



Untersuchung der Hydrodynamik im Bereich des geplanten Offshore Windparks „Gennaker“

Studie im Auftrag der

OWP Gennaker GmbH,
Stephanitorsbollwerk 3

28217 Bremen

Revision Nr. 3.0 der gleichnamigen Studie K. DUWE et al. 2016

Verfasser:

Hydromod GbR

Dipl.-Ozean. Dr. rer. nat. K. Duwe
Hamburg am 31.01.2024

IfGDV Wissenschaftliche Beratung

Dipl.-Math. Dr. rer. nat. K. Buckmann
Hinrichshagen am 31.01.2024

Verzeichnis der Abkürzungen

USG	Untersuchungsgebiet
roi	Projektgebiet oder „region of interest“
OWP	Offshore Windpark
WEA	Windenergieanlage
USP	Umspannplattform
S_{Boden}	Salzgehalt 1 m über Seegrund [psu]
S_{Oben}	Salzgehalt 1 m unter der Gewässeroberfläche [psu]
δS	Vertikale Salzgehaltsdifferenz
G	Schichtungskoeffizient
D_OWP	Durchmesser des OWP
B_OWP	Breite des OWP
V_OWP	Projizierter Verbau durch den OWP
C_OWP	Charakteristische Zahl des OWP
MBI	M ajor B altic I nflow
psu	p ractical s alinity u nit
BSH	B undesamt für S eeschifffahrt und H ydrographie
IOW	I nstitut für O stseeforschung W arnemünde
DHHN92	D eutsches H aupt h öhen n etz (einheitlich für alle Bundesländer seit 1992)

Inhaltsverzeichnis

1. Anliegen und Methodik
2. Hydrographie
 - 2.1 Hydrographische Eigenschaften des USG
 - 2.2 Bathymetrie des Projektgebietes
3. Einbauten in See und deren Auswirkungen
 - 3.1 Auswirkungen auf die vertikale Vermischung
 - 3.2 Auswirkungen auf den Wasseraustausch durch Barrierewirkung
 - 3.3 Kumulative Effekte mit dem EnBW Windpark BALTIC 1
 - 3.3.1 Auswirkungen auf die vertikale Vermischung
 - 3.3.2 Auswirkungen auf den Wasseraustausch durch Barrierewirkung
4. Zusammenfassung
5. Verzeichnisse
 - 5.1 Verzeichnis der Abbildungen
 - 5.2 Verzeichnis der Tabellen
6. Literatur
7. Anlagen und Quellen

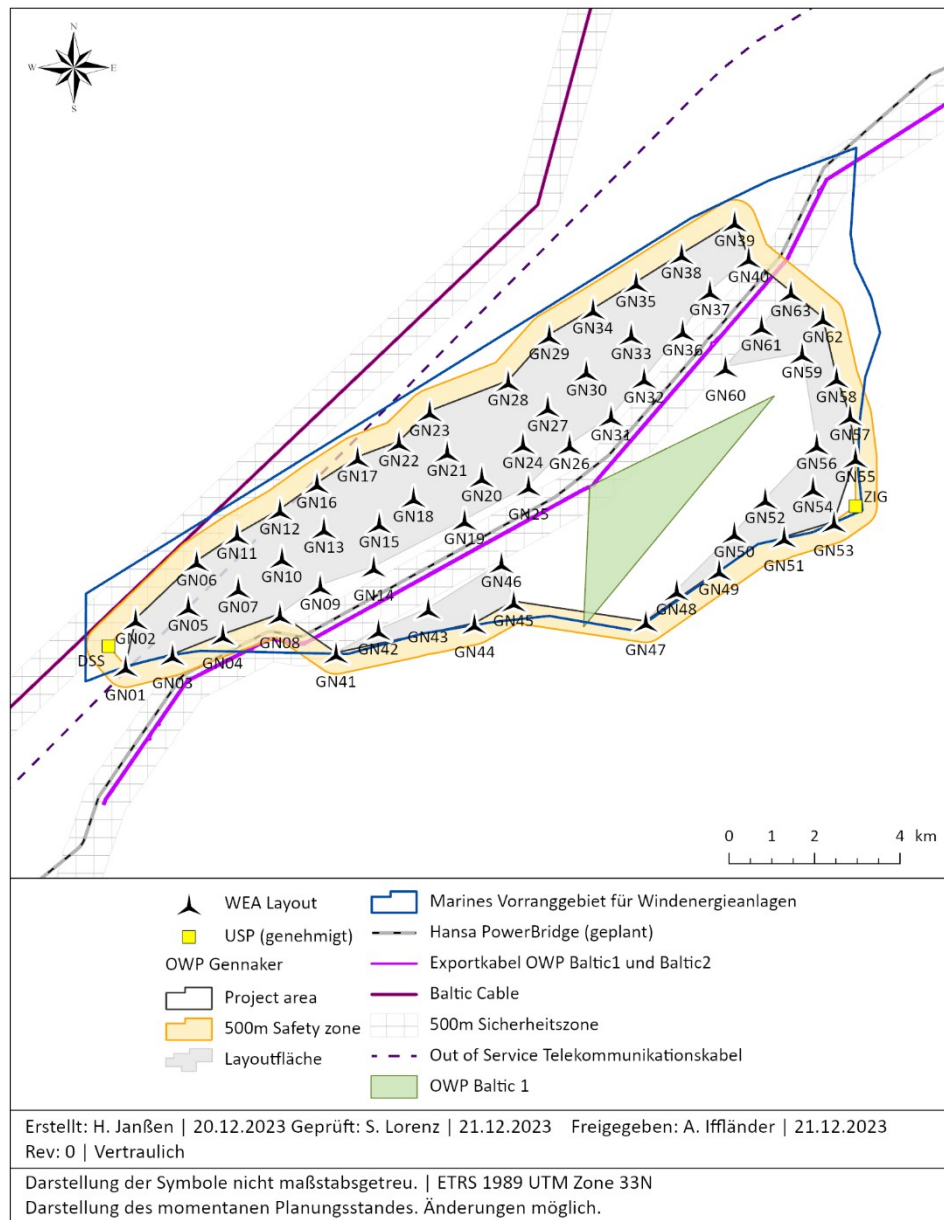
1. Anliegen und Methodik

Die Fa. OWP Gennaker GmbH, im Folgenden AG genannt, plant die Errichtung des Offshore Windparks „OWP Gennaker“ in der Ostsee innerhalb der 12 sm-Zone vor der Küste von Mecklenburg-Vorpommern. Die OWP Gennaker GmbH besitzt seit dem 15.05.2019 eine Baugenehmigung zur Errichtung und zum Betrieb des OWP „Gennaker“ im Windvorranggebiet „Darß“. Eine Änderungsgenehmigung aufgrund zwischenzeitlich veränderter Voraussetzungen für verfügbare Turbinentypen wurde 2024 erteilt.

Im Verlaufe sich zuspitzender multipler Krisen im Winter 2022 / 2023 nahmen generelle, d.h. auch internationale Marktverwerfungen, Inflation und krisenbedingte Engpässe stark zu. Die Folge war ein signifikanter Kosten- und Zinsanstieg, der sich entsprechend negativ auf die globalen Erzeugungs- und Lieferketten auswirkte, darunter auch auf die Offshore-Windindustrie und das Projekt Gennaker. Da sich bei hohen Vorverpflichtungen parallel die Inbetriebnahme erneut um ein weiteres Jahr verzögern sollte, musste nun der Einsatz der modifizierten OWEA erneut geprüft werden. Nach Herstellerangaben sollte der nächste Typenwechsel etwa ab Quartal 1 2026 erfolgen. Mit der Verschiebung der Inbetriebnahme von 2026 auf 2027 ging unabhängig davon ein weiterer Kostenanstieg einher. Infolgedessen ist eine erneute Umplanung des Vorhabens erfolgt, die eine zeitliche Verschiebung der Inbetriebnahme im Jahre 2028 (Base Case) und alternativ im Jahr 2029 vorsieht. Aufgrund der Systematik im BImSchG ist ein erneutes Genehmigungsverfahren erforderlich. Dafür ist die Änderung der bestehenden Genehmigung auf den zum neuen Umsetzungszeitpunkt verfügbaren Anlagentyp vorgesehen.

Die aktualisierte Planung des Vorhabens „OWP Gennaker“ umfasst nun die Errichtung und den Betrieb von 63 WEA der 15MW-Leistungsklasse sowie der windparkinternen Verkabelung. Die Errichtung und der Betrieb der beiden bereits genehmigten Umspannplattformen (USP) an der östlichen und westlichen Peripherie des Vorhabengebietes ist folglich nicht Gegenstand dieses Genehmigungsantrags, muss jedoch im Antrag und so auch in dieser Studie als bestehende Vorbelastung berücksichtigt werden.

Das angepasste Anlagen-Design zeigt Karte 1. Alle Projektunterlagen sind auf die oben genannten Änderungen zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren. Die vorliegende Studie aktualisiert die Studien DUWE et al. 2016 und DUWE et al. 2022.



Karte 1: Offshore-Windpark Gennaker- Standorte, Teilflächen und Vorbelastungen (OWP Gennaker GmbH, 2023).

Das Planungsgebiet, im Folgenden kurz die roi (region of interest), liegt östlich der Darßer Schwelle in der Umgebung des bereits mit 21 Windenergieanlagen (WEA) in Betrieb befindlichen EnBW Windparks BALTIC 1 (Abb. 1a) und hat von Zingst aus eine Küstenentfernung von ca. 15 km. Das Vorhaben plant die Errichtung von 63 WEA der 15MW-Leistungsklasse. Die beiden peripher gelegenen Umspannplattformen (USP) sind bereits genehmigt. Diese 65 Bauwerke sollen durch Fundamente im Meeresboden verankert werden; die WEA auf sog. Monopiles, die USP auf Jacket-Fundamenten. Die Wassertiefen betragen ca. 13-20 m.

Für hydrodynamische Untersuchungen muss ein dafür geeignetes größeres Untersuchungsgebiet, im Folgenden kurz USG, gewählt werden, welches die roi umfasst (Abb. 1a). Die bathymetrischen Verhältnisse innerhalb des USG und insbesondere auch des Projektgebietes (roi) zeigt Abb. 1b.

