

Heutige und zukünftige Auswirkungen des Klimawandels und Meeresspiegelanstiegs auf der Insel Pari

Jochen Hinkel^{1,2*}, Geronimo Gussmann¹, Daniel Lincke¹ und Vanessa Völz^{1,2}

25. Januar 2023

1 Global Climate Forum e.V. (GCF), Adaptation and Social Learning, Neue Promenade 6, 10178 Berlin

2 Humboldt Universität zu Berlin, Arbeitsgruppe Ressourcenökonomik, Albrecht Daniel Thaer-Institut, Invalidenstraße 42, 10115 Berlin.

* E-Mail: hinkel@globalclimateforum.org

Diese Veröffentlichung ist eine wissenschaftliche Studie des Global Climate Forums (GCF). Ihr Ziel ist es, Entscheidungsprozesse im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels und des Meeresspiegelanstiegs für kleine Inseln und speziell für die Insel Pari in Indonesien zu unterstützen. Die Studie wurde vom Hilfswerk der Evangelisch-reformierten Kirche Schweiz (HEKS) in Auftrag gegeben. Die darin dargelegten wissenschaftlichen Ergebnisse geben nicht den Standpunkt von HEKS wieder, sondern allein den Standpunkt der Autoren und Autorinnen, die diese Studie aus objektiver Perspektive und nach bestem Wissen und Gewissen verfasst haben.

Kontakt Information

Priv.-Doz. Dr. habil. Jochen Hinkel
Global Climate Forum e.V. (GCF)
Adaptation and Social Learning
Neue Promenade 6
10178 Berlin
Email: hinkel@globalclimateforum.org
Web: <https://globalclimateforum.org/>

doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7566046>

© Global Climate Forum 2023

Sofern nicht anders angegeben, ist die Weiterverwendung dieses Dokuments unter der Creative Commons Attribution 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0; <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) gestattet. Dies bedeutet, dass die Wiederverwendung unter der Voraussetzung erlaubt ist, dass ein entsprechender Hinweis gegeben wird und alle Änderungen angegeben werden. Für die Verwendung oder Reproduktion von Abbildungen, Fotos oder anderem Material, das nicht Eigentum der Autoren und Autorinnen sind, muss die Erlaubnis direkt bei den Urheberrechtsinhabern eingeholt werden.

Bitte wie folgt zitieren:

Hinkel J., Gussmann, G., Lincke, D. und Völz V., 2023. Heutige und zukünftige Auswirkungen des Klimawandels und Meeresspiegelanstiegs auf der Insel Pari. GCF Working Paper 1/2023, Global Climate Forum, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7566046>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Anstieg des mittleren Meeresspiegels.....	6
2.1. Globaler mittlerer Meeresspiegel.....	6
2.1.1. Ursachen.....	6
2.1.2. Anstieg bis heute.....	7
2.1.3. Zukünftiger Anstieg.....	7
2.2. Relativer mittlerer Meeresspiegelanstieg bei Pari.....	8
2.2.1. Ursachen.....	8
2.2.2. Anstieg des Meeresspiegels bei Pari bis heute.....	9
2.2.2.1. Klimawandelbedingter Anstieg des mittleren Meeresspiegels.....	9
2.2.2.2. Klimawandel-unabhängige Ozean-Variabilität.....	10
2.2.2.3. Klimawandel-unabhängige vertikale Landbewegung.....	10
2.2.3. Zukünftiger Anstieg.....	11
3. Extremer Meeresspiegel in Pari.....	13
3.1. Extreme Wasserstände.....	13
3.1.1. Ursachen.....	13
3.1.2. Heutige extreme Wasserstände.....	13
3.1.3. Zukünftige extreme Wasserstände.....	14
3.2. Wellen bei Pari.....	15
3.2.1. Ursachen.....	15
3.2.2. Heutige Wellen.....	15
3.2.3. Zukünftige Wellen.....	16
4. Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf Pari.....	16
4.1. Überflutungen.....	16
4.1.1. Ursachen.....	16
4.1.2. Heutige Exposition Pari.....	17
4.1.3. Heutige Auswirkungen.....	18
4.1.4. Ursachen der Überflutungen vom 4./5. Dezembers 2021.....	19
4.1.5. Zukünftige Überflutungen.....	20
4.1.6. Anpassungsmaßnahmen und Kosten.....	21
4.2. Verstärkte Küstenerosion.....	23
4.2.1 Ursachen.....	23
4.2.2. Heutige Auswirkungen.....	24
4.2.3. Zukünftige Auswirkungen.....	25
4.2.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten.....	25
4.3. Verlust von Korallen.....	25
4.3.1. Ursachen.....	25
4.3.2. Heutige Auswirkungen.....	26
4.3.3. Zukünftige Auswirkungen.....	26
4.3.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten.....	26
4.4. Verlust von Mangroven.....	27
4.4.1. Ursachen.....	27
4.4.2. Heutige Auswirkungen.....	27
4.4.3. Zukünftige Auswirkungen.....	27
4.4.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten.....	27
4.5. Versalzung und Verlust von Grundwasser.....	28
4.5.1. Ursachen.....	28
4.5.2. Heutige Auswirkungen.....	28
4.5.3. Zukünftige Auswirkungen.....	28

4.5.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten.....	28
4.6. Versalzung von Böden.....	29
4.6.1. Ursachen.....	29
4.6.2. Heutige Auswirkungen.....	29
4.6.3. Zukünftige Auswirkungen.....	29
4.6.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten.....	29
5. Zusammenfassung.....	30
5.1. Kausalzusammenhänge zwischen dem menschengemachten Klimawandel und den Flutschäden auf der Insel Pari.....	30
5.1.1. Heutige Schäden.....	30
5.1.2. Zukünftige Schäden.....	30
5.2. Quantitative Zuordnung heutiger und zukünftiger Flutschäden.....	31
5.2.1. Heutige Schäden.....	31
5.2.2. Zukünftige Schäden.....	32
6. Danksagungen.....	34
7. Literatur.....	35

1. Einleitung

Diese Studie untersucht die heutigen und zukünftigen Auswirkungen der menschengemachten (anthropogenen) Klimaerwärmung auf die indonesische Insel Pari. Der Schwerpunkt liegt auf dem Meeresspiegelanstieg, weil dieser für einen Großteil der klimawandelbedingten Auswirkungen auf niedrig gelegene Korallenriffinseln (wie Pari) verantwortlich ist. Insbesondere verfolgt die Studie zwei Ziele:

1. Festzustellen, ob es eine überwiegende Wahrscheinlichkeit gibt, dass die menschengemachte Klimaerwärmung und der damit verbundene Meeresspiegelanstieg zu klimawandelbedingten Auswirkungen und Schäden geführt haben, und in der Zukunft zu Schäden führen werden.
2. Zu quantifizieren, welchen ursächlichen Anteil die menschengemachte Klimaerwärmung an historischen Flutschäden und zukünftig zu erwartenden Flutschäden hat.

Wir gehen dabei wie folgt vor: Wir beginnen die Beschreibung aller relevanten Ursachen und Kausalketten mit einer Zusammenfassung des Wissensstands aus den letzten Berichten des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC, ugs. Weltklimarat). Die IPCC-Berichte werten in regelmäßigen Abständen die gesamte wissenschaftliche Literatur zur Klimaerwärmung und dessen Auswirkungen aus, und bilden somit die weltweit verlässlichste Quelle für die Beurteilung von kausalen Zusammenhängen. Die IPCC-Erkenntnisse ergänzen wir mit Ergebnissen und Analysen der wissenschaftlichen Literatur und Daten, die speziell für die Insel Pari relevant sind.

Für die Einordnung des wissenschaftlichen Verständnisses von kausalen Zusammenhängen nutzen wir die dafür vom IPCC kalibrierte Sprache (Mastrandrea et al., 2011). Diese Sprache drückt das Vertrauen in eine Aussage in fünf Stufen aus: sehr niedriges Vertrauen, niedriges Vertrauen, mittleres Vertrauen, hohes Vertrauen und sehr hohes Vertrauen. Wenn sich das Vertrauen in Aussagen quantitativ mit Wahrscheinlichkeiten belegen läßt, benutzen wir die ebenfalls vom IPCC festgelegten Begriffe wahrscheinlich für eine Wahrscheinlichkeit $\geq 66\%$, sehr wahrscheinlich für eine Wahrscheinlichkeit $\geq 90\%$ und so gut wie sicher für eine Wahrscheinlichkeit $\geq 99\%$. Diese Begriffe sind im Folgenden jeweils unterstrichen.

Abbildung 1 fasst die Ursachen, Kausalketten und Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Insel Pari zusammen, welche in den Kapiteln 2-4 dann detailliert untersucht werden. Zum Beispiel können höhere Überflutungen durch den Verlust von Korallen und Mangroven oder durch den Anstieg extremer Meeresspiegel und Wellen verursacht werden. Der Verlust von Korallen und anderen Ökosystemen kann entweder klimawandelbedingt erfolgen (Ozeanerwärmung und -versauerung) oder durch lokale menschliche Aktivitäten, wie zum Beispiel Bauaktivitäten oder Überfischung. Der Anstieg extremer Meeresspiegel und Wellen kann ebenso vom Klimawandel (Veränderung von Wind- und Druckfeldern, Anstieg des mittleren Meeresspiegels) und durch die natürliche dekadische Variabilität oder vertikale Landbewegungen getrieben werden, wobei Letzteres auch anthropogen getrieben sein kann (Nicholls et al., 2021).

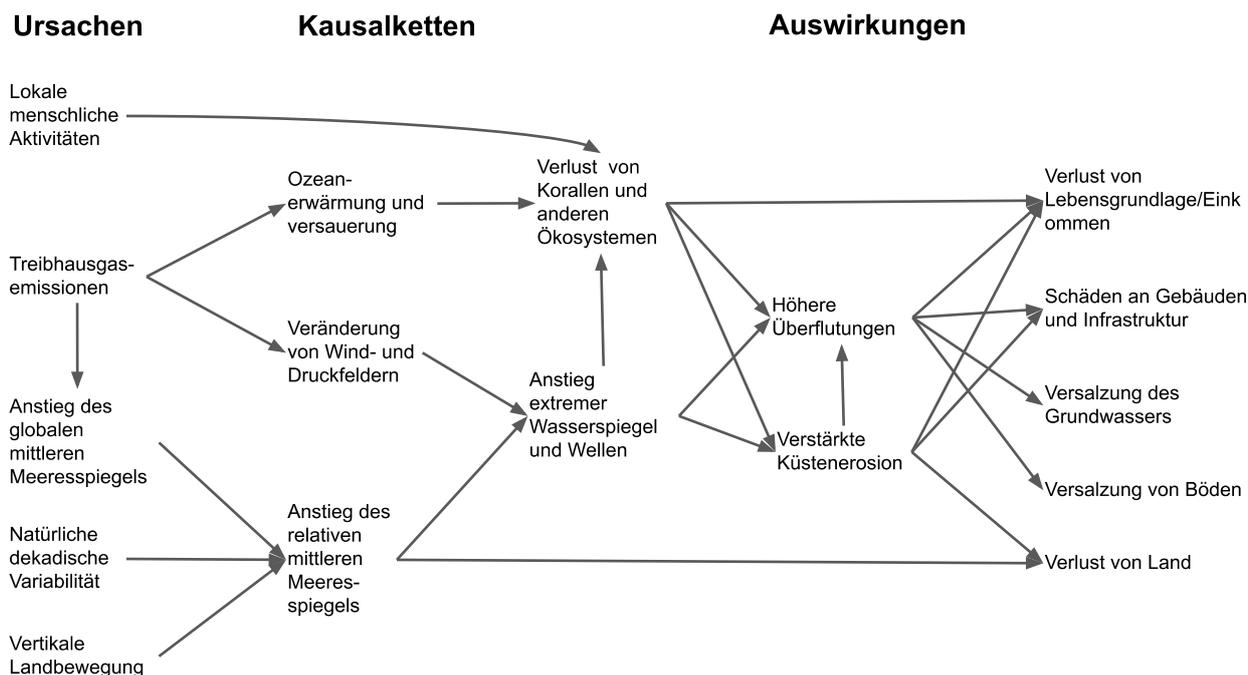


Abbildung 1: Ursachen, Kausalketten und Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs und Klimawandels auf die Insel Pari.

In den folgenden Kapiteln geht die Studie wie folgt vor: Kapitel 2 beschreibt die wissenschaftlichen Grundlagen zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels und Kapitel 3 beschreibt die wissenschaftlichen Grundlagen für den Anstieg extremer Meeresspiegel wie Gezeiten, Sturmfluten und Wellen. Kapitel 4 beschreibt dann die heutigen und zukünftigen Auswirkungen des Anstiegs mittlerer und extremer Meeresspiegel auf die Insel Pari sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen. Schließlich fasst Kapitel 5 das in den vorherigen Kapiteln präsentierte zusammen, um die oben beschriebenen Ziele dieser Studie zu erreichen.

2. Anstieg des mittleren Meeresspiegels

2.1. Globaler mittlerer Meeresspiegel

2.1.1. Ursachen

Bis heute (2010 - 2019) hat seit der Industrialisierung (1850 - 1900) eine anthropogene (menschengemachte) globale Erderwärmung von 1,07°C (wahrscheinlicher Bereich 0,8°C - 1,3°C) stattgefunden. Diese Erderwärmung ist auf einen starken Anstieg der Treibhausgasemissionen zurückzuführen, der seit der Industrialisierung durch Verbrennung von fossilen Energien, industrieller Produktion und veränderter Landnutzung stattgefunden hat (IPCC AR6: Arias et al., 2021).

Die menschengemachte Erderwärmung führt so gut wie sicher zu einem Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels durch das Abschmelzen von Landeis auf Grönland, Antarktis und Gletschern, Veränderungen der Dichte von Meerwasser und Veränderungen der Wasserspeicherung an Land (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). Die Dichte des Meerwassers wird hauptsächlich durch Temperaturveränderungen bestimmt, so reduziert eine steigende Wassertemperatur die Wasserdichte. Eine geringere Wasserdichte führt zu einem größeren Volumen des Meerwassers und damit zu einer Ausdehnung (thermische Expansion), was zum Meeresspiegelanstieg führt. Eine Veränderung von Wasserspeicherung an Land beinhaltet Veränderungen in Oberflächengewässern, Bodenfeuchtigkeit, Grundwasserspeicher und Schnee (Landeis auf Grönland, der Antarktis und Gletschern hier ausgenommen) (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Im letzten Jahrhundert (1901-2018) war hauptsächlich das

Abschmelzen der Gletscher (41%) und die thermische Expansion (38%) für den steigenden Meeresspiegel verantwortlich. Seit kurzem (2006-2018) dominiert jedoch das Abschmelzen von Landeismassen, also Gletschern und Eisschilden, den globalen Meeresspiegelanstieg (hohes Vertrauen). Grönland und die Antarktis sind die größten Reservoirs mit gefrorenem Frischwasser, weshalb das Abschmelzen ebendieser einen deutlich höheren Meeresspiegelanstieg erzeugen wird als alle anderen Ursachen (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021).

2.1.2. Anstieg bis heute

Der sechste Sachstandsbericht des IPCC stellt fest, dass der mittlere globale Meeresspiegel zwischen 1901 und 2018 um 20 cm angestiegen ist (hohes Vertrauen) (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Dabei ist die Anstiegsrate von 1,3 mm/Jahr von 1901 bis 1971, über 1,9 mm/Jahr von 1971 bis 2006 und 3,3 mm/Jahr von 1993 bis 2018, auf 3,7 mm/Jahr von 2006 bis 2018 gestiegen (hohes Vertrauen). Ferner kommt der Sachstandsbericht zu dem Schluss, dass der menschengemachte Klimawandel seit mindestens 1971 die Hauptursache für den Meeresspiegelanstieg ist (sehr wahrscheinlich) (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021).

2.1.3. Zukünftiger Anstieg

Der sechste Sachstandsbericht des IPCC prognostiziert mit mittlerem Vertrauen, dass der globale mittlere Meeresspiegel unter einem Szenario ungeminderter Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) bis 2100 wahrscheinlich um 0,63 bis 1,01 m ansteigen wird, und unter einem Szenario mit niedrigen Emissionen (SSP1-1.9) wahrscheinlich um 0,28 bis 0,55 m, jeweils im Vergleich zu 1995-2014 (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Die Prognosen basieren auf verschiedenen sozioökonomischen Szenarien, welche zukünftige Treibhausgasemissionen und die damit einhergehende Erderwärmung abschätzen. Mittels physikalischer Modelle, unter anderem für Landeismassen der Antarktis, Grönland und Gletscher, wird berechnet, zu welchem Meeresspiegelanstieg eine prognostizierte Erderwärmung führt. Diese Prognosen des globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs sind für vier verschiedene sozioökonomische Szenarien in Abbildung 2 dargestellt. Ein sozioökonomisches Szenario, beispielsweise “SSP5-8.5”, setzt sich dabei aus einem sozioökonomischen Pfad “SSP5” und einem repräsentativem Konzentrationspfad (engl.: representative concentration pathways, RCP) “8.5” zusammen. Der sozioökonomische Pfad beschreibt die zukünftige Entwicklung von sozioökonomischen Faktoren wie Bevölkerung, Wirtschaft und der internationalen Staatengemeinschaft und der repräsentative Konzentrationspfad (RCP) die zukünftigen Treibhausgasemissionen, wobei letzterer durch das sozioökonomische Szenario bedingt wird.

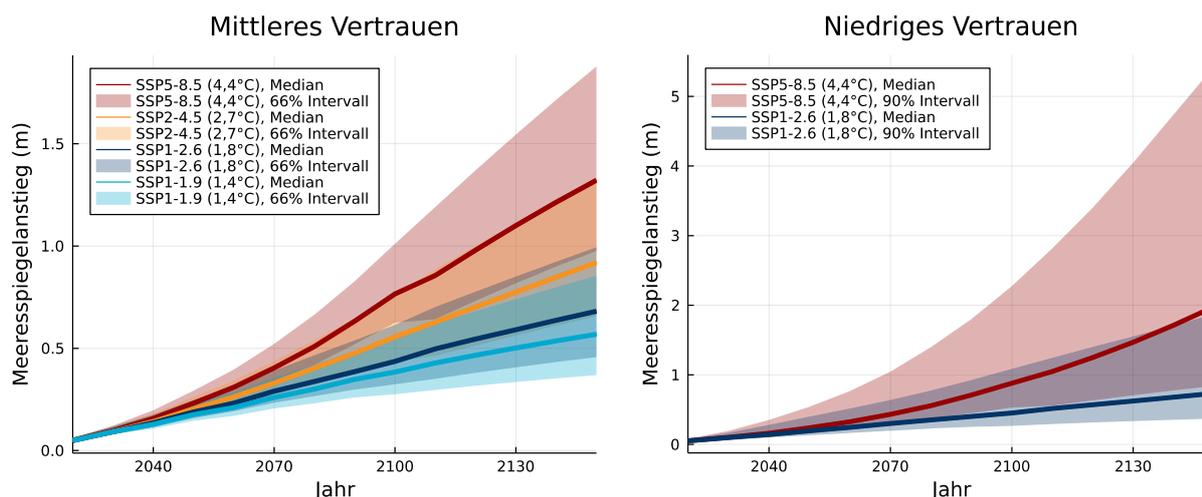


Abbildung 2: Prognosen des globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs des sechsten IPCC Sachstandsberichts (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021) nach mittlerem (links) und niedrigem Vertrauen (rechts) für vier verschiedene sozioökonomische Szenarien (SSP), die durch Treibhausgasemissionen die zukünftige Erderwärmung beeinflussen. Für jedes Szenario ist der im Mittel zu erwartende Meeresspiegelanstieg (Median) und die wahrscheinliche (66% Wahrscheinlichkeit) bzw. sehr wahrscheinliche (90% Wahrscheinlichkeit) Bandbreite angegeben. Die Temperaturangaben in der Legende beziehen sich auf die Erderwärmung im Jahr 2100.

Der sechste Sachstandsbericht des IPCC prognostiziert auch, dass im Falle eines raschen Abschmelzens der Eisschilde Grönlands und der Antarktis der Meeresspiegel wesentlich höher ausfallen könnte (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Um wie viel genau ist schwer zu sagen, da einige der Prozesse, die zu einem schnellen Abschmelzen der Eisschilde führen können, bisher schlecht verstanden sind und/oder in modernen Klima-, Ozean- und Landeismodellen sogar fehlen (Church et al., 2013; Fox-Kemper et al., 2021; Meehl et al., 2007; Oppenheimer et al., 2019). Ein vom IPCC AR6 generiertes Szenario, in welchem die unvollständigen Modellrechnungen zum Abschmelzen der Eisschilde durch eine zur Verfügung stehenden Befragung von Eisschildmodellierexperten (Bamber et al., 2019) ersetzt wurde, schätzt ab, dass es eine 5% Wahrscheinlichkeit gibt, dass der Meeresspiegel unter dem Szenario SSP1-2.6 1,1 m in 2100 überschreitet und unter dem Szenario SPP5-8.5 sogar 2,3 m (Abbildung 2, rechte Seite).

Der mittlere Meeresspiegel wird aufgrund des menschengemachten Klimawandels für die nächsten Jahrhunderte bis Jahrtausende weiter ansteigen (hohes Vertrauen) (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Der Grund dafür ist, dass das Abschmelzen der Gletscher und Polkappen um Jahrhunderte bis Jahrtausende verzögert auf Treibhausgasemissionen und Erderwärmung reagiert. So werden zum Beispiel die Emissionen, die in der Vergangenheit bis zum Jahr 2016 ausgestoßen wurden, unabwendbar zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von 0,7 bis 1,1 m (wahrscheinliche Bandbreite) bis 2300 führen (Nauels et al., 2019). Schaut man weiter in die Zukunft, ergeben sich selbst für den Fall, dass die Weltgemeinschaft die globale Erwärmung auf 1,5°C beschränken kann, eine wahrscheinliche Bandbreite von 2-3 m Meeresspiegelanstieg in 2.000 Jahren und 6-7 m in 10.000 Jahren (Tabelle 1) (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Im Fall einer Erwärmung um 3,0°C ist eine wahrscheinliche Bandbreite von 10 bis 24 m Meeresspiegelanstieg in den nächsten 10.000 Jahren und im Fall einer Erwärmung von 5,0°C eine wahrscheinliche Bandbreite von 28 bis 37 m Meeresspiegelanstieg zu erwarten.

Zeitpunkt	1,5°C	2,0°C	3,0°C	4,0°C	5,0°C
2050	0,16 bis 0,24 m	0,17 bis 0,26 m	0,18 bis 0,27 m	0,19 bis 0,28 m	0,22 bis 0,31 m
2100	0,34 bis 0,59 m	0,40 bis 0,69 m	0,50 bis 0,81 m	0,58 bis 0,92 m	0,69 bis 1,05 m
In 2.000 Jahren	2 bis 3 m	2 bis 6 m	4 bis 10 m	12 bis 16 m	19 bis 22 m
In 10.000 Jahren	6 bis 7 m	8 bis 13 m	10 bis 24 m	19 bis 33 m	28 bis 37 m

Tabelle 1: Wahrscheinliche Bandbreite des langfristigen Anstiegs des globalen mittleren Meeresspiegels in 2.000 bzw. 10.000 Jahren relativ zu 1995-2014 unter fünf Erwärmungsszenarien (Änderung der globalen Mitteltemperatur in den Jahren 2081-2100 im Vergleich zu 1850-1900) (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021).

