

Innovationen zum Umgang mit dem Meeresspiegelanstieg

Themenkurzprofil Nr. 36 | Simone Ehrenberg-Silies | April 2020

Der globale mittlere Meeresspiegel steigt deutlich stärker, als dies noch vor einem halben Jahrzehnt erwartet wurde. Für 2100 wird mit einem maximalen Anstieg von 110 cm gegenüber dem Stand von 2000 gerechnet, abhängig von den zugrundegelegten Annahmen über die zukünftigen Treibhausgasemissionen und die dadurch ausgelöste Temperaturerhöhung. Je nach Berechnungsmodell betreffen die jährlich zu erwartenden Überflutungen für 2100 im Extremfall – bei einer stärkeren Dynamik des Schmelzens der Antarktiseisschilde – zwischen 260 Mio. („NASA Shuttle Radar Topography Mission“ – SRTM) und 630 Mio. Menschen („Coastal Digital Elevation Model“ – CoastalDEM). Am stärksten werden die Auswirkungen des steigenden Meeresspiegels in den niedrigen und mittleren Breiten sein. Zu den gefährdeten Hafenstädten mit der größten Bevölkerungsanzahl zählen Kolkata und Mumbai (Indien), Guangzhou und Shanghai (China), Ho-Chi-Minh-Stadt und Hai Phòng (Vietnam), Dhaka (Bangladesch), Bangkok (Thailand), Rangun (Myanmar) und Miami (USA).

Angesichts der Gefahrenlage reagieren Länder, Städte und Gemeinden mit zahlreichen Gegenmaßnahmen, die jedoch unterschiedlich ausgereift sind und teils lediglich als Prototypen und Konzeptideen vorliegen, etwa schwimmende Städte und Bauernhöfe. Lösungsansätze wie das niederländische Projekt Sandmotor befinden sich noch in der Erprobungsphase. Superdeiche sind aufgrund ihrer enormen Kosten und langen Bauzeiten nicht überall realisierbar, Innovationen wie der Bau auf Warften, z.B. in der Hamburger Hafencity, funktionieren nur bei der Neuentwicklung von Stadtteilen. Politische Entscheidungsträgerinnen und -träger stehen somit vor der Herausforderung, aus dem Potpourri weltweit diskutierter Lösungsansätze diejenigen für den eigenen Küstenschutz auszuwählen, die den finanziellen, geografischen, topografischen und

soziokulturellen Rahmenbedingungen am besten gerecht werden sowie eine gewisse Flexibilität für den Fall aufweisen, dass sich die Dynamik des Meeresspiegelanstiegs nochmals intensivieren sollte.

Hintergrund und Entwicklung

Der erwartete Anstieg des Meeresspiegels

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; im Deutschen häufig als Weltklimarat bezeichnet) geht in seinem neuesten Sonderbericht (IPCC 2019) von einem Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels aus, der sich seit Beginn der Messungen beschleunigt. Ursächlich hierfür sind die aufgrund der menschengemachten Erderwärmung tauenden Gletscher und Eisschilde sowie die thermische Ausdehnung der Meere. Die Beschleunigung des Anstiegs lässt sich an den Durchschnittswerten von Gezeitenpegeln und Höhenmessungen in unterschiedlichen Zeiträumen ablesen: Stieg der globale mittlere Meeresspiegel von 1901 bis 1990 noch um 1,4 mm pro Jahr und von 1970 bis 2015 um 2,1 mm, waren es von 1993 bis 2015 bereits 3,2 mm pro Jahr und von 2006 bis 2016 sogar 3,6 mm pro Jahr (IPCC 2019, S.323). Phänomene wie erhöhte Windgeschwindigkeiten, starke Wellen und Niederschläge von tropischen Wirbelstürmen tragen in Verbindung mit dem Meeresspiegelanstieg dazu bei, dass Küstenregionen in Zukunft zunehmenden Risiken ausgesetzt sein werden (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle et al. 2020, S.3). In Städten wie Tokio werden sich aufgrund des steigenden Meeresspiegels z.B. die Auswirkungen von möglichen Erdbeben, Tsunamis und Taifunen dramatisch verschärfen und können zu extremen Überschwemmungen führen (C40 Cities 2016, S.19).

Das IPCC arbeitet seit seinem 5. Sachstandsbericht aus den Jahren 2013/2015 mit vier neuen Szenarien zur Treibhaus-



gaskonzentration für 2100 und zum Strahlungsantrieb (Veränderung der Energiebilanz des Systems Erde – Atmosphäre aufgrund von Störungen wie Treibhausgasemissionen) zwischen 1850 und 2100, den sogenannten Representative-Concentration-Pathways-Szenarien (RCP-Szenarien). In all diesen Szenarien steigt der Meeresspiegel, wenngleich mit unterschiedlicher Intensität. Im 20. Jahrhundert hat sich der Meeresspiegel bereits um rund 15 cm erhöht (DKK/KDM 2019, S.15). Selbst bei 2 °C globaler Erderwärmung gegenüber vorindustrieller Zeit würde der globale Meeresspiegel noch um 30 bis 60 cm steigen. Im Worst-Case-Szenario (RCP8.5) mit den höchsten angenommenen Treibhausgasemissionen und einer Erderwärmung zwischen 3 und 4 °C bis 2100 würde er um 60 bis 110 cm zunehmen. 2007 nahm der IPCC noch 59 cm und 2014 als Höchstwert 82 cm an (Schmitt 2019). Die Gründe für die Anpassungen der Schätzung des zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs sind, dass sich in den vergangenen 10 Jahren die Schmelzgeschwindigkeit der grönländischen Eisschilde verdreifacht und die der Antarktis verdoppelt hat (DKK/KDM 2019, S.15; IPCC 2019, S.330 f.). Der Mittelwert aus den beiden Szenarien ergibt einen Meeresspiegelanstieg zwischen 43 und 84 cm bis 2100 im Verhältnis zum globalen mittleren Meeresspiegel zwischen 1986 und 2005 (DKK/KDM 2019, S.15; IPCC 2019, S.324).

Regional und lokal kann der tatsächliche Meeresspiegelanstieg jedoch in einer Bandbreite um etwa ein Drittel nach oben oder unten variieren (Schmitt 2019). Mögliche Unterschiede ergeben sich aus Strömungen im Ozean und in der Atmosphäre, aus Landhebungen und -senkungen, dem Absinken des Meeresbodens durch Grundwasserentnahme sowie der Förderung von Öl und Erdgas (DKK/KDM 2019, S.12).

