

Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband
in Kooperation mit IWW Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH

**Integrales Wassermanagement für die
Wasserstoffproduktion –
Entwicklung eines Leitfadens für energiewirtschaftliche
Planungs- und Zulassungsverfahren**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Förderkennzeichen 39052/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von
Minori Matoba (OOWV)
Kerstin Krömer (iwag)
Ursula Karges (IWW)
Thomas Riedel (IWW)
Marcel Koti (IWW)
Anja Rohn (IWW)
Dominic Röher (IWW)
Christine Kübeck (OOWV)
Jens-Uwe Gerdes (OOWV)

Brake, Dezember 2025

Inhalt

Zusammenfassung	6
1 Einleitung	7
2 Beschreibung Wasserbedarf Energy Hub.....	11
2.1 Wasserbedarf	11
2.2 Wasserqualität	12
3 Identifikation und Bewertung der verfügbaren Wasserressourcen	13
3.1 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	13
3.1.1 Räumliche Lage.....	13
3.1.2 Geologie / Hydrogeologie	14
3.1.3 Landnutzung.....	14
3.2 Rechtliche Grundlagen (Einleit- / Entnahmegenehmigung als Überblick)	14
3.3 Prüfung der Ressourcen – generelle Vorgehensweise	15
3.3.1 Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot	16
3.3.2 Wasserqualität	16
3.3.3 Lage / Umfeld.....	16
3.3.4 Weitere Nutzer.....	17
3.4 Niederschlagswasser	17
3.5 Grundwasser	18
3.6 Oberflächengewässer	19
3.7 Künstliche Kanäle - Ems-Jade-Kanal	22
3.8 Meerwasser	25
3.9 Kläranlagenabläufe.....	28
4 Bewertung verfahrenstechnischer Alternativen	30
4.1 Methodisches Vorgehen.....	30
4.2 Beschreibung notwendiger Verfahrensstufen	31
4.3 Qualität der Spülwässer und Konzentrate	32
4.4 Aufbereitung des KA-Ablaufs Wilhelmshaven	33
4.5 Aufbereitung des Kläranlagenablaufs Sande	33
4.6 Aufbereitung Oberflächengewässer (Ems-Jade-Kanal)	35
4.7 Aufbereitung Meerwasser	36
4.8 Bewertungsmatrix: Entscheidungshilfe zur Technologieauswahl.....	36
5 Bewertung von Abwässern der Wasserstoffproduktion und Wasseraufbereitung	40
5.1 Abwässer aus der Wasserstoffproduktion.....	40
5.2 Übergeordnete Bewertung aller potenziellen Einleitgewässer	41
5.3 Genehmigungsrechtliche Aspekte.....	41

5.3.1	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	41
5.3.2	Abschätzung der Umweltauswirkungen	42
5.3.3	Beweissicherung.....	42
5.3.4	Eingriffsreglung und Artenschutz	43
6	Beschreibung Versorgungsszenarien.....	43
6.1	Entscheidungsmatrix zur Priorisierung der Ressourcen.....	43
6.2	Priorisierung der Ressourcen	44
6.3	Standort Wilhelmshaven	45
6.4	Standort Sande.....	48
7	Ergebnistransfer	50
7.1	Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung.....	50
7.2	Methodik Leitfaden	51
8	Fazit	52
9	Literaturverzeichnis	54
10	Anhang	56
10.1	Anhänge zum Kapitel „Identifikation und Bewertung der verfügbaren Wasserressourcen“ ...	56
10.2	Anhänge zum Kapitel „Bewertung verfahrenstechnischer Alternativen“	63
10.2.1	Kläranlage Wilhelmshaven.....	63
10.2.2	Kläranlage Sande	68
10.2.3	Oberflächengewässer (Ems-Jade-Kanal)	73
10.2.4	Meerwasser.....	79
10.2.5	Exemplarischer Einsatz der Matrix zur Ermittlung einer verfahrenstechnischen Vorzugsvariante anhand des Anwendungsfalls <i>KA Wilhelmshaven</i>	84
10.3	Übergeordnete Matrix zur Priorisierung der Ressourcen.....	87
10.4	Leitfaden für energiewirtschaftliche Planungs- und Zulassungsverfahren	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Ausschnitt der Projekte des Energy Hubs (Quelle: Wirtschaftsförderungsgesellschaft Wilhelmshaven mbH (Hg.), Broschüre „Hier findet Energie statt“, Ausgabe 1/2024)	8
Abbildung 2 Brauchwasserbedarf (hier bezeichnet als Betriebswasser) der Standortcluster Wilhelmshaven Süd und Nord (Quelle Fraunhofer IST, Stand Mai 2025).....	11
Abbildung 3 Brauchwasserbedarf (hier bezeichnet als Betriebswasser) des Standortclusters Friesland-Etzel (Quelle Fraunhofer IST, Stand Mai 2025)	11
Abbildung 4 Lage der betrachteten Wasserstoffproduktionsstandorte (Grundkarte: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie WMS-Dienst 2024)	13
Abbildung 5 Modellbasierte Abschätzung der Veränderung der mittleren monatlichen Abflussbildung im Verbandsgebiet Emden für die Zeitscheibe 2017 – 2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum 2002 – 2016. (Quelle: KLEVER Risk (2023), S. 15).....	21
Abbildung 6 Verbindung des Ems-Jadekanals mit dem Nordgeorgsfehnkanal und dem südlich gelegenen Leda-Jümme Gebiet (Quelle: Gewässer und Bauwerke an Gewässern LGLN Stand 2021). Die blauen Pfeile weisen auf den Scheitelbereich der Kanäle hin.	23
Abbildung 7 Bereiche des Nationalparks Wattenmeer in der Jade: rot = Ruhezone, grün = Zwischenzone); in rot umkreist: potentieller Entnahme- und Einleitbereich.....	27
Abbildung 8 Draufsicht der Kläranlage Wilhelmshaven (Quelle: https://www.tbw-whv.de/technische	29
Abbildung 9 Draufsicht der Kläranlage Sande (Quelle: Google Maps, letzter Zugriff: 13.09.2024)	30
Abbildung 10 Schema der Verfahrenskette zur Aufbereitung von KA-Ablauf Wilhelmshaven	33
Abbildung 11 Verfahrenskette zur Aufbereitung des KA-Ablaufs Sande.....	35
Abbildung 12 Verfahrenskette zur Aufbereitung von Oberflächenwasser am Beispiel des Ems-Jade-Kanals am Standort Westerende-Kirchloog.....	35
Abbildung 13 Verfahrenskette zur Aufbereitung von Wasser aus der Nordsee am Jadebusen	36
Abbildung 14 Bewertungsmatrix zur Ermittlung einer verfahrenstechnischen Vorzugsvariante zur Bereitstellung von Ultrareinstwasser	39
Abbildung 15 Zeitplan der Wasseraufbereitung für den Standort Wilhelmshaven	47
Abbildung 16 Zeitplan der Wasseraufbereitung für den Standort Sande.....	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielhafte Qualitätsanforderungen für Kühl- und Reinstwasser	12
Tabelle 2: Salinität, Temperatur und Schwebstoffe in der Jade Bucht gemessen bei mehreren Ausfahrten (Böning et al. 2017; 2018).....	26
Tabelle 3 Qualitätsanforderungen für vollentsalztes Wasser nach VGB - M407 (2019)	31
Tabelle 4 Investitionskosten der Wasseraufbereitung für den Standort Wilhelmshaven.....	47
Tabelle 5 Investitionskosten der Wasseraufbereitung für den Standort Sande	49

Abkürzungsverzeichnis

AOX	adsorbierbare organische Halogenverbindungen
BSB5	biologischer Sauerstoffbedarf
CEB	Chemical Enhanced Backwash
CIP	Cleaning in Place
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Dissolved Organic Carbon
EDI	Elektrodeionisation
EJK	Ems-Jade-Kanal
EJK	Ems-Jade-Kanal
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
IX	Ionenaustauscher
IXMB	Ionenaustauschermischbett
IXMB	Ionenaustauscher-Mischbett
KA	Kläranlage
LJG	Leda-Jümme-Gebiet
meq/l	Milliequivalent pro Liter
Mn	Mangang
MNQ	mittlerer Niedrigwasserabfluss
N ₂	Stickstoff
NGFK	Nordgeorgsfehnkanal
O ₂	Sauerstoff
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
RO	Reverse Osmosis
SAC	Strong Acid Cation
SAK254	Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm
TOC	Total Organic Carbon
UF	Ultrafiltration
UQN	Umweltqualitätsnorm
WAC	Weak Acid Cation
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHV	Wilhelmshaven
WRRL	EU-Wasserrahmenrichtlinie

Zusammenfassung

Deutschlandweit führen Herausforderungen wie Klimawandel, regionales Bevölkerungs- und industrielles Wachstum zu einem Umdenken in der Bewirtschaftung der Wasserressourcen. Um die Trinkwasserversorgung zukünftiger Generationen sichern zu können, muss die Auswahl der Wasserressource dem Nutzungszweck entsprechen und alternative Ressourcen berücksichtigen. Im Nordwesten Niedersachsens befindet sich ein großes Infrastrukturprojekt, der Energy Hub, das sich zum Ziel gesetzt hat, ein Drehkreuz für die Erzeugung, Speicherung und Verteilung von erneuerbaren Energien und Energieträgern, insbesondere Wasserstoff, zu werden. Dies geht mit einem zu erwartenden Anstieg des Wasserbedarfs in der Region einher, welcher zukünftig um etwa 20 Mio. m³ pro Jahr ansteigen kann. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) hat das Projekt „IWM-H2 Integriertes Wassermanagement für die Wasserstoffproduktion“ gefördert, bei dem die Projektpartner IWW und OOWV gemeinsam Wasserversorgungsoptionen für die Gesamtheit der Projekte des Energy Hubs entwickelt haben. Anhand der Erfahrungen aus dem Projekt wurde eine systematische Vorgehensweise für die Durchführung von Machbarkeitsstudien zur nachhaltigen Wasserversorgung der grünen Wasserstoffproduktion erarbeitet und in einem Leitfaden festgehalten. Folgende alternative Ressourcen werden für die Wasserversorgung in Betracht gezogen:

Kläranlagenablauf: Die aus dem Kläranlagenablauf zu gewinnende Wassermenge ist durch den Zu- und damit den Ablauf der Kläranlagen limitiert. Die für den Energy Hub in Frage kommenden Kläranlagen (KA) stehen in Wilhelmshaven und Sande. Für beide Kläranlagen sind die Abwassermengen klar umrissen; rund 5,6 Mio. m³ pro Jahr für die KA Wilhelmshaven und rund 400.000 m³ pro Jahr für die KA Sande.

Meerwasser: Meerwasser als Direktentnahme, stünde in unbegrenztem Ausmaß zur Verfügung. Die Wasserqualität, insbesondere der Salzgehalt, werden zu einem erhöhten Aufwand in der Aufbereitung führen. Die Entnahme ist erlaubnisfrei, jedoch wird für das Entnahmebauwerk eine Genehmigung benötigt, sodass hier Auflagen erwartet werden, welche je nach Standort u. a. die Belange des Nationalparks Wattenmeer und seiner Schutzgüter angemessen berücksichtigen. Im Bereich der Interaktion zwischen Grundwasserraum und Meerwasser ist eine Entnahme von infiltrierendem Meerwasser möglich. Das durch Uferfiltrat gewonnene Meerwasser hat den Vorteil, dass eine „Filterfunktion“ des Untergrundes mit Bezug zu biologischen Komponenten vorhanden ist. Zu bedenken ist allerdings, dass es zu einer Küstennahen Uferfiltratentnahme bisher keine Erfahrungen gibt, ebenso sind weitere Wirkeinflüsse bisher nicht abschätzbar.

Oberflächengewässer: Die Untersuchungen zeigen, dass die Datengrundlage für die Mengenabschätzung der Oberflächengewässer für eine statistische Auswertung entweder nicht oder nur unzureichend vorhanden ist. Für die Uferfiltratentnahme gelten die gleichen Aspekte wie bei Meerwasser.

Die Nutzung von Niederschlagswasser wurde nicht weiter im Detail betrachtet, aufgrund des großen erforderlichen Flächenbedarfs und der stark schwankenden Wasserverfügbarkeit. Ebenso wurde Grundwasser als Ressource ausgeschlossen, da das nutzbare Dargebot als gering ausgewiesen wird, wegen der geringen Neubildungsrate.

Auf Grund der unterschiedlichen absoluten und saisonalen Verfügbarkeiten, werden die Ressourcen voraussichtlich kombiniert werden müssen, um die Versorgung aller Projekte sicherstellen zu können.

1 Einleitung

Wasser ist ein fundamentales Element mit vielfältigen sozioökonomischen Einflussfaktoren. Es ist sowohl die Grundlage für nachhaltige Entwicklung und Überleben als auch ein entscheidender Wirtschaftsfaktor. Allerdings geraten viele Wasserressourcen zunehmend unter Druck, insbesondere durch den Klimawandel, Bevölkerungswachstum und industrielle Entwicklung. Durch den Klimawandel treten sowohl Wasserknappheit und Dürren als auch Überschwemmungen immer häufiger auf. Siedlungs- und Industrieentwicklungen tragen zudem zu einem steigenden Wasserbedarf und zunehmender Verschmutzung der Ressourcen bei.

Grüner Wasserstoff ist ein wichtiger Energieträger für die Dekarbonisierung verschiedener Sektoren, wie z.B. für Verkehr, Industrie und Gebäude. In Deutschland hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, bis 2030 10 Gigawatt (GW) grünen Wasserstoff zu produzieren. Im Juni 2024 wurde vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) eine Handreichung „Standortprüfung von industriellen Ansiedlungen zur Wasserstoffherzeugung: Wasserfachliche Aspekte bei einem Anschluss an die regionale bzw. lokale Wasserinfrastruktur“ herausgegeben¹. Ziel dieser Handreichung ist es, die Interessenten für die Wasserstoffherzeugung im Rahmen ihrer Ansiedlungsüberlegungen auf die wasserfachlich zu beachtenden Aspekte vorzubereiten. Die im Anhang dieser Veröffentlichung enthaltene Checkliste beinhaltet drei Abschnitte, die bei der Standortprüfung zu berücksichtigen seien: i) Wasserbedarf, ii) Versorgungsinfrastruktur und iii) Abwasseranfall. Aus Sicht des BDEW ist es äußerst relevant, sich mit diesen Aspekten rechtzeitig auseinanderzusetzen, jedoch bilden die darin aufgeführten Fragen nur grundsätzliche Frage- und Aufgabenstellungen ab.

Eine sichere Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sind wichtig, für eine nachhaltige Entwicklung der Wasserstoffindustrie (Bormann et al. 2020). Allerdings spielen diese Themen aktuell in vielen energiewirtschaftlichen Planungsprozessen eine eher untergeordnete Rolle. Im Rahmen dieses DBU-geförderten Projektes wurde systematisch eine Vorgehensweise für die Durchführung von Machbarkeitsstudien zur nachhaltigen Wasserversorgung der grünen Wasserstoffproduktion erarbeitet. Als Fallstudie wurden hierbei die Stadt Wilhelmshaven (WHV) und der umgebende Landkreis Friesland betrachtet. Das Infrastrukturprojekt Energy Hub möchte hier ein Drehkreuz für Erneuerbare Energien, insbesondere Wasserstoff, entwickeln (vgl. Abbildung 1).

¹<https://www.bdew.de/service/publikationen/bdew-handreichung-plus-checkliste-zur-wasserfachlichen-standortpruefung-von-industriellen-wasserstoffproduktionsstaetten/>

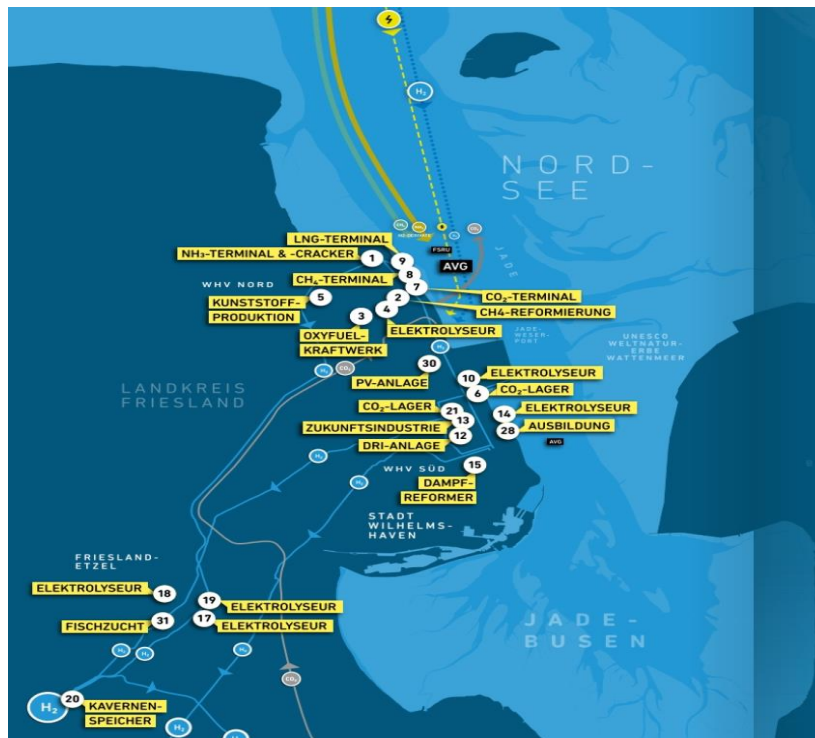


Abbildung 1 Ausschnitt der Projekte des Energy Hubs (Quelle: Wirtschaftsförderungsgesellschaft Wilhelmshaven mbH (Hg.), Broschüre „Hier findet Energie statt“, Ausgabe 1/2024)

Im Rahmen der Studie wurden verschiedene Wasserressourcen auf ihre Verfügbarkeit, sowie technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Aufbereitung und Genehmigungsfähigkeit der Nutzung untersucht. Eine Innovation stellt die Berücksichtigung von genehmigungsrechtlichen Aspekten für die Einleitung der entstehenden Abwässer dar, da es bislang noch keinen Anhang in der Abwasserverordnung (AbwV) gibt, welcher diese adressiert. Das Ziel war es, eine möglichst große Übertragbarkeit der Ergebnisse zu schaffen, indem sehr unterschiedliche Ressourcen berücksichtigt wurden, welche nicht in Konkurrenz zur Trinkwasserversorgung stehen. Die angewandte Methodik wurde in einem Leitfaden dokumentiert und soll als Vorlage für weitere energiewirtschaftliche Planungsprozesse für die grüne Wasserstoffproduktion in Deutschland dienen.

Der Oldenburgisch-Ostfriesische Wasserverband (OOWV), der rund 1 Million Menschen im Nordwesten Niedersachsens mit Trinkwasser versorgt, und das IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH (IWW), bundesweit anerkanntes Forschungs- und Beratungsinstitut in der Wasserversorgung, führen dafür ihre Expertise zu Wasserressourcen und Brauchwasserlösungen zusammen.

Aktuelle Problemstellung und Stand des Wissens und der Technik

Der Wasser-Wasserstoff-Nexus

Grüner Wasserstoff ist notwendig, um die volatile Energieverfügbarkeit aus Erneuerbaren Energien (Photovoltaik und Windkraft) mit der Nachfrage zu verbinden und somit ein resilientes Energiesystem zu schaffen. Durch den Einsatz von Strom wird Wasser in einer Wasserelektrolyse zu Wasserstoff, einem chemischen Energieträger, umgewandelt. Dieser kann u. a. in bestehenden Wasserstoffanwendungen, wo aktuell kein grüner Wasserstoff genutzt wird, eingesetzt werden oder eine Alternative zu Strom darstellen. Dass dieser Schritt eine wichtige Rolle in der industriellen Energiewende spielt, belegen verschiedene Studien wie das DBU-Vorhaben „Dekarbonisierung der Prozesswärme im Klimahafen Gelsenkirchen“ (Jung & Rath 2023). Aus diesem Grund wird

angenommen, dass der Wasserstoffbedarf in den nächsten Jahren ansteigen wird (Köppel et al. 2023). Dies geht allerdings mit einer Zunahme des Wasserbedarfs einher. Insgesamt wird angenommen, dass für die grüne Wasserstoffproduktion ausreichend Wasser in Deutschland verfügbar ist (Saravia & Gehrman 2024). Viele Studien und Analysen führen jedoch nur übergeordnete Untersuchungen durch, anstatt lokale Auswirkungen zu betrachten oder sie gehen von einer Versorgung mit Meerwasser aus. Sowohl die Onshore- als auch die Offshore-Wasserstoffproduktion mit Meerwasser stellen nur einen Teil der Lösung dar. In der Energiewirtschaft besteht ein höheres Interesse an Grundwasser oder Oberflächenwasser, da diese einen geringeren Energie- und Ressourcenverbrauch bei der Aufbereitung zu Reinstwasser erfordern. Diese Ressourcen sind allerdings standortspezifisch sehr unterschiedlich verfügbar. Wenn die Wasserverfügbarkeit in Planungsprozessen nicht ausreichend berücksichtigt wird, hat dies potenziell langfristige Folgen für den lokalen Wasserhaushalt. Das betrifft vor allem Regionen wie Niedersachsen, die in den vergangenen Jahren von Trockenheit und Dürrephasen betroffen waren. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die sich entwickelnde Wasserstoffindustrie eine große Auswirkung auf die lokale Wasserwirtschaft haben wird.

Wasserbedarf der grünen Wasserstoffproduktion

Generell sind zwei Hauptprozesse im Rahmen der Wasserstoffherstellung relevant, für die Wasser in großer Menge zur Verfügung stehen muss: Kühlung und Elektrolyse. Je nach Anwendungsart und Technologie sind die Qualitätsanforderungen unterschiedlich. Bei dem Elektrolyseprozess ist Wasser neben Strom die Hauptressource, welche zu Sauerstoff (O_2) und Wasserstoff (H_2) gespalten wird. Hier ist Wasser mit einem sehr hohen Reinheitsgrad, als Reinstwasser oder vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) bezeichnet, erforderlich. Dies bedeutet, dass das Wasser partikelfrei sein muss und nur geringe Konzentrationen an Metallen, Ionen und organischen Stoffen enthalten darf. Schon kleinste Verunreinigungen können die chemische Reaktion stören, das entstehende Wasserstoffgas verunreinigen oder die Nutzungsdauer der Elektroden und des Gesamtsystems beeinträchtigen. Die konkreten Anforderungen an die Wasserqualität hängen von der Elektrolysetechnologie ab. Die erforderliche Reinstwassermenge lässt sich aus dem stöchiometrischen Anteil des H_2 im Wasser ableiten: für die Produktion von 1 kg H_2 werden etwa 9 kg H_2O benötigt. Hinzu kommen jedoch noch Verluste im Elektrolyseur, da die entstehenden Gase H_2 und O_2 Feuchtigkeit aus dem System austragen. Diese Verluste liegen bei etwa 10-25 % (Krömer et al. 2025).

Bei dem Elektrolyseprozess wird ein Teil der eingesetzten Energie in Wärme umgewandelt. Wenn diese keinem Nutzen zugeführt wird, z. B. im Nah- oder Fernwärmenetz, muss sie abgeführt werden. Hierfür wird meistens ebenfalls Wasser benötigt, wobei die Kühlwassermenge stark von der Kühltechnologie abhängt. Es gibt geschlossene Systeme wie die Luftkühlung oder Kältekompressionskühlung, welche keinen oder nur einen geringen Wasserbedarf haben. In offenen Systemen wie der Verdunstungskühlung hingegen, werden große Wassermengen benötigt. Es gibt auch hybride Systeme, die eine Kombination geschlossener und offener Systeme darstellen. Bei Anlagen mit einer Kapazität von > 50 MW kommen meistens Nass-/Verdunstungskühlsysteme zum Einsatz, aufgrund ihres geringeren Platz-, Energie- und Investitionsbedarfs (Krömer et al. 2025).

Auch für die Kühlung wird eine hohe Wasserqualität, etwa trinkwasserähnlich, benötigt, um einen störungsfreien Betrieb zu ermöglichen. Mögliche Probleme aufgrund von Verschmutzungen im Wasser sind folgende:

- Partikuläre Verschmutzung durch Oxidation und Ausfall von gelösten Inhaltsstoffen wie Metallen
- Entstehung von Belägen durch Härtebildner wie Calcium

- Ablagerungen und Verschleimung aufgrund von biologischem Wachstum
- Verkeimung
- Korrosion, vor allem in Abhängigkeit vom pH-Wert und dem Salz- und Chloridgehalt.

Der Gesamtwasserbedarf setzt sich aus den oben beschriebenen Prozessen und zusätzlichen Mengen für die Wasserherstellung zusammen. Um die jeweils erforderliche Qualität zu erzielen, sind verschiedene Aufbereitungsstufen erforderlich, bei denen Verluste entstehen. Diese Restwasserströme müssen zum Wasserbedarf in Zielqualität hinzugerechnet werden und entstehen in Form von Spülwässern, Eluaten und Konzentraten. Je höher die Verschmutzung des Rohwassers und je höher die Qualitätsanforderung, desto größer die Verluste.

2 Beschreibung Wasserbedarf Energy Hub

2.1 Wasserbedarf

Die Wasserbedarfe der Projekte des Energy Hubs im Raum WHV und Sande lassen sich räumlich in drei Cluster einteilen: WHV Nord, WHV Süd und Friesland-Etzel (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3; zur Erläuterung: Betriebswasser ist die Summe der Wasserbedarfe).

Die Projekte haben abweichende Zeithorizonte zur Realisierung und teilweise auch Ausbau- oder Zwischenstufen, in denen die Produktionskapazität Schritt für Schritt wachsen soll. Somit kann auch der Ausbau der Wasserversorgung stufenweise erfolgen. Der Wasserbedarf steigt für alle drei Cluster ab 2027/2028 an, bis im Jahr 2035 die aktuell geplanten Projekte im Vollausbau realisiert sein sollen. Die Projekte des Energy Hubs befinden sich in unterschiedlichen und z.T. auch in frühen Phasen der Projektplanung. Es ist davon auszugehen, dass im Rahmen der weiteren Planungen auch die Wasserbedarfe weiter differenziert und mit zunehmender Genauigkeit definiert werden.

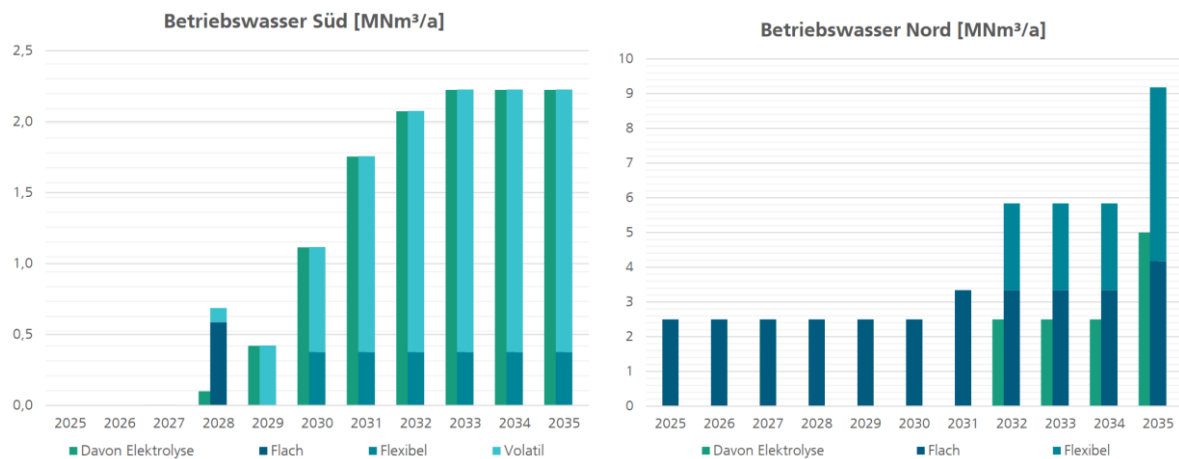


Abbildung 2 Brauchwasserbedarf (hier bezeichnet als Betriebswasser) der Standortcluster Wilhelmshaven Süd und Nord (Quelle Fraunhofer IST, Stand Mai 2025)

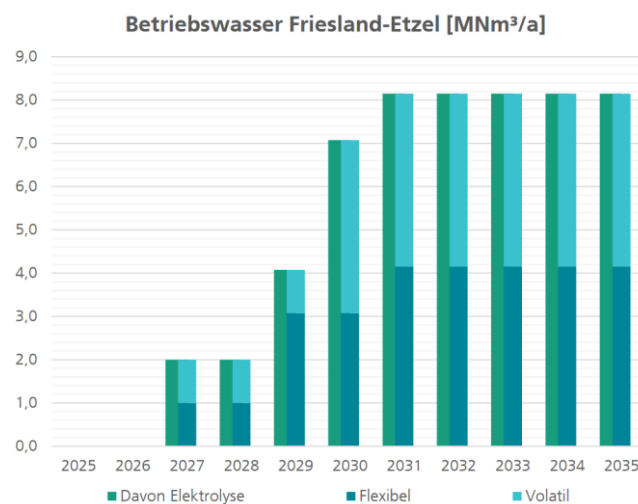


Abbildung 3 Brauchwasserbedarf (hier bezeichnet als Betriebswasser) des Standortclusters Friesland-Etzel (Quelle Fraunhofer IST, Stand Mai 2025)

Nach aktueller Datenerfassung durch das Fraunhofer IST ergibt sich ein Zielwasserbedarf von knapp 20 Mio. m³ pro Jahr in der finalen Ausbaustufe 2035 (ca. 11 Mio. m³/a in Wilhelmshaven und ca. 8 Mio. m³/a in Friesland-Etzel). Davon werden etwa 60 % in Reinstwasserqualität (Leitfähigkeit < 20 µS/cm)

für die Elektrolyse benötigt. Die tatsächlichen Wasserbedarfe sind abhängig von den noch nicht festgelegten Betriebsszenarien der Produktion. Daher sind bisher nur mögliche Szenarien in den Daten abgebildet. Die restlichen Bedarfe beziehen sich auf eine trinkwasserähnliche Qualität (Leitfähigkeit 200-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sowie Brauchwasserqualität (Leitfähigkeit $> 1.500 \mu\text{S}/\text{cm}$), welche meist zur Kühlung auf niedrigerem Temperaturniveau eingesetzt wird. Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, ist der tatsächliche Wasserbedarf aufgrund von Verlusten bei den Aufbereitungsprozessen, in Abhängigkeit von der Wasserressource und der erforderlichen Qualität, deutlich höher als der Wasserbedarf in der Zielwasserqualität.

2.2 Wasserqualität

Im Rahmen dieser Studie wurde die Produktion von Reinstwasser für die Elektrolyse sowie Kühlwasser für die Kühlung betrachtet. Die Qualitätsanforderungen an die beiden Wässer variieren teilweise stark zwischen den Projekten. Daher wurde basierend auf Angaben mehrerer Projekte ein Zielbereich für die Produktwasserqualität festgelegt (Tabelle 1). Für die Reinstwasserqualität gibt es die Leitlinie ASTM D1193-06 oder das Merkblatt VGB - M407, welche Zielwerte für unterschiedliche Parameter angeben.

Tabelle 1: Beispielhafte Qualitätsanforderungen für Kühl- und Reinstwasser

		Kühlwasser		Reinstwasser
		Min	Max	Max
Chlorid	mg/l		<300	<0,01
Elektrische Leitfähigkeit bei 25°C	$\mu\text{S}/\text{cm}$		<1.000	$\leq 0,08$
Freie Kohlensäure	mg/l		CO ₂ -frei	entgast, CO ₂ -frei
Natrium	mg/l			$\leq 0,005$
Silikat	mg/l		<0,15	$\leq 0,010$
Temperatur	°C	9	15	
Gesamthärte	mmol/l		3,2	
Sauerstoff	mg/l		<15	entgast
TOC	mg/l			<0,2
DOC	mg/l			<0,2
KBE	cfu/ml		<10.000	<0,1
Alkalinität als CaCO ₃	ppm	>75	<400	
Karbonathärte	mmol/l	>0,5	<5	

3 Identifikation und Bewertung der verfügbaren Wasserressourcen

3.1 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

3.1.1 Räumliche Lage

Das vorliegende Untersuchungsgebiet umfasst die Ostfriesische Halbinsel im Nordwesten von Niedersachsen. Das Untersuchungsgebiet ist im Norden und Osten durch die Nordsee bzw. die Jade begrenzt. Im Großraum variieren die Geländehöhen von unter -2 m Normalhöhenull (NHN) im Marschgebiet bis über 14 m NHN im südöstlichen Geestbereich. Der ostfriesisch-oldenburgische Geestrücken verläuft in südöstlich-nordwestlicher Richtung durch das Untersuchungsgebiet und flacht dabei sukzessive ab. Die zur Nordsee hin gelegene Marsch wird über ein weitverzweigtes Netzwerk von Oberflächengewässern und Kanälen entwässert, um eine Landnutzung zu ermöglichen.

Das untersuchte Kerngebiet mit den Produktionsstandorten befindet sich im Landkreis Friesland und in der Stadt Wilhelmshaven, welche eine Gesamtfläche von etwa 716 km² abdecken. Für die Überblicksbetrachtung werden auch Gebiete außerhalb des Kerngebietes, im westlich anschließenden Landkreis Wittmund, mitbetrachtet.

Die Standorte WHV Nord und WHV Süd (Abbildung 4) liegen im stadtnahen Industriegebiet direkt an der Innenjade und haben somit direkten Zugang zur Nordsee. Weiterhin liegen sie in unmittelbarer Nähe des Jade-Weser-Ports, dem einzigen Tiefwasserhafen Deutschlands. Der dritte Standort Sande liegt südwestlich des Stadtgebiets von Wilhelmshaven in direkter Nähe der namensgebenden Gemeinde.



Abbildung 4 Lage der betrachteten Wasserstoffproduktionsstandorte (Grundkarte: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie WMS-Dienst 2024)

3.1.2 Geologie / Hydrogeologie

Die wichtigsten geologischen Einheiten bestehen aus quartären Sanden, glazialen Ablagerungen aus dem Pleistozän (Kies und Sand) und ehemaligen Gezeitengebieten (Sand und Schlamm). Dabei kann in die Bereiche Geest und Marsch unterteilt werden. Die Geestbereiche bestehen im Wesentlichen aus eiszeitlichen Ablagerungen. In diesen Bereichen finden sich vorwiegend Sande, die durch Schmelzwasser nach der letzten Vereisung transportiert wurden, und Geschiebelehm. Nach Norden hin tauchen die Sedimente ab und werden überlagert von Wechsellagen bestehend aus Torf und Ton bzw. Schluff. Diese sind im Zuge des Meeresspiegelanstiegs der letzten 10.000 Jahre entstanden. Teile der Marsch waren früher Salzwiesen oder Wattbereiche, die vor etwa 900 Jahren durch Deichbau zurückgewonnen worden. Die Sedimente in diesem Gebiet können eine Mächtigkeit von zehn bis zu Hunderten von Metern erreichen und stellen die Hauptgrundwasserleiter dar, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden.

Das Grundwasser in den oberen Grundwasserleitern ist weitgehend ungespannt. Der Grundwasserspiegel wird stark durch die Entwässerungstätigkeit in der Region geprägt. Aufgrund der niedrigen Flurabstände waren Moore und Feuchtgebiete im Allgemeinen ein wichtiger Teil der Landschaft, bevor Landnutzungsänderungen zu einem starken Flächenrückgang dieser Gebiete geführt haben.

