

Bericht

Behandlung von Porenwasser aus Sedimenten des Werftbeckens Warnemünde

Konzept

Projekt-Nr.: 24 002 01
vom 29. Februar 2024

Bearbeiter: Dr.-Ing. Andreas Horn
M. Sc. Jan-Philip Samson

verantwortlich: Dr.-Ing. Andreas Horn

Auftraggeber:



INROS Lackner SE
Rosa-Luxemburg-Str. 16
18055 Rostock

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Berichtstext	1
1 Veranlassung	2
2 Rahmenbedingungen.....	3
2.1 Allgemeine Rahmenbedingungen	3
2.2 Qualität.....	3
2.3 Quantität	4
2.4 Empfehlung Einleitzielwerte zur Direkteinleitung	5
2.5 Örtliche Gegebenheiten	7
2.6 Medien.....	8
2.7 Schnittstellen	8
3 Variantenentwicklung	9
3.1 Variante 1: Adsorptionsverfahren mit Ionenaustausch	11
3.2 Variante 2: Adsorptionsverfahren mit Ammoniumentfernung mittels Zeolith	13
3.3 Qualitative Bewertung der Verfahrensvarianten und Definition einer Vorzugsvariante	14
4 Praxisbeispiele als Referenzen für den Technologievorschlag.....	15
5 Kostenschätzung.....	16
6 Zusammenfassung	18
Verzeichnisse	V
Abkürzungsverzeichnis	1
Tabellenverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
Literaturverzeichnis	4
Anhang	A
Anlage 1: Übersicht Schadstoffzusammensetzung Porenwasser.....	1
Anlage 2: Bromierte Diphenylether (BDE); Bestimmungsgrenzen, Ableitung Einleitgrenzwert	2

Anlage 3: Lageplan Aufstellungsplan Wasserreinigungsanlage, Plannr.: 2017– 0282 4 WB LP 40 0021 0 P	3
Verfassererklärung	X

BERICHTSTEXT

1 **Veranlassung**

Die INROS–LACKNER SE ist mit der Generalplanung zur Umgestaltung des Werftbeckens Warnemünde zur Entwicklung eines maritimen Gewerbeparks für nachhaltige Technologien beauftragt.

Im Rahmen der Umgestaltung erfolgt die Teilverfüllung des Werftbeckens mit belasteten Hafensedimenten aus dem unmittelbaren Maßnahmenbereich. Im Zuge der Konsolidierung der Sedimentablagerung wird belastetes Porenwasser mittels Drainagen aus dem Sediment geleitet und aufgefangen. Das Porenwasser erfüllt die Anforderungen an eine Direkteinleitung nicht und muss daher vor der Einleitung gereinigt werden.

Die HORN & MÜLLER Ingenieurgesellschaft wurde mit der Erstellung eines Konzeptes zur Aufreinigung des schadstoffbelasteten Porenwassers beauftragt. Das Konzept zeigt Technologien auf, mit denen eine Reinigung des Porenwassers prinzipiell möglich ist und dient u.a. der Abstimmung von Einleitzielwerten für die temporäre Direkteinleitung mit der zuständigen Behörde.

2 Rahmenbedingungen

2.1 Allgemeine Rahmenbedingungen

Die Wasserreinigungsanlage (WRA) zur Reinigung von Porenwasser aus Sedimenten des Hafenbeckens dient der temporären Reinigung anfallender Wässer während einer Baumaßnahme über einen Zeitraum von ca. einem Kalenderjahr.

Das Anlagendesign wird wesentlich durch die Betriebsdauer der Maßnahme geprägt. Erforderliche Baukörper sollen als ISO Container ausgeführt werden. Der Betrieb der Anlage soll nach Möglichkeit ohne anwesendes Fachpersonal erfolgen.

Die zum Einsatz kommende Technologie muss für die Reinigung schwankender Zulaufmengen mit möglichen Stillstandzeiten geeignet sein. Für eine optimierte Skalierung soll die Anlage modular konzeptioniert sein. Anfahrprozesse nach Stillstandzeiten sollen vollautomatisiert ablaufen und unmittelbar mit dem maximalen hydraulischen Durchsatz möglich sein.

Die Bewertung der Umweltverträglichkeit von vorgestellten Technologien folgt einem ganzheitlichen Ansatz, bei dem besonderer Wert darauf gelegt wird, Problemverlagerungen zu vermeiden.

2.2 Qualität

Die voraussichtliche Qualität des zu reinigenden ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Parameter	Einheit	Min	Mittel	Max
pH-Wert	-	7,6	7,8	7,9
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	22.300	24.825	30.000
AOX	µg/l	30	40	51
Gesamtphosphor	mg/l	1	4	11
Stickstoff, gesamt	mg/l	13	22	32
Ammonium-N	mg/l	9,2	18,55	33
Schwermetalle				
Blei	µg/l	1,7	1,7	1,7
Cadmium	µg/l	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Eisen	µg/l	118	386	596
Kupfer	µg/l	2	12	22
Mangan	µg/l	66	442	830
Nickel	µg/l	1,2	1,4	1,7
Quecksilber	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zink	µg/l	1,3	2,2	3,0
PAK				
Summe PAK 15	µg/l	0,21	0,45	0,70
PCB				
Summe PCB 7	µg/l	0,01	0,04	0,06
weitere organische Parameter				
Tributylzinn	µg/l	0,025	0,088	0,150
Summe BDE (Summe BG Kongenere)	µg/l	0,036	0,039	0,050

Tabelle 1: Zulaufqualität Porenwasser gem. Anlage 1

2.3 Quantität

In Abbildung 1 wird der zeitliche Verlauf des Anfalls von Porenwasser dargestellt. Grundsätzlich lassen sich drei Phasen der Konsolidierung unterscheiden, die sich auch in den anfallenden Wassermengen widerspiegeln. Sie werden nachfolgend beschrieben.

Zunächst erfolgt ein Einbau des Baggergutes und eine anschließende Verrieselung zur Vorkonsolidierung. In dieser Phase fällt kaum austretendes Porenwasser an.

Nach 210 Tagen erfolgt der Einbau von Vertikaldränagen und die Auflastschüttung. Ab diesem Zeitpunkt fallen die relevanten Wassermengen mit im Maximum ca. 25 m³/h über einen Zeitraum von ca. 100 Tagen an.

Nach 380 Tagen ist eine Konsolidierung von 95 % erreicht, was allgemein als Konsolidierungsziel gilt. Ab diesem Zeitpunkt fällt bis zur vollständig abgeschlossenen Konsolidierung nach ca. 550 Tagen eine geringe Porenwassermenge von ca. 1 m³/h an.

Neben dem Porenwasser wird Niederschlagswasser auf der Konsolidierungsfläche abgeleitet, erfasst und der WRA zugeführt. Das zu behandelnde Niederschlagswasser wird im Maximum mit 10 m³/h beziffert.

Es ergibt sich ein maximaler Volumenstrom von 35 m³/h. Auf Basis des maximalen Volumenstromes erfolgt die Dimensionierung der WRA.

Gem. der quantitativen Porenwasserprognose ergibt sich in Abhängigkeit des realen Niederschlages die zwischen Tag 210 und Tag 550 zu behandelnde Wassermenge von maximal ca. 160.000 m³. Bezogen auf die Betriebsdauer der WRA ergibt sich ein mittlerer Volumenstrom von ca. 20 m³/h, welcher die Grundlage für die Berechnung der Betriebskosten darstellt.