Folgen des Meeresspiegelanstiegs

Das IPCC prognostiziert, dass historisch ungewöhnliche Extremwasserstände (sogenannte Jahrhunderthochwasser) aufgrund des Meeresspiegelanstiegs in Kombination mit Extremwetterlagen in allen RCP-Szenarien zunehmen werden. Weltweit werden solche Extremwasserstände in tiefliegenden Städten und auf kleinen Inseln bis 2050 mindestens jährlich auftreten. Besonders stark werden tropische Regionen betroffen sein (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle et al. 2020, S.5; DKK/KDM 2019, S.17; IPCC 2019, S.324). Starke Fluten und Stürme stellen nicht nur eine Herausforderung für Küstenschutzbauwerke dar, sondern führen durch massivere Wellenkraft und höhere Wasserstände im Flachwasserbereich der Küsten zudem zu Erosionen (DKK/KDM 2019, S.19). Ökosysteme wie Mangrovenwälder und Bodentypen wie Salzmarschen, Strände und vorgelagerte Sandbänke, die normalerweise einen natürlichen Schutz vor Überflutungen bilden, werden dadurch zerstört (Schmitt 2019).

Betroffene Küstengesellschaften

Wie viele Menschen in welchen Regionen der Erde von einem Meeresspiegelanstieg betroffen wären, wird gemeinhin mit einem Modell der US-Raumfahrtbehörde NASA bestimmt, das auf Satellitendaten der SRTM beruht. Die Präzision der Modellergebnisse ist allerdings fragwürdig, denn das Satellitenradar kann nur die Oberfläche von Erhebungen wie Gebäuden oder Bäumen erfassen. In Gebieten mit hoher Besiedlungs- oder Vegetationsdichte weist es deshalb eine positive Verzerrung der Geländehöhe auf, die sich bei Küstenstädten im Durchschnitt auf rund 4 Höhenmeter beläuft (Kulp/Strauss 2019, S.2; Mrasek 2019). Seit Kurzem wird in der Wissenschaft alternativ das CoastalDEM angewendet, bei dem ein künstliches neuronales Netz zum Einsatz kommt. Die Datengrundlage für dieses Netz umfasst, verglichen mit Satellitendaten, präzisere Daten aus dem Airborne Laserscanning – dabei ist die Scaneinheit an einem Flugzeug angebracht – sowie Daten zu Siedlungsformen, Vegetationstypen und den Höhen von Pflanzen und Häusern. Auf Basis dieses Datensets wird das künstliche neuronale Netz trainiert, zwischen der tatsächlichen Erdoberfläche und anderen Oberflächen zu unterscheiden (Mrasek 2019). Den Berechnungen aus dem CoastalDEM zufolge werden in allen RCP-Szenarien dreimal mehr Menschen vom Meeresspiegelanstieg bedroht sein, als nach dem NASA-SRTM-Modell angenommen wird. Das CoastalDEM berechnet für 2100 im Szenario mit den niedrigsten Treibhausgasemissionen (RCP2.6), dass 190 Mio Menschen von der permanenten Überschwemmung ihres Lebensraums (gegenüber 48 Mio. nach NASA SRTM) und 340 Mio. Menschen von jährlichen Überflutungen bedroht sein werden (95 Mio. nach NASA SRTM). Bei weiterhin stark ansteigenden Treibhausgasemissionen gemäß RCP8.5 sind laut CoastalDEM 2100 sogar 230 Mio. Menschen von der Überschwemmung ihres Lebensraums bedroht (60 Mio. nach NASA SRTM) und 390 Mio. Menschen von jährlichen Überflutungen (110 Mio. Menschen nach NASA SRTM). Im

nicht auszuschließenden, aber zunächst noch unwahrscheinlichen Fall eines dynamischeren Schmelzens der antarktischen Eisschilde könnten nach CoastalDEM 2100 sogar bis zu 520 Mio. Menschen ihren Lebensraum durch den steigenden Meeresspiegel verlieren (bis zu 180 Mio. nach NASA SRTM); mit jährlichen Extremwasserständen müssten bis zu 630 Mio Menschen leben (laut NASA SRTM bis zu 260 Mio) (Kulp/Strauss 2019, S.3). Alle Berechnungen beruhen auf Bevölkerungsdaten von 2010, sodass die Zahlen weder Migrationsbewegungen noch Bevölkerungswachstum in der Zukunft abbilden (Kulp/Strauss 2019, S.2).

Es gilt als weitgehend unumstritten, dass vor allem die niedrigen und teilweise die mittleren Breiten extrem vom Meeresspiegelanstieg betroffen sein werden (DKK/KDM 2019, S.16). Neue Berechnungen nach CoastalDEM lassen darüber hinaus vermuten, dass China, Indien, Bangladesch, Vietnam, Indonesien und Thailand noch stärkeren Risiken ausgesetzt sein werden als ursprünglich angenommen (Mrasek 2019). Das IPCC prognostiziert für Bangladesch, dass bei einem Meeresspiegelanstieg um 1 m 20% seiner Landmasse versinken würden. Eine Umsiedlung von 30 Mio. Menschen wäre die Folge. In Ägypten würden Ende dieses Jahrhunderts 10% des Nildeltas untergehen, wodurch 5 Mio Menschen gefährdet wären und fruchtbares Land verloren ginge (Schadwinkel 2019). Eine Studie von Hanson et al. 2011, S.100, in der die Risiken des Meeresspiegelanstiegs für die Bevölkerung und Vermögenswerte in den großen Hafenstädten der Welt für 2070 analysiert

und dabei Dynamiken wie zukünftiges Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum berücksichtigt wurden, belegt das starke Risiko für Menschen in den Städten der zuvor genannten Länder. Nimmt man als Referenzgröße die prognostizierten gefährdeten Vermögenswerte, dann befinden sich mit Amsterdam und Rotterdam auch zwei europäische Städte unter den Top 20 weltweit.