Die hydrochemische Zusammensetzung der Grundwässer folgt grundsätzlich den geologischen Einheiten. In den organik-reichen Ablagerungen der Marschen finden sich oft stark reduzierende Bedingungen. Hier sind gelöstes Eisen und Mangan sowie Methan weit verbreitet (Schlömers et al., 2018). In vielen dieser Grundwasserleiter ist Pyrit vorhanden (Houben et al., 2017). In der Geestregion weisen weniger als 10 % der Grundwasserleiter einen ähnlich hohen Methangehalt auf. Hier herrschen überwiegend oxische Redoxbedingungen. Viele der Grundwässer weisen einen pH-Wert von etwa 5,5 bis 7,5 auf. Grundwasser unterhalb von Mooren kann sogar einen pH-Wert < 5,5 aufweisen. Aufgrund der Nähe zur Küste kann der Salzgehalt in den oberflächennahen Grundwasserleitern lokal erhöht sein.

3.1.3 Landnutzung

Die primäre Landnutzung (siehe Anhang 10.1-1) ist außerhalb der Stadt- und Siedlungsbereiche größtenteils durch landwirtschaftliche Bewirtschaftung und im Bereich des Voslapper Grodens durch naturschutzrechtlich geschützte Bereiche geprägt. Südlich des Standortes Sande befindet sich ein größeres von Ackerland geprägtes Gebiet. Das Stadtgebiet von WHV ist meeresseitig von Industriestandorten eingerahmt. Der geplante Standort WHV Süd ist zwischen zwei Steinkohlekraftwerken gelegen. Von diesen befindet sich eines (Fa. Onyx Power GmbH) aktuell im Betrieb und das andere (Fa. Uniper SE) wurde Ende 2021 stillgelegt. Der Standort WHV Nord ist zwischen einer Chemiefabrik und einer Ölraffinerie geplant. Weiterhin befindet sich hier direkt vor der Küste das LNG-Terminal Wilhelmshaven, welches Ende 2022 in Betrieb genommen wurde.

3.2 Rechtliche Grundlagen (Einleit- / Entnahmegenehmigung als Überblick)

Im Rahmen der wasserrechtlichen Genehmigungen (Entnahme und Einleitung) sind umweltrechtliche Vorgaben zu erfüllen und erforderliche Fachbeiträge sowie die dazugehörigen Gutachten zu erbringen. Für einige dieser Gutachten sind ausreichend Zeiträume für die Erhebung von Daten einzuplanen. In der Regel sind Gutachten und Fachbeiträge zu Themen wie Naturschutz oder Umweltverträglichkeit zu erstellen.

Grundsätzlich sind die Art und der Umfang der erforderlichen Gutachten und Fachbeiträge in Abstimmung mit den Zulassungs- und beteiligten Fachbehörde in Abhängigkeit von den umwelt- und gewässerbezogenen Anforderungen zu erstellen. Exemplarisch können folgende Untersuchungen angeführt werden:

- eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung nach UVPG²
- ein Fachbeitrag zur Eingriffsregelung nach § 14 BNatSchG
- ein Fachbeitrag zum Artenschutz nach § 44 BNatSchG
- eine FFH-Verträglichkeitsuntersuchung nach Art. 6 Abs. 3 der FFH-Richtlinie bzw. § 34 BNatSchG
- ein Fachbeitrag zur Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) bzw. zu Auswirkungen auf die Bewirtschaftungsziele nach § 44 i.V.m § 27- 31 WHG.

Eine erste Übersicht ergab für die geplante Entnahme mit Blick auf die angedachten Ressourcen folgende genehmigungsrechtliche Situation:

Für die Ermittlung der Zuständigkeiten gilt grundsätzlich die Verordnung über Zuständigkeiten auf dem Gebiet des Wasserrechts (ZustVO-Wasser). Es ist aber empfehlenswert frühzeitig Kontakt mit den voraussichtlichen Zulassungsbehörden und Fachbehörden aufzunehmen.

Für bestimmte Nutzungen von Meerwasser (außerhalb des Nationalparks) wird keine wasserrechtliche Erlaubnis benötigt. Gemäß § 9, Abs. 1, Nr. 1 WHG ist die Entnahme aus oberirdischen Gewässern eine Benutzung im Sinne des Gesetzes, welche eine wasserrechtliche Erlaubnis erfordert. Die Entnahme von Meerwasser aus Küstengewässern ist hingegen nicht als Benutzung im Sinne des Gesetzes aufgeführt. Je nach Entnahmemenge besteht jedoch eine Pflicht zur Umweltverträglichkeitsprüfung oder Vorprüfung. Zudem sind Entnahmebauwerke genehmigungspflichtig.

Für die Nutzung von geklärtem Abwasser ist keine wasserrechtliche Erlaubnis zu beantragen. Bei der Aufbereitung anfallende Abwässer, Spülwässer und Konzentrate sind jedoch zu berücksichtigen, da sie einer Einleitgenehmigung bedürfen.

3.3 Prüfung der Ressourcen – generelle Vorgehensweise

In der vorliegenden Untersuchung wird geprüft, inwiefern die im Umfeld der geplanten Wasserstoffparks gelegenen Wasserressourcen für eine Nutzung zur Brauchwassergewinnung geeignet sind. Die Untersuchung der Wasserressourcen erfolgt auf Basis von öffentlich zugänglichen Bestandsdaten und den im Zuge des Projektes erhobenen Daten. Die Datengrundlage ist je nach Ressource sehr unterschiedlich. Daher ist die für die Analyse der Wasserressourcen genutzte Datengrundlage darzulegen und hinsichtlich der Eignung für eine Bewertung zu prüfen. Die Eignung bezieht sich darauf, ob diese Daten für diesen spezifischen Zweck geeignet, also ausreichend genau, vollständig, aktuell und zuverlässig sind. So sind Daten mit unterschiedlichem räumlichem und zeitlichem Bezug zu berücksichtigen.

² Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 1 des Gesetzes vom 25. November 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 282) geändert worden ist

Ziel dieser Vorgehensweise ist ein effizienter und transparenter Prüfprozess für die Eignung von Wasserressourcen für die Brauchwassergewinnung. In diesem Zusammenhang werden Eignungskriterien definiert, welche im Folgenden beschrieben werden.

Der Bericht umfasst weder eine Risikoanalyse zur Durchführbarkeit noch kann eine abschließende Aussage getroffen werden, ob eine wasserrechtliche Nutzung bzw. unter welchen Bedingungen eine Nutzung der Wasserressourcen möglich ist. Eine weiterführende Absprache mit den behördlichen Entscheidern und Akteuren ist hierfür zwingend notwendig.

3.3.1 Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot

Das Wasserdargebot und der davon nutzbare Anteil der potenziellen Ressourcen sind die entscheidenden Kriterien in der Beurteilung ihrer Eignung für die Wasserstoffproduktion und immer in Relation zum anfallenden Bedarf zu setzen. Das nutzbare Wasserdargebot bezieht sich auf die Menge an Wasser, die nachhaltig aus einer Ressource entnommen werden kann, ohne die Ressource selbst oder die Umwelt zu schädigen oder eine Einschränkung anderer Nutzer herbeizuführen. Dabei sind Faktoren wie mögliche Folgen des Klimawandels zu berücksichtigen.

3.3.2 Wasserqualität

Die Betrachtung der Wasserqualität stellt im Rahmen der Wasserbereitstellung für Wasserstoff einen Faktor dar, der sich in erster Linie auf den Aufwand für die anzuwendende Aufbereitung hin zur „Zielwasserqualität“ bezieht. Für die „Zielwasserqualität“ werden im Rahmen dieser Studie die Qualitätsanforderungen in Tabelle 1 zugrunde gelegt.

So umfasst die Aufbereitung von (süßem) Grundwasser hoher Qualität deutlich weniger technische Arbeitsschritte und verursacht damit relativ geringere Kosten als die Aufbereitung von Meerwasser mit einem hohen Salzgehalt. Zusätzlich sind anfallende Abwässer zu berücksichtigen, die bei der Aufbereitung entstehen. Entsorgungskonzepte sollten Teil dieser Überlegung sein. So können bei der Einleitung u.a. von Spülwässern oder Konzentraten mögliche Raumwiderstände durch die Nutzungsanforderung anderer Akteure und den Naturschutz (siehe auch WRRL) eine wichtige Rolle spielen.

Als verfahrenstechnisch relevante Parameter wurden neben der Leitfähigkeit, dem pH-Wert und beispielsweise dem gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) eine Vielzahl weiterer einzelner Stoffe sowie Summenparameter als notwendig erachtet. Aufgrund der besonderen Lage des Untersuchungsgebietes in Küstennähe sollte zudem ein Fokus auf dem Salzgehalt bzw. der Mineralisierung der zu betrachtenden Wässer liegen. Hinzu kamen als weitere, wesentliche Komponenten z. B. eher partikuläre Komponenten, wie abfiltrierbare und absetzbare Stoffe. Saisonale Schwankungen in der Wasserzusammensetzung können sich zudem negativ auf die Effizienz der Aufbereitung auswirken und stellten daher ein weiteres zentrales Kriterium in der Analyse dar.

3.3.3 Lage / Umfeld

Die Verortung und das Umfeld der Wasserressourcen sowie die sich ggf. daraus ergebende Distanz zum Nutzungsort kann sich entscheidend auf den Aufwand für eine Erschließung der Wasserressource und die dafür notwendigen technischen Rahmenbedingungen auswirken. Hierbei ist ggf. die Festlegung eines potentiellen Entnahmepunktes entscheidend. Für einige Ressourcen sind technische Rahmenbedingungen zu schaffen, welche z. B. aufgrund einer begrenzten zeitlichen Verfügbarkeit eine

Speicherung von Wasser ermöglichen. Beim Niederschlag ist eine flächenhafte Fassung zu berücksichtigen.

Insofern gibt dieses Prüfkriterium zudem Hinweise auf mögliche unmittelbare Auswirkungen der für die Erschließung der Ressource ggf. notwendigen baulichen Maßnahmen wie Trassenbau etc., da in einer vereinfachten Annahme davon ausgegangen wird, dass sich mit einer größeren zu überbrückenden Distanz auch die Anzahl der Raumwiderstände erhöhen kann.

3.3.4 Weitere Nutzer

Durch die Berücksichtigung weiterer Nutzer können bereits frühzeitig potenziell entstehende Nutzungskonflikte vermieden werden. So müssen die Anforderungen verschiedener Nutzergruppen mit umweltrelevanten (wasserwirtschaftlichen) Zielen in Einklang gebracht werden. Die Erstellung von Plänen, die die spezifischen Bedürfnisse und Herausforderungen jeder Region berücksichtigen, ist hierbei entscheidend.

3.4 Niederschlagswasser

Eignung der Datengrundlage: Für eine Ersteinschätzung werden Informationen des Climate Service Center Germany, kurz GERICS, zur Jahresniederschlagssumme und möglichen Veränderungen im Rahmen des Klimawandels auf Landkreisebene (Pfeifer et al. 2021) herangezogen. In den Berichten werden Klimakenngrößen wie z. B. Temperatur, Hitzetage, Trockentage oder Starkregentage auf Basis der Landkreise zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen zudem die projizierten Entwicklungen der Klimakenngrößen im Verlauf des 21. Jahrhunderts für unterschiedliche Klimaschutz-Szenarien. Die Berichte sind für alle Landkreise einheitlich aufgebaut und erlauben den regionalen Vergleich untereinander und mit den Ergebnissen für das ganze Bundesland.

Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot: Die Jahresniederschlagsmenge betrug im 30-jährigen Mittel (1971-2000) im Landkreis Friesland und der Stadt Wilhelmshaven 805 mm/a. Generell zeichnet sich ein leichter Trend zu zunehmenden Jahresniederschlagssummen ab. Im Rahmen der natürlichen Schwankungen ändern sich die Niederschlagsmengen im Betrachtungszeitraum von Jahr zu Jahr zwischen ca. 504 mm/a (1959) und bis zu 1.168 mm/a (1998). Der Niederschlag zeigt zwar keine ausgeprägte Saisonalität, unter Berücksichtigung von Verdunstungseffekten kommt es jedoch zu einer saisonal unterschiedlichen Verfügbarkeit. Es zeigt sich zudem eine große Schwankung des Niederschlags zwischen den Jahren. Die Anzahl der Trockentage beläuft sich derzeit auf 222,9 Tage pro Jahr mit gleichbleibender Verteilung in den Prognoseszenarien.

Lage und Umfeld: Für eine Nutzung von Niederschlagswasser sind neben den verfügbaren Niederschlagsmengen auch technische Faktoren zu betrachten. So muss das Niederschlagswasser auf entsprechend großen Flächen gefasst werden und steht somit nicht der Grundwasserneubildung zur Verfügung. Aufgrund der saisonal unterschiedlichen Verfügbarkeit ist zudem eine Speicherung notwendig, um Zeiten mit weniger oder keinem Niederschlag überbrücken zu können.

Wasserqualität: Beim Niederschlag wird von einem gering mineralisierten Wasser ausgegangen. Eine mögliche Beeinflussung der Wasserqualität kann durch eine Speicherung erfolgen und muss berücksichtigt werden.

Fazit: Aufgrund des hohen Flächenbedarfs für die Fassung von Niederschlagswasser und der jährlich großen Schwankungsbreite ist die Wasserressource Niederschlag als Primärwasserquelle für die

Elektrolyse nicht nutzbar. Aus diesem Grund wird Niederschlag als primäre Wasserressource ausgeschlossen. Eine Detailuntersuchung erfolgt nicht.

3.5 Grundwasser

Eignung der Datengrundlage: Das Land Niedersachsen setzt mit dem Erlass zur „mengenmäßigen Bewirtschaftung des Grundwassers“³ einen rechtlichen Bewirtschaftungsrahmen der Grundwasserressourcen fest. Hierin werden entsprechend der EU-Wasserrahmenrichtlinie Grundwasserkörper als Bewirtschaftungseinheiten abgegrenzt, die administrativ weiter in Grundwasserteilkörper aufgeteilt werden. Für jeden Grundwasserteilkörper werden durch das Land Niedersachsen die maßgeblich nutzbaren Grundwasserdargebotsreserven festgesetzt, die noch über das Volumen der bereits genehmigten Grundwasserentnahmen hinaus im Einklang mit den Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie genutzt werden können (letzter Stand vom 14.05.2024). Das Ziel des Bewirtschaftungsrahmens ist damit, einer Gefährdung des mengenmäßigen guten Zustandes durch einzelne Nutzungen oder die Summe von Nutzungen vorzubeugen.

Zusätzlich wurden Informationen zur Grundwasserneubildung und Grundwasserversalzung aus den öffentlich zugänglichen Kartenwerken des NLWKN⁴ sowie Informationen zu Wasserentnahmen Dritter aus dem Niedersächsischen Wasserbuch herangezogen⁵. Die Datengrundlage wird im Rahmen der Ersteinschätzung als hinreichend angesehen.

Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot: Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Bereich des Grundwasserkörpers „Jade Lockergestein links“ (GWK 32, siehe Anhang 10.1-2). Der GWK 32 erstreckt sich von der Ostfriesischen Küste (Wangerland) bis kurz vor Oldenburg auf einer Fläche von 1.050 km². Im aktuellen Mengenbewirtschaftungserlass des Landes Niedersachsen wird für die Gesamtfläche des GWK 32 ein nutzbares Dargebot von 5,5 Mio. m³ pro Jahr ausgewiesen, welches die rechtliche Obergrenze der Nutzung darstellt. Der GWK 32 ist weiter in sechs Teilkörper untergliedert. Es ist zu beachten, dass die nutzbaren Dargebotsreserven nicht gleichmäßig auf die Teilkörper verteilt sind. Für den hier betrachteten Grundwasserteilkörper ID 65 des „Jade Lockergestein links“ im Landkreis Friesland entfällt eine Dargebotsreserve von 2,0 Mio. m³ pro Jahr.

In Anhang 10.1-3 ist die Grundwasserneubildung auf der Ostfriesischen Halbinsel in Jahreswerten für die Jahre von 1991 – 2020 wiedergegeben. Die Grundwasserneubildung wird in Niedersachsen basierend auf dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA berechnet, dessen neueste Version als mGROWA22 für die Bestimmung des nutzbaren Grundwasserdargebotes genutzt wurde⁶. Hieraus wird deutlich, dass die Neubildungsrate für den größten Teil der Region Friesland und Wilhelmshaven gering bis zehrend ist.

Wasserqualität: Im küstennahen Marschgebiet treten weithin geogen bedingte Grundwasserversalzungen auf. Die Abbildung im Anhang 10.1-3 zeigt den Verlauf der Salz-Süßwassergrenze des Grundwasserkörpers „Jade Locker-gestein links“.

³ Mengenmäßige Bewirtschaftung des Grundwassers -Niedersachsen- vom 23. April 2024 (Nds. MBl. Nr. 223 vom 14.05.2024)

⁴ NBIS Kartenserver (Stand Juli 2025): <https://www.lbeg.niedersachsen.de/kartenserver/nibis-kartenserver-72321.html>

⁵Wasserbuch Niedersachsen (Stand Juli 2025):

https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/service/daten_karten/wasserbuch/wasserbuch-niedersachsen-45652.html

⁶ Siehe Beschreibung MBE Methodik, Stand: 26. März 2024; zu beachten: Kritik an der Methodik durch WVT und OOWV

Weitere Nutzer: Die öffentliche Wasserversorgung wird hauptsächlich durch die Gewinnung von süßem Grundwasser abgedeckt. In der Region Friesland und Wilhelmshaven wird an verschiedenen Stellen Grundwasser entnommen und für die öffentliche Wasserversorgung herangezogen.

Lage und Umfeld: In Küstennähe besteht die Möglichkeit der Förderung von infiltriertem Meerwasser, was eine besondere Form der Wassergewinnung darstellt. Eine Förderung von versalztem bzw. brackigem Grundwasser als Uferfiltrat hätte gegenüber der direkten Meerwasserentnahme den Vorteil, dass der Untergrund eine Filterfunktion ausübt und weite Anteile der vorhandenen Meerestiere und -pflanzen herausfiltert. Demgegenüber stehen jedoch fehlende Erkenntnisse zu den Auswirkungen einer solchen Förderung. Dazu zählen u. a. eine landseitige Grundwasserabsenkung und deren Auswirkung auf die Oberflächengewässer sowie die mögliche Versalzung oberflächennaher Bodenstrukturen (Upconing). Aber auch mögliche Auswirkungen auf Deichbauwerke sind zu betrachten. Für die Nutzung der Ressource Grundwasser (versalzt bzw. brackig) sind dementsprechend weitreichende Untersuchungen notwendig, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht geleistet werden können.

Fazit: Eine Erschließung von Grundwasser wird im Untersuchungsraum aufgrund des geringen nutzbaren Wasserdargebots ausgeschlossen. Auch die Nutzung von versalztem Grundwasser wird aufgrund der noch nicht absehbaren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt aktuell nicht weiter betrachtet.

3.6 Oberflächengewässer

Der Untersuchungsraum weist ein enges Gewässernetz, bestehend aus Flüssen, Kanälen, Sielen und Gräben auf. Viele der Gewässer sind zum Zwecke der Entwässerung künstlich angelegt oder in ihren Eigenschaften erheblich verändert worden. Zu unterscheiden sind insbesondere folgende Arten von Oberflächen(-fließ)gewässern:

- Flüsse: Zu nennen sind v. a. größere Flussläufe. Im Binnenland sind überdies weitere kleinere Flussläufe mit einer überwiegend erheblich veränderter Gewässergeometrie, ausgerichtet an Nutzungsansprüchen, vorhanden.
- Kanäle: Zu nennen ist der Ems-Jade-Kanal, der im Wesentlichen zum Zwecke der Schifffahrt und der Entwässerung angelegt wurde.
- Gräben: Vor allem in den Marschgebieten des Untersuchungsraums ist ein dichtes Netz von Gräben vorhanden. Diese dienen im Wesentlichen der Entwässerung landwirtschaftlicher Flächen.

Die vorgenannten Oberflächengewässer haben insbesondere eine Bedeutung für die Entwässerung, den Hochwasserschutz, die Schifffahrt und die Landwirtschaft, ebenso aber auch für den Tourismus und die Naherholung sowie für den Natur- und Gewässerschutz. In der Projektregion besteht die Besonderheit, dass das binnenseitig gefasste Wasser über Auslaufbauwerke (Siele) in die Küstengewässer abgeführt wird. Einige Sielbauwerke sind zudem mit Schöpfwerken ausgestattet, die eine tideunabhängige Entwässerung gewährleisten.

Für die Entwässerung in den niedrig liegenden Küstengebieten sind die Entwässerungsverbände oder Sielachten zuständig – übergeordnet auch als Unterhaltungsverbände (UHV) bezeichnet. Im Untersuchungsraum befinden sich zahlreiche Unterhaltungsverbände mit unterschiedlichen Einzugsgebieten (Anhang 10.1-4), die für die Entwässerung sowohl der Geest- als auch der Marschgebiete verantwortlich sind. Die Entwässerungssystematik und die erforderliche

Infrastruktur wurde auf diese Einzugsgebiete, die spezifischen hydrologischen Gegebenheiten sowie auf die Nutzungsansprüche ausgerichtet. So ist ein aufeinander abgestimmtes Entwässerungssystem mit künstlich definierten Einzugsgebieten, Vorflutern und Auslassbauwerken entstanden.

Grundlage für die Bewirtschaftung der Gewässer (Nutzung und Schutz) sind die Bewirtschaftungsziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG) bzw. die ins nationale Recht umgesetzten Bewirtschaftungsziele nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sowie die Regelungen der Oberflächengewässerverordnung (OGewV). Hydrographisch ist der Untersuchungsraum der Flussgebietseinheit Weser und dem Bearbeitungsgebiet Tideweser zuzuordnen (FGG Weser 2021). In der Abbildung 9 ist das Gewässernetz mit den Oberflächenwasserkörpern gemäß § 3 Nr. 6 WHG, die eine Einzugsgebietsgröße von mehr als 10 km² aufweisen, dargestellt. Diese werden in den küstennahen Marschgebieten dem Typ „Gewässer der Marschen“ und im westlichen Geestbereich den Typen „Sand- bzw. kiesgeprägte Tieflandbäche“ oder „organisch geprägte Bäche“ zugeordnet. Gekennzeichnet sind im Anhang 10.1-5 außerdem noch bedeutende Auslassbauwerke entlang der Küstenlinie an der Jade.

Ergänzung Uferfiltrat: Bei der Gewinnung von Uferfiltrat handelt es sich um ein Verfahren, bei dem Wasser aus Oberflächengewässern indirekt gewonnen wird. Durch die Förderung von Grundwasser aus einem Brunnen oder Brunnengalerie in einer bestimmten Entfernung zum Gewässerufer, wird ein hydraulisches Gefälle erzeugt, durch das Wasser vom Fluss zum Brunnen strömt. Voraussetzung hierfür ist eine hydraulische Anbindung des Gewässers an den Grundwasserleiter, in dem der Brunnen verfiltriert ist. Die in Ufernähe errichteten Brunnen fördern dann eine Mischung aus Uferfiltrat und einem (möglichst kleinen) Teil natürlichen Grundwassers, das landseitig zuströmt.

Die Gewinnung von Uferfiltrat bietet im Gegensatz zur direkten Gewinnung von Oberflächenwasser mehrere Vorteile. So erfolgt entlang der Uferfiltratpassage durch das Flusssediment und den Grundwasserraum eine Filtration des Oberflächenwassers, bei der v. a. Schwebstoffe zurückgehalten werden.

Es erfolgte keine weiterführende Betrachtung zur möglichen Nutzung von Uferfiltrat. So liegt einerseits keine ausreichende Datenbasis zu den Oberflächengewässern (insbesondere Wasserdargebot) und deren Interaktion mit dem Grundwasserleiter vor. Andererseits ist davon auszugehen, dass bei der Uferfiltration in geringem Umfang auch Grundwasser erschlossen wird, was bereits im Kapitel 3.5 aufgrund des fehlenden Dargebots ausgeschlossen wird.

Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot: Für den Untersuchungsraum stehen nur wenige Daten zur wasserwirtschaftlichen Gesamtsituation zur Verfügung. Zudem unterliegt das Abflussgeschehen der Marschgewässer dem Einfluss von Wasserstandsregulierungen durch den Betrieb von Siel- und Schöpfwerken. So wurden kontinuierliche Durchflussmessungen an Auslassbauwerken (Siele und Schöpfwerke) erst in den letzten Jahren (wissenschaftlich begleitet) durchgeführt. In den vorherigen Jahren gab es verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Wasserhaushaltsbilanz im niedersächsischen Küstenraum. Jedoch ist daraus bisher keine kontinuierliche Datenreihe entstanden. Für eine fundierte Darlegung des Wasserdargebots in den Oberflächengewässern im Untersuchungsraum ist die Datenbasis nicht ausreichend.

Die Verfügbarkeit von Wasser soll am Beispiel von Daten aus den Forschungsprojekten KLEVER und KLEVER Risk für den westlichen Teil der Ostfriesischen Halbinsel dargelegt werden. Im Rahmen der

beiden Forschungsprojekte sind Wasserbilanzrechnungen für Bereiche im Umfeld des Untersuchungsraums durchgeführt worden. In der Abbildung 5 ist die Abflussbildung für Emden dargestellt. Es zeigt sich hierbei eine deutliche Saisonalität der Abflussbildung, mit sehr geringen Werten im Sommer. Damit einher geht, dass die Verfügbarkeit des Niederschlagswassers im Sommer geringer als im Winter sein wird.

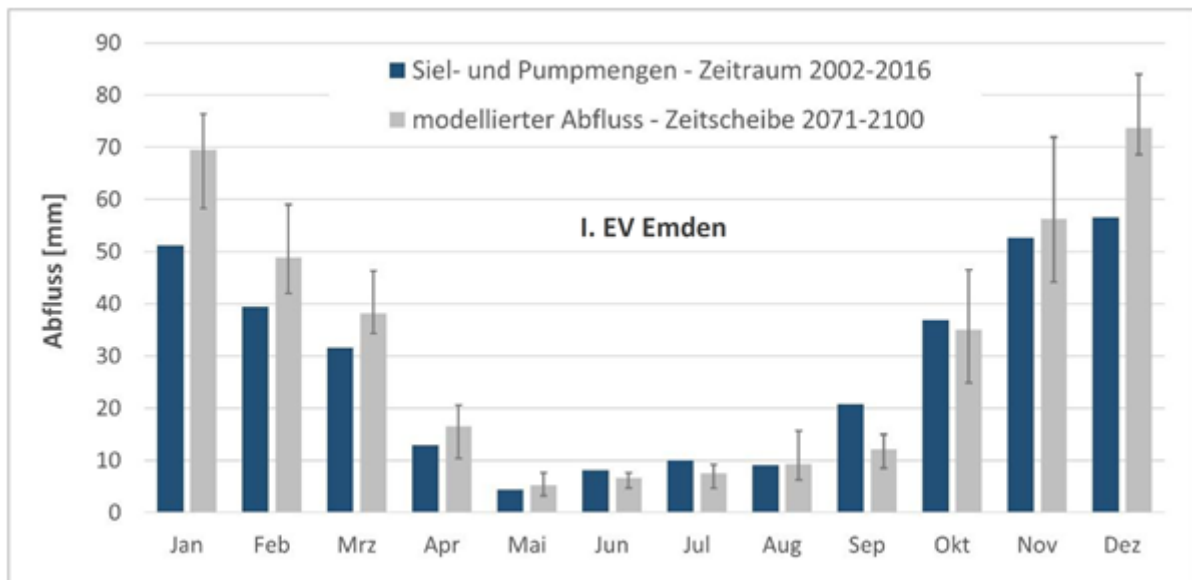


Abbildung 5 Modellbasierte Abschätzung der Veränderung der mittleren monatlichen Abflussbildung im Verbandsgebiet Emden für die Zeitscheibe 2017 – 2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum 2002 – 2016. (Quelle: KLEVER Risk (2023), S. 15)

Für eine Einschätzung, ob die Wasserressource Oberflächengewässer genutzt werden kann, ist zu beachten, dass das Gewässersystem der Marschen künstlich gesteuert wird. Gibt es einen mehr oder weniger freien Abfluss aus den nahe gelegenen Geestgebieten, so werden die Marschgewässer ausschließlich durch die entsprechenden Pump-, Schöpfwerke oder Siele gesteuert. Das bedeutet, dass ein Fließen in den Marschgewässern nur stattfinden kann, wenn eine Pumpe aktiv oder ein Sieltor geöffnet ist. Daraus folgt, dass in den Marschgebieten das Oberflächenwasser über einen gewissen Zeitraum stillstehen kann. In diesen Zeiten ist eine Entnahme von Oberflächenwasser vermutlich nicht oder nur eingeschränkt möglich.

Zielsetzungen des Gewässer- und Naturschutzes können zudem zu einer Begrenzung des nutzbaren Anteils der Ressource Oberflächenwasser führen. Maßgebend für die tatsächlich nutzbare Menge ist u. a. eine gewässerschutzverträgliche Entnahme, die zu keiner deutlichen Veränderung des Abflussgeschehens führen sollte (vgl. § 33 WHG, betr. Mindestwasserführung). Auch die Entnahme selbst kann zu einer Beeinträchtigung von Arten und Lebensgemeinschaften führen und somit Zielen und Anforderungen des Gewässer- und Naturschutzes entgegenstehen. Zu beachten sind hierbei u. a. die Bewirtschaftungsziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG) bzw. die ins nationale Recht umgesetzten Bewirtschaftungsziele nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sowie Anforderungen und Ziele wasserabhängiger Schutzgebiete und sonstiger gewässerbezogener Schutzgegenstände (z. B. Vereinbarkeit mit den Zielsetzungen von Natura 2000-Gebieten).

Wasserqualität: Die Wasserzusammensetzung ist mit den Mittel- und Extremwerten über den Zeitraum von 2015 - 2023 im Anhang 10.1-6 für die Messstation Schöpfwerk Petershörn aufgelistet.

Für alle gemessenen Parameter zeigt sich eine große Variabilität. Insbesondere die elektrische Leitfähigkeit, welche als Indikator für einen Salzwassereintrag dient, weist eine große Spannweite zwischen 204 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und bis zu 17.660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf.

Weitere Nutzer: Grundsätzlich sind Nutzungsansprüche Dritter und umweltrechtliche Randbedingungen zu berücksichtigen. Insbesondere Zielsetzungen des Gewässer- und Naturschutzes können zu einer Begrenzung des nutzbaren Anteils der Ressource führen – wie bereits aufgezeigt wurde. Ergänzend sind außerdem die folgenden weiteren Aspekte zu nennen:

- **Moorschutz:** Es ist auf die strategischen Bestrebungen zur Renaturierung von Moorflächen hinzuweisen. Teilbereiche des Untersuchungsraums sind Bestandteil der Programmkulisse „Niedersächsische Moorlandschaften“ (NMU 2025a).
- **Landwirtschaftliche Bewässerung:** Bisher ist die Nutzung der Oberflächengewässer auf die zeitweilige Entnahme von Beregnungswasser für landwirtschaftliche Flächen begrenzt. Zumindest in der niedersächsischen Küstenregion ist der Bedarf an Beregnungswasser für die Landwirtschaft noch nicht so hoch wie in anderen niedersächsischen Regionen (z. B. Ostniedersachsen).
- **Wassermanagement:** Die Erkenntnis der saisonal sehr unterschiedlichen Verfügbarkeit der Niederschläge führt zu Überlegungen, dass Wasser vermehrt in der Landschaft zurückgehalten werden müsste. Dabei sind sowohl Trockenwetter- als auch Starkregenereignisse sowie die entsprechenden Umweltvorgaben für die Gewässer zu berücksichtigen.

Fazit: Im Ergebnis der vorliegenden Befassung ist festzustellen, dass die Datengrundlage für die Ermittlung des nutzbaren Anteils der Ressource Oberflächenwasser grundsätzlich nicht geeignet ist und Wassermengen allenfalls über theoretische Abschätzungen hergeleitet werden könnten. Unabhängig davon ist zu konstatieren, dass zwar langfristig große Wassermengen durch die Siele und Schöpfwerke in die Nordsee entwässert werden, es aber kurz- bis mittelfristige Zeiträume gibt, in denen kein nennenswerter Abfluss vorhanden ist. Des Weiteren können Ziele und Anforderungen des Natur- und Gewässerschutzes, Nutzungen Dritter oder zukünftig nicht absehbare Entwicklungen im Untersuchungsraum der Beanspruchung der Ressource entgegenstehen. Aufgrund der aktuell nicht ausreichenden Datenbasis und dem umfassenden Untersuchungsbedarf wird eine Nutzung von Oberflächengewässern zunächst nicht weiter betrachtet.

3.7 Künstliche Kanäle - Ems-Jade-Kanal

Der Ems-Jade-Kanal (EJK) wurde zwischen 1880 und 1886 gebaut und stellte die binnenseitige Verbindung zwischen den Häfen Emden und Wilhelmshaven dar. Betrieben und unterhalten wird der EJK vom NLWKN, Betriebsstelle Aurich.

Der EJK quert den ostfriesischen Geestrücken und überwindet dabei eine Geländehöhe von ca. 5,7 m NHN mittels sechs Staustufen. Der EJK ist durch einen Wasserscheitel auf Höhe Marcardsmoor (Wiesmoor) in Abschnitte mit einem nach Osten und Westen gerichteten Abfluss geteilt. Da der EJK durch die Freizeitschiffahrt genutzt wird, ist die Einhaltung von festgesetzten Wasserständen erforderlich. Dies bedingt die bedarfsweise Zuführung von Wasser über den Nordgeorgsfehnkanal (NGFK) und ist mit dem Rückgriff auf verfügbare Wassermengen aus dem Leda-Jümme-Gebiet (LJG) südlich von Leer verbunden. Der NGFK mündet bei Marcardsmoor in den EJK. Der Scheitelwasserpunkt

des NGFK befindet sich zwischen den Schleusen Wiesmoor und Neudorf, mit einem Abstrom nach Norden zum EJK und nach Süden in Richtung Jümme (siehe Abbildung 6).

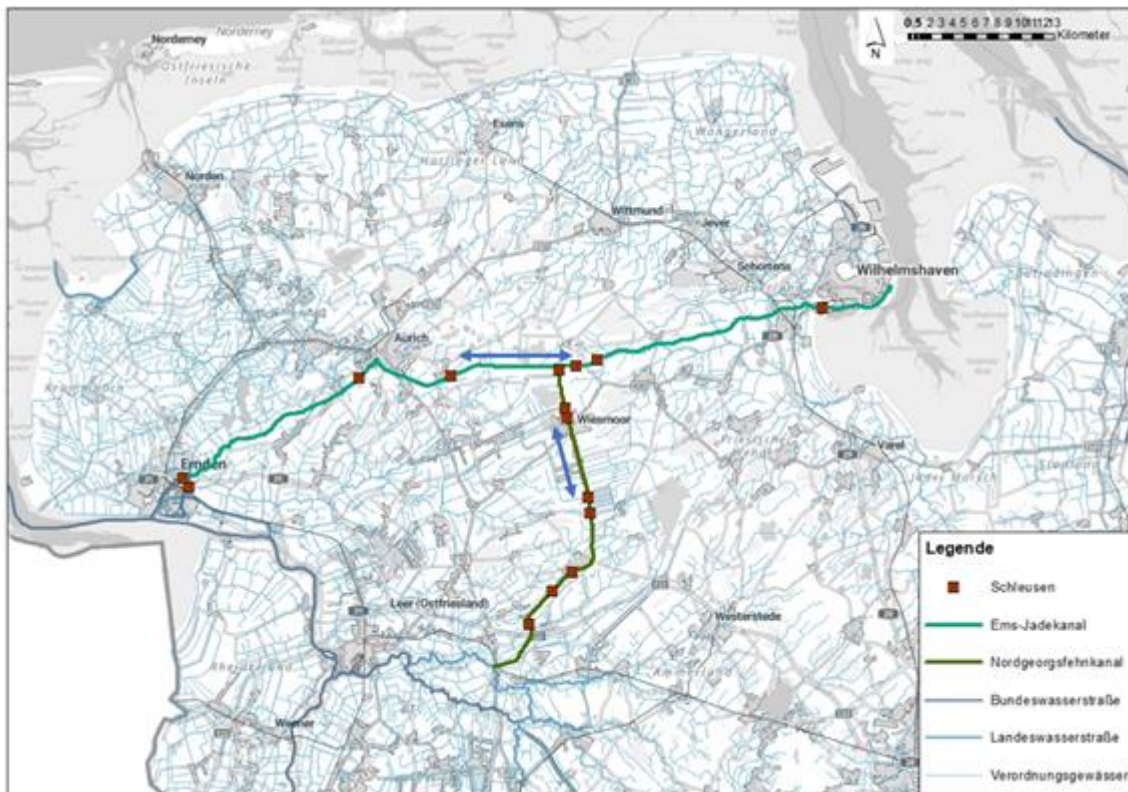


Abbildung 6 Verbindung des Ems-Jadekanals mit dem Nordgeorgsfehnlkanal und dem südlich gelegenen Leda-Jümme Gebiet (Quelle: Gewässer und Bauwerke an Gewässern LGLN Stand 2021). Die blauen Pfeile weisen auf den Scheitelbereich der Kanäle hin.