2.2. Relativer mittlerer Meeresspiegelanstieg bei Paris

2.2.1. Ursachen

Der relative mittlere Meeresspiegelanstieg der an einem bestimmten Ort (hier Paris) auftritt, unterscheidet sich von dem globalen mittleren Meeresspiegelanstieg aufgrund von drei Ursachen, welche voneinander abgegrenzt werden müssen, um den anthropogenen Anteil an dem lokal auftretenden Meeresspiegelanstieg zu identifizieren.

1. Der **klimawandelbedingte Anstieg des mittleren Meeresspiegels** fällt unterschiedlich für verschiedene Weltregionen aus. Die Gründe sind die regional unterschiedlichen Raten der thermostatischen Expansion, klimawandelbedingter Veränderung der Ozeanzirkulation und damit verbunden regionalen Änderung der Wasserspiegel (dynamische Topographie) und der klimawandelbedingten Umverteilung von Wassermassen innerhalb der Kryosphäre aufgrund des Abschmelzens der Eisschilde (Cazenave and Moreira, 2022; Fox-Kemper et al., 2021).
2. Die **Klimawandel-unabhängige Ozean-Variabilität** sorgt für regionale Schwankungen des Meeresspiegels auf Zeitskalen von mehreren Jahren bis Dekaden. Diese natürlichen Schwankungen

verändern den langjährigen mittleren Meeresspiegel nicht, sondern sind nur temporäre Abweichungen vom langjährigen mittleren Meeresspiegel.

3. **Klimawandel-unabhängige vertikale Landbewegung** (Senkung oder Hebung der Geländehöhe), welche wiederum vor allem drei verschiedene Ursachen haben kann (Shirzaei et al., 2020):
 - a. Die **glaziale isostatische Anpassung (GIA)** bezeichnet die immer noch stattfindende Landhebung oder Landsenkung aufgrund der Anpassung des Erdkörpers an die Umverteilung von Eis- und Wassermassen nach der letzten Eiszeit.
 - b. Die **Sedimentverdichtung** ist bei geologisch jungen Sedimentablagerungen, wie sie vor allem in Flussmündungen zu finden sind, ein weit verbreitetes Phänomen, welches zu Landsenkung und damit zu einem Anstieg des relativen Meeresspiegels führt. Dieser Prozess kann durch menschliche Aktivitäten wie Bebauung, Entwässerung von Böden, Trockenlegung von Feuchtgebieten und vor allem durch Entnahme von Grundwasser, Öl und Gas erheblich verstärkt werden (Shirzaei et al., 2020; Syvitski et al., 2009).
 - c. Die **Tektonik** bezeichnet Landhebungen und -senkung durch Bewegungen der Erdkruste, wie sie z.B. bei Erdbeben auftreten können.

2.2.2. Anstieg des Meeresspiegels bei Pari bis heute

2.2.2.1. Klimawandelbedingter Anstieg des mittleren Meeresspiegels

Es gibt keine langjährigen Messungen des Meeresspiegelanstiegs auf Pari seit dem Beginn der Industrialisierung, aber Modellrechnungen zeigen, dass der Meeresspiegel in der Region um Pari von 1861 bis 2005 wahrscheinlich um 11 bis 21 cm durch den anthropogenen Klimawandel angestiegen ist (Mengel et al., 2016). Im Rahmen des ISIMIP Projektes wurden regionalisierte Meeresspiegelanstiegs-Modellierungen für den Zeitraum 1861-2005 erstellt. Die Daten für den Pari am nächsten liegenden Gridpunkt (S5° 75', O106° 75') sind in Tabelle 2 aufgelistet. Diese Modellrechnungen umfassen nur den Meeresspiegelanstieg, der auf den menschengemachten Klimawandel (durch Treibhausgasemissionen) zurückzuführen ist.

Modell	Median und <u>wahrscheinliche</u> Bandbreite (66% Intervall) des mittleren Meeresspiegelanstiegs (m)
GFDL-ESM2M	0,14 (0,13 - 0,15)
MIROC5	0,13 (0,11 - 0,15)
IPSL-CM5A-LR	0,18 (0,17 - 0,20)
HadGEM2-ES	0,19 (0,18 - 0,21)

Tabelle 2: Klimawandel-induzierter Anstieg des mittleren Meeresspiegels in 2005, relativ zu 1861, basierend auf Modellrechnungen aus dem ISIMIP Archiv (Mengel et al., 2016). Die Daten sind verfügbar unter: <https://www.isimip.org/gettingstarted/availability-input-data-isimip2b/>.

Globale satellitengestützte Messungen des mittleren regionalen Meeresspiegels, die seit 1993 verfügbar sind, zeigen, dass in der Java See um Pari der mittlere Meeresspiegel mit rund 4,4 mm pro Jahr (Abbildung 3) schneller ansteigt als der globale Mittelwert von 3,3 mm pro Jahr (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Dies zeigen globale und auch regionale Auswertungen der Satellitendaten über unterschiedliche Zeiträume (Fenoglio-Marc et al., 2012; Hamlington et al., 2020a, 2020b), sowie unsere unten präsentierte eigene Auswertung von Satellitenmessungen im Zeitraum von 1993 bis 2022 an einem etwa 35 km südwestlich von Pari liegenden Kreuzungspunkt der Satellitenbahnen (Abbildung 3). Dort lag der Meeresspiegelanstieg im Schnitt bei 4,4 mm/Jahr, wobei der globale mittlere Anstieg des Meeresspiegels in dem Zeitraum von 1993 bis 2018 bei 3,3 mm/Jahr lag (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Kreuzungspunkte sind aufgrund der höheren Datendichte gut geeignet, um die Änderung des Meeresspiegels zu erfassen.

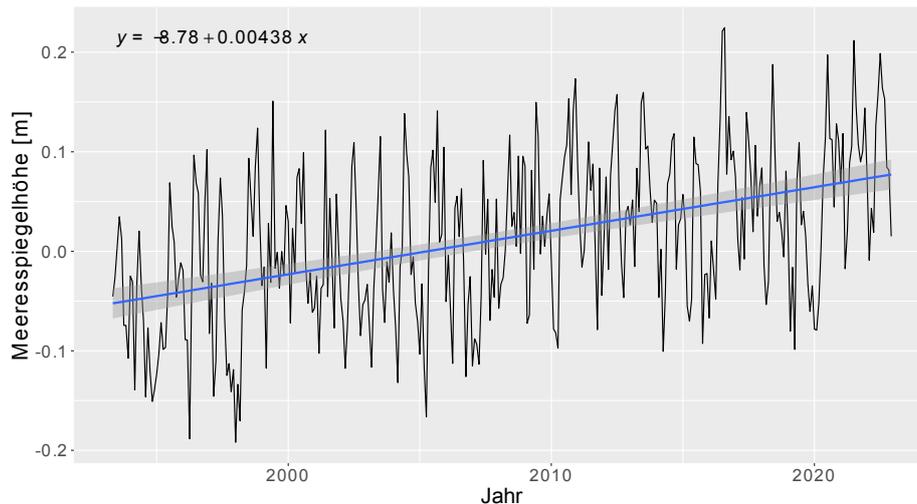


Abbildung 3: Messungen des mittleren Meeresspiegels durch Satellitenaltimetrie von 1993 bis 2021 am Kreuzungspunkt Topex/JASON1/2/3,S6FM ($S5^{\circ} 55' 51,4092''$, $O106^{\circ} 18' 5,9976''$). Für unsere Berechnungen haben wir folgende 6 Satellitenmissionen benutzt: Topex in einer neueren Revision (TOPR), Jason-1 Rev.E (JASE), Jason-2 Rev.D (J2_D), Jason-3 Rev-F (J3_F) und Sentinel-6 Ref. 006 und thw.007 (S6AF).

2.2.2.2. Klimawandel-unabhängige Ozean-Variabilität

Der mittlere Meeresspiegel um Pari unterliegt natürlichen (d.h., vom anthropogenen Klimawandel unabhängig) Schwankungen um bis zu +/- 20 cm (Abbildung 3). Diese für Indonesien charakteristischen Schwankungen lassen sich zum überwiegenden Teil auf die El-Niño-Südliche Oszillation (ENSO) zurückführen (Fenoglio-Marc et al., 2012), welche eine regelmäßige periodische (2-7 jährige) Schwankung der Winde und der Meeresoberflächentemperatur über dem tropischen östlichen Pazifik ist, die das Klima und den Meeresspiegel in weiten Teilen der Tropen und Subtropen beeinflusst.

2.2.2.3. Klimawandel-unabhängige vertikale Landbewegung

Von den drei Prozessen, die die vertikale Landbewegung verursachen (Kapitel 2.2.1), spielt in Pari grundsätzlich nur die Tektonik eine Rolle. Die glaziale isostatische Anpassung spielt grundsätzlich keine Rolle für Pari, da dieser Prozess nur in der Nähe von Regionen, die während der Eiszeiten mit Inlandeis bedeckt waren, relevant ist. Die Sedimentverdichtung spielt ebenfalls für Pari keine oder nur eine sehr kleine Rolle. Zum einen ist die Sedimentdecke von Pari nur 0,5 bis 1,0 m mächtig und darunter liegt ein Korallenkalkstein (Utomo et al., 2017). Die Sedimentkompaktion spielt bei Korallensanden ohnehin nur eine kleine Rolle, da diese wenig komprimierbar sind (Shirzaei et al., 2020). Tektonische Beiträge zu Landhebung oder Senkung sind grundsätzlich bei Pari denkbar, da Pari 300 km nördlich des Sundagraben (Java Grabens) liegt, wo sich die Australische Platte unter die Eurasische Platte schiebt (Fenoglio-Marc et al., 2012).

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Beitrag der vertikalen Landbewegung zum relativen Meeresspiegelanstieg auf Pari gering ist, auch wenn dies nicht abschließend geklärt werden kann. Es gibt für Pari keine lokalen Messungen der vertikalen Landbewegung und auch keine geeigneten Vor-Ort Messungen des relativen Meeresspiegelanstiegs. Zwar wurde in Pari vom 30. Mai 1987 bis zum 21. Januar 1990, mit Unterbrechungen, ein Messpegel betrieben ($S5^{\circ} 5'$, $O106^{\circ} 37'$), aber diese Zeitspanne ist zu kurz, um auf einen Trend schließen zu können. Ferner war der Pegel nicht mit einem globalen Navigationssatellitensystem (englisch: global navigation satellite system; GNSS) verbunden und da es noch keine Satellitenaltimetrie zu diesem Zeitpunkt gab, ist es nicht möglich, einen eventuellen Trend des Meeresspiegelanstiegs heraus zu rechnen, da man nicht unterscheiden kann, ob der relative Meeresspiegelanstieg durch eine Landsenkung oder Anstieg des Meeresspiegels zustande kam. Die aktuellsten verfügbaren globalen Daten von Oelsmann et al. (2022) weisen jedoch darauf hin, dass der

derzeitige Meeresspiegelanstieg nur durch eine geringe Landsenkung von rund $-0,2$ mm/Jahr für die Periode 1995-2020 beeinflusst wird (Abbildung 4). Allerdings ist zu beachten, dass die Unsicherheit dieser Daten relativ groß ist und der Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 68% zwischen $-0,5$ mm/Jahr Landsenkung bis $+0,1$ mm/Jahr liegt. In jedem Fall sind diese Raten noch um einen Faktor 10 kleiner als die Rate des menschengemachten Meeresspiegelanstiegs. Ferner ist zu betonen, dass diese Werte im Vergleich zu einigen Orten am Festland sehr gering sind, da beispielsweise in Jakarta eine (lokal begrenzte) Landabsenkung von 60-100 mm/Jahr gemessen wird (Abidin et al., 2011; Nicholls et al., 2021).

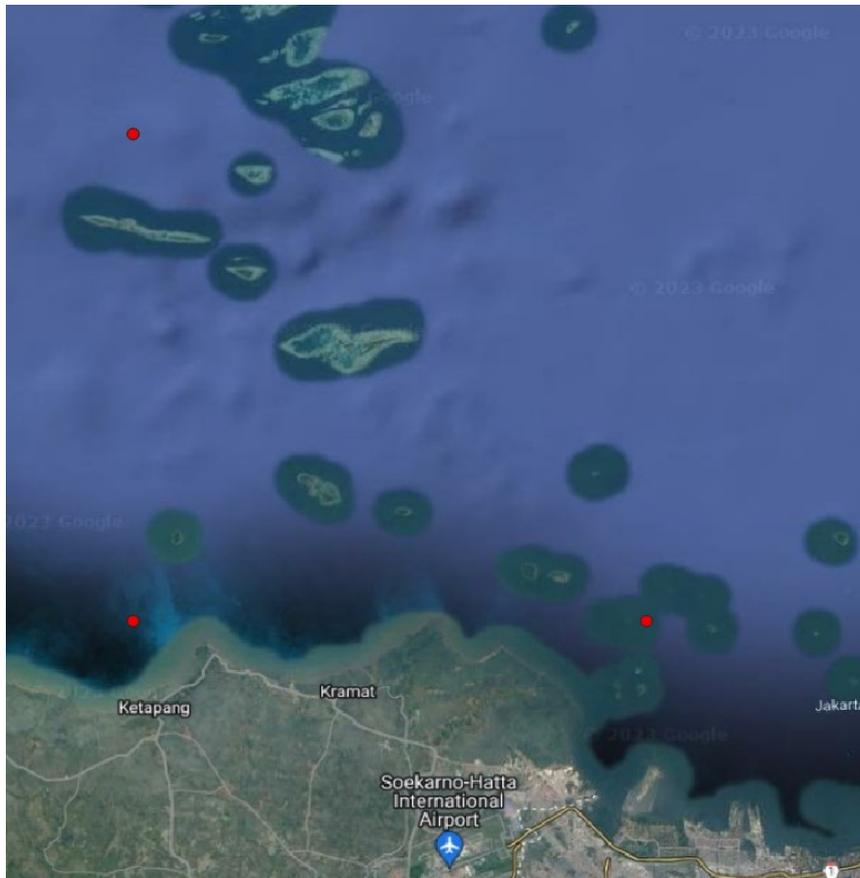


Abbildung 4: Drei Datenpunkte des globalen Datensatzes von Oelsman et al., 2022, die die vertikale Landbewegung um Pari herum angeben. Die drei Punkte haben eine Landabsenkung von $-0,1$ mm/Jahr, $-0,3$ mm/Jahr und $-0,2$ mm/Jahr. Als Mittelwert ergibt sich $-0,2$ mm/Jahr. Quelle für die unterliegenden Satellitenbilder: Google Earth, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO © 2023 Maxar Technologies.

2.2.3. Zukünftiger Anstieg

Der sechste Sachstandsbericht des IPCC prognostiziert, dass der lokale relative Meeresspiegelanstieg nahe der Insel Pari im zu erwartendem Mittel dem globalen Anstieg gleicht, jedoch im Vergleich zum globalen Meeresspiegelanstieg größere Unsicherheit aufweist (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Tabelle 3 vergleicht den lokal für Pari prognostizierten Meeresspiegelanstieg mit dem global prognostizierten Meeresspiegelanstieg für das Jahr 2050 und 2100 in verschiedenen sozioökonomischen Szenarien. Während die im Median zu erwartenden Meeresspiegelanstiege fast identisch sind, sind die wahrscheinlichen Bereiche (66% Intervalle) deutlich breiter für Pari. Unabhängig von sozioökonomischen Szenarien liegen im Jahr 2100 die unteren 66% Intervallgrenzen des wahrscheinlichen Bereichs für Pari 20 cm niedriger als die globalen Untergrenzen, und die oberen Intervallgrenzen für Pari 20 cm höher als die globalen Obergrenzen. Die IPCC Prognosen des Meeresspiegelanstiegs für Pari (Abbildung 5) sind also unsicherer als globale Prognosen (Abbildung 2) und können sowohl niedriger als auch höher als der globale Meeresspiegel ausfallen. Die Hauptgründe für die größere Unsicherheit des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs um Pari, im Vergleich zum globalen Mittel, sind Unsicherheiten in der klimawandelbedingten Umverteilung von Masse innerhalb der Kryosphäre und des Ozeans (siehe Kapitel

2.2.1), als auch die schwer zu prognostizierende vertikale Landbewegung, welche nicht durch den Klimawandel beeinflusst wird.

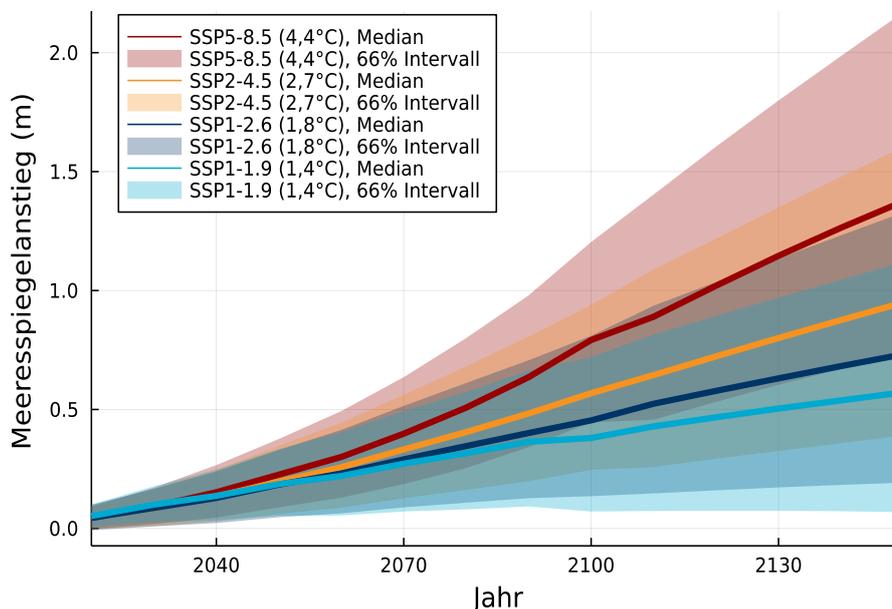


Abbildung 5: Prognosen des lokalen mittleren Meeresspiegelanstiegs nahe Pari ($S6^{\circ} 0'$, $O107^{\circ} 0'$) vom sechsten IPCC Sachstandsbericht (Fox-Kemper et al., 2021) mit mittlerem Vertrauen für vier verschiedene sozioökonomische Szenarien (SSP), die durch Treibhausgasemissionen die zukünftige Erderwärmung beeinflussen (Legende gibt Erderwärmung im Jahr 2100 an). Für jedes Szenario ist der im Mittel zu erwartende Meeresspiegelanstieg (Median) und eine wahrscheinliche Bandbreite (66% Intervall) angegeben.

Sozioökonomisches Szenario	Erderwärmung im Jahr 2100	Globaler Meeresspiegelanstieg (m) Median (66% <u>wahrscheinlicher</u> Bereich)		Lokaler Meeresspiegelanstieg Pari (m) Median (66% <u>wahrscheinlicher</u> Bereich)	
		2050	2100	2050	2100
SSP1-1.9	1,4°C	0,18 (0,15 - 0,23)	0,38 (0,28 - 0,55)	0,19 (0,05 - 0,33)	0,38 (0,07 - 0,72)
SSP1-2.6	1,8°C	0,19 (0,16 - 0,25)	0,44 (0,32 - 0,62)	0,18¹ (0,05 - 0,33)	0,45 (0,14 - 0,81)
SSP2-4.5	2,7°C	0,20 (0,17 - 0,26)	0,56 (0,44 - 0,76)	0,20 (0,06 - 0,35)	0,57 (0,25 - 0,94)
SSP5-8.5	4,4°C	0,23 (0,20 - 0,29)	0,77 (0,63 - 1,01)	0,23 (0,09 - 0,38)	0,79 (0,45 - 1,20)

Tabelle 3: Vergleich von globalem und lokalem Meeresspiegelanstieg ($S6^{\circ} 0'$, $O107^{\circ} 0'$) nach sechstem Sachstandsbericht des IPCC (Fox-Kemper et al., 2021) für das Jahr 2050 und 2100 mit mittlerem Vertrauen. Es sind jeweils der zu erwartende Median und in Klammern die wahrscheinliche Bandbreite (66% Intervall) des Meeresspiegelanstiegs für vier verschiedene sozioökonomische Szenarien angegeben.

1 Der Median des lokalen Meeresspiegelanstiegs für Pari liegt im Jahr 2050 etwas niedriger im Szenario SSP1-2.6 als im Szenario SSP1-1.9 aufgrund der Ozean-Variabilität.

3. Extremer Meeresspiegel in Pari

3.1. Extreme Wasserstände

3.1.1. Ursachen

Extreme Wasserstände setzen sich aus der Überlagerung des mittleren Meeresspiegels, der Gezeiten und der Sturmflutwasserstände zusammen. Sturmflutwasserstände sind durch starken Wind und atmosphärischem Unterdruck verursachte Anstiege des Meeresspiegels. Um extreme Wasserstände zu messen, werden in der Regel lokale Messpegel verwendet, welche den Meeresspiegel stündlich oder in noch kürzeren Zeitabschnitten aufzeichnen. Da extreme Wasserstände nur für begrenzte Zeit (einige Stunden bis 1-2 Tage) auftreten, lassen sie sich nicht per Satellit messen, da Satelliten nur alle paar Tage über einen lokalen Standort fliegen. Falls keine Pegeldata von einem Ort zur Verfügung stehen, können auch sogenannte Reanalysen von extremen Wasserständen genutzt werden, welche extreme Wasserstände mittels gekoppelten Sturmflut- und Gezeitenmodellen berechnen.

3.1.2. Heutige extreme Wasserstände

Die für Pari vorliegenden lokalen Pegelmessungen sind zu kurz, um eine Statistik der extremen Wasserstände zu erstellen, aber sie zeigen, dass ein mittlerer Tidenhub im Jahr 1989 bei etwa 70 cm lag, mit Schwankungen von etwa 40 cm bis 100 cm. In Pari wurde vom 30. Mai 1987 bis 21. Januar 1990 ein Messpegel betrieben, dessen stündliche Messdaten vom Sea Level Center der Universität Hawaii (UHSLC) zur Verfügung gestellt werden (Abbildung 6).