Die Situation in Deutschland

Laut IPCC (2019) entsprach der Meeresspiegelanstieg von Nord- und Ostsee in der Vergangenheit in etwa dem globalen Mittelwert. Ebenso wird erwartet, dass er sich zukünftig im globalen Mittel bewegen wird. Für die Küstenbewohnerinnen und -bewohner in Deutschland ist vor allem der Meeresspiegelanstieg in Verbindung mit Extremwittersituationen risikoreich, da dies zu Sturmfluten führen kann (DKK/KDM 2019, S.22 ff.). An den 3.600 km der deutschen Küste sind Gebiete bedroht, die an der Nordsee bis zu 5 und an der Ostsee bis zu 3 m über dem Meeresspiegel liegen. Hier leben 3,2 Mio. Menschen mit volkswirtschaftlichen Werten von 900 Mrd. Euro. Durch Sturmfluten am meisten gefährdet gelten küstennahe Städte wie Hamburg, Bremen, Kiel, Lübeck, Rostock und Greifswald (IMAA 2019, S.72). Wie überall, so gefährdet auch der Meeresspiegelanstieg in Deutschland nicht nur Menschen und Vermögenswerte, sondern führt zur Erosion von Küsten, Inseln und Halligen. Problematisch ist zudem, dass steigendes Wasser das einzigartige Ökosystem des Wattenmeeres in Gefahr bringt (Schadwinkel 2019).

Top 20 der weltweit betroffenen Städte gemäß der gefährdeten Bevölkerungszahl 2070

Kolkata (Indien):	14.014.000
Mumbai (Indien):	11.418.000
Dhaka (Bangladesch):	11.135.000
Guangzhou (China):	10.333.000
Ho-Chi-Minh-Stadt (Vietnam):	9.216.000
Shanghai (China):	5.451.000
Bangkok (Thailand):	5.138.000
Rangun (Myanmar):	4.965.000
Miami (USA):	4.795.000
Hai Phòng (Vietnam):	4.711.000
Alexandria (Ägypten):	4.375.000
Tianjin (China):	3.790.000
Khulna (Bangladesch):	3.641.000
Ningbo (China):	3.305.000
Lagos (Nigeria):	3.229.000
Abidjan (Elfenbeinküste):	3.110.000
New York – Newark (USA):	2.931.000
Chittagong (Bangladesch):	2.866.000
Tokio (Japan):	2.521.000
Jakarta (Indonesien):	2.248.000

Top 20 der betroffenen Städte gemäß den gefährdeten Vermögenswerten in Mrd. US-Dollar weltweit 2070

Miami (USA):	3.513,04
Guangzhou (China):	3.357,72
New York – Newark (USA):	2.147,35
Kolkata (Indien):	1.961,44
Shanghai (China):	1.771,17
Mumbai (Indien):	1.598,05
Tianjin (China):	1.231,48
Tokio (Japan):	1.207,07
Hong Kong (China):	1.163,89
Bangkok (Thailand):	1.117,54
Ningbo (China):	1.073,93
New Orleans (USA):	1.013,45
Osaka-Kōbe (Japan):	968,96
Amsterdam (Niederlande):	843,70
Rotterdam (Niederlande):	825,68
Ho-Chi-Minh-Stadt (Vietnam):	652,82
Nagoya (Japan):	623,42
Qingdao (China):	601,59
Virginia Beach (USA):	581,69
Alexandria (Ägypten):	563,28

Eigene Darstellung nach Hanson et al. 2011, S. 102

Strategien zum Umgang mit steigendem Meeresspiegel

Grundsätzlich können vier Handlungsweisen voneinander unterschieden werden, mit denen auf den Anstieg des Meeresspiegels reagiert werden kann: die Verteidigung mit Schutzbauwerken wie Deiche, Sperrwerke, Deckwerke oder Dünen; die Anpassung von Infrastrukturen; das Vordringen in die See durch Landgewinnung, Neueindeichung und Sandaufspülung sowie letztlich der Rückzug aus gefährdeten Gebieten (DKK/KDM 2019, S.20). Seit den Erfahrungen mit dem Tsunami im Indischen Ozean von 2004 und dem Hurrikan Katrina von 2005 gewinnt zudem der ökosystembasierte Küstenschutz an Bedeutung. Im Zusammenhang mit diesen beiden Naturkatastrophen entdeckten Forschende, dass Küstenstreifen, denen Korallen, Mangroven und Salzwiesen vorgelagert waren, weniger in Mitleidenschaft gezogen wurden als Küstenstreifen ohne diese natürlichen Habitate (Schröder 2018). In der Bucht von San Francisco werden beispielsweise gerade Austern und Seegras auf ihre Wirksamkeit zur Abmilderung von Wellenkraft getestet. Vor allem in Verbindung mit anderen Strategien, wie dem Bau hochwassergeschützter Infrastrukturen, wird ökosystembasierten Küstenschutzmaßnahmen ein großes Potenzial zugeschrieben (Haas 2020).

Im Folgenden wird eine Auswahl neuartiger Herangehensweisen zum Umgang mit dem steigenden Meeresspiegel exemplarisch diskutiert, die konventionelle Lösungsansätze, wie die Anpassung von Infrastrukturen (Hafencity), die Sandaufspülung (Sandmotor), die Errichtung von Schutzbauwerken (Superdeiche) und die Landgewinnung (Floating Farm und schwimmende Städte), auf innovative und kreative Weise erweitern.

Als besonders innovativ gilt die Gestaltung der **Hamburger Hafencity**, wo Gebäude und Straßen auf Warften in hochwassersicherer Höhe von 8 bis 9 m über Normalnull (HafenCity Hamburg o.J.) mit wasserfesten Erdgeschossen und wasserdichten Garagen in den verletzlichsten Bereichen gebaut worden sind (Haas 2020). Die Straßen und Brücken stellen bei einer Sturmflut eine sichere Verbindung zur Hamburger Innenstadt her, die im öffentlichen Hochwasserschutzgebiet liegt. Die Höhenbestimmung der Warften orientiert sich an den behördlich ermittelten Bemessungswasserständen und am Seegang (Müller/Gönnert 2018, S.514f.). Bemessungswasserstände für die öffentlichen Hochwasserschutzanlagen werden alle 10 Jahre aktualisiert; für Hamburg wurden sie letztmalig 2012 festgelegt. Damals wurde ein sogenannter Klimazuschlag von 20 cm bis 2050 ermittelt (BUKEA o.J.).