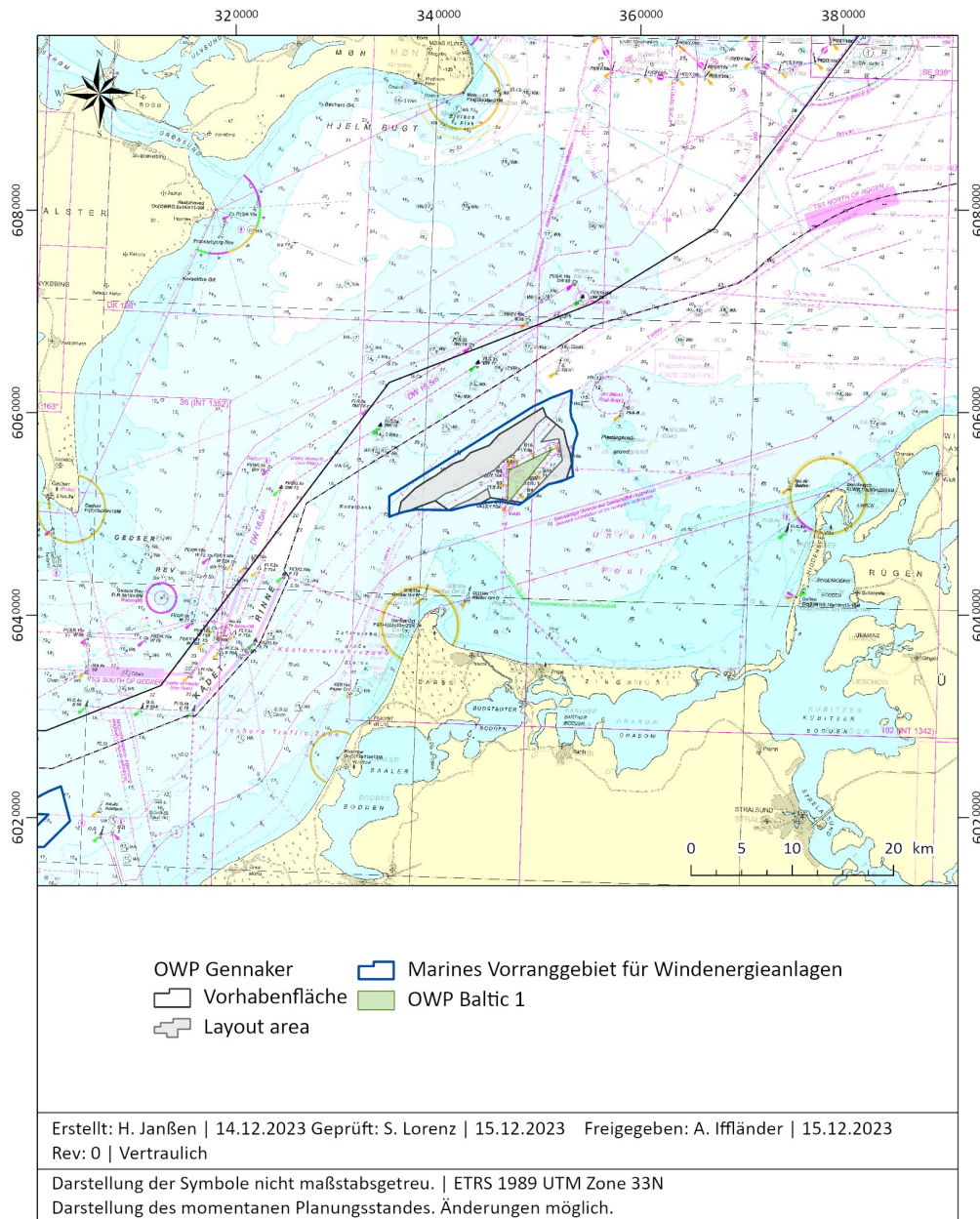


Abbildung 1a: Lage des USG.

Die Aufgabe der vorliegenden Studie ist es, die Hydrodynamik innerhalb des USG und insbesondere der roi zu beschreiben und eine Abschätzung des Einflusses der geplanten Fundamente auf die Salzwasserintrusionen in die zentrale Ostsee durchzuführen.

Das zentrale ökologische Anliegen ist der Erhalt eines ungehinderten Einstroms sauerstoffreichen Nordseewassers in die tiefen Bereiche der Ostsee. Die vorliegende Studie behandelt daher vor allem auch die Frage, ob und ggf. wie stark die geplanten Einbauten in See den Wasseraustausch großräumig beeinflussen können.

Die Abschätzung der Folgen der geplanten Eingriffe wird in zwei Schritten vorgenommen. Zuerst wird der Effekt von in See eingebauten Fundamenten für einzelne Einbauorte abgeschätzt. Hierzu wird die von den Einbauten

angeregte vertikale Salzgehaltsvermischung mittels eines Subgrid-Approximations-Verfahrens berechnet. Dieses von HYDROMOD entwickelte Verfahren kam bereits in anderen Vorhaben mit vergleichbarer Problematik (Kriegers Flak – heute EnBW Windpark Baltic 2, EnBW Windpark BALTIC I, ARCADIS Ost 1) erfolgreich zum Einsatz und ist entsprechend validiert. In einem zweiten Schritt wird eine robuste Abschätzung des Einflusses vorgenommen, der von dem OWP als Ganzes ausgeht.

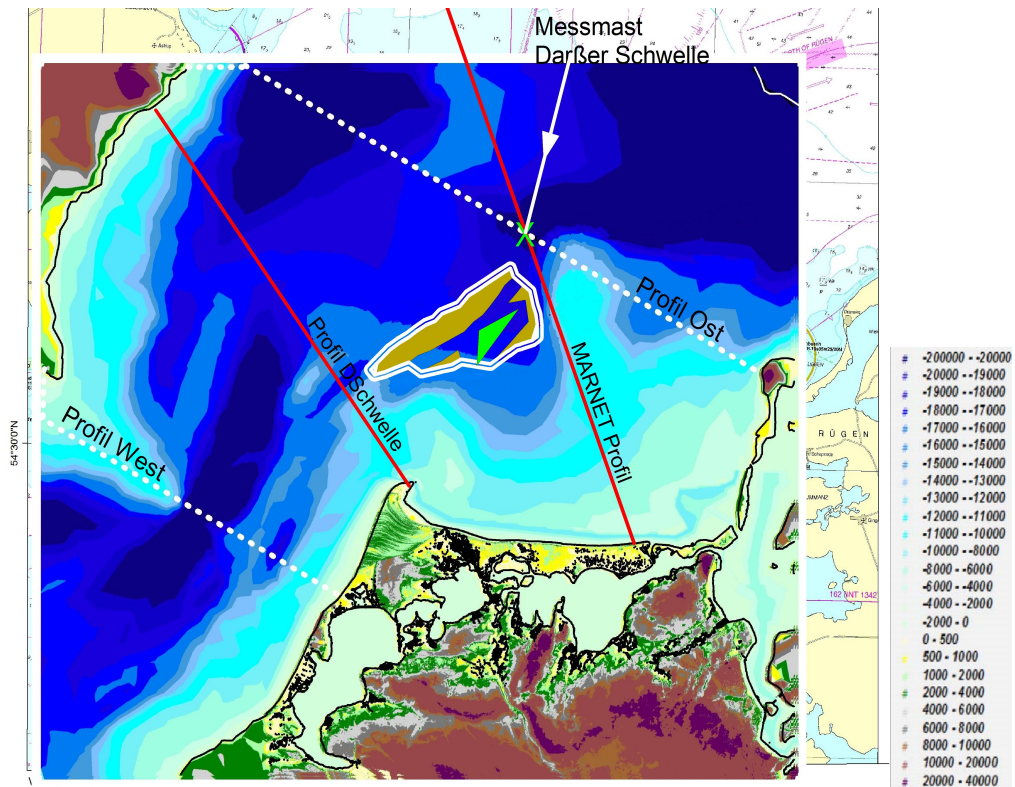


Abbildung 1b: Lage des Projektgebietes und des USG sowie die Darstellung der Wassertiefen und Geländehöhen in mm DHHN92 (Quellen: BSH, IOW, LUNG-MV).

2. Hydrographie

2.1 Hydrographische Eigenschaften des USG

Der Wasseraustausch zwischen Ostsee und Nordsee erfolgt zu ca. 80% über das USG und die darin liegende Darßer Schwellen und zu 20% über den Öresund. Der Wasseraustausch weist zwei wesentliche Komponenten auf:

Erstens ist die Ostsee ein Nebenmeer des Atlantiks, in das ein großes Einzugsgebiet entwässert. Dies hat zur Folge, dass die Nettobilanz des Wasseraustausches mit der Nordsee negativ ist. Es strömen im Mittel ca. 500 km³ Wasser pro Jahr (AURADA 1998) mehr aus der Ostsee heraus als hineinströmen. Diese Wassermenge fällt vor allem im Frühling an, was zur Folge hat, dass sich besonders in diesem Zeitraum eine weitgehend windunabhängige von Ost nach West gerichtete oberflächennahe Hauptstromrichtung ausbildet.

Zweitens stellt die Darßer Schwellen mit Wassertiefen von nicht mehr als 18 m die wichtigste Barriere für die Erneuerung des Wasserkörpers der östlichen Ostsee durch Zustrom salzreichen Wassers aus der Nordsee dar. Die Wasserqualität der Ostsee hängt demnach neben dem Süßwasserzufluss aus dem Einzugsgebiet vor allem auch von den seltenen starken

Salzwasserintrusionen (MBI – **M**ajor **B**altic **I**nflow nach MATTHÄUS (2006)) ab. Nach FRANCK et al. (1987) loc. cit. MORHOLZ et al. (2015) müssen mehrere Kriterien erfüllt sein, damit ein barotrop getriebener Einstrom über die Darßer Schwelle, d. h. durch das Untersuchungsgebiet (USG) in die Ostsee als MBI eingestuft werden kann. Dazu muss über mindestens 5 aufeinanderfolgende Tage hinweg an der Darßer Schwelle die Salinität am Seeboden größer oder gleich 17 psu betragen und der Schichtungskoeffizient G darf in dieser Zeit nicht über 0,2 liegen. Der Koeffizient G berechnet sich zu: $G = (1.0 - S_{\text{oben}}/S_{\text{Boden}})$.

Die Salzwasserintrusionen sind sehr gut untersucht und nach ihrer Stärke geordnet in einer Rangliste erfasst worden (Abb. 2). Die MBI sind in der Lage, die ungünstigen Rahmenbedingungen der Ostsee als Nebenmeer zeitweise aufzuheben und teilweise auszugleichen. Nach dem MBI in 2003 gab es zehn Jahre keine derartigen Salzwassereintrüche. In Abb. 2 sind die zuletzt beobachteten Ereignisse noch nicht enthalten. Während der MBI vom 14. - 22.11. 2015 mit 76 km³ eingeströmtem Salzwasser nur von mittlerem Rang war, belegte der zuvor im Zeitraum 13. - 25.12. 2014 beobachtete MBI mit ca. 198 km³ eingeströmtem Salzwasser zusammen mit dem Ereignis in 1913 Rang 3 der bis 1880 zurückreichenden Rangliste. Im Gefolge des starken MBI 2014 kam es zu weiteren stärkeren Salzwassereintrüchen, von denen zwei Ereignisse (11/2015 und Januar/Februar 2016) den Rang eines MBI schwacher bis mittlerer Intensität hatten (MSR 2016-2020).