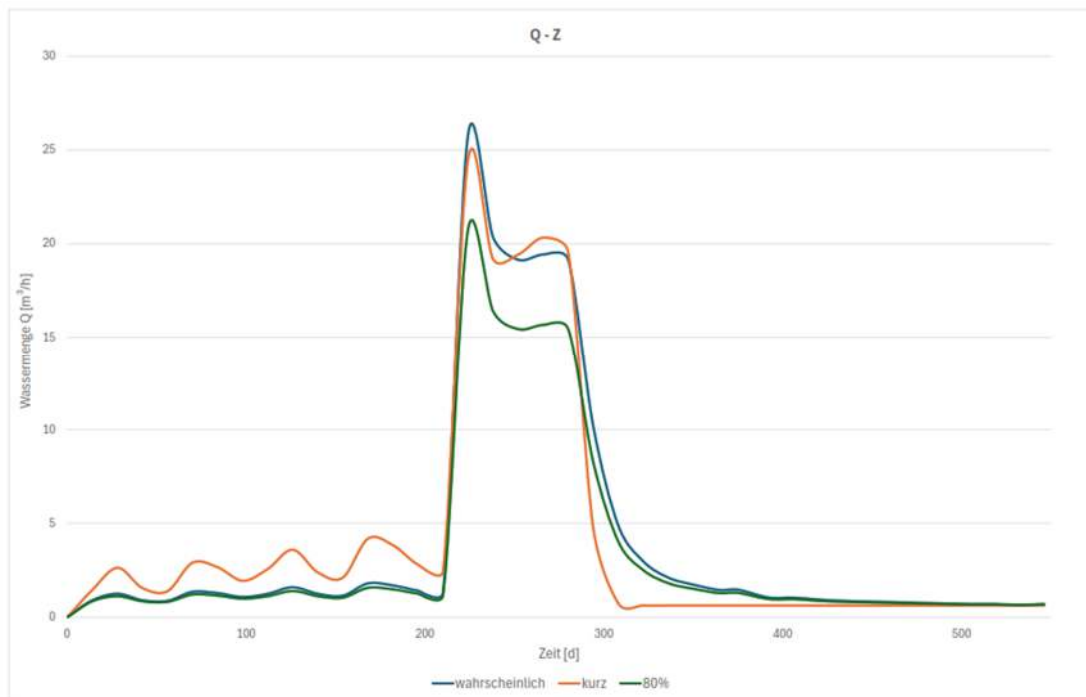


Abbildung 1: Prognose zeitlicher Verlauf Anfall Porenwasser. Quelle: Baugrund Stralsund, nachrichtlich übernommen gem. Übersendung vom 29.01.2024

2.4 Empfehlung Einleitzielwerte zur Direkteinleitung

In Tabelle 2 werden empfohlene Einleitzielwerte für die Direkteinleitung von gereinigtem Porenwasser in das Hafenbecken Warnemünde in einer Gegenüberstellung mit Regelwerken für abweichende Anwendungen aufgeführt.

Die Herkunft des Wassers ist maßgeblich für die Einstufung des Wassers und der damit einhergehenden Anwendung von Regelwerken für die Ableitung von Einleitgrenzwerten. Das vorliegende Wasser ist herkunftseitig am ehesten vergleichbar mit kontaminiertem Grundwasser, für welches keine einheitlichen Einleitgrenzwerte definiert sind. Die Vorgabe von Einleitgrenzwerten für die Direkteinleitung von gereinigtem kontaminiertem Grundwasser erfolgt durch die zuständige Genehmigungsbehörde unter Anwendung der Wasserrahmenrichtlinie und weiteren, allgemein geltenden Regelwerken.

Durch die Genehmigungsbehörde wurde signalisiert, dass die in der OGewV definierten Umweltqualitätsnormen (UQN) für prioritäre Stoffe und weitere Stoffe des chemischen Zustands für die Überprüfung auf Einhaltung der zulässigen Höchstkonzentrationen (ZHK-UQN) bei der Vorgabe von Einleitgrenzwerten für die Direkteinleitung von gereinigtem Porenwasser in das Hafenbecken Warnemünde zur Anwendung kommen könnten. Abweichend davon wurde vorabgestimmt, dass für Nährstoffparameter die Grenzwerte der AbwV und für die Schwermetalle Kupfer sowie

Zink, für die keine ZHK-UQN vorliegt, die Gefahrenschwellenwerte der LAWA 2016 zum Tragen kommen.

Im Ergebnis einer Machbarkeitsprüfung, in welcher die technische Realisierbarkeit der Einleitgrenzwerte nach OGewV ZHK-UQN, LAWA 2016 und AbwV bewertet wurde, erfolgt die Empfehlung der Einleitzielwerte nach Tabelle 2. Die empfohlenen Einleitzielwerte entsprechen weitgehend den genannten Regelwerken. Abweichungen werden für die Stoffe Tributylzinn (TBT) und die Summe bromierter Diphenylether empfohlen.

Parameter	Einheit	OGewV ZHK-UQN Anlage 8, Spalte 7	LAWA 2016 GFS	AbwV Anhang 1	TrinkwV	Empfehlung Einleitzielwerte
pH-Wert		-----	-----	-----		6,5 – 9,5
Nährstoffe						
Gesamtphosphor	mg/l	0,018	-----	1		1
Stickstoff, gesamt	mg/l	0,25	-----	13		13
Ammonium-N	mg/l	-----	-----	10	0,5	10
Schwermetalle						
Blei	µg/l	14	1,2	-----	10	14
Cadmium	µg/l	0,45	0,3	-----	3	0,45
Kupfer	µg/l	-----	5,4	-----	2.000	5,4
Nickel	µg/l	34	7	-----	20	34
Quecksilber	µg/l	0,07	0,1	-----	1	0,07
Zink	µg/l	-----	60	-----		60
Industrielle Schadstoffe						
Naphthalin	µg/l	130	2	-----		130
Anthracen	µg/l	0,1	0,1	-----		0,1
Fluoranthen	µg/l	0,12	0,1	-----		0,12
Benzo(a)pyren	µg/l	0,027	0,01	-----	0,001	0,027
Benzo(b)fluoranthen	µg/l	0,017	0,03	-----		0,017
Benzo(k)fluoranthen	µg/l	0,017		-----		0,017
Benzo(g,h,i)perylene	µg/l	0,00082	0,002	-----		0,00082
Summe PAK 15 ohne Naphthalin	µg/l	-----	0,2	-----		0,2
Summe PCB 6	µg/l	k. A.	0,01	-----		0,01
Diflufenican	µg/l	-----	-----	-----		-----
Triclosan	µg/l	0,02	-----	-----		0,02
Tributylzinn	µg/l	0,0015	0,0002	-----		0,005
BDE inkl. BG	µg/l	0,014	-----	-----		0,1

Tabelle 2: Empfehlung Einleitzielwerte für die Direkteinleitung von gereinigten Porenwasser in das Hafenbecken Warnemünde, Gegenüberstellung mit Regelwerken für abweichende Anwendungsfälle

Die analytische Bestimmungsgrenze von Organozinnverbindungen (OZV) wie TBT mit GC-MS (a.a.R.d.T), liegt im Bereich von ca. 1 ng/l. Die Quantifizierung von chromatographischen Stoffauftrennungen per Massenspektrometrie erfolgt auf Basis einer Kalibrierung mit Standardlösungen und wird im Bereich der Bestimmungsgrenze durch Signalrauschen unterschiedlicher Herkunft überlagert. Eine Fehlinterpretation der Signalausgabe tritt im Bereich der Bestimmungsgrenze regelmäßig auf. Weitere Fehlerquellen stellen Probenahme, Konservierung und Transport dar. Unter Berücksichtigung der regelmäßig auftretenden Analyseungenauigkeiten bei der Erhebung von Schadstoffkonzentrationen im Bereich der Bestimmungsgrenze wird empfohlen,

einen Einleitzielwert von 5 ng/l zu beantragen. Der Einleitzielwert je OZV i.H.v. 5 ng/l kommt bei der Genehmigung von Direkteinleitungen regelmäßig zur Anwendung (Beispiel siehe [3]).

Der Parameter BDE stellt einen Summenparameter aus 24 Kongeneren Verbindungen dar. Die enthaltenen Kongenere werden in Anlage 2 aufgeführt und mit angewendeten Bestimmungsgrenzen eines marktführenden Analytiklabors aufgelistet, welche bei der Analyse des Porenwassers zum Einsatz kamen. Es wird deutlich, dass die Bestimmungsgrenze mit steigendem Bromierungsgrad von den Tribrom-Diphenylethern (BG 0,1 bis 0,14 ng/l) bis zum Decabrom-Diphenylether (BG 11,7 bis 16,2 ng/l) zunimmt. Die Summe der in Anlage 2 aufgeführten Bestimmungsgrenzen für die 24 analysierten BDE umfasst einen Bereich von 36 bis 50 ng/l. Um Fehlinterpretationen von Messwerten zu vermeiden, wird analog zum empfohlenen Einleitzielwert für TBT die Berücksichtigung von Zuschlagsfaktoren zur Ermittlung von belastbaren Grenzwerten oberhalb der BG für die 24 BDE-Einzelkongenere empfohlen, mit welchen sich Analyseungenauigkeiten weitgehend ausschließen lassen.

Die Summe der mit Zuschlägen versehenen BG für die 24 BDE-Kongenere ergibt 79 ng/l. Es wird empfohlen, einen Einleitungszielwert i.H.v. 100 ng/l zu beantragen.