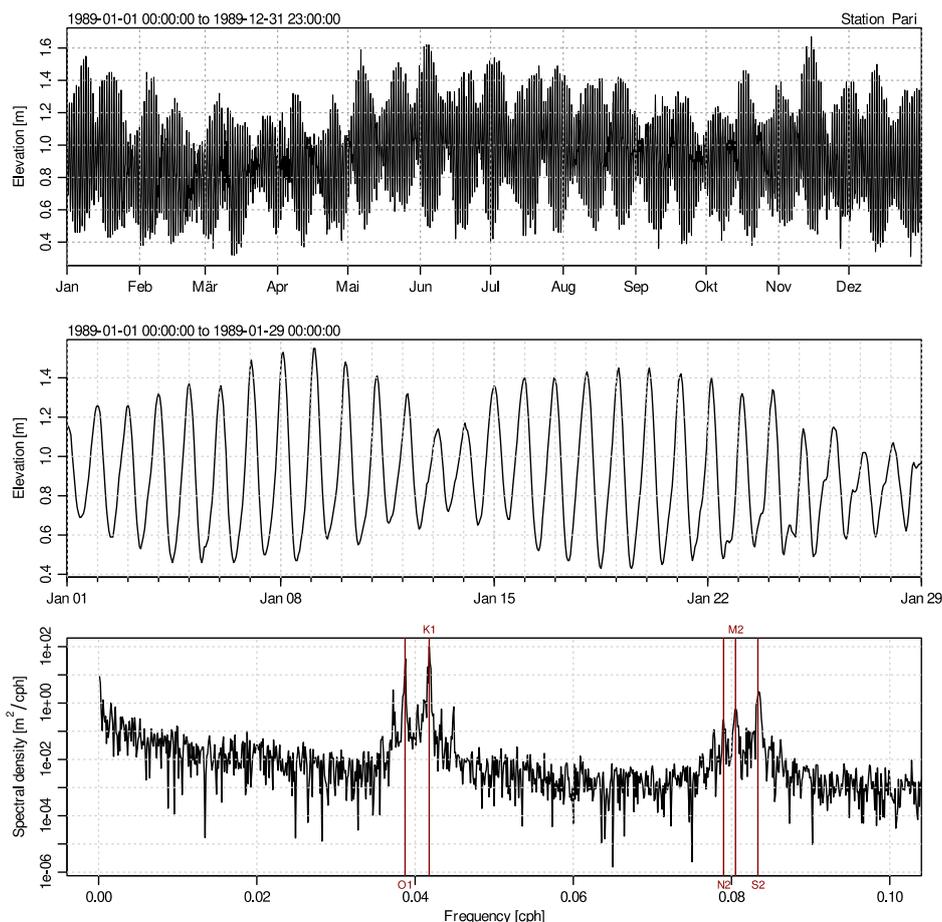


Abbildung 6: Analyse des Gezeiteinflusses im Jahr 1989 am Pegel Pari. Das obere Panel zeigt die stündlich gemessenen extremen Wasserstände über das ganze Jahr 1989. Das mittlere Panel zeigt den Gezeitengang exemplarisch für Januar 1989. Das untere Panel zeigt die Spektrale Dichte der verschiedenen Gezeitenbestandteile.

Globale Reanalysedaten zeigen, dass der jährliche Extremwasserstand bei 0,93 m und der 1.000-jährigen Extremwasserstand bei 1,12 m über dem mittleren Meeresspiegel liegt. Die Daten stammen vom COAST-RP Datensatz, welcher auch tropische Zyklone berücksichtigt (Dullaart et al., 2021). Dieser Datensatz enthält einen Reanalysepunkt vor Pari (S5° 50' 41.9994" , O106° 37' 33.5958" - siehe Abbildung 7). Die von COAST-RP zur Verfügung gestellte Extremwertstatistik in diesem Punkt ist in Tabelle 4 dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass der derzeitige mittlere Tidenhub für diesen Reanalysepunkt laut den Reanalysedaten 1,02 m beträgt. Der mittlere hohe Hochwasserstand im Jahr 2022 (Mean higher high water (MHHW) - der durchschnittliche höchste Wasserstand eines Tages während Flut) beträgt 0,55 m über dem mittleren Meeresspiegel, der mittlere niedrige Niedrigwasserstand (Mean lower low water (MLLW) - der durchschnittliche niedrigste Wasserstand eines Tages während Ebbe) beträgt 0,47 m unter dem mittleren Meeresspiegel. Die höchste astronomische Flut (Springflut) liegt mit 0,91 m über dem mittleren Meeresspiegel im Bereich des einjährigen Flutereignisses.

Wiederkehrperiode (Jahre)	1	2	5	10	25	50	100	250	500	1000
Wasserstand (m über mittlerem Meeresspiegel)	0,93	0,96	0,99	1,01	1,03	1,06	1,07	1,08	1,09	1,12

Tabelle 4: Die Wasserstände von Extremereignissen mit ausgewählter Wiederkehrperiode für Pari Island nach dem COAST-RP Datensatz für das Jahr 2022.

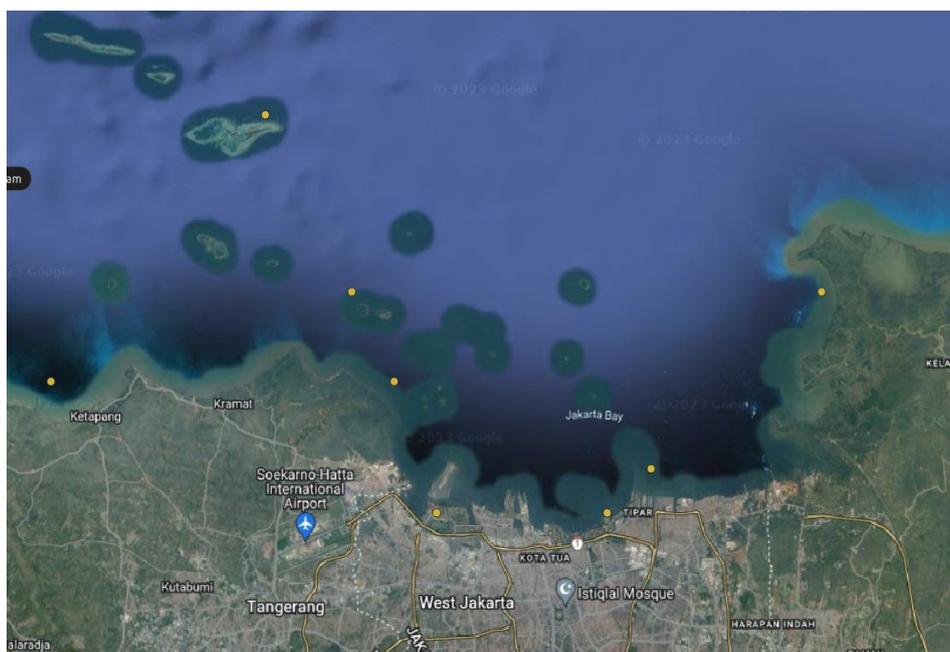


Abbildung 7: Reanalysepunkte (gelb) im COAST-RP Datensatz (Dullaart et al., 2022). Der Punkt oben links im Bild liegt vor Pari. Quelle für die unterliegenden Satellitenbilder: Google Earth, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO © 2023 Maxar Technologies.

3.1.3. Zukünftige extreme Wasserstände

Der Klimawandel beeinflusst zukünftige extreme Wasserstände dadurch, dass er a) extreme Wasserstände durch den Meeresspiegelanstieg erhöht, und b) globale Wind- und Druckfelder verändert, wobei der erste Faktor deutlich dominiert. Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels erhöht extreme Wasserstände in der Regel um genau den Betrag des Meeresspiegelanstiegs. Beispielsweise wird eine Sturmflut, die heute 1,20 m hoch ist, mit 20 cm Meeresspiegelanstieg 1,40 m hoch sein. In der Vergangenheit war dies der bei Weitem dominierende Effekt und es wird erwartet, dass sich dies im 21. Jahrhundert fortsetzt (Lowe et al., 2001; Menendez and Woodworth, 2011). Des Weiteren verändert die globale Erwärmung auch die globalen Wind- und Druckfelder, was wiederum die extremen Wasserstände beeinflusst. Das heißt, wenn Windgeschwindigkeiten in einer Region zunehmen, können auch abhängig von den lokalen Gegebenheiten

extreme Wasserstände zunehmen. Die globalen Modellierungen zeigen jedoch, dass dieser zweite Effekt relativ gering ist. So wurde beispielsweise festgestellt, dass der Wind/Druck-Effekt die Sturmfluten im globalen Durchschnitt unter den Konzentrationspfaden RCP4.5 und RCP8.5 um weniger als 10% verändert (Vousdoukas et al., 2018).

Die Erhöhung der extremen Wasserstände durch den Meeresspiegelanstieg verändert die Häufigkeit, mit der Wasserstände mit einer bestimmten Höhe auftreten. Das bedeutet, dass beispielsweise im Jahr 2100 unter dem Szenario SSP5-8.5 der Wasserstand der jährlichen Sturmflut bei 1,72 m (*wahrscheinlicher Bereich* 1,36 m - 2,13 m) und der Wasserstand der 1000-jährigen Sturmflut bei 1,91 m (*wahrscheinlicher Bereich* 1,55 m - 2,33 m) über dem mittleren Meeresspiegel liegt. Für 2050 liegen die entsprechenden Werte bei 1,16 m (*wahrscheinlicher Bereich* 1,02 m - 1,31 m) für die jährliche Sturmflut bzw. bei 1,35 m (*wahrscheinlicher Bereich* 1,21 m - 1,50 m) für die 1000-jährige Sturmflut. Das bedeutet, dass es unter diesem Szenario bereits 2050 wahrscheinlich ist, dass die jährliche Sturmflut höher ist als heute die 1000-jährige Sturmflut und die lokale Bevölkerung Wasserstände erleben wird, die seit Jahrtausenden nicht aufgetreten sind. Zu beachten ist dabei, dass sich die entsprechenden Tidenverhältnisse im gleichen Maße ändern.

3.2. Wellen bei Pari

3.2.1. Ursachen

Wellen entstehen hauptsächlich durch Wind, der über den Ozean bläst und dadurch das Wasser in Bewegung versetzt. Weitere Ursachen für Wellen können Seebeben sein. Als Dünung bezeichnet man Wellen, die über längere Strecken gewandert sind und ihr Entstehungsgebiet verlassen haben, der aktuell vorherrschende Wind also nicht die Energiequelle der Dünung ist (Grunau, 2012). Seegang bezeichnet das gemeinsame Wirken von Wellen und Dünung. Um die Höhe eines Seegangs zu beschreiben, wird oft die signifikante Wellenhöhe angegeben. Die signifikante Wellenhöhe ist als die mittlere Höhe des höheren Drittels aller gemessenen Wellen über einen repräsentativen Zeitraum definiert. Generell können Wellen zum Entstehen von Extremereignissen beitragen, dennoch fehlen an vielen Orten der Welt lokale Daten, mangels Messtationen. Für kleine tropische Inseln im Pazifik und im Indischen Ozean tragen Wellen häufig und Sturmfluten hingegen nur selten zu Überflutungen bei (Rueda et al., 2017).

3.2.2. Heutige Wellen

Allgemein zeichnet sich das Meer um Pari durch einen relativ ruhigen Seegang aus. Die höchsten Wellen treten während des Ostmonsuns (Juni-August) und während des Westmonsuns (Dezember-Februar) auf, während die Wellenhöhen in den Übergangsmontaten niedriger sind (Vidura et al., 2020). Die einzigen verfügbaren in-situ Messungen von Wellenhöhen sind vom 3. bis 13. Juni 2018 mit einer Wellenboje gemessen worden. Diese Messdaten zeigen Wellenhöhen von etwa 0,3 m (Vidura et al., 2020). Wenn keine detaillierten historischen Messungen der Wellenhöhe vorliegen, kann auf Reanalysedaten zurückgegriffen werden. Diese Daten entstehen durch die Kombination aus Modellen und Observationen und erstellen dadurch zeitlich und räumlich detailliert aufgelöste Datensätze. Abbildung 8 zeigt den Reanalysedatensatz ERA-Interim als signifikante Wellenhöhe in der Nähe von Pari ($S5^{\circ} 5'$, $O106^{\circ} 5'$), welcher im Rahmen des Copernicus Climate Change Service entwickelt worden ist (Hersbach et al., 2020, p. 5). Die rekonstruierte Wellenhöhe an diesem Ort liegt zwischen 0,2 und 0,7 m und ist somit deutlich höher als die Wellenbojen-Messung von 0,3 m. Diese Abweichung könnte durch die räumliche Distanz von 44 km zwischen dem Messpunkt der Satellitendaten weiter draußen im Meer ($S5^{\circ} 5'$, $O106^{\circ} 5'$) zu der Positionierung der Wellenboje im Hafen von Pari ($S5^{\circ} 86'$, $O106^{\circ} 62'$) erklärt werden, da Pari von Korallenriffen umgeben ist, welche eine reduzierende Wirkung auf Wellenhöhen haben (siehe 4.1.3).

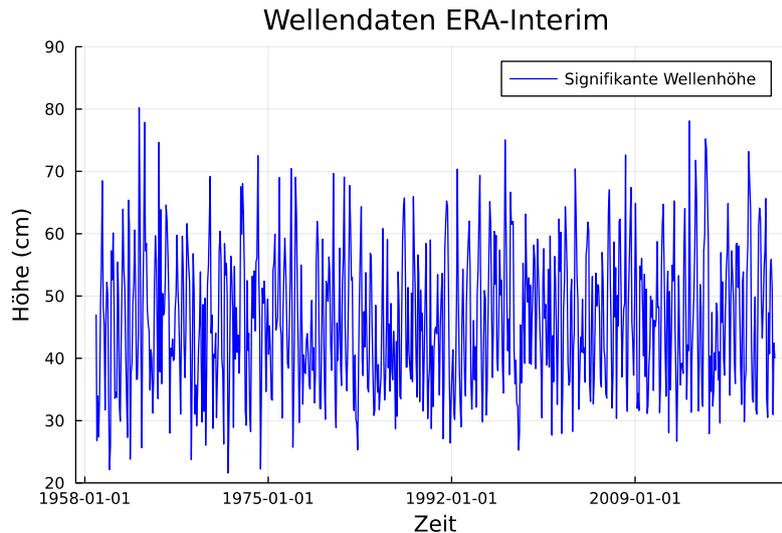


Abbildung 8: Signifikante Wellenhöhen von 1995 bis 2022 nach ERA-Interim Reanalysedaten (Hersbach et al., 2020, p. 5).

3.2.3. Zukünftige Wellen

Zwar beeinflusst der Klimawandel die Wellen durch die Veränderung der globalen Druck- und Windfelder, dieser Effekt scheint jedoch relativ klein zu sein und große Unsicherheiten innerhalb und zwischen verschiedenen Klimamodellen überwiegen. Für Paris besonders relevant wäre eine Änderung des Asiatischen Monsuns, weil sich dadurch Windstärken und -richtungen ändern, was wiederum sich auf Wellenhöhen und -richtungen auswirkt. In den nächsten Dekaden, sind Veränderungen des Monsuns aber hauptsächlich durch natürliche Schwankungen des Klimas und nicht durch den Klimawandel zu erwarten (mittleres Vertrauen) (IPCC, 2021). Längerfristig könnte ein klimawandelbedingter Zusammenbruch des Golfstroms (atlantische meridionale Umwälzzirkulation) zu einer Abschwächung des asiatischen Monsuns führen, aber die IPCC Autoren und Autorinnen haben mittleres Vertrauen, dass dies nicht vor dem Jahr 2100 passiert (IPCC, 2021). Im Übrigen haben globale Simulationen gezeigt, dass der Effekt von verschiedenen Klimaszenarien auf Wellenhöhen ungefähr um den Faktor 10 kleiner ist als der Effekt verschiedener Klimamodelle (Wang et al., 2015). Unter Verwendung eines großen Ensembles verschiedener globaler Klima- und Wellenmodelle wurde festgestellt, dass unter dem Konzentrationspfad RCP4.5 alle robusten Änderungen des Wellenklimas im Rahmen der heutigen natürlichen Variabilität liegen (Morim et al., 2019). Mit anderen Worten: In einer 2°C-Welt (RCP4.5) wird sich das Wellenklima wahrscheinlich nicht signifikant ändern.

4. Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf Paris

4.1. Überflutungen

4.1.1. Ursachen

Überflutungen von Küstenregionen und kleinen Inseln werden typischerweise durch eine Kombination vom mittleren Meeresspiegel, Gezeiten, Sturmfluten, Wellen und Starkregenereignissen verursacht. Welche Kombination von Ereignissen zu Überflutungen führen, hängt von der lokalen Geographie ab und unterscheidet sich stark von Ort zu Ort. Der mittlere Meeresspiegelanstieg kann zur permanenten Überflutung von Küstenregionen führen, wenn keine ausreichenden Küstenschutzmaßnahmen vorhanden sind. Lange bevor dies passiert, macht sich der Meeresspiegelanstieg durch temporäre Überflutungen, die durch Extremereignisse ausgelöst werden, bemerkbar. Extreme Wasserstände können dabei zu einer temporären Überflutung von Küstenregionen führen, wenn der Wasserstand höher als das Land ist und es keine ausreichenden Küstenschutzmaßnahmen gibt. Wellen können auch zu einer temporären Überflutung von Küstenregionen führen, insbesondere auch dann, wenn die Wellen niedriger sind als die Küstenregion, weil Wellen durch Wellenstau und Wellenaufbau auch auf höher gelegenes Land schwappen können (siehe

Abbildung 9). Starkregen und dadurch verursachter Oberflächen- und Fließgewässerabfluss können die extremen Wasserstände zusätzlich erhöhen. Dies scheint auf Pari nicht relevant zu sein, da Pari eine kleine Insel ohne Oberflächenwasser-Läufe ist, und sich somit das Wasser bei Starkregen entweder schnell infiltriert oder verteilt (Marganingrum et al., 2023).

Ob, und wie stark, die Kombination von mittleren und extremen Meeresspiegeln zu Überflutungen führt, wird durch die Wechselwirkungen der extremen Meeresspiegel mit dem Küstenprofil bestimmt, einschließlich der natürlichen (Korallenriffe, Mangrovenwälder) und künstlichen (z. B. Wellenbrecher, Deiche, Strandmauern) Hochwasserbarrieren. Pari ist von Korallenriffen umgeben. Diese haben eine wichtige Küstenschutzfunktion. Korallenriffe reduzieren die an der Küste ankommende Wellenhöhe und -energie erheblich, indem sie die Welle an der äußeren Riffkante brechen und während die Welle über das Riffdach (eng. reef flat) läuft, die Wellenenergie und -höhe weiter reduzieren (Lowe et al., 2005). Je breiter das Riffdach ist, desto mehr wird die Wellenenergie gedämpft und desto niedriger sind die Wellen, die auf die Küste treffen. Abbildung 9 fasst diese biophysikalischen Prozesse, die Morphologie und die Sedimentprozesse einer Korallenriffinsel zusammen.

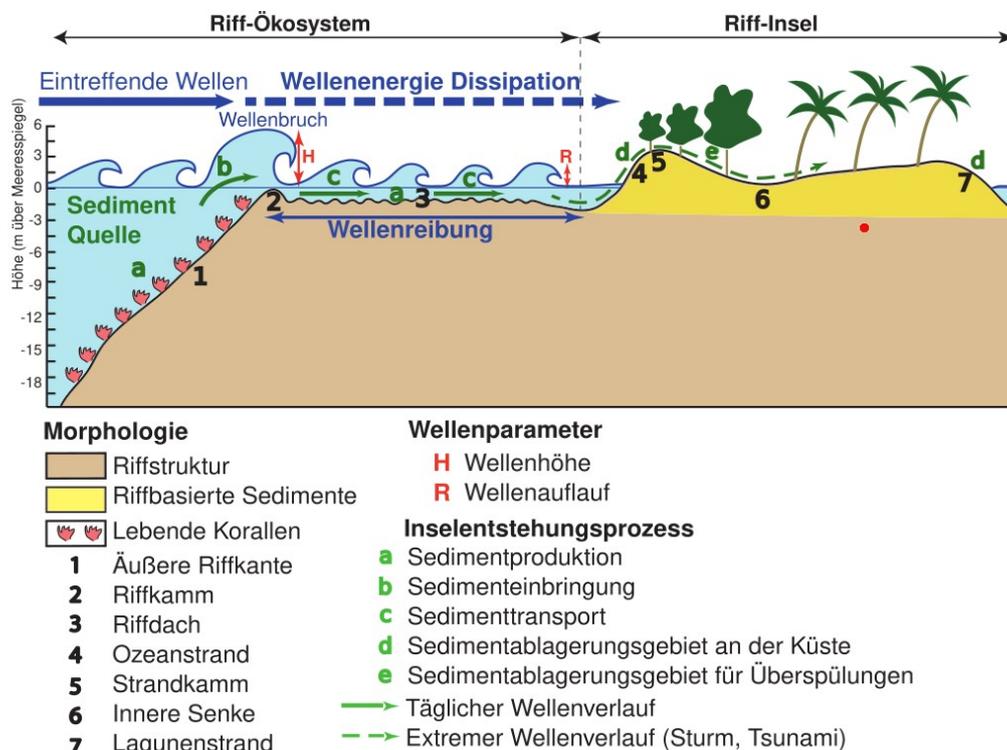


Abbildung 9: Konzeptuelle Übersicht der biophysikalischen Prozesse einer Korallenriffinsel (Adaptiert von Duvat and Magnan, 2019).

4.1.2. Heutige Exposition Pari

Die Geländehöhen der Inselgruppe um Pari (Tengah, Kongs Bar, Burung, Tikus, Pari) liegen zu 68% (0,53 km²) unterhalb des 100-jährigen Flutereignisses von 1,07 m. Für die Analyse der Höhendaten auf Pari wurde das digitale Geländemodell des Joint Research Center (JRC) der Europäischen Kommission genutzt (Abbildung 10). Hochauflösende LiDAR Höhendaten standen für diese Studie nicht zur Verfügung. Die Inselgruppe hat eine Gesamtfläche von 0,75 km². Davon liegen 0,3 km² (oder 39%) unterhalb von 0,5 m über dem mittleren Meeresspiegel und 0,5 km² (oder 65%) unterhalb von 1,0 m über dem mittleren Meeresspiegel. Diese geringen Geländehöhen über dem Meeresspiegel machen Pari im Zusammenspiel mit der oben dargestellten relativ geringen Variabilität des Wasserstandes (niedrige Gezeiten, geringe Extremwasserstände, geringe Wellen) zum Flutrisikogebiet, da bereits ein geringer Anstieg des mittleren Meeresspiegels größere Veränderungen des Flutrisikos impliziert, auf das die Insel nicht vorbereitet ist.

angestiegen (Kapitel 2.2.2). Verglichen dazu ist der Beitrag von Sturmfluten relativ gering (Kapitel 3.1.2). Dabei ist zu bedenken, dass natürliche Hochwasserbarrieren wie Korallenriffe und Mangrovenwälder zwar eine stark reduzierende Wirkung auf Wellenhöhen haben, jedoch kaum eine reduzierende Wirkung auf Extremwasserstände. Eine aktuelle Auswertung der wissenschaftlichen Literatur über die Küstenschutzfunktion von Marschen und Mangroven zeigt, dass die Dämpfungsrate, d.h. die Verringerung der Wellen- oder Sturmfluthöhen in Abhängigkeit von der durch das Feuchtgebiet zurückgelegten Strecke, bei Wellen in der Größenordnung von 1% pro Meter liegt, wohingegen sie bei Sturmfluthöhen nur bei 1% pro 100 m liegt (Temmerman et al., 2023).