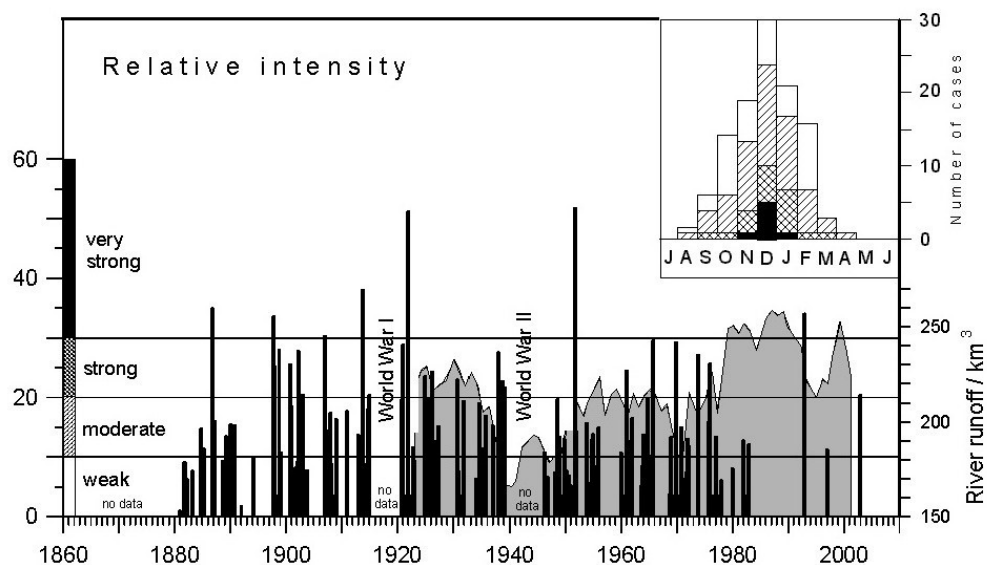


Abbildung 2: MBI's zwischen 1880 und 2005 nach MATTHÄUS 2006.

2.2 Bathymetrie des Projektgebietes

Die ROI wurde projektgebunden neu vermessen. Diese Tiefenvermessung wurde im Raster von 0,25 m x 0,25 m geliefert (Quelle 5b) und von den Autoren dieser Studie auf ein Raster von 25 m x 25 m interpoliert (Abb. 3). Im Zusammenhang mit der Analyse und Interpolation der Tiefenvermessung wurde eine begleitende Rauigkeitsanalyse ausgeführt, um Aufschlüsse über die Oberflächenstruktur des Seegrundes in der Umgebung der WEA und daraus evtl. abgeleitete Einsichten in längerfristige Effekte der bodennahen Strömung, z. B. der Sedimenttransporte, zu erhalten (K. DUWE et al. 2016). Die Rauigkeit des USG ist vornehmlich von den hydrodynamischen Gegebenheiten (Wellen- und Strömungsbedingungen) im USG geprägt und nimmt i. A. von West nach Ost ab. Im östlichen Bereich wird die Textur des Seegrundes von dem Seekabel des OWP „EnBW Windpark BALTIC 1“

geschnitten. Für die genauere Beurteilung der hydrographischen Verhältnisse wurde um jeden Standort einer WEA ein Puffer gelegt, innerhalb dessen die gemessenen Wassertiefen statistisch analysiert wurden. Da die WEA auf Monopiles mit einem Durchmesser von max. 9 m (am Seegrund) errichtet werden sollen, wurde der Puffer aus einem Bereich von 4,50 m Radius und einem darum liegenden Ring der Breite von 18 m festgelegt; der Puffer umfasst somit je einen Bereich von 22,5 m Radius um jeden geplanten WEA-Standpunkt. Abb. 4 zeigt beispielhaft die Pufferung der GN08; Tab. 1 gibt die Statistik der Wassertiefen im jeweiligen Puffer um jede WEA an.

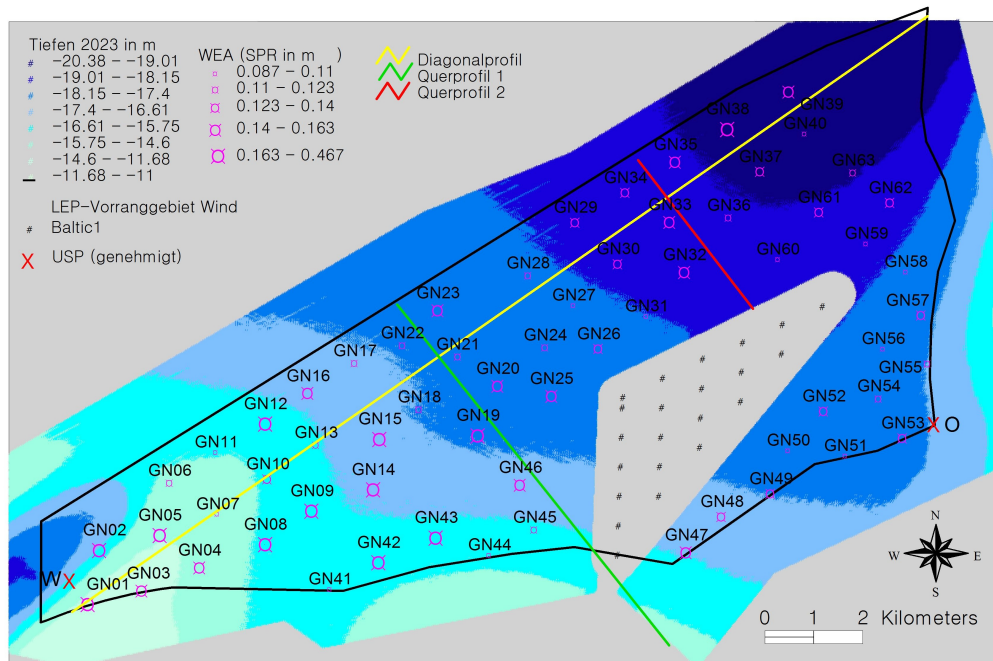


Abbildung 3: Wassertiefen der roi in m bezogen auf DHHN16 (Quelle 5b) und Standorte der geplanten Einbauten in See, größtenklassifiziert anhand der Spreizung der Wassertiefen (statSPR in Tab. 1) um die WEA sowie der Vorbelastungen durch OWP „EnBW Windpark BALTIC 1“ und die bereits genehmigten USP-Ost („O“) und USP-West („W“).

Tabelle 1: Statistik der Verteilung der Wassertiefen um die WEA-Standorte

ID	StatAnzahl Peilpkt-	StatMIN [mm]	StatMAX [mm]	statSPR [mm]	StatAVG [mm]	StatST D [mm]
GN01	25426	-14355	-14180	175	-14273	32
GN02	25426	-16719	-16522	198	-16623	42
GN03	25426	-14149	-14000	149	-14084	26
GN04	25426	-14953	-14810	143	-14895	23
GN05	25426	-14851	-14675	175	-14762	28
GN06	25426	-15641	-15525	116	-15583	19
GN07	25426	-15188	-15099	88	-15144	14
GN08	25426	-16123	-15657	467	-15939	53
GN09	25426	-16559	-16135	424	-16370	48
GN10	25426	-15918	-15791	127	-15870	16
GN11	25426	-15858	-15748	110	-15806	17
GN12	25426	-16456	-16286	169	-16380	31
GN13	25426	-16570	-16455	115	-16523	20
GN14	25426	-16874	-16700	174	-16793	22
GN15	25426	-17124	-16823	301	-17040	42

GN16	25426	-16930	-16772	158	-16875	26
GN17	25426	-17341	-17222	119	-17285	16
GN18	25426	-17466	-17343	123	-17414	18
GN19	25426	-17587	-17405	182	-17517	33
GN20	25426	-17715	-17552	163	-17655	24
GN21	25426	-17690	-17573	117	-17647	17
GN22	25426	-17561	-17444	117	-17505	16
GN23	25426	-17735	-17582	153	-17669	21
GN24	25426	-17929	-17805	123	-17874	18
GN25	25426	-17766	-17623	142	-17708	19
GN26	25426	-17933	-17793	140	-17870	21
GN27	25426	-18079	-17972	107	-18037	16
GN28	25426	-18084	-17961	123	-18041	17
GN29	25426	-18359	-18220	139	-18309	15
GN30	25426	-18356	-18225	131	-18311	23
GN31	25426	-18174	-18069	106	-18136	15
GN32	25426	-18520	-18375	145	-18451	19
GN33	25426	-18670	-18529	141	-18615	20
GN34	25426	-18578	-18442	136	-18519	20
GN35	25426	-18959	-18807	152	-18891	18
GN36	25426	-18903	-18786	117	-18858	19
GN37	25426	-19273	-19137	135	-19223	19
GN38	25426	-19333	-19143	190	-19244	30
GN39	25426	-19679	-19521	158	-19600	21
GN40	25426	-19512	-19413	99	-19457	16
GN41	25426	-16177	-16070	107	-16133	17
GN42	25426	-16395	-16147	249	-16232	34
GN43	25426	-16455	-16154	301	-16352	23
GN44	25426	-16099	-16007	91	-16062	12
GN45	25426	-16540	-16421	119	-16497	15
GN46	25426	-17167	-17014	153	-17108	21
GN47	25426	-16773	-16624	149	-16704	17
GN48	25426	-17213	-17075	137	-17151	17
GN49	25426	-17480	-17350	130	-17428	21
GN50	25426	-17754	-17667	87	-17719	10
GN51	25426	-17763	-17655	109	-17725	18
GN52	25426	-17930	-17802	128	-17871	19
GN53	25426	-17637	-17510	127	-17589	13
GN54	25426	-17819	-17700	119	-17775	13
GN55	25426	-17450	-17331	119	-17388	14
GN56	25426	-17919	-17810	109	-17878	19
GN57	25426	-17716	-17576	139	-17655	24
GN58	25426	-18049	-17952	97	-18013	14
GN59	25426	-18413	-18304	109	-18366	16
GN60	25426	-18657	-18549	108	-18610	16
GN61	25426	-18926	-18796	130	-18871	18
GN62	25426	-18571	-18444	127	-18517	17
GN63	25426	-19150	-19039	111	-19101	15

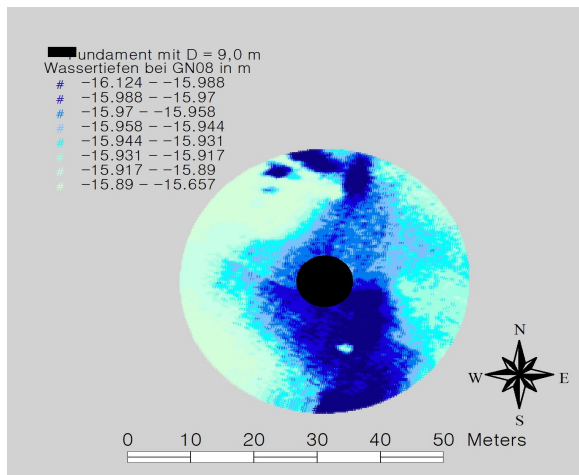


Abbildung 4: Wassertiefen bei WEA GN08¹

Um die Struktur des Seegrundes größerräumig zu betrachten, wurden ein von Südwest nach Nordost gehendes Diagonalprofil und zwei senkrecht zur Hauptstromrichtung liegende Tiefenprofile (Querprofile) angelegt (s. Abb. 3) und analysiert (Abb. 5a, 5b und 5c). Das Tiefenprofil 1 (s. Abb. 3, cyanfarbene Linie) verläuft senkrecht zur Hauptstromrichtung und dient zusätzlich dazu, die Positionen der senkrecht zur Profil projizierten Standorte der geplanten Fundamente (WEA-Symbole), d. h. die Projektion des OWP Designs auf ein für die Hydrodynamik in der ROI normatives Profil zu projizieren. Die Lage und Dichte der Projektionspunkte auf dem Profil wird als ein Hinweis auf die von der Errichtung des OWP Gennaker ausgehende Veränderung der „hydraulischen Glattheit“ des Projektgebietes interpretiert.