Die gewählte Maßnahme zum Hochwasserschutz in der Hafencity weist verschiedene Vorteile auf. Zum einen ist sie, verglichen mit der Eindeichung, deutlich kostengünstiger (Müller/Gönnert 2018, S.514f.). Der Warftenbau ermöglicht die sukzessive und ökonomisch rentable Weiterentwicklung des Stadtteils nach Bedarfslage. Zum anderen hätte die Eindeichung die Sicht auf das Wasser behindert.

Das Wasser als wichtiger Milieugeber des Stadtteils hätte stark an Bedeutung verloren. Außerdem bieten die Warften ausreichend Platz für Tiefgaragen, weshalb keine weiteren Parkmöglichkeiten im Stadtteil geschaffen werden müssen. Aufgrund der Knappheit öffentlichen Raums in Hamburg – wie generell in Städten – kann dies als weiterer Vorteil gewertet werden (HafenCity Hamburg o.J.).

Die Niederlande erproben im Rahmen ihres **Sandmotorprojekts** seit 2011, ob eine riesige, mit 21,5 Mio m³ Sand künstlich angelegte hakenförmige Sandbank die natürlichen Dünen Südhollands effektiver und nachhaltiger vor Erosionen schützen kann als konventionelle Sandvorspülmaßnahmen (Haas 2020). Bei Sandvorspülmaßnahmen werden große Sandmengen an Küsten oder Strände befördert, um diese vor Sturmfluten zu schützen und Landverluste zu vermeiden. Die beim Sandmotorprojekt verwendete Sandmenge entspricht dem 5-Fachen eines normalen Sandvorspülprojekts. Der Sandmotor versorgt durch das Wirken von Gezeiten, Wind und Wellen die benachbarten Küsten mit Sand, dabei löst er sich nach und nach auf (van Oudenhoven et al. 2019, S.17).

Sandvorspülung ist in den Niederlanden seit den 1990er Jahren die primäre Strategie des Küstenschutzes. Allerdings war es bisher üblich, die Sandvorspülung auf dem Vorstrand vorzunehmen (Luijendijk/van Thiel de Vries 2019, S.161). Bei einem Meeresspiegelanstieg um 40 cm müsste das Volumen der jährlichen konventionellen Sandvorspülungsmaßnahmen an der niederländischen Küste um das 3- bis 4-Fache gesteigert werden; bei einem Anstieg um 2 m bis 2100 sogar um das 20-Fache, dies sind mehrere 10 Mio m³ pro Jahr, im schlimmsten Fall 100 Mio. m³ (Aarninkhof 2019, S.199). Technisch ist dies durchaus möglich, das wird mit Projekten wie Palm Islands (Dubai) und Maasvlakte II (Niederlande) unter Beweis gestellt (Aarninkhof 2019, S.199). Mit Megasandvorspülprojekten wie dem Sandmotor, die auf 20 bis 30 Jahre ausgelegt sind, wird





jedoch die Hoffnung verbunden, dass auf Dauer ein geringeres Sandvolumen benötigt wird und diese auch geringere Auswirkungen auf das marine Ökosystem haben. Da konventionelle Sandvorspülprojekte alle 5 Jahre erneuert werden müssen, ist das marine Ökosystem dauerhaft gestört; hingegen steht bei Megasandvorspülprojekten mehr Zeit für das marine Ökosystem zur Verfügung, ins Gleichgewicht zurückzufinden (Luijendijk/van Thiel de Vries 2019, S.161).

Positiv für die ökologische Bilanz des Sandmotors ist ebenso, dass er die Grundwasservorräte in den Dünen der Küste ansteigen lässt (Bierkens/Essink 2019, S.177). Der Sandmotor selbst weist eine höhere Vielfalt benthischer Spezies – am Boden eines Gewässers lebende Lebewesen – auf als die friesischen Inseln und er hat sich zu einem Habitat für Plattfische sowie andere schützenswerte und kommerziell wertvolle Fischarten entwickelt (van Oudenhoven/Luijendijk 2019, S.141). Nachteilig wirken sich allerdings die Freizeitaktivitäten auf die Dünenvegetation aus, denen die Menschen auf dem Sandmotor nachgehen können (van Oudenhoven/Luijendijk 2019, S.141). Die gastronomischen und Sportangebote sind ein essenzieller Bestandteil des Sandmotors, denn sie erhöhen seine gesellschaftliche Akzeptanz und sind auch eine Einnahmequelle zur Refinanzierung des Projekts. Eine abschließende wissenschaftliche Bewertung des Sandmotors wird für 2021 erwartet.

Der Sandmotor erfährt hohe internationale Aufmerksamkeit vor allem in Städten und Regionen, die ebenfalls mit der Erosion ihrer Küsten zu kämpfen haben, wengleich die Kosten für den Sandabbau in manchen Regionen eine Realisierung erschweren dürften. Projekte, die dem Sandmotor ähneln und in ihren Planungen unterschiedlich weit fortgeschritten sind, existieren z.B. in Schonen (Schweden),

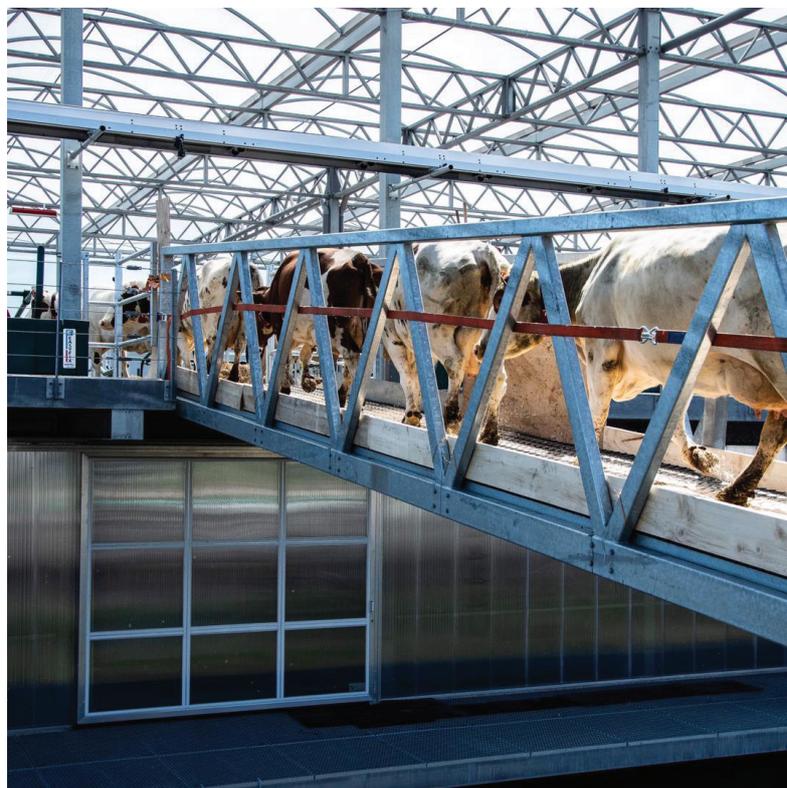
Lima (Peru), Negril (Jamaika) und Bacton (UK). In Bacton waren die Planungsarbeiten so weit fortgeschritten, dass Ende 2019 bereits mit der konkreten Umsetzung unter der Bezeichnung Sandscaping begonnen werden konnte (Luijendijk/van Oudenhoven 2019, S.165; Luijendijk/Vikolainen 2019, S.167).