Lage und Umfeld: Der EJK verläuft nördlich von Sande und südlich von Wilhelmshaven in Ost-West-Richtung. Er weist keine direkte Verbindung zum umgebenden Oberflächengewässernetz auf. Es erfolgt jedoch eine Entwässerung von Teilflächen im Umfeld des Kanals z. B. durch den Entwässerungsverband Aurich und die Einleitung von gereinigtem Abwasser. Daraus ergibt sich ein komplexes Wassermanagement, welches derzeit auf die Funktionen des EJK und des angeschlossenen NGFK als Schifffahrtskanal und Entwässerungssystem ausgerichtet ist.

Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot: Das Dargebot im EJK hängt von den im Rahmen des Wassermanagements gelenkten Zuflüssen ab. Zur Ermittlung des Wasserdargebots und der Verfügbarkeit werden im Folgenden die Zuströme betrachtet:

Für die überschlägige Abschätzung des Zustroms von Wasser aus dem Einzugsgebiet des EJK werden nur das Teileinzugsgebiet zwischen Weisens und Barkenbuschschloot sowie zwei Teileinzugsgebiete des NGFKs von Wiesmoor bis zum EJK entsprechend NMU (2025) mit einer Gesamtfläche von 60,25 km² betrachtet. Es sind insbesondere folgende Fließgewässer zu nennen, die in diesem Bereich in den EJK und den NGFK überführt werden: Ringschloot Marcardsmoor, Wiesedermeerschloot, Meerschloot, Blockhausgraben, Ossensetgraben, Barkenbuschschloot, Herrenmoorgraben, Voßschloot (NGFK), Zugschloot Marcardsmoor (NGFK) und Großfehn Anschlusskanal (NGFK).

Für eine Abschätzung des Zustroms aus den Einzugsgebieten sind Informationen zur Gebietsabflussspende notwendig. Die Niederschlagshöhe kann jedoch von Jahr zu Jahr sehr stark schwanken (vgl. Kapitel 3.4) und unterliegt einem saisonal stark variablen Abflussgeschehen. So ist davon auszugehen, dass v. a. in den Sommermonaten (Mai-Oktober) die Verfügbarkeit des Wasserdargebots stark eingeschränkt ist. Durch den Betrieb der Schleusen des EJKs wird zudem das Abflussgeschehen künstlich gesteuert. Dadurch kann es unter den aktuellen Bedingungen zum Beispiel zu teils länger andauernden Zeitphasen ohne nennenswerten Abfluss kommen.

Im Einzugsgebiet des EJK und dem NGFK liegen mehrere kommunale Kläranlagen. Die Einleitung der Kläranlage Wiesmoor mit einem Abwasserstrom von 488.000 m³/a erfolgt in den NGFK, in Abstromrichtung zum EJK (Wasserbuch Niedersachsen, Stand März 2025). Die übrigen Kläranlagen weisen nur einen geringen Beitrag, mit Einleitmengen unter 10.000 m³/a, laut Wasserbuch Niedersachsen auf. Die tatsächlichen Einleitmengen sind zu prüfen und können von dem hier verwendeten Wert abweichen. Informationen über mögliche Zuleitungen von privaten Kleinkläranlagen sind nicht bekannt und können im Folgenden nicht berücksichtigt werden.

Durch die Rückführung von Wasser aus dem LJG über den NGFK steht zudem indirekt ein weiteres Wasserdargebot zur Verfügung. Der maximal mögliche Zustrom aus Süden wird einerseits durch die Pumpenkapazität im NGFK limitiert. Andererseits erfordert die unmittelbare Verbindung des EJK über den NGFK zum Leda-Jümme-Gebiet die Betrachtung der Auswirkungen auf den dort bestehenden tidebeeinflussten Bereich. Die Auswirkungen können erhöhte Sedimentation und Salzfracht bedeuten. Die Entnahme von Wasser aus der Jümme ist an einen Pegelstand größer 0,5 m NHN gebunden. Weder zu den gepumpten Wassermengen aus dem Leda-Jümme-Gebiet, noch den Pegelständen in der Jümme liegen derzeit Daten vor. Eine Bewertung des Wasserdargebots ist daher nicht möglich.

Wasserqualität: Im Rahmen des DBU-Projektes erfolgte eine Probenahme am EJK bei Dykhausen am 12.09.2024. Die Messergebnisse sind im Anhang 10.1-8 aufgelistet. Im EJK liegt ein eher gering mineralisiertes Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit um 300 µS/cm vor. Das Wasser weist typischerweise einen hohen DOC und TOC-Gehalt von 50-70 mg/l auf. Bei der Messung in Dykhausen 2024 wurde eine hohe Trübung von 18 NTU und ein SAK₄₃₆ von 21 m⁻¹ festgestellt. Der pH-Wert ist im neutralen Bereich. Obwohl überwiegend eine hohe Sauerstoffsättigung (>5 mg/l) vorliegt, werden Eisen- und Mangankonzentrationen von bis zu 2,4 mg/l bzw. 0,2 mg/l gemessen. Grund hierfür könnte eine Bindung von Eisen und Mangan an organische Verbindungen sein. Dies sollte im Hinblick auf eine prozesstechnische Entfernung weiterführend geprüft werden.

Zur Untersuchung möglicher Schwankungen in der Wasserzusammensetzung wird die Messstelle 94192530 Marcardsmoor des NLWKN herangezogen. Die Messwerte für die elektrische Leitfähigkeit im Zeitraum zwischen 2019 und 2022 sind im Anhang 10.1-7 dargestellt. Die Messwerte schwanken im Bereich zwischen 180 und 460 µS/cm, mit eher geringen Werten im Winter und höheren Werten im Sommer.

Die Auswertung der Daten zur Wasserqualität bildet das System im Ist-Zustand und damit ausgerichtet auf die Funktionalität als Schifffahrtskanal ab. Bei einem geänderten Wassermanagement können sich davon abweichende Systemzustände auch hinsichtlich der Wasserqualität ergeben. Die im Folgenden dargestellten Daten sind daher nur als Hinweis zu werten. Weiterführende Untersuchungen zur Wasserqualität sollen diesbezüglich Aufschluss geben.

Weitere Nutzer: Der EJK wird aktuell zur Freizeitschiffahrt genutzt. Voraussetzung hierfür ist die Einstellung von bestimmten Pegelständen. Derzeit sind keine Entnahmen aus dem EJK bekannt (siehe Wasserbuch Niedersachsen, Stand März 2025). Im Hinblick auf weitere mögliche Nutzungskonkurrenzen sind außerdem die strategischen Bestrebungen zur Renaturierung von Moorflächen zu berücksichtigen. Insbesondere bezogen auf die Moorschutzgebiete sind Erhaltungs- und Verbesserungsmaßnahmen zum Wasserhaushalt erforderlich. So sind z. B. für das „Kollrunger Moor und Klinge“ bzw. die Naturschutzgebiete „Kollrunger Moor“ und „Wiesmoor-Klinge“ Maßnahmen der Wasserrückhaltung als Voraussetzung zur Wiedervernässung abgetorfter Hochmoorflächen und zur Etablierung von Hochmoorregeneration vorgesehen.

In räumlicher Nähe zum Leda-Sperrwerk findet eine Zuwässerung der landwirtschaftlich genutzten Flächen statt. Diese Zuwässerung wird hauptsächlich in den Sommermonaten durchgeführt und kann nur stattfinden, wenn ausreichend Oberwasserabfluss vorhanden ist. Ein Einströmen von salzhaltigem Wasser aus der Ems unterbindet die Zuwässerung und könnte einer Entnahme von Wasser aus dem Leda-Jümme-Gebiet entgegenstehen.

Zusammengefasst ist im Rahmen der Ermittlung verfügbarer Wasserressourcen grundsätzlich nicht abschätzbar, inwieweit die vorgenannten Maßnahmen zum Erhalt und zur Verbesserung von Schutzgebieten sowie zur Umsetzung der landesweiten Moorschutzstrategie die Menge der Wasserressource „Ems-Jade-Kanal“ zukünftig beeinflussen werden. Gleichwohl sind diese Aspekte im Rahmen einer konservativen Abschätzung mit Blick auf die mengenmäßige Verfügbarkeit des Wassers zu berücksichtigen.

Fazit: Das nutzbare Wasserdargebot ist auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis nicht beurteilbar. Eine Nutzung der Wasserressource in einem größeren Umfang, insbesondere im Zeitraum April bis Oktober, ist im Hinblick auf die Zulassungsfähigkeit unter den untersuchten Bedingungen fraglich. Zu nennen ist insbesondere – unter Einbezug des § 33 WHG – der Nachweis zur Vereinbarkeit mit den Bewirtschaftungszielen nach § 27 – 31 WHG.

Eine nutzbare Wasserentnahmemenge ist für diesen Zeitraum bezogen auf die Zuströme aus dem betrachteten Einzugsgebiet des EJK und die mittels Pumpbetrieb aus dem LJG geförderten Mengen auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis nicht beurteilbar. Das nutzbare Dargebot im EJK hängt vom Zufluss aus dem NGFK ab. Es ist zu untersuchen, ob und inwiefern durch ein angepasstes Wassermanagement eine Nutzung als Wasserressource möglich ist. Hierfür wird eine fundierte Datenbasis zur Funktionsweise und den Zuströmen benötigt.

3.8 Meerwasser

Lage / Umfeld: Die Herausforderungen bei der Nutzung von Meerwasser sind, neben den Ansprüchen an die technische Aufbereitung, unter Umständen andere Nutzungen, wie z.B. Schifffahrt oder Fischerei, die berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus muss bei Meerwasserentnahmen im Raum Wilhelmshaven immer das Ökosystem Wattenmeer mitgedacht werden.

Die Jade wird in Außenjade, Innenjade und Jadebusen untergliedert, wobei die Linie Schillig–Alte Mellum die Innen- von der Außenjade trennt, und die Innenjade durch die Linie Wilhelmshaven – Eckwarderhörne vom Jadebusen abgegrenzt wird (Lang, 2003). Als potenzieller Entnahmeraum ist die Innenjade angedacht.

Die Jade wird durch Gezeiten mit einem Tidehub von bis zu 3,8 m beeinflusst. Dabei fließen mit jedem Tidezyklus rund $400 \times 10^6 \text{ m}^3$ in den Jadebusen ein und aus (Götschenberg und Kahlfeld, 2008). Das

vorherrschende Watt ist aus schlickigen bis sandigen holozänen Sedimenten aufgebaut und unterliegt ständigen Veränderungen bedingt durch Strömungs- und Windverhältnisse. Im Gegensatz zu den Ästuarien bspw. der Ems oder Weser weist der Jadebusen durch die Jade keinen nennenswerten Oberwasserzufluss auf (Lang, 2003).

Datengrundlage: Zur Bewertung der potenziellen Ressource Meerwasser wurden – soweit verfügbar – vorrangig öffentlich zugängliche Geodaten und Daten zur Wasserqualität des NLWKN und der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer herangezogen (vgl. Tabelle 2). Zudem wurden bereits bestehende Gutachten zu ähnlichen Vorhaben – insbesondere der Wasserentnahme zu Kühlzwecken – gesichtet und ggf. in die Bewertung einbezogen.

Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot: Theoretisch steht Meerwasser in nahezu unbegrenzten Mengen zur Verfügung. Praktisch nehmen jedoch sowohl die genaue Art der Entnahme als auch die finale Lage der Entnahmestellen Einfluss auf die zur Verfügung stehenden Quantitäten.

Wasserqualität: Meerwasser hat im Vergleich zu Grund- und Oberflächenwasser an Land eine deutlich höhere Salinität. Im küstennahen Bereich unterliegt die Salinität Schwankungen von mehreren Promille, da Süßwasser über Flüsse und submarine Austritte von landseitig zuströmendem Grundwasser eingetragen wird. Die allgemeinen Strömungsmuster sowie die vorherrschenden Winde vermischen das Süßwasser zu unterschiedlichen Anteilen mit dem Meerwasser. Nach WRRL entspricht der Gewässertyp im Jadebusen dem euhalinen Wattenmeer. Die mittlere Salinität liegt im Bereich zwischen 30 - 32 PSU (Practical Salinity Unit). Informationen aus regelmäßigen Monitorings an verschiedenen Messpunkten im Bereich der Jade (vgl. Tabelle 2) von Bundes- und Landesbehörden liegen für einige aufbereitungs- bzw. einleitungsrelevante Parameter vor. Dazu zählen u.a. Nährstoffe, Schadstoffe, Metalle aber auch Grünalgen und Seegras, sowie Salinität (Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer und weitere Portale⁷). Messungen zu Schwebstoffen in der Jade, die ebenfalls durch eine Aufbereitung zu entfernen wären, zeigen, dass die Schwebfrachten immer bei Niedrigwasser am größten sind, da das ablaufende Wasser zu einer Sedimentmobilisierung führt. Untersuchungen im westlich angrenzenden Bereich des Wattenmeers bei Spiekeroog zeigen eine tideabhängige Partikelgröße von 150 bis 400 µm (Bartholomä et al., 2009).

Tabelle 2: Salinität, Temperatur und Schwebstoffe in der Jade Bucht gemessen bei mehreren Ausfahrten (Böning et al. 2017; 2018)

Jahr	2010				2013	2014
Monat	Januar	April	Juli	November	Juli	März
Mittlere Salinität	28	28.8	32.8	27.6	30.1	30.5
Mittlere Wassertemperatur [°C]	0.6	9.2	20.8	8.7	Keine Angabe	Keine Angabe
Mittlere Schwebfrachten [mg/l]	Keine Angabe	30/120 ^a	10/50 ^a	30/70 ^a	15.4	35.4

Technische Rahmenbedingungen: Aus regulatorischer Sicht stellt sich die Frage nach dem geplanten Entnahmeort, denn während Meerwasser-Entnahmen prinzipiell erlaubnisfrei sind, wird für Entnahmebauwerke eine Zulassung benötigt. Ggf. ist zusätzlich eine Vorprüfung oder Prüfung der Umweltverträglichkeit notwendig. Zudem regelt schon § 6 WHG, dass Gewässer im Allgemeinen

⁷ <https://www.mdi-de.org/mdi-de/>

nachhaltig zu bewirtschaften sind und diese Bewirtschaftung auch zum Schutz der Meeresumwelt beizutragen hat (§ 6, Absatz 1, 1 WHG), sodass potentielle negative Einflüsse auf lokale Ökosysteme zu prüfen sind. Dies gilt umso mehr, als das Teile des vor Wilhelmshaven liegenden Küstenabschnittes dem Nationalpark Wattenmeer und anderen Schutzzonen zugeordnet werden. Hiervon ausgenommen sind Gebiete im Bereich des JadeWeserPorts sowie der weiteren Wilhelmshavener Häfen.

Weitere Nutzungen und Widerstände: Grundsätzlich sind auch für die Meerwasserentnahme Nutzungsansprüche Dritter und umweltrechtliche Randbedingungen zu berücksichtigen. Insbesondere Zielsetzungen des Gewässer- und Naturschutzes können zu einer Begrenzung des nutzbaren Anteils selbst der Ressource Meer- bzw. Küstenwasser oder zu erweiterten Auflagen an die Umsetzung führen. So können insbesondere durch die Entnahme großer Mengen auch Auswirkungen auf biotische Schutzgüter auftreten, wie Fischschäden direkt an der Entnahme, die in vergleichbaren Vorhaben bereits auftraten und für die Minderungsmaßnahmen zu prüfen sein werden (u.a. ARSU, 2023). Eine tatsächliche Abschätzung und Bewertung der Ressource Meerwasser kann erst erfolgen, wenn Entscheidungen über Entnahme- und Einleitstandorte getroffen wurden.

Für die weitere Betrachtung wird angenommen, dass Entnahme und Einleitung in dem Bereich der Innenjade erfolgt. Hier liegen keine unmittelbaren Schutzzonen o. ä. vor (Vgl. Abbildung 7). Diese sind jedoch umgebend (FFH-Gebiete: Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer, Teichfledermaus-Habitate im Raum Wilhelmshaven, Vogelschutzgebiete: Niedersächsisches Wattenmeer und angrenzendes Küstenmeer, Wangerland, Voslapper Groden-Nord & Süd, Marschen am Jadebusen).

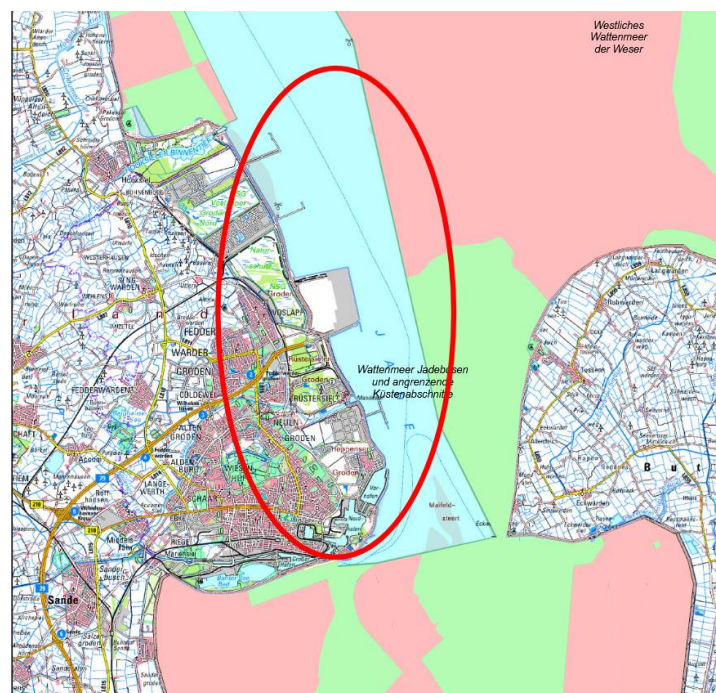


Abbildung 7 Bereiche des Nationalparks Wattenmeer in der Jade: rot = Ruhezone, grün = Zwischenzone); in rot umkreist: potentieller Entnahme- und Einleitbereich

Gerade auf mobile oder auch sehr sensitive Arten kann ein solches Vorhaben – selbst, wenn es nach formalen Kriterien nicht unmittelbar im besonders geschützten Bereich durchgeführt wird – aufgrund der räumlichen Nähe doch zu negativen Einflüssen führen. Dem Synthesebericht des Fischmonitorings für das Onyx-Power-Kraftwerk ist zu entnehmen, dass die Artenzusammensetzung an unterschiedlichen Entnahmeorten (Uniper/Onyx-Entnahmen) für naturschutzfachlich relevante

Fischarten im Gebiet, wie Finte, Flussneunage oder auch Hering, innerhalb der Jade differiert. Eine potenzielle Schädigung durch die Entnahme ist somit zu prüfen.

Fazit: Aus mengenmäßiger, wie auch aus rechtlicher Sicht erscheint Meerwasser als eine wirkliche Alternative unter den potenziellen Wasserressourcen am Standort Wilhelmshaven. Dafür sprechen auch bereits bestehende Kühlwasserentnahmen bzw. entsprechende Genehmigungen im Bereich des JadeWeserPorts, bzw. des Wilhelmshavener Hafens. Die zugehörigen Gutachten sind zugleich Hinweis auf den wahrscheinlich anfallenden Prüfbedarf und notwendigen Gutachtenumfang, sowie auf die u. U. mit zu planenden Maßnahmen zur Verringerung oder Kompensation negativer ökologischer Auswirkungen (u.a.: ARSU, 2023; IBL, 2007). Aufgrund u. a. der Salinität und enthaltenen Schwebstoffe ist im Vergleich zu anderen Ressourcen mit einem erhöhten Aufbereitungsaufwand und damit höheren Aufbereitungskosten zu rechnen. Alternativ böte sich eine vorrangige Nutzung zu Kühlzwecken an.

3.9 Kläranlagenabläufe

Im Nahbereich der betrachteten Wasserstoffproduktionsstandorte befinden sich zwei kommunale Kläranlagen: KA Wilhelmshaven und KA Sande-Altenhof.

Kläranlage Wilhelmshaven

Die KA WHV wird durch die Technischen Betriebe der Stadt WHV betrieben. Das im Stadtgebiet WHV und Schortens anfallende Abwasser wird über eine Mischkanalisation zur Zentralkläranlage WHV geleitet. Das geklärte Abwasser wird derzeit direkt in die Innenjade abgeleitet. Lediglich bei stärkeren Regenereignissen wird stark verdünntes Mischwasser direkt in die Jade abgeschlagen.

Das Abwasser wird im ersten Schritt in einer mechanischen Vorreinigung von Grobstoffen, mineralischen Anteilen und Schlamm abgetrennt. Dies erfolgt mithilfe eines Rechens, belüfteten Sandfangs und einer Vorklärung. Im nachfolgenden Schritt werden organische Stoffe mikrobiologisch im Abwasser abgebaut und zu Biomasse umgewandelt. Diese wird im letzten Reinigungsschritt der Nachklärung mittels Sedimentation ebenfalls aus dem Wasser entfernt. Die Nachklärung stellt somit die letzte Reinigungsstufe vor einer weiteren Aufbereitung des Wassers in einem Brauchwasserwerk dar. Das Wasser zur weiteren Aufbereitung könnte potenziell aus der Ablaufrinne der Nachklärung entnommen werden. Die einzelnen Verfahrensstufen sind auf dem Foto der Kläranlage zu erkennen (Abbildung 8).



Abbildung 8 Draufsicht der Kläranlage Wilhelmshaven (Quelle: <https://www.tbw-whv.de/technische>)

Die Auslegung der Aufbereitungskapazität des Brauchwasserwerks erfolgt auf Basis des minimalen stündlichen Abwasseranfalls aus den Jahren 2022-2023. Dieser betrug $640 \text{ m}^3/\text{h}$, wodurch ca. 5,6 Mio. m^3/a aufbereitetes Abwasser für eine Brauchwasserversorgung zur Verfügung stünden (Anhang 10.1-9). Die Qualität des Kläranlagenablaufs wurde anhand der Betriebstagebücher für den Zeitraum 2021-2023, den öffentlich verfügbaren Daten aus dem Wasserbuch des NLWKN, sowie durch zwei Messungen mit großem Parameterumfang analysiert. Die Qualität entspricht typischem kommunalem Kläranlagenablauf mit geringem industriellem Einfluss.

Kläranlage Sande

Die KA Sande-Altenhof wird von der Gemeinde Sande betrieben und weist ein deutlich geringeres Schmutzwasseraufkommen auf. Das geklärte Abwasser wird über den Neuenfelder Zuggraben in das Mariensieder Tief abgeleitet. Es ist zu prüfen, inwiefern Auswirkungen auf den Naturwasserhaushalt für den jeweiligen Vorfluter von Bedeutung sein können, wenn eine Einleitung durch die KA wegfällt bzw. stark reduziert wird.

Die Aufbereitung erfolgt wie bei der KA WHV durch eine mechanische Vorreinigung, gefolgt von einer biologischen Behandlung und im letzten Schritt durch eine Nachklärung, in der die in Biomasse umgewandelten organischen Inhaltsstoffe des Wassers abgetrennt werden. Anders als in WHV erfolgt die Nachklärung nicht durch Sedimentation, sondern durch einen Tuchfilter, welcher die Biomasse aus dem Wasser abtrennt. Die Entnahme des Kläranlagenablaufs könnte entweder aus dem Ablauf des Tuchfilters erfolgen oder aus zwei stillgelegten Nachklärbecken. Im letzteren Fall könnten die Nachklärbecken gleichzeitig als Pufferbecken dienen.



Abbildung 9 Draufsicht der Kläranlage Sande (Quelle: Google Maps, letzter Zugriff: 13.09.2024)

Für die Auslegung des Brauchwasserwerks wird als erster Ansatz das 15%-Quantil der stündlichen Ablaufmengen für den Zeitraum 2022 bis Juli 2024 zugrunde gelegt. Wie auch bei der KA WHV wird im Laufe der Planung eine genauere Betrachtung anhand der 15-Minuten-Werte des Kläranlagenablaufs erfolgen. Das 15%-Quantil beträgt $48 \text{ m}^3/\text{h}$, wodurch ca. $420.480 \text{ m}^3/\text{a}$ aufbereitetes Abwasser für eine Brauchwasserversorgung zur Verfügung stünden (Anhang 10.1-10).

Die Qualität des Kläranlagenablaufs wurde anhand von Auszügen der Betriebstagebücher für den Zeitraum Januar 2022 bis Juli 2024, den öffentlich verfügbaren Daten aus dem Wasserbuch des NLWKN, sowie durch zwei Messungen mit großem Parameterumfang analysiert. Die Qualität entspricht typischem kommunalem Kläranlagenablauf mit geringem industriellem Einfluss.

Bestehende Nutzungen und Widerstände: In beiden Fällen würde das Wasser vor der Einleitung in den jeweiligen Vorfluter entnommen werden. Die unmittelbare Beeinflussung eines Oberflächengewässers durch die Entnahme entfällt somit. Zu prüfen wäre inwieweit durch die Entnahme eine merkbare und u. U. untragbare Verringerung der Mindestabflussmenge des Vorfluters entstünde. Die KA Sande leitet über ein bestehendes Netz aus künstlichen und hoch regulierten Entwässerungsgräben in das Mariensiel-Tief ein, die KA Wilhelmshaven direkt in die Jade und erfährt damit eine hohe Verdünnung. In beiden Fällen wird zu prüfen sein, inwiefern die Einleitungen der bei der Aufbereitung anfallenden Abwässer und Konzentrate Auswirkungen auf den Naturwasserhaushalt haben, bzw. den Zielvorgaben der WRRL entgegenstehen könnten.

Hinsichtlich der weiteren Widerstände wären die ggf. bestehenden Raumwiderstände zu prüfen, wobei die Ausgestaltung der Leitungsführung hier die entscheidende Rolle spielen wird.

Fazit: Aus rechtlicher Sicht wie auch aus Sicht der Nachhaltigkeitsbeurteilung erscheint die Nutzung von geklärtem Abwasser als eine erwägenswerte Option. Das nutzbare Wasser würde im Idealfall entnommen, bevor es dem eigentlichen Wasserkreislauf wieder zufließt. Relevant wird die Frage der Leitungsführung zur jeweiligen Aufbereitung sein sowie die der Aufbereitung selbst.

4 Bewertung verfahrenstechnischer Alternativen

4.1 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen zur Bewertung der verfahrenstechnischen Alternativen ist ein iterativer Prozess. Basierend auf den Ergebnissen in Kapitel 3 wurden die ermittelte Quantität und Qualität der

relevanten Wasserressourcen sowie des benötigten Brauchwassers gegenübergestellt. Die Quantität bestimmt die Größe und den Platzbedarf der zu planenden verfahrenstechnischen Anlagen und insbesondere den notwendigen Speicherbedarf. Bei allen Ressourcen, mit Ausnahme des Meerwassers, müssen eine Variation der verfügbaren Rohwassermengen und entsprechende Speichermöglichkeiten berücksichtigt werden, um eine durchgehende Brauchwasserversorgung sicherzustellen. Die Roh- und Zielwasserqualität hingegen bestimmen maßgeblich die einzusetzende Aufbereitungstechnik und den Bedarf an Energie und Zusatzstoffen.

Mithilfe eines Modellierungstools und den ermittelten Daten wurde eine Planung der Verfahrenstechnik durchgeführt. Diese bildete die Grundlage zur weiteren Planung und Kostenermittlung durch ein Ingenieurbüro. Laut Gono et. al (2024) sollte der Wert für die elektrische Leitfähigkeit für die Wasserstoffelektrolyse unter $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ liegen. Stringentere Ansätze orientieren sich an der Definition Vollentsalztes Wasser, auch demineralisiertes Wasser oder Deionat genannt, oder nähern sich den Anforderungen der Halbleiterindustrie an ($0,055 \mu\text{S}/\text{cm}$). Im VGB – M 407 (2019) werden folgende Mindestanforderungen an Vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) gestellt. Diese wurden als Ziel für die Auslegung der Verfahrenskette festgelegt:

Tabelle 3 Qualitätsanforderungen für vollentsalztes Wasser nach VGB - M407 (2019)

Leitfähigkeit bei 25°C	$\leq 0,08$	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Kieselsäurekonzentration	$\leq 0,010$	mg/l
Natriumkonzentration	$\leq 0,005$	mg/l
Gelöster Organischer Kohlenstoff (DOC)	$\leq 0,200$	mg/l C

Wichtig zu beachten ist, dass die in den Abbildungen zur Verfahrenskette mit Massenstrommodell dargestellten Ausbeuten und resultierenden Produktwassermengen auf der Verfahrenskonzeption des IWWs basieren und sich daher von den in den Tabellen zu Volumenströmen und Qualitätsparametern der Abwasserströme unterscheiden. Die Charakterisierung der Abwässer und Konzentrate basierte auf Grundlage der Ausbeuten, welche durch ein extern beauftragtes Ingenieurbüro berechnet wurden. Die beiden Konzepte unterscheiden sich in einzelnen Stufen hinsichtlich der Ausbeuten sowie in der Prozessreihenfolge geringfügig, was zu leicht abweichenden Gesamtbilanzen führt. Darüber hinaus wurde in der IWW-Variante keine Aufbereitung des UF-Spülwassers berücksichtigt, da diese nicht Teil der festgelegten Systemgrenze war. Ebenso sind potenzielle CIP-Abwässer aus der Umkehrosmose nicht in der Bilanz enthalten, da Häufigkeit, Dauer und Chemikalieneinsatz solcher Reinigungen erst im (Pilot-)Betrieb verlässlich bestimmt werden können.

4.2 Beschreibung notwendiger Verfahrensstufen

Die Verfahrensketten zur Wasseraufbereitung sind in zwei Qualitätsstufen unterteilt. Die erste Qualitätsstufe (auch als Basiswasserqualität bezeichnet) ist für Kühlzwecke geeignet, während die zweite Qualitätsstufe dem Ultrareinstwasser für die Elektrolyse entspricht. Die Verfahrensketten für die betrachteten Wasserressourcen sind im Wesentlichen gleich aufgebaut und unterscheiden sich hauptsächlich in Anzahl und Typ folgender einzusetzender Technologien:

1. Vorfiltration
2. Flockung
3. Ultrafiltration (UF)
4. Ozonung – bei Bedarf

5. Bio-Filtration – bei Bedarf
6. Umkehrosmose (RO)
7. Spülwasseraufbereitung
8. Entsäuerung / Membranentgasung
9. Elektrodeionisation (EDI)
10. Ionenaustausch (bei Bedarf)

4.3 Qualität der Spülwässer und Konzentrate

Bei fast allen Verfahren der Aufbereitungskette entstehen Abwässer bzw. Konzentrate, die folgendermaßen gekennzeichnet sind:

Vorfilter: In der Regel kommen Feinfilter mit Maschenweiten $\leq 200 \mu\text{m}$ zum Einsatz, mit denen grobe Verunreinigungen zurückgehalten werden. Die Filter müssen regelmäßig zurückgespült werden. Die Spülwässer sind durch einen hohen Feststoffanteil gekennzeichnet und können nach Abtrennung des Schlammes i.d.R. in das Rohwasser zurückgeführt werden.

Ultrafiltration: UF-Membranen müssen ebenfalls regelmäßig zurückgespült werden, um Partikelablagerungen zu entfernen. Da vor der UF Flockungsmittel dosiert werden, um eine effizientere Abscheideleistung und Stabilisierung des Membranbetriebs zu erreichen, sind diese Flockungsschlämme ebenfalls in den Spülwässern enthalten. Üblicherweise handelt es sich dabei um Aluminium- oder Eisensalze. Die Spülwässer ohne zusätzliche Reinigungschemikalien können zusammen mit denen der Vorfilter z.B. in Absetzbecken behandelt und das Klarwasser in das Rohwasser zurückgeführt werden.

In bestimmten, einstellbaren Zeitintervallen werden aber auch sogenannte CEB (Chemical Enhanced Backwash), d. h. durch Dosierung von Reinigungschemikalien unterstützte Rückspülungen durchgeführt. Weiterhin sind in größeren Zeitabständen manuell auszulösende CIP-Reinigungen (Cleaning in Place) notwendig. Beide Reinigungsregime dienen der Regeneration der Membranleistung durch Entfernung von Fouling, um die Leistungsfähigkeit der UF-Membranen langfristig zu erhalten und zu stabilisieren. Dafür können üblicherweise die Standardchemikalien Natronlauge, Schwefelsäure und/oder Natriumhypochlorit eingesetzt werden. Die chemikalienhaltigen Abwässer sollten nach erfolgter Neutralisation entsorgt bzw. ggf. zusammen mit den Konzentraten der Umkehrosmose in ein Fließgewässer eingeleitet werden.

Umkehrosmose: Beim Betrieb von Umkehrosmoseanlagen fallen Konzentrate an, die alle aus dem Rohwasser zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe in aufkonzentrierter Form enthalten. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Härtebildner Ca und Mg, aber auch um organische Spurenstoffe, DOC, Nitrat, Sulfat und Schwermetalle. Die Zusammensetzung des Konzentrats ergibt sich aus der Zusammensetzung des Rohwassers, dem Rückhaltvermögen der Membran für die einzelnen Wasserinhaltsstoffe sowie der Ausbeute der UO-Anlage. Bei einer Prozessausbeute von 80 Prozent und einem Rückhalt für einen bestimmten Stoff von nahezu 100 Prozent, würde dieser im Konzentrat um den Faktor 5 aufkonzentriert vorliegen.

Für einen reibungslosen Umkehrosmosebetrieb werden im Zulauf zur RO i.d.R. Scaling-Inhibitoren (sog. Antiscalants) zudosiert. Diese dienen dem Zweck, Fouling, Scaling und somit das Verblocken der RO-Membran zu reduzieren bzw. bestenfalls gänzlich zu verhindern. Zur Anwendung kommen

hauptsächlich Produkte aus den Stoffgruppen der Phosphate, Phosphonsäuren oder der Polycarbonsäuren. Diese finden sich ebenfalls in den Konzentraten wieder.

Die Konzentrate fallen in der Regel kontinuierlich an und werden in Deutschland, bei Vorliegen einer entsprechenden Einleitgenehmigung, überwiegend unbehandelt in ein Fließgewässer eingeleitet (Direkteinleitung). Die in größeren Abständen anfallenden chemikalienhaltigen Reinigungswässer der Umkehrosmosemembranen sollten zusammen mit den Reinigungswässern der UF neutralisiert und entsorgt werden.