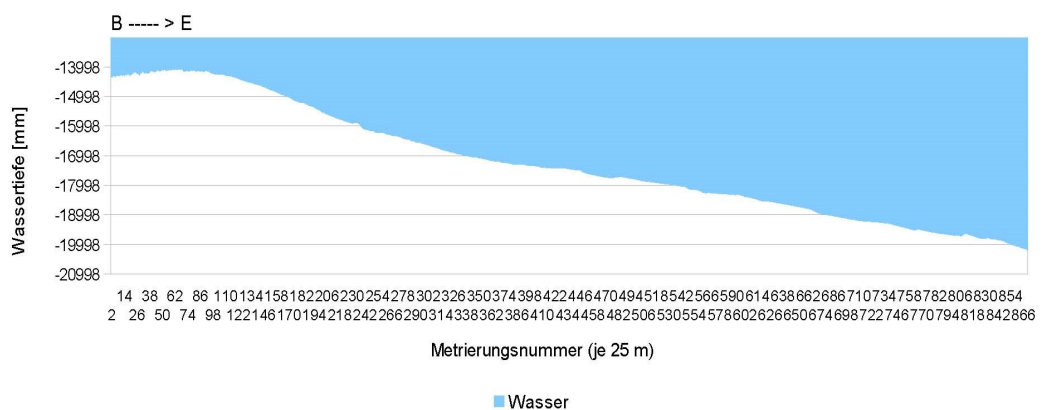


Abbildung 5a: Diagonalprofil von SW nach NE durch das Projektgebiet
Außerhalb des durch die Querprofile 1 und 2 eingegrenzten Bereiches mit tlw. sehr unruhigen Lagebedingungen der Sedimente (Abb. 5b und 5c) sind keine nennenswerten Unebenheiten des Seegrundes mehr auszumachen.

Die anhand der Bathymetrie erkennbaren Bereiche des USG, in denen stärkere Sedimentumlagerungen stattfinden, sollen hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften der dort vorhandenen Sedimente weiter

¹ ca. 7 m südlich von WEA DN08 zeigt sich eine singuläre, um bis zu 10 cm erhöhte Fundstelle, evtl. ein großer Stein mit der Länge ca. 2,5 m und der Breite 1,5 m

charakterisiert werden. Hierzu wurde die Sedimentverteilungskarte 2935 (Quelle: BSH Hamburg und IOW Warnemünde) herangezogen, die originale Karte (Quelle 0) wurde für das Projekt erworben.

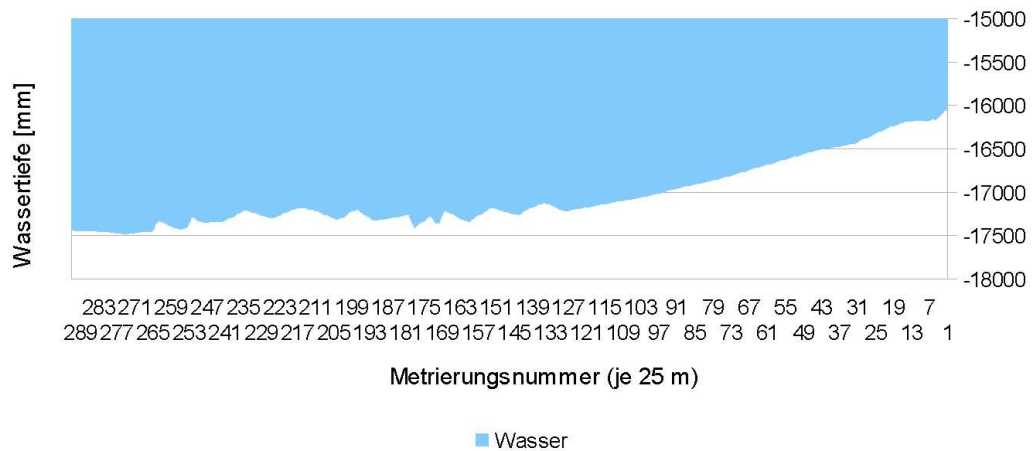


Abbildung 5b: Das Querprofil 1 zeigt im NW unruhige Lageverhältnisse und Aufwerfungen der Sedimente an, die sich nach NE (hangauf) beruhigen.

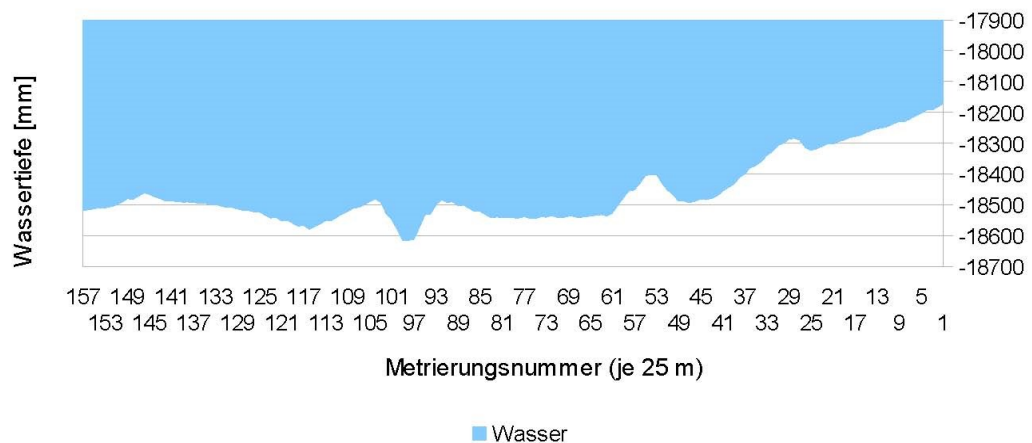
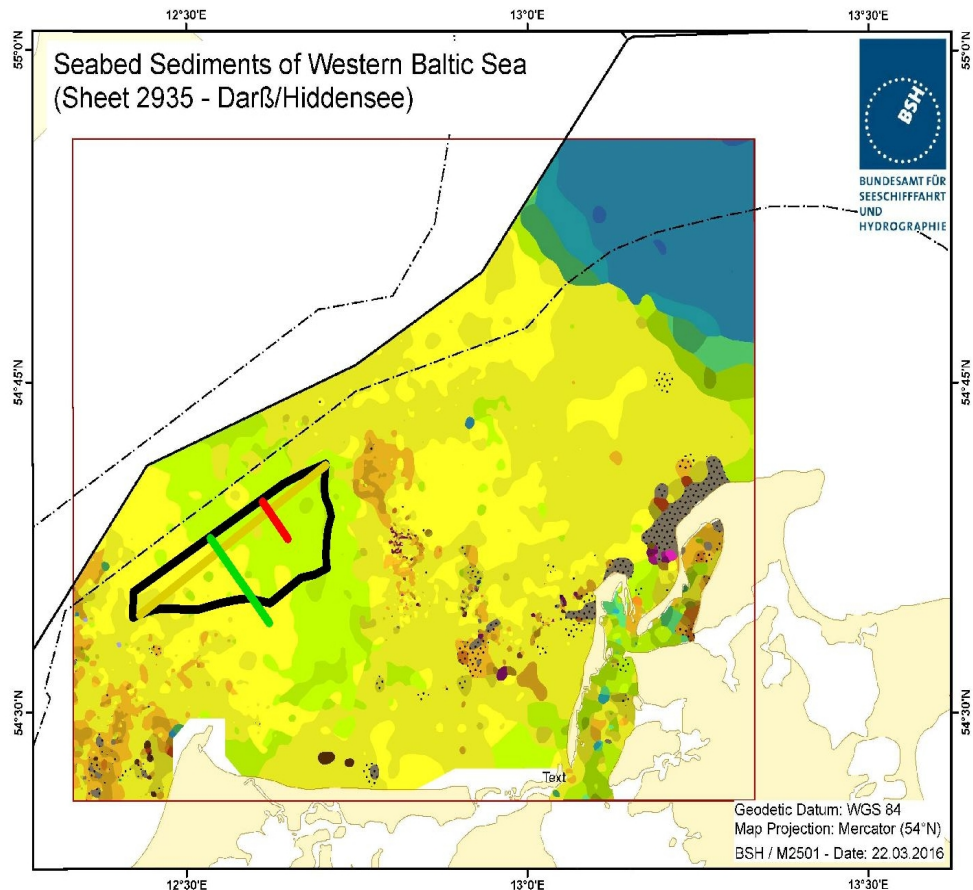


Abbildung 5c: Das Querprofil 2 schneidet in gesamter Breite mehrere ca. 10 cm hohe Ribbel, die nennenswerte Sedimentumlagerungen durch hydrodynamische Kräfte belegen.

Abb. 6 zeigt die Sedimenthauptgruppen im USG. Abb. 6 zeigt weiter, dass im Bereich des Querprofils 1 (cyan-farbene Linie) eine Sortierungsgrenze der Sedimente verläuft. Im Westen des Profils liegt "feiner Sand, sehr gut sortiert", im Osten ist der Übergang zu "sehr feiner Sand, sehr gut sortiert" vollzogen. Damit kann als gesichert gelten, dass hydrodynamische Kräfte am Gewässerboden i. d. R. von West nach Ost gerichtete Verschiebe- und Sortierarbeit leisten, durch die sehr feiner Sand auf den Unterwasserhang geworfen wird. Es ist wahrscheinlich, dass die Sedimente im USG hinsichtlich ihrer Lagestabilität als ein weitgehend kohäsionsloses Lockergestein angesehen werden können. Strömungen, die unter dieser Annahme nicht mehr in der Lage sind, sehr feinen Sand (Durchmesser < 0,125 mm) zu bewegen, besitzen Größenordnungen von nicht mehr als einigen cm/s.