Ebenfalls wird in den Niederlanden, wie auch in Japan, über den Bau von weiteren sogenannten **Superdeichen** nachgedacht (Haas 2020). Die Idee wurde bereits in den 1980er Jahren in Japan speziell für dicht besiedelte urbane Räume entwickelt (Stalenberg/Kikumori 2008, S.138; Tokyo Institute of Technology/Delft University of Technology 2016, S.7), in denen ein konventioneller Deichbau aufgrund der Flächenknappheit deutliche Nachteile aufweist. Superdeiche existieren bereits in japanischen Städten wie Nagoya, Osaka und Tokio (Alcamo/Olesen 2012, S.134 ff.). Sie unterscheiden sich von konventionellen Deichen dadurch, dass sie nicht besonders hoch, jedoch extrem breit sind; deshalb können sie bebaut, bepflanzt und mit Verkehrswegen ausgestattet werden (Haas 2020). Ihr Bau geht also gewöhnlich mit raum- und stadtplanerischen Überlegungen einher. Im Gegensatz zu konventionellen Deichbauvorhaben, bei denen zumeist Eigentumsfragen in langwierigen rechtlichen Auseinandersetzungen geklärt werden müssen, die nicht selten zu Entschädigungszahlungen führen, können beim Bau von Superdeichen Eigentumsstreitigkeiten vermieden werden, da Landeigentümer auf den Superdeichen bauen können (Stalenberg/Kikumori 2008, S.137 ff.). Ein weiterer Vorzug von Superdeichen im Vergleich zu konventionellen Deichen ist, dass sie keine Sichtbarriere darstellen. Da Leben auf dem Superdeich konstant stattfinden kann, bleibt das Wasser in Sichtweite und damit der Bezug der Menschen zum Wasser erhalten (Stalenberg/Kikumori 2008, S.137 ff.).

Superdeiche können 300 bis 500 m breit sein (Alcamo/Olesen 2012, S.134 ff.). Während ein konventioneller Deich in etwa ein Höhe-zu-Breite-Verhältnis von 1:3 bis 1:4 aufweist (Krishnan et al. 2019), steigt ein Superdeich sehr sanft mit einem Höhe-zu-Breite-Verhältnis von 1:30 (Stalenberg/Kikumori 2008, S.138). Durch den sanften Anstieg wird nicht nur das Abgleiten der oberen Deichschicht vermieden, wie es bei konventionellen Deichen vorkommen kann, sondern auch die Wellenkraft abgemildert (Stalenberg/Kikumori 2008, S.138). Zudem sind die Superdeiche erdbebensicher (Alcamo/Olesen 2012, S.134 ff.), da sie aus einem Baumaterial bestehen, das keine Bodenverflüssigung und kein Abrutschen zulässt (Stalenberg/Kikumori 2008, S.138). Im Gegensatz zu konventionellen Deichen brechen sie nicht unter schwerem Wasserdruck zusammen, wenn sie von Wasserfluten über- oder von Sickerwasser unterspült werden. Diese Eigenschaft der Superdeiche ist von zentraler Bedeutung, denn ein Deichbruch an nur einer Stelle reicht in der Regel völlig aus, um heftige Überflutungen im Hinterland zu verursachen (Alcamo/Olesen 2012, S.134 ff.). Dass es trotz der zahlreichen Vorteile von Superdeichen nur sehr wenige gibt, liegt an folgenden Gründen: den massiven Baukosten von 100 Mio US-Dollar pro km – verglichen mit 1,5 bis 7,5 Mio US-Dollar pro km für konventionelle Deiche – (Alcamo/Olesen 2012, S.134 ff.), der Notwendigkeit, Anwohner vorübergehend umzusiedeln (Tokyo Institute of Technology/Delft University of Technology 2016, S.7) und der mit diesen Faktoren korrespondierenden langen Bauzeit (Krishnan et al. 2019).

Aus den Niederlanden stammt auch die Idee der **Floating Farm**, eines Milchbauernhofs mit 38 Kühen, der seit Mai 2019 im Merwehaven der Rhein-Maas-Delta-Stadt Rotterdam liegt. Das dreistöckige Gebäude mit Brücke zu einem kleinen Stück Wiese auf dem Festland ist mit einem Metallbolzen im Hafenbecken verankert. Je nach Wasserstand kann sich der schwimmende Kuhbauernhof am Metallbolzen nach oben und unten bewegen. Zusätzlich bemerkenswert an dem Prototyp des schwimmenden Bauernhofs ist, dass er nachhaltig und weitestgehend unabhängig von einer Festlandversorgung ist. Lediglich das Viehfutter kommt von außen. Das dreistöckige Gebäude, dessen Untergeschoss unter Wasser liegt, verfügt über eine eigene Wasser- und Energieversorgung (Regenwassertank auf dem Dach, Solarpaneele auf dem Wasser). In der Floating Farm werden auch Milchprodukte erzeugt. Die Floating Farm findet weltweit Beachtung, etwa in Mumbai (Pschak 2019), das ebenso wie Rotterdam vom steigenden Meeresspiegel betroffen und dicht besiedelt ist, also eine ähnliche Interessenlage aufweist. Umfassende wissenschaftliche Studien zur Floating Farm in Rotterdam stehen noch aus.