4.4 Aufbereitung des KA-Ablaufs Wilhelmshaven

In Abbildung 10 wurde die Verfahrenskette zur Aufbereitung von KA-Ablauf Wilhelmshaven dargestellt. Eine detaillierte Darstellung inklusive der Massenströme ist in Anhang 10.2-2. Grundlegende Auslegungsparameter für die einzelnen Verfahrensstufen sowie die Wasserqualitätsparameter können Anhang 10.2.1 entnommen werden. Im Projektrahmen wurden Versorgungstabilität, technologische Langlebigkeit und geringe Volatilität als maßgebende Kriterien festgelegt, so dass eine tendenziell konservativere Auslegung bevorzugt wird. Somit wurde beispielsweise der Flux als wesentlicher Designparameter der Ultrafiltration und der Umkehrosmose tendenziell im unteren Bereich der von Herstellern empfohlenen Werte angesetzt. Neben firmeneigenen Excel-basierten Tools wurde von öffentlich zugänglicher Simulationssoftware Gebrauch gemacht. Die Auswahl von Modulen, Materialien und Systemkonfigurationen erfolgte anhand projektbezogener Vorerfahrungen und im engmaschigen Austausch mit externen Experten.

Die angegebenen Auslegungsdaten sollen als Orientierungswerte verstanden werden und zielen auf eine Aufbereitung von 100 Prozent des zu erwartenden Zulaufes ab. Um die Netto-Anlagenverfügbarkeit zu erhöhen, also mögliche Stillstandzeiten während verschiedener Wartungs- und Reinigungsvorgänge zu kompensieren, sollte die Anlagenkonfiguration (Anzahl Produktionseinheiten) n+1 betragen, und somit eine Überkapazität bereitstellen. Bei alternierenden Wartungs- und Reinigungsprozessen kann die Anlagenauslastung der nicht stillstehenden Straßen hochgefahren werden, sodass es zu keinen Produktionswassereinbußen kommt.

Die erwartete Leitfähigkeit des Permeats nach der UO2 beträgt $4 \mu\text{S}/\text{cm}$ und die des Diluats nach der EDI $\leq 0,062 \mu\text{S}/\text{cm}$. Im Ablauf des IXMBs kann somit eine Ionen-Konzentration nahe 0 meq/l (Milliequivalent pro Liter) erreicht und ein sicherer und langlebiger Betrieb des Elektrolyseurs gewährleistet werden.

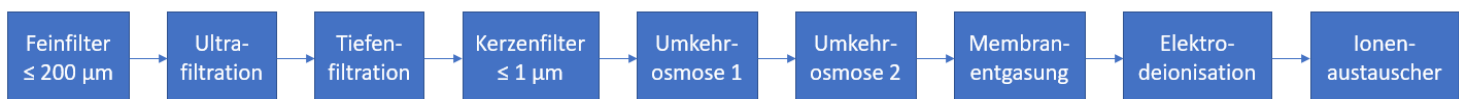


Abbildung 10 Schema der Verfahrenskette zur Aufbereitung von KA-Ablauf Wilhelmshaven

4.5 Aufbereitung des Kläranlagenablaufs Sande

Die Volumenströme und Konzentrationen der wesentlichsten Parameter des KA-Ablaufs und der Restwasserströme sind in Anhang 10.2.1 enthalten. Nachfolgend wird beschrieben, wie mit den Restwasserströmen umzugehen ist.

Chemikalienfreie Spülwässer aus Vorfilter und UF: Das Klarwasser (nach Absetzbecken, siehe Kap. 4.3) kann entweder in den Rohwasserstrom zurückgeführt oder direkt in den Vorfluter der KA eingeleitet werden. Es enthält maximal die Konzentrationen, die im KA-Ablauf ohnehin enthalten sind.

RO-Konzentrat: Das Konzentrat enthält die zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe des Kläranlagenablaufs in aufkonzentrierter Form sowie die zugegebenen Antiscalants. Es wurde eine Ausbeute von 74 Prozent angenommen (RO1), so dass sich die zurückgehaltenen Stoffe im Konzentrat um den Faktor 4 erhöhen. Vor dem Hintergrund einer Einleitgenehmigung sind neben Mikroschadstoffen und Antiscalants vor allem auch erhöhte Salzgehalte als relevant einzustufen. Die von der Abwasservorordnung geforderten Einleitgrenzwerte für abfiltrierbare Stoffe ($< 50 \text{ mg/l}$) und AOX ($< 0,2 \text{ mg/l}$) werden in den Restwasserströmen nicht überschritten. Der Parameter Arsen, für den es ebenfalls einen Grenzwert gibt ($< 0,1 \text{ mg/l}$), wird in der KA nicht gemessen (ist nicht relevant). Diese Grenzwerte können im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens durch weitergehende Anforderungen für Parameter, die im Konzentrat auftreten, ergänzt werden.

Gemäß den Vorgaben der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) darf sich der ökologische Zustand des aufnehmenden Gewässers nicht verschlechtern. Dabei spielen die Wasserführung (Verdünnung) bzw. die Mengenverhältnisse Einleitung/Gewässer eine wesentliche Rolle. Für die Beurteilung sind folgende Parameter zu prüfen: Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffgehalt, BSB5, TOC, Chlorid, Sulfat, Eisen, ortho-Phosphat-Phosphor, Gesamtphosphor, Gesamt-Stickstoff, Ammonium-Stickstoff, Ammoniak-Stickstoff, Nitrat-Stickstoff und Nitrit-Stickstoff. Die entsprechenden Anforderungen für einen sehr guten bzw. guten ökologischen Zustand sind in der OGewV genannt.

Im RO-Konzentrat sind einige dieser Parameter im Vergleich zum KA-Ablauf deutlich erhöht, insbesondere Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat sowie die Stickstoffwerte. Außerdem könnten erhöhte Nährstoffkonzentrationen (Nitratwerte) das Risiko von Eutrophierung (übermäßiges Algenwachstum) erhöhen. Es kommt somit auf die Wasserführung des Vorfluters an, in den eingeleitet werden soll. Bei ungünstigen Mischungsverhältnissen (z.B. Konzentratmenge zu MNQ in der Größenordnung von 1:10) oder wenn eine Verschlechterung des ökologischen oder chemischen Gewässerzustandes droht, sind weitergehende Betrachtungen erforderlich. Für die Einleitung von Antiscalants gibt es derzeit keine Grenzwerte.

Chemikalienhaltige Spülwässer: Aufgrund der Verwendung von Säure für die Membranreinigung enthält das neutralisierte Spülabwasser hohe Konzentrationen an Anionen (Sulfat). Außerdem erhöht sich der BSB5-Wert. Diese beiden Parameter könnten bei fehlender Verdünnung für eine Einleitung problematisch sein. Alle anderen Parameter haben die gleichen Konzentrationen wie im RO-Konzentrat oder etwas niedriger und könnten bei entsprechender Verdünnung zusammen mit diesen eingeleitet werden. Chemikalien für die Neutralisation der Spülwässer wurden vernachlässigt.

In Abbildung 11 wurde die Verfahrenskette zur Aufbereitung von KA-Ablauf dargestellt. Eine detaillierte Darstellung inklusive der Massenströme ist in Anhang 10.2-4. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Ablaufmenge der Kläranlage Sande wurde im Projektkonsortium entschieden, bei dieser Ressource kein Wasser zu Kühlzwecken aus dem Prozess auszuschleusen. Grundlegende Auslegungsparameter für die einzelnen Verfahrensstufen, die zugrunde gelegten Wasserqualitätsparameter, sowie Angaben zu den Restwasserströmen können Anhang 10.2.2 entnommen werden.

Die erwartete Leitfähigkeit des Permeats nach der UO2 beträgt $3 \mu\text{S/cm}$ und die des Diluats nach der EDI $\leq 0,062 \mu\text{S/cm}$. Im Ablauf des IXMBs kann somit eine Ionen-Konzentration nahe 0 meq/l erreicht werden. Die Qualitäten der Restwasserströme sind hinsichtlich kritischer Parameter mit denen der KA Wilhelmshaven vergleichbar und entsprechend zu bewerten.

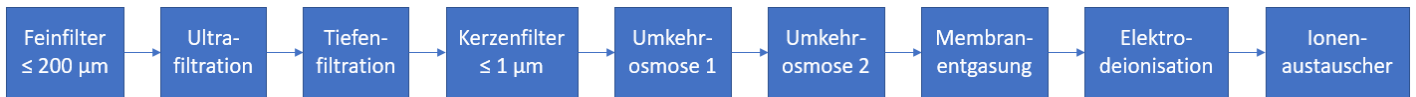


Abbildung 11 Verfahrenskette zur Aufbereitung des KA-Ablaufs Sande

4.6 Aufbereitung Oberflächengewässer (Ems-Jade-Kanal)

In Abbildung 12 wurde die Verfahrenskette zur Aufbereitung von Oberflächenwasser am Beispiel des EJKs dargestellt. Eine detaillierte Darstellung inklusive der Massenströme ist in Anhang 10.2-7. Die zugrunde gelegte Rohwasserqualität kann Anhang 10.2.3 entnommen werden.



Abbildung 12 Verfahrenskette zur Aufbereitung von Oberflächenwasser am Beispiel des Ems-Jade-Kanals am Standort Westerende-Kirchloog

Die hohe Belastung durch gelöste organische Substanzen und suspendierte Stoffe im Oberflächenwasser kann zu Fouling und Verschleiß an den Ultrafiltrationsmembranen führen. Um dem entgegenzuwirken und den Reinigungsaufwand zu reduzieren, sollte die vorgeschaltete Flockung zweistufig, also als kombinierter Prozess bestehend aus Mischungs- und Reaktionsbehälter sowie einer anschließenden Abscheideeinheit, z.B. einem Sedimentationsbecken oder einem Lamellenklärer, ausgeführt werden. In Anhang 10.2.3 sind Orientierungswerte für die verfahrenstechnische Auslegung zusammengetragen.

Die erwartete Leitfähigkeit des Permeats nach der UO2 beträgt $3 \mu\text{S}/\text{cm}$ und die des Diluats nach der EDI $\leq 0,062 \mu\text{S}/\text{cm}$. Im Ablauf des IXMBs kann somit eine Ionen-Konzentration nahe $0 \text{ meq}/\text{l}$ erreicht werden.

Die Konzentrationen der Restwasserströme wurden auf Basis von Messdaten für den EJK der Jahre 2019-2022 und einer IWW-Analyse ermittelt. Es wurde jeweils die Maximalkonzentration zugrunde gelegt (siehe Anhang 10.2.310.2.3). Die Beurteilung der Restströme ist analog zu denen der KA.

Vor dem Hintergrund einer Einleitgenehmigung sind neben Mikroschadstoffen und Antiscalants vor allem auch die erhöhten Salz- und Sulfatkonzentrationen als relevant einzustufen. Außerdem könnten erhöhte Nährstoffkonzentrationen (Nitratwerte) das Risiko von Eutrophierung (übermäßiges Algenwachstum) erhöhen. Wenn das Konzentrat in das gleiche Gewässer eingeleitet wird, aus dem es entnommen wurde, entsteht bei gleichbleibender Wasser- und Frachtenmenge im Einzugsgebiet keine Netto-Konzentrationsänderung. Es wird nur die Fracht (also die Stoffmenge) wieder an die Umwelt abgegeben, und es entsteht keine zusätzliche Belastung durch Zufluss oder Abfluss. Lokal führt die Einleitung jedoch zu höheren Stoffkonzentrationen. In der Realität können sich lokale Konzentrationen somit dennoch verändern, z.B. durch zeitliche Verzögerungen oder ungleichmäßige Verteilung. Für die Beurteilung von möglichen Auswirkungen der Konzentrateinleitung auf die Gewässerqualität ist deshalb immer eine Einzelfallprüfung notwendig. So sind beispielsweise periodisch trockenfallende Gewässer nicht für Einleitungen geeignet. Neben den Mischungsverhältnissen müssen auch der ökologische Gewässerzustand, die Untergrundbeschaffenheit und besondere Nutzungen eines Gewässers beachtet werden. Eine gute Verdünnung und optimierte Einleitbedingungen können negative Auswirkungen verhindern (Egner et al., 2024).

4.7 Aufbereitung Meerwasser

Aufgrund der hohen Salzkonzentration im Meerwasser steigt der osmotische Druck erheblich an, was den für die Umkehrosmose erforderlichen Betriebsdruck im Vergleich zu Kläranlagenabläufen und Oberflächengewässern deutlich erhöht. Daher wird die in weniger salzhaltigen Wasserressourcen übliche Konzentratstufung in der ersten Permeatstufe bei der Meerwasseraufbereitung in der Regel nicht angewandt, da sie den notwendigen Energiebedarf unwirtschaftlich ansteigen lassen würde und die Membranen zu stark belasten könnte. Zudem führt die Meerwasserentsalzung zu vergleichsweise hohen Salzkonzentrationen in den Konzentraten.

In Abbildung 13 wurde die Verfahrenskette zur Aufbereitung von Meerwasser dargestellt. Eine detaillierte Darstellung inklusive der Massenströme ist in Anhang 10.2-9.

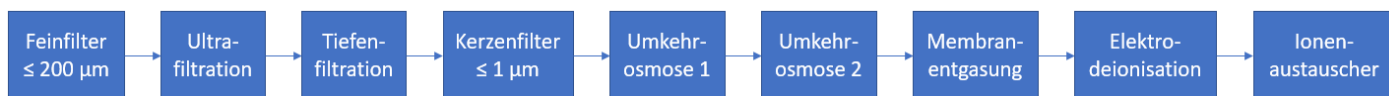


Abbildung 13 Verfahrenskette zur Aufbereitung von Wasser aus der Nordsee am Jadebusen

Bei der Massenstrombilanz ist zu beachten, dass der Kühlwasseranteil von 50 Prozent auf das Permeat der UO1, und nicht auf die gesamte Menge Meerwasser bezogen ist. In Anhang 10.2.4 sind Orientierungswerte für die verfahrenstechnische Auslegung zusammengetragen. Die zugrunde liegenden Wasserqualitätsdaten der Ressource Meerwasser sind in Anhang 10.2.4 enthalten. Wesentliche Auslegungsparameter sowie Volumenströme und Konzentrationen der wesentlichsten Parameter und der Restwasserströme können Anhang 11.2.4 entnommen werden.

Die Beurteilung der Restströme erfolgt analog zu KA und EJK: So können die chemikalienfreien Spülwässer aus Vorfilter und UF nach dem Absetzbecken entweder in den Rohwasserstrom zurückgeführt oder direkt in den Jadebusen eingeleitet werden.

Grundsätzlich ist bei der Einleitung von Konzentraten und chemikalienhaltigen Abwässern eine ausreichende Verdünnung in der Nordsee zu erwarten. Aufgrund seiner geschützten Lage und flachen Geografie ist die Jade jedoch weniger vom direkten Einfluss der offenen Nordsee betroffen. Schadstoffe und Nährstoffe können sich möglicherweise anreichern. Eine Überprüfung der Verdünnung ist somit auch hier erforderlich.

4.8 Bewertungsmatrix: Entscheidungshilfe zur Technologieauswahl

Generell ist bei der Vollentsalzung die praktisch völlige Entfernung von ionischen und schwach dissoziierenden Bestandteilen aus Rohwasser gemeint. Verfahrenstechnisch wird die Demineralisierung des aufzubereitenden Rohwassers stufenweise implementiert. Während die Vorbehandlung auf die Bereitstellung eines, für einen wirtschaftlichen und technisch störungsfreien Betrieb der Vollentsalzung, optimal vorbehandelten Wassers abzielt, orientiert sich die Komplexität und Ausführung der Nachbehandlung an den spezifischen Anforderungen an das Produktwasser.

Die Vollentsalzung von Wasser erfolgte lange Zeit primär mit Ionenaustauscher-Systemen, die mit Chemikalien regeneriert werden. Diese Technik ist erprobt und wird seit mehr als einem halben Jahrhundert erfolgreich eingesetzt. Der bekannte Nachteil der Ionenaustauschverfahren ist die Verwendung von Chemikalien für die Regeneration und der resultierende Anfall von belastetem Abwasser, das vor Ableitung neutralisiert werden muss. Seit den letzten 20 Jahren werden zunehmend Umkehrosmosesysteme zur Vollentsalzung eingesetzt.

Die in Abbildung 14 dargestellte Matrix bildet daher gemäß dem Stand der Technik Ionenaustauscher nicht als Option für die vollständige Demineralisierung ab. Der Fokus liegt auf membranbasierten Konfigurationen, insbesondere Umkehrosmose mit geeigneter Vorbehandlung und EDI als chemikalienarme bzw. chemikalienfreie Technik zur Vollentsalzung. IX-Systeme werden nur in punktuellen Polishing-Funktionen oder als Mischbett in Spezialanwendungen erwähnt, nicht aber als Vollentsalzungs-Alternativen.

Die vorliegende Bewertungsmatrix unterstützt die Auswahl einer Vorzugsvariante zur Aufbereitung alternativer Wasserressourcen zu vollentsalztem/Ultrareinstwasser für die grüne Wasserstoffproduktion. Sie ist als lineare Verfahrenskette angelegt und gliedert sich in die Stufen Vorbehandlung, Entsalzung/Demineralisierung, Nachbehandlung / Polishing und Reststoffmanagement. Bewertet werden ausschließlich diejenigen Stufen, bei denen mehrere technische Alternativen in der Matrix hinterlegt sind. Die verwendeten Begrifflichkeiten und die Systematik der Matrix richten sich nach dem Merkblatt VGBM407 — Konzeption, Spezifizierung und Leistungsnachweis von Anlagen zur Wasserentsalzung. Relevante Orientierungswerte sind entsprechend in die Matrix integriert.

Zur Übersichtlichkeit ist die Matrix in der ersten Ebene in vier Rohwasserkategorien unterteilt: Grundwasser / Uferfiltrat, Oberflächenwasser mit geringem Salzgehalt (z. B. Fluss, Stauseewasser), Oberflächenwasser mit hohem Salzgehalt (Meer/Brackwasser) und Kläranlagenablauf. Diese Einordnung dient ausschließlich als beispielhafte Orientierung, wie eine Verfahrenskette typischerweise konzipiert werden könnte. Entscheidend für die Auswahl einer konkreten Verfahrensstufe ist jedoch immer die tatsächliche Wasserqualität — und zwar der Wert eines Parameters am Eintritt der jeweiligen Verfahrensstufe (in der Matrix im Raster „Richtwerte bezogen auf die Wasserqualität im Eintritt zur jeweiligen Verfahrensstufe“ zu finden). In der Darstellung werden verpflichtende Verfahrensstufen und optionale Varianten visuell unterschieden: Verpflichtende Stufen sind in einem Kästchen mit durchgezogener Linie dargestellt; Varianten oder Technologien, die bei Annahme einer typischen Wassercharakteristik nicht zwingend erforderlich sind, werden in einem Kästchen mit gestrichelter Linie dargestellt.

Die Matrix ist so aufgebaut, dass Alternativen an unterschiedlichen Stellen der Kette erscheinen können. Diese Alternativpfade sind einheitlich farblich markiert, um ihre Positionierungsvarianten sichtbar zu machen. Ein Entscheidungsbeispiel zur Vollentsalzung könnte wie folgt gelesen werden: „Alternativ zur zweistufigen Umkehrosmose (UO 2) kann zum Schutz der EDI entweder die Variante einstufige UO mit WAC/SACenthärtung vor der UO oder einstufige UO mit Permeat-Restenthärtung gewählt werden“. Beide Alternativen sind in der Matrix rot markiert, weil sie an unterschiedlichen Stellen einzufügen wären. Die entsprechenden Auswirkungen bzw. die Bewertung der Alternativen (z. B. bei WAC/SACenthärtung vor UO: häufige Regeneration mit hohem Chemikalienaufwand und entsprechendem Abwasseraufkommen, dafür aber Reduzierung von Scaling-Effekten bei der RO und daraus folgend ein stabilerer Betrieb) sind im Raster „Vorzugsvarianten / Bewertung bezogen auf...“ dokumentiert und vergleichend zwischen den Optionen zu lesen.“ Konkret sind in der Spalte „Vorzugsvarianten/Bewertung bezogen auf...“ für jede Alternative die ökologischen, technischen und ökonomischen Folgen aufgeführt (z. B. Rohwasserausbeute, Energieverbrauch, Abwasser/Regenerationsaufkommen, Chemikalienbedarf, Betriebsaufwand).

Die Entscheidungsfindung erfolgt durch Vergleich der aggregierten Punktzahlen sowie durch die qualitative Abwägung der in der Matrix vermerkten Wirkfaktoren. Die Gewichtung sollte projektspezifisch geprüft und ggf. angepasst werden.

Ein exemplarischer Einsatz der Matrix zur Ermittlung einer verfahrenstechnischen Vorzugsvariante ist anhand des Anwendungsfalls KA Wilhelmshaven in Anhang 10.2.5 dargestellt.

Erläuterung zu Fußnote 3 in der Bewertungsmatrix: Nicht als Variation in der Matrix umgesetzt ist die Möglichkeit den gesamten Block „Eisen/Mangan“ in den Block „Partikuläre Fracht/Organik“ zu integrieren (siehe Verfahrenskette aus Kapitel 4.4 bis 4.7). Eine kombinierte Ozonierung/Flockung + Tiefenfiltration vor der Ultrafiltration überführt durch Oxidation gelöste in partikuläre Organik, verbessert eventuell die Flockenbildung und damit den Abscheidegrad an der UF und verringert die mechanische Beanspruchung; Risiken sind eine bereits „zugute“ Wasserqualität hinsichtlich der Partikelgröße beim Eintritt in die UF, was die Verblockung der Membrankapillare/Poren fördern kann sowie eine nicht vollständig abgeschlossene Oxidation von unlöslichem Mangan(II) zum löslichen Mangan(IV)-Oxid, welches bei der Passage durch die Membranmodule zur irreversiblen Schädigung dieser führen kann. Sollte die nicht in der Matrix aufgeführte Variante bevorzugt werden, empfiehlt es sich, direkt vor der UF eine zusätzliche Inline-Flockung vorzusehen, um erneut größere Flockungsaggregate zu erzeugen.

Verfahrenstechnische Konsequenz		Vorreinigung → Vorbehandlung → Entsalzung/ Demineralisierung → Nachbehandlung/ Polishing → Reststoffmanagement																				
Verfahrensschritt	Vorreinigung	Vorbehandlung			Entsalzung/ Demineralisierung						Nachbehandlung/ Polishing			Reststoffmanagement								
Behandlung von...	Grobe Verunreinigung > 2mm	Feine Verunreinigung ≤ 200	Partikuläre Fracht/ Organik	Eisen/ Mangan	Carbonat-härte/ Gesamthärte	Feine Verunreinigung ≤	Kationen/ Anionen/ CO2/ Carbonat-/ Gesamthärte	Carbonat-härte/	CO2		Feine Verunreinigung ≤	Restionen	Spülwasseraufbereitung	Konzentrationsleitungen								
Potenzielle Ressourcen (Einordnung nach VGB M-407)	Grundwasser oder Uferfiltrat Oberflächenwasser mit geringem Salzgehalt (Fluss-, Stauseewasser usw.) Oberflächenwasser mit hohem Salzgehalt (Meer- und Brackwasser) Kläranlagenablauf	Grob-/Feinrechen/ Siebanlage Grob-/Feinrechen	Feinfilter ≤ 200µm	Inline-Flockung Flockung + Sedimentation Inline-Flockung	Ultrafiltration Luft + Tiefenfiltration (MSF) Ozon (+/- Reaktor) Tiefenfiltration (MSF)	WAC/ SAC 1 Antiskalant	Kerzenfilter ≤ 5µm	UO1	UO konzentratgestuft Entsäuerung mit NaOH 2 WAC/ SAC 4	UO 2 1	UO konzentratstufe	Permeat-Restenthärtung WAC/ SAC 1	Na/ Luft-Vakuum 2 Membran-entgasung 2	Kerzenfilter ≤ 5µm 5	EDI	DMB Absatz-becken Ultrafiltration	Meer 6	Vorfuter Mischungsverhältnis > 1:500 6	Vorfuter Mischungsverhältnis < 1:500 6			
Richtwerte bezogen auf die Wasserqualität im Eintritt zur jeweiligen Verfahrensstufe			> 30	>> 30	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10	>> 10		
Parameter (mg/l)																						
Vorzugsvarianten/ Bewertung bezogen auf...																						
Dimension Wirkfaktor	Einfluss auf... / Beeinflusst von...	Gewichtung [nicht priorisiert 0% ... stark priorisiert 100%]	Inlineflockung	Flockung+ Sedimentation	Ozon + Reaktor+ MSF	Luft + MSF	WAC/SAC vorgeschaltet	Antiskalant	Konzentrat-Stufe	NaOH	UO2	Konzentrat-Stufe	Permeat-Restenthärtung	Membran-entgasung mit N2	Membran-entgasung mit Luft-Vakuum	DMB	Absatz-becken	Absatz-becken + UF				
50%	Ökologischer Einfluss/ Umweltrelevanz	60% Rohwasserausbeute 10% Energieverbrauch 20% Anfall von Reststoffen (qualitativ/ quantitativ) 10% Betriebsmitteleinsatz	0 1 1 2	1 2 2 2	1 2 2 2	1 2 1 2	2 1 2 1	0 0 1 2	0 2 2 2	0 1 1 1	2 1 1 1	0 2 2 2	2 0 1 2	0 2 1 1	0 1 1 1	0 1 1 1	2 2 1 1	0 1 1 1	0 1 1 1	0 1 1 1	0 1 1 1	
10%	Technisch betriebliche Anforderungen	60% Redundanz/ Betriebssicherheit 20% Betriebsaufwand 20% Flächenbedarf	0 1 2	0 2 2	0 2 2	0 1 2	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1	0 1 1
10%	Systemflexibilität	50% Saisonale Schwankungen Qualität 50% Saisonale Schwankungen Quantität	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
30%	Kosten	50% Investition 50% Betrieb	0 1	0 1	0 2	0 1	0 2	0 2	0 2	0 1	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2
100%		Gesamt Umweltrelevanz	0,44 0,50	1,08 1,40	1,38 1,40	0,89 1,00	1,61 1,80	0,44 0,50	0,79 0,60	0,44 0,50	1,24 1,50	0,79 0,60	1,25 1,60	0,79 0,30	0,37 0,10	0,48 0,20	1,13 1,60	0,69 0,40	0,00 0,00	0,15 0,20	0,30 0,40	

1 alternativ zur zweistufigen UO kann zum Schutz der EDI entweder die Variante einstufige UO mit Enthärtung vor der UO oder einstufige UO mit Permeatrestenthärtung gewählt werden (rot gestrichelte Linie)
2 alternativ zur physikalischen Entsäuerung mittels Membranentgasung kann im Falle der zweistufigen UO eine chemische Entsäuerung zwischen UO1 und UO2 gewählt werden (Härtebildner - Sättigungsindizes bei pH-Wert-Einstellung beachten)
3 vollständiger Ozonabbau vor Eintritt in die UF muss sichergestellt werden, ggf. mittels Aktivkohlefilter/optional kann eine Ozonierung + Tiefenfiltration auch vor der Flockung eingesetzt werden, um die Flockenbildung zu verbessern
4 nur bei sehr hartem Wasser und zweistufiger UO
5 zum Schutz der EDI vor partikulärem Eintrag unbedingt notwendig, falls Permeatrestenthärtung gewählt
6 siehe Egner et al. (2024); gilt unter der Voraussetzung, dass mindestens die emissionsseitigen Anforderungen gemäß Anhang 31 AbwV bzgl. abfiltrierbare Stoffe, Arsen und AOX eingehalten werden; Einzelfallprüfung mit detaillierter Betrachtung der standortspezifischen Randbedingungen ist immer notwendig

0 keine negativen Auswirkungen zu erwarten
1 geringfügige negative Auswirkung zu erwarten
2 schwerwiegende negative Auswirkungen zu erwarten

Abbildung 14 Bewertungsmatrix zur Ermittlung einer verfahrenstechnischen Vorzugsvariante zur Bereitstellung von Ultrareinstwasser

5 Bewertung von Abwässern der Wasserstoffproduktion und Wasseraufbereitung

5.1 Abwässer aus der Wasserstoffproduktion

Eine Beschreibung der Abwässer aus der Wasseraufbereitung ist in Kapitel 4.3 dargestellt. Für die Beschreibung der Abwässer aus der Wasserstoffproduktion wurden Daten aus der Literatur sowie aus laufenden Wasserstoffprojekten zugrunde gelegt. Während es zu den Abwässern aus der Kühlung einige Informationen gibt, konnten nur wenige Quellen mit Informationen zu den Abwässern aus dem Elektrolyseprozess gefunden werden. Qualitätsangaben konnten keine gefunden werden. Insgesamt ist die Datenlage über Abwässer der grünen Wasserstoffproduktion sehr lückenhaft.

Bei alkalischen Elektrolyseuren (AEL) ist eine Kaliumhydroxid-Lösung als Elektrolyt enthalten. Die Häufigkeit für die Entsorgung dieser Kaliumhydroxid-Lösung ist abhängig von der Reinstwasserqualität und der Betriebsweise des Elektrolyseurs. Wenn ein Wechsel erforderlich ist, kann das entstehende Abwasser entweder lokal behandelt oder extern entsorgt werden.

Bei Proton-Exchange Membrane (PEM) Elektrolyseuren wird das Reinstwasser im Kreislauf geführt. Während der Kreislaufführung wird dieses Wasser meist durch Ionenaustauscher (IX) oder durch Elektrodeionisation (EDI) gereinigt, wodurch unerwünschte gelöste Ionen aus dem Wasser entfernt werden und der hohe Reinheitsgrad des Wassers eingehalten wird, der für die Elektrolyse notwendig ist. Im Falle der Ionenaustauscher werden die Ionen an einem Ionenaustauscherharz gebunden. Dabei wird das Kunstharz mit der Zeit mit Ionen beladen, sodass es bei Vollladung regeneriert oder entsorgt werden muss. Bei der Regeneration entstehen sogenannte Eluate. Im Falle der EDI werden die unerwünschten Inhaltsstoffe mittels einer Membran aus dem Wasser entfernt, sodass wie bei der Umkehrosmose ein Konzentratstrom entsteht.

Es ist anzunehmen, dass die im Wasser gelösten Ionen Inhaltsstoffe der im Elektrolyseur verbauten Materialien und/oder Membranen sind, die durch Abnutzung der Materialien im Wasser landen. Die konkreten Inhaltsstoffe der beschriebenen Abwasserströme konnte weder in der Literatur noch in Gesprächen mit den Projektbetreibern ermittelt werden.

Wie bereits in vorherigen Kapiteln beschrieben, wird im Elektrolyseprozess ein Teil der eingesetzten Energie in Wärme umgewandelt. Wenn diese Wärme nicht weiter genutzt wird, muss das System gekühlt werden, wofür es verschiedene Optionen gibt, mit unterschiedlichem Anfall an Abwässern. Das Kühlsystem mit dem geringsten Wasserbedarf und Abwasseranfall ist die Luft- oder Trockenkühlung, bei der das primäre Kühlmedium Luft ist. Hier wird die entstehende Wärme der Umgebungsluft zugeführt, welche wiederum durch kühlere Luft oder Kühlwasser abgekühlt wird.

Bei der Verdunstungskühlung wird die Wärme an das Kühlwasser abgegeben, welches durch Kühltürme geführt wird. Hier entweicht der Großteil der Wärme in die Umgebungsluft durch Verdunstung. Bei der Anwendung solcher offener Wasserkühlsysteme fällt Abschlämmwasser als Abwasserstrom an. Aufgrund der Verdunstung des Kühlwassers findet eine Aufkonzentrierung der im Wasser befindlichen Inhaltsstoffe statt. Um eine Ablagerung dieser Stoffe zu vermeiden, wird regelmäßig das Abschlämmwasser aus dem Kühlsystem entfernt. Neben den aufkonzentrierten Stoffen kann das Abwasser auch Chemikalien enthalten, welche teilweise zur Verringerung von Ablagerungen und Biofilmen eingesetzt werden (Saravia & Gehrman 2024).

Insgesamt ist die Ableitung von Abwässern aus der Kühlung etabliert. Im Anhang 31 der Abwasserverordnung werden die Anforderungen an einzuleitende Abwässer aus Kühlprozessen festgelegt.

5.2 Übergeordnete Bewertung aller potenziellen Einleitgewässer

Im Untersuchungsgebiet kommen verschiedene Gewässer für die Einleitung der Abwässer aus der Wasseraufbereitung in Frage. Dazu zählen die von den Kläranlagen bereits genutzten Oberflächengewässer sowie Direkteinleitungen in die Jade. Aufgrund der erheblichen wasserbaulichen Maßnahmen zur Entwässerung im Küstenraum sind die Oberflächengewässer im Untersuchungsgebiet nach WRRL mehrheitlich als „künstlich“ oder „erheblich verändert“ einzustufen. Die Bewertung der jeweiligen Oberflächengewässer für den Zeitraum 2015-2021 ist hier veröffentlicht worden: <https://www.umweltkarten-niedersachsen.de>. Das ökologische Potenzial wurde demnach im Jahr 2015 überwiegend als „mäßig“ bis „schlecht“ bewertet. Das chemische Potenzial wurde für nahezu alle Gewässer mit „nicht gut“ bewertet. Hauptgrund waren die gemessenen Quecksilberkonzentrationen. Der Bereich des Jadedbusens, der Innenjade und Teile der Außenjade ist gehört zum Oberflächenwasserkörper „Wattenmeer Jadedbusen und angrenzende Küstenabschnitte (Küstengewässer)“ und ist als natürliches Gewässer eingestuft worden. Der ökologische Zustand wurde für den aktuellen Bewirtschaftungszeitraum als „mäßig“ „“ bewertet. Der chemische Zustand wurde als „schlecht“ bewertet (FGG Weser 2021).

Die tatsächliche Eignung eines Gewässers zur Einleitung hängt von einer Reihe von Faktoren ab, die mit der zulassenden Behörde abgestimmt werden müssen. Ein aktives Genehmigungsverfahren wurde im Rahmen dieses Projekts nicht durchgeführt. Im folgenden Kapitel werden jedoch die grundlegenden Aspekte eines solchen Verfahrens skizziert.

5.3 Genehmigungsrechtliche Aspekte

Durch die Aufbereitung der verschiedenen Rohwässer zur Zielqualität hin fallen Abwässer bzw. Konzentrate unterschiedlicher Qualität an. Diese müssen i. d. R. entweder in einen Vorfluter oder in eine Abwasserleitung eingeleitet werden bzw. direkt an eine Kläranlage geleitet werden. Die genaue Wahl der Einleitungsstelle ist abhängig von der Möglichkeit einer Konzentrateinleitung, die ggf. noch zu verlegen ist. Durch die Einleitung können hydrologische und hydrochemische Veränderungen im Fließgewässer stattfinden. Diese müssen vorab geprüft und bewertet werden.

Vor Beginn der Planungen und Untersuchungen sollten durch Vorgespräche mit den zuständigen Behördenvertretern Klarheit über die möglichen Anforderungen geschaffen werden.

5.3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Wasserrechtlich stellt das Einleiten von Stoffen in ein Gewässer nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG eine Gewässerbenutzung dar, die nach § 8 WHG eine wasserbehördliche Erlaubnis erfordert. Einen entsprechenden Anhang in der Abwasserverordnung (AbwV) für Abwässer aus Brauchwasserwerken gibt es noch nicht.