Sediments

Classification after Tauber (2012)

Gravel, very well sorted	Medium sand, poorly sorted	Medium silt, poorly sorted
Gravel, well sorted	Medium sand, very poorly sorted	Medium silt, very poorly sorted
Gravel, moderately sorted	Fine sand, very well sorted	Fine silt, very well sorted
Gravel, poorly sorted	Fine sand, well sorted	Fine silt, well sorted
Gravel, very poorly sorted	Fine sand, moderately sorted	Fine silt, moderately sorted
Very coarse sand, very well sorted	Fine sand, poorly sorted	Fine silt, poorly sorted
Very coarse sand, well sorted	Fine sand, very poorly sorted	Fine silt, very poorly sorted
Very coarse sand, moderately sorted	Very fine sand, very well sorted	Very fine silt, very well sorted
Very coarse sand, poorly sorted	Very fine sand, well sorted	Very fine silt, well sorted
Very coarse sand, very poorly sorted	Very fine sand, moderately sorted	Very fine silt, moderately sorted
Coarse sand, very well sorted	Very fine sand, poorly sorted	Very fine silt, poorly sorted
Coarse sand, well sorted	Very fine sand, very poorly sorted	Very fine silt, very poorly sorted
Coarse sand, moderately sorted	Coarse silt, very well sorted	Clay, very well sorted
Coarse sand, poorly sorted	Coarse silt, well sorted	Clay, well sorted
Coarse sand, very poorly sorted	Coarse silt, moderately sorted	Clay, moderately sorted
Medium sand, very well sorted	Coarse silt, poorly sorted	Clay, poorly sorted
Medium sand, well sorted	Coarse silt, very poorly sorted	Clay, very poorly sorted
Medium sand, moderately sorted	Medium silt, very well sorted	Lag sediment
	Medium silt, well sorted	Clay, unspecified
	Medium silt, moderately sorted	Peat
		Stones

Abbildung 6: WEA des „OWP Gennaker“ vor dem Hintergrund der Sedimenthauptgruppen nach der Sedimentverteilungskarte „Seabed Sediments of Western Baltic Sea (Sheet 2935 – Darß/Hiddensee)“, Quelle: BSH Hamburg und IOW Warnemünde

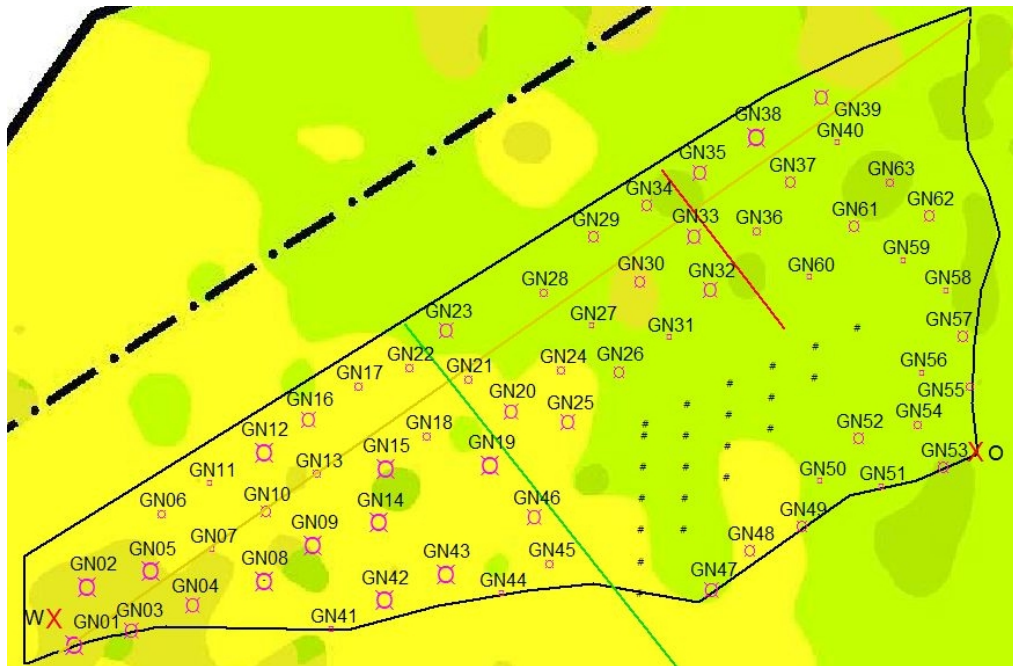


Abbildung 6a: Auszug aus Abb. 6: WEA des „OWP Gennaker“ vor dem Hintergrund der Sedimenthauptgruppen nach der Sedimentverteilungskarte „Seabed Sediments of Western Baltic Sea (Sheet 2935 – Darß/Hiddensee)“, Quelle: BSH Hamburg und IOW Warnemünde

Eine grobe Abschätzung möglicher Stromgeschwindigkeiten im USG kann aus den zuvor dargestellten MBI und aus der Geometrie des Ostprofils und des Westprofils, welche das USG seeseitig begrenzen (Abb. 1a), erhalten werden. Nimmt man als Grundlage der Abschätzung der möglichen Stromgeschwindigkeiten den zuvor beschriebenen MBI von 2014 mit 198 km³ Einstrom in 11,5 Tagen, so ergaben sich an den Querprofilen des USG überschlägig über 11,5 Tage gemittelte Hauptströme von 199.275 m³/s, was am Westprofil ca. 0,85 m/s und am Ostprofil ca. 0,18 m/s mittleren Hauptstrom bedeutet hat. An den tiefsten Stellen des Westprofils (Kadetrinne) hat das überschlägig zu einer vertikal gemittelten Strömung von 1,82 m/s geführt. An den tiefsten Stellen des Ostprofils wären überschlägig vertikal gemittelte Strömungen von 0,24 m/s aufgetreten.

Für dieses Fachgutachten lagen keine Strömungsmessungen aus dem Planungsgebiet und seiner näheren Umgebung vor. Zur Abschätzung typischer Strömungsgeschwindigkeiten konnte jedoch auf Simulationsergebnisse des operationellen Modells des BSH für das Jahr 2007 zurückgegriffen werden. Hiernach kann im Bereich von typischen Geschwindigkeiten in Bodennähe um 0,2 – 0,3 m/s ausgegangen werden, welche jedoch, je nach Windwirkung, erheblich variieren können. Mit der Tiefe nimmt die Strömung merklich ab und verändert ihre Richtung Ablenkung bei Ekman-Zirkulation bis hin zu gegenläufigen Strömungen. Bei Starkwind- und Sturmereignissen sowie in ausgeprägten Ein- oder Ausstromphasen können im Tiefenbereich von 6 m und 16 m MSL mit 50jähriger Wiederholungsrate Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 1,48 m/s auftreten (JÖRSS BLUNCK ORDEMANN 2016, S. 32). Diese extremen Strömungsereignisse führen zu bodennahen Stromgeschwindigkeiten von ca. 1 m/s und oberflächennahen Geschwindigkeiten von bis zu 1,69 m/s (D. PRANDL 2009, S. 82ff).

3. Einbauten in See und deren Auswirkungen

Die Salzkonzentration des einströmenden Wassers aus der Nordsee ist wegen ihres dominanten Einflusses auf die Wasserdichte der zentrale Faktor für eine besonders starke Tiefenbelüftung des Arkona Beckens. Daher ist besonderes Augenmerk auf einen eventuellen Einfluss des geplanten Windparks auf die vertikale Vermischung in der Wassersäule zu richten, da diese bei ungünstiger Prognose die Eindringtiefe von Salzkeilen bei Einstromereignissen in die innere Ostsee reduzieren könnte.

3.1 Auswirkungen auf die vertikale Vermischung

Zur Abschätzung der Auswirkungen der geplanten Einbauten in See auf den Salzgehalt wurden die Geschwindigkeits- und Salzgehaltsprofile des BSH Messpunktes Darßer Schwelle (Abb. 7) mit Hilfe vorhandener Modelldaten des BSH auf fünf ausgewählte Positionen (Abb. 8) übertragen. Anschließend wurde, wie bei Modellrechnungen üblich, der Effekt der in See eingebauten Fundamente durch Berechnung der vertikalen Salzgehaltsvermischung durch ein Subgrid-Approximations-Verfahren berechnet. Dieses von HYDROMOD entwickelte Verfahren kam bereits in anderen Vorhaben mit vergleichbarer Problematik (Kriegers Flak - heute EnBW Windpark Baltic 2, EnBW Windpark BALTIC I, ARCADIS Ost 1) erfolgreich zum Einsatz und ist entsprechend validiert. Die für diese Approximationen erforderlichen Eingangsgrößen stammen aus den Ergebnissen von Simulationen mit einem feinskaligen Modell für Tripod-Fundamente. Diese Ansätze sind im vorliegenden Planungsfall als Worst-Case-Annahmen zu betrachten, da die hier als „Monopiles“ bzw. in zwei Fällen als „Jackets“ vorgesehenen Pfähle weniger Strömungswiderstand bieten als Tripod-Bauten.

Die nachfolgend aufgeführten Berechnungen wurden im Jahre 2016 auf Basis der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Planungsvorgaben durchgeführt.

Seither haben sich die Annahmen über zur erwartende Salzgehaltsverhältnisse (sowohl im Mittel als auch in ihren Extremwerten) nicht verändert. Obwohl keine neuere Tiefenvermessung des Areals vorliegt, sind nach fachlicher Einschätzung keine signifikanten Änderungen der Grundlagen der Modellbathymetrie anzunehmen.

Es verbleiben für eine möglicherweise notwendige Neubewertung nur die Auswirkungen der aktuellen Planungen durch die in ihrer Anzahl reduzierten Fundamente der neu positionierten und in ihrer Größe veränderten WEA (Quelle 4). Diese veränderten Standorte der WEA sind jedoch im Modellmaßstab als so marginal zu bewerten, dass die nachstehend gemachten Aussagen weiterhin in vollem Umfang gültig sind.

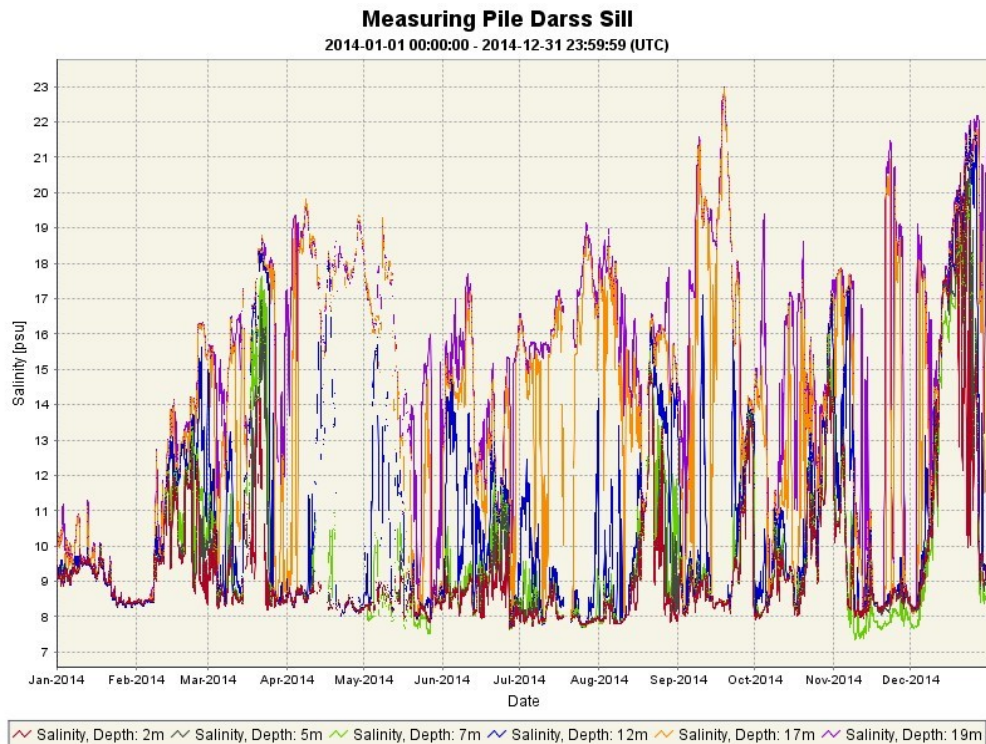


Abbildung 7: Vertikale Salzgehaltsprofile an der BSH-Messposition Darßer Schwelle (Lage s. Abb. 1b) im Jahr 2014 mit starken Einstromereignissen