Visionär und futuristisch erscheinen die Diskussionen im Rahmen des Programms der Vereinten Nationen für menschliche Siedlungen (UN-HABITAT) über **schwimmende Städte** (Floating Cities) nach den Entwürfen der Oceanix Ltd. (UN 2019). Diese Satellitenstädte sollen vor allem



für Asien konzipiert werden, wo Städte nicht nur vor der Herausforderung eines steigenden Meeresspiegels stehen, sondern durch die Landknappheit an die Grenzen der Urbanisierung stoßen. Nach den Entwürfen von Oceanix bestehen die schwimmenden Städte aus sechseckigen, miteinander verbundenen Modulen. Diese sollen sowohl in Massenproduktion herstellbar als auch sturmtauglich sein. Wie in Städten an Land, sollen auf ihnen Räume und Infrastrukturen für Arbeit, Wohnen und Freizeit sowie religiöse Einrichtungen geschaffen werden. Ähnlich wie bei der Floating Farm in Rotterdam, wird auch mit den schwimmenden Städten der Leitgedanke der Autarkie verfolgt: Die Stromversorgung soll weitestgehend aus lokaler Sonnenenergie erfolgen, ein Wasser- und Regenwasserkreislauf würde etabliert und die Nahrungsmittelversorgung über die Produktion in der schwimmenden Stadt selbst bewerkstelligt werden. Die Verbindung zum Festland soll mit Fähren und Drohnen gewährleistet werden (Revkin 2019). Die schwimmende Stadt soll Wohnraum für 10.000 Menschen bieten. Ihre Konstruktion ist so ausgelegt, dass sie einem Hurrikan der Kategorie 5 standhalten kann (Wood o.J.). Kategorie 5 ist die höchste Hurrikanstufe, bei der der Wasserspiegel aufgrund extremer Windgeschwindigkeiten über 251 km/h auf über 5,5 m ansteigen kann. Von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern wird allerdings kritisiert, dass eine hurrikanresistente Konstruktion der schwimmenden Städte enorme Kosten verursache, weshalb das Konzept eher für geschützte Gewässer geeignet wäre (Revkin 2019). Ebenso wird in der wissenschaftlichen Diskussion zur Vision schwimmender Städte generell beanstandet, dass diese zwar ein Risiko – den steigenden Meeresspiegel – benennen, aber selbst zahlreiche Risiken verursachen könnten,

wie Verschuldung durch hohe Investitionen und die Zunahme sozialer Ungleichheit, etwa hinsichtlich der Frage, wer in den schwimmenden Städten leben darf (Jue 2020).

Wenngleich die Realisierung schwimmender Städte nicht unmittelbar bevorsteht, so knüpft sie doch an bereits heute existierende Maßnahmen an, auf dem Wasser mit seinen dynamischen Höhenständen zu leben, wie die Beispiele von Hausbooten und Floating Markets in Seattle, Jakarta, Mexico City und andernorts zeigen (UN 2019).

Gesellschaftliche und politische Relevanz

Es leben 380 Mio Menschen in Gemeinden, Städten und Dörfern, die weniger als 5 m über dem Meeresspiegel liegen, und 680 Mio in Siedlungen unterhalb von 10 m über dem Meeresspiegel (Schmitt 2019). Zudem befinden sich viele der globalen Megastädte an Küsten und Flussdeltas, die extrem von den Folgen eines steigenden Meeresspiegels betroffen sein werden. Der IPCC (2019) prognostiziert, dass sich die Kosten infolge von Flutschäden auf das 100- bis 1.000-Fache bis 2100 vervielfachen werden, wenn nicht gegengesteuert wird (Schmitt 2019). Angesichts der Tatsache, dass der Meeresspiegel noch schneller ansteigen wird, als es 2014 prognostiziert wurde, sind Gemeinschaften an Küsten umso dringlicher gefordert, die für sie optimalen Küstenschutzstrategien zu entwickeln. Welche Maßnahmen ergriffen werden können, ist nicht nur eine Frage der geografischen und topografischen Gegebenheiten vor Ort sowie des voraussichtlichen Gefährdungsniveaus. Die Antwort hängt auch von den finanziellen Möglichkeiten sowie der gesellschaftlichen Akzeptanz und der politischen Steuerungsfähigkeit in den jeweiligen Ländern ab (Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle et al. 2020, S.7). Nicht alle betroffenen Regionen werden wirkungsvolle Strategien entwickeln können: Bangladesch mit seinen zahlreichen Inseln und Kanälen im Gangesdelta ist mit konventionel-

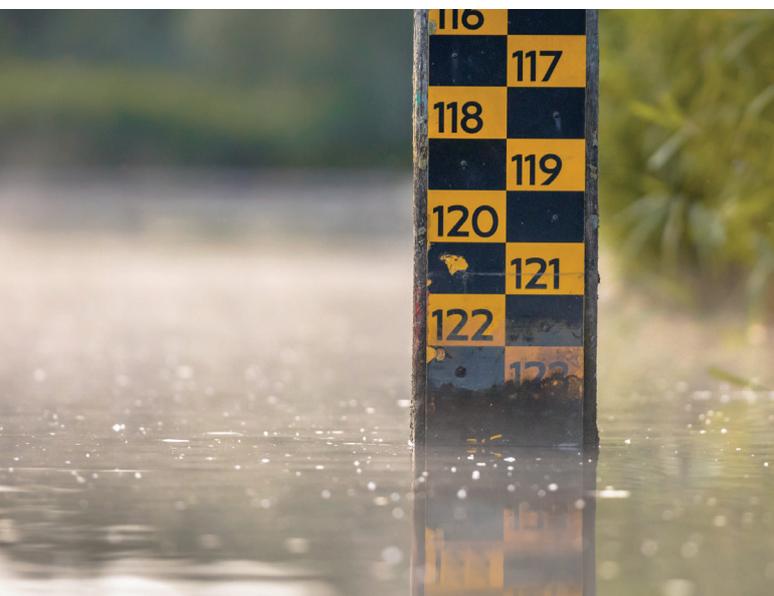
len Maßnahmen wie Deichen kaum zu schützen (Mrasek 2019). Die Erprobung von Alternativen ist durch geringe ökonomische Ressourcen zudem nur eingeschränkt möglich (Schmitt 2019). Andernorts, wo Finanzierungsfragen nicht das dominante Handlungshemmnis sind, steht nicht immer das nötige Orientierungswissen zur Verfügung, um eine evidenzbasierte Folgenabschätzung von geplanten Maßnahmen durchführen zu können – oder es mangelt schlicht an politischem Willen, Alternativen zu prüfen. Die Stadt New York plant beispielsweise für 119 Mrd. Dollar den Bau einer schützenden Mauer um Manhattan. Diese Mauer würde nicht nur eine enorme Fläche verbrauchen, sondern zudem einen enormen Eingriff in die Umwelt des Menschen darstellen (Haas 2020).