4.1.4. Ursachen der Überflutungen vom 4./5. Dezembers 2021

In 2021 fanden besonders schwere Überflutungen in der Nacht von Samstag, dem 4., auf Sonntag, den 5. Dezember, statt. Dabei wurde das Haus von Herrn Arif Pujanto im südwestlichen Teil der Insel um ungefähr 20 cm überflutet. Im Folgenden untersuchen wir die Ursachen dieser Überflutung.

Die Auswertung von Satelliten- und Pegelmessungen zeigt, dass die Fluten vom 4./5. Dezember 2021 durch eine Kombination von erhöhtem mittleren Meeresspiegel und außergewöhnlich hohem extremen Meeresspiegel zustande gekommen sind. Der 4./5. Dezember ist am Pegel Kolinamil des Hafens von Jakarta als besonders hoher Extremwasserstand eingegangen (Abbildung 11). Da dieser Pegel nur durch ca. 30 km offenes Meer von Pari getrennt ist, ist davon auszugehen, dass die Extremwasserstände um Pari ähnlich waren. Ferner lag der mittlere Meeresspiegel, welcher natürlichen Schwankungen von rund +/- 20 cm unterliegt, im November/Dezember 2021 relativ hoch (Abbildung 12). Die signifikanten Wellenhöhen waren am 4./5. Dezember 2021 eher durchschnittlich bis niedrig (Abbildung 11), was, zusammen mit der in Kapitel 3.2.2 festgestellten starken Wellendämpfung des Korallenriffes zur Konklusion führt, dass Wellen wohl keine große Rolle bei der Überflutung des 4./5. Dezembers 2021 gespielt haben.

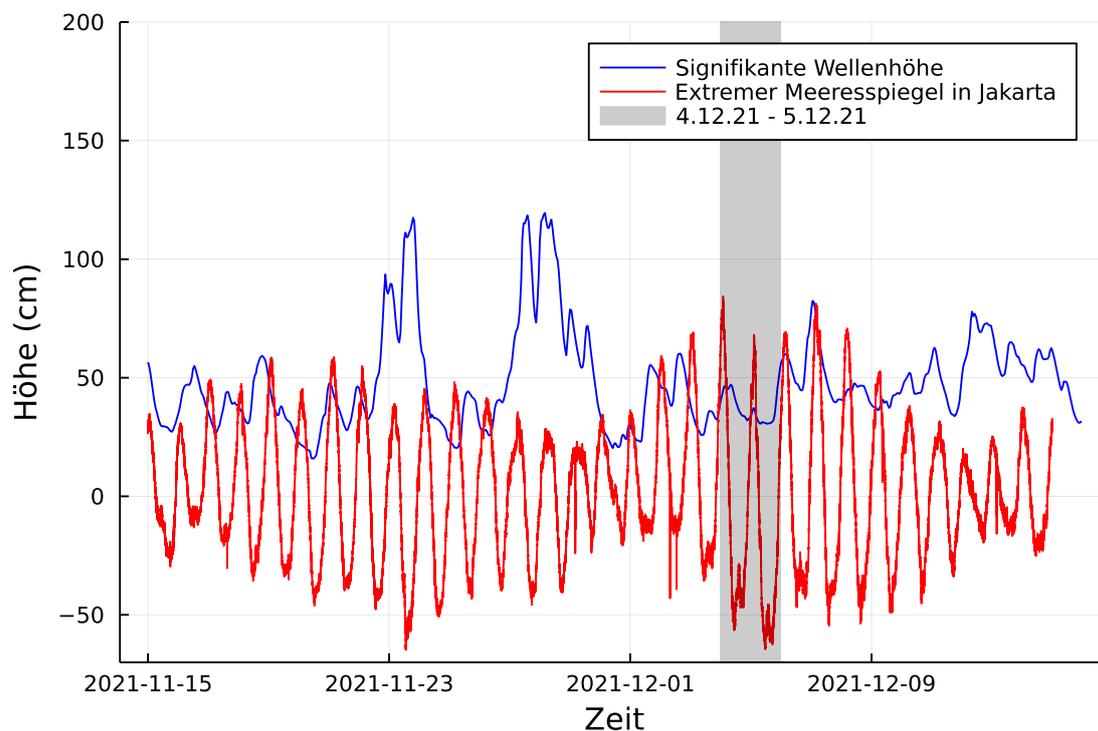


Abbildung 11: Messungen des extremen Meeresspiegels und der Wellenhöhen von November bis Dezember 2021. Die signifikante Wellenhöhe (blau) stammt von ERA-Interim Reanalysedaten (Hersbach et al., 2020, p. 5). Der extreme Meeresspiegel stammt von der Pegelmessung im Hafen von Jakarta (rot) und wird relativ zur durchschnittlichen Wasserhöhe dargestellt. Der Zeitraum vom 4. bis 5. Dezember 2021, in dem besonders hohe Flutereignisse auf Pari auftraten, ist grau markiert.

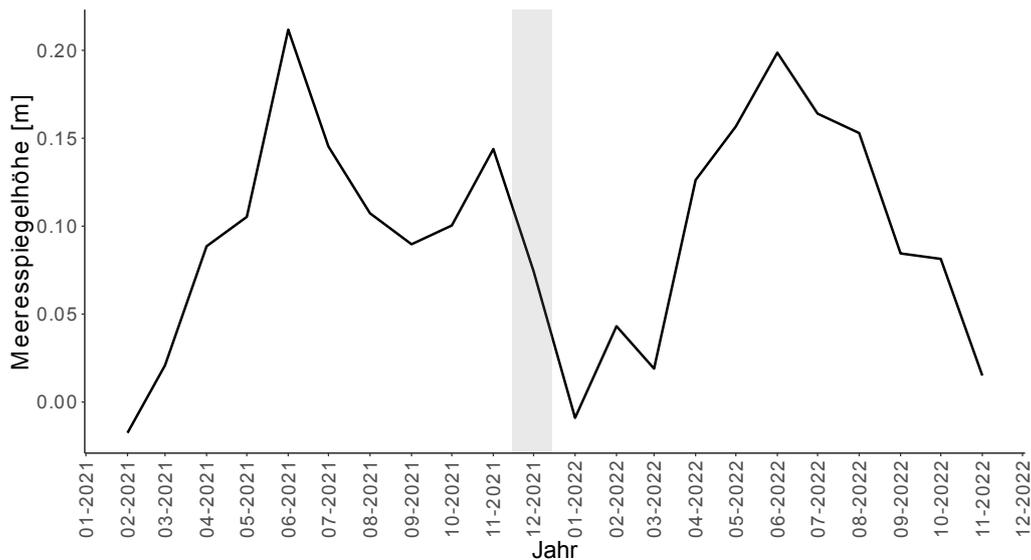


Abbildung 12: Höhe des mittleren monatlichen Meeresspiegels in den Jahren 2021 und 2022, basierend auf den in Kapitel 2.2.2.1 präsentierten Satellitenmessungen am Kreuzungspunkt Topex/JASON1/2/3,S6FM ($S5^{\circ} 55' 51,4092''$, $O106^{\circ} 18' 5,9976''$) etwa 35 km südwestlich von Pari. Der Zeitraum von Mitte November bis Mitte Dezember 2021, in dem die Flut vom 4./5. Dezember 2021 passierte, ist grau markiert.

4.1.5. Zukünftige Überflutungen

Der Beitrag von Wellen zu Überflutungen wird in Zukunft erheblich zunehmen, weil die Korallenriffe, welche heute die Wellen dämpfen und somit die Inseln vor Überflutung durch Wellen schützen (Kapitel 4.1.1), zunehmend durch den Klimawandel degradiert werden (Kapitel 4.3.1). Degradierete Korallenriffe können Inseln mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg immer weniger schützen, da sie im Gegensatz zu gesunden Riffen nicht mehr mit dem Meeresspiegelanstieg wachsen können und somit die Insel immer weniger vor Wellen schützen (Montaggioni, 2005; Perry et al., 2018; Quataert et al., 2015). Modellrechnungen zeigen, dass viele Korallenriffinseln durch diesen Effekt bereits bis 2050 unbewohnbar werden könnten, falls keine weitreichenden Anpassungsmaßnahmen getroffen werden (Storlazzi et al., 2018). Degradierete (bzw. abgestorbene) Riffe produzieren weniger (bzw. keine) Sedimente (Tuck et al., 2019), was zu einem Sedimentdefizit in der Lagune führt und so die Küstenerosion verstärkt (Kapitel 4.2.1). Damit wird auch das Flutrisiko erhöht, da erodierende Küsten weniger vor Wellen schützen (Aslam and Kench, 2017). Modellrechnungen, die die Auswirkungen erhöhter Wellen auf das Flutrisiko durch die oben beschriebenen Effekte für Pari quantifizieren, liegen bisher noch nicht vor.

Zusätzlich zu den höheren Wellen führt der Anstieg des mittleren Meeresspiegels zu einem Anstieg der Extremwasserstände und damit zu häufigeren und intensiveren Fluten. Wenn keine Anpassungsmaßnahmen getroffen werden (Kapitel 4.1.6), führt der Anstieg zur permanenten Überflutung und dem Verlust von Land. Ein statistisches Modell aus den Extremwasserständen in Tabelle 5 ergibt zum Beispiel, dass der heutige 1000-jährige Extremwasserstand unter 10 cm Meeresspiegelanstieg im Mittel alle 9 Jahre auftritt und unter 20 cm Meeresspiegelanstieg jedes Jahr. Selbst ein heute 10000-jähriger Extremwasserstand wird unter 20 cm Meeresspiegelanstieg in der Zukunft zu einem (fast) jährlichen Ereignis. Das heißt, dass selbst Häuser, die heute ein sehr geringes Flutrisiko haben, schon unter dem Szenario mit dem geringsten Meeresspiegelanstieg (SSP1-1.9) in 2050 jährlich überflutet werden (siehe Tabelle 5).

Extremwasserstand (m)	0,96	1,03	1,07	1,12	1,16
Wiederkehrperiode heute (Jahre)	1	10	100	1.000	10.000
Wiederkehrperiode unter 10 cm Meeresspiegelanstieg (Jahre)	1	1	1,4	8,6	81,9
Wiederkehrperiode unter 20 cm Meeresspiegelanstieg (Jahre)	1	1	1	1	1,3

Tabelle 5: Die (heutige) Wiederkehrperiode von Extremwasserständen und deren Änderung unter 10 cm bzw. 20 cm Meeresspiegelanstieg. Ein Extremereignis, das unter heutigen Bedingungen im Durchschnitt einmal alle 1000 Jahre auftritt, tritt mit 10 cm Meeresspiegelanstieg bereits einmal alle 9 Jahre (im Durchschnitt) auf Pari auf.

4.1.6. Anpassungsmaßnahmen und Kosten

Die Überflutungsgefahr auf Pari nimmt mit dem Meeresspiegelanstieg zu und die Bevölkerung läuft dadurch Gefahr an sozioökonomische und biophysikalische Anpassungsgrenzen gebracht zu werden. Dies kann jedoch teilweise durch Anpassungsmaßnahmen verzögert werden (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). Menschen, die an der Küste leben, implementieren seit jeher verschiedene Maßnahmen, um die durch die natürliche Klimavariabilität entstehenden Gefahren und neuerdings auch die zunehmenden Küstengefahren durch den Meeresspiegelanstieg zu reduzieren (IPCC AR6: Mycoo et al., 2022). Allerdings wird dies in tiefliegenden Küstenzonen zunehmend schwieriger und ohne weitreichende Anpassungsmaßnahmen würden die meisten Atoll-Inseln bis 2050 unbewohnbar werden (Storlazzi et al., 2018).

Die weitverbreitetsten Anpassungsmaßnahmen an die zunehmende Überflutungsgefahr auf Korallenriffinseln sind bauliche Küstenschutz-Maßnahmen, die durch einen Maßnahmen-Mix aus baulichen und naturbasierten Maßnahmen ergänzt sowie in enger Abstimmung mit der lokalen Bevölkerung umgesetzt werden sollten (Temmerman et al., 2023). Die Maßnahmen reichen von baulichen Maßnahmen an der Küste wie Dämmen, Hochwasserschutzmauern, Gabionen und Tetrapoden zu Maßnahmen vor der Küste wie künstlichen Wellenbrechern. Durch solche baulichen Maßnahmen kann die Küste von kleinen Inseln gesichert und die Überflutungsgefahr zeitweise reduziert werden, indem die auflaufenden Wellen gebremst oder das Wasser physisch daran gehindert wird, auf das Land zu fließen (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). Deiche werden aufgrund des Platzmangels auf kleinen Inseln kaum errichtet. Auf den meisten bewohnten Korallenriffinseln - auch auf Pari - wurden bauliche Maßnahmen zur Küstensicherung oder zur Reduzierung der Überflutungsgefahr umgesetzt (Duvat, 2019). Insbesondere in Hafен- bzw. Marina-Bereichen ist dies der Fall. Allerdings werden auch zunehmend Wohn- und Naherholungsgebiete baulich geschützt (Major et al., 2021). Zum Beispiel gibt es auf Pari bereits vereinzelte küstenparallele sowie vertikal vom Strand abgehende Küstenschutz-Maßnahmen wie Gabionen und Buhnen, die jeweils Erosion verringern und das Ufer befestigen sollen. Allerdings werden solche baulichen Maßnahmen als Anpassungsmaßnahme an die steigenden Überflutungsgefahren auf kleinen Inseln kontrovers diskutiert, weil bauliche Eingriffe natürliche Sedimentprozesse unterbinden und damit zu einem ‚lock-in‘, i.e., einer Pfadabhängigkeit von weiteren baulichen Maßnahmen führen können (Klöck et al., 2022). Allerdings sehen sich Inselbevölkerungen durch die rapide steigende Überflutungsgefahr immer häufiger zu solchen Maßnahmen gezwungen.

Die Stückkosten von baulichen Maßnahmen zur Reduzierung der Überflutungsgefahr auf Korallenriffinseln variieren stark und sind generell höher als auf dem Festland (Aerts, 2018). Generell gibt es zwei Gründe für die hohen Baukosten. Erstens müssen Baumaterialien meist vom Festland importiert werden. Zweitens treiben die Abgelegenheit und die erschwerte Zugänglichkeit der kleinen Inseln die Baukosten relativ zum Festland in die Höhe. Kostensätze für bauliche Küstenschutzmaßnahmen in Indonesien sind nicht öffentlich verfügbar. Jedoch können vergleichbare Inselregionen als Anhaltspunkt dienen. Zum Beispiel belaufen sich die Median-Baukosten für einen Wellenbrecher in tropischen Gegenden auf rund 20.000 USD pro Meter (Ferrario et al., 2014).

Neben baulichen Maßnahmen werden auch naturbasierte Maßnahmen zur Reduzierung der Überflutungsgefahr eingesetzt. Naturbasierte Maßnahmen beziehen sich auf verschiedene Maßnahmen, die die nachhaltige Bewirtschaftung, Erhaltung und Wiederherstellung von Ökosystemen umfassen, um die Anpassung an die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs zu ermöglichen. Dazu gehören beispielsweise das für Pari besonders wichtige Erhalten oder Wiederherstellen von Korallenriffen und Mangroven, die die Küste vor allem vor Überflutungen durch Wellenereignisse schützen (siehe Kapitel 4.1.1) und auch die Küstenerosionsgefahr verringern (siehe auch Kapitel 4.2). Es ist allerdings anzumerken, dass naturbasierte Maßnahmen meist nur im Zusammenspiel mit baulichen Maßnahmen effektiv gegen Überflutungen schützen können und ein von der Bevölkerung auf Pari ausgewählter Maßnahmen-Mix nötig ist – zumindest vor dem Hintergrund des Meeresspiegelanstiegs (Temmerman et al., 2023).

Die Wirkung von naturbasierten Maßnahmen in der Reduzierung von Überflutungsgefahren ist vornehmlich eine Puffernde. Das heißt, dass durch größere Überflutungsflächen und/oder natürliche Widerstände, wie zum Beispiel durch Wurzeln und Äste von Mangroven, die Bewegungsenergie der Wassermassen reduziert wird, statt sie physisch daran zu hindern auf die Insel zu fließen (Sierra-Correa and Cantera Kintz, 2015). Dies mindert die Wellenenergie und reduziert die Überflutungsgefahr durch Wellen. Insbesondere die Korallenriffe von Korallenriffinseln haben eine essenzielle Hochwasserschutzfunktion (Beck et al., 2018). Aber auch Mangrovenwälder sind häufig auf kleinen Inseln zu finden und ebenso Teil des natürlichen Küstenschutzsystems einer Insel (siehe auch Abschnitt Verlust von Korallen und Abschnitt Verstärkte Küstenerosion). Weniger verbreitet und in ihrer Küstenschutzfunktion noch nicht vollständig erforscht sind Seegraswiesen.

Um die natürliche Küstenschutzfunktion von Korallen und Mangroven zu erhalten, gibt es Bestrebungen, diese im Rahmen von naturbasierten Maßnahmen wieder aufzuforsten (Roelvink et al., 2021). In Bezug auf Korallen wird dies bisher nur in kleinem Umfang betrieben, weil der Korallenriffschutz ein technisch aufwändiges und kostenintensives Unterfangen ist (Oppen et al., 2017). Die Situation bei Mangroven ist anders (siehe auch Abschnitt Verlust von Seegraswiesen und Mangroven). Indonesien plant zum Beispiel 600.000 ha Mangroven bis 2024 aufzuforsten (Worldbank, 2022).

Die Landerhöhung (vgl. Warft) ist eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Überflutungsgefahr. Landerhöhungen werden meist in Verbindung mit Landgewinnungen durchgeführt (Sengupta et al., 2018). Durch die Erhöhung des Geländes wird das Überflutungsrisiko reduziert. Der Vorteil dieser Maßnahme im Vergleich zu baulichen Maßnahmen wie einer solitär eingesetzten Hochwasserschutzmauer ist, dass dem sogenannten “Badewanneneffekt” entgegengewirkt wird. Der Badewanneneffekt tritt ein, wenn der mittlere Meeresspiegel über der Geländehöhe liegt und einer permanenten Überflutung nur mit Hilfe von baulichen Maßnahmen entgegengewirkt wird. Für eine Korallenriffinsel wäre eine solche Situation extrem problematisch, weil der Grundwasserspiegel der Insel mit dem Meeresspiegel steigen würde und kontinuierliches Abpumpen des Grundwassers erforderlich wäre. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn der Star Beach im Westteil von Pari vollständig mit einer Hochwasserschutzmauer umschlossen würde.

Landerhöhungen sind eine bisher wenig verbreitete Maßnahme in kleinen Inselregionen, jedoch zeigen einzelne Beispiele wie Hulhumalé auf den Malediven, dass diese Maßnahme ein hohes Potential für die erfolgreiche Anpassung an den Meeresspiegelanstieg hat. Hulhumalé ist eine künstlich aufgeschüttete Insel, die, um die Überflutungsgefahr zu reduzieren, 2 m über dem mittleren Meeresspiegel aufgeschüttet wurde (Bisaro et al., 2019). Im Vergleich zu den natürlichen Inseln auf den Malediven ist dies eine Verdopplung der Geländehöhe. In ähnlicher Weise werden auch bereits bewohnte Inseln erweitert, allerdings mit dem vornehmlichen Ziel, die Insel zu vergrößern und nicht, um die Überflutungsgefahr zu reduzieren (Gussmann and Hinkel, 2021). Letzteres könnte auch für Pari eine Anpassungsmöglichkeit sein. In mehreren Phasen könnte Pari erhöht, erweitert, das neue Gebiet entwickelt und dann besiedelt werden. Das dann freigewordene Gelände könnte dann ebenfalls erhöht, neu entwickelt und wieder besiedelt werden. Auch das Aufschütten einzelner Warften ist denkbar. Es ist anzumerken, dass dies jedoch extrem technisierte Lösungen wären, mit drastischen Auswirkungen auf die sozialen und ökologischen Systeme von Pari. Die Kosten für Landerhöhungen sind abhängig von der durchführenden Firma (inländisch/ausländisch) und dem Umfang der Entwicklungskosten. Als Maßstab liegen Daten von den Malediven vor: Dort werden 5,5-9 USD pro Kubikmeter veranschlagt. Dazu kommen Kosten für die Küstensicherung und die jeweiligen

Entwicklungskosten (Infrastruktur etc.).

Eine weitere Anpassungsmöglichkeit ist gebäudlicher Hochwasserschutz. Diese Maßnahme zählt zu den in der Literatur als ‚accommodation‘ also ‚sich einrichten‘ bezeichneten Maßnahmen (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). Bei dieser Strategie wird eine regelmäßige Überflutung der Insel, oder Teile davon, in Kauf genommen, aber Maßnahmen ergriffen, um Flutschäden an Gebäuden zu minimieren. Das Paradebeispiel für diese Strategie sind durch Stelzen erhöhte Häuser. Zum Beispiel haben Bewohner und Bewohnerinnen in Semarang City (Indonesien) ihre Häuser zwischen 0,5 und 4 m erhöht, um sich an den steigenden Meeresspiegel anzupassen (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). Dies wäre auch auf Pari eine sinnvolle Strategie. Einzelne Gebäude sind bereits erhöht, wie zum Beispiel der Gebetsraum ‚mushola nurul falah‘ im Nordosten der Insel Pari, nahe des Strands Perawan. Auch das Innere der Gebäude kann auf regelmäßige Überflutungen eingerichtet werden. Zum Beispiel schreibt die Bauordnung auf den Malediven eine minimale Steckdosenhöhe von 0,6 m vor (Gussmann and Hinkel, 2021). Der Vorteil dieser Strategie des sich Einrichtens wäre, dass durch die regelmäßigen Überflutungen Sedimentablagerungen erfolgen würden und somit die Insel auf natürliche Weise erhöht werden könnte (Duvat, 2019). Dies wird zum Beispiel auf den norddeutschen Halligen praktiziert (Klöß, 2019). Diese Strategie wirkt sich allerdings auch nachteilig auf die ökonomischen Aktivitäten auf der Insel aus, beispielsweise kann Landwirtschaft nicht mehr oder nur in kleinem Umfang betrieben werden. Uns ist bisher keine Korallenriffinsel bekannt, die diese Strategie umfassend verfolgt. Die Kosten für die Aufstellung eines Hauses auf betonverstärkte Bambus Stelzen in Vietnam beliefen sich auf 1.250-2.500 USD pro Haus, jedoch ohne Angabe der Aufstellungshöhe. Erosionsprozesse sind auf Korallenriffinseln besonders ausgeprägt, da sie aus unverfestigtem, biogenem Material von Korallen bestehen, das durch Strömungen und Wellen auf den Inseln und ihren Lagunen abgelagert wird (Duvat, 2019; Holdaway et al., 2021; Kench, 2012; Kumar et al., 2018). Siehe auch Abbildung 1. Zu den natürlichen Ursachen der Küstenerosion gehören Meeresströmungen, Gezeiten, Wellen, Sturmfluten und die relative Veränderung des Meeresspiegels. Zu den anthropogenen Ursachen gehören menschliche Eingriffe in den Sedimenttransport durch die Zerstörung von Korallenriffen und den Bau von Küsten-Infrastruktur wie Deichen, Häfen und Wellenbrechern.