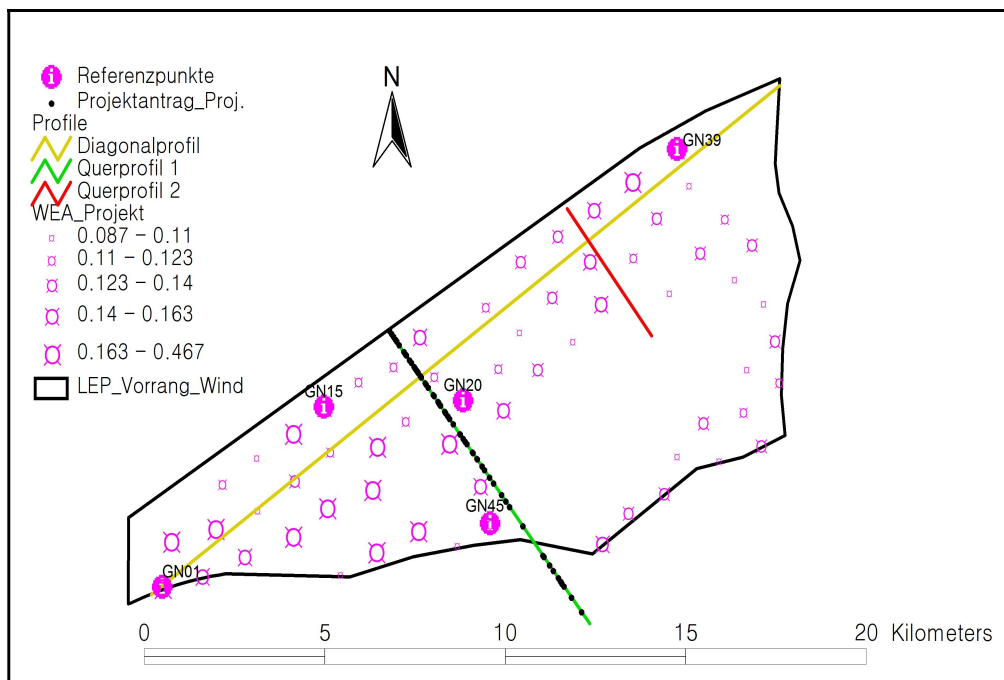


Abbildung 8 Die beantragten WEA des Projektes, größenklassifiziert nach statSPR in [m] (s. Tab. 1) sowie die Fußpunkte der Orthogonalprojektion aller WEA auf das Querprofil 1 zusammen mit den Referenzpunkten, an denen prognostisch Vermischungsfaktoren berechnet wurden.

Die Anzahl und Standorte wurden ausgewählt, um die Heterogenität der Strömungs- und Salzgehaltsverhältnisse zu erfassen. Die Prognosen in den Tabellen beziehen sich auf einzelne Teilvolumina von 25 m x 25 m x Wassertiefe. Bezogen auf den gesamten Windpark wird der kumulative Einfluss aller eingebauten Fundamente eher geringer sein, da große Teile des Querschnitts nicht durch Einbauten beeinträchtigt werden.

Um zusätzlich auch Extremsituationen bewerten zu können, wurden für den Einstromzeitraum vom 13. bis 25. Dezember 2014 (MBI) die Veränderungen des maximal auftretenden bodennahen Salzgehaltes und maximaler Schichtung ermittelt (Tab. 2). Die prognostizierten Veränderungen an den gewählten WEA-Standorten, simuliert auf Tripod-Fundamenten, bewegen sich demnach in der Größenordnung von 2 bis 5%.

Tabelle 2: Auswirkungen der WEA auf maximale Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für den Einstromzeitraum 13. – 25.11.2014 (fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP „Gennaker“)

Ort	Tiefe [m]	(ohne WEA)		(mit WEA)		Differenz
		S_{Boden}	δS	S_{Boden}	δS	S_{Boden}
GN01	14,4	13,51	3,51	13,32	3,13	-0,19
GN20	17,8	21,39	11,50	20,91	10,60	-0,48
GN39	19,7	21,63	11,79	21,14	10,82	-0,49
GN45	16,6	18,16	8,24	17,75	7,43	-0,41
GN16	17,0	19,96	10,03	19,51	9,14	-0,45

Um den Einfluss der WEA auf den Transport von Salzwasser über längere Zeiträume zu bewerten, wurden die stündlich berechneten Werte auf Quartalsmittelwerte umgerechnet (Tab. 3a, 3b und 3c). Die Zahlen für den bodennahen Salzgehalt (S_{Boden}) sowie für die vertikale Salzgehaltsdifferenz (δS) sind auf eine Fläche von 25 m x 25 m normiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die ausgewählten WEA selbst bei extremen Wetterlagen nur geringe lokale Veränderungen in den extremen und in den mittleren Salzgehaltswerten verursacht werden können. Anhand der verwendeten Messreihe des BSH für das Jahr 2014, das den MBI des Ranges 3 der seit 1880 geführten Rangliste einschließt, lassen sich keine aus dem Einbau einzelner Fundamente resultierenden praktisch relevanten Veränderungen nachweisen.

Tabelle 3a: Abschätzung mittlerer jahreszeitlicher Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für das Jahr 2014 **ohne den Einbau von Fundamenten** (BSH-Messposition und fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP Gennaker)

Mittlere Verhältnisse für Bodensalzgehalt und haline Schichtung in roi (Abschätzung ohne Windenergieanlagen für das Jahr 2014)									
Ort	Tiefe [m]	Jan. - März		April – Juni		Juli – Sept.		Okt. – Dez.	
		S_{Boden}	δS	S_{Boden}	δS	S_{Boden}	δS	S_{Boden}	δS
Darßer Schwelle	18,0	12,45	2,99	15,68	7,13	16,70	7,89	15,50	4,91
GN01	14,4	10,89	1,64	11,47	3,12	11,57	2,94	12,25	1,87
GN20	17,8	11,65	2,66	14,60	6,51	15,39	7,04	14,04	3,91
GN39	19,7	11,77	3,08	15,07	7,31	16,12	8,09	14,86	5,04
GN45	16,6	10,61	2,18	12,55	5,02	13,00	5,21	12,45	2,88
GN16	17,0	10,55	2,37	13,02	5,74	13,66	6,08	12,58	3,25

Tabelle 3b: Abschätzung mittlerer jahreszeitlicher Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für das Jahr 2014 **mit eingebauten Fundamenten** (fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP Gennaker)

Mittlere Verhältnisse für Bodensalzgehalt und haline Schichtung in roi (Abschätzung mit Windenergieanlagen für das Jahr 2014)									
Ort	Tiefe [m]	Jan. - März		April – Juni		Juli – Sept.		Okt. – Dez.	
		S _{Boden}	∂S	S _{Boden}	∂S	S _{Boden}	∂S	S _{Boden}	∂S
GN01	14,4	10,88	1,62	11,45	3,08	11,55	2,91	12,26	1,85
GN20	17,8	11,63	2,63	14,57	6,44	15,36	6,99	14,02	3,89
GN39	19,7	11,74	3,01	15,05	7,27	16,09	8,03	14,83	4,99
GN45	16,6	10,59	2,12	12,52	4,97	12,99	5,18	12,43	2,85
GN16	17,0	10,53	2,33	13,01	5,72	13,64	6,05	12,56	3,21

Tabelle 3c: Auswirkungen der WEA auf mittlere jahreszeitliche Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für das Jahr 2014 (**Differenztabelle aus 3a und 3b**, fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP Gennaker)

Mittlere Differenzen für Bodensalzgehalt und haline Schichtung in roi (Auswirkungen einzelner Windenergieanlagen für das Jahr 2014)									
Ort	Tiefe [m]	Jan. - März		April – Juni		Juli – Sept.		Okt. – Dez.	
		S _{Boden}	∂S	S _{Boden}	∂S	S _{Boden}	∂S	S _{Boden}	∂S
GN01	14,4	-0,01	-0,02	-0,02	-0,04	-0,02	-0,03	-0,01	-0,02
GN20	17,8	-0,02	-0,03	-0,03	-0,07	-0,03	-0,05	-0,02	-0,02
GN39	19,7	-0,03	-0,07	-0,02	-0,04	-0,03	-0,06	-0,03	-0,05
GN45	16,6	-0,02	-0,06	-0,03	-0,05	-0,01	-0,03	-0,02	-0,03
GN16	17,0	-0,02	-0,04	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,02	-0,04

Mit Ausnahme lokal eng begrenzter Effekte haben die geplanten Fundamente keinen wesentlichen Einfluss auf den Wasserstand. Typisch für einen derartigen lokalen Effekt ist die Bugwelle im Luv des Anstromes, welche sich, je nach Anströmgeschwindigkeit, mehr oder weniger deutlich ausbildet. Damit verglichen sind durch andere Effekte, z. B. barokline (thermohalin erzeugte) Prozesse verursachte Wasserstandsschwankungen erheblich geringer. Lediglich die lokalen Strömungen im unmittelbaren Bereich eines eingebauten Fundamentes werden durch die kleinen Wasserstandsschwankungen und die durch sie induzierten barotropen Strömungen beeinflusst.

3.2 Auswirkungen auf den Wasseraustausch durch Barrierewirkung

Wie bereits herausgestellt wurde, beziehen sich die berechneten Vermischungsfaktoren jeweils auf Teilvolumina: 25 m x 25 m x Wassertiefe. Bezogen auf den gesamten Windpark wird der kumulative Einfluss aller Fundamente eher geringer sein, da große Teile des Querschnitts nicht durch Einbauten beeinträchtigt werden. Daher ist nicht zu erwarten, dass **durch die Einbauten des OWP** die in den beschriebenen lokalen Vermischungsvorgängen im Umfeld der Fundamente der einzelnen WEA und **der bereits genehmigten USP** wirksame Energie ausreicht, um ggf. vorhandene Schichtungen großräumig zu beeinflussen oder gar aufzulösen. Es kann damit sicher ausgeschlossen werden, dass der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee aufgrund von Vermischungsprozessen in und um den OWP Gennaker praktisch bedeutsam beeinflusst werden wird.