Im weiteren Konzept gilt es zu prüfen, ob die vorgeschlagenen Einleitwerte aus Tabelle 2 gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) bzw. mit dem Stand der Technik (SdT) mit den verfügbaren Reinigungstechnologien erreichbar sind.

2.5 Örtliche Gegebenheiten

Eine mögliche Fläche für die Wasserreinigungsanlage wird in Abbildung 2 dargestellt (vgl. Anlage 2). Die Aufstellfläche mit einer Gesamtgröße von 840 m² (60 m x 14 m) befindet sich nordöstlich des Ablagerungsbereiches für Baggergut.

Die final zur Anwendung kommende Aufstellfläche für die Wasserreinigungsanlage wird sich an den Anforderungen, die sich aus der Technologie der Vorzugsvariante ergeben, orientieren und kann von der dargestellten Fläche abweichen.

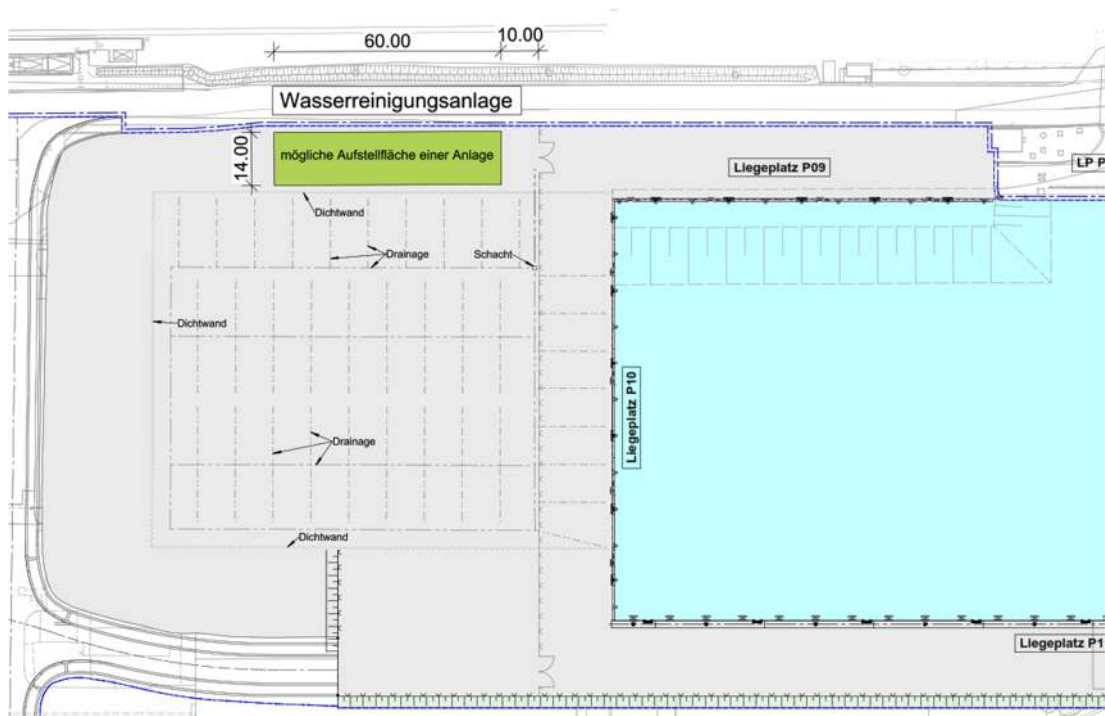


Abbildung 2: Aufstellfläche Porenwasser-Reinigungsanlage

2.6 Medien

Die WRA benötigt eine 400 V Niederspannungs-Stromversorgung. Die installierte Anlagenleistung beträgt je nach Verfahrensvariante zwischen ca. 80 kW für Adsorptionsvarianten und ca. 330 kW für eine Ausführungsvariante mit Membrantrennverfahren.

2.7 Schnittstellen

Die Schnittstelle im Zulauf der Wasserreinigungsanlage bildet ein Ausgleichsbehälter (AGB). Der AGB dient dem Ausgleich von temporären hydraulischen Belastungsspitzen sowie zur Zwischenspeicherung des Anlagenzulaufs während kürzerer Stillstandzeiten.

Da der Anfall des zu behandelnden Porenwassers durch die Geschwindigkeit der Verbringung von Nassbaggertgut aktiv beeinflusst werden kann, ist für den AGB ein Volumen in der Größenordnung des maximalen Anlagenzulaufs über einen Zeitraum von ca. 1,5 Stunden (ca. 50 m³) vorgesehen.

Die Ableitung des Anlagenablaufs erfolgt nach Abstimmung mit den zuständigen Genehmigungsbehörden über ein temporäres Einleitbauwerk als Direkteinleitung in das Hafenbecken.

3 Variantenentwicklung

Die Variantenentwicklung erfolgt unter Berücksichtigung der qualitativen und quantitativen Eigenschaften des zu behandelnden Porenwassers. Weiterhin werden die in Kapitel 2.1 definierten allgemeinen Rahmenbedingungen und Anforderungen an den Anlagenbetrieb beachtet.

Ausgehend von ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften werden Mechanismen gesammelt, mit denen die Entfernung der enthaltenen Schadstoffe aus dem Wasserstrom prinzipiell möglich ist. In einem zweiten Schritt wird die Gesamtmatrix der Wasserinhaltsstoffe betrachtet. Einzelverbindungen können Ausschlusskriterien für Reinigungstechnologien darstellen oder die Anordnung von Reinigungsstufen im Verfahren beeinflussen. Abschließend wird der Aufwand für eine Verfahrensvariante abgeschätzt und im weiteren Planungsverlauf quantifiziert.

BIOLOGISCHE REINIGUNGSVERFAHREN

Entsprechend der Herkunft des Porenwassers aus dem Sediment eines Ostsee-Hafenbeckens wird das zu behandelnde Wasser durch einen (NaCl-) Salzgehalt von maximal ca. 1,8 % geprägt und ist damit den Brackwässern zuzuordnen. Obwohl Brackwässer theoretisch biologisch gereinigt werden können, kommt die Reinigungstechnologie für das vorliegende Porenwasser nicht in Frage. Die Summe der enthaltenen ionischen Bestandteile und daraus resultierendem osmotischen Druck an den Zellwänden der Mikroorganismen sowie die gem. Kapitel 2.1 geforderten Rahmenbedingungen, insbesondere die Inbetriebnahme mit dem maximalen Volumenstrom, stehen dem Einsatz einer biologischen Reinigungsstufe entgegen.

MEMBRANTRENNVERFAHREN

Eine Möglichkeit das vorliegende Porenwasser zu behandeln, stellt der Einsatz von Membrantrennverfahren dar. Membrantrennverfahren umfassen physikalische Reinigungstechnologien, bei der Flüssigkeiten mit einem angelegten Druck durch eine Membran gefördert werden. Es findet keine chemische Veränderung der Einzelverbindungen statt, sondern der Stoffstrom wird in einen belasteten und einen unbelasteten getrennt. Wasserinhaltsstoffe, deren Größe die mittlere Porengröße der eingesetzten Membran übersteigt, werden durch die Membran zurückgehalten und sammeln sich auf der Konzentratseite der Membran. Das wässrige Medium und Wasserinhaltsstoffe, die kleiner als die Porengröße der Membran sind, passieren die Membran und treten als Permeat aus dem Membranmodul. Membrantrennverfahren werden nach ihrer Porengröße unterschieden.

Die Modellierung von Nanofiltration und Umkehrosmose (RO – engl. reverse osmosis) stellt sich komplizierter dar und wird nach dem Lösungs-Diffusions-Modell berechnet. Der Stofftransport durch die Membran erfolgt aufgrund unterschiedlicher Löslichkeiten der Einzelstoffe in der polymeren Membran (Stoffeintritt) und ihrem

anschließenden diffusiven Austritt auf der Permeatseite. Mit einer RO können sämtliche Ionen zurückgehalten werden.

Ein typische Einsatzgebiete für Membrantrennverfahren mit Umkehrosmosemembranen sind die Meerwasserentsalzung, Reinstwassererzeugung im Gesundheitswesen und der Industrie oder die Behandlung von hochkontaminierten Wässern. Für diese Anwendungen stellt die Technologie die allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T) dar.

Mit geeigneten Membranmaterialien lässt sich ein beliebig sauberes Wasser erzeugen.

Dem sehr guten Stoffrückhalt bei Einsatz von RO-Membranen stehen Nachteile gegenüber, die nachfolgend aufgeführt werden.