Der Klimawandel und der Anstieg des Meeresspiegels beeinflussen diese natürlichen und anthropogenen Ursachen von Küstenerosion in zweifacher Hinsicht. Generell verstärken höhere, mittlere und extreme Meeresspiegel die Küstenerosion (Ranasinghe, 2016; Wong et al., 2014). Bei Korallenriffinseln kommt dazu, dass der Klimawandel zusätzlich den natürlichen Erosionsschutz durch gesunde Korallenriffe (siehe Kapitel 4.3) und Mangrovenwälder (siehe Kapitel 4.4) der Inseln gefährdet. Degradierete Riffe haben eine geringere Wellenreibung als gesunde Riffdächer, was dazu führt, dass die Wellen weniger gedämpft werden und somit höher auf die Küste treffen (Quataert et al., 2015). Des Weiteren produzieren degradierete (bzw. abgestorbene) Riffe weniger (bzw. keine) Sedimente. Dies führt dazu, dass Korallenriffen nicht mehr mit dem Meeresspiegel mitwachsen können, was deren Schutzfunktion erheblich reduziert (s. Abbildung 1). Zudem fehlen dann auch die Sedimente in der Lagune, was zusätzlich die Küstenerosion verstärkt (Bramante et al., 2020).

4.2. Verstärkte Küstenerosion

4.2.1 Ursachen

Die Erosion von Land an Küsten ist global weit verbreitet und wird von einer Reihe natürlicher und anthropogener Faktoren beeinflusst, darunter der Klimawandel und der Anstieg des Meeresspiegels (Luijendijk et al., 2018; IPCC AR5: Wong et al., 2014). Erosionsprozesse sind auf Korallenriffinseln besonders ausgeprägt, da sie aus unverfestigtem, biogenem Material von Korallen bestehen, das durch Strömungen und Wellen auf den Inseln und ihren Lagunen abgelagert wird (Duvat, 2019; Holdaway et al., 2021; Kench, 2012; Kumar et al., 2018). Siehe auch Abbildung 1. Zu den natürlichen Ursachen der Küstenerosion gehören Meeresströmungen, Gezeiten, Wellen, Sturmfluten und die relative Veränderung des Meeresspiegels. Zu den anthropogenen Ursachen gehören menschliche Eingriffe in den Sedimenttransport durch die Zerstörung von Korallenriffen und den Bau von Küsten-Infrastruktur wie Deichen, Häfen und Wellenbrechern.

Der Klimawandel und der Anstieg des Meeresspiegels beeinflussen diese natürlichen und anthropogenen Ursachen von Küstenerosion in zweifacher Hinsicht. Generell verstärken höhere, mittlere und extreme Meeresspiegel die Küstenerosion (Ranasinghe, 2016; IPCC AR5: Wong et al., 2014)(Ranasinghe, 2016; Wong et al., 2014). Bei Korallenriffinseln kommt dazu, dass der Klimawandel zusätzlich den natürlichen Erosionsschutz durch gesunde Korallenriffe (siehe Kapitel 4.3) und Mangrovenwälder (siehe Kapitel 4.4) der Inseln gefährdet. Degradierete Riffe haben eine geringere Wellenreibung als gesunde Riffdächer, was dazu führt, dass die Wellen weniger gedämpft werden und somit höher auf die Küste treffen (Quataert et al., 2015). Des Weiteren produzieren degradierete (bzw. abgestorbene) Riffe weniger (bzw. keine) Sedimente. Dies führt dazu, dass Korallenriffen nicht mehr mit dem Meeresspiegel mitwachsen können, was deren Schutzfunktion erheblich reduziert (s. Abbildung 1). Zudem fehlen dann auch die Sedimente in der Lagune, was zusätzlich die Küstenerosion verstärkt (Bramante et al., 2020).

4.2.2. Heutige Auswirkungen

Die heutigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Küstenerosion in Pari lassen sich aufgrund der vielen klimawandelunabhängigen Ursachen der Küstenerosion im Allgemeinen und speziell für Pari nicht quantifizieren (IPCC AR6: Mycoo et al., 2022; IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). Laut lokalen Berichten hat Pari von 2013 bis 2021 rund 11% seiner Fläche (rund 6 Hektar) durch Erosion verloren (BBC News Indonesia, 2021). Eine Analyse der Satellitenbilder kann dies nicht bestätigen (Abbildung 13). Ferner ist unklar, ob dieser Verlust durch den Meeresspiegelanstieg bedingt war oder andere Ursachen hatte. Jüngste Studien, die eine große Anzahl von Koralleninseln im Pazifik und im Indischen Ozean untersucht haben, zeigen, dass etwa 90% dieser Inseln in den letzten Jahrzehnten des Meeresspiegelanstiegs entweder stabil geblieben sind oder an Fläche gewonnen haben (Duvat, 2019; Holdaway et al., 2021). Dazu gehörten auch Inseln in Regionen, in denen der Meeresspiegel um das 3- bis 4-fache des globalen Durchschnitts anstieg (McLean and Kench, 2015). Diese Studien zeigen auch, dass der anthropogene Meeresspiegelanstieg derzeit nur eine geringe Rolle bei der heutigen Küstenerosion spielt (McLean and Kench, 2015).



Abbildung 13: Veränderung der Küstenlinie auf Pari von 2009 bis 2021. Die gelbe Linie zeigt die Küstenlinie der Insel Pari im Jahr 2009, die pinke Linie zeigt die Küstenlinie im Jahr 2021. Quelle: Google Earth, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO © 2023 Maxar Technologies.

4.2.3. Zukünftige Auswirkungen

Die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Küstenerosion in Pari hängen vor allem von der Zukunft der Korallen ab. Korallenriffinseln sind in der Lage mit dem Meeresspiegelanstieg mitzuwachsen, solange das Riff ausreichend Sediment produziert, die natürliche Sedimenttransportdynamik aufrechterhalten wird und die Inseln episodisch überflutet werden können, sodass sie durch das von der Flut abgelagerte Sediment vertikal wachsen können.

4.2.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten

Die Anpassungsmaßnahmen an - die zwar empirisch zur Zeit für Pari nicht feststellbare, aber zu erwartende - verstärkte Erosion auf Korallenriffinseln haben eine große Schnittmenge mit den Anpassungsmaßnahmen an Überflutungen (siehe Abschnitt Überflutungen), wobei die verbreitetsten Maßnahmen Uferbefestigungen sind. Diese werden jedoch im Umfeld von Korallenriffinseln aufgrund ihrer fragwürdigen Effektivität, Erosion zu vermindern, kontrovers diskutiert (Nunn et al., 2021; Piggott-McKellar et al., 2020). Dennoch sind sie häufig für die lokale Bevölkerung alternativlos, wenn die Erosion der Küste zunehmend ihr Hab und Gut bedroht. Es gibt allerdings auch erosionsspezifische Maßnahmen, die auf kleinen Inseln implementiert werden. Diese reichen von baulichen Maßnahmen wie Buhnen oder Faschinen - also vertikal vom Strand abgehende Konstruktionen mit dem Ziel Sediment an Ort und Stelle zu halten - hin zu sogenannten weichen Maßnahmen wie Sandaufspülungen oder Kiesschüttungen (Linham and Nicholls, 2012). Buhnen werden häufig auf Korallenriffinseln gebaut, um der Erosion des Strandes entgegenzuwirken. Dies kann erfolgreich sein und die Erosion an Teilen der Insel reduzieren (Darsan and Alexis, 2014), gleichzeitig kann die Unterbrechung des Sedimenttransports durch Buhnen zu verstärkter Erosion an anderen Stellen der Insel führen (Duvat and Magnan, 2019).

Sandaufspülungen hingegen gelten als effektive Maßnahme, um verstärkter Erosion entgegenzutreten, in dem erodiertes Sediment durch regelmäßige Aufspülungen ersetzt wird. Allerdings sind Sandaufspülungen vergleichsweise teuer, weil sie regelmäßig wiederholt werden müssen. Außerdem werden durch den Spülvorgang häufig die Riffe der Insel beschädigt, was sich negativ auf die ökologischen und natürlichen Küstenschutzsysteme auswirken kann und somit kontraproduktiv ist. Letztlich ist auch die langfristige Verfügbarkeit von Sand für hoch frequentierte Aufspülungen zu hinterfragen. Zumal es gängige Praxis ist, weit entfernte Sanddepots zu vermeiden und stattdessen mit sogenannten 'Cutter Suction Dredgers' Sand aus den Riffen der Lagune zu gewinnen. Letzteres hat drastische Auswirkungen auf die Ökosysteme der Lagune und kann sogenannte Sandfallen kreieren und damit auch wieder kontraproduktiv auf die Erosion der Inseln wirken. Folglich werden Sandaufspülungen auf kleinen Inseln eher selten angewendet. Ausnahmen gibt es im Pazifik und im Indischen Ozean. Auf Tuvalu wurden zum Beispiel erstmals Kiesschüttungen erfolgreich eingesetzt, um die Küstenlinie zu sichern und Erosion zu verhindern (Onaka et al., 2017). Und auf den Malediven werden Sandaufspülungen genutzt, um der Erosion von Stränden auf verschiedenen Resortinseln entgegenzuwirken (Duvat, 2020).

Die Kosten für Anpassungsmaßnahmen an verstärkte Erosion auf kleinen Inseln variieren stark und sind für Pari aufgrund von fehlenden Kostensätzen nicht abschätzbar. Als Anhaltspunkt können globale Kostenbeispiele herangezogen werden. Für Sandaufspülungen variieren die Kosten je nach Herkunft des Materials und den damit verbundenen Transportkosten stark. In den Vereinigten Staaten schwanken die Kosten zwischen 5-18 USD pro Kubikmeter Sand und in den Niederlanden werden die Kosten auf 4-8 USD pro Kubikmeter Sand geschätzt. Besser vergleichbar sind Kostenschätzungen aus Vietnam von 5,8 USD pro Kubikmeter Sand (Aerts, 2018)

4.3. Verlust von Korallen

4.3.1. Ursachen

Die Gesundheit von Korallenriffen ist weltweit stark durch die mit dem Klimawandel verbundene Ozeanerwärmung gefährdet (Hughes et al., 2018). Die ebenfalls durch die Emission von Treibhausgasen verursachte Versauerung der Ozeane trägt zu dieser Gefahr bei, weil ein saurer Ozean die Fähigkeit der Korallen, kalkhaltige Strukturen aufzubauen, verringert, aber die langfristigen Auswirkungen dieses Prozesses sind erst in Ansätzen erforscht (Kroeker et al., 2013). Zusätzlich sind Korallen durch anthropogene

Faktoren wie Verschmutzung, Fischerei und Tourismus bedroht (Hughes et al., 2017).

4.3.2. Heutige Auswirkungen

Korallen auf der ganzen Welt sind bereits unter dem heutigen Niveau der globalen Erwärmung stark durch die Ozeanerwärmung strapaziert (Hughes et al., 2018). Auf Pari kann der Gesundheitsstatus der Korallenriffe bisher noch als moderat bis gut bezeichnet werden (Subhan et al., 2021). Korallen sind aber durch die starke Nutzung und Verschmutzung bereits beeinträchtigt und das Bleichen und das Absterben von Korallen wurde während der El Niño Southern Oscillation beobachtet (Madduppa et al., 2012).

4.3.3. Zukünftige Auswirkungen

Die meisten Korallen werden bei einer globalen Erwärmung von 2°C (SSP1-2.6) oder mehr nicht mit dem Meeresspiegelanstieg mitwachsen können (Sehr hohes Vertrauen, IPCC AR6: Cooley et al., 2022). Bis 2070 wird erwartet, dass mehr als 75% der Korallen selbst bei einer moderaten Erwärmung von einer jährlichen schweren Bleiche betroffen sein werden (van Hooidonk et al., 2016). Der Verlust von Korallen erhöht nicht nur das Überflutungsrisiko erheblich, sondern auch das Erosionsrisiko, da kranke oder abgestorbene Riffe nicht das Sediment produzieren können, das Korallenriffinseln benötigen, um zu wachsen und mit dem Meeresspiegelanstieg mitzuhalten. Wenn ein Riff gesund ist, können sowohl die Riffe als auch die zugehörigen Inseln mit dem steigenden Meeresspiegel innerhalb bestimmter Grenzen wachsen, je nach der Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs (Montaggioni, 2005; Perry et al., 2018), da die biologisch-detritische Produktivität eines gesunden Riffs die Sedimentversorgung der Inseln aufrechterhält (Tuck et al., 2019).

4.3.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten

Es gibt verschiedene Methoden, die für den Korallenriffschutz bzw. das Wiederaufforsten von Korallen verwendet werden. Diese Methoden lassen sich in die drei Kategorien einteilen: Ungeschlechtliche Vermehrungsmethoden, geschlechtliche Vermehrungsmethoden und Substratverbesserungen. Unter ungeschlechtliche Vermehrungsmethoden fallen Verpflanzungen, Korallengärten und die Mikrofragmentierung, bei der kleine Korallenfragmente zu einer Korallenfliese gezüchtet und dann effizient ausgesetzt werden können. Bei geschlechtlichen Vermehrungsmethoden wird die Larvenvermehrung der Korallen künstlich unterstützt. Letztlich können Substratverbesserungen vorgenommen werden, bei denen künstliche Riffe angelegt werden oder durch den Einsatz von Elektrizität ein schnelleres Wachstum und eine höhere Überlebensrate von Korallentransplantaten versucht wird zu erreichen (Boström-Einarsson et al., 2020). Grundsätzlich schützt man Korallen am besten, indem die negativen, menschengemachten Einflussfaktoren reduziert werden.

In Indonesien ist der Korallenriffschutz weit verbreitet und es gab zwischen 1990-2020 insgesamt 533 Restaurierungsprojekte in 29 der 34 Provinzen Indonesiens (Razak et al., 2022). Auch auf Pari gab es verschiedene Maßnahmen zum Korallenriffschutz (siehe Tabelle 6). Grundsätzlich werden unterschiedliche Methoden und Materialien für die Restaurierungsprojekte in Indonesien verwendet. Es wurden zum Beispiel verschiedene Betonstrukturen, Keramikmodule, Drahtgitterschablonen und andere Stahlstrukturen zur ungeschlechtlichen Vermehrung und Substratverbesserung genutzt. Über die letzten Jahre hat der Korallenriffschutz in Indonesien Fahrt aufgenommen und mehr als zwei Drittel der Projekte wurden seit 2010 umgesetzt (388 Projekte). Kürzlich wurde das "Indonesia Coral Reef Garden"-Programm von der indonesischen Regierung aufgesetzt, um den Korallenriffschutz weiter voranzutreiben.

Jahr	Beschreibung	Durchführende Organisation
1990	Schaffung künstlicher Riffe, mit Hilfe von Reifen und Beton gefüllten Reifen als Dreiecke angeordnet. Jede Einheit bestand aus 60 Reifen. Insgesamt 31 Einheiten mit 1860 Reifen.	Forschungs- und Entwicklungszentrum für Meeresbiologie, Zentrum für ozeanologische Forschung und Entwicklung.
2002	Auf der Südseite von Pari wurden Korallen-Verpflanzungen durchgeführt.	Universität Pertanian
2019	Korallen-Verpflanzungen im Korallenschutzgebiet von Pari und anderen Inseln.	Abteilung für Ernährungssicherung, Maritime Angelegenheiten und Landwirtschaft der DKI-Landesregierung

Tabelle 6: Vergangene Projekte zur Wiederherstellung von Korallenriffen auf Pari (Razak et al., 2022).

Die Kosten für Korallenriffschutz variieren drastisch und hängen stark von der gewählten Methode ab. Die durchschnittlichen Projektkosten von Korallenriffschutz-Projekten in Tropengebieten betragen 400.000 USD pro Hektar in 2010. Für Korallengärten können 6.000 USD pro Hektar anfallen und für den Bau eines künstlichen Riffs bis zu 4.000.000 USD pro Hektar (Bayraktarov et al., 2019). Einzelne Projekte in Indonesien geben eine bessere Orientierungshilfe. So wurden zwischen 2013 und 2015 auf Bali kleine, modulare, offene Strukturen zur Substratstabilisierung und zur Unterstützung der verpflanzten Korallenfragmente errichtet. Insgesamt wurden etwa 11.000 Strukturen auf einem 2 Hektar großen Riff zu Kosten von 174.000 USD errichtet (Williams et al., 2019).

4.4. Verlust von Mangroven

4.4.1. Ursachen

Ähnlich wie Korallen schützen auch Mangroven die Küsten vor Extremereignissen und erbringen eine Reihe wichtiger Ökosystemleistungen, wie die Unterstützung der Fischerei und die Bindung von Kohlenstoff. Mangrovenwälder werden häufig durch Rodung und degradierte Ökosysteme gefährdet (Sierra-Correa and Cantera Kintz, 2015). Mangroven können mit hohen Raten des Meeresspiegelanstiegs mithalten, indem sie den Küstenhang hinauf und mit dem Meeresspiegelanstieg ins Landesinnere wandern. Dies setzt jedoch voraus, dass die Wanderung ins Landesinnere nicht durch steile Küstenhänge oder menschliche Infrastruktur (z.B. Deiche, Straßen, Siedlungen usw.) behindert wird, dass Platz für das Anwachsen vorhanden ist und dass Sedimentvorräte vorhanden sind (Lovelock et al., 2015; Schuerch et al., 2018). Die Platzverfügbarkeit auf Korallenriffinseln ist jedoch oft begrenzt, weil die Küstenzone klein ist und/oder stark vom Menschen genutzt wird (Sasmito et al., 2016). Eine vergleichende Analyse von Mangrovenstandorten, auch auf Korallenriffinseln in der indisch-pazifischen Region, hat ergeben, dass die Mangroven an etwa 70% der untersuchten Standorte bereits heute aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Sedimenten nicht in der Lage sind, sich an den Meeresspiegelanstieg anzupassen (Lovelock et al., 2015).

4.4.2. Heutige Auswirkungen

Die heutigen Auswirkungen des Klimawandels auf Mangroven in Pari lassen sich aufgrund der vielen klimawandelunabhängigen Mitursachen nicht quantifizieren.

4.4.3. Zukünftige Auswirkungen

Die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf Mangroven in Pari lassen sich aufgrund der vielen klimawandelunabhängigen Mitursachen nicht quantifizieren.

4.4.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten

Um den Verlust von Mangroven auszugleichen oder sogar den Mangrovenbestand zu erweitern, können Mangroven neu verpflanzt oder wieder aufgeforstet werden (Lovelock et al., 2022). Damit wird die Küstenschutzfunktion der Mangroven erhalten bzw. erweitert. Dies ist eine auf Korallenriffinseln weit verbreitete und gängige Praxis, die häufig lokal umgesetzt wird. Auch auf Pari werden bereits Mangroven

aufgeforstet. Zum Beispiel wurden am 10. Januar 2022, im Rahmen des nationalen “One Million Trees Day” im Südosten der Insel Mangroven gepflanzt. Auch im Südwesten der Insel gibt es Bemühungen, Mangroven aufzuforsten. Die Kosten für das Aufforsten von Mangroven sind stark ortsabhängig und nehmen mit der Abgeschiedenheit des Verpflanzungsorts zu.

4.5. Versalzung und Verlust von Grundwasser

4.5.1. Ursachen

Süßwasserlinsen (unterirdisches Süßwasservorkommen) von Korallenriffinseln sind aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit und der geringen Geländehöhe der Inseln in besonderem Maße durch den Meeresspiegelanstieg gefährdet (IPCC AR6: Mycoo et al., 2022; IPCC AR5: Nurse et al., 2014). Süßwasserlinsen von Korallenriffinseln bilden sich auf dem in tieferen Schichten vorhandenen Salzwassers aufgrund der etwas geringeren Dichte des Süßwassers. Deswegen kann sich die Süßwasserlinse grundsätzlich mit dem Meeresspiegelanstieg nach oben bewegen. Dies ist aber meist durch die geringe Geländehöhe der Inseln begrenzt (Falkland and White, 2020). Des Weiteren führt die mit dem Meeresspiegelanstieg verbundene häufigere Überflutung von Inseln durch Sturmfluten oder Wellen (Kapitel 4.1) zur Versalzung der Süßwasserlinse, wobei bereits geringe Mengen von Salzwasser, die von oben in diese Linse eindringen, diese für Monate bis Jahre unbrauchbar machen können (Gingerich et al., 2017; Holding and Allen, 2015). Viele Korallenriffinseln sind bereits heute auf die Gewinnung von Trinkwasser durch Entsalzung von Meerwasser oder durch Einfuhr und Nutzung von Brackwasser angewiesen (Falkland and White, 2020).

4.5.2. Heutige Auswirkungen

Aufgrund der geringen Mächtigkeit des Grundwasserleiters in Pari hat der historische Meeresspiegelanstieg zu einer Verschlechterung der Grundwasserqualität beigetragen. Die Lithologie der Insel Pari wird von Korallenkalkstein dominiert. Darüber liegt eine 0,5 bis 1 m mächtige Korallensandschicht, die als Grundwasserleiter fungiert. Die Sandschicht ist in der Mitte der Insel dicker und nimmt zum Inselrand hin ab (Utomo et al., 2017). Wasservolumen und -qualität des Grundwasserleiters werden durch den Niederschlag, die Gezeiten und die Nutzung des Grundwassers bestimmt (Marganingrum et al., 2023). Die Grundwasserqualität wird stark von den Gezeiten beeinflusst und variiert von brackig bis salzig (Utomo et al., 2017). Bei geringen Niederschlagsmengen in der Trockenzeit verringern sich Wasservolumen und Wasserqualität durch eindringendes Meerwasser (Gemilang et al., 2019). Die Bewohner und Bewohnerinnen von Pari nutzen das Grundwasser für den täglichen Bedarf wie Baden und Waschen über Brunnen, die mit einer Tiefe von ein bis zwei Metern in ihren Häusern installiert sind (Bericht von Einheimischen). Zum Trinken und Kochen wird das durch Umkehrosiose destillierte Wasser genutzt, das sie auf der Insel zu einem Preis von 1000 IDR pro Kanister (20 Liter) kaufen können. Die wiederkehrenden und schweren Überflutungen haben das Wasserversorgungssystem auf Pari erheblich beeinträchtigt.