Die Problematik soll im Folgenden aus einem anderen Blickwinkel betrachtet werden. Um die Gesamtheit der geplanten Einbauten in See, das sind **die 63 Fundamente** der geplanten technischen Anlagen, hinsichtlich ihrer summarischen Barrierewirkung abzuschätzen, wurden das geplante Layout des OWP kartiert (**z. B. Abb. 3**) und die Standorte der WEA und der **zwei**

USP durch Parallelprojektion rechtwinkelig auf das senkrecht zur Hauptstromrichtung liegende Querprofil 1 projiziert. Jedes Fundament korrespondiert so mit einem (WEA) oder mehreren (USP) Fußpunkten auf dem Querprofil. Der größte Abstand zweier Fußpunkte entlang des Profils gibt die „Breite des OWP“, B_{Gen} , an (Abb. 9), die im vorliegenden Planungsfall ca. 8.563 m beträgt. Bezieht man die Dimensionierung der Fundamentpfähle mit geplanten Durchmessern von max. 9 m ein, so ist jeder Fußpunkt auf dem Querprofil Mittelpunkt einer max. 9 m breiten Strecke. Abhängig vom Design des Windparks können sich diese Strecken mehr oder weniger überlappen. Im Planungsfall ergibt sich theoretisch eine entlang des Querprofils verbaute Strecke von ca. 576 m. Das Verhältnis aus verbauter Strecke und Breite des OWP beträgt ca. 0,067 und ist von der konkreten Lage des Profils unabhängig. Es wird maßgeblich vom geplanten Design des OWP Gennaker bestimmt und ist als ein Maß zu betrachten, das die durch die geplanten Einbauten in See reduzierte hydraulische Glattheit des Projektgebietes beschreibt. Es lässt sich auch als ein strömungswirksamer Verbau, V_{Gen} , eines beliebigen senkrecht zur Hauptstromrichtung liegenden Querprofils konstanter Tiefe und mit der Länge B_{Gen} um ca. 6,7% interpretieren. Je tiefer der Windpark gestaffelt ist, umso mehr relativiert sich die Bedeutung dieses Koeffizienten. Der Durchmesser eines OWP, D_{OWP} (Abb. 8), ist definiert als der maximale Abstand zweier WEA des OWP. Im vorliegenden Fall des OWP Gennaker beträgt der Durchmesser D_{Gen} ca. 17.711 m.

Die Charakteristische Zahl des OWP Gennaker, C_{Gen} , ist definiert als:

$$C_{Gen} = B_{Gen}/D_{Gen} * V_{Gen}/B_{Gen} \approx 8.563/17.566 * 0,067 \approx 0,0326$$

Da der theoretisch unterstellte Verbau des Querprofils innerhalb der offenen See liegt, hätte dieser zur Folge, dass die Strömung der durch den OWP gegebenen hydraulischen Vergrößerung teilweise zu hydraulisch glatteren Regionen, d. h. hin zu den Tiefwasserbereichen ausweicht. Dies beeinflusst den Wasseraustausch tendenziell positiv. Da der theoretische Verbau jedoch nur etwa 0,32% der Fläche des Querprofils „Westrand“ (Abb. 1b) ausmacht, erreicht der Effekt keine praktisch relevante Größenordnung.

3.3 Kumulative Effekte mit dem EnBW Windpark BALTIC 1

3.3.1 Auswirkungen auf die vertikale Vermischung

Eingebettet in das Gebiet des OWP Gennaker liegt im Südosten der bereits bestehende EnBW Windpark BALTIC 1 mit 21 WEA und einer USP, die jeweils als Monopiles mit Durchmessern bis ca. 4 m gegründet wurden. Für diese Ausführungen werden die beiden benannten OWP und die als Vorbelastung anzusehenden zwei USP des OWP „Gennaker“ zu einem „OWP Kum“ zusammengefasst. Der EnBW Windpark BALTIC 1 nimmt weniger als ein Zehntel der Fläche des OWP Kum ein. Die Abstände zwischen benachbarten WEA sind innerhalb des EnBW Windpark BALTIC 1 i. A. etwas geringer als im OWP Gennaker (Abb. 9). Die bathymetrische Variation ist innerhalb der Fläche des EnBW Windpark BALTIC 1 mit dem zentralen Bereich des geplanten OWP Gennaker vergleichbar (Abb. 9).

Abschätzungen der Salzgehaltsverhältnisse im zentralen Bereich des EnBW Windpark BALTIC 1, z. B. der WEA mit der Nummer 14 (Abb. 9) und einer Wassertiefe von ca. -18,0 m, ergeben einen maximalen Bodensalzgehalt von 21,13 psu. Für den gewählten Extremzeitraum 13.- 25. November 2014 ergibt

sich für diese WEA eine Vermischung in der Wassersäule von -0,39 psu (vgl. Tab. 2). Damit kann als gesichert gelten, dass die Vermischungsfaktoren der WEA in beiden OWP die gleiche Größenordnung besitzen. Wegen des im Vergleich zum OWP Gennaker geringeren mittleren Abstands der WEA im Bereich des EnBW Windpark BALTIC 1 ist im letzteren von leicht stärkeren Wechselwirkungen bei der Vermischung an den einzelnen WEA auszugehen. Wegen der Kleinheit des OWP und seiner vollständigen Einbettung in die konvexe Hülle des OWP Gennaker kommt dies für dessen Außenbereich nicht zum Tragen.

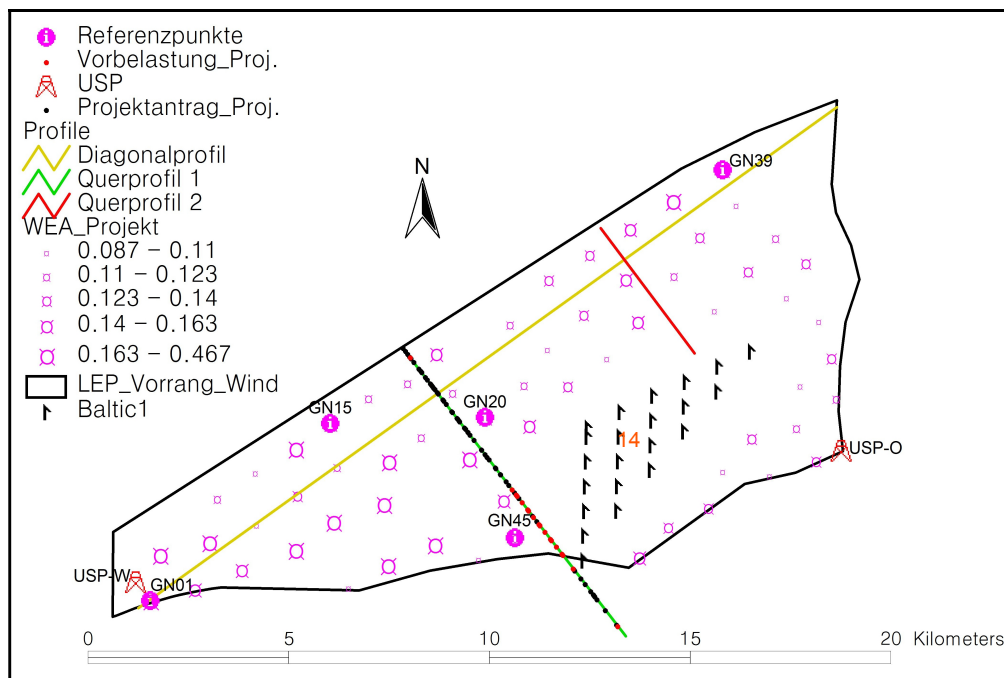


Abbildung 9: Die beantragten WEA, größeklassifiziert nach statSPR in [m] (s. Tab. 1) und die Vorbelastungen des Projektes (BALTIC 1 und zwei bereits genehmigte USP) sowie die Fußpunkte der Orthogonalprojektion aller Bauwerke auf das Querprofil 1 zusammen mit den Referenzpunkten, an denen prognostisch Vermischungsfaktoren berechnet wurden.

3.3.2 Kumulative Auswirkungen auf den Wasseraustausch durch Barrierewirkung

Mit der in Abschnitt 3.2 eingeführten Methodik errechnet sich der charakteristische Wert C_{Bal} des EnBW Windpark BALTIC 1 zu:

$$C_{Bal} \approx 2.475/6.697 * 78/6.697 \approx 0,0117.$$

Er ist sehr viel kleiner als $C_{Gen}=0,0326$, was auf eine erheblich niedrigere Barrierewirkung hinweist.

Die Breite des kumulierten Windparks, OWP Kum, ist gleich der Breite des OWP Gennaker: $B_{Kum} = B_{Gen} \approx 8.563 \text{ m}$.

Der Durchmesser des kumulierten Windparks, OWP_Kum, ist gleich dem Durchmesser des OWP Gennaker: $D_{Kum} = D_{Gen} \approx 17.566 \text{ m}$. Bei Einbeziehung des EnBW Windpark BALTIC 1 steigt der theoretische Verbau durch den OWP Gennaker von ca. 576 m auf einen gemeinsamen Wert von $V_{Kum} \approx 731 \text{ m}$ an.

Der charakteristische Wert des kumulierten OWP ergibt sich somit zu:

$$C_Kum = B_Kum/D_Kum * V_Kum/B_Kum \approx 8.563/17.566 * 0,085 \approx 0,041.$$

Der Wert ist nur wenig größer als der entsprechende Wert für den OWP Gennaker mit $C_Gen \approx 0,0326$, was auf geringfügig erhöhte Barrierewirkung schließen lässt. C_Kum wird maßgeblich von dem Design bestimmt, das sich aus den Planungen des OWP Gennaker, **zusammen mit zwei USP (Vorbelastung) und der Realisation des „EnBW Windpark BALTIC 1“ (Vorbelastung) zusammensetzt.**

Da der theoretisch unterstellte Verbau des Querprofils innerhalb der offenen See liegt, hätte dieser zur Folge, dass die Strömung der durch den kumulierten OWP gegebenen hydraulischen Vergrößerung teilweise zu hydraulisch glatteren Regionen, d. h. hin zu den Tiefwasserbereichen ausweicht. Dies beeinflusst den Wasseraustausch tendenziell positiv. Da der theoretische Verbau auch bei Kumulation beider OWP nur einen sehr geringen Bruchteil der Fläche des Querprofils „Westrand“ (0,4%) ausmacht, erreicht der Effekt auch hier keine praktisch relevante Größenordnung.

4. Zusammenfassung

Die Gutachter vertreten im Ergebnis ihrer Untersuchungen und Berechnungen die nach ihrer Meinung gesicherte Auffassung, dass die hydrodynamischen Einflüsse des geplanten Windparks Gennaker auf den Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee von vernachlässigbarer Bedeutung sind.

An einzelnen WEA innerhalb des OWP ergeben sich Änderungen des Strömungsfeldes, die jedoch außerhalb eines Nahfeldes nicht mehr relevant sind. Es sind lediglich noch schwache Überlagerungen und Wechselwirkungen mit abstromig gelegenen Anlagen möglich. Diese werden als unkritisch angesehen. Die lokal prognostizierten Veränderungen bleiben auf die unmittelbare Umgebung des Windparks beschränkt und liegen darüber hinaus unterhalb technisch noch erfassbarer Größenordnungen. Fern- und Langzeitwirkungen der lokalen Strömungsunterschiede sind nicht zu erwarten.

Die vom Windpark ausgehenden Änderungen des Turbulenzfeldes bleiben auf die unmittelbare Umgebung des Windparks und vor allem der einzelnen Anlagen beschränkt. Bei starker Anströmung und gleichzeitig starker haliner Schichtung gibt es lokal kurzzeitig eine verstärkte vertikale Vermischung in der Nähe der Sprungschicht. Über längere Zeiträume (Wochen) überwiegen aber deutlich Perioden schwacher Schichtung oder geringer Strömungsgeschwindigkeiten.

Die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten reichen nicht aus, um Vermischungsvorgänge des Salzgehalts im Fernfeld in Gang zu bringen. Dieses Ergebnis wird durch die Untersuchungen und die HN-Modellierungen der Autoren zur Eingriffsprognose für den EnBW Windpark BALTIC 1 und ARCADIS Ost 1 bestätigt.