1. Eine Umkehrosmoseanlage erfordert den Aufwand von Betriebsmitteln in Form von elektrischer Energie. Der für die eingesetzten Druckerhöhungspumpen erforderliche Energieaufwand ist von der Druckstufe der Umkehrosmose abhängig und mit ca. 1.000.000 kWh für die Gesamtbetriebsdauer der WRA erheblich.
2. Bei einer mehrstufigen RO verlässt der Permeatstrom mit einem Volumenstrom von 75 – 90 % pro Einzelstufe die Umkehrosmose. Für die Reinigungsaufgabe ist eine zweistufige RO-Anlage erforderlich. Im Resultat ergibt sich ein Konzentratvolumenstrom von mindestens 10 % des Eingangsvolumenstromes. Die Konzentratentsorgung stellt den wesentlichen Nachteil von RO-Anlagen dar. In dem Konzentrat werden die im Wasser enthaltenen Schadstoffe und Inhaltsstoffe nicht selektiv aufkonzentriert. Ist keine Einleitung des Konzentrates in Oberflächengewässer möglich, wie es in der Regel bei größeren Meerwasserentsalzungsanlagen praktiziert wird, sind die hochbelasteten Wässer zu entsorgen. Die Entsorgung erfolgt in der Regel durch Deponierung als gefährlicher Abfall nach Eindampfung oder über Verbrennungsanlagen und stellt eine Problemverlagerung dar, welche gem. allgemeiner Rahmenbedingungen zur Planung der Wasserreinigungsanlage zu vermeiden sind.
3. Die Reinigung des Porenwassers mit Membrantrennverfahren ist im Vergleich mit weiteren Behandlungsoptionen unwirtschaftlich.

Im Folgenden wird die Umsetzung einer Hauptreinigungsstufe mit Membrantrennverfahren nicht weiter beleuchtet.

ADSORPTIONSVERFAHREN

Adsorptionsverfahren stellen eine gängige Methode dar, um organische Kontaminanten aus Wässern zu entfernen und mit Hilfe von z.B. Aktivkohle in weiterführende, meist thermische Behandlungsverfahren zu überführen. Das Verfahrensprinzip ist

besonders gut für Reinigungsaufgaben geeignet, welche eine gute Skalierbarkeit sowie die sichere Einhaltung von ambitionierten Einleitgrenzwerten für organische Stoffe erfordern.

In den folgenden Unterkapiteln werden adsorptive Verfahrensvarianten aufgezeigt, die für die Abreinigung des Porenwassers auf Einleitqualität geeignet sind.

3.1 Variante 1: Adsorptionsverfahren mit Ionenaustausch

Die im Porenwasser enthaltenen Schadstoffe können mit Adsorptionsverfahren abgereinigt werden. Dabei kommen in Reihe geschaltete Filter zum Einsatz, welche die Schadstoffe entsprechend ihrer chemischen Eigenschaften an ein Trägermaterial binden. Für die vorliegenden Wasserinhaltsstoffe müssen mehrere unterschiedliche Filtermaterialien eingesetzt werden.

Das Grundfließbild der Verfahrensvariante 1: Adsorptionsverfahren mit Ionenaustausch wird in Abbildung 3 dargestellt.

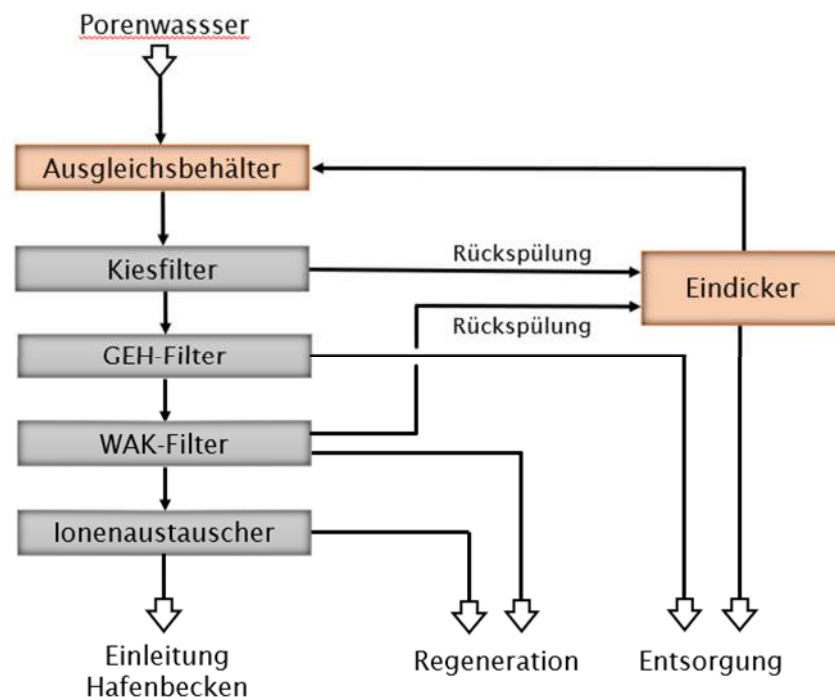


Abbildung 3: Grundfließbild Variante 1 – Adsorptionsverfahren mit Ammoniumentfernung per Ionenaustausch

Das Porenwasser sowie ggf. anfallendes Niederschlagswasser wird in einem Ausgleichsbehälter gesammelt und geregelt in die WRA überführt. Die erste Verfahrensstufe stellt eine Kiesfiltration dar, in welcher Feststoffe zurückgehalten werden. Untergeordnet findet bei vorhandenem Sauerstoff eine kontaktkatalytische Eisenoxidation am Filtermaterial statt. Die Kiesfilter werden als Zwillingsfilter

betrieben, welche jeweils auf den gesamten Volumenstrom ausgelegt werden. Übersteigt der Differenzdruck über einen Filter 0,5 bar, erfolgt die vollautomatische Rückspülung mit Druckluft und Wasser.

Der zweite Kiesfilter übernimmt für die Dauer der Rückspülung die beschriebene Funktion für den Gesamtvolumenstrom. Das Rückspülwasser wird in einen Absetzbehälter überführt. Enthaltene Feststoffe sinken zu Boden und bilden Rückspülschlamm, welcher zu entsorgen ist. Der Überstand wird in den Ausgleichsbehälter zurückgeführt.

Nach der Kiesfiltration folgt eine Festbett-Filterstufe mit granuliertem Eisenhydroxid (GEH, β -FeOOH und $\text{Fe}(\text{OH})_3$), in welcher die Wasserinhaltsstoffe Phosphat und Kupfer adsorptiv gebunden werden. Über die Betriebsdauer kommen ca. 80 t GEH-Material zum Einsatz.

Die im Wasser enthaltenen industriellen Schadstoffe (PAK, PCB, BDE sowie TBT) werden adsorptiv an Wasseraktivkohle gebunden. Die Einleitzielwerte für TBT und BDE stellen die Dimensionierungsgrundlage für die Wasseraktivkohlestufe dar. Die Reinigungsaufgabe erfordert eine gegenüber Standardanwendungen erhöhte Kontaktzeit sowie den Einsatz von spezieller Wasseraktivkohle für die Abscheidung von persistenten organischen Schadstoffen (POP). Unter Berücksichtigung von möglichen BDE Gehalten unter der analytischen Bestimmungsgrenze sind über den Betriebszeitraum maximal 8,1 g BDE abzuscheiden.

Die Beladung der Wasseraktivkohle mit POP wird durch die Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (POP-Verordnung) geregelt. BDE dürfen nach genannter Verordnung maximal 0,001 Gew.-% der beladenen Aktivkohle-Masse zur Regenerierung oder Entsorgung ausmachen. Der vorgegebene Wert ist maßgeblich für die rechnerische Standzeit der Wasseraktivkohle verantwortlich.

Für die Gewährleistung von erforderlichen Mindestverweilzeiten bei gleichzeitiger Einhaltung von geeigneten Strömungsgeschwindigkeiten für die Schadstoffadsorption soll die WAK-Stufe zweistraßig umgesetzt werden. Bei maximalem Anlagenzulauf ($35 \text{ m}^3/\text{h}$) werden beide Straßen betrieben. Bei Volumenströmen kleiner $20 \text{ m}^3/\text{h}$ wird eine WAK-Straße außer Betrieb genommen.