4.5.3. Zukünftige Auswirkungen

Da mit dem Anstieg des Meeresspiegels Überflutungen häufiger werden, verkürzt sich die Erholungszeit von Süßwasserlinsen zunehmend, und es ist davon auszugehen, dass über kurz oder lang das Grundwasser nicht mehr nutzbar sein wird.

4.5.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten

Der Versalzung und dem Verlust von Grundwasser auf Pari kann durch Regenwasserauffangsysteme oder Volumen-erhöhende Maßnahmen des Grundwasserleiters entgegengewirkt werden. Falls dies nicht mehr ausreicht, kann die Wasserverfügbarkeit durch einen Ausbau der Entsalzungsanlagen sichergestellt werden (Utomo et al., 2017). Regenwasserauffangsysteme sind eine weitverbreitete Maßnahme, um die Wasserversorgung auf Korallenriffinseln zu unterstützen. Diese Systeme nutzen meist über Dächer abfließendes Regenwasser, das in einem Tank gesammelt wird und somit dezentral für einzelne Haushalte Wasser bereitstellt. Diese Methode gilt als effektiv und kann sogar zu Dürrezeiten (e.g. El Niño) ausreichend Wasser bereitstellen (Bailey et al., 2018). Außerdem können Volumen-erhöhende Maßnahmen des Grundwasserleiters durchgeführt werden. Dies wurde auf Pari bereits erforscht. In einer ersten

Machbarkeitsstudie zeigen Utomo et al. (2017), dass durch die Erhöhung des Porenvolumens der oberen Sandschicht auf Pari von 30% auf 60%, der Salzgehalt des Grundwassers um 77% abnimmt und damit statt Brackwasser wieder Süßwasser auf einer Bodentiefe von 2,5 m anzufinden war. Sollte die Frequenz der Überflutungen auf Teilen der Insel aufgrund des Meeresspiegelanstiegs allerdings weiter zunehmen, wird es gleichermaßen schwieriger, die Versalzung des Grundwasserleiters wieder auszugleichen. In diesem Falle können die Entsalzungsanlagen auf Pari als ultima ratio ausgebaut werden und die Wasserversorgung sicherstellen (Duvat et al., 2021).

4.6. Versalzung von Böden

4.6.1. Ursachen

Das Eindringen von Meerwasser durch Überflutungen ist die häufigste Ursache für die Versalzung von Böden und wird u.a. vom Meeresspiegelanstieg verursacht (Daliakopoulos et al., 2016). Die Geländehöhe ist die wichtigste Determinante für den Bodensalzgehalt in Küstengebieten. Auf den generell tiefliegenden Korallenriffinseln ist der Bodensalzgehalt somit bereits vergleichsweise hoch (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019).

4.6.2. Heutige Auswirkungen

Die Versalzung von Böden führt zu Veränderungen der Mikroorganismen, der Enzyme und der Schwermetalle im Boden (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). Diese Veränderungen wirken sich negativ auf die landwirtschaftlichen Aktivitäten auf Korallenriffinseln aus. Generell sind landwirtschaftliche Aktivitäten auf Korallenriffinseln bereits stark durch den geringen Platz und durch das biophysikalische Umfeld eingeschränkt. Berichten der lokalen Bevölkerung auf Pari zufolge, können allerdings die gängigen Nutzpflanzen (Kokosnuss, Brotfrucht und Taro) weiterhin angebaut werden.

4.6.3. Zukünftige Auswirkungen

Eine zunehmende Versalzung der wenigen fruchtbaren Böden erschwert das Kultivieren der kompatiblen Pflanzenarten und reduziert den Ertrag. Damit wirkt sich die Versalzung der Böden negativ auf die zukünftige Nahrungsmittelsicherheit auf Pari aus (IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere: Oppenheimer et al., 2019). In anderen Worten wird ein höherer Bodensalzgehalt dazu führen, dass Nutzpflanzen, die heute noch erfolgreich angebaut werden, Ertragsverluste erleiden und ggf. komplett ausfallen werden. Folglich nimmt die Nahrungsmittelsicherheit weiter ab, da Nahrung zunehmend oder vollkommen vom Festland importiert werden muss.

4.6.4. Anpassungsmaßnahmen und Kosten

Zur Reduktion des Bodensalzgehalts kann der Boden rekultiviert, anders gedüngt, bewässert oder ausgelaugt werden (Machado and Serralheiro, 2017). Allerdings sind diese Anpassungsmaßnahmen langwierig, kostenintensiv und setzen vor allem eine hohe Verfügbarkeit von Süßwasser voraus. Bei der Rekultivierung des Bodens würden Salze im Boden an Calciumsulfat gebunden und dann ausgespült werden. Da Süßwasser auf Pari knapp und kostbar ist, erscheint eine Rekultivierung des Bodens als nicht kosteneffektiv. Neben Maßnahmen, die auf eine Reduktion des Bodensalzgehalts abzielen, kann auch eine Fruchtänderung durchgeführt werden. Taro ist zum Beispiel ein weit verbreitete Nutzpflanze im asiatisch-pazifischen Raum, dessen Nährstoffqualität durch zunehmende Bodensalzgehalte nur geringfügig beeinträchtigt wird (Lloyd et al., 2021). Somit kann davon ausgegangen werden, dass Taro auch auf Pari weiterhin erfolgreich angebaut werden kann.

5. Zusammenfassung

5.1. Kausalzusammenhänge zwischen dem menschengemachten Klimawandel und den Flutschäden auf der Insel Pari

Dieses Kapitel prüft, ob es eine überwiegende Wahrscheinlichkeit gibt, dass die menschengemachte Klimaerwärmung und der damit verbundene Meeresspiegelanstieg bereits heute zu klimawandelbedingten Auswirkungen auf die Insel Pari und zu Schäden geführt haben, bzw. in der Zukunft zu Schäden führen werden. Unter Schäden verstehen wir (i) Kosten für Reparatur und Ersatz von beschädigten Gebäuden und Inventar, (ii) Kosten, die durch Einnahmeausfälle entstehen, sowie (iii) Kosten für allgemeine und individuelle Anpassungsmaßnahmen, wie z.B. im Fall der Bevölkerung von Pari das Bauen von Hochwasserschutzmauern, Gabionen oder Wellenbrechern, die Erhöhung des Geländes oder der Häuser, Sandaufspülungen, der Korallenriffschutz, das Aufforsten von Mangroven und der Einbau von Wasserfilteranlagen aufgrund der Versalzung des Grundwassers (siehe Kapitel 4).

5.1.1. Heutige Schäden

Es ist so gut wie sicher, dass die menschengemachte Klimaerwärmung und der damit verbundene Meeresspiegelanstieg bereits heute zu klimawandelbedingten Auswirkungen und Schäden auf Pari geführt haben. Der mittlere Meeresspiegel ist durch den menschengemachten Klimawandel im Zeitraum von 1861 und 2005 zwischen 11 und 21 cm in der Region um Pari angestiegen (siehe Kapitel 2.2.2). Dazu kommen noch rund 5 cm für den Zeitraum von 2005 bis 2021 dazu, ausgehend von der durch Satelliten seit 1992 gemessenen durchschnittlichen Anstiegsrate von 3,3 mm/Jahr (siehe Kapitel 2.1.2). Das ergibt folglich einen menschengemachten Meeresspiegel von 16 bis 26 cm. Das heißt, ohne menschengemachten Klimawandel lägen der mittlere Meeresspiegel und damit auch die Extremwasserstände, die zu den Überflutungen in den Jahren 2021/22 geführt haben (siehe Kapitel 4.1.4), zwischen 16 und 26 cm niedriger. In diesem Fall wäre z.B. das Haus von Herrn Arif Pujanto (Bertempat Tinggal di Pulau Pari RT004/004, Kelurahan Pulau Pari, Kecamatan Kepulauan Seribu Kabupaten, Adminitrasi Kepulauan Seribu), welches am 4./5. Dezember 2021 um ca. 20 cm überschwemmt wurde, nicht oder lediglich um 4 cm überschwemmt worden.

5.1.2. Zukünftige Schäden

Es ist so gut wie sicher, dass die menschengemachte Klimaerwärmung und der damit verbundene Meeresspiegelanstieg zu zukünftigen, klimawandelbedingten Auswirkungen und Schäden auf Pari führen werden. Der letzte IPCC Sachstandsbericht (AR6) stellt fest, dass es so gut wie sicher ist, dass der globale mittlere Meeresspiegel weiter ansteigen wird (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021) und ein höherer mittlerer Meeresspiegel führt zwangsläufig zu höheren und häufigeren Überflutungen (Kapitel 4.1), verstärkter Küstenerosion (Kapitel 4.2), Versalzung und Verlust von Grundwasser (Kapitel 4.5) und Böden (Kapitel 4.6), bzw. zu allgemeinen und individuellen Anpassungskosten, um diese zu Schäden zu vermeiden. Dies gilt insbesondere für tropische Korallenriffinseln wie Pari, für die schon ein geringer Anstieg des Meeresspiegels im Dezimeter Bereich zu großen Schäden führt, weil die Inselgruppe besonders niedrig liegt (65% der Fläche unter 1 m Geländehöhe; Siehe Kapitel 4.1.2) und geringe Bandbreiten von Extremwasserständen aufweisen (rund 20 cm; Kapitel 3.1.2) und somit Bebauungen und Nutzungen wenige Dezimeter über dem mittleren Meeresspiegel vorhanden sind. Zu beachten ist auch, dass der menschengemachte Meeresspiegelanstieg selbst dann weiter voranschreitet, wenn die Treibhausgasemissionen sofort auf Null reduziert werden würden, weil das Abschmelzen der Gletscher und Polkappen um Jahrhunderte bis Jahrtausende verzögert auf Treibhausgasemissionen und Erderwärmung reagiert (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). So werden zum Beispiel die Emissionen, die in der Vergangenheit (bis zum Jahr 2016) ausgestoßen wurden, unabwendbar zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von 0,7 bis 1,1 m (wahrscheinliche Bandbreite) bis 2300 führen (Nauels et al., 2019). Das heißt, dass historische Emissionen auch für zukünftige, noch auftretende Schäden verantwortlich sind.

Der mittlere Meeresspiegel wird aufgrund des menschengemachten Klimawandels für die nächsten Jahrhunderte bis Jahrtausende weiter ansteigen, wobei das Ausmaß des künftigen Meeresspiegelanstiegs maßgeblich davon abhängt, wie stark sich die Erde erwärmt (hohes Vertrauen) (IPCC AR6: Fox-Kemper et al., 2021). Wenn die Weltgemeinschaft es schafft, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu beschränken, ergibt sich eine wahrscheinliche Bandbreite des globalen mittleren Meeresspiegelanstieg von 0,3-0,6 m in 2100, 2-3 m in 2.000 Jahren und 6-7 m in 10.000 Jahren (Tabelle 1). Im Fall ungeminderter Emissionen und einer Erwärmung um 5,0°C in 2100, liegt die wahrscheinliche Bandbreite des Meeresspiegelanstieg bei 0,7 bis 1,1 m in 2100, 19 bis 22 m in 2.000 Jahren und 28 bis 37 m in 10.000 Jahren.

Wie die Insel Pari zukünftig bewohnbar sein wird, lässt sich aufgrund der hohen Unsicherheit über zukünftige Treibhausgasemissionen und den Meeresspiegelanstieg heute nicht sagen, aber es ist kaum vorstellbar, dass die Insel Pari langfristig für Menschen bewohnbar bleibt, wenn die Emissionen nicht drastisch gesenkt werden. Im Falle, dass die Weltgemeinschaft es schafft, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu beschränken, wird Pari für die nächsten Jahrhunderte im Prinzip bewohnbar bleiben, sofern genügend Ressourcen für Küstenschutzmaßnahmen (Kapitel 4.1.6) vorhanden sind und die Inselbevölkerung bereit und in der Lage ist, in einer stark veränderten Umgebung zu leben (hohes Vertrauen). In diesem Fall müssten dichter besiedelte Gebiete eingedämmt werden, Häuser und Infrastruktur müssten erhöht werden und Trink- und Brauchwasser müssten importiert oder aus Meerwasser hergestellt werden. Im Fall ungeminderter Treibhausgasemissionen (e.g., einer Erderwärmung um 5,0°C) kann es bereits gegen Ende des 21sten Jahrhunderts notwendig werden, die Insel Pari aufzugeben. In jedem Fall wird es eine große Herausforderung sein, Einkommensmöglichkeiten aus Tourismus, Fischerei und Gartenbau zu erhalten, was sich wiederum auf die Bewohnbarkeit der Insel auswirkt.

5.2. Quantitative Zuordnung heutiger und zukünftiger Flutschäden

Dieses Unterkapitel quantifiziert exemplarisch den Anteil, den der anthropogene Anstieg des Meeresspiegels an bisher aufgetretenen (Kapitel 5.2.1) und zukünftig zu erwartenden (Kapitel 5.2.2) Flutschäden auf der Insel Pari hat. Der durch die menschengemachte Klimaerwärmung verursachte Schaden ergibt sich dabei aus der Differenz der Schäden eines *faktischen* Szenarios, welches das beschreibt, was passiert ist oder passieren kann (z.B. 1,5°C globale Erwärmung oder 5°C globale Erwärmung), und einem *kontrafaktischen* Referenzszenario, welches die Welt ohne Klimawandel beschreibt.

5.2.1. Heutige Schäden

Die Zuordnung bereits aufgetretener, beobachteter Schäden bezieht sich immer auf ein einzelnes Extremereignis. Hier beschränken wir uns auf die Schäden der Überflutung vom 4./5. Dezember, weil bei diesem Ereignis das Haus von Arif Pujanto mit einem Wasserstand von ungefähr 20 cm überflutet wurde. Die Exposition des Hauses von Arif Pujanto sowie die durch das Flutereignis vom 4./5. Dezember 2021 aufgetretenen Schäden sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Exposition		Schäden der Überflutung vom 4./5. Dezember			
Exponierte Werte		Kapitalwert (Herstellungswert)	Schadensart	Beschreibung	Kosten (Millionen IDR)
Gebäude	Wohngebäude	Material und Lohnkosten IDR 300 Millionen (circa 20.230 CHF ²)	Reparatur des Wohngebäudes	Sachkosten für Holz zur Reparatur betragen IDR 3 Millionen. Angaben über Lohnkosten liegen nicht vor.	3,0
Inventar	Grundwasserquelle (Pegel liegt weniger als 2 Meter tief)	N/A	Mehrbedarf an aufbereitetem Wasser	Mehrbedarf an aufbereitetem Wasser von der örtlichen Wasseraufbereitungsanlage zum täglichen Bedarf und Reinigen von Haus nach der Flut.	0,14
	Werkzeuge, v.a. 2 elektrische Schweißgeräte	IDR 2,3 Millionen (circa CHF 155 ¹)	Keine		Nicht verfügbar
Einkommen	Handwerkliche Tätigkeit	N/A	Reinigung und Reparatur	5 Tage Arbeitsausfall für Reinigen von Häusern, Gärten, Wege und den Strand von Schlamm und Treibgut, Schutt entsorgen und die Häuser und Einrichtungen wieder bewohnbar herrichten	Nicht verfügbar
	Touristische Tätigkeit	N/A	Fehlen von Strandgästen	Mehrere Wochen blieben Touristen fern	Nicht verfügbar

Tabelle 7: Exposition des Hauses von Arif Pujanto und die aufgetretenen Schäden durch die Überflutung vom 4./5. Dezember. Die Angaben stammen von Arif Pujanto.

80-100% des Schadens des Flutereignisses vom 4./5. Dezember 2021 an dem Gebäude von Arif Pujanto lässt sich dem anthropogenen Meeresspiegelanstieg zuordnen. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, läge in einer kontrafaktischen Welt ohne menschengemachten Klimawandel der mittlere Meeresspiegel und damit auch der extreme Meeresspiegel am 4./5. Dezember 2021 wahrscheinlich rund 16 bis 26 cm unter dem heutigen Meeresspiegel. Wenn man die obere Schranke annimmt, wäre das Haus des Klägers 2 nicht überschwemmt worden, d.h. der aufgetretene Schaden kann zu 100% dem anthropogenen Meeresspiegelanstieg zugeordnet werden. Wenn man die untere Schranke annimmt, wäre das Haus von Arif Pujanto nur um 4 cm überschwemmt worden. Unter der Annahme einer linearen Schadensfunktion läge der Schaden in der kontrafaktischen Welt bei $4/20 = 20\%$ des tatsächlich aufgetretenen Schadens.

5.2.2. Zukünftige Schäden

Bei der quantitativen Zuordnung zukünftiger, durch den anthropogenen Meeresspiegelanstieg verursachter Schäden kann man sich nicht auf einzelne Extremereignisse beziehen, da diese ja zukünftig und noch nicht im Einzelnen bekannt sind. Stattdessen muss sich die Zuordnung auf das aus allen möglichen, zukünftigen Extremereignissen resultierende Schadensrisiko beziehen. Dabei ist zu beachten, dass der Meeresspiegel klimawandelbedingt auch dann weiter ansteigt, wenn die Treibhausgasemissionen sofort auf Null reduziert werden würden (siehe Kapitel 5.1.1).

Die Analyse der Extremwasserstände ergibt, dass sich das Haus von Arif Pujanto rund 70 bis 90 cm über dem mittleren Meeresspiegel befindet. Eine große Unsicherheit bei der Ermittlung zukünftiger Schäden für Arif Pujanto ist das Fehlen genauer Geländehöhen (wie hoch das Haus über dem mittleren Meeresspiegel liegt). Laut des digitalen Geländemodells liegt das Haus von Arif Pujanto 1,05 m über dem mittleren Meeresspiegel (Kapitel 4.1.2). Dieser Wert ist aber mit Unsicherheiten behaftet. Laut der Reanalysedaten der Extremwasserstände (Kapitel 3.1.2) muss das Haus zwischen 70 und 90 cm über dem mittleren Meeresspiegel liegen, unter der Annahme, dass die Wiederkehrperiode der Flut des 4./5. Dezember zwischen 1 und 1000 Jahren lag, was eine sehr sichere Annahme ist. Da das Haus um 20 cm überflutet wurde und die Höhe der einjährigen Flut rund 90 cm ist und die der 1000-jährigen Flut rund 110 cm ist, ergibt sich daraus eine Höhe des Hauses von 70 bis 90 cm über dem mittleren Meeresspiegel.

² Wechselkurs Oanda.com vom 14. Juni 2022.

Exemplarische Modellrechnungen nach wissenschaftlichen Standards zeigen, dass die Schäden aufgrund des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs schnell ansteigen. Eine Analyse zu erwartender Schäden wurde mit einer Standard-Tiefen-Schadensfunktion (Depsky et al., 2022; Diaz, 2016; Hinkel et al., 2014; Lincke and Hinkel, 2021) und mit einer Halbschadentiefe (Wassertiefe, die 50% des Gebäudewertes als Schaden verursacht) von 0,75 m (entspricht dem ermittelten Wert für Wohngebäude in Asien nach Huizinga et al. (2017)) durchgeführt und ist in Abbildung 14 dargestellt.

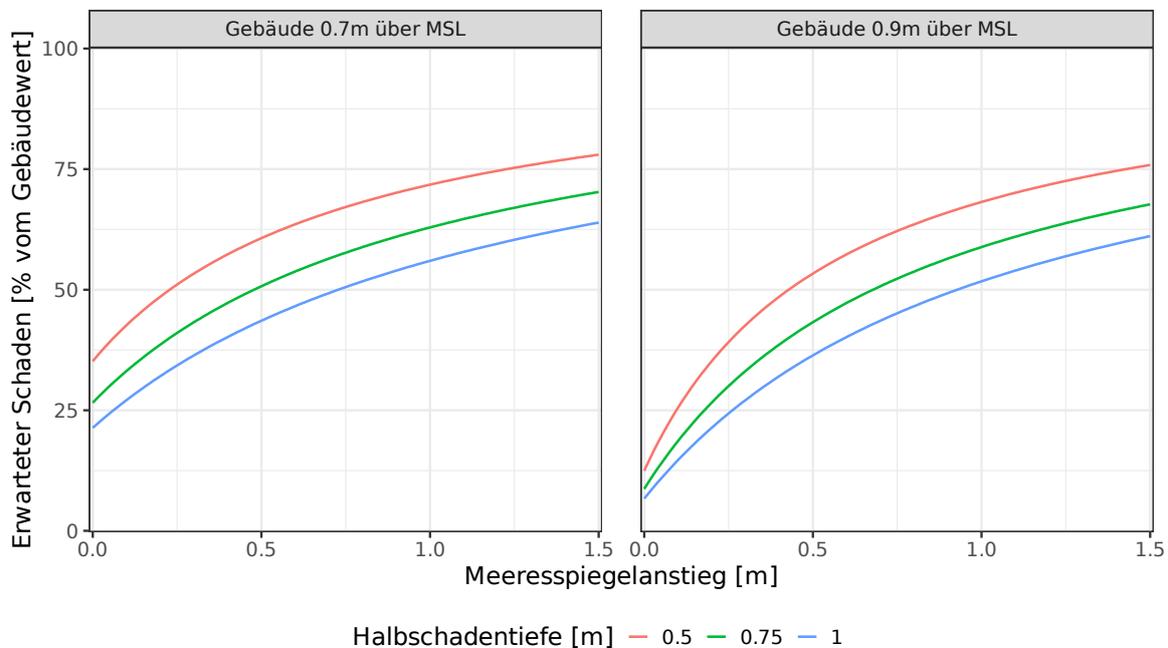


Abbildung 14: Der Erwartungswert des Schadens durch Überflutung für Gebäude auf Pari auf einer Höhe von 0,7 (links) und 0,9 (rechts) Meter über dem mittleren Meeresspiegel als Prozentsatz vom Gebäudewert, abhängig vom Meeresspiegelanstieg. Die Farbe kodiert die Verwendung von verschiedenen Halbschadentiefen.

Für ein exemplarisches Beispielgebäude ergibt sich, dass zukünftige Schäden im Umfang von 52% bis 99,9% dem anthropogenen Meeresspiegelanstieg zuzuordnen sind und zwar unabhängig von dem zu erwartenden Meeresspiegelanstieg unter den Szenarien SSP1-RCP1.9 und SSP2-RCP8.5. Die für die verschiedenen Meeresspiegelanstiegsszenarien zu erwartenden Schäden eines Gebäudes, das auf 0,7 m bzw. 0,9 m Höhe über dem mittleren Meeresspiegel steht, sind in Tabelle 8 dargestellt. Aus diesen Beispielrechnungen ergibt sich, welchen Anteil der anthropogene Meeresspiegelanstieg an den Gesamtschäden hat. Es ist zu erwarten, dass aufgetretene Schäden irgendwann nicht mehr repariert werden können, da durch den Meeresspiegelanstieg das Gebäude permanent unter Wasser steht. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, beträgt der durchschnittliche höchste Wasserstand eines Tages während der Flut (Mean higher high water - MHHW) 0,55 m über dem mittleren Meeresspiegel. Unter der Annahme, dass das Gebäude aufgegeben wird, wenn die Höhe des Grundes auf dem es steht unter diesen Wert fällt, ergibt sich, dass ein Gebäude, das heute 0,7 m über dem Meeresspiegel liegt, nach 0,15 m Meeresspiegelanstieg aufgegeben wird und eines das 0,9 m über dem Meeresspiegel liegt, bei 0,35 m Meeresspiegelanstieg aufgegeben wird.