Die kumulierte Wirkung des bestehenden EnBW Windpark BALTIC 1 und des geplanten OWP Gennaker ist größer als die Wirkungen der OWP, jeweils allein betrachtet. Sie liegt aber sehr nahe der Wirkung des geplanten OWP Gennaker und ist, so wie diese auch, praktisch nicht relevant.

Die von den Gutachtern dargestellten Änderungen der Turbulenz in der Nähe ausgewählter WEA sind unstrittig. Die Betrachtungen reichen jedoch so nicht aus, um technische Fragen der Standfestigkeit, die hier auch nicht Untersuchungsgegenstand sind, befriedigend zu beantworten.

Für die Studie K. DUWE et al. 2016, auf deren Grundlage die Genehmigung des Projektantrages „Gennaker“ erfolgte, wurde das 2016 beantragte Windparklayout verwendet. Vorliegend wurde das neu beantragte Layout für die Turbine der 15MW-Leistungsklasse vor dem Hintergrund des aktuellen Kenntnisstandes überprüft. Die hydrographische Informations- und Datenlage von 2016 bis 2023 wurde analysiert und entsprechend berücksichtigt. Die Überprüfung der hydrodynamischen Verhältnisse im Zeitraum 2016-2023 hat ergeben, dass es in der Folge des MBI 2014 zu einer Intensivierung der Belüftung der Ostsee gekommen ist, ohne dass die entsprechenden Einstromereignisse auch nur annähernd die Intensität des hier als maßgeblich verwendeten maximalen Einstromereignisses von 2014 erreicht haben. Daher sind die bei K. DUWE et al. 2016 und K. DUWE et al. 2022 getroffenen Aussagen auch per dato uneingeschränkt gültig.

5. Verzeichnisse der Abbildungen und Tabellen

5.1 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1a (Seite 5): Lage des USG.

Abbildung 1b (Seite 6): Lage der roi und des USG sowie die Darstellung der Wassertiefen und Geländehöhen in mm DHHN92 (Quellen: BSH, IOW, LUNG-MV).

Abbildung 2 (Seite 7): MBIs zwischen 1880 und 2005 nach MATTHÄUS 2006.

Abbildung 3 (Seite 8): Wassertiefen der roi in m bezogen auf DHHN16 (Quelle 5b) und Standorte der geplanten Einbauten in See, größenklassifiziert anhand der Spreizung der Wassertiefen (statSPR in Tab. 1) um die WEA sowie der Vorbelastungen durch OWP „EnBW Windpark BALTIC 1“ und die bereits genehmigten USP-Ost („O“) und USP-West („W“).

Abbildung 4 (Seite 10): Wassertiefen bei WEA GN08

Abbildung 5a (Seite 10): Diagonalprofil von SW nach NE durch das Projektgebiet. Außerhalb des durch die Querprofile 1 und 2 eingegrenzten Bereiches mit tlw. sehr unruhigen Lagebedingungen der Sedimente (Abb. 5b und 5c) sind keine nennenswerten Unebenheiten des Seegrundes mehr auszumachen.

Abbildung 5b (Seite 11): Das Querprofil 1 zeigt im NW unruhige Lageverhältnisse und Aufwerfungen der Sedimente an, die sich nach NE (hangauf) beruhigen.

Abbildung 5c (Seite 11): Das Querprofil 2 schneidet in gesamter Breite mehrere ca. 10 cm hohe Ribbel, die nennenswerte Sedimentumlagerungen durch hydrodynamische Kräfte belegen.

Abbildung 6 (Seite 12): WEA des „OWP Gennaker“ vor dem Hintergrund der Sedimenthauptgruppen nach der Sedimentverteilungskarte „Seabed Sediments of Western Baltic Sea (Sheet 2935 – Darß/Hiddensee)“, Quelle: BSH Hamburg und IOW Warnemünde.

Abbildung 6a: (Seite 13) Auszug aus Abb. 6: WEA des „OWP Gennaker“ vor dem Hintergrund der Sedimenthauptgruppen nach der Sedimentverteilungskarte „Seabed Sediments of Western Baltic Sea (Sheet 2935 – Darß/Hiddensee)“, Quelle: BSH Hamburg und IOW Warnemünde

Abbildung 7 (Seite 15): Vertikale Salzgehaltsprofile an der BSH-Messposition Darßer Schwelle (Lage s. Abb. 1b) im Jahr 2014 mit starken Einstromereignissen

Abbildung 8 (Seite 15): Die beantragten WEA des Projektes, größenklassifiziert nach statSPR in [m] (s. Tab. 1) sowie die Fußpunkte der Orthogonalprojektion aller WEA auf das Querprofil 1 zusammen mit den Referenzpunkten, an denen prognostisch Vermischungsfaktoren berechnet wurden.

Abbildung 9 (Seite 19): Die beantragten WEA, größenklassifiziert nach statSPR in [m] (s. Tab. 1) und die Vorbelastungen des Projektes (BALTIC 1 und zwei bereits genehmigte USP) sowie die Fußpunkte der Orthogonalprojektion aller Bauwerke auf das Querprofil 1 zusammen mit den Referenzpunkten, an denen prognostisch Vermischungsfaktoren berechnet wurden.

Karte 1 (Seite 4): Offshore -Windpark Gennaker- Standorte und Teilflächen (OWP Gennaker GmbH, 2023).

5.2 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1 (Seite 8-9) Statistik der Verteilung der Wassertiefen um die WEA-Standorte

Tabelle 2 (Seite 16): Auswirkungen der WEA auf maximale Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für den Einstromzeitraum 14. – 26.11.2014 (Fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP „Gennaker“)

Tabelle 3a (Seite 16): Abschätzung mittlerer jahreszeitlicher Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für das Jahr 2014 (BSH-Messposition und fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP Gennaker)

Tabelle 3b (Seite 17): Abschätzung mittlerer jahreszeitlicher Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für das Jahr 2014 bei Berücksichtigung einzelner WEA (Fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP Gennaker)

Tabelle 3c (Seite 17): Auswirkungen der WEA auf mittlere jahreszeitliche Verhältnisse von bodennahem Salzgehalt und haliner Schichtung für das Jahr 2014 (Fünf ausgewählte Standorte für geplante WEA im OWP Gennaker)

6. Literatur

AURADA, K. 1998: Komplementäres Geosystem Ostseeraum. Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd. 112 S. 1-27. Gebrüder Borngräber. Berlin und Stuttgart.

BURCHARD, H.; HOFMEISTER, R.; LASS, H.U.; MOHRHOLZ,V.; RENNAU,H.; SZEWCZYK, A.; UMLAUF, L., 2010: Quantification of Water Mass Transformations in the Arkona Sea Impact of Offshore Wind Farms. QuantAS-Off. Abschlussbericht des Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde. Warnemünde im Juni 2010

MSR 2016-2022: Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 2016 – 2022. Meereswiss. Berichte des IOW 2016-0101, 2017-0104, 2018-0107, 2019-0110 2020-0114, 2021-0119, 2022-0120, und 2023-0123.

RENNAU, H., SCHIMMELS S., BURCHARD, H., 2012: On the effect of structure induced resistance and mixing on inflows into Baltic Sea: A numerical model study. Coastal Engineering 60, 53-68.

DUWE, K. 2000 ff.: Strömungsgutachten zu den Offshore Windparks BALTIC 1 und ARCADIS Ost 1.

DUWE, K.; BUCKMANN, K 2016: Untersuchung der Hydrodynamik im Bereich des geplanten Offshore Windparks „Gennaker“. Studie im Auftrag der OWP Gennaker GmbH v. 21.06.2016.

DUWE, K.; BUCKMANN, K 2022: Untersuchung der Hydrodynamik im Bereich des geplanten Offshore Windparks „Gennaker“. Revision Nr. 1.1 der gleichnamigen Studie K. DUWE et al. 2016. Studie im Auftrag der OWP Gennaker GmbH v. 31.05.2022.

FRANCK, H., MATTHÄUS, W., SAMMLER, R., 1987: Major inflows of saline water into the Baltic Sea during the present century. Gerlands Beitr. Geophys. 96, 517–531.

V. MOHRHOLZ, M. NAUMANN, G. NAUSCH, S. KRÜGER, U. GRÄWE 2015: Fresh oxygen for the Baltic Sea — An exceptional saline inflow after a decade of stagnation. Journal of Marine Systems 148 (2015) 152–166

MOHRHOLZ, V. (2018). Baltic saline barotropic inflows (SBI) 1887 - 2018. Leibniz Institute for Baltic Sea Research (IOW), <http://doi.iowarnemuende.de/10.12754/data-2018-0004>

JÖRSS BLUNCK ORDEMANN GmbH 2016: Design Basis Gennaker. Studie für die OWP Gennaker GmbH v. 10.05.2016.

MATTHÄUS, W. 2006: The history of investigation of salt water inflows into Baltic Sea- from the early beginning to recent results. Meereswissenschaftliche Berichte N. 65. Institut für Ostseeforschung Warnemünde. 2006.

PRANDL, D. 2009: Estuaries- Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology. Cambridge University Press.2009.

7. Anlagen und Quellen

Quelle 0: Sedimentverteilungskarte „Seabed Sediments of Western Baltic Sea (Sheet 2935 – Darß/Hiddensee)“, Quelle: BSH Hamburg und IOW Warnemünde

Quelle 1: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Modelldaten aus dem operationellen Nord- und Ostseemodell (2007-2008)

Quelle 2: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Hydrographische Daten aus dem MARNET-Messnetz der Ostsee für die Stationen Darßer Schwellen, Arkona Becken, Oder Bank, Fehmarn Belt (2007-2008, 2014, 2015)

Quelle 3: Baltic saline barotropic inflows (SBI) 1887 - 2020. IOW 2021. http://doi.io_warnemuende.de/10.12754/data-2018-0004

Quelle 4: Ergänzung zu Formular 1.1 – Revision 1, OWP Gennaker GmbH, 08.09.2017.

Quelle 5a: Vermessungsbüro Weigt (VBW): Tiefenvermessung des USG in DHHN92 auf einem quadratischen Raster der Maschenweite 1,00 m. Greifswald 2015/2016.

Quelle 5b: Vermessungsbüro Weigt (VBW): Tiefenvermessung des USG in DHHN16 auf einem quadratischen Raster der Maschenweite 0,25 m. Greifswald 2022.

Quelle 5: „Projektbeschreibung- Vorhaben Offshore-Windpark Gennaker, OWP Gennaker GmbH, 2023“

Quelle 6: Messdaten-Reihe „NO_TS_MO_6600024“ der. COPERNICUS-Datenbank des BSH. Internet-Link:

https://data.marine.copernicus.eu/product/INSITU_BAL_PHYBGCWAV_DISCRETE_MYNRT_013_032/files?subdataset=cmems_obs-ins_bal_phybgcwav_mynrt_na_irr_202211--ext--history&path=INSITU_BAL_PHYBGCWAV_DISCRETE_MYNRT_013_032%2Fcmems_obs-ins_bal_phybgcwav_mynrt_na_irr_202211%2Fhistory%2FMO%2F