Jede WAK-Behandlungsstraße besteht aus 4 modularen, in Reihe geschalteten Druckbehältern mit einem Volumen von ca. 5 m^3 . Bei einem WAK-Inhalt von ca. 2,43 t je Filter ergibt sich eine WAK-Gesamtmenge von ca. 19,5 t. Vergleicht man die WAK-Gesamtmenge mit der rechnerisch benötigten Mindestmenge gem. POP-Verordnung und der zu adsorbierenden BDE-Gesamtmenge (8,1 g BDE, max. Beladung WAK 0,001 %), wird deutlich, dass die Anforderungen der POP-Verordnung aufgrund verfahrenstechnischer Notwendigkeiten zur Abreinigung der POP um einen Faktor > 20 unterschritten werden.

Im Anschluss an die Adsorptionsstufe ist als letzten Wasserinhaltsstoff Ammonium abzureinigen, was bei Variante 1 mit Hilfe eines Ionenaustauschers erfolgen soll.

Der Ionenaustauscher wird als Kation-Vollentsalzungsstufe per Schwebebett-Reaktor mit einem Behältervolumen von ca. 20 m³ ausgeführt, um den hydraulischen und qualitativen Anforderungen der Reinigungsaufgabe gerecht zu werden. Der Ionenaustauscher soll als „plug-in“-Filter ausgeführt werden, um auf die Regeneration des Ionenaustauscherharz am Standort zu verzichten. Wird die rechnerische Kapazitätsgrenze des Ionenaustauscherharz erreicht, wird die Anlieferung eines Austauschfilters eingeleitet. Um einen Ammonium-Durchbruch zu verhindern, wird ein weiterer Ionenaustauscher mit einem Behältervolumen von ca. 3 m³ temporär zugeschaltet.

3.2 Variante 2: Adsorptionsverfahren mit Ammoniumentfernung mittels Zeolith

Das Grundfließbild der Verfahrensvariante 2: Adsorptionsverfahren mit Ammonium-Entfernung mittels Zeolith wird in Abbildung 4 dargestellt. Die Verfahrensvariante ist bis auf die Ausführung der Ammoniumabscheidung identisch zu Variante 1.

In Variante 2 erfolgt die Ammoniumabscheidung mit einem Ionenaustausch an Zeolithmaterial. Im Zuge der Ammoniumanlagerung werden Kalzium-, Kalium-, Natrium- und Magnesiumionen aus dem Filtermaterial abgegeben.

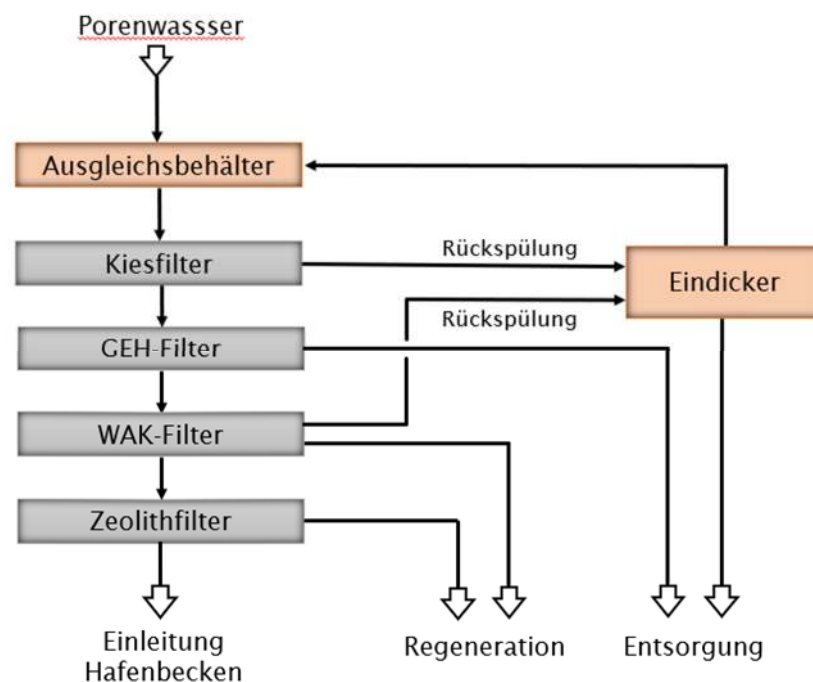


Abbildung 4: Grundfließbild Variante 1.2 – Adsorption mit Ammoniumentfernung mittels Zeolith

Das Zeolithmaterial kann nach vollständiger Beladung regeneriert werden. Aufgrund des temporären Charakters der WRA soll wie bei Variante 1 auf die Regenerierung des Materials vor Ort verzichtet werden. Im Gegensatz zu den Betriebsmitteln WAK und Ionenaustauscherharz besteht für das Betriebsmittel Zeolith jedoch nach aktuellem Kenntnisstand nicht die Möglichkeit, „plug-in“-Wechselfilter mit Zeolithmaterial zu beziehen. Das Material ist daher per Saugwagen abzusaugen und zur externen Regenerierung oder Entsorgung abzufahren.

Die Zeolithstufe zur Abreinigung von Ammonium wird je Behandlungsstraße in jeweils einem ca. 15 m³ Druckbehälter ausgeführt. Über die Betriebsdauer kommen ca. 30 t Zeolithmaterial zum Einsatz.

3.3 Qualitative Bewertung der Verfahrensvarianten und Definition einer Vorzugsvariante

Die aufgezeigten Verfahrensvarianten setzen sich anteilig aus den a.a.R.d.T in den Verfahrensstufen Kiesfiltration und Adsorption an Wasseraktivkohle sowie den als Stand der Technik einzuordnenden Technologien zur Abscheidung der Nährstoffe mit GEH-Filtern und Ionenaustausch mit technischen Harzen bzw. natürlichen Zeolithen zusammen.

Die Verfahrensvarianten 1 und 2 sind technisch gleichwertig. Der Einsatz von Mineralien zum Ammoniumaustausch bei Umsetzung von Variante 2 stellt sich im Vergleich zum Einsatz technischer Harze bei Umsetzung der Variante 1 wirtschaftlich dar.

Im Folgenden wird eine Kostenschätzung für die Vorzugsvariante Variante 2: Adsorptionsverfahren mit Ammoniumentfernung mittels Zeolith durchgeführt.

4 Praxisbeispiele als Referenzen für den Technologievorschlag

Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über praxiserprobte Anlagen zur Reinigung kontaminierter Wässer mit vergleichbaren Technologien und erfolgreicher Einhaltung von Einleitwerten gegeben werden. Damit wird die Eignung des Verfahrensvorschlags verdeutlicht.

GRUNDWASSERREINIGUNGSANLAGE BERLIN; POLYMANT BERLIN

<https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/bodenschutz-und-altlasten/nachsorgen-der-bodenschutz-altlasten/beispiele-sanierung-im-60-40-freistellungsverfahren/polymant/>

- 30 m³/h, Anilinderivate, Chlornitrobenzol, Ammonium zur Stimulierung Abbau, sprengstofftypische Verbindungen, Arsen
- Behandlung mit Kiesfilter, Adsorber GEH, Wasseraktivkohle
- Direkteinleitung in die Vorflut, Einleitwerte Wasserbehörde Senat Berlin

GRUNDWASSERREINIGUNGSANLAGE ÖKOLOGISCHES GROßPROJEKT BERLIN, INDUSTRIEGEBIET SPREE

<https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/bodenschutz-und-altlasten/nachsorgen-der-bodenschutz-altlasten/beispiele-oekologisches-grossprojekt-berlin/>

- 50 m³/h, LHKW, BTEX, PAK, Organochlorpestizide, MKW, Organoarsenverbindungen, Ammonium
- Behandlung u.a. mit Kiesfilter, Wasseraktivkohle, Adsorbermaterial GEH, Strippung, KatOx, Betrieb 2004–2024
- Direkteinleitung in die Vorflut, Einleitwerte Wasserbehörde Senat Berlin

REINIGUNGSANLAGE FÜR ORGANOZINNVERBINDUNGEN CHEMIEPARK GENDORF, BURGKIRCHEN

https://lra-aoe.de/media/3929/0-20190524-154-e-antrag_einleitung_stand_2021-1.pdf

- 5 m³/h, Hg, HCH, Organozinnverbindungen
- Behandlung mit Kiesfilter und Wasseraktivkohle [3]
- Antrag auf Einleitgenehmigung ab 2021

ADSORBERANLAGE ZUR ABREINIGUNG VOM AMMONIUM

- 5,5 m³/h, Ammonium 8 – 10 mg/l auf < 0,2 mg/l
- Abscheidung vom Ammonium aus dem Füllwasser der Therme Laa an der Thaya (Österreich)
- Betrieb seit 2006

5 Kostenschätzung

Die geschätzten Investitionskosten für die Vorzugsvariante V2 (vgl. Kapitel 3.2) werden in Abbildung 5 dargestellt. Die Investitionskosten für den Neubau der Anlage wird mit ca. 460.000 EUR geschätzt. Die Investitionssumme umfasst Kosten für die Anlagentechnik sowie weitere Bautechnik. Die angesetzten Kosten für Bautechnik i.H.v. ca. 100.000 EUR beinhalten Kosten für ISO-Container als temporäre Bauhülle für die Aufstellung für sensible Anlagenkomponenten, Lieferung und Montage von ggf. benötigten Stahlbetonplatten zur Ertüchtigung der Tragfähigkeit des Untergrundes sowie ein Schätzwert für die öffentliche und nichtöffentliche Erschließung (Medienanbindung).