Tabelle 8 zeigt die berechneten Schäden bis zu dem Zeitpunkt der Aufgabe, die Kosten für ein neues Gebäude und die Summe dieser auftretenden Kosten. Des Weiteren setzt diese Tabelle die Schäden unter den oben aufgeführten Meeresspiegelanstiegsszenarien ins Verhältnis zu einem Szenario gänzlich ohne Meeresspiegelanstieg. Damit lässt sich der Teil des Schadens quantifizieren, der sich auf den anthropogenen Meeresspiegelanstieg zurückführen lässt. Dieser ist für Gebäude, die höher liegen, höher als für tiefer liegende Gebäude, weil höher liegende Gebäude praktisch keinen Schaden ohne Meeresspiegelanstieg erleiden.

	Szenarien		
	Kontrafaktisches Szenario (kein Meeresspiegelanstieg)	SSP1-RCP1.9	SSP2-RCP8.5
Geländehöhe über mittlerem Meeresspiegel im Jahr 2020 (cm).	90 / 110	70 / 90	70 / 90
Erwarteter jährlicher Schaden 2022 (IDR Millionen)	26 / 0,01	80 / 26	80 / 26
Wegziehhjahr (wenn MS+MHHW (0,55m) > Geländehöhe)	nie	2050 / 2100	2050 / 2070
Nicht diskontierte Summe der jährlichen Schäden bis 2100 bzw. dem Wegziehhjahr (IDR Millionen)	2000 / 0,7	3900 / 6200	3900 / 4500
Erwarteter jährlicher Schaden im Wegziehhjahr (IDR Millionen)	-	38 / 37	40 / 38
Kosten für neues Gebäude anderswo (IDR Millionen)	0	300	300
Gesamtschaden (IDR Millionen)	2000 / 0,7	4200 / 6500	4200 / 4800
Anteil des anthropogenen Klimawandels am Gesamtschaden (%)	0 / 0	52% / 99,9%	52% / 99,9%

Tabelle 8: Erwartete Schäden an einem Beispielgebäude, das auf einer Höhe von 0,7 m / 0,9 m über dem heutigen mittleren Meeresspiegel steht, bis zu einem hypothetischen Wegzugsjahr, in welchem das Gebäude bei der mittleren (Tiden-)flut überflutet wird. Die letzte Zeile stellt dar, wie hoch der Anteil des Schadens ist, der dem Meeresspiegelanstieg zugeordnet werden kann. Die Zahlen stammen aus einer Beispielrechnung der Autoren und Autorinnen, basierend auf den Angaben in Tabelle 7. Die Umzugskosten umfassen dabei nur den Gebäudewert (der mit 300 Millionen IDR angenommen wurde - siehe Tabelle 7). Die Meeresspiegelanstiegsszenarien stammen vom IPCC (Kapitel 2.1.3). Als Halbschadentiefe wurde 0,75 m verwendet (siehe Abbildung 14).

6. Danksagungen

Die Autoren und Autorinnen dieser Studie möchten sich bei folgenden Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen für Ihre Unterstützung beim Erstellen dieser Studie bedanken. Wir danken Michalis Voudoukas und dem *Joint Research Center* der Europäischen Kommission für das zur Verfügung stellen des Digitalen Geländemodells für Pari. Wir danken Virginie Duvat-Magnan und Gonéri Le Cozannet für Hinweise zur Geologie der Insel Pari, sowie Tilo Schöne für das zur Verfügung stellen der Altimeter Satellitendaten.

7. Literatur

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y.E., Deguchi, T., 2011. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Nat. Hazards* 59, 1753–1771. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>
- Aerts, J., 2018. A Review of Cost Estimates for Flood Adaptation. *Water* 10, 1646. <https://doi.org/10.3390/w10111646>
- Andersen, O.B., Knudsen, P., 2009. DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models. *J. Geophys. Res.* 114, C11001. <https://doi.org/10.1029/2008JC005179>
- Arias, P.A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R.G., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M.D., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P.W., Trewin, B., Achuta Rao, K., Adhikary, B., Allan, R.P., Armour, K., Bala, G., Barimalala, R., Berger, S., Canadell, J.G., Cassou, C., Cherchi, A., Collins, W., Collins, W.D., Connors, S.L., Corti, S., Cruz, F., Dentener, F.J., Dereczynski, C., Di Luca, A., Diongue Niang, A., Doblas-Reyes, F.J., Dosio, A., Douville, H., Engelbrecht, F., Eyring, V., Fischer, E., Forster, P., Fox-Kemper, B., Fuglestedt, J.S., Fyfe, J.C., Gillett, N.P., Goldfarb, L., Gorodetskaya, I., Gutierrez, J.M., Hamdi, R., Hawkins, E., Hewitt, H.T., Hope, P., Islam, A.S., Jones, C., Kaufman, D.S., Kopp, R.E., Kosaka, Y., Kossin, J., Krakovska, S., Lee, J.-Y., Li, J., Mauritsen, T., Maycock, T.K., Meinshausen, M., Min, S.-K., Monteiro, P.M.S., Ngo-Duc, T., Otto, F., Pinto, I., Pirani, A., Raghavan, K., Ranasinghe, R., Ruane, A.C., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Samset, B.H., Sathyendranath, S., Seneviratne, S.I., Sörensson, A.A., Szopa, S., Takayabu, I., Tréguier, A.-M., van den Hurk, B., Vautard, R., von Schuckmann, K., Zaehle, S., Zhang, X., Zickfeld, K., 2021. Technical Summary. *Clim. Change 2021 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group Sixth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change.* <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Aslam, M., Kench, P.S., 2017. Reef island dynamics and mechanisms of change in Huvadhu Atoll, Republic of Maldives, Indian Ocean. *Anthropocene* 18, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.05.003>
- Bailey, R.T., Beikmann, A., Kottermair, M., Taboroši, D., Jenson, J.W., 2018. Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities. *J. Hydrol.* 557, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.016>
- Bamber, J.L., Oppenheimer, M., Kopp, R.E., Aspinall, W.P., Cooke, R.M., 2019. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116, 11195–11200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116>
- Bayraktarov, E., Stewart-Sinclair, P.J., Brisbane, S., Boström-Einarsson, L., Saunders, M.I., Lovelock, C.E., Possingham, H.P., Mumby, P.J., Wilson, K.A., 2019. Motivations, success, and cost of coral reef restoration. *Restor. Ecol.* 27, 981–991. <https://doi.org/10.1111/rec.12977>
- BBC News Indonesia, 2021. Pulau-pulau Indonesia terancam tenggelam: Bertahan walau rumah mulai tergenang.
- Beck, M.W., Losada, I.J., Menéndez, P., Reguero, B.G., Díaz-Simal, P., Fernández, F., 2018. The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nat. Commun.* 9, 2186. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z>
- Bisaro, A., de Bel, M., Hinkel, J., Kok, S., Bouwer, L.M., 2019. Leveraging public adaptation finance through urban land reclamation: cases from Germany, the Netherlands and the Maldives. *Clim. Change.* <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02507-5>
- Boström-Einarsson, L., Babcock, R.C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S.C.A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D., Stewart-Sinclair, P.J., Vardi, T., McLeod, I.M., 2020. Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLOS ONE* 15, e0226631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631>
- Bramante, J.F., Ashton, A.D., Storlazzi, C.D., Cheriton, O.M., Donnelly, J.P., 2020. Sea Level Rise Will Drive Divergent Sediment Transport Patterns on Fore Reefs and Reef Flats, Potentially Causing Erosion on Atoll Islands. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JF005446>
- Cazenave, A., Moreira, L., 2022. Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review. *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 478, 20220049. <https://doi.org/10.1098/rspa.2022.0049>
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., Unnikrishnan, A.S.,

2013. Sea Level Change, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1137–1216.
- Cooley, S.R., David S. Schoeman, Laurent Bopp, Philip Boyd, Simon Donner, Shin-Ichi Ito, Wolfgang Kiessling, Paulina Martinetto, Elena Ojea, Marie-Fanny Racault, Björn Rost, Mette Skern-Mauritzen, Dawit Yemane Ghebrehiwet, 2022. Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services, in: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2123–2161.
- Daliakopoulos, I.N., Tsanis, I.K., Koutroulis, A., Kourgialas, N.N., Varouchakis, A.E., Karatzas, G.P., Ritsema, C.J., 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Sci. Total Environ.* 573, 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- Darsan, J., Alexis, C., 2014. The Impact of Makeshift Sandbag Groynes on Coastal Geomorphology: A Case Study at Columbus Bay, Trinidad. *Environ. Nat. Resour. Res.* 4, p94. <https://doi.org/10.5539/enrr.v4n1p94>
- Depsky, N., Bolliger, I., Allen, D., Choi, J.H., Delgado, M., Greenstone, M., Hamidi, A., Houser, T., Kopp, R.E., Hsiang, S., 2022. DSCIM-Coastal v1.0: An Open-Source Modeling Platform for Global Impacts of Sea Level Rise. *EGUsphere* 1–47. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-198>
- Diaz, D.B., 2016. Estimating global damages from sea level rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM). *Clim. Change* 137, 143–156. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1675-4>
- Dullaart, J., Muis, S. (Sanne), Bloemendaal, N., Chertova, Maria, Couasnon, Anais, Aerts, J.C.J.H. (Jeroen), 2022. COAST-RP: A global COastal dAtaset of Storm Tide Return Periods. <https://doi.org/10.4121/13392314.V2>
- Dullaart, J.C.M., Muis, S., Bloemendaal, N., Chertova, M.V., Couasnon, A., Aerts, J.C.J.H., 2021. Accounting for tropical cyclones more than doubles the global population exposed to low-probability coastal flooding. *Commun. Earth Environ.* 2, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00204-9>
- Duvat, V.K.E., 2020. Human-driven atoll island expansion in the Maldives. *Anthropocene* 32, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100265>
- Duvat, V.K.E., 2019. A global assessment of atoll island planform changes over the past decades. *WIREs Clim. Change* 10, e557. <https://doi.org/10.1002/wcc.557>
- Duvat, V.K.E., Magnan, A.K., 2019. Rapid human-driven undermining of atoll island capacity to adjust to ocean climate-related pressures. *Sci. Rep.* 9, 15129. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51468-3>
- Duvat, V.K.E., Magnan, A.K., Perry, C.T., Spencer, T., Bell, J.D., Wabnitz, C.C.C., Webb, A.P., White, I., McInnes, K.L., Gattuso, J., Graham, N.A.J., Nunn, P.D., Le Cozannet, G., 2021. Risks to future atoll habitability from climate-driven environmental changes. *WIREs Clim. Change* 12. <https://doi.org/10.1002/wcc.700>
- Falkland, T., White, I., 2020. Freshwater Availability Under Climate Change, in: Kumar, L. (Ed.), *Climate Change and Impacts in the Pacific*, Springer Climate. Springer International Publishing, Cham, pp. 403–448. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32878-8_11
- Fenoglio-Marc, L., Schöne, T., Illigner, J., Becker, M., Manurung, P., Khafid, 2012. Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region. *Mar. Geod.* 35, 137–150. <https://doi.org/10.1080/01490419.2012.718682>
- Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airoidi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat. Commun.* 5, 3794. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., et al., 2021. Chapter 9: Ocean, cryosphere and sea level change, in: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Gemilang, W.A., Hasanah, N.N., Wish, U.J.J., 2019. Karakteristik Hidrogeokimia Akuifer Tak Terkekang Kawasan Pesisir Pulau Weh, Aceh. *J. SUMBER DAYA AIR* 15, 27–38. <https://doi.org/10.32679/jsda.v15i1.481>
- Gingerich, S.B., Voss, C.I., Johnson, A.G., 2017. Seawater-flooding events and impact on freshwater lenses

- of low-lying islands: Controlling factors, basic management and mitigation. *J. Hydrol.* 551, 676688. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.001>
- Grunau, P., 2012. *Meteorologie für den Nautiker: Eine Betrachtung über die wesentlichen Aspekte der Klimatologie, Meteorologie, Laderaum-Meteorologie, sowie der meteorologischen Navigation*. BoD – Books on Demand.
- Gussmann, G., Hinkel, J., 2021. A framework for assessing the potential effectiveness of adaptation policies: Coastal risks and sea-level rise in the Maldives. *Environ. Sci. Policy* 115, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.028>
- Hamlington, B.D., Frederikse, T., Nerem, R.S., Fasullo, J.T., Adhikari, S., 2020a. Investigating the Acceleration of Regional Sea Level Rise During the Satellite Altimeter Era. *Geophys. Res. Lett.* 47, e2019GL086528. <https://doi.org/10.1029/2019GL086528>
- Hamlington, B.D., Gardner, A.S., Ivins, E., Lenaerts, J.T.M., Reager, J.T., Trossman, D.S., Zaron, E.D., Adhikari, S., Arendt, A., Aschwanden, A., Beckley, B.D., Bekaert, D.P.S., Blewitt, G., Caron, L., Chambers, D.P., Chandanpurkar, H.A., Christianson, K., Csatho, B., Cullather, R.I., DeConto, R.M., Fasullo, J.T., Frederikse, T., Freymueller, J.T., Gilford, D.M., Giroto, M., Hammond, W.C., Hock, R., Holschuh, N., Kopp, R.E., Landerer, F., Larour, E., Menemenlis, D., Merrifield, M., Mitrovica, J.X., Nerem, R.S., Nias, I.J., Nieves, V., Nowicki, S., Pangaluru, K., Piecuch, C.G., Ray, R.D., Rounce, D.R., Schlegel, N.-J., Seroussi, H., Shirzaei, M., Sweet, W.V., Velicogna, I., Vinogradova, N., Wahl, T., Wiese, D.N., Willis, M.J., 2020b. Understanding of Contemporary Regional Sea-Level Change and the Implications for the Future. *Rev. Geophys.* 58, e2019RG000672. <https://doi.org/10.1029/2019RG000672>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Perrette, M., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C., Levermann, A., 2014. Coastal flood damage and adaptation cost under 21st century sea-level rise. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 3292–3297. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>
- Holdaway, A., Ford, M., Owen, S., 2021. Global-scale changes in the area of atoll islands during the 21st century. *Anthropocene* 33, 100282. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100282>
- Holding, S., Allen, D.M., 2015. From days to decades: numerical modelling of freshwater lens response to climate change stressors on small low-lying islands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 933–949. <https://doi.org/10.5194/hess-19-933-2015>
- Hughes, T.P., Anderson, K.D., Connolly, S.R., Heron, S.F., Kerry, J.T., Lough, J.M., Baird, A.H., Baum, J.K., Berumen, M.L., Bridge, T.C., Claar, D.C., Eakin, C.M., Gilmour, J.P., Graham, N.A.J., Harrison, H., Hobbs, J.-P.A., Hoey, A.S., Hoogenboom, M., Lowe, R.J., McCulloch, M.T., Pandolfi, J.M., Pratchett, M., Schoepf, V., Torda, G., Wilson, S.K., 2018. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science* 359, 80–83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>
- Hughes, T.P., Barnes, M.L., Bellwood, D.R., Cinner, J.E., Cumming, G.S., Jackson, J.B.C., Kleypas, J., Leemput, I.A. van de, Lough, J.M., Morrison, T.H., Palumbi, S.R., Nes, E.H. van, Scheffer, M., 2017. Coral reefs in the Anthropocene. *Nature* 546, 82–90. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Huizinga, J., de Moel, H., Szewczyk, W., 2017. Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines (No. EUR 28552). European Commission, Joint Research Centre.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Kench, P.S., 2012. Compromising Reef Island Shoreline Dynamics: Legacies of the Engineering Paradigm in the Maldives, in: *Pitfalls of Shoreline Stabilization: Selected Case Studies*, Coastal Research Library. Springer Science+Business Media.
- Klöck, C., 2019. Dealing with climate change in the German Wadden Sea: Perceptions, measures, and contestation on Hallig Hooge. *Ocean Coast. Manag.* 179, 104864.

- <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104864>
- Klöck, C., Duvat, V.K.E., Nunn, P.D., 2022. Maladaptive diffusion? The spread of hard protection to adapt to coastal erosion and flooding along island coasts in the Pacific and Indian Ocean. *Reg. Environ. Change* 22, 136. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01989-x>
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Glob. Change Biol.* 19, 1884–1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
- Kumar, L., Eliot, I., Nunn, P.D., Stul, T., McLean, R., 2018. An indicative index of physical susceptibility of small islands to coastal erosion induced by climate change: an application to the Pacific islands. *Geomat. Nat. Hazards Risk* 9, 691–702. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1455749>
- Lincke, D., Hinkel, J., 2021. Coastal Migration due to 21st Century Sea-Level Rise. *Earths Future* 9. <https://doi.org/10.1029/2020EF001965>
- Linham, M.M., Nicholls, R.J., 2012. Adaptation technologies for coastal erosion and flooding: a review. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Marit. Eng.* 165, 95–112. <https://doi.org/10.1680/maen.2011.29>
- Lloyd, G.R., Uesugi, A., Gleadow, R.M., 2021. Effects of Salinity on the Growth and Nutrition of Taro (*Colocasia esculenta*): Implications for Food Security. *Plants* 10, 2319. <https://doi.org/10.3390/plants10112319>
- Lovelock, C.E., Barbier, E., Duarte, C.M., 2022. Tackling the mangrove restoration challenge. *PLOS Biol.* 20, e3001836. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001836>
- Lovelock, C.E., Cahoon, D.R., Friess, D.A., Guntenspergen, G.R., Krauss, K.W., Reef, R., Rogers, K., Saunders, M.L., Sidik, F., Swales, A., Saintilan, N., Thuyen, L.X., Triet, T., 2015. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature* 526, 559–563. <https://doi.org/10.1038/nature15538>
- Lowe, J.A., Gregory, J.M., Flather, R.A., 2001. Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. *Clim. Dyn.* 18, 179–188. <https://doi.org/10.1007/s003820100163>
- Lowe, R.J., Falter, J.L., Bandet, M.D., Pawlak, G., Atkinson, M.J., Monismith, S.G., Koseff, J.R., 2005. Spectral wave dissipation over a barrier reef. *J. Geophys. Res. Oceans* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002711>
- Machado, R., Serralheiro, R., 2017. Soil Salinity: Effect on Vegetable Crop Growth. *Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. Horticulturae* 3, 30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030>
- Madduppa, H.H., Ferse, S.C.A., Aktani, U., Palm, H.W., 2012. Seasonal trends and fish-habitat associations around Pari Island, Indonesia: setting a baseline for environmental monitoring. *Environ. Biol. Fishes* 95, 383–398. <https://doi.org/10.1007/s10641-012-0012-7>
- Major, D.C., Blaschke, P., Gornitz, V., Hosek, E., Lehmann, M., Lewis, J., Loehr, H., Major-Ex, G.A., Pedersen Zari, M., Vásquez Vargas, M.J., Watterson, E., Wejs, A., 2021. Adaptation to climate change in small island settlements. *Ocean Coast. Manag.* 212, 105789. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105789>
- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y.E., Deguchi, T., 2011. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Nat. Hazards* 59, 1753–1771. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>
- Aerts, J., 2018. A Review of Cost Estimates for Flood Adaptation. *Water* 10, 1646. <https://doi.org/10.3390/w10111646>
- Andersen, O.B., Knudsen, P., 2009. DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models. *J. Geophys. Res.* 114, C11001. <https://doi.org/10.1029/2008JC005179>
- Arias, P.A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R.G., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M.D., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P.W., Trewin, B., Achuta Rao, K., Adhikary, B., Allan, R.P., Armour, K., Bala, G., Barimalala, R., Berger, S., Canadell, J.G., Cassou, C., Cherchi, A., Collins, W., Collins, W.D., Connors, S.L., Corti, S., Cruz, F., Dentener, F.J., Dereczynski, C., Di Luca, A., Diongue Niang, A., Doblas-Reyes, F.J., Dosio, A., Douville, H., Engelbrecht, F., Eyring, V., Fischer, E., Forster, P., Fox-Kemper, B., Fuglestedt, J.S., Fyfe, J.C., Gillett, N.P., Goldfarb, L., Gorodetskaya, I., Gutierrez, J.M., Hamdi, R., Hawkins, E., Hewitt, H.T., Hope, P., Islam, A.S., Jones, C., Kaufman, D.S., Kopp, R.E., Kosaka, Y., Kossin, J., Krakovska, S., Lee, J.-Y., Li, J., Mauritsen, T., Maycock, T.K., Meinshausen, M., Min, S.-K., Monteiro, P.M.S.,

- Ngo-Duc, T., Otto, F., Pinto, I., Pirani, A., Raghavan, K., Ranasinghe, R., Ruane, A.C., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Samset, B.H., Sathyendranath, S., Seneviratne, S.I., Sörensson, A.A., Szopa, S., Takayabu, I., Tréguier, A.-M., van den Hurk, B., Vautard, R., von Schuckmann, K., Zaehle, S., Zhang, X., Zickfeld, K., 2021. Technical Summary. *Clim. Change 2021 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group Sixth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Aslam, M., Kench, P.S., 2017. Reef island dynamics and mechanisms of change in Huvadho Atoll, Republic of Maldives, Indian Ocean. *Anthropocene* 18, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.05.003>
- Bailey, R.T., Beikmann, A., Kottermair, M., Taboroši, D., Jenson, J.W., 2018. Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities. *J. Hydrol.* 557, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.016>
- Bamber, J.L., Oppenheimer, M., Kopp, R.E., Aspinall, W.P., Cooke, R.M., 2019. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116, 11195–11200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116>
- Bayraktarov, E., Stewart-Sinclair, P.J., Brisbane, S., Boström-Einarsson, L., Saunders, M.I., Lovelock, C.E., Possingham, H.P., Mumby, P.J., Wilson, K.A., 2019. Motivations, success, and cost of coral reef restoration. *Restor. Ecol.* 27, 981–991. <https://doi.org/10.1111/rec.12977>
- BBC News Indonesia, 2021. Pulau-pulau Indonesia terancam tenggelam: Bertahan walau rumah mulai tergenang.
- Beck, M.W., Losada, I.J., Menéndez, P., Reguero, B.G., Díaz-Simal, P., Fernández, F., 2018. The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nat. Commun.* 9, 2186. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z>
- Bisaro, A., de Bel, M., Hinkel, J., Kok, S., Bouwer, L.M., 2019. Leveraging public adaptation finance through urban land reclamation: cases from Germany, the Netherlands and the Maldives. *Clim. Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02507-5>
- Boström-Einarsson, L., Babcock, R.C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S.C.A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D., Stewart-Sinclair, P.J., Vardi, T., McLeod, I.M., 2020. Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLOS ONE* 15, e0226631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631>
- Bramante, J.F., Ashton, A.D., Storlazzi, C.D., Cheriton, O.M., Donnelly, J.P., 2020. Sea Level Rise Will Drive Divergent Sediment Transport Patterns on Fore Reefs and Reef Flats, Potentially Causing Erosion on Atoll Islands. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JF005446>
- Cazenave, A., Moreira, L., 2022. Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review. *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 478, 20220049. <https://doi.org/10.1098/rspa.2022.0049>
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., Unnikrishnan, A.S., 2013. Sea Level Change, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1137–1216.
- Cooley, S.R., David S. Schoeman, Laurent Bopp, Philip Boyd, Simon Donner, Shin-Ichi Ito, Wolfgang Kiessling, Paulina Martinetto, Elena Ojea, Marie-Fanny Racault, Björn Rost, Mette Skern-Mauritzen, Dawit Yemane Ghebrehiwet, 2022. Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services, in: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2123–2161.
- Daliakopoulos, I.N., Tsanis, I.K., Koutroulis, A., Kourgialas, N.N., Varouchakis, A.E., Karatzas, G.P., Ritsema, C.J., 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Sci. Total Environ.* 573, 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- Darsan, J., Alexis, C., 2014. The Impact of Makeshift Sandbag Groynes on Coastal Geomorphology: A Case Study at Columbus Bay, Trinidad. *Environ. Nat. Resour. Res.* 4, p94. <https://doi.org/10.5539/enrr.v4n1p94>
- Depsky, N., Bolliger, I., Allen, D., Choi, J.H., Delgado, M., Greenstone, M., Hamidi, A., Houser, T., Kopp,