Aus umweltrechtlicher Sicht sind ggf. verschiedene Gutachten und Fachbeiträge als Bestandteil der Antragsunterlagen zu erstellen, wie z. B. zum Artenschutz, zur Eingriffsregelung und zur FFH-Verträglichkeit nach BNatSchG sowie zur Betroffenheit der Bewirtschaftungsziele nach EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Diese sind abhängig von Art und Umfang der zu erwartenden

Wirkungen der Einleitung und vom Umfang der möglichen Betroffenheit bestimmter Schutzgegenstände und –gebiete.

Im Rahmen der Anforderungen der WRRL sind die Auswirkungen eines Vorhabens auf die Bewirtschaftungsziele gemäß § 27 WHG bzw. § 44 i. V. m. § 27 WHG (Verschlechterungsverbot und Zielerreichungsgebot) der betroffenen Oberflächengewässer und Küstengewässer zu untersuchen. Mögliche Auswirkungen der Einleitungen des Konzentrats auf biologische und chemische Qualitätskomponenten, die für die Bewertung des Gewässerzustands maßgebend sind, sind zu betrachten. Bezogen auf geplante Einleitungen ist eine Immissionsbetrachtung bezogen auf den betroffenen Oberflächenwasserkörper erforderlich. Wichtig ist der Nachweis, dass ein Vorhaben nicht dem Verschlechterungsverbot und dem Zielerreichungsgebot der WRRL bzw. des WHG entgegensteht. Grundlage für die Bewertung sind insbesondere die Vorgaben der Oberflächengewässerverordnung (OgewV).

5.3.2 Abschätzung der Umweltauswirkungen

Vor der Zulassung einer Einleitung ist in der Regel eine Immissionsbetrachtung erforderlich. Dafür müssen beurteilungsrelevante Daten und Informationen über die hydrologischen, chemischen und biologischen Qualitätskomponenten des betroffenen Oberflächenwasserkörpers ermittelt, beschrieben und bewertet werden.

Im Rahmen einer Abschätzung zu möglichen Auswirkungen sind die von der Einleitung ausgehenden Wirkungen im Hinblick auf ihre Dauer, Intensität und Raum zu beschreiben. Auf Grundlage dieser Informationen kann eine differenzierte Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen auf die o.g. Qualitätskomponenten erfolgen. Methodische Hinweise zur Bearbeitung dieser Fragestellungen werden z. B. durch LAWA (2017, 2021) vorgegeben.

5.3.3 Beweissicherung

Vor Beginn einer Maßnahme müssen Informationen zur Hydromorphologie, Gewässerphysik, Gewässerchemie und Gewässerbiologie dokumentiert werden. Der aktuelle Zustand des Gewässers mit seinen Vorbelastungen wird auf der Basis naturschutzfachlicher und wasserrechtlicher Kriterien geprüft und hinsichtlich des Verschlechterungsverbotes gemäß den Qualitätsstandards Gewässerstruktur, Gewässerchemie und Gewässerbiologie diskutiert.

Abfluss. Der Abfluss ist ein Basisparameter, der insbesondere Grundlage für die Abschätzung möglicher Wirkungen durch eine veränderte Einleitung ist. Liegen keine Daten für den Ort der geplanten Einleitung vor, können Daten von nahegelegenen Pegeln – sofern vorliegend - bei den gewässerkundlichen Diensten angefragt werden oder Annahmen zum Abflussgeschehen auf Grundlage von Informationen zum Einzugsgebiet des Gewässers getroffen werden. Bezogen auf die Küstengewässer sind in ggf. auch hydrologische Modelle als Grundlage heranzuziehen.

Gewässerstrukturgüte. Die Gewässerstrukturgüte kann mit einer (einmaligen) Kartierung, zum Beispiel nach den Kriterien der LAWA (2019) und des Umweltbundesamtes (UBA, 2014), erfasst werden. In der Regel finden sich in den Bundesländern eigene Vorgaben.

Ökologische und biologische Bewertung: Gemäß der OGewV sind biologische Qualitätskomponenten zur Beschreibung und Bewertung des ökologischen Zustands bzw. Des ökologischen Potenzials der von der Einleitung betroffenen Oberflächengewässer bzw. Wasserkörper zu betrachten. Dazu gehören - je nach den gewässertypbezogenen Anforderungen - Qualitätskomponenten der Gewässerflora, wie z.

B. Makrophyten, und Qualitätskomponenten der Gewässerfauna, wie Makrozoobenthos (Wirbellose) oder die Fischfauna.

Chemisch-physikalische Parameter. Für die hydrochemische Betrachtung sind die Nähr- und Schadstoffe der OGewV als Grundlage für die Beschreibung und Bewertung möglicher Auswirkungen auf den Gewässerzustand zu untersuchen. In Abstimmung mit den Zulassungs- und Fachbehörden sollte eine Abstimmung über die Art und Umfang der Untersuchungen erfolgen. Dabei sollten vorrangig die Parameter betrachtet werden, deren Konzentrationen durch die Einleitung von Abwässern möglicherweise nachteilig verändert werden könnten.

5.3.4 Eingriffsregelung und Artenschutz

Es ist ggf. zu prüfen, ob die Maßnahmen zur Einleitung der Abwässer die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts erheblich beeinträchtigen können und die Eingriffsregelung gemäß § 14 ff. BNatSchG anzuwenden ist. Im Weiteren sind ggf. Artenschutzrechtliche Belange zu berücksichtigen. Demnach ist zu prüfen, ob durch die Einleitung von Abwässern zu Verbotstatbeständen gemäß § 44 Abs. 1 BNatSchG (Zugriffsverbote) i. V. m. § 44 Abs. 5 BNatSchG aufgrund vorkommender europarechtlich geschützter Arten und europäischer Vogelarten führt und ob sich daraus Konsequenzen für die geplante Einleitung ergeben.

6 Beschreibung Versorgungsszenarien

6.1 Entscheidungsmatrix zur Priorisierung der Ressourcen

Für eine erste grobe Priorisierung der Ressourcen eines Standortes wurde eine Bewertungsmatrix entwickelt (Anhang 10.3-1). Diese führt die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Bewertungskriterien, bzgl. Wassermenge, Wasserqualität, Aufwand für die wasserrechtlichen Genehmigungen, Aufbereitungsaufwand und Umweltauswirkungen zusammen. Darüber hinaus sind noch die Kriterien Infrastruktur (Rohrleitungsbau und Entnahme-/Übergabebauwerk) sowie Kosten- und Zeitaufwand enthalten. Die Matrix ist für eine erste qualitative Einschätzung gedacht, wenn noch keine detaillierten Informationen zu allen Ressourcen vorliegen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens waren zuvor unterschiedlich komplexe bzw. in den Datenanforderungen sehr detaillierte Varianten ähnlicher Matrizen entwickelt und testweise angewendet worden. Im Ergebnis, waren die Ressourcen aufgrund der sehr unterschiedlichen jeweiligen Datenlagen nicht mehr untereinander vergleichbar, sodass die Umsetzung als nicht zielführend verworfen wurde. Die nun erstellte Matrix weist eine geringere Detailtiefe auf, sodass eine grobe Abschätzung möglich ist. Am Beispiel des Standortes Wilhelmshaven wird die Nutzung der Matrix demonstriert (vgl. Anhang 10.3-2), unter Berücksichtigung der Ressourcen Oberflächenwasser, kommunales Abwasser der KA Wilhelmshaven und Meerwasser aus der Innenjade. Die Bewertungskriterien werden jeweils für die in Frage kommenden Wasserressourcen mit einer Punktzahl bewertet (0=gering, 1=mittel, 2=hoch). Das Ergebnis ist eine Gesamtpunktzahl je Ressource, welche die Priorisierung darstellt. Je niedriger die Gesamtpunktzahl, desto höher die Priorisierung.

Datenlage Wasserverfügbarkeit: es wird bewertet, ob ausreichend verfügbare Wassermenge einer Ressource vorhanden ist. Da es sich hier um ein Ausschlusskriterium handelt, scheidet eine Ressource aus, wenn ersichtlich ist, dass keine nutzbare Wassermenge vorhanden ist oder noch keine ausreichende Datenlage vorliegt, um dies abschätzen zu können. Aufgrund mangelnder Daten scheiden hier die Oberflächengewässer aus.

Infrastruktur (Netz, Entnahme): es erfolgt eine Einschätzung des genehmigungsrechtlichen und baulichen Aufwands für das erforderliche Verteilnetz, sowie für das Übergabe-/Entnahmebauwerk im Zulauf des Brauchwasserwerks. Der Aufwand für das Verteilnetz wird für die KA und das Meerwasser als "mittel" bewertet. Für die Entnahmeinfrastruktur erhält Meerwasser eine höhere (=schlechtere) Bewertung, aufgrund der Notwendigkeit des Baus eines Entnahmebauwerks, während die Übergabe des Rohwassers zwischen einer Kläranlage und einer weitergehenden Aufbereitung weniger aufwändig ist.

Rohwasserqualität und Wasseraufbereitung: aufgeteilt auf die Aspekte "Anfall von Reststoffen", "Betriebsmitteleinsatz", "Energieverbrauch" und "Rohwasserausbeute", wird der Aufbereitungsaufwand bewertet. Für alle vier Bereiche wird Meerwasser mit "hoch" bewertet und Kläranlagenablauf mit "mittel", da die Qualität des Meerwassers eine höhere Verschmutzung und einen hohen Salzgehalt aufweist.

Wasserrechtliche Genehmigung: es wird der Aufwand für den Erhalt einer Genehmigung zur Wasserentnahme und Abwassereinleitung bewertet. Der Aufwand für die Einleitgenehmigung wird für beide Ressourcen als "mittel" bewertet und für die Entnahmegenehmigung als "gering", da für beide Ressourcen keine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich ist.

Umweltauswirkungen des Gesamtvorhabens: es erfolgt eine Einschätzung der Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen, ausgehend von der Entnahme, Einleitung, dem Trassenbau und der Aufbereitung. Umweltauswirkungen der Entnahme werden bei beiden Ressourcen als "gering" bewertet und für die Einleitung und den Trassenbau als "mittel". Die Auswirkungen der Aufbereitung werden für Meerwasser als "hoch" und für die KA als "mittel" bewertet.

Zeit: es wird der zeitliche Aufwand für den Bau eines Brauchwasserwerks bewertet. Die Bewertung für Meerwasser ist "hoch", aufgrund der aufwändigeren Verfahrenstechnik und dem notwendigen Bau eines Entnahmebauwerks, während die KA mit "mittel" bewertet wird.

Kosten: es werden die gesamten Jahreskosten geschätzt. Sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten werden für das Meerwasser als "hoch" eingeschätzt, aufgrund der oben genannten Aspekte (erhöhter Aufbereitungsaufwand, Entnahmebauwerk). Die Kosten für die KA werden als "mittel" bewertet.

Insgesamt erhält die KA Wilhelmshaven eine höhere Priorisierung mit einer Gesamtpunktzahl von 0,8, im Vergleich zu einer Punktzahl von 1,5 für das Meerwasser aus der Innenjade.

6.2 Priorisierung der Ressourcen

Die Nutzung von Niederschlagswasser für die Versorgung von Elektrolyseuren wurde nicht im Detail betrachtet. Grund hierfür ist primär der hohe Flächenbedarf, der zum Auffangen und Speichern erforderlich ist, aber auch die große Schwankungsbreite der verfügbaren Menge. Hinzu kommt, dass im Betrachtungsraum vorwiegend eine Mischkanalisation vorhanden ist, die eine gezielte Niederschlagswasserabführung erschwert. Ebenfalls nicht weiter betrachtet wurde die Ressource Grundwasser. Das nutzbare Grundwasserangebot wird hier als gering ausgewiesen, da die Neubildungsrate im Betrachtungsraum als gering bis zehrend bewertet wird. Darüber hinaus sind die Auswirkungen durch die Entnahme von salzigem Grundwasser auf den gesamten Wasserhaushalt zum jetzigen Zeitpunkt nicht absehbar.

Die Nutzung von Kläranlagenablauf bietet den Vorteil, dass das Abwasser durch die Kläranlagen bereits eine Aufbereitung durchläuft und der Salzgehalt im Vergleich zu Meerwasser und küstennahen Oberflächengewässern geringer ist. Dadurch ist der Entsalzungsaufwand und damit der Energieaufwand bei der Reinstwasserproduktion geringer. Darüber hinaus ist die Nutzung von Kläranlagenablauf genehmigungsfrei. Allerdings reichen die Ablaufmengen der KA Wilhelmshaven und der KA Sande nicht aus, um den gesamten Wasserbedarf der Projekte zu decken.

Meerwasser ist theoretisch in unbegrenzter Menge verfügbar, allerdings ist die tatsächlich verfügbare Menge abhängig von der Art der Entnahme sowie der Entnahmestelle. Die Entnahme ist erlaubnisfrei, jedoch werden Auflagen im Zusammenhang mit dem Entnahmebauwerk erwartet, welche die Belange des Nationalparks Wattenmeer und seiner Schutzgüter angemessen berücksichtigen. Eine Herausforderung bei der technischen Aufbereitung ist der hohe Salzgehalt, der einen hohen Aufbereitungsaufwand erfordert.

Die Untersuchungen zu den Oberflächengewässern sowie zum künstlichen Gewässer Ems-Jade-Kanal haben gezeigt, dass die vorhandene Datenlage nicht ausreicht, um die nutzbaren Wassermengen zu ermitteln. Es sind lediglich theoretische Abschätzungen möglich, die darauf hindeuten, dass große Wassermengen über die Siele und Schöpfwerke in die Nordsee entwässert werden. Allerdings gibt es auch Zeiträume, in denen kein Abfluss vorhanden ist. Für die Wasserentnahme kämen entweder die Gewässer in Frage, für die die Unterhaltungsverbände verantwortlich sind, oder der Ems-Jade-Kanal. Es wird im nächsten Schritt an der Erweiterung der Daten im Rahmen eines Monitoringkonzeptes gearbeitet, um die verfügbaren Wassermengen ermitteln zu können.

Aufgrund der oben beschriebenen Aspekte wurde folgende Priorisierung der Ressourcen erarbeitet:

1. Kläranlagenablauf: Klarwasser ist bei der Entnahme nicht dem „natürlichen“ Wasserkreislauf zugehörig
2. Meerwasser als Direktentnahme: steht unbegrenzt zur Verfügung, die Entnahme ist erlaubnisfrei
3. Oberflächenwasser/Ems-Jade-Kanal: die Datengrundlage wird erweitert, um maximale Entnahmemengen und Entnahmepunkte abschließend bestimmen zu können.

6.3 Standort Wilhelmshaven

Für die Wasserversorgung der Projekte am Standort Wilhelmshaven sind die Ressourcen Kläranlagenablauf der Kläranlage Wilhelmshaven und Meerwasser priorisiert. Die Klarwassermenge der Kläranlage Wilhelmshaven reicht allerdings nicht für die Wasserversorgung aller Projekte. Dennoch ist diese Ressource für die Initialphase der Projekte die beste Option und auch darüber hinaus als Teilmenge der Wasserversorgung der Projekte in der finalen Ausbaustufe weiterhin relevant. Darüberhinausgehende Wasserbedarfe können für den Standort nur über die Aufbereitung von Meerwasser zur Verfügung gestellt werden.

Eine Entsorgung der anfallenden Restwässer aus der Wasseraufbereitung (Spülwässer und Konzentrate) kann ausschließlich in die Nordsee erfolgen. Im Rahmen des Projektes konnten keine projektspezifischen Daten zu den anfallenden Abwässern aus der Elektrolyse und dem Kühlprozess ermittelt werden. Daher wird im nachfolgenden Zeit- und Kostenplan ausschließlich die Wasserversorgung berücksichtigt.

Auf Basis der in der der Machbarkeitsstudie ermittelten Anforderungen an die Verfahrenstechnik wurden die Gesamtkosten für das Projekt ermittelt (Kostenrahmen). Diese Kosten basieren auf groben Kenn- und Erfahrungswerten der iwag, des OOWV, des IWW und des beauftragten Ingenieurbüros. Dementsprechend liegen der Kostenermittlung keine konkreten, detaillierten Planungen zu Grunde. Individuelle quantitative und qualitative Bedarfsangaben des Projektes sowie Standortfaktoren konnten hierbei nicht berücksichtigt werden. Für die Ermittlung des Kostenrahmens wurden die Hauptkomponenten der einzelnen Verfahrensstufen dimensioniert und hieraus der Platzbedarf sowie Kosten ermittelt. Zu den Hauptkomponenten zählen:

- Speicherbehälter (Zulauf-, Zwischen- und Produktspeicher)
- Pumpwerke (Zulaufpumpwerk, Feedpumpen für Ultrafiltration und Umkehrosmose)
- Chemikalienlagerung und Dosierung
- Ultrafiltration inkl. periphere Anlagenkomponenten und Verrohrung
- Umkehrosmose inkl. periphere Anlagenkomponenten
- Entsäuerung (inkl. periphere Anlagenkomponenten)

Bei der EMSR-Technik wurden pauschale Kostenansätze für die Trafostation, das Prozessleitsystem und die Niederspannungshauptverteilung berücksichtigt. Die Kosten für die Gebäude basieren auf den Flächen- und Volumenbedarfsabschätzungen und wurden mit 500 €/m³ umbautem Raum berücksichtigt. Kosten für zentrale Verrohrungen und Verkabelungen in den Gebäuden wurden pauschal basierend auf Projekten ähnlicher Größenordnung angenommen. Ebenso wurden Kosten für Gebäudedächer, Außenbereiche (Zaun, Tore, Beleuchtung und Entwässerung), Blitzschutz, Haustechnik und Telekommunikation durch pauschalierte Ansätze in den Kostenrahmen aufgenommen. Baunebenkosten und Planungsleistungen werden jeweils pauschal mit 20% berücksichtigt.

Nicht berücksichtigt wurden u.a. aus projekt- bzw. standortspezifischen Anforderungen resultierende Kosten. Diese können aber zu erheblichen Kostensteigerungen führen. Beispiele hierfür sind Anforderungen, die aus den Bedingungen des Baugrundes resultieren (z.B. höhere Kosten für die Gründung als berücksichtigt), oder Belastungen des Baugrundes (Entsorgungskosten für kontaminierte Böden). Grundstückskosten und Kosten, die aus erhöhten Anforderungen an eine Behandlung der Abwässer (Spülwässer und Konzentrate) resultieren, sind ebenfalls nicht berücksichtigt. Auch erhöhte Kosten bei der Bereitstellung der Stromversorgung sowie einer Notstromversorgung oder einer (teilweisen) Eigenstromversorgung mit PV sind in dem ermittelten Kostenrahmen nicht vorgesehen.

Für den Standort Wilhelmshaven wird von einer Nutzung der bestehenden Infrastruktur ausgegangen. Die Kosten für einen Neubau dieser Komponenten werden hier nicht berücksichtigt. Dies betrifft beispielsweise das Einleitbauwerk. Das Verteilnetz zwischen den Standorten der Wasseraufbereitung und der Anwendung ist bei der Erstellung des Kostenrahmens nicht berücksichtigt.

Auf Grund des frühen Planungsstandes und vieler projekt- und standortspezifischer Anforderungen ist ein Kostenaufschlag von 40% auf alle Komponenten berücksichtigt. Die Kosten wurden auf Basis des Kostenstandes des Jahres 2025 (Kostenstand II. Quartal 2025) ermittelt. Kosten aus

Vergleichsprojekten aus Vorjahren wurden mit einer pauschalen jährlichen Kostensteigerung berücksichtigt. Eine zukünftige Kostenentwicklung wird im Rahmen der Machbarkeitsstudie nicht prognostiziert, weitere Kosten- / Preissteigerungen (z.B. für Personal, Materialien, Energie) werden nicht eingerechnet.

Der nachfolgenden Tabelle sind die Kostenrahmen der erforderlichen Investition unterteilt nach den Gewerken Ingenieurbau, Verfahrenstechnik, Elektrotechnik und Automatisierung zu entnehmen. Für die Bereitstellung von bis zu 384 m³/h teilentsalztes Wasser aus dem Klarwasser der Kläranlage Wilhelmshaven für die finale Behandlung zu Reinstwasser für die Elektrolyse ist unter Berücksichtigung der o.g. Rahmenbedingungen eine Investition in Höhe von 68 Mio. € erforderlich. Wird Meerwasser als Ressource genutzt, betragen die Investitionskosten für Bereitstellung von 427 m³/h teilentsalztes Wasser für die finale Behandlung zu Reinstwasser für die Elektrolyse und 427 m³/h Kühlwasser ca. 121 Mio. €.

Tabelle 4 Investitionskosten der Wasseraufbereitung für den Standort Wilhelmshaven

	Aufbereitungskapazität			Investitionskosten			
	Rohwassermenge	Teilentsalztes Wasser zur Erstellung von Reinstwasser für Elektrolyse	Kühlwasser	*inkl. Pauschalen für Unsicherheiten, Baunebenkosten und Planungsleistungen; exkl. Projekt- und standortspezifischen Anforderungen; exkl. Entnahme und Einleitbauwerke			
				Ingenieurbau	Verfahrenstechnik	Elektrotechnik	Automatisierung
m ³ /h	m ³ /h		€	€	€	€	
Kläranlage	640	384		29.150.000	21.790.000	10.410.000	6.360.000
Meerwasser	2716	427	427	44.970.000	46.540.000	21.320.000	7.670.000

Die Zeitplanung wurde auf Basis der Ergebnisse der Machbarkeitsstudie entwickelt. Hierbei sind analog zu der Ermittlung des Kostenrahmens keine projekt- und standortspezifischen Anforderungen und keine Pufferzeiten eingeplant. Die im Kostenrahmen nicht berücksichtigten Komponenten wie Entnahme- und Einleitbauwerke, das Verteilnetz und Speicher zum Ausgleich von Verfügbarkeiten der Ressourcen, die auf saisonale Effekte oder Auswirkungen des Klimawandels zurückzuführen sind, sind in der Zeitplanung ebenfalls nicht berücksichtigt.

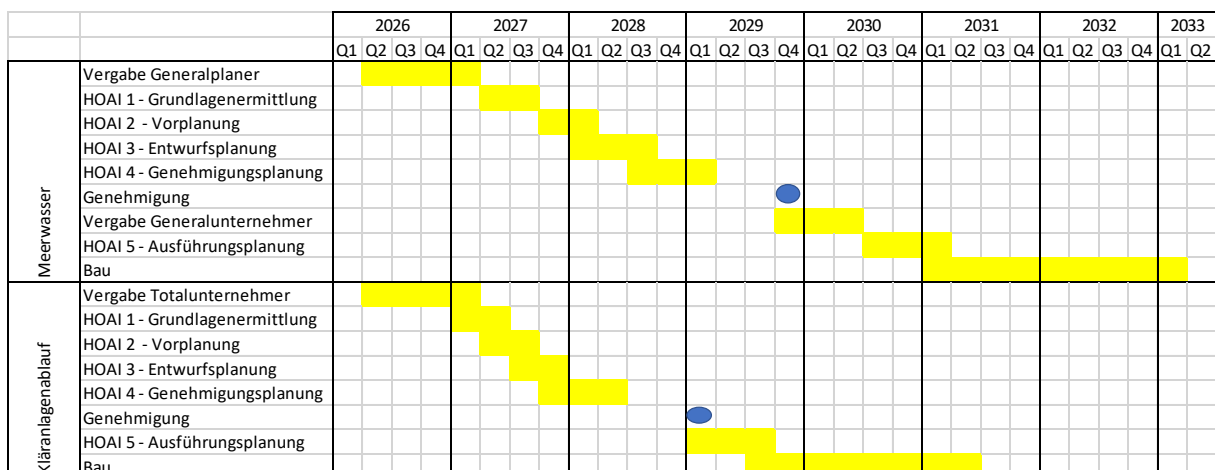


Abbildung 15 Zeitplan der Wasseraufbereitung für den Standort Wilhelmshaven

6.4 Standort Sande

Priorisierte Wasserressourcen sind die Kläranlage Sande, Meerwasser und Oberflächenwasser. Auf Grund der geringen Mengen kann der Ablauf der Kläranlage Sande nur in der Initialphase oder als ergänzende Ressource für die nächsten Ausbaustufen angesehen werden. Für die Wasserversorgung der folgenden Ausbaustufen sind Meerwasser und die Nutzung von Oberflächenwasser aus dem Ems-Jade-Kanal potenzielle Versorgungsoptionen. Die nahezu unbegrenzte Verfügbarkeit von Meerwasser steht hierbei der großen Entfernung zwischen der Meerwasserentnahme und dem Standort der Elektrolyseprojekte gegenüber. Aufgrund einer Kooperation zwischen dem Wasserstoffparkbetreiber Friesen Elektra in Sande und dem Kavernenbetreiber Storag Etzel in Friedeburg, kann voraussichtlich die bereits bestehende Meerwasserleitung von Storag Etzel genutzt werden. Aus diesem Grund sind die Kosten für eine Meerwasserleitung nicht berücksichtigt. Voraussetzung für eine Nutzung des Ems-Jade-Kanals als Ressource ist die Erweiterung der Datenbasis hinsichtlich Qualität und Quantität unter Berücksichtigung der saisonalen Schwankungen und potentieller Entwicklungen, die aus den Folgen des Klimawandels resultieren.

Eine Einleitung der anfallenden Restwässer aus der Wasseraufbereitung (Spülwässer und Konzentrate) kann potentiell nach einer entsprechenden Wasserbehandlung in die Nordsee erfolgen. Weitere Alternativen sind noch zu prüfen. Im Rahmen des Projektes konnten keine projektspezifischen Daten zu den anfallenden Abwässern aus der Elektrolyse und dem Kühlprozess ermittelt werden. Daher wird im nachfolgenden Zeit- und Kostenplan ausschließlich die Wasserversorgung berücksichtigt.

Auf Basis der in der der Machbarkeitsstudie ermittelten Anforderungen an die Verfahrenstechnik wurden die Gesamtkosten für das Projekt ermittelt (Kostenrahmen). Diese Kosten basieren auf groben Kenn- und Erfahrungswerten der iwag, des OOWV, des IWW und des beauftragten Ingenieurbüros. Dementsprechend liegen der Kostenermittlung keine konkreten, detaillierten Planungen zu Grunde. Individuelle quantitativen und qualitativen Bedarfsangaben des Projektes sowie Standortfaktoren konnten hierbei nicht berücksichtigt werden. Für die Ermittlung des Kostenrahmens wurden die Hauptkomponenten der einzelnen Verfahrensstufen dimensioniert und hieraus der Platzbedarf sowie Kosten ermittelt. Zu den Hauptkomponenten zählen:

- Speicherbehälter (Zulauf-, Zwischen- und Produktspeicher)
- Pumpwerke (Zulaufpumpwerk, Feedpumpen (Ultrafiltration und Umkehrosiose)
- Chemikalienlagerung und Dosierung
- Ultrafiltration inkl. periphere Anlagenkomponenten und Verrohrung
- Umkehrosiose inkl. periphere Anlagenkomponenten
- Entsäuerung (inkl. periphere Anlagenkomponenten)

Bei der EMSR-Technik wurden pauschale Kostenansätze für die Transformatoren, das Prozessleitsystem und die Niederspannungshauptverteilung berücksichtigt. Die Kosten für die Gebäude basieren auf den Flächen- und Volumenbedarfsabschätzungen und wurden mit 500 €/m³ umbauten Raum berücksichtigt. Kosten für zentrale Verrohrungen und Verkabelungen in den Gebäuden wurden pauschal basierend auf Projekten ähnlicher Größenordnung angenommen. Ebenso wurden Kosten für Gebäudedächer, Außenbereiche (Zaun, Tore, Beleuchtung und Entwässerung), Blitzschutz Haustechnik und Telekommunikation durch pauschalierte Ansätze in dem Kostenrahmen

aufgenommen. Baunebenkosten und Planungsleistungen werden jeweils pauschal mit 20% berücksichtigt.

Nicht berücksichtigt wurden u.a. aus projekt- bzw. standortspezifischen Anforderungen resultierende Kosten. Diese können aber zu erheblichen Kostensteigerungen führen. Beispiele hierfür sind Anforderungen die aus den Bedingungen des Baugrundes resultieren (z.B. höhere Kosten für die Gründung als berücksichtigt) oder Belastungen des Baugrundes (Entsorgungskosten für kontaminierte Böden ist nicht berücksichtigt) resultieren. Grundstückskosten und Kosten die aus erhöhten Anforderungen an ein Behandlung der Abwässer (Spülwässer und Konzentrate) sind ebenfalls nicht berücksichtigt. Erhöhte Kosten bei der Bereitstellung der Stromversorgung sowie eine Notstromversorgung und eine teilweise Eigenstromversorgung mit PV sind in dem ermittelten Kostenrahmen ebenfalls nicht vorgesehen. Ebenfalls nicht berücksichtigt für die Erstellung dieses Kostenrahmens sind das Verteilnetz zwischen den Standorten der Wasseraufbereitung sowie Speicher der Ressourcen, die die schwankende Verfügbarkeit auf Grund von saisonalen Effekten oder Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt.

Auf Grund des frühen Planungsstandes und vieler projekt- und standortspezifischen Anforderungen ist ein Kostenaufschlag von 40% auf alle Komponenten berücksichtigt. Die Kosten wurden auf Basis des Kostenstandes des Jahres 2025 (Kostenstand II. Quartal 2025) ermittelt. Kosten aus Vergleichsprojekten aus Vorjahren wurden mit einer pauschalen jährlichen Kostensteigerung berücksichtigt. Eine zukünftige Kostenentwicklung wird im Rahmen der Machbarkeitsstudie nicht prognostiziert, weitere Kosten- / Preissteigerungen (z.B. für Personal, Materialien, Energie) werden nicht eingerechnet.

Der nachfolgenden Tabelle sind die Kostenrahmen der erforderlichen Investitionen unterteilt nach den Gewerken Ingenieurbau, Verfahrenstechnik, Elektrotechnik und Automatisierung zu entnehmen. Für die Bereitstellung von bis zu 31 m³/h teilentsalztes Wasser aus dem Klarwasser der Kläranlage Sande für die finale Behandlung zu Reinstwasser für die Elektrolyse ist unter Berücksichtigung der o.g. Rahmenbedingungen eine Investition in Höhe von ca. 14 Mio. € erforderlich. Wird Meerwasser als Ressource genutzt, betragen die Investitionskosten für Bereitstellung von 427 m³/h teilentsalztes Wasser für die finale Behandlung zu Reinstwasser für die Elektrolyse und 427 m³/h Kühlwasser ca. 121 Mio. €. Für die Ermittlung des Kostenrahmens für die Nutzung von Oberflächenwasser wurde eine Produktionskapazität von 28 m³/h Reinstwasser und 66 m³/h Kühlwasser herangezogen. Hieraus resultiert eine erforderliche Investition von etwa 24 Mio. €.

Tabelle 5 Investitionskosten der Wasseraufbereitung für den Standort Sande

	Aufbereitungskapazität			Investitionskosten *inkl. Pauschalen für Unsicherheiten, Baunebenkosten und Planungsleistungen; exkl. Projekt- und standortspezifischen Anforderungen; exkl. Entnahme und Einleitbauwerke; exkl. Saisonale Speicher			
	Rohwassermenge m ³ /h	Teilentsalztes Wasser zur Erstellung von Reinstwasser für Elektrolyse m ³ /h	Kühlwasser	Ingenieurbau	Verfahrenstechnik	Elektrotechnik	Automatisierung
				€	€	€	€
Kläranlage	48	31	0	6.220.000	2.760.000	2.220.000	2.970.000
Meerwasser	2716	427	427	44.970.000	46.540.000	21.320.000	7.670.000
Oberflächenwasser	137	28	66	10.370.000	5.960.000	4.410.000	3.330.000

Die Zeitplanung wurde auf Basis der Ergebnisse der Machbarkeitsstudie entwickelt. Hierbei sind analog zu der Ermittlung des Kostenrahmens keine projekt- und standortspezifischen Anforderungen und keine Pufferzeiten eingeplant. Die im Kostenrahmen nicht berücksichtigten Komponenten, wie Entnahme- und Einleitbauwerke, das Verteilnetz und Speicher zum Ausgleich von Verfügbarkeiten der Ressourcen, die auf saisonale Effekte oder Auswirkungen des Klimawandels zurückzuführen sind, sind in der Zeitplanung ebenfalls nicht berücksichtigt.

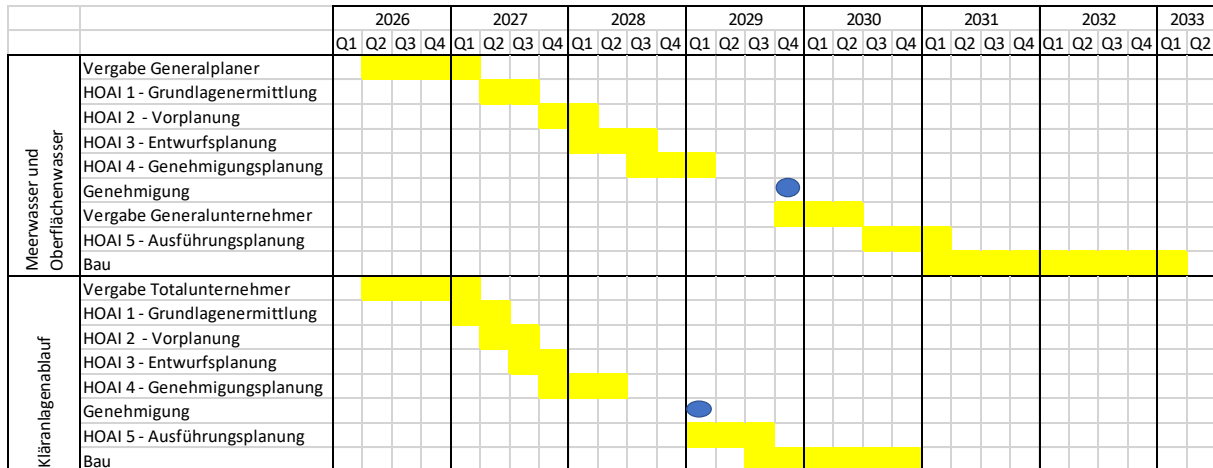


Abbildung 16 Zeitplan der Wasseraufbereitung für den Standort Sande

7 Ergebnistransfer

7.1 Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung

Der Ergebnis- und Wissenstransfer im Forschungsprojekt erfolgte über mehrere, auf die jeweiligen Zielgruppen abgestimmte Kommunikationswege. Für die wissenschaftliche Fachwelt wurden die zentralen Erkenntnisse des Projekts in einem Fachartikel mit dem Titel "Wasserversorgung für H₂-Projekte im Nordwesten Niedersachsens" in der DVGW Energie | Wasser-Praxis veröffentlicht (Krömer et al. 2025). Auch über das IWW-Journal und die IWW-Homepage wurden bereits Zwischenergebnisse veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen der Ergebnisse werden auch nach Abschluss des Forschungsprojektes in Fachzeitschriften erfolgen. Darüber hinaus präsentierten die Projektmitglieder ihre Ergebnisse auf nationalen Konferenzen, um den Austausch mit Expertinnen und Experten aus angrenzenden Forschungsfeldern zu fördern und eine wissenschaftliche Diskussion anzustoßen. In diesem Zusammenhang haben OOWV und iwag bei den Veranstaltungen IWW Kolloquium "Wasserstoffproduktion – Bedeutung für die Wasserwirtschaft" und "Grüner Wasserstoff aus Abwasser - Erkenntnisse und Perspektiven aus dem Projekt KA4H₂" Zwischenergebnisse des Projekts präsentiert und zur Diskussion gestellt. Durch das IWW erfolgte die Präsentation der Ergebnisse auf der Essener Tagung und im IWW-Beirat.