Die Anlagentechnik umfasst in der Kostenschätzung eine Summe von ca. 360.000 EUR. Die Summe setzt sich aus ca. 220.00 EUR für Maschinen- und Anlagentechnik in Form von Pumpen, Gebläsen und Behältern sowie ca. 140.000 EUR für sonstige benötigte Komponenten und Leistungen wie Stahlbau, Rohrleitungsbau, EMSR-Anbindung, Dokumentation und Baustelleneinrichtung zusammen.

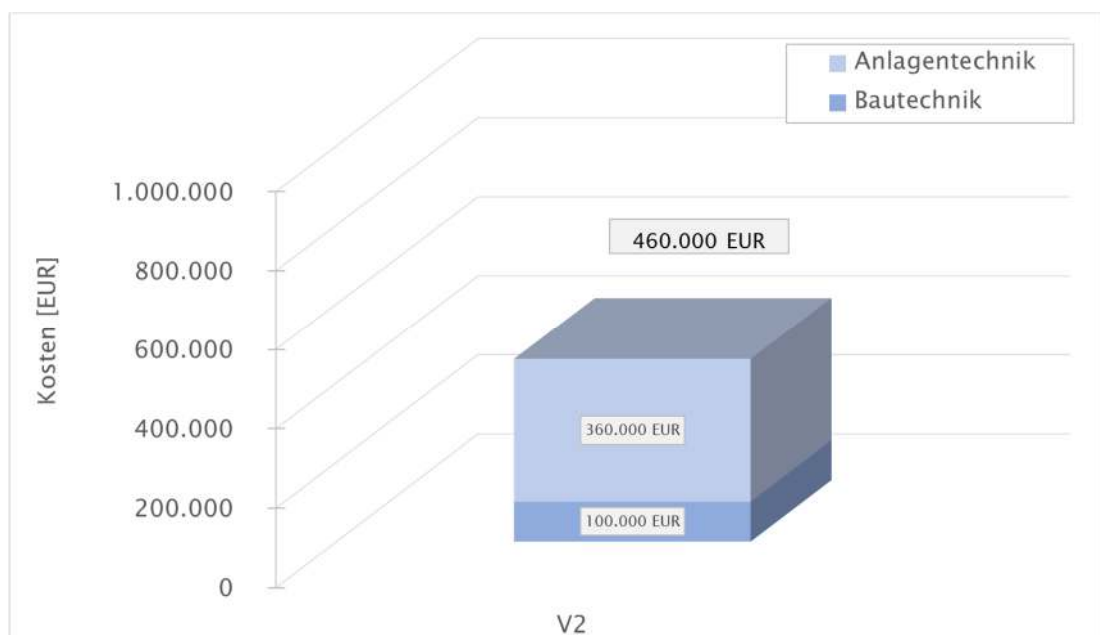


Abbildung 5: Ergebnis Kostenschätzung Investitionskosten Verfahrensvariante V2

Die geschätzten Gesamtkosten für Lieferung und Betrieb der WRA über den gesamten Betriebszeitraum werden in Abbildung 6 dargestellt. Die geschätzten Betriebskosten der Vorzugsvariante V2 betragen ca. 600.000 EUR.

Für die Lieferung der Betriebsmittel werden in Summe ca. 450.000 EUR veranschlagt, wobei Aufwendungen i.H.v. ca. 380.000 EUR für die Betriebsmittel GEH und Zeolith angesetzt werden. Weitere Kostenpunkte stellen Reparatur, Wartung und Unterhalt (RWU) mit ca. 20.000 EUR sowie Entsorgungskosten dar (ca. 30.000 EUR).

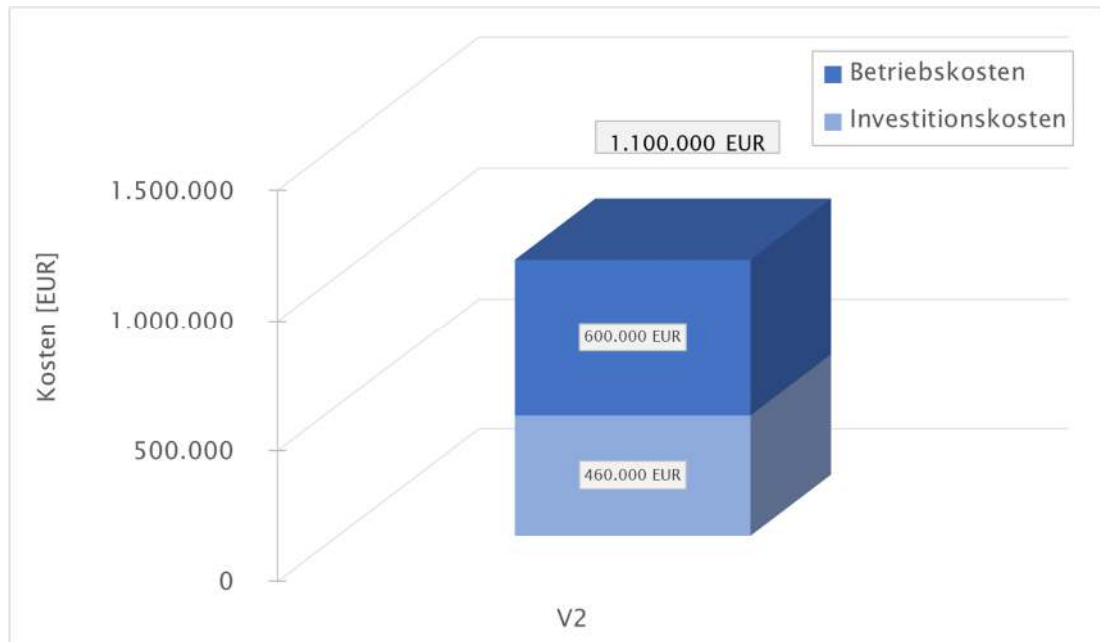


Abbildung 6: Ergebnis Kostenschätzung Investitions- und Betriebskosten Verfahrensvariante V2

Die Mietkosten der Anlagentechnik kann im Vergleich mit den angesetzten Investitionskosten abweichen, wenn eine Nachnutzung von Anlagenkomponenten wie im Falle der Vorzugsvariante V2 möglich ist.

Durch HORN & MÜLLER wurden Anfragen bei marktführenden Unternehmen für den Betrieb von Mietanlagen von einzelnen Verfahrensstufen der Vorzugsvariante V2 vorgenommen. Die Angebote für die Komponenten liegen im Bereich der kalkulierten Summe aus Investitions- und Betriebskosten und lassen keinen Kostenvorteil bei Umsetzung einer Mietanlage gegenüber dem Neubau einer WRA erkennen.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Konzept zur Behandlung von Porenwasser aus Sedimenten des Hafenbeckens Warnemünde werden Technologien aufgezeigt, mit welchen die Reinigung des Porenwassers prinzipiell möglich ist. Geeignete Verfahrenskombinationen stellen adsorptive Verfahren in Kombination mit unterschiedlichen Ausführungen einer Ionenaustauschstufe dar. Membrantechnologien sind aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten und hinsichtlich der Entsorgung von Abfallmengen nicht zu empfehlen.

Auf Basis der Möglichkeiten von bestehenden Analytikverfahren wurden Empfehlungen für abzustimmende Einleitgrenzwerte für die industriellen Schadstoffe TBT und BDE abgeleitet.

Eine Zusammenfassung über die technische Leistungsfähigkeit der Vorzugsvariante bei vorgeschlagenen Einleitwerten liefert Tabelle 3.