- R.E., Hsiang, S., 2022. DSCIM-Coastal v1.0: An Open-Source Modeling Platform for Global Impacts of Sea Level Rise. *EGUsphere* 1–47. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-198>
- Diaz, D.B., 2016. Estimating global damages from sea level rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM). *Clim. Change* 137, 143–156. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1675-4>
- Dullaart, J., Muis, S. (Sanne), Bloemendaal, N., Chertova, Maria, Couasnon, Anais, Aerts, J.C.J.H. (Jeroen), 2022. COAST-RP: A global COastal dAtaset of Storm Tide Return Periods. <https://doi.org/10.4121/13392314.V2>
- Dullaart, J.C.M., Muis, S., Bloemendaal, N., Chertova, M.V., Couasnon, A., Aerts, J.C.J.H., 2021. Accounting for tropical cyclones more than doubles the global population exposed to low-probability coastal flooding. *Commun. Earth Environ.* 2, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00204-9>
- Duvat, V.K.E., 2020. Human-driven atoll island expansion in the Maldives. *Anthropocene* 32, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100265>
- Duvat, V.K.E., 2019. A global assessment of atoll island planform changes over the past decades. *WIREs Clim. Change* 10, e557. <https://doi.org/10.1002/wcc.557>
- Duvat, V.K.E., Magnan, A.K., 2019. Rapid human-driven undermining of atoll island capacity to adjust to ocean climate-related pressures. *Sci. Rep.* 9, 15129. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51468-3>
- Duvat, V.K.E., Magnan, A.K., Perry, C.T., Spencer, T., Bell, J.D., Wabnitz, C.C.C., Webb, A.P., White, I., McInnes, K.L., Gattuso, J., Graham, N.A.J., Nunn, P.D., Le Cozannet, G., 2021. Risks to future atoll habitability from climate-driven environmental changes. *WIREs Clim. Change* 12. <https://doi.org/10.1002/wcc.700>
- Falkland, T., White, I., 2020. Freshwater Availability Under Climate Change, in: Kumar, L. (Ed.), *Climate Change and Impacts in the Pacific*, Springer Climate. Springer International Publishing, Cham, pp. 403–448. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32878-8_11
- Fenoglio-Marc, L., Schöne, T., Illigner, J., Becker, M., Manurung, P., Khafid, 2012. Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region. *Mar. Geod.* 35, 137–150. <https://doi.org/10.1080/01490419.2012.718682>
- Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airoidi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat. Commun.* 5, 3794. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., et al., 2021. Chapter 9: Ocean, cryosphere and sea level change, in: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Gemilang, W.A., Hasanah, N.N., Wish, U.J.J., 2019. Karakteristik Hidrogeokimia Akuifer Tak Terkekang Kawasan Pesisir Pulau Weh, Aceh. *J. SUMBER DAYA AIR* 15, 27–38. <https://doi.org/10.32679/jsda.v15i1.481>
- Gingerich, S.B., Voss, C.I., Johnson, A.G., 2017. Seawater-flooding events and impact on freshwater lenses of low-lying islands: Controlling factors, basic management and mitigation. *J. Hydrol.* 551, 676688. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.001>
- Grunau, P., 2012. *Meteorologie für den Nautiker: Eine Betrachtung über die wesentlichen Aspekte der Klimatologie, Meteorologie, Laderaum-Meteorologie, sowie der meteorologischen Navigation*. BoD – Books on Demand.
- Gusmann, G., Hinkel, J., 2021. A framework for assessing the potential effectiveness of adaptation policies: Coastal risks and sea-level rise in the Maldives. *Environ. Sci. Policy* 115, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.028>
- Hamlington, B.D., Frederikse, T., Nerem, R.S., Fasullo, J.T., Adhikari, S., 2020a. Investigating the Acceleration of Regional Sea Level Rise During the Satellite Altimeter Era. *Geophys. Res. Lett.* 47, e2019GL086528. <https://doi.org/10.1029/2019GL086528>
- Hamlington, B.D., Gardner, A.S., Ivins, E., Lenaerts, J.T.M., Reager, J.T., Trossman, D.S., Zaron, E.D., Adhikari, S., Arendt, A., Ashwanden, A., Beckley, B.D., Bekaert, D.P.S., Blewitt, G., Caron, L., Chambers, D.P., Chandanpurkar, H.A., Christianson, K., Csatho, B., Cullather, R.I., DeConto, R.M., Fasullo, J.T., Frederikse, T., Freymueller, J.T., Gilford, D.M., Giroto, M., Hammond, W.C., Hock, R., Holschuh, N., Kopp, R.E., Landerer, F., Larour, E., Menemenlis, D., Merrifield, M., Mitrovica, J.X., Nerem, R.S., Nias, I.J., Nieves, V., Nowicki, S., Pangaluru, K., Picuch, C.G., Ray, R.D., Rounce, D.R., Schlegel, N.-J., Seroussi, H., Shirzaei, M., Sweet, W.V., Velicogna, I., Vinogradova,

- N., Wahl, T., Wiese, D.N., Willis, M.J., 2020b. Understanding of Contemporary Regional Sea-Level Change and the Implications for the Future. *Rev. Geophys.* 58, e2019RG000672. <https://doi.org/10.1029/2019RG000672>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Perrette, M., Nicholls, R.J., Tol, R.S.J., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C., Levermann, A., 2014. Coastal flood damage and adaptation cost under 21st century sea-level rise. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 3292–3297. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>
- Holdaway, A., Ford, M., Owen, S., 2021. Global-scale changes in the area of atoll islands during the 21st century. *Anthropocene* 33, 100282. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100282>
- Holding, S., Allen, D.M., 2015. From days to decades: numerical modelling of freshwater lens response to climate change stressors on small low-lying islands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 933–949. <https://doi.org/10.5194/hess-19-933-2015>
- Hughes, T.P., Anderson, K.D., Connolly, S.R., Heron, S.F., Kerry, J.T., Lough, J.M., Baird, A.H., Baum, J.K., Berumen, M.L., Bridge, T.C., Claar, D.C., Eakin, C.M., Gilmour, J.P., Graham, N.A.J., Harrison, H., Hobbs, J.-P.A., Hoey, A.S., Hoogenboom, M., Lowe, R.J., McCulloch, M.T., Pandolfi, J.M., Pratchett, M., Schoepf, V., Torda, G., Wilson, S.K., 2018. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science* 359, 80–83. <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>
- Hughes, T.P., Barnes, M.L., Bellwood, D.R., Cinner, J.E., Cumming, G.S., Jackson, J.B.C., Kleypas, J., Leemput, I.A. van de, Lough, J.M., Morrison, T.H., Palumbi, S.R., Nes, E.H. van, Scheffer, M., 2017. Coral reefs in the Anthropocene. *Nature* 546, 82–90. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Huizinga, J., de Moel, H., Szewczyk, W., 2017. Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines (No. EUR 28552). European Commission, Joint Research Centre.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kench, P.S., 2012. Compromising Reef Island Shoreline Dynamics: Legacies of the Engineering Paradigm in the Maldives, in: *Pitfalls of Shoreline Stabilization: Selected Case Studies*, Coastal Research Library. Springer Science+Business Media.
- Klöck, C., 2019. Dealing with climate change in the German Wadden Sea: Perceptions, measures, and contestation on Hallig Hooge. *Ocean Coast. Manag.* 179, 104864. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104864>
- Klöck, C., Duvat, V.K.E., Nunn, P.D., 2022. Maladaptive diffusion? The spread of hard protection to adapt to coastal erosion and flooding along island coasts in the Pacific and Indian Ocean. *Reg. Environ. Change* 22, 136. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01989-x>
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Glob. Change Biol.* 19, 1884–1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
- Kumar, L., Eliot, I., Nunn, P.D., Stul, T., McLean, R., 2018. An indicative index of physical susceptibility of small islands to coastal erosion induced by climate change: an application to the Pacific islands. *Geomat. Nat. Hazards Risk* 9, 691–702. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1455749>
- Lincke, D., Hinkel, J., 2021. Coastal Migration due to 21st Century Sea-Level Rise. *Earths Future* 9. <https://doi.org/10.1029/2020EF001965>
- Linham, M.M., Nicholls, R.J., 2012. Adaptation technologies for coastal erosion and flooding: a review. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Marit. Eng.* 165, 95–112. <https://doi.org/10.1680/maen.2011.29>
- Lloyd, G.R., Uesugi, A., Gleadow, R.M., 2021. Effects of Salinity on the Growth and Nutrition of Taro (*Colocasia esculenta*): Implications for Food Security. *Plants* 10, 2319. <https://doi.org/10.3390/plants10112319>
- Lovelock, C.E., Barbier, E., Duarte, C.M., 2022. Tackling the mangrove restoration challenge. *PLOS Biol.*

- 20, e3001836. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001836>
- Lovelock, C.E., Cahoon, D.R., Friess, D.A., Guntenspergen, G.R., Krauss, K.W., Reef, R., Rogers, K., Saunders, M.L., Sidik, F., Swales, A., Saintilan, N., Thuyen, L.X., Triet, T., 2015. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature* 526, 559–563. <https://doi.org/10.1038/nature15538>
- Lowe, J.A., Gregory, J.M., Flather, R.A., 2001. Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. *Clim. Dyn.* 18, 179–188. <https://doi.org/10.1007/s003820100163>
- Lowe, R.J., Falter, J.L., Bandet, M.D., Pawlak, G., Atkinson, M.J., Monismith, S.G., Koseff, J.R., 2005. Spectral wave dissipation over a barrier reef. *J. Geophys. Res. Oceans* 110. <https://doi.org/10.1029/2004JC002711>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S., 2018. The State of the World's Beaches. *Sci. Rep.* 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Machado, R., Serralheiro, R., 2017. Soil Salinity: Effect on Vegetable Crop Growth. Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. *Horticulturae* 3, 30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030>
- Madduppa, H.H., Ferse, S.C.A., Aktani, U., Palm, H.W., 2012. Seasonal trends and fish-habitat associations around Pari Island, Indonesia: setting a baseline for environmental monitoring. *Environ. Biol. Fishes* 95, 383–398. <https://doi.org/10.1007/s10641-012-0012-7>
- Major, D.C., Blaschke, P., Gornitz, V., Hosek, E., Lehmann, M., Lewis, J., Loehr, H., Major-Ex, G.A., Pedersen Zari, M., Vásquez Vargas, M.J., Watterson, E., Wejs, A., 2021. Adaptation to climate change in small island settlements. *Ocean Coast. Manag.* 212, 105789. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105789>
- Marganingrum, D., Ismail, M.F.A., Wulan, D.R., 2023. Assessment of shallow groundwater contamination on Pari Island, Indonesia. *Environ. Monit. Assess.* 195, 87. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10649-w>
- Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Edenhofer, O., Stocker, T.F., Field, C.B., Ebi, K.L., Matschoss, P.R., 2011. The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups. *Clim. Change* 108, 675–691. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0178-6>
- McLean, R., Kench, P., 2015. Destruction or persistence of coral atoll islands in the face of 20th and 21st century sea-level rise? *WIREs Clim. Change* 6, 445–463. <https://doi.org/10.1002/wcc.350>
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., Zhao, Z.-C., 2007. Global Climate Projections, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 747–846.
- Menendez, M., Woodworth, P.L., 2011. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge dataset. *J. Geophys. Res.* 115, 2156–2202.
- Mengel, M., Levermann, A., Frieler, K., Robinson, A., Marzeion, B., Winkelmann, R., 2016. Future sea level rise constrained by observations and long-term commitment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 201500515. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500515113>
- Montaggioni, L.F., 2005. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: Development patterns and controlling factors. *Earth-Sci. Rev.* 71, 1–75. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.01.002>
- Morim, J., Hemer, M., Wang, X.L., Cartwright, N., Trenham, C., Semedo, A., Young, I., Bricheno, L., Camus, P., Casas-Prat, M., Erikson, L., Mentaschi, L., Mori, N., Shimura, T., Timmermans, B., Aarnes, O., Breivik, Ø., Behrens, A., Dobrynin, M., Menendez, M., Staneva, J., Wehner, M., Wolf, J., Kamranzad, B., Webb, A., Stopa, J., Andutta, F., 2019. Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nat. Clim. Change* 9, 711–718. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5>
- Mycoo, M., M. Wairiu, D. Campbell, V. Duvat, Y. Golbuu, S. Maharaj, J. Nalau, P. Nunn, J. Pinnegar, O. Warrick, 2022. Small Islands, in: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

- Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2123–2161.
- Nauels, A., Gütschow, J., Mengel, M., Meinshausen, M., Clark, P.U., Schleussner, C.-F., 2019. Attributing long-term sea-level rise to Paris Agreement emission pledges. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116, 23487–23492. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907461116>
- Nicholls, R.J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A.T., Meysignac, B., Hanson, S.E., Merken, J.-L., Fang, J., 2021. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nat. Clim. Change.* <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>
- Nunn, P.D., Klöck, C., Duvat, V., 2021. Seawalls as maladaptations along island coasts. *Ocean Coast. Manag.* 205, 105554. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105554>
- Nurse, L.A., McLean, R.F., Agard, J., Briguglio, L.P., Duvat-Magnan, V., Pelesikoti, N., Tompkins, E., Webb, A., 2014. Small islands, in: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1613–1654.
- Oelsmann, J., Marcos, M., Passaro, M., Sánchez, L., Dettmering, D., Seitz, F., 2022. The impact of continuous space and time-resolving vertical land motion on relative sea level change (No. EGU22-5281). Presented at the EGU22, Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5281>
- Onaka, S., Ichikawa, S., Izumi, M., Uda, T., Hirano, J., Sawada, H., 2017. Effectiveness of Gravel Beach Nourishment on Pacific Island, in: *Asian and Pacific Coasts 2017.* Presented at the The 9th International Conference on Asia and Pacific Coasts 2017 (APAC 2017), WORLD SCIENTIFIC, SMX Convention Centre, Pasay City, Philippines, pp. 651–662. https://doi.org/10.1142/9789813233812_0059
- Oppen, M.J.H., Gates, R.D., Blackall, L.L., Cantin, N., Chakravarti, L.J., Chan, W.Y., Cormick, C., Crean, A., Damjanovic, K., Epstein, H., Harrison, P.L., Jones, T.A., Miller, M., Pears, R.J., Peplow, L.M., Raftos, D.A., Schaffelke, B., Stewart, K., Torda, G., Wachenfeld, D., Weeks, A.R., Putnam, H.M., 2017. Shifting paradigms in restoration of the world’s coral reefs. *Glob. Change Biol.* 23, 3437–3448. <https://doi.org/10.1111/gcb.13647>
- Oppenheimer, M., Glavovic, B., Hinkel, J., Wal, R. van de, Magnan, A.K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., Deconto, R.M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meysignac, B., Sebesvari, Z., 2019. Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities, in: *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321–445.
- Perry, C.T., Alvarez-Filip, L., Graham, N.A.J., Mumby, P.J., Wilson, S.K., Kench, P.S., Manzello, D.P., Morgan, K.M., Slangen, A.B.A., Thomson, D.P., Januchowski-Hartley, F., Smithers, S.G., Steneck, R.S., Carlton, R., Edinger, E.N., Enochs, I.C., Estrada-Saldivar, N., Haywood, M.D.E., Kolodziej, G., Murphy, G.N., Pérez-Cervantes, E., Suchley, A., Valentino, L., Boenish, R., Wilson, M., Macdonald, C., 2018. Loss of coral reef growth capacity to track future increases in sea level. *Nature* 558, 396–400. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0194-z>
- Piggott-McKellar, A.E., Nunn, P.D., McNamara, K.E., Sekinini, S.T., 2020. Dam(n) Seawalls: A Case of Climate Change Maladaptation in Fiji, in: Leal Filho, W. (Ed.), *Managing Climate Change Adaptation in the Pacific Region, Climate Change Management.* Springer International Publishing, Cham, pp. 69–84. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40552-6_4
- Quataert, E., Storlazzi, C., van Rooijen, A., Cheriton, O., van Dongeren, A., 2015. The influence of coral reefs and climate change on wave-driven flooding of tropical coastlines. *Geophys. Res. Lett.* 42, 6407–6415. <https://doi.org/10.1002/2015GL064861>
- Ranasinghe, R., 2016. Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Sci. Rev.* 160, 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.011>
- Razak, T.B., Boström-Einarsson, L., Alisa, C.A.G., Vida, R.T., Lamont, T.A.C., 2022. Coral reef restoration in Indonesia: A review of policies and projects. *Mar. Policy* 137, 104940. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104940>
- Roelvink, F.E., Storlazzi, C.D., van Dongeren, A.R., Pearson, S.G., 2021. Coral Reef Restorations Can Be

- Optimized to Reduce Coastal Flooding Hazards. *Front. Mar. Sci.* 8, 653945. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.653945>
- Rueda, A., Vitousek, S., Camus, P., Tomás, A., Espejo, A., Losada, I.J., Barnard, P.L., Erikson, L.H., Ruggiero, P., Reguero, B.G., Mendez, F.J., 2017. A global classification of coastal flood hazard climates associated with large-scale oceanographic forcing. *Sci. Rep.* 7, 5038. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05090-w>
- Sasmito, S.D., Murdiyarso, D., Friess, D.A., Kurnianto, S., 2016. Can mangroves keep pace with contemporary sea level rise? A global data review. *Wetl. Ecol. Manag.* 24, 263–278. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9466-7>
- Schuerch, M., Spencer, T., Temmerman, S., Kirwan, M.L., Wolff, C., Lincke, D., McOwen, C.J., Pickering, M.D., Reef, R., Vafeidis, A.T., Hinkel, J., Nicholls, R.J., Brown, S., 2018. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature* 561, 231–234. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0476-5>
- Sengupta, D., Chen, R., Meadows, M.E., 2018. Building beyond land: An overview of coastal land reclamation in 16 global megacities. *Appl. Geogr.* 90, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.12.015>
- Shirzaei, M., Freymueller, J., Törnqvist, T.E., Galloway, D.L., Dura, T., Minderhoud, P.S.J., 2020. Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nat. Rev. Earth Environ.* <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00115-x>
- Sierra-Correa, P.C., Cantera Kintz, J.R., 2015. Ecosystem-based adaptation for improving coastal planning for sea-level rise: A systematic review for mangrove coasts. *Mar. Policy* 51, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.09.013>
- Storlazzi, C.D., Gingerich, S.B., van Dongeren, A., Cheriton, O.M., Swarzenski, P.W., Quataert, E., Voss, C.I., Field, D.W., Annamalai, H., Piniak, G.A., McCall, R., 2018. Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding. *Sci. Adv.* 4, eaap9741. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9741>
- Subhan, B., Zamani, N.P., Rahmawati, F., Arafat, D., Bramandito, A., Khairudi, D., Santoso, P., Royhan, Q.M., Madduppa, H., Rizqydiani, M., 2021. Coral diseases of mushroom coral (Fungiidae) in Pari Island, Kepulauan Seribu, Jakarta. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 944, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012031>
- Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W.H., Hannon, M.T., Brakenridge, G.R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L., Nicholls, R.J., 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nat. Geosci.* 2, 681–686. <https://doi.org/10.1038/ngeo629>
- Temmerman, S., Horstman, E.M., Krauss, K.W., Mullarney, J.C., Pelckmans, I., Schoutens, K., 2023. Marshes and Mangroves as Nature-Based Coastal Storm Buffers. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 15, null. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-040422-092951>
- Tuck, M.E., Kench, P.S., Ford, M.R., Masselink, G., 2019. Physical modelling of the response of reef islands to sea-level rise. *Geology* 47, 803–806. <https://doi.org/10.1130/G46362.1>
- Utomo, E.P., Purwoaminta, A., Sudrajat, Y., 2017. Changes in the Configuration of the Fresh Water Lens due to ASRRG, Western Part of the Tiny Pari Island, Seribu Islands, Jakarta, Indonesia. *J. Geol. Dan Sumberd. Miner.* 18, 1–11. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v18i1.100>
- van Hooidek, R., Maynard, J., Tamelander, J., Gove, J., Ahmadia, G., Raymundo, L., Williams, G., Heron, S.F., Planes, S., 2016. Local-scale projections of coral reef futures and implications of the Paris Agreement. *Sci. Rep.* 6, 39666. <https://doi.org/10.1038/srep39666>
- Vidura, A., Nurjaya, I.W., Iqbal, M., Jaya, I., 2020. Ocean wave measurement and wave energy calculation using overtopping power plant scheme. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 429, 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012047>
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L.P., Feyen, L., 2018. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat. Commun.* 9, 2360. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>
- Wang, X.L., Feng, Y., Swail, V.R., 2015. Climate change signal and uncertainty in CMIP5-based projections of global ocean surface wave heights: CLIMATE CHANGE SIGNAL IN WAVE HEIGHTS. *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 3859–3871. <https://doi.org/10.1002/2015JC010699>
- Williams, S.L., Sur, C., Janetski, N., Hollarsmith, J.A., Rapi, S., Barron, L., Heatwole, S.J., Yusuf, A.M., Yusuf, S., Jompa, J., Mars, F., 2019. Large-scale coral reef rehabilitation after blast fishing in Indonesia. *Restor. Ecol.* 27, 447–456. <https://doi.org/10.1111/rec.12866>

- Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A., 2014. Coastal systems and low-lying areas, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 361–409.
- Worldbank, 2022. *The Economics of Large-scale Mangrove Conservation and Restoration in Indonesia*. Washington DC.