Angesichts der Bedrohungslage erscheint es unverständlich, dass nicht überall auf der Welt der Anstieg des Meeresspiegels in die Stadtplanung angemessen berücksichtigt wird. So ordnete US-Präsident Trump an, die Bundesbehörden dürften keine präventiven stadtplanerischen Maßnahmen gegen Überflutungen ergreifen (Haas 2020). Doch selbst wenn politische Entscheidungsträgerinnen und -träger die aktuellen Prognosen des IPCC zum Meeresspiegelanstieg beherzigen würden, wäre nicht gewährleistet, dass bei geplanten Siedlungen und Infrastrukturen auf unerwartete dynamische Entwicklungen der Höchstwerte für den globalen mittleren Meeresspiegel rechtzeitig reagiert werden kann. Wer etwa 2014 auf Basis der IPCC-Daten geplant hatte, rechnete noch mit einem Höchstwert von 84 cm und nicht mit 110 cm, wie er aus dem Sonderbericht des IPCC (2019) hervorgeht.

Schon heute ist absehbar, dass nicht alle Regionen vor den Folgen eines steigenden Meeresspiegels geschützt werden können – dementsprechend müssen einige Regionen aufgegeben werden. Je nachdem, wie sich die Treibhausgasemissionen entwickeln werden und wie wirksam sowie innovativ die Maßnahmen für den Küsten- und Hochwasserschutz sind, werden mehr oder weniger Menschen ihre ursprünglichen Siedlungsgebiete verlassen müssen und damit Binnen- und transnationale Migrationsbewegungen auslösen und verstärken.

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Das Thema eignet sich grundsätzlich für die weitere Bearbeitung in Form eines gutachtenbasierten TA-Projekts. Hier sollte die vertiefende Analyse von Innovationen zum Umgang mit dem Meeresspiegelanstieg im Vordergrund stehen. Als Untersuchungskriterien böten sich grundsätzlich die Widerstandsfähigkeit der Innovationen in unterschiedlichen RCP-Szenarien an, ihre Auswirkungen auf Stadt- und Raumplanung und Gesellschaft, ihre Kosten sowie ihr Transferpotenzial in andere Weltregionen. Berücksichtigt werden sollten auch politische und soziale Rahmenbedingungen sowie Governanceaspekte, die für



die Umsetzung der Maßnahmen relevant sein könnten. Im Unterschied zum Sonderbericht des IPCC (2019), der ebenfalls eine Übersicht zu den Aktivitäten weltweit im Bereich des Küsten- und Hochwasserschutzes bietet, sollte in dem TA-Projekt auf das Potenzial der zurzeit nur als Prototypen existierenden Lösungen, Konzepte und Ideen fokussiert werden.

Literaturverzeichnis

- ▶ Aarninkhof, S. (2019): The Sand Motor. Stepping Stone for a Coastal Climate Lab? In: Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (Hg.): The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change. Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft, S.198–199
- ▶ Alcamo, J.; Olesen, J. E. (2012): Life in Europe under climate change. Chichester/Hoboken
- ▶ Bierkens, M.; Essink, G. O. (2019): Opportunities for Fresh Groundwater Resources in Mega-Nourishment. In: Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (Hg.): The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change. Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft, S.176–177
- ▶ BUKEA (Behörde für Umwelt und Energie Hamburg) (o.J.): Transformationspfad Klimaanpassung. <https://www.hamburg.de/klimaplan/13255424/transformationpfad-klimaanpassung/> (13.4.2020)
- ▶ C40 Cities (C40 Cities Climate Leadership Group) (2016): Good Practice Guide. Climate Change Adaptation in Delta Cities. http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/good_practice_briefings/images/5_C40_GPG_CDC_original.pdf?1456788885 (26.3.2020)
- ▶ Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, DLR Projektträger; scnat (Swiss Academy of Science; ProClim (ProClim – Forum for Climate and Global Change); UBA (Umweltbundesamt) (2020): IPCC- Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima (SROCC). Hauptaussagen. https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_SROCC.pdf (3.8.2020)
- ▶ DKK (Deutsches Klima-Konsortium); KDM (Konsortium Deutsche Meeresforschung) (Hg.) (2019): Zukunft der Meeresspiegel. Fakten und Hintergründe aus der Forschung (Jensen, J.; Klein, B.; Kusche, J.; Latif, M.; Ratter, B.; Rhein, M.; Rovere, A.; Schlurmann, T.; Schulz, M.; Stammer, D.; Tinz, B.; Vafeidis, A.; Visbeck, M.; Wachler, B.). Berlin, http://www.deutsche-meeresforschung.de/docs/kdm_dkk_zukunft_der_meeresspiegel.pdf (25.3.2020)
- ▶ Haas, M. (2020): »Wir können nicht sagen, das wird schon alles gut gehen«. Süddeutsche Zeitung Magazin, 27.2.2020, <https://sz-magazin.sueddeutsche.de/die-loesung-fuer-alles/kristina-hill-klimawandel-meeresspiegel-88410> (25.3.2020)
- ▶ HafenCity Hamburg GmbH (o.J.): Warften statt Deiche: Hochwasserschutz in der HafenCity. <https://www.hafen-city.com/de/konzepte/warften-statt-deiche-hochwasserschutz-in-der-hafencity.html> (17.4.2020)
- ▶ Hanson, S.; Nicholls, R.; Ranger, N.; Hallegatte, S.; Corfee-Morlot, J.; Herweijer, C.; Chateau, J. (2011): A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. In: Climatic Change 104(1), S.89–111
- ▶ IMAA (Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung): (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Umweltbundesamt (Hg.), https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf (25.3.2020)
- ▶ IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) (2019): Special Report: on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications für Low-Lying Islands, Coasts and Communities (Oppenheimer, M.; Glavovic, B.C.; Hinkel, J.; van de Wal, R.; Magnan, A.K.; Abd-Elgawad, A.; Cai, R.; Cifuentes-Jara, M.; DeConto, R.M.; Ghosh, T.; Hay, J.; Isla, F.; Marzeion, B.; Meyssignac, B.; Sebesvari, Z.). https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_SROCC.pdf (9.3.2020)
- ▶ Jue, M. (2020): Floating Architectures. Fantasies of Safety and Oceanic Riskscapes. In: Ghosh, B.; Sarkar, B. (Hg.): The Routledge companion to media and risk. New York, S.315–327
- ▶ Krishnan, S.; Lin, J.; Simanjuntak, J.; Hooimeijer, F.; Bricker, J.; Daniel, M.; Yoshida, Y. (2019): Interdisciplinary Design of Vital Infrastructure to Reduce Flood Risk in Tokyo's Edogawa Ward. In: Geosciences 9(8), S.357
- ▶ Kulp, S.A.; Strauss, B. H. (2019): New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. In: Nature communications 10(1), S.1–12
- ▶ Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (2019): Exploring other Sandy Shores. In: Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (Hg.): The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change. Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft, S.164–165
- ▶ Luijendijk, A.; van Thiel de Vries, J. (2019): Sandy Strategies. In: Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (Hg.): The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change. Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft, S.160–163
- ▶ Luijendijk, A.; Vicolainen, V. (2019): Sandscaping inspired by the Sand Motor. In: Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (Hg.): The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change. Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft, S.166–167
- ▶ Mrasek, V. (2019): Steigender Meeresspiegel. Viel mehr Menschen bedroht als gedacht. Deutschlandfunk, 30.10.2019, https://www.deutschlandfunk.de/steigender-meeresspiegel-viel-mehr-menschen-bedroht-als.676.de.html?dram:article_id=462262 (25.3.2020)
- ▶ Müller, J.-M.; Gönnert, G. (2018): Aktuelle Entwicklungen im Hamburger Küstenschutz. In: Die Küste 86, S.513–519
- ▶ Pschak, E. (2019): Kuh über Wasser. Süddeutsche Zeitung, 22.11.2019, <https://www.sueddeutsche.de/geld/floatingfarm-kuh-ueber-wasser-1.4688167> (25.3.2020)