Wasserkonzentration Input			Wasserkonzentration Output	
Verfahrensstufe	Verbindung/ Stoffgruppe	Konzentration Maximum $c_{\max}^0$	Abscheidegrad [%]	Einleitzielwerte c_{EZW}
GEH	P _{Ges}	11 mg/l	> 90	< 1 mg/l
	Cu	22 µg/l	> 75	< 5,4 µg/l
WAK	PAK	0,6 µg/l	> 67	< 0,2 µg/l
	PCB	0,06 µg/l	> 84	< 0,01 µg/l/l
	TBT	150 ng/l	> 97	< 5 ng/l
	BDE	50 ng/l	–	< 100 ng/l
Zeolith	NH ₄ -N	33 mg/l	> 70	< 10 mg/l

Tabelle 3: Nachweis der Schadstoffabscheidung für die Vorzugsvariante

Es wird ersichtlich, dass mit üblichen Abscheidegraden eine Unterschreitung der Einleitgrenzwerte gesichert werden kann. Durch die Dimensionierung entsprechender Behältergrößen und Wechselzeiten wird die Einhaltung über die Dauer der temporären Maßnahme gewährleistet.

Der Betrieb der Vorzugsvariante ist mit Aufwendungen i.H.v. ca. 1.1 Mio. EUR über den Betriebszeitraum von ca. 340 Tagen verbunden.

VERZEICHNISSE

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung / Erläuterung
a.a.R.d.T	allgemein anerkannte Regeln der Technik
AbwV	Abwasserverordnung
AGB	Ausgleichsbehälter
AK	Aktivkohle
BDE	Bromierte Diphenylether
BG	Bestimmungsgrenze
GC	Gaschromatografie
GEH	Granuliertes Eisenhydroxid
MS	Massenspektrometrie
OGewV	Oberflächengewässer Verordnung
POP	Persistente organische Schadstoffe (engl. persistent organic pollutants)
RO	Umkehrosmose (engl. reverse osmosis)
StdT	Stand der Technik
TBT	Tributylzinn
UKN	Umweltqualitätsnorm
WAK	Wasseraktivkohle
WRA	Wasserreinigungsanlage
ZHK	Zulässige Qualitätsnorm

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zulaufqualität Porenwasser gem. Anlage 1	3
Tabelle 2:	Empfehlung Einleitzielwerte für die Direkteinleitung von gereinigten Porenwasser in das Hafenbecken Warnemünde, Gegenüberstellung mit Regelwerken für abweichende Anwendungsfälle.....	6
Tabelle 3:	Nachweis der Schadstoffabscheidung für die Vorzugsvariante.....	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prognose zeitlicher Verlauf Anfall Porenwasser. Quelle: Baugrund Stralsund, nachrichtlich übernommen gem. Übersendung vom 29.01.2024.....	5
Abbildung 2: Aufstellfläche Porenwasser-Reinigungsanlage	8
Abbildung 3: Grundfließbild Variante 1 – Adsorptionsverfahren mit Ammoniumentfernung per Ionenaustausch	11
Abbildung 4: Grundfließbild Variante 1.2 – Adsorption mit Ammoniumentfernung mittels Zeolith.....	13
Abbildung 5: Ergebnis Kostenschätzung Investitionskosten Verfahrensvariante V2 ...	16
Abbildung 6: Ergebnis Kostenschätzung Investitions- und Betriebskosten Verfahrensvariante V2.....	17

Literaturverzeichnis

- [1] Inros Lackner SE
Umgestaltung Wertbecken Warnemünde Maritimer Gewerbepark für nachhaltige Energietechnologien.
Bereich Herstellung Hafeninfrastruktur.
Erläuterungsbericht Entwurfs- und Genehmigungsplanung
Rostock, 17.11.2023

- [2] Inros Lackner SE
Umgestaltung Wertbecken Warnemünde Maritimer Gewerbepark für nachhaltige Energietechnologien.
Bereich Herstellung Hafeninfrastruktur.
Erläuterungsbericht Entwurfs- und Genehmigungsplanung
Rostock, 17.11.2023

- [3] InfraServ GmbH
Antrag auf Erteilung einer gehobenen Erlaubnis für die Einleitung von gereinigtem Abwasser und nicht behandlungsbedürftiger Abwasser in die Alz nach §§ 8,9,10 und 15 WHG (K154/19)
Burgkirchen a.d. Alz, 2019

ANHANG

Anlage 1: Übersicht Schadstoffzusammensetzung Porenwasser

Porenwasser

Labornummer / Probe		23-3895-001 - 3	23-3895-002 - 3	23-3895-003 - 3	23-3895-004 - 3	OGewV ZHK-UQN Anlage 6, Spalte 9	OGewV ZHK-UQN Anlage 8, Spalte 7
Parameter	Einheit	P 1 Porenwasser	P 2 Porenwasser	P 3 Porenwasser	P 4 Porenwasser		
pH-Wert		7,6	7,9	7,9	7,9	----	----
Temperatur (pH-Wert- Bestimmung)	°C	14,5	13,8	13	14,5	----	----
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	30.000	24.100	22.300	22.900	----	----
AOX	µg/l	51	30	40	40	----	----
Gesamtphosphor	mg/l	3,2	1,3	1,4	11	----	----
Phosphat-ortho-P	mg/l	2	1,2	1,4	10	----	----
Stickstoff, gesamt	mg/l	19	13	23	32	----	----
Nitrat-N	mg/l	0,029	0,027	< 0,023	0,029	----	----
Ammonium-N	mg/l	9,2	11	21	33	----	----
Sulfat	mg/l	687	875	624	426	----	----
Eisen	µg/l	365	463	118	596	----	----
Mangan	µg/l	400	66	470	830	----	----
Orthosilikat (SiO ₄)	µg/l	55.000	29.000	38.000	60.000	----	----
Schwermetalle							
Blei	µg/l	1,7	< 1,0	< 1,0	< 1,0	----	14
Cadmium	µg/l	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	----	0,45
Kupfer	µg/l	22	2,0	15	9,2	----	----
Nickel	µg/l	1,3	1,2	1,7	1,4	----	34
Quecksilber	µg/l	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	----	0,07
Zink	µg/l	3	< 1,0	1,3	< 1,0	----	----
PAK							
Naphthalin	µg/l	0,17	0,088	< 0,005	0,031	----	130
Acenaphthylen	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	----
Acenaphthen	µg/l	0,049	< 0,005	0,029	0,02	----	----
Fluoren	µg/l	0,031	< 0,005	0,018	0,013	----	----
Phenanthren	µg/l	0,07	< 0,005	0,024	0,012	----	----
Anthracen	µg/l	0,031	< 0,005	0,027	0,012	----	0,1
Fluoranthren	µg/l	0,16	0,16	0,3	0,075	----	0,12
Pyren	µg/l	0,13	0,15	0,19	0,043	----	----
Benzo(a)anthracen	µg/l	0,015	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	----
Chrysen	µg/l	0,014	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	----
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	0,01	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	0,017
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	0,022	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	0,017
Benzo(a)pyren	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	0,027
Dibenzo(a,h)anthracen	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	----
Benzo(g,h,i)perylene	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	0,00082
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	----	----
Summe PAK (Addition ohne < -Werte)	µg/l	0,702	0,3188	0,588	0,206	----	----