Den Mitgliedern des Energy Hub, als Interessenvertretung der Elektrolyseprojekte des Landkreises Friesland und der Stadt Wilhelmshaven, wurden die Zwischenergebnisse bereits im ersten Quartal 2025 im Rahmen einer digitalen Veranstaltung vorgestellt und sie wurden konstruktiv diskutiert.

Um die interessierte Öffentlichkeit einzubeziehen, setzte das Projektteam auf leicht zugängliche und verständlich aufbereitete Informationsformate. Ein projektbegleitender Flyer vermittelte einen kompakten Überblick über Ziele, Vorgehen und erste Resultate. Zusätzlich wurde ein öffentlicher Zwischenbericht erstellt, der den aktuellen Forschungsstand transparent darstellte und den Fortschritt

des Projekts nachvollziehbar machte (Ahlhorn et al. 2025). Ergänzt wurde dies durch Informationsveranstaltungen, in denen Bürgerinnen und Bürger die Möglichkeit hatten, sich direkt mit den Forschenden auszutauschen, Fragen zu stellen und Rückmeldungen zu geben (Informationsabend zum Thema Wasserstoffherstellung in Friesland der NABU-Ortsgruppe Sande, September 2024 und OOWV-Informationsabend zum Thema Wasserstoffherstellung in Friesland Sande, Mai 2025).

Durch diese mehrstufige Strategie des Ergebnistransfers konnte gewährleistet werden, dass sowohl die wissenschaftliche Gemeinschaft als auch die breite Öffentlichkeit angemessen über die Ergebnisse und den Mehrwert des Projektes informiert wurden.

7.2 Methodik Leitfaden

Im Rahmen des Projektes und basierend auf den während der Bearbeitung gesammelten Erkenntnissen, wurde ein orientierender Leitfaden erarbeitet, der die systematische Vorgehensweise für die Durchführung von Machbarkeitsstudien zur nachhaltigen Wasserversorgung der grünen Wasserstoffproduktion darstellt. Ziel ist es, den Wasserbedarf für die Wasserstoffproduktion nachhaltig zu decken, ohne bereits bestehende, lokale Wasserbedarfe und -nutzungen zu gefährden oder untragbare Nutzungskonflikte auszulösen. Neben den projektspezifischen Erfahrungen wurden aber auch Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten mitgedacht.

Der Leitfaden soll als eine Entscheidungshilfe bei der Wahl der zu nutzenden Wasserressource für die grüne Wasserstoffproduktion dienen. Er soll dazu beitragen den Wasserbedarf für die Wasserstoffproduktion nachhaltig zu decken, ohne bereits bestehende, lokale Wasserbedarfe und -nutzungen zu gefährden. Da bei der Wasserstoffproduktion Wasser für die jeweiligen Nutzungen aufbereitet werden muss, werden in diesem Leitfaden auch die Themen Aufbereitung und Entsorgung adressiert. Der Aufbau des Leitfadens wurde so gewählt, dass er sich an den wichtigsten Schritten im Planungsprozess orientiert, von der Ressourcensuche bis zur tatsächlichen Nutzung. Dabei wurde vor allem Wert auf die regulatorischen Vorgaben gelegt, um solchen Akteuren den Einstieg zu erleichtern, die nicht oder nur unregelmäßig mit wasserwirtschaftlichen Themen arbeiten.

Der Leitfaden wurde in einem Stakeholderworkshop im ersten Halbjahr mit Vertretern von Projekten des Energy Hubs interaktiv diskutiert. Hierfür wurden Zwischenergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und Anforderungen an den Leitfaden erarbeitet. Um die projektspezifischen Anforderungen berücksichtigen und die Anforderungen an Geheimhaltungsvereinbarungen wahren zu können, wurden die Umsetzungen der Anforderungen des Leitfadens jeweils bilateral mit repräsentativen Projekten des Energy Hub diskutiert und in der Finalisierung des Leitfadens aufgenommen.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen durch verschiedene Landeswassergesetze und deren Umsetzung durch die Behörden, kann der Leitfaden nicht als Verfahrensbuch verwendet werden. Die länder- und kreisspezifischen Vorgaben müssen mit der gesetzlich zuständigen Wasserbehörde, die die Genehmigungsverfahren führt, sorgfältig abgestimmt werden.

8 Fazit

Die Wasserstoffindustrie ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende in Deutschland und kann die Dekarbonisierung verschiedener Industrien unterstützen. Gleichzeitig wird sie den lokalen Wasserbedarf erhöhen, was zu Herausforderungen für die Wasserwirtschaft führen kann. Damit die Produktion von grünem Wasserstoff in keiner Konkurrenz zur lokalen Trinkwasserversorgung steht, wurde im Rahmen dieser Studie die Nutzung alternativer Ressourcen für die Projekte des Energy Hubs in Wilhelmshaven und Sande untersucht.

Als grundlegende Randbedingung für die Planung der Wasserversorgung eines Wasserstoffstandortes, wurde zunächst der Wasserbedarf ermittelt. Unsicherheiten oder Änderungen des Wasserbedarfs wirken sich sowohl auf die Bewertung der Wasserressourcen und Anlagengrößen, als auch die genehmigungsrechtlichen Anforderungen aus. Auch im Rahmen dieser Studie haben Unklarheiten bezüglich des Wasserbedarfs zu zeitlichen Verzögerungen geführt. Nach aktueller Schätzung beträgt der gesamte Wasserbedarf des Energy Hubs in den Endausbaustufen in 2035 etwa 20 Mio. m³/a. Aufgrund der großen Mengen erfordert die Wasserversorgung eine Kombination aus verschiedenen Ressourcen.

Für die Bewertung einer Ressource sind belastbare Daten zur verfügbaren Wassermenge und -qualität erforderlich. Diese Daten sind nicht immer verfügbar, wie dies am Beispiel der betrachteten Oberflächengewässer deutlich wurde. So ist auch für die Ermittlung der nutzbaren Wassermengen des Ems-Jade-Kanals zusätzlicher zeitlicher Aufwand für ein Monitoringkonzept, über den Rahmen der Studie hinaus, erforderlich. Im Verlauf der Studie hat es sich als hilfreich erwiesen, frühzeitigen Kontakt zu den relevanten wasserwirtschaftlichen Akteuren herzustellen, z.B. Behörden oder Unterhaltungsverbände, um die Datenermittlung zu unterstützen, sowie erste Einschätzungen zu den wasserrechtlichen Anforderungen zu ermitteln. Auf dieser Basis konnten für die beiden Standorte Wilhelmshaven und Sande eine Priorisierung der Ressourcen und erste verfahrenstechnische Konzepte für die Wasserversorgung entwickelt werden.

Auf Grund der zukünftig steigenden Nutzungskonkurrenz um die Ressource Wasser, vertritt der OÖVV die Position, dass innerhalb des Verbandsgebietes das süße Grundwasser nicht für die mittel- bzw. langfristige Versorgung größerer Wasserstoffprojekte zur Verfügung steht. Aufgrund der zeitlich sehr engen Planungshorizonte der Wasserstoffprojekte in der Region und der erfahrungsgemäß langwierigen Wasserrechtsverfahren für die Entnahme wird aber eine kurzfristige und limitierte (in Menge und Zeit) Anschubversorgung mit Trinkwasser aus dem bestehenden Versorgungssystem erforderlich sein. Die Entwicklung, Projektierung und Umsetzung von Brauchwasseranlagen zur Aufbereitung alternativer Ressourcen wird ebenfalls geraume Zeit in Anspruch nehmen.

Für den Standort Wilhelmshaven wird die Versorgung der ersten Ausbaustufen durch die KA Wilhelmshaven angestrebt, welche im Vergleich zu Meerwasser einen geringeren Aufbereitungsaufwand erfordert, aufgrund des geringeren Salzgehaltes. Um darüberhinausgehende Wasserbedarfe zu decken, wird die Nutzung von Meerwasser priorisiert. Der primäre Vorteil liegt hier in der unbegrenzten Verfügbarkeit der Ressource. Auch für den Standort Sande wird für die erste Ausbaustufe kommunales Abwasser der KA Sande bevorzugt. Aufgrund der geringen Wasserverfügbarkeit ist hier ebenfalls eine Kombination mit anderen Ressourcen erforderlich. Bevorzugt wird hier Meerwasser und Oberflächenwasser aus dem Ems-Jade-Kanal.

Für die Entsorgung der Restwasserströme aus der Wasseraufbereitung wird die Innenjade vorgesehen, bzw. werden für Sande noch Alternativen untersucht. Im Rahmen der Studie konnten keine konkreten Daten zu der Zusammensetzung der Abwasserströme aus dem Elektrolyseprozess ermittelt werden. Dies erfordert weiteren Forschungsbedarf.

Zusammenfassend konnte im Rahmen dieses DBU-geförderten Projektes nachgewiesen werden, dass die Wasserbedarfe durch die Kombination dieser alternativen Ressourcen abzudecken sind und die zur Aufbereitung erforderlichen Technologien dem Stand der Technik entsprechen. Nach Beendigung des Projektes können, basierend auf den Projektergebnissen, projektspezifisch weitergehende Untersuchungen zu den Entnahmen aus den einzelnen Ressourcen ebenso wie zu den Einleitungen durchgeführt und die verfahrenstechnischen Konzepte weiter detailliert werden. Somit kann diese Machbarkeitsstudie als Basis für die großtechnische Umsetzung der alternativen Wasserversorgung des Energy Hubs Wilhelmshaven dienen.

Durch die Veröffentlichung der Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Projekt, werden diese über den Projektstandort hinaus für die Wasserversorgung für die Neuansiedlung von großskaligen Industrieprojekten mit hohen Anforderungen an die Wasserqualität, wie Wasserstoffelektrolyse oder Projekte aus dem Bereich Chip-Produktion, nutzbar.

9 Literaturverzeichnis

Ahlhorn, F.; Kübeck, C.; Gerdes, J.-U.; Karges, U.; Riedel, T.; Krömer, K.; Steffen, L.-O.; Leverenz, K.; Matoba, M.; Rohn, A.; Koti, M.; Röher, D. (2025) Zwischenbericht: Integrales Wassermanagement für die Wasserstoffproduktion – Entwicklung eines Leitfadens für energiewirtschaftliche Planungs- und Zulassungsverfahren.

AQS Baden-Württemberg (2008) Ringversuch 2/2008, TW A1 – Anionen, Analytische Qualitätssicherung Baden-Württemberg, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart

Bartholomä, A., Kubicki, A., Badewien, T. H., and Flemming, B. W. (2009). *Ocean Dyn.* 59, 213–225

BDEW (2024) Handreichung plus Checkliste zur wasserfachlichen Standortprüfung von industriellen Wasserstoffproduktionsstätten

Bender F. [H RSG.] (1984): *Angewandte Geowissenschaften, Teil 3: Geologie der Kohlenwasserstoffe, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, angewandte Geowissenschaften in Raumplanung und Umweltschutz.*- Stuttgart (Enke)

Böning P., Ehlert C., Niggemann J., Schnetger B. and Pahnke K. (2017) Thallium dynamics in the Weser estuary (NW Germany). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 187, 146–151

Böning, Philipp, Schnetger, Bernhard, Beck, Melanie, Brumsack, Hans-Jürgen, 2018. Thallium dynamics in the southern North Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 227, 143–155

Bormann, H., E. Gramlich, F. Müller, M. Schröder, S. Vodegel und M. Sievers. 2020. Keine Energie ohne Wasser – Zukunftsszenarien und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserwirtschaft unter gravierend veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Abschlussbericht der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef.

Egner et al. (2024): Beurteilung von Konzentrateinleitungen. Informationen für Behörden und

FGG Weser (2021): "Bewirtschaftungsplan 2021 bis 2027 für die Flussgebietseinheit Weser gemäß § 83 WHG".

Houben, G.J., Sitnikova, M.A., Post, V.E.A., 2017. Terrestrial sedimentary pyrite as a potential source of trace metal release to groundwater – a case study from the Emsland, Germany. *Appl. Geochem.* 76, 99–111

IBL UmweltPlanung (2007) Gewässerökologisches Gutachten: Potenziale zur Kühlwassernutzung am Kraftwerksstandort Wilhelmshaven.

Iwona, K.-B.; Gono, M.; Svehlakova, H. (2024) Water for Green Hydrogen Production. In: 24th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE).

Jaestedt (2010): Ersteinschätzung der Umwelterheblichkeit der Einleitung von Salzabwasser aus der Kaliproduktion der K+S KALI GmbH in die Innenjade, Gutachten Ing.-Büro Jaestedt + Partner im Auftrag des Runden Tisches 2010

Jung, Wolfgang/Rath, Stephan (2023): Dekarbonisierung der industriellen Prozesswärme im energieintensiven Mittelstand am Beispiel des Klimahafens Gelsenkirchen als klimaneutraler Industrie-

und Logistikstandort. Abschlussbericht über ein Studienprojekt, gefördert unter dem Az: 38168/01-23 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, März 2023.

K. Krömer, L.-O. Steffen, K. Leverenz, M. Matoba (2025) Wasserversorgung für H2-Projekte im Nordwesten Niedersachsens. DVGW energie | wasser-praxis, 76(9) 2025.

Köppel, W., Wietschel, M., Gnann, T., Fleiter, T., Lux, B., Manz, P., Rehfeldt, M., Speth, D., Steinbach, J. and Pfluger, B. (2023) Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem – eine systemische Analyse. Energie | wasser-praxis 01/2023.

Krömer, K.; Steffen, L.-O.; Leverenz, K.; Matoba, M. (2025) Wasserversorgung für H2-Projekte im Nordwesten Niedersachsens. DVGW energie | wasser-praxis, 76(9) 2025.)

LAWA (2017) Handlungsempfehlung Verschlechterungsverbot, Ständiger Ausschuss der LAWA Wasserrecht (LAWA-AR)

LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft) [Hrsg.] (2019): „Verfahrensempfehlung zur Gewässerstrukturkartierung – Verfahren für kleinen bis mittelgroße Fließgewässer“

Marggraf G. (2001): Geogene und anthropogene Einfluss auf ein isoliertes System (Düneninseln) in Bezug auf die Hydrochemie des Grundwassers, Dissertation

Saravia, F.; Gehrmann, S. (2024) Gesamtbedarf für die Wasserelektrolyse. Wie groß ist der Wasserfußabdruck einschließlich der Kühlsysteme?, Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/wasserelektrolyse-gesamtwasserbedarf-factsheet-dvgw.pdf>.

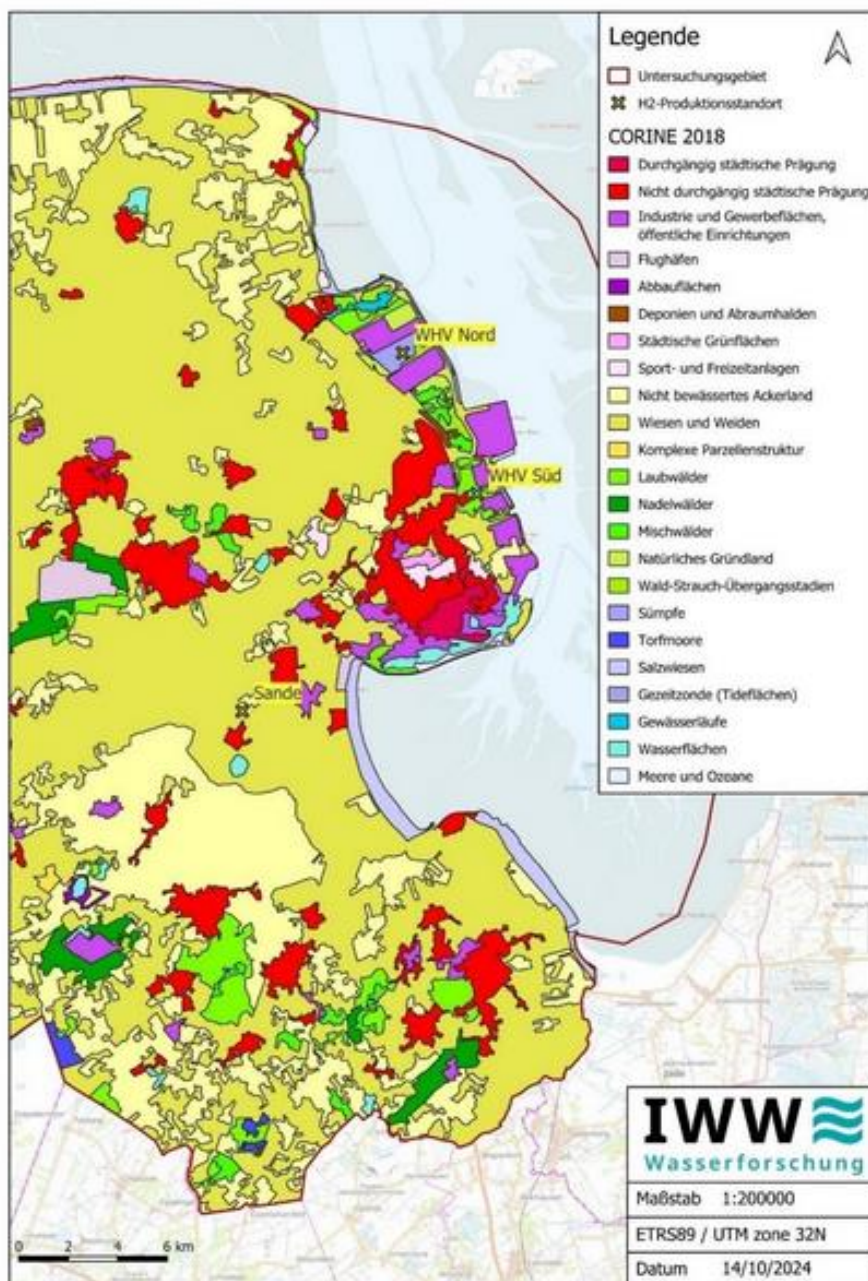
Schloemer, S., Oest, J., Illing, S.J., Elbracht, J., Blumenberg, M., 2018. Spatial distribution and temporal variation of methane, ethane and propane background levels in shallow aquifers – a case study from Lower Saxony (Germany). J. Hydrol.: Reg. Stud. 19, 57–79

Umweltbundesamt (2014) Hydromorphologische Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen, UBA Texte 43/2014

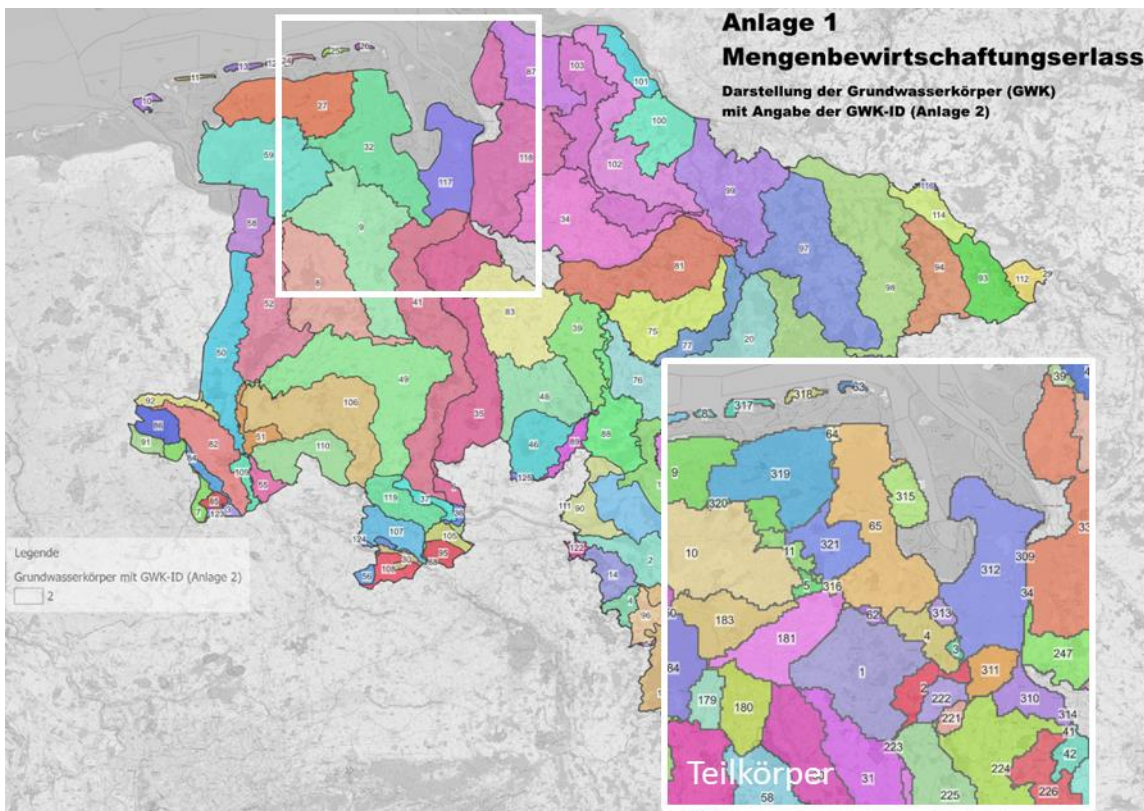
Wasserversorger. Ergebnisbericht des BMBD-Verbundprojektes KonTriSol

10 Anhang

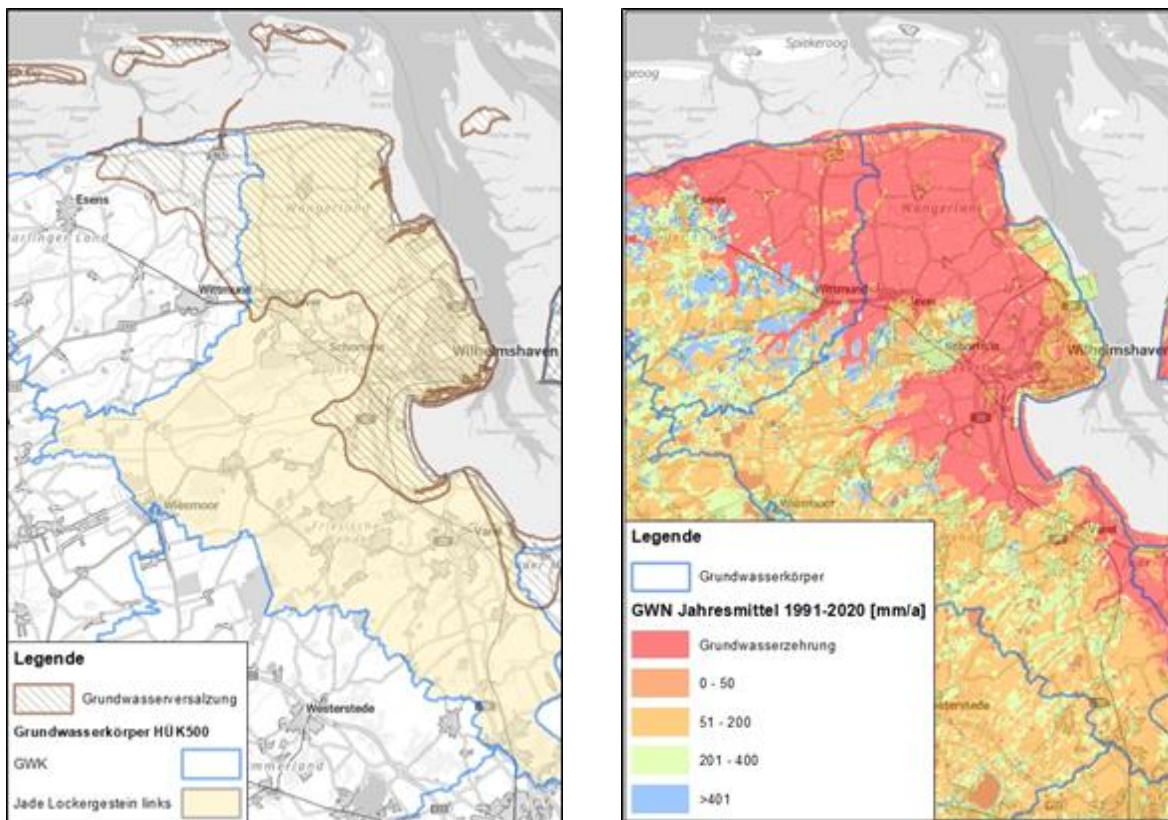
10.1 Anhänge zum Kapitel „Identifikation und Bewertung der verfügbaren Wasserressourcen“



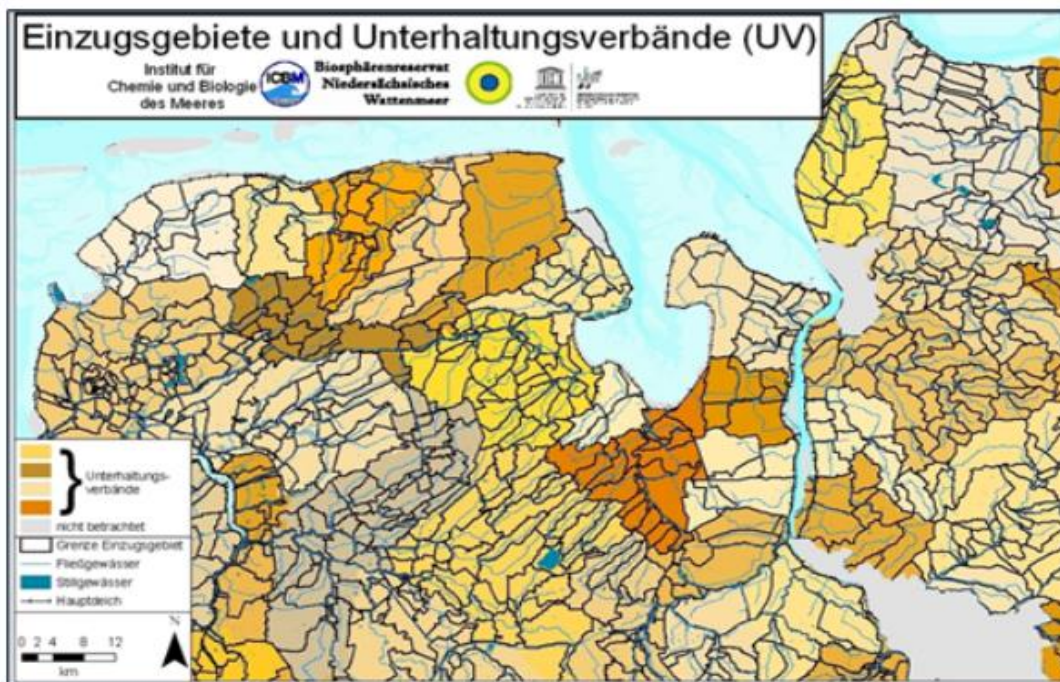
Anhang 10.1-1 Landnutzung im Untersuchungsgebiet



Anhang 10.1-2 Grundwasserkörper und Teilkörper nach Mengenbewirtschaftungserlass (Quelle: MBE, Stand 2024)



Anhang 10.1-3 Links: Salz-Süßwassergrenze im Grundwasser. (Quelle: NIBIS Kartenserver); Rechts: Grundwasserneubildung (Jahreswerte 1991-2020) auf der Ostfriesischen Halbinsel. (Quelle: NIBIS Kartenserver, mGROWA22, Abruf: Juni 2024)



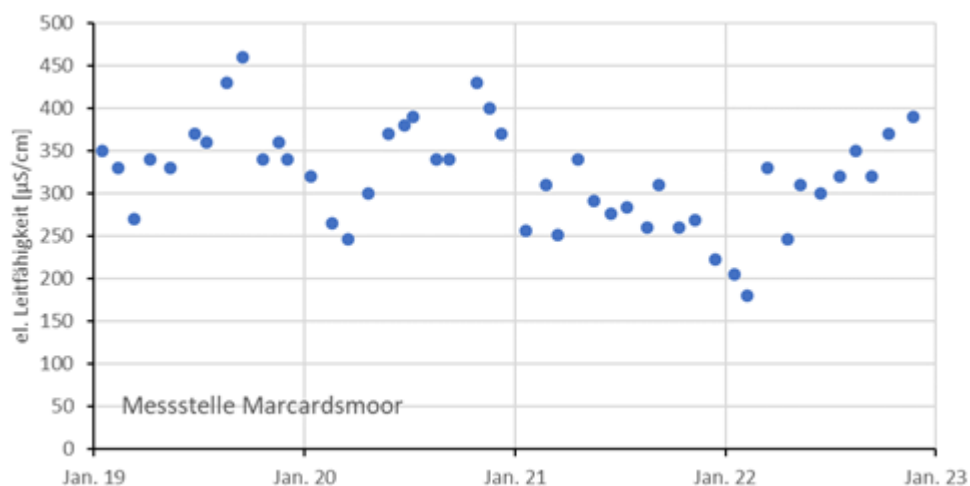
Anhang 10.1-4 Grenzen der Unterhaltungsverbände im niedersächsischen Küstenraum mit den jeweiligen Einzugsgebieten. Quelle: verändert nach Ahlhorn et al. (2010)



Anhang 10.1-5 Oberflächengewässer und Auslassbauwerke

Anhang 10.1-6 Zusammensetzung des Wassers am Schöpfwerk Petershörne. Quelle: eigene Darstellung, Daten: NLWKN

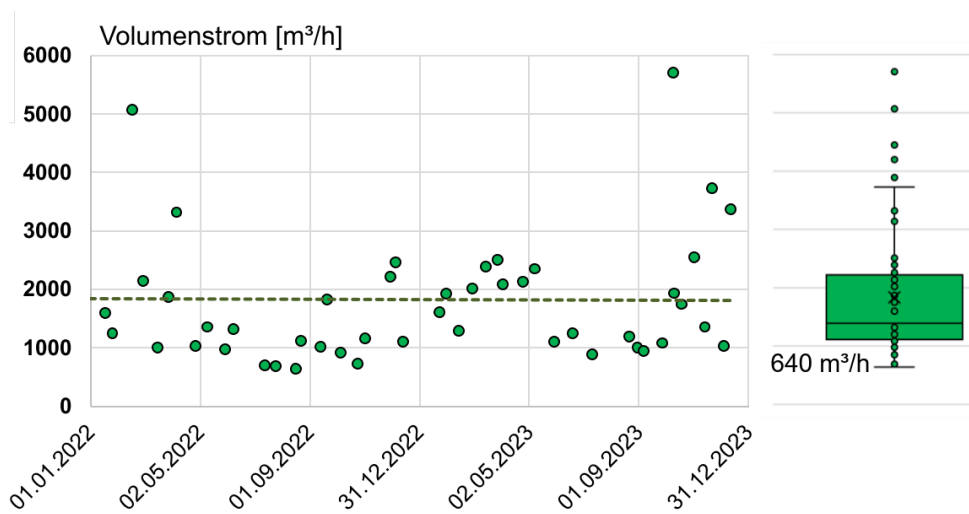
Parameter	Einheit	Daten (2015-2023)		
		Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	14,76	61	2
Ammoniumstickstoff	mg/l	0,42	1,1	0,05
Calcium	mg/l	55,99	163	19
Chlorid	mg/l	890,36	5800	20
Eisen	mg/l	3,36	7,5	0,24
Elektrische Leitfähigkeit 25 C	mg/l	3106,71	17660	204
Gesamtphosphat-Phosphor	mg/l	0,24	0,85	0,05
Gesamtstickstoff	mg/l	2,98	8,4	1,2
Hydrogenkarbonat	mg/l	93,52	129	37,8
Magnesium	mg/l	54,09	304	4,2
Nitratstickstoff	mg/l	1,34	5,6	0,1
Nitritstickstoff	mg/l	0,03	0,11	0,01
Organisch gebundener Kohlenstoff (DOC)	mg/l	16,84	36	7,1
Orthophosphat-Phosphor	mg/l	0,06	0,32	0,02
pH-Wert		7,36	8,8	6,7
Sauerstoff	mg/l	9,32	16,3	3,3
Sulfat	mg/l	165,58	790	19
Wassertemperatur	°C	11,68	24,5	0,4



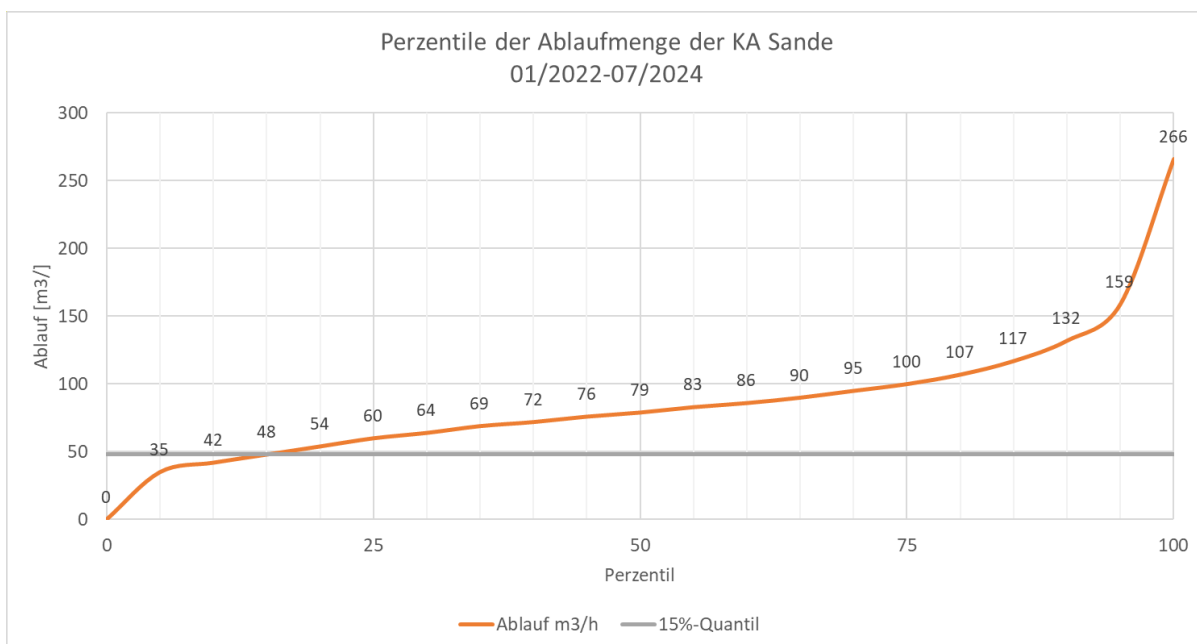
Anhang 10.1-7 Zeitliche Entwicklung der el. Leitfähigkeit an der Messstelle Marcardsmoor (Datengrundlage: NLWKN, Wasserbuch)

Anhang 10.1-8 Auswertung der Messwerte an der Messtelle Dykhausen im EJK (eigene Probenahme)

		Probenahme	EJK Dykhausen			Probenahme	EJK Dykhausen
		Datum	12.09.2024			Datum	12.09.2024
		Anzahl der Messungen	1			Anzahl der Messungen	1
Vor Ort Parameter	Temperatur	°C	ohne	Kationen	Calcium	mg/l	17,1
	Elektrische Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	201		Magnesium	mg/l	4,29
	Sauerstoff	mg/l	6,7		Natrium	mg/l	14,9
	Trübung	1/m	18,4		Kalium	mg/l	6,82
	Färbung (SAK 436 nm)	NTU	21,04	Anionen	Chlorid	mg/l	21,9
	(SAK 254 nm)	1/m	260		Sulfat	mg/l	15,1
	pH-Wert	-	6,9		Hydrogenkarbonat	mg/l	
	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l			Fluorid	mg/l	0,15
Basekapazität pH 8,2	mmol/l	0,2	Bromid		mg/l	0,111	
Säurekapazität pH 4,3	mmol/l	0,77	Borat		mg/l	0,171	
Freie Kohlensäure	mg/l	8,8	Silicium		mg/l	7,19	
			Silikat		mg/l	15,2	
Org. Summenparameter	BSB5	mg/l		Metalle gesamt	Aluminium	mg/l	1,488
	DOC	mg/l	54		Barium	mg/l	0,034
	TOC	mg/l	62		Blei	mg/l	0,003
Nährstoffe	N gesamt	mg/l			Bor	mg/l	0,031
	Nitrat-N	mg/l	<BG*		Cadmium	mg/l	<0,0002
	Nitrit-N	mg/l	<BG*		Chrom	mg/l	0,0043
	Ammonium-N	mg/l	0,56*		Cobalt	mg/l	<0,001
	Phosphat-P gesamt	mg/l	0,85*		Eisen	mg/l	6,187
	ortho-Phosphat-P	mg/l			Kupfer	mg/l	0,009
					Mangan	mg/l	0,131
					Molybdän	mg/l	<0,006
					Nickel	mg/l	0,003
					Strontium	mg/l	0,08
					Vanadium	mg/l	0,009
					Zink	mg/l	0,029