- ▶ Revkin, A. (2019): Floating cities could ease the world's housing crunch, the UN says. National Geographic, 5.4.2019, <https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/04/floating-cities-could-ease-global-housing-crunch-says-un/> (26.3.2020)
- ▶ Schadwinkel, A. (2019): Sonderbericht zum Klimawandel. Die Erde versinkt in Wasser und Salz. ZEIT ONLINE, 25.9.2019, <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2019-09/sonderbericht-klimawandel-ipcc-report-ergebnisse-weltklimarat-klimaschutz> (25.3.2020)
- ▶ Schmitt, S. (2019): Meeresspiegel. Die Flut von morgen. ZEIT ONLINE, 25.9.2019, <https://www.zeit.de/2019/40/meeresspiegel-anstieg-wasserstand-klimaschutz-weltklimarat> (25.3.2020)
- ▶ Schröder, T. (2018): Die Natur als Bollwerk gegen die Wassermassen. Süddeutsche Zeitung, 7.1.2018, <https://www.sueddeutsche.de/wissen/deichbau-die-natur-als-bollwerk-gegen-die-wassermassen-1.3812282> (31.3.2020)
- ▶ Stalenberg, B.; Kikumori, Y. (2008): Urban flood control on the rivers of Tokyo metropolitan. In: Graaf, R.; Hooimeijer, F. (Hg.): Urban Water in Japan. London, S.119–142
- ▶ Tokyo Institute of Technology; Delft University of Technology (2016): Challenges in coastal flood risk reduction – collaboration between the Netherlands and Japan. NWO-JSPS Joint Seminar. https://pure.tudelft.nl/portal/files/20671410/NWO_JSPS_Joint_Seminar_2016_Report.pdf (7.4.2020)
- ▶ UN (United Nations) (2019): Sustainable Floating Cities Can Offer Solutions to Climate Change Threats Facing Urban Areas, Deputy Secretary-General Tells First High-Level Meeting. 3.4.2019, <https://www.un.org/press/en/2019/dsgsm1269.doc.htm> (26.3.2020)
- ▶ Van Oudenhoven, A.; Aukes, E.; Luijendijk, A. (2019): Towards multifunctional coastal management. In: Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (Hg.): The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change. Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft, S.14–17
- ▶ Van Oudenhoven, A.; Luijendijk, A. (2019): The Ecosystem Services of the Sand Motor. In: Luijendijk, A.; van Oudenhoven, A. (Hg.): The Sand Motor: A Nature-Based Response to Climate Change. Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast. Delft, S.138–141
- ▶ Wood, B. (o.J.): BIG designs a floating city that could survive a hurricane. The Spaces, <https://thespaces.com/big-designs-a-floating-city-that-could-survive-a-hurricane/> (16.4.2020)

Das Horizon-Scanning ist Teil des methodischen Spektrums der Technikfolgenabschätzung im TAB.

**Horizon
SCANNING**

Mittels Horizon-Scanning werden neue technologische Entwicklungen beobachtet und diese systematisch auf ihre Chancen und Risiken bewertet. So werden technologische, ökonomische, ökologische, soziale und politische Veränderungspotenziale möglichst früh erfasst und beschrieben. Ziel des Horizon-Scannings ist es, einen Beitrag zur forschungs- und innovationspolitischen Orientierung und Meinungsbildung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zu leisten.

In der praktischen Umsetzung werden im Horizon-Scanning softwaregestützte Such- und Analyseschritte mit expertenbasierten Validierungs- und Bewertungsprozessen kombiniert.

Herausgeber: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Gestaltung: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Bildnachweise: © elgol/iStock (S. 1), © mpix-foto/AdobeStock (S. 2), © Image'in/AdobeStock (S. 4), © Delphotostock/AdobeStock (S. 5), © Rotterdam Partners (S. 6), © creativenature.nl/AdobeStock (S. 7)

ISSN-Internet: 2629-2874