Porenwasser

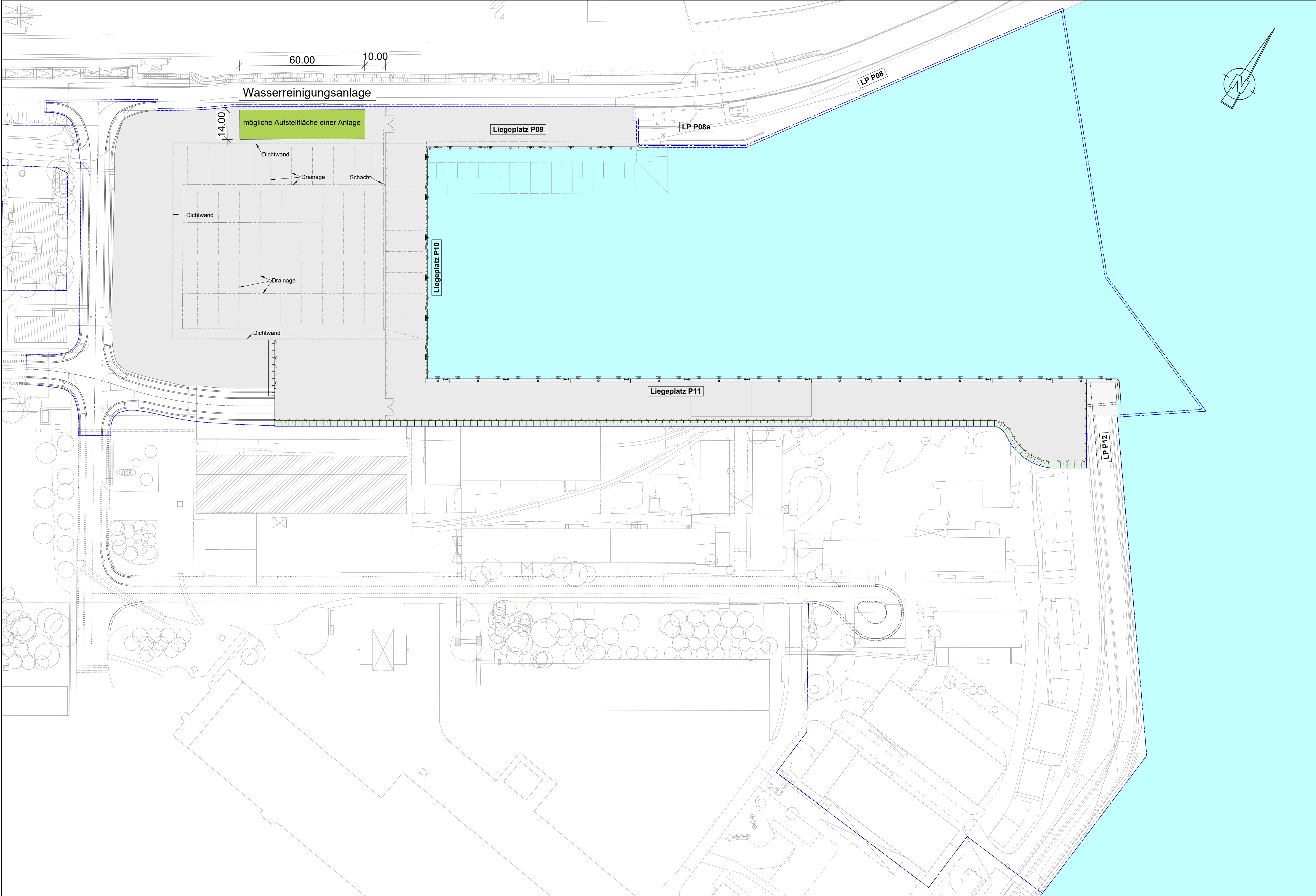
Labornummer / Probe		23-3895-001 - 3	23-3895-002 - 3	23-3895-003 - 3	23-3895-004 - 3	OGewV ZHK-UQN Anlage 6, Spalte 9	OGewV ZHK-UQN Anlage 8, Spalte 7
Parameter	Einheit	P 1 Porenwasser	P 2 Porenwasser	P 3 Porenwasser	P 4 Porenwasser		
PCB							
PCB 28	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0005 **	-----
PCB 52	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0005 **	-----
PCB 101	µg/l	< 0,005	0,0096	< 0,005	< 0,005	0,0005 **	-----
PCB 118	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	-----	-----
PCB 138	µg/l	< 0,005	0,022	< 0,005	< 0,005	0,0005 **	-----
PCB 153	µg/l	0,011	0,022	< 0,005	< 0,005	0,0005 **	-----
PCB 180	µg/l	< 0,005	0,0093	< 0,005	< 0,005	0,0005 **	-----
Summe PCB 6 (Addition ohne < -Werte)	µg/l	0,011	0,0629	n.b.	n.b.	-----	-----
Summe PCB 7 (Addition ohne < -Werte)	µg/l	0,011	0,0629	n.b.	n.b.	-----	-----
weitere organische Parameter							
Diflufenican	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,009 *	-----
Triclosan	µg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	-----
Tributylzinn	µg/l	< 0,017	0,15	0,025	< 0,017	-----	0,015
Summe BDE (exkl. BG)	µg/l	ND	ND	ND	ND	-----	0,014
Summe BDE (inkl. BG)	µg/l	0,0357	0,0357	0,0357	0,0495	-----	0,014
----- keine Angabe							
ND - nicht bestimmt, da keines der entsprechenden Kongenere oberhalb der BG lag							
* JD-UQN, Tabelle Anlage 6, Spalte 7							
** JD-UQN, Tabelle Anlage 6, Spalte 7 und nur soweit, wie die Erhebung von Schwebstoff- oder Sedimentdaten nicht möglich ist.							

Anlage 2: Bromierte Diphenylether (BDE); Bestimmungsgrenzen, Ableitung Einleitgrenzwert

Bromierungsgrad	Kongener Kurzname	Analytik Bsp. 1 710-2023-21965002 BG [ng/l]	Analytik Bsp.2 710-2023-21965004 BG [ng/l]	Empfohlener Grenzwert (Kongener; Summe) [ng/l]
Tri	BDE 17	0,10	0,14	1,00
Tri	BDE 28	0,10	0,14	1,00
Tetra	BDE 47	0,23	0,32	1,00
Tetra	BDE 49	0,23	0,32	1,00
Tetra	BDE 66	0,23	0,32	1,00
Tetra	BDE 71	0,23	0,32	1,00
Tetra	BDE 77	0,23	0,32	1,00
Penta	BDE 85	0,47	0,65	1,00
Penta	BDE 99	0,47	0,65	1,00
Penta	BDE 100	0,47	0,65	1,00
Penta	BDE 119	0,47	0,65	1,00
Penta	BDE 126	0,47	0,65	1,00
Hexa	BDE 138	0,70	0,97	2,00
Hexa	BDE 153	0,70	0,97	2,00
Hexa	BDE 154	0,70	0,97	2,00
Hexa	BDE 156	0,70	0,97	2,00
Hepta	BDE 183	1,17	1,62	3,00
Hepta	BDE 184	1,17	1,62	3,00
Hepta	BDE 191	1,17	1,62	3,00
Octa	BDE 196	2,33	3,24	5,00
Octa	BDE 197	2,33	3,24	5,00
Nona	BDE 206	4,67	6,48	10,00
Nona	BDE 207	4,67	6,48	10,00
Deca	BDE 209	11,70	16,20	20,00
Summe 24 Kongenere, rechnerisch		35,71	49,53	79,00
Summe 24 Kongenere, Vorschlag Einleitzielwert [ng/l]				100,00

Bromierungsgrad	Anzahl Kongenere	Messwert inkl. BG [ng/l]	Messwert inkl. BG [ng/l]
Tri	2	0,20	0,28
Tetra	5	1,17	1,62
Penta	5	2,34	3,24
Hexa	4	2,80	3,89
Hepta	3	3,51	4,86
Octa	2	4,66	6,48
Nona	2	9,34	12,96
Deca	1	11,70	16,20
Summe	24	35,71	49,53

**Anlage 3: Lageplan Aufstellungsplan Wasserreinigungsanlage,
Plannr.: 2017-0282 4 WB LP 40 0021 0 P**



Höhensystem: m NHN

Lagesystem: ETRS 89

E					
D					
C					
B					
A					
Änd.-Ind.	Datum	Beschreibung/Änderung	Gez.	Bearbeiter	

Bauherr/Auftraggeber		 HANSE- UND UNIVERSITÄTSSTADT ROSTOCK Hafen- und Seemannsamt Warnowufer 60a, 18057 Rostock		
Phase	Entwurfs- und Genehmigungsplanung		Bestätigung Bauherr	
Vorhaben/Objekt	Umgestaltung Werftbecken Warnemünde Maritimer Gewerbepark für nachhaltige Energietechnologien		Bearbeiter	gez. Günzl
			gezeichnet	gez. Töllner
Fachbereich/Zeichnungsinhalt	Lageplan		Kontrolle	gez. Holland
Wasserbau	Aufstellungsplan - Wasserreinigungsanlage		Projektleiter	gez. Günzl
Verfasser	 INROS LACKNER SE Rosa-Luxemburg-Str. 16 18055 Rostock Tel: 0381-4567-569 Fax: 0381-4567-559		Maßstab	1:1000
			Datum	25.01.2024
Auftrags-Nr./Plancode	2017-0282 4 WB LP 40 0021 0 P			

VERFASSENERKLÄRUNG

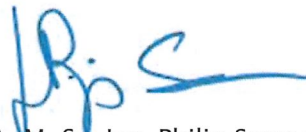
Die Untersuchung wurde auf der Grundlage des heutigen Wissensstandes unter den vorstehend geschilderten Bedingungen und Voraussetzungen nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt.

Berlin, 29. Februar 2024

HORN & MÜLLER
Ingenieurgesellschaft mbH



Dr.-Ing. Andreas Horn



i.A. M. Sc. Jan-Philip Samson