Anhang 10.1-9 Stündliche Ablaufmengen der KA WHV für 2021 bis 2023



Anhang 10.1-10 Perzentile der Ablaufmenge der KA Sande im Zeitraum Jan 2022 bis Jul 2024

10.2 Anhänge zum Kapitel „Bewertung verfahrenstechnischer Alternativen“

10.2.1 Kläranlage Wilhelmshaven

Parameter	Einheit	Einzelmessung IWW 18.04.2024	Einzelmessung IWW 02.09.2024	Daten aus Betriebstagebüchern (2021-2023)			
				MW	Median	Min	Max
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	<5,0	<5,0	2,78	2,2	0,1	38,3
Aluminium	mg/l	0,138	0,085				
Ammonium	mg/l	0,09	2,3	0,38	0,17	0,01	7,77
Ammonium-Stickstoff	mg/l	0,07	1,811	0,3	0,13	0,01	6,04
AOX	µg/l	-	35				
Barium	mg/l	0,013	<0,010				
Basekapazität bis pH8,2	mmol/l	0,57	0,81				
Biologischer Sauerstoffbedarf	mg/l	<2	<3	2	2	0,3	6
Blei	mg/l	<0,002	<0,002				
Bor	mg/l	0,241	0,234				
Borat	mg/l	1,312	1,273				
Bromid	mg/l	0,988	1,026				
Cadmium	mg/l	0,0003	<0,0002				
Calcium	mg/l	74,6	58,2				
Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l	35	33	29,11	29	12	58
Chlorid	mg/l	295	354				
Chrom	mg/l	0,00083	<0,00050				
Cobalt	mg/l	<0,001	<0,001				
DOC	mg/l	-	11	9,93	10,5	8,1	11
Eisen	mg/l	0,157	0,248				
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	1600	1720	1706	1736	723	2800
Färbung (SAK 436 nm)	m-1	1,57	1,84				
Fluorid	mg/l	1	0,17				
Freie Kohlensäure	mg/l	25,1	35,6				
Gesamt-Stickstoff	mg/l	6,52	9,6	7,93	7,98	4,35	14,2
Kalium	mg/l	24,6	31,2				
Kupfer	mg/l	<0,0021	<0,0020				
Magnesium	mg/l	22,6	25				
Mangan	mg/l	0,312	0,204				
Messtemperatur KB8_2	°C	19,3	22,5				
Molybdän	mg/l	<0,005	<0,005				
Natrium	mg/l	197	239				
Nickel	mg/l	0,0027	0,0029				
Nitrat	mg/l	28,5	33,2	28,47	28,83	10,89	52,26
Nitrat-Stickstoff	mg/l	6,43	7,5	6,43	6,51	2,46	11,8
Nitrit	mg/l	0,066	0,94	0,34	0,13	0,01	2,92
Nitrit-Stickstoff	mg/l	0,02	0,287	0,1	0,04	0	0,89
ortho-Phosphat	mg/l	<0,10	4,9				
Phosphat, gesamt	mg/l	<0,030	6,7				
Phosphor, gesamt	mg/l	<0,5	2,2	0,34	0,32	0,11	0,95
pH-Wert bei Messtemperatur		7,24	6,98	7,81	7,82	6,70	8,54
Säurekapazität bis pH4,3	mmol/l	4,88	3,63	4,3	4,31	1,8	6,36
Silicium	mg/l	12,2	12,3				
Silikat	mg/l	25,8	25,9				
Strontium	mg/l	0,34	0,27				
Sulfat	mg/l	72	73,4				
TDS	mg/l	890	950				
Temperatur bei KS4,3 Messung	°C	14,9	22,4				
Trübung	NTU	-	1,06				
Vanadium	mg/l	<0,002	<0,002				
Zink		0,025	0,02				

Anhang 10.2-1 Wasserqualitätsdaten der KA Wilhelmshaven

Parameter	Einheit	KA-Ablauf	Spülwasser chemiekaliefrei	RO-Konzentrat	Spülwasser chemiekalienthaltig (UF und RO)	Restwasserströme gesamt	Anforderungen OGewV*
Volumenstrom	m ³ /d	640	30,1	155,6	8,5	194,3	
Volumenstrom	m ³ /a	15360	722,5	3735,5	204,7	4662,7	
Trübung		1,06					
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	38,30	38,300	0,000	0,000	5,935	
pH-Wert		8,54	8,440	6,000			5,5 - 8,5
Temperatur	°C	22,40	22,400	22,400	22,902	22,422	
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	2800,00	2800,001	10760,233	3463,876	9206,419	
Salinität (berechnet)	mg/l	1806,45	1806,452	6942,086	2234,759	5939,625	
Sauerstoff, gelöst	mg/l	nicht gemessen					>4 - 9
TOC, ges. org. Kohlenstoff	mg/l	nicht gemessen					<7 - 15
DOC	mg/l	11,0000	8,250	32,365	9,197	27,611	
Säurekapazität pH 4,3	mmol/l	6,36	6,340	24,110	7,055	20,608	
BSB ₅ , homogenisiert	mg/l O ₂	6,00	2,400	9,511	33,380	9,457	<3 - 6
CSB, homogenisiert	mg/l O ₂	58,00	40,600	163,079	84,587	140,654	
Ammonium-Stickstoff	mg/l	6,04	6,040	22,002	4,716	18,770	≤0,1 - 0,3
Nitrit-Stickstoff	mg/l	0,89	0,890	2,850	0,978	2,464	≤0,03 - 0,05
Nitrat-Stickstoff	mg/l	11,80	11,800	37,789	12,950	32,671	
Stickstoff, gesamt (anorg.)	mg/l	nicht gemessen		0,999			
Stickstoff, insgesamt (TNb)	mg/l	14,20	11,360	45,040	13,540	38,438	
PO ₄ ³⁻ , gelöst	mg/l	nicht gemessen					
PO ₄ ³⁻ , gesamt	mg/l	6,74	1,011	4,008	1,288	3,424	
ortho-Phosphat	mg/l	4,9000	0,735	2,913	0,171	2,455	≤0,05 - 0,2
Phosphor, gesamt	mg/l	2,20	0,330	2,001	0,461	1,675	<0,1 - 0,3
Aluminium, gesamt	mg/l	0,14	0,014	0,056	0,016	0,048	
Chlorid	mg/l	354,00	368,545	1431,049	1030,969	1248,841	≤200
Eisen, gesamt	mg/l	0,25	0,002	0,010	0,003	0,008	≤0,7 - 1,8
Mangan, gesamt	mg/l	0,31	0,003	0,012	0,003	0,010	
Nitrat	mg/l	52,26	52,257	167,351	57,415	144,690	Jahresdurchschnitt-UQN: 50
Nitrit	mg/l	2,92	2,924	9,365	3,213	8,097	
Sulfat	mg/l	73,40	73,400	290,886	419033,881	18639,298	75 - 220
Blei	mg/l	0,0020	0,000	0,000	0,675	0,030	
Cadmium	mg/l	0,0003	0,000	0,000	0,000	0,000	
Chrom	mg/l	0,0008	0,000	0,000	1,529	0,067	
Kupfer	mg/l	0,0021	0,000	0,000	20,770	0,912	
Nickel	mg/l	0,0029	0,003	0,011	2,679	0,127	
Zink	mg/l	0,0250	0,025	0,099	25,513	1,203	
AOX	mg/l	35,0000	35,000	140,107			
Antiscalant	mg/l	0,0000	0,000	12,009	0,691	9,651	
Bromid	mg/l	nicht gemessen	0,000	0,000	5,880	0,258	

*Anforderungen an guten ökologischen Zustand im Wasserkörper, abhängig vom Fließgewässertyp, nach Anlage 7 OGewV

Wesentliche Auslegungsparameter, die diesen Berechnungen zugrunde liegen, können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

	UF	Tiefenfiltration	UO pass 1	UO pass 2	EDI	IXMB
Auslegungssoftware	System-Design - Inge	Excel-Tool - IWW	WAVE 2024 - DuPont	WAVE 2024 - DuPont	WinFlow - Veolia	LewaPlus - Lanxess
Zulaufmenge (m³/h)	640	576	582	117	105	99
Ausbeute (%)	90	98	75	90	94	100
			73			
Modul Typ/ Medium	IntegraTec MB 80 TR (Inge)	Quarzsand/ Hydroanthrazit	Fortlife CR100 (DuPont)	BW30 HRLE-440 (DuPont)	E-Cell 3X (MK 5) (Veolia)	UltraPure UP1295 MD (Lanxess)
Flux netto (L/m²/h)	60	-	23	28	-	-
Filtergeschwindigkeit (m/h)	-	5	-	-	-	40
Transmembrandruck TMP (bar)	-	-	10	6	-	-
Verbrauch Betriebsmittel (l/d)	290 (PACl)	-	17 (Antiscalant)	-	-	-
Aktive Membranfläche (m²)	9.150	-	19.398	3.924	-	-
Filterfläche (m²)	-	115	-	-	-	2,5
Volumen Filterbett (m³)	-	240	-	-	-	3,4
spez. Energieverbrauch (kWh/m³)	0,03	-	0,7		0,01	-
Anzahl Straßen	n+1	n+1	n+1	n+1	n	n

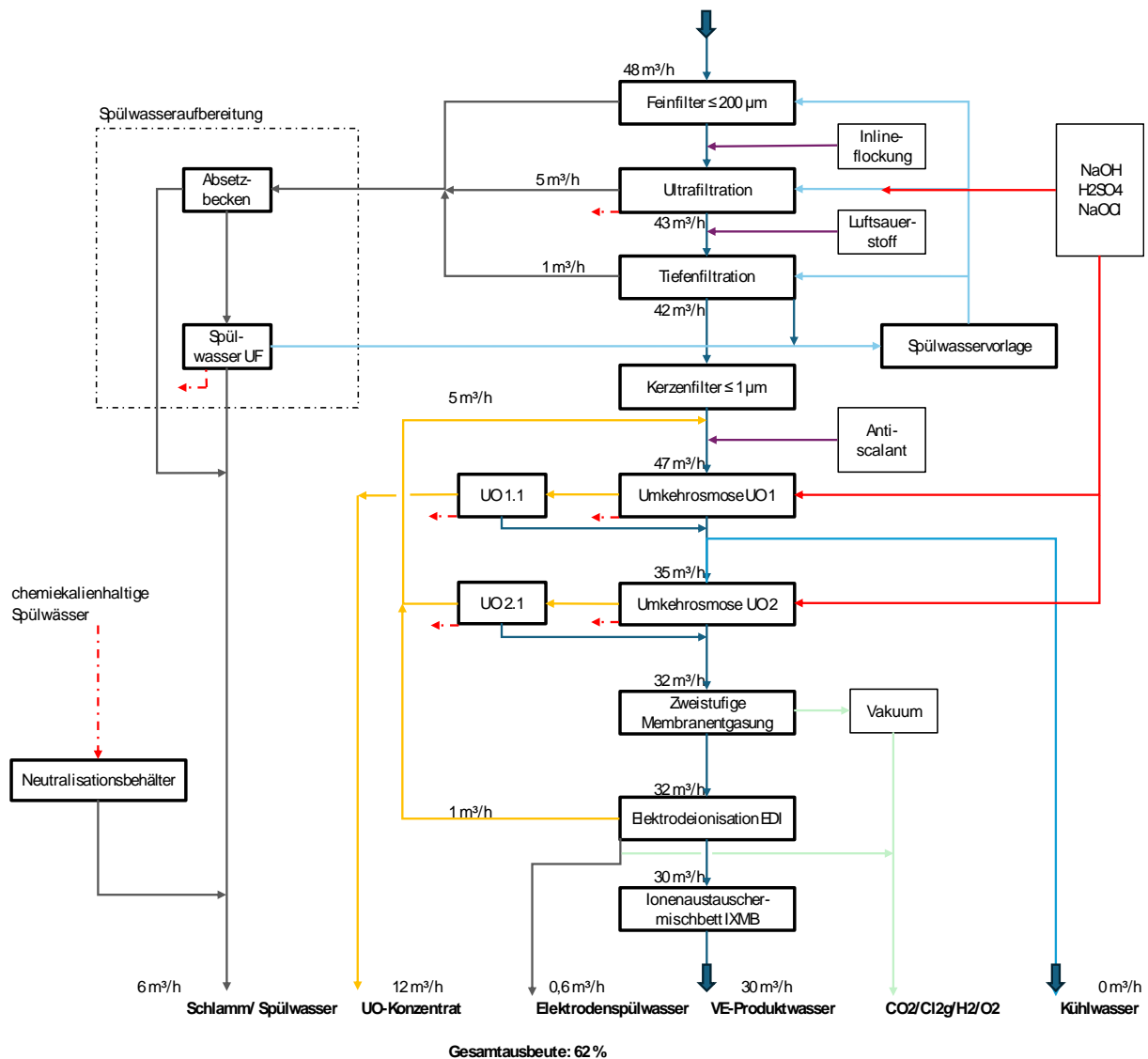
Die hier angenommenen Ausbeuten wurden mit den Ergebnissen des Ingenieurbüros H2U abgeglichen, um die Datengrundlage zwischen Restwasserströmen, Kosten und Flächenbedarfen zu synchronisieren. Gleiches gilt für die anderen Wasserressourcen

Mittl. Kläranlagen-Ablauf (KA-Tagebuch 2021-2023)	m ³ /d	44030
Min. Kläranlagen-Ablauf	m ³ /d	15360
	m ³ /d	
Ausbeute Vorfiltration		98%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	640
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	640
Max. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2, bei minimalem KA-Ablauf)	m ³ /h	428
Max. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2, bei minimalem KA-Ablauf)	m ³ /a	3.749.280
Betriebsstunden	h/a	8.760
Mittl. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2, bei minimalem KA-Ablauf)	m ³ /h	428
Ausbeute RO1		74%
Max. Zulauf RO1	m ³ /h	582
Mittl. Zulauf RO1	m ³ /h	581,5
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14,0
Häufigkeit CIP	Anzahl pro Jahr	4,0
Anzahl Straßen	n+1	11,0
	m ³ gesamt pro Tag	1,7
Biozid-Lösung	m ³ pro Woche und Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	11,8
Anteil Kühlwasser Permeat RO1	%	71%
Ausbeute RO2		80%
Max. Zulauf RO2	m ³ /h	790
Mittl. Zulauf RO2	m ³ /h	16,0
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14,0
Anzahl Straßen	n+1	6,0
	m ³ gesamt pro Tag	0,9
Biozid-Lösung mit DBNPA	m ³ pro Woche und Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	6,4
Ausbeute für UF + Spülwasser UF		94%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	627
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	627
Anteil Spülwasser gesamt bis Spülwasser UF		6,0%
davon Anteil Spülwasser Biofilter		2,0%
Anteil Spülwasser UF + Spülwasser UF (chemiekalienfrei)		4,8%
Anteil CEB UF + Spülwasser UF (chemiekalienhaltig)		1,2%
Volumen Spülwasserauffangbehälter	m ³	40,0
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP pro Straße	8
Häufigkeit pro Jahr	pro Straße	2
Anzahl Straßen	n+1	7
	m ³ gesamt pro Tag	0,3

10.2.2 Kläranlage Sande

Parameter	Einheit	Einzelmessung IWW 16.04.24	Einzelmessung IWW 04.09.24	Daten aus Betriebstagebüchern (2022-07/2024)			
				MW	Median	Min	Max
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	<5,0	<5,0				
Aluminium	mg/l	0,018	0,011				
Ammonium	mg/l	0,18	0,14				
Ammonium-Stickstoff	mg/l	0,137	0,112	0,3	0,2	0,2	2,53
AOX	µg/l	50	0				
Barium	mg/l	<0,010	<0,010				
Basekapazität bis pH 8,2	mmol/l	0,62	0,65				
Biologischer Sauerstoffbedarf	mg/l	<2	<3				
Blei	mg/l	<0,002	<0,002				
Bor	mg/l	0,175	0,115				
Borat	mg/l	0,95	0,627				
Bromid	mg/l	0,398	0,253				
Cadmium	mg/l	<0,0002	<0,0002				
Calcium	mg/l	72,7	50				
Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l	29	19	26,8	26,4	18,8	37,9
Chlorid	mg/l	160	120				
Chrom	mg/l	<0,00050	<0,00050				
Cobalt	mg/l	<0,001	<0,001				
DOC	mg/l	-	7,9				
Eisen	mg/l	0,052	0,045				
Elektrische Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	1110	813				
Färbung (SAK 436 nm)	m-1	1,48	1,22				
Fluorid	mg/l	0,18	0,14				
Freie Kohlensäure	mg/l	27,3	28,6				
Gesamt-Stickstoff	mg/l	0,402	<0,300	0,9	0,71	0,5	4,85
Kalium	mg/l	23,8	20,2				
Kupfer	mg/l	<0,0020	<0,0020				
Magnesium	mg/l	15,8	9,93				
Mangan	mg/l	0,216	0,138				
Messtemperatur KB8_2	°C	19,8	16,6				
Molybdän	mg/l	<0,005	<0,005				
Natrium	mg/l	123	95,6				
Nickel	mg/l	<0,0020	<0,0020				
Nitrat	mg/l	1,1	<1,00				
Nitrat-Stickstoff	mg/l	0,25	<0,20	0,6	0,46	0,3	3,09
Nitrit	mg/l	0,051	0,069				
Nitrit-Stickstoff	mg/l	0,016	0,021	0,034	0,022	0,003	0,46
ortho-Phosphat	mg/l	1,8	1,4				
Phosphat, gesamt	mg/l	1,9	1,4				
Phosphor, gesamt	mg/l	0,63	0,47	0,7	0,64	0,25	1,21
pH-Wert bei Messtemperatur		7,25	7,05	7,6	7,6	2	9,4
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	4,94	3,3				
Silicium	mg/l	14,8	12				
Silikat	mg/l	31,2	25,4				
Strontium	mg/l	0,26	0,06				
Sulfat	mg/l	61,4	51,2				
TDS	mg/l	640	470				
Temperatur bei KS 4,3 Messung	°C	18,6	14				
Wassertemperatur	°C			15,5	15,6	0	23,9
Vanadium	mg/l	<0,002	<0,002				
Zink	mg/l	0,017	0,015				

Anhang 10.2-3 Wasserqualitätsdaten der KA Sande



Anhang 10.2-4 Verfahrenskette inkl. Massenstrommodell zur Aufbereitung von KA-Ablauf Sande

In nachfolgender Tabelle sind die Volumenströme und Konzentrationen der wesentlichsten Parameter des KA-Ablaufs und der Restwasserströme aufgeführt. Alle Konzentrationen, die in den Restströmen signifikant höher sind als im KA-Ablauf sind gelb markiert. Die Berechnungen erfolgten analog zu KA Wilhelmshaven.

Die Konzentrationen im KA-Ablauf sind jeweils die Maximalwerte (worst case) aus den KA-Daten der Jahre 2022 bis 07/2023 bzw. aus 2 Analysen des IWW.

Die Qualitäten der Restwasserströme sind hinsichtlich kritischer Parameter mit denen der KA Wilhelmshaven vergleichbar und entsprechend zu bewerten.

Parameter	Einheit	KA-Ablauf	Spülwasser chemiekalien- frei	RO-Konzentrat	Spülwasser chemiekalien-haltig (UF und RO)	Restwasserströme gesamt	Anforderungen OGW*
Volumenstrom	m ³ /d	48		11		14	
Volumenstrom	m ³ /a	1152	55	268		345	
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	5	5	0	0	0,8	
Sauerstoff	mg/l	nicht gemessen					>4 - 9
pH-Wert		9	9	6			5,5 - 8,5
Temperatur	°C	19	19	18	20	18	
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	1110	1110	4393	1836	3707	
Salinität (berechnet)	mg/l	716	716	2834	1184	2392	
BSP5, homogenisiert	mg/l O2	3	1	5	101	10	<3 - 6
CSB, homogenisiert	mg/l O2	38	27	108	210	102	
TOC, ges. org. Kohlenstoff	mg/l	nicht gemessen					<7 - 15
DOC	mg/l	8	6	24	7	20	
Saurekapazität pH 4,3	mmol/l	5	5	19	6	16	
Ammonium-Stickstoff	mg/l	3	3	10	4	8	≤0,1 - 0,3
Nitrit-Stickstoff	mg/l	0,5	0,5	1,7	0,6	1,4	≤0,03 - 0,05
Nitrat-Stickstoff	mg/l	3	3	12	4	10	
Stickstoff, insgesamt (TNb)	mg/l	5	4	16	8	13	
ortho-Phosphat	mg/l	1,8	0,3	1,1	0,2	0,9	≤0,05 - 0,2
PO43-, gesamt	mg/l	3,7	0,6	2,2	1,7	1,9	
Phosphor, gesamt	mg/l	1,2	0,2	1,4	0,6	1,2	<0,1 - 0,3
Aluminium, gesamt	mg/l	0,02	0,0	0,1	0,0	0,0	
Chlorid	mg/l	160	175	693	646	608	≤200
Eisen, gesamt	mg/l	0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	≤0,7 - 1,8
Mangan, gesamt	mg/l	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
Nitrat	mg/l	14	14	51	18	43	Jahresdurchschnitt-UQN: 50
Nitrit	mg/l	2	2	8	3	6	
Sulfat	mg/l	61	61	245	292640	19039	75 - 220
Blei	mg/l	0,002	0,0001	0,0004	2,2	0,1	
Cadmium	mg/l	0,0001	0,000005	2E-05	6E-06	2E-05	
Chrom	mg/l	0,0005	0,00003	1E-04	5E+00	3E-01	
Kupfer	mg/l	0,002	0,0001	0,0004	67,6	4,4	
Nickel	mg/l	0,002	0,002	0,01	8,7	0,6	
Zink	mg/l	0,02	0,02	0,1	83	5	
AOX	µg/l	0,05	0,05	0,20	0,06	0,17	
Antiscalant	mg/l		0	12	2	9	
Bromid	mg/l		0,0	0,0	19,1	1,2	

*Anforderungen an guten ökologischen Zusatz im Wasserkörper, abhängig vom Fließgewässertyp, nach Anlage 7 OGWV

Wesentliche Auslegungsparameter, die diesen Berechnungen zugrunde liegen, können folgender Tabelle entnommen werden:

	UF	Tiefenfiltration	UO pass 1	UO pass 2	EDI	IXMB
Auslegungssoftware	System-Design - Inge	Excel-Tool - IWW	WAVE 2024 - DuPont	WAVE 2024 - DuPont	WinFlow - Veolia	LewaPlus - Lanxess
Zulaufmenge (m³/h)	48	43	47	35	32	30
Ausbeute (%)	90	98	75	90	94	100
			73			
Modul Typ/ Medium	IntegraTec MB 80 TR (Inge)	Quarzsand/ Hydroanthrazit	Fortlife CR100 (DuPont)	BW30 HRLE-440 (DuPont)	E-Cell 3X (MK 5) (Veolia)	UltraPure UP1295 MD (Lanxess)
Flux netto (L/m²/h)	54	-	23	32	-	-
Filtergeschwindigkeit (m/h)	-	5	-	-	-	34
Transmembrandruck TMP (bar)	-	-	10	7	-	-
Verbrauch Betriebsmittel (l/d)	25 (PACl)	-	1,5 (Antiscalant)	-	-	-
Aktive Membranfläche (m²)	750	-	1.561	981	-	-
Filterfläche (m²)	-	9	-	-	-	0,5
Volumen Filterbett (m³)	-	18	-	-	-	0,6
spez. Energieverbrauch (kWh/m³)	0,03	-	1,0		0,01	
Anzahl Straßen	n+1	n+1	n+1	n+1	n	n

Mittl. Kläranlagen-Ablauf (KA-Tagebuch 2021-2023)	m ³ /d	1152
Min. Kläranlagen-Ablauf	m ³ /d	1152
Ausbeute Vorfiltration		99%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	48
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	48
Max. Produktwasserabgabe (Feed RO2, bei minimalem KA-Abfluss)	m ³ /h	41
Max. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /a	359.160
Betriebsstunden	h/a	8.760
Mittl. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /h	41
Ausbeute RO1		75%
Max. Zulauf RO1	m ³ /h	55
Mittl. Zulauf RO1	m ³ /h	54,7
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14,0
Anzahl Straßen	n+1	3,0
	m ³ gesamt pro Tag	0,5
Biozid-Lösung mit DBNPA	m ³ pro Woche und Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	3,2
Anteil Kühlwasser Permeat RO1	%	0,00%
Ausbeute RO2		80%
Max. Zulauf RO2	m ³ /h	73
Mittl. Zulauf RO2	m ³ /h	4,3
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14,0
Anzahl Straßen	n+1	3,0
	m ³ gesamt pro Tag	0,5
Biozid-Lösung mit DBNPA	m ³ pro Woche und Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	3,2
Ausbeute für UF + Spülwasser UF		94%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	48
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	48
Anteil Spülwasser gesamt bis Spülwasser UF		6,0%
davon Anteil Spülwasser Biofilter		1,0%
Anteil Spülwasser UF + Spülwasser UF (chemiekalienfrei)		4,8%
Anteil CEB UF + Spülwasser UF (chemiekalienhaltig)		1,2%
Volumen Spülwasserauffangbehälter	m ³	30
durchschn. Aufenthaltszeit	h	13
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	5
Häufigkeit pro Jahr	pro Straße	2
Anzahl Straßen	n+1	5
	m ³ pro Tag gesamt	0,13

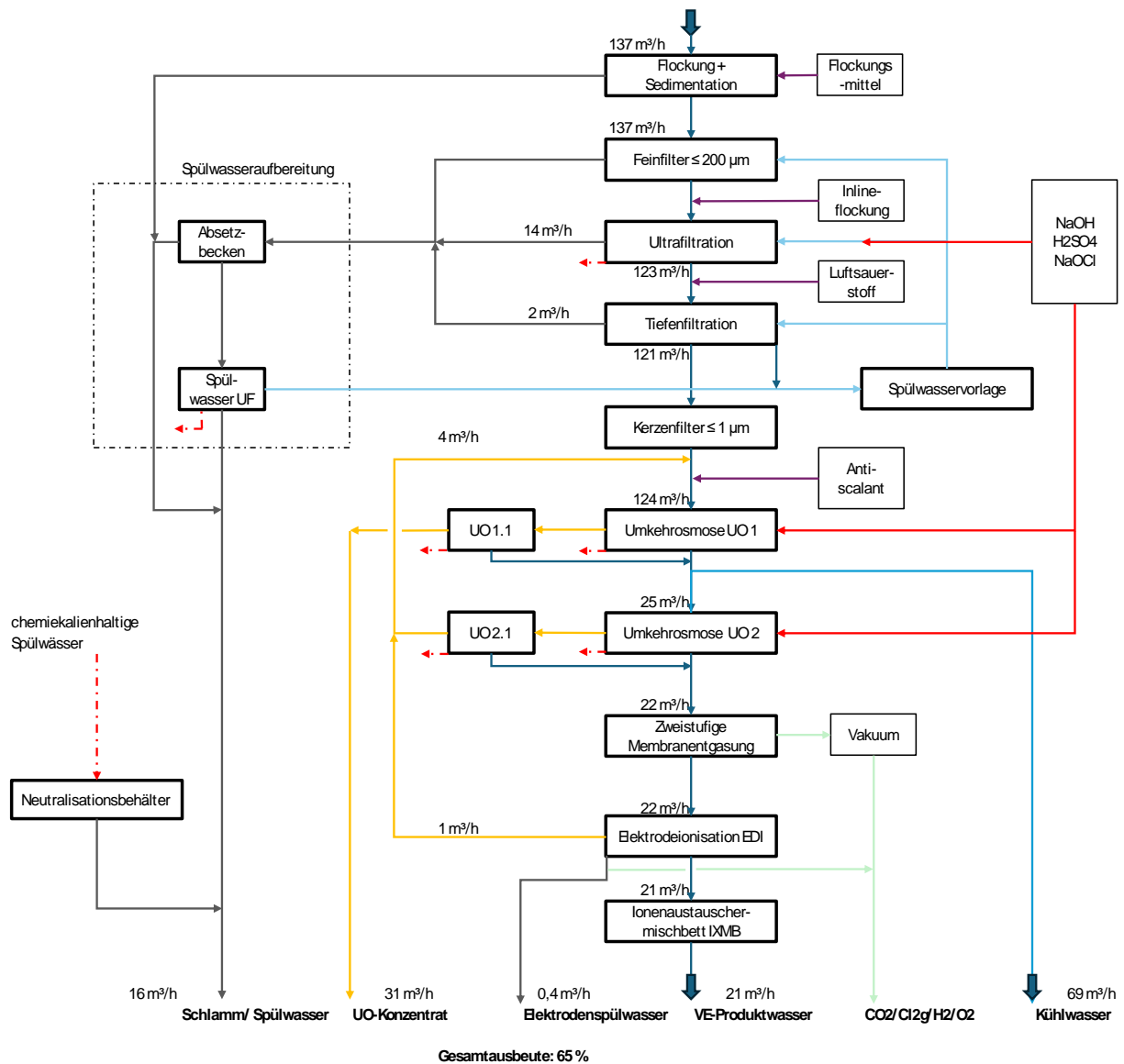
10.2.3 Oberflächengewässer (Ems-Jade-Kanal)

Parameter	Einheit	Einzelmessung IWW 12.09.2024	Datenbasis Messstelle Westerende Kirchloog (Daten 2019-2022)			
			MW	Median	Min	Max
Temperatur	°C		12,02	11,2	3,70	23,6
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l		8,79	8	2,00	18
pH-Wert		6,9	7,24	7,3	6,50	8,2
Trübung	NTU	18,4				
Elektrische Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	201	594,06	510	227,00	1420
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	0,77	1,88	1,7	0,90	3,9
BSB5	mg/l		3,28	3,05	1,90	5,7
Sauerstoff	mg/l	6,7	8,14	8,3	3,90	11,8
DOC	mg/l	54	32,84	37	13,30	54
TOC	mg/l	62	36,10	41	15,30	57
SAK 254	m-1	260				
Färbung (SAK 436 nm)	m-1	21,04				
Ammonium	mg/l	0,72				
Ammonium-Stickstoff	mg/l		0,27	0,26	0,26	0,76
Gesamt-Stickstoff	mg/l		4,73	4,5	2,50	8,9
Nitrat-Stickstoff	mg/l		2,39	2	0,93	5,4
Nitrit-Stickstoff	mg/l		0,05	0,03	0,02	0,27
Nitrat	mg/l	<1,00	10,57	8,86	4,12	23,91
Nitrit	mg/l	<0,020	0,15	0,10	0,07	0,89
ortho-Phosphat-Phosphor	mg/l		0,21	0,19	0,03	0,48
Phosphat, gesamt	mg/l	2,6	0,64	0,58	0,09	1,47
Phosphat, gelöst	mg/l	2,22				
Phosphor, gesamt	mg/l	0,85	0,33	0,3	0,13	0,64
Phosphor, gelöst	mg/l	0,724				
Chlorid	mg/l	21,9	83,81	64	25,00	260
Gesamthärte	mmol/l		1,16	1,17	0,62	1,93
Calcium	mg/l	17,1	36,75	36	19,00	56
Magnesium	mg/l	4,29	5,83	5,5	3,60	13
Magnesium, gelöst	mg/l	4,35				
Sulfat	mg/l	15,1	44,44	42	13,00	96
Eisen	mg/l	6,187	1,21	1,2	0,70	2,2
Eisen, gelöst	mg/l	4,571				
Mangan	mg/l	0,131				
Mangan, gelöst	mg/l	0,129				
Kalium	mg/l	6,82	10,19	8,5	4,60	22
Kalium, gelöst	mg/l	6,79				
Natrium	mg/l	14,9				
Aluminium	mg/l	1,488				
Aluminium, gelöst	mg/l	0,337				
Bromid	mg/l	0,111				
Fluorid	mg/l	0,15				
Kupfer	mg/l	0,009				
Molybdän	mg/l	<0,006				
Nickel	mg/l	0,003				
Barium	mg/l	0,034				
Silicium	mg/l	7,19				
Silikat	mg/l	15,2				
Strontium	mg/l	0,08				
Vanadium	mg/l	0,009				
Zink	mg/l	0,029				
Blei	mg/l	0,003				
Bor	mg/l	0,031				
Borat	mg/l	0,171				
Cadmium	mg/l	<0,0002				
Chrom	mg/l	0,0043				
Cobalt	mg/l	<0,001				
Kupfer, gelöst	mg/l	0,01				
Molybdän, gelöst	mg/l	<0,005				
Nickel, gelöst	mg/l	<0,002				
Barium, gelöst	mg/l	0,026				
Silicium, gelöst	mg/l	4,67				
Silikat, gelöst	mg/l	9,88				
Strontium, gelöst	mg/l	0,08				
Vanadium, gelöst	mg/l	0,007				
Zink, gelöst	mg/l	0,04				
Blei, gelöst	mg/l	<0,002				
Bor, gelöst	mg/l	0,031				
Borat, gelöst	mg/l	0,17				
Cadmium, gelöst	mg/l	<0,0002				
Chrom, gelöst	mg/l	0,002				
Cobalt, gelöst	mg/l	<0,001				

Anhang 10.2-5 Wasserqualitätsdaten des EKJ (1)

Parameter	Einheit	Mikroschadstoffe
		Einzelmessung IWW 12.09.2024
TFA	µg/l	1,5
Bentazon	µg/l	<0,02
Bromoxynil	µg/l	<0,03
Dichlorprop	µg/l	<0,03
Ethofumesat	µg/l	<0,03
MCPA	µg/l	0,02
Mecoprop (MCP)	µg/l	<0,02
Chlorpyrifos-ethyl	µg/l	<0,01
Chlorpyrifos-methyl	µg/l	<0,02
Atrazin	µg/l	<0,03
Bromacil	µg/l	<0,03
Chloridazon	µg/l	<0,03
Chlortoluron	µg/l	<0,03
Desethyl-Atrazin	µg/l	<0,03
Desethyl-Terbuthylazin	µg/l	<0,03
Desisopropyl-Atrazin	µg/l	<0,03
Diflufenican	µg/l	<0,03
Diuron	µg/l	<0,03
Ethidimuron	µg/l	<0,03
Isoproturon	µg/l	<0,03
Metalaxyl	µg/l	<0,03
Metamitron	µg/l	<0,03
Metazachlor	µg/l	<0,03
Methabenzthiazuron	µg/l	<0,03
Metolachlor	µg/l	<0,03
Metoxuron	µg/l	<0,03
Metribuzin	µg/l	<0,03
Simazin	µg/l	<0,03
Terbuthylazin	µg/l	<0,03
Oxadixyl	µg/l	<0,03
Pirimicarb	µg/l	<0,03
AMPA	µg/l	0,12
Glyphosat	µg/l	0,21
Chlorthalonil-Met-M4 (R471811 M4)	µg/l	<0,03
Chloridazon-desphenyl (B)	µg/l	<0,03
Chloridazon-methyl-desphenyl (B1)	µg/l	<0,03
Chlorthalonil-Met-M12 (R417888 M12)	µg/l	<0,03
Dimethachlor-CGA369873	µg/l	<0,03
Dimethachlor-ESA (CGA 354742)	µg/l	<0,03
Dimethachlor-OA (CGA 50266)	µg/l	<0,03
Dimethenamid-ESA M 27	µg/l	0,04
Metazachlor-C-Metabolit BH 479-4 OA	µg/l	<0,03
Metazachlor-Met. BH-479-11	µg/l	<0,03
Metazachlor-Met. BH-479-9	µg/l	<0,03
Metazachlor-S-Metabolit BH 479-8 ESA	µg/l	<0,03
N,N-Dimethylsulfamid DMS	µg/l	<0,03
S-Metolachlor-C-Metabolit CGA 351916 / CGA 51202 OA	µg/l	0,42
S-Metolachlor-Met NOA413173	µg/l	<0,03
S-Metolachlor-S-Metabolit CGA 380168 / CGA 354743 ESA	µg/l	0,34
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	µg/l	<0,03
1,2,4-Triazol CGA 71019	µg/l	0,06

Anhang 10.2-6 Wasserqualitätsdaten des EKJ (2)



Anhang 10.2-7 Verfahrenskette inkl. Massenstrommodell zur Aufbereitung von Oberflächenwasser am Beispiel des EJK

In nachfolgender Tabelle sind die Volumenströme und Konzentrationen der wesentlichsten Parameter des EJK und der Restwasserströme aufgeführt.

Alle Konzentrationen, die in den Restströmen signifikant höher sind als im EJK sind gelb markiert. Die Berechnungen erfolgten analog zu den KA. Die Pestizidwirkstoffe der Niedersächsische Landesliste (NiLaLi) von 2020 wurden im Rahmen einer Probenahme von IWW analysiert. In der Tabelle sind nur diejenigen enthalten, für die Positivbefunde nachgewiesen wurden.

Parameter	Einheit	EJK	Spülwasser chemiekaliefrei	RO-Konzentrat	Spülwasser chemiekaliefaltig (UF und RO)	Restwasserströme gesamt	Anforderungen OGWV*
Volumenstrom	m ³ /d	137	7	34	3	43	
Volumenstrom	m ³ /d	3288	156	808	63	1027	
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	18	18	0	0	3	
pH-Wert		8,2	8	7	0	0	>4 - 9
Temperatur	°C	24	24	23	25	23	
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	1420	1420	5208	2361	4457	5,5 - 8,5
Salinität (berechnet)	mg/l	916	916	3360	1523	2676	
Sauerstoff, gelöst	mg/l	11,8					
TOC, ges. org. Kohlenstoff	mg/l	62	47	174	62	148	<7 - 15
Saurekapazität pH 4,3	mmol/l	4	4	14	5	12	
BSB ₅ , homogenisiert	mg/l O ₂	5,7	2	9	103	13	<3 - 6
Ammonium-Stickstoff	mg/l	0,76	0,8	3	3	2	≤0,1 - 0,3
Nitrit-Stickstoff	mg/l	0,27	0,3	0,9	0,4	0,7	≤0,03 - 0,05
Nitrat-Stickstoff	mg/l	5,4	5	17	7	15	
Stickstoff, insgesamt (TNb)	mg/l	8,9	7	27	12	23	
PO ₄₃₋ , gesamt	mg/l	2,6	0,4	1,5	1,6	1,3	
ortho-Phosphat	mg/l	nicht gemessen					≤0,05 - 0,2
Phosphor, gesamt	mg/l	0,9	0,1	1,1	0,6	1,0	<0,1 - 0,3
Aluminium, gesamt	mg/l	1,5	0,03	0,1	0,05	0,1	
Chlorid	mg/l	260	282	1044	812	914	≤200
Eisen, gesamt	mg/l	6	0,06	0,23	0,08	0,20	≤0,7 - 1,8
Mangan, gesamt	mg/l	0,1	0,001	0,005	0,002	0,004	
Nitrat	mg/l	5	5	17	7	15	Jahresdurchschnitt-UQN: 50
Nitrit	mg/l	0,3	0,3	0,9	0,4	0,7	
Sulfat	mg/l	96	96	361	293947	18360	75 - 220
Blei	mg/l	0,003	0,0002	0,0006	2,2	0,1	
Cadmium	mg/l	0	0	0	0	0	
Chrom	mg/l	0,004	0,0002	0,001	5,0	0,3	
Kupfer	mg/l	0,009	0,0005	0,002	67	4	
Nickel	mg/l	0,003	0,003	0,01	9	0,5	
Zink	mg/l	0,029	0,03	0,1	83	5	
Antiscalant	mg/l	0	0	11	2	9	
TFA	µg/l	1,5	1,5	5,64	2,0	4,8	
MCPA	µg/l	0,02	0,02	0,08	0,03	0,1	2
AMPA	µg/l	0,12	0,12	0,45	0,2	0,4	
Glyphosat	µg/l	0,21	0,21	0,79	0,3	0,7	
Dimethenamid-ESA M 27	µg/l	0,04	0,04	0,15	0,1	0,1	
S-Metolachlor-C-Metabolit CGA 351916 / CGA 51202 OA	µg/l	0,42	0,42	1,58	0,6	1,3	
S-Metolachlor-S-Metabolit CGA 380168 / CGA 354743 ESA	µg/l	0,34	0,34	1,28	0,5	1,1	
1,2,4-Triazol CGA 71019	µg/l	0,06	0,06	0,23	0,1	0,2	

*Anforderungen an guten ökologischen Zusatnd im Wasserkörper, abhängig vom Fließgewässertyp, nach Anlage 7 OGWV

Wesentliche Auslegungsparameter, die diesen Berechnungen zugrunde liegen, sind nachfolgend zusammengestellt:

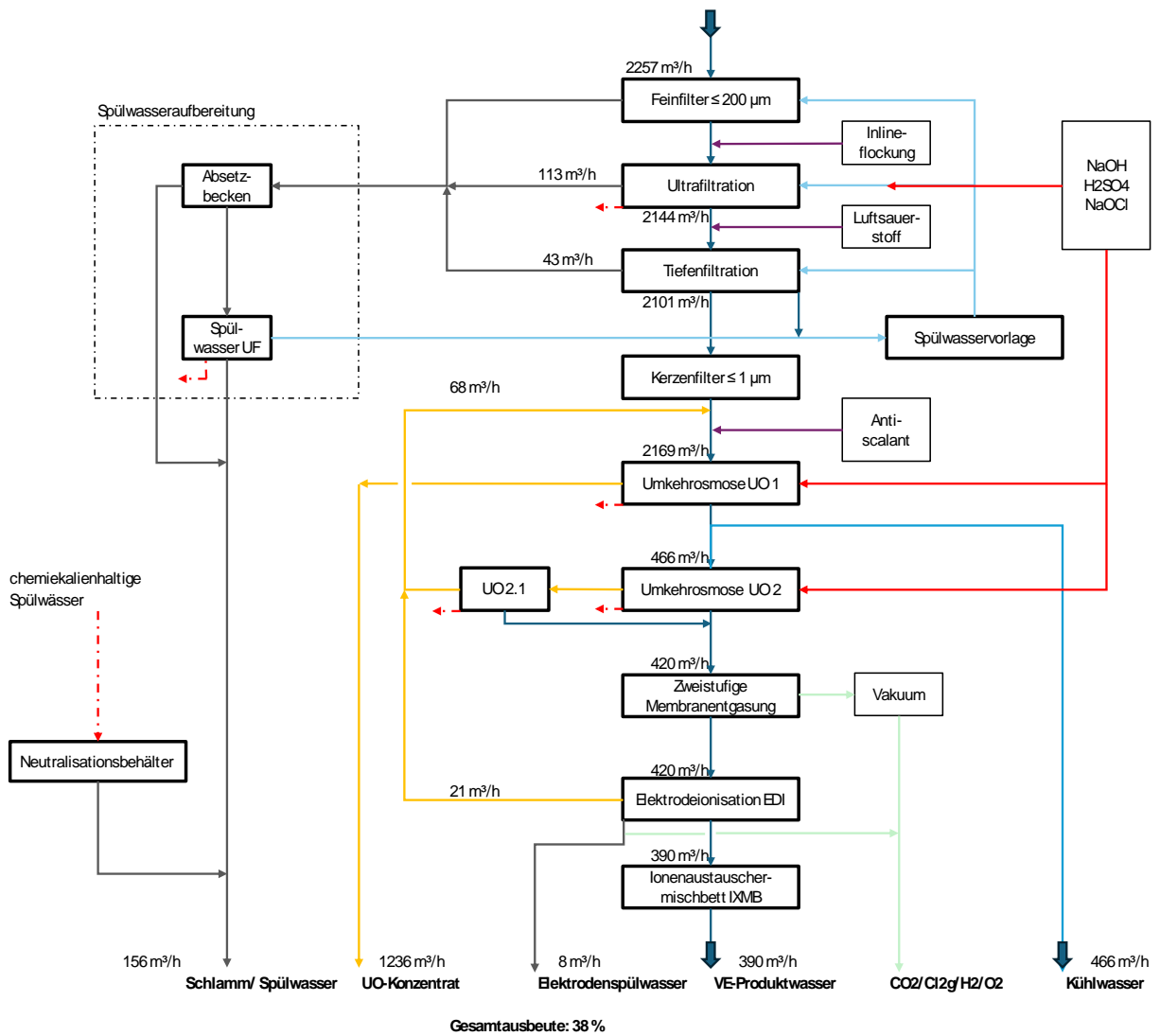
	UF	Tiefenfiltration	UO pass 1	UO pass 2	EDI	IXMB
Auslegungssoftware	System-Design - Inge	Excel-Tool - IWW	WAVE 2024 - DuPont	WAVE 2024 - DuPont	WinFlow - Veolia	LewaPlus - Lanxess
Zulaufmenge (m³/h)	137	123	124	25	22	21
Ausbeute (%)	90	98	75	90	93	100
			73			
Modul Typ/ Medium	IntegraTec MB 80 TR (Inge)	Quarzsand/ Hydroanthrazit	Fortlife CR100 (DuPont)	BW30 HRLE-440 (DuPont)	E-Cell 3X (MK 5) (Veolia)	UltraPure UP1295 MD (Lanxess)
Flux netto (L/m²/h)	43	-	22	28	-	-
Filtergeschwindigkeit (m/h)	-	5	-	-	-	38
Transmembrandruck TMP (bar)	-	-	13	12	-	-
Verbrauch Betriebsmittel (l/d)	114 (PACl)	-	1,5 (Antiscalant)	-	-	-
Aktive Membranfläche (m²)	2.500	-	3.567	437	-	-
Filterfläche (m²)	-	25	-	-	-	0,79
Volumen Filterbett (m³)	-	51	-	-	-	1
spez. Energieverbrauch (kWh/m³)	0,035	-	0,84		0,01	
Anzahl Straßen	n+1	n+1	n+1	n+1	n	n

mittlere Entnahme	m ³ /d	44030
Min. Entnahme	m ³ /d	3288
Ausbeute Vorfiltration		99%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	137
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	137
Max. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /h	428
Max. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /a	3.749.280
Betriebsstunden	h/a	8.760
Mittl. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /h	428
Ausbeute RO1		74%
Max. Zulauf RO1	m ³ /h	582
Mittl. Zulauf RO1	m ³ /h	581,5
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14,0
Anzahl Straßen	n+1	11
	m ³ gesamt pro Tag	1,7
Biozid-Lösung mit DBNPA	m ³ pro Woche und Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	11,8
Anteil Kühlwasser Permeat RO1	%	70,6%
Ausbeute RO2		80%
Max. Zulauf RO2	m ³ /h	790
Mittl. Zulauf RO2	m ³ /h	16,0
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14,0
Anzahl Straßen	n+1	6
	m ³ gesamt pro Tag	0,9
Biozid-Lösung mit DBNPA	m ³ pro Woche und Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	6,4
Ausbeute für UF + Spülwasser UF		94%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	136
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	136
Anteil Spülwasser gesamt bis Spülwasser UF		6,0%
davon Anteil Spülwasser Biofilter		1,0%
Anteil Spülwasser UF + Spülwasser UF (chemiekaliefrei)		4,8%
Anteil CEB UF + Spülwasser UF (chemiekalienhaltig)		1,2%
Volumen Spülwasserauffangbehälter	m ³	40
durchschn. Aufenthaltszeit	h	6,1
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP pro Straße	8,1
Häufigkeit pro Jahr	pro Straße	2
Anzahl Straßen	n+1	7
	m ³ pro Tag gesamt	0,31

10.2.4 Meerwasser

Parameter	Einheit	Daten aus diversen Quellen zusammengetragen		
		Min	Max	Mittelwert
pH-Wert		8	8	8
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	30000	34000	32000
Säurekapazität bis pH 4,3	mg/l	171	195	183
Chlorid	mg/l	15329	19370	17349,5
Nitrit	mg/l	0,1	0,1	0,1
Sulfat	mg/l	2710	3293	3001,5
Natrium	mg/l	8483	10770	9626,5
Kalium	mg/l	390	664	527
Ammonium	mg/l	0,2	0,3	0,25
Calcium	mg/l	602	606	604
Magnesium	mg/l	1300	1683	1491,5
Eisen	mg/l	0,5	0,5	0,5
Mangan	mg/l	0,3	0,3	0,3
Aluminium	mg/l	0,2	0,2	0,2
AOX	µg/l	48	48	48
Salinität	PSU	25,63	33,94	29,785
Gesamt-Stickstoff	mg/l	0,21	0,21	0,21
Gelöster anorganischer Stickstoff	mg/l	0,17	0,17	0,17
Phosphor, gesamt	mg/l	0,021	0,021	0,021
TOC	mg/l	1,4	4	2,7
DOC	mg/l	1,4	14	7,7
Arsen	µg/l	1,5	4,1	2,8
Cadium	µg/l	0,06	0,1	0,08
Chrom	µg/l	0,5	1,7	1,1
Kupfer	µg/l	1,1	6	3,55
Quecksilber	µg/l	0,005	0,0076	0,0063
Nickel	µg/l	0,4	2,3	1,35
Blei	µg/l	0,2	1,5	0,85
Zink	µg/l	1,2	6,7	3,95
2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorbiphenyl	µg/l	0,112	0,128	0,12
2,2',3,4,4',5-Hexachlorbiphenyl	µg/l	0,133	0,133	0,133
2,2',4,4',5,5'-Hexachlorbiphenyl	µg/l	0,158	0,158	0,158
2,2',4,5,5'-Pentachlorbiphenyl	µg/l	0,116	0,116	0,116
Benz(a)anthracen	µg/l	2	2,51	2,255
Benz(a)pyren	µg/l	0,5	4,27	2,385
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	2	5,15	3,575
Benzo(ghi)perylen	µg/l	0,6	4,34	2,47
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	2	2,18	2,09
Chrysen	µg/l	2	3,68	2,84
Fluoranthren	µg/l	1	7,38	4,19
gamma-Hexachlorocyclohexan	µg/l	0,1	0,18	0,14
Indeno(1,2,3-cd)pyren	µg/l	0,5	3,46	1,98
Naphthalin	µg/l	2	3	2,5
Phenanthren	µg/l	2	5,2	3,6
Pyren	µg/l	2,37	5,7	4,035

Anhang 10.2-8 Wasserqualitätsdaten der Nordsee (Quellen: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN); Marggraf (2001); Bender (1984); Jaestedt (2010))



Anhang 10.2-9 Verfahrenskette inkl. Massenstrommodell zur Aufbereitung von Meerwasser

Die Berechnung der Restströme erfolgte für eine künstliche Qualität, die auf diversen Quellen mit Daten des Jadebusens an der Nordseeküste in Niedersachsen basiert. Die zugrunde liegenden Konzentrationen sind jeweils die Maximalwerte (worst case) aus verstreut vorliegenden Messdaten der Jahre 1994-2023 (siehe Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). In nachfolgender Tabelle sind die Volumenströme und Konzentrationen der wesentlichsten Parameter des Jadebusens und der Restwasserströme aufgeführt.

Alle Konzentrationen, die in den Restströmen signifikant höher sind als im Jadebusen sind gelb markiert. Die Berechnungen erfolgten analog zu KA und EJK.

Parameter	Einheit	Nordsee	Spülwasser chemiekaliefrei	RO-Konzentrat	Spülwasser chemiekalienthaltig (UF und RO)	Restwasserströme gesamt
Volumenstrom	m ³ /d	48	426	1214	107	1747
Volumenstrom	m ³ /a	1152	10221	29129	2579	41930
Trübung		nicht gemessen				
Abfiltrierbare Stoffe	mg/l	nicht gemessen				
pH-Wert		8,0	7,9	6,0		
Temperatur	°C	nicht gemessen				
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	34000	34000	57812	34264	50559
Salinität (berechnet)	mg/l	21935	21935	37298	22106	32619
Sauerstoff, gelöst	mg/l	nicht gemessen				
TOC, ges. org. Kohlenstoff	mg/l	4	3	5	3	5
Säurekapazität pH 4,3	mmol/l	195	195	329	195	288
B5B5, homogenisiert	mg/l O2	nicht gemessen				
CSB, homogenisiert	mg/l O2	nicht gemessen				
Ammonium-Stickstoff	mg/l	6	6	10	3	8
Nitrit-Stickstoff	mg/l	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0
Nitrat-Stickstoff	mg/l	nicht gemessen	5	8	5	7
Stickstoff, gesamt (anorg.)	mg/l	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Stickstoff, insgesamt (TNb)	mg/l	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3
PO43-, gelöst	mg/l	nicht gemessen				
PO43-, gesamt	mg/l	0,06	0,0	0,0	0,9	0,1
Phosphor, gesamt	mg/l	0,02	0,0	0,3	0,3	0,2
Aluminium, gesamt	mg/l	0,20	0,0	0,0	0,0	0,0
Chlorid	mg/l	19370	19381	33219	20061	29036
Eisen, gesamt	mg/l	0,5	0,005	0,009	0,005	0,008
Mangan, gesamt	mg/l	0,3	0,003	0,005	0,003	0,005
Nitrat	mg/l	24	24	35	24	32
Nitrit	mg/l	0,10	0,1	0,1	0,1	0,1
Sulfat	mg/l	3293	3293	5733	473559	33919
Arsen	µg/l	4,1	0,2	0,4	0,2	0,3
Blei	µg/l	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1
Cadmium	µg/l	nicht gemessen				
Chrom	µg/l	2	0,1	0,1	0,2	0,1
Kupfer	µg/l	6	0,3	0,5	1,9	0,6
Nickel	µg/l	2	2	4	3	3
Quecksilber	µg/l	0,008	0,0	0,0	0,0	0,0
Zink	µg/l	7	7	12	9	10
AOX	µg/l	48	48	84		
Monochloramin	mg/l		0,0	0,0	0,0	0,0
Bisulfit	mg/l		0,0	0,0	0,0	0,0
Antiscalant	mg/l		0,0	5,3	0,0	3,7
Bromid	mg/l		0,0	0,0	0,5	0,0
2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorbiphenyl	µg/l	0,1	0,0	0,2	0,0	0,2
2,2',3,4,4',5-Hexachlorbiphenyl	µg/l	0,1	0,0	0,2	0,0	0,2
2,2',4,4',5,5'-Hexachlorbiphenyl	µg/l	0,2	0,0	0,3	0,0	0,2
2,2',4,5,5'-Pentachlorbiphenyl	µg/l	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1
Chrysen	µg/l	4	0,0	6	0,0	4,5
Fluoranthren	µg/l	7	0,0	13	0,0	8,9
gamma-Hexachlorocyclohexan	µg/l	0,2	0,0	0,3	0,0	0,2
Naphthalin	µg/l	3	0,0	5	0,0	4
Phenanthren	µg/l	5	0,0	9	0,0	6
Pyren	µg/l	6	0,0	10	0,0	7

Wesentliche Auslegungsparameter, die diesen Berechnungen zugrunde liegen, wurden nachfolgend zusammengestellt:

	UF	Tiefenfiltration	UO pass 1	UO pass 2	EDI	IXMB
Auslegungssoftware	System-Design - Inge	Excel-Tool - IWVW	WAVE 2024 - DuPont	WAVE 2024 - DuPont	WinFlow - Veolia	LewaPlus - Lanxess
Zulaufmenge (m³/h)	2257	2144	2169	466	420	390
Ausbeute (%)	95	98	43	90	93	100
			42			
Modul Typ/ Medium	IntegraTec MB PRO 95 TR	Quarzsand/ Hydroanthrazit	30XFR-400/34 (DuPont)	BW30 HRLE-440 (DuPont)	E-Cell 3X (MK 5) (Veolia)	UltraPure UP1295 MD (Lanxess)
Flux netto (L/m²/h)	51	-	15	28	-	-
Filtergeschwindigkeit (m/h)	-	5	-	-	-	45
Transmembrandruck TMP (bar)	-	-	23	12	-	-
Verbrauch Betriebsmittel (l/d)	932 (PACl)	-	57 (Antiscalant)	-	-	-
Aktive Membranfläche (m²)	35.000	-	56.634	13.735	-	-
Filterfläche (m²)	-	428	-	-	-	8
Volumen Filterbett (m³)	-	715	-	-	-	12
spez. Energieverbrauch (kWh/m³)	0,01	-	4,82		0,01	
Anzahl Straßen	n+1	n+1	n+1	n+1	n	n

Die Ausbeute der RO1 ist bei der Aufbereitung von Meerwasser aufgrund des höheren Salzgehaltes mit 43 Prozent geringer als bei den anderen Ressourcen. Die zurückgehaltenen Stoffe erhöhen sich im Konzentrat um den Faktor 1,7.

Mittl. Ablauf	m ³ /d	65184
Min. Ablauf	m ³ /d	65184
Ausbeute Vorfiltration		98%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	2716
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	2716
Max. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /h	854
Max. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /a	4.270.000
Betriebsstunden	h/a	5.000
Mittl. Produktwasserabgabe (Kühlwasser + Feed RO2)	m ³ /h	854
Ausbeute RO1		43%
Max. Zulauf RO1	m ³ /h	1986
Mittl. Zulauf RO1	m ³ /h	1986
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14
Anzahl Straßen	n+1	11
	m ³ gesamt pro Tag	1,7
Biozid-Lösung mit DBNPA	m ³ pro Woche und Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	12
Anteil Kühlwasser Permeat RO1	%	44%
Ausbeute RO2		80%
Max. Zulauf RO2	m ³ /h	4619
Mittl. Zulauf RO2	m ³ /h	27
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14
Anzahl Straßen	n+1	6
	m ³ gesamt pro Tag	1
Biozid-Lösung mit DBNPA	m ³ pro Woche pro Straße	7,5
	m ³ gesamt pro Tag	6,4
Ausbeute für UF + Spülwasser UF		80%
Max. Zulauf UF	m ³ /h	2662
Mittl. Zulauf UF	m ³ /h	2662
Anteil Spülwasser gesamt bis Spülwasser UF		20%
davon Anteil Spülwasser Biofilter		2%
Anteil Spülwasser UF + Spülwasser UF (chemiekalienfrei)		16%
Anteil CEB UF + Spülwasser UF (chemiekalienhaltig)		4%
Volumen Spülwasserauffangbehälter	m ³	100
durchschn. Aufenthaltszeit	h	0,2
CIP-Lösung (sauer o. alkalisch)	m ³ pro CIP und Straße	14
Häufigkeit pro Jahr	pro Straße	1
Anzahl Straßen	n+1	11
	m ³ pro Tag gesamt	0,42

10.2.5 Exemplarischer Einsatz der Matrix zur Ermittlung einer verfahrenstechnischen Vorzugsvariante anhand des Anwendungsfalls KA Wilhelmshaven

Anhand der Ressource KA Wilhelmshaven wird der Umgang mit der Bewertungsmatrix zur Ermittlung einer verfahrenstechnischen Vorzugsvariante exemplarisch demonstriert. Dabei ist die Implementierung optionaler Prozessstufen zu validieren, und geeignete Prozessvarianten sind auf Basis definierter Kriterien auszuwählen. Die Gewichtung der einzelnen Dimensionen/ Wirkfaktoren wurde im Projektkonsortium auf den Aufbereitungsstandort KA Wilhelmshaven abgestimmt. Die Matrix gibt dabei bereits einen verfahrenstechnischen Rahmen vor.

Im ersten Schritt dient die Wahl der Rohwasserart (Anhang 10.2-10) zur Orientierung, wie eine Verfahrenskette typischerweise aufgebaut werden könnte. Daraus erhält man von links nach rechts lesend die verfahrenstechnische Konsequenz zur Entfernung der Zielstoffe nach Kategorie.

Verfahrenstechnische Konsequenz	
Verfahrensschritt Behandlung von...	
Potenzielle Ressourcen (Einordnung nach VGB-M407)	Grundwasser oder Uferfiltrat
	Oberflächenwasser mit geringem Salzgehalt (Fluss-, Stauseewasser usw.)
	Oberflächenwasser mit hohem Salzgehalt (Meer- und Brackwasser)
	Kläranlagenablauf

Anhang 10.2-10 Auswahl des Rohwassers

An erster Stelle in der Kategorie Vorreinigung tritt gestrichelt umrandet, also optional, ein **Grob/Feinrechen**. Da zu diesem Planungszeitpunkt der genaue Ort und die Art der Wasserentnahme noch nicht bekannt sind, sollte dieser unbedingt mit eingeplant werden. An zweiter Stelle steht ein **Feinfilter** mit mindestens 200 µm. Dieser dient vorrangig zum Schutz der UF und ist oftmals schon integraler Bestandteil dieser technologischen Einheit. Der anschließenden **Ultrafiltration** sollte hier zur erweiterten Reduktion von partikulärer und organischer Fracht eine **Inline-Flockung** (siehe Richtwerte bezogen auf die Wasserqualität im Eintritt zur jeweiligen Verfahrensstufe) vorgeschaltet werden. Eventuell vorhandenes Eisen, Mangan oder hohe DOC-Gehalte (siehe Richtwerte...) werden durch den Einsatz von **Ozon** oxidiert und in einer **Tiefenfiltration** abgeschieden. Der Einsatz von **Antiskalanten** ist in den allermeisten Fällen nicht zu vermeiden und auch der **Kerzenfilter** ≤ 5 µm ist zum Schutze der **Umkehrosmose** obligatorisch. Optional kann die 1. Stufe UO **konzentratgestuft** ausgeführt werden (siehe Vorzugsvarianten/ Bewertung bezogen auf...). Unter Eintritt der Bedingungen „Richtwerte...“ und „Vorzugsvarianten/...“ kann das saure Permeat zur chemischen Entsäuerung mit **NaOH** versetzt werden. Alternativ und unter Abwägung der projektspezifischen Kriterien kann die Entsäuerung auch physikalisch mittels Membranentgasung stattfinden. Bei sehr hartem Wasser (überprüfe Richtwerte...) und zweistufiger Umkehrosmose sollte eine Enthärtung mittels **schwach- und stark sauren Anionenaustauschern (WAC/SAC)** stattfinden, bevor das Permeat in der **Umkehrosmose 2** weiter

behandelt wird. Alternativ zur UO2 besteht die Möglichkeit eine UO1-Permeat **Restenthärtung** mittels **WAC/SAC** durchzuführen. Sollte sich für die zweistufige UO entschieden werden, kann auch diese wieder **konzentratgestuft** ausgeführt werden. Die Membrantgasung wird entweder mit einem Stützgas **N₂** oder mit **Luft-Vakuum** betrieben. Die darauffolgende **EDI**, welche immer durch einen **Kerzenfilter ≤ 5 µm** geschützt konzipiert wird, kann mit einem **IXMB** ergänzt werden, sofern dies projektspezifisch unter „Vorzugsvariante/...“ entschieden wird. Zur Spülwasseraufbereitung wird entweder ein **Absetzbecken** oder eine kombinierte Lösung aus **Absetzbecken und Ultrafiltration** eingesetzt.

Im nächsten Schritt (siehe Anhang 10.2-11) werden Richtwerte angegeben, welche beim Überschreiten den Eintritt einer optionalen Verfahrensstufe bedingen. Für dieses Vorgehen muss die Rohwasserqualität bekannt sein und über Auslegungssoftware abgeschätzt werden, wie sich diese entlang der Aufbereitungskette ändert. Generell empfiehlt es sich jedoch, nicht nur die angegebenen Parameter, sondern das volle Spektrum nach VGB-M 407 zu analysieren.

Richtwerte bezogen auf die Wasserqualität im Eintritt zur jeweiligen Verfahrensstufe		
Parameter [mg/l]	Suspendierte Stoffe TS	
	Gelöster Organischer Kohlenstoff DOC	
	Eisen 2+ zweiwertig	
	Mangan Mn zweiwertig	
	Säurekapazität K _{S4,3} [mmol/l]	
	Kohlenstoffdioxid CO ₂ gelöst	
	Kieselsäure gesamt	
	Barium/ Strontium	

Anhang 10.2-11 Parameter zur Auswahl optionaler Prozessschritte

Der DOC im Ablauf der Kläranlage Wilhelmshaven beträgt als Median mehrerer Messungen 11 mg/l, der TS-Gehalt < 5 mg/l. Da der DOC im Schnitt den Schwellenwert von **10 mg/l** überschreitet, empfiehlt sich der Einsatz einer **Inline-Flockung**. Der DOC ist allerdings nicht hoch genug (>> 10 mg/l), um den Einsatz einer Ozonierung zu rechtfertigen. Die Werte für Eisen (0,248 mg/l) und Mangan (0,312 mg/l) überschreiten zwar nicht die Schwelle **0,5 mg/l**, wie bei den Richtwerten zur Tiefenfiltration angegeben, insbesondere Mangan kann jedoch saisonal variieren und wird durch Einzelmessungen nicht ausreichend repräsentiert. Deshalb wird der Einsatz einer **belüfteten Tiefenfiltration** empfohlen, sollte sich dies unter „Vorzugsvarianten/...“ als unproblematisch darstellen. Da es sich beim KA-Ablauf um sehr hartes Wasser handelt (K_{S4,3} = 4,31 mmol/l > **0,7 mmol/l**), sollte unter Abschätzung der projektspezifischen Kriterien die Enthärtung zwischen **UO1** und **UO2** mittels **WAC/SAC** in Betracht gezogen werden. Die Wahl einer Permeat- einstufigen oder zweistufigen UO-Konfiguration wird ebenfalls anhand dieser Kriterien getroffen. Der durch die Software WAVE simulierte CO₂-Gehalt im Permeat nach der UO1 bzw. UO2 beträgt 16 und 22 mg/l > **0,2 mg/l**, was für den Einsatz einer Entsäuerung spricht. Alternativ zur Membrantgasung kann die chemische Entsäuerung mittels NaOH unter Abwägung der Auswirkungen herangezogen werden.

Im letzten Schritt (Anhang 10.2-12) werden schlussendlich die noch offenen Prozessoptionen anhand von definierten Kriterien und Gewichtungsfaktoren entschieden. Die belüftete Tiefenfiltration, mit einer Gesamtbewertung unter 1, sollte zur Gefahrenminimierung durch das Auftreten von Mangan in

die Planung mit aufgenommen werden, da hier keine bis geringfügige negative Auswirkungen infolge des Verfahrens selbst zu erwarten sind (0,89). Der Impact durch den Einsatz einer **Membrantgasung unter Luft-Vakuum** (0,37) ist anhand der Gewichtung geringer als die chemische Entsäuerung mittels NaOH (0,44) zu werten. Die Auswertung des potenziellen Einflusses der Implementierung einer Permeat ein- oder zweistufigen UO-Ausführung spricht leicht für die **zweistufige Umkehrosmoseanlage** (1,24) gegenüber der einstufigen Ausführung mit Permeat Restenthärtung (1,25). Weiterhin ist der negative Einfluss eines nach der EDI geschalteten **Mischbettes IXMB** als gering einzuschätzen (0,48), sodass die Vorteile als Qualitäts-Sicherheitsstufe und zur Entlastung der EDI selbst (kann kleiner dimensioniert werden) überwiegen. Hinsichtlich einer Spülwasseraufbereitung ist der negative Einfluss durch eine kombinierte Lösung aus **Absetzbecken und UF** mit einem Wert von 0,80 ebenfalls als gering einzuordnen und kann zu Gunsten der Gesamtausbeute präferiert werden.

Anhang 10.2-12 fasst die Ergebnisse zusammen. Ergebniszellen in den Zeilen „Gesamt“ und „Umweltrelevanz“ fassen die gewichtete Bewertung pro Stufe und aller Optionen zusammen, während an der rechten Seite die zusammenfassende Bewertung der gewählten Verfahrenskette angezeigt wird. Die gewählten Verfahrensstufen sind grau gekennzeichnet. Die Gesamtbewertung von 0,6 hinsichtlich der festgelegten Kriterien und Gewichtungen lässt auf einen minimalen umweltrelevanten Einfluss der gewählten Verfahrenskette für die Reinstwasserbereitstellung in Relation zu den vorhandenen Optionen schließen.

Dimension	Wirkfaktor	Einfluss auf.../ Beeinflusst von...	Inline-Flockung	Flockung + Sedimentation	Osmon + Reaktor + MF	Luft + MF	WAO/SAC vorgeschaltet	Antrikolant	Konzentrat-Stufe	NaOH	UO2	Konzentrat-Stufe	Permeat-Restenthärtung	Membran-entgasung mit N2	Membran-entgasung mit Luft-Vakuum	IXMB	Absetz-becken	Absetz-becken + UF	Bewertung der gewählten Verfahrenskette		
40%	Ökologischer Einfluss/ Umweltrelevanz	Rohwasserausbeute	0	1	1	1	2	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0,33	
		Energieverbrauch	1	1	1	1	0	1	2	1	1	2	0	2	0	2	1	0	0	1	1,11
		Anfall von Reststoffen (qualitativ/ quantitativ)	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	0	0	0	1	2	1	1	1,11
10%	Technisch betriebliche Anforderungen	Betriebsmitteleinsatz	2	0	0	1	2	2	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0,67
		Redundanz/ Betriebssicherheit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0,11
		Betriebsaufwand	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0,89
10%	Systemflexibilität	Flächenbedarf	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,89
		Saisonale Schwankungen Qualität	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,11
		Saisonale Schwankungen Quantität	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,00
40%	Kosten	Investition	0	1	2	1	2	0	2	0	2	0	2	0	2	1	1	1	1	2	1,22
		Betrieb	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1,00
			1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1,11
100%																					
			0,44	1,04	1,44	0,89	1,83	0,44	0,88	0,44	1,24	0,88	1,19	0,96	0,46	0,96	1,02	0,80		0,73	
			0,20	1,40	1,40	1,00	1,80	0,50	0,60	0,50	1,50	0,60	1,60	0,30	0,10	0,20	1,60	0,40			

Anhang 10.2-12 Projektspezifischen Beurteilung optionaler Prozessschritte (die grauen Zellen markieren die gewählte Variante). Übersichtshalber sind die Spalten, welche nicht optionale Prozessstufen enthalten, ausgeblendet.

10.3 Übergeordnete Matrix zur Priorisierung der Ressourcen

Kriterien	Detaillierte Erläuterung	Gewichtung	Standort X						Bewertung			
			Ressource 1		Ressource 2		Ressource 3					
			aufnehmender Vorfluter: XXX	Wert	aufnehmender Vorfluter: XXX	Wert	aufnehmender Vorfluter: XXX	Wert				
Datenlage Wasserverfügbarkeit	Ausschlusskriterium: ist eine ausreichende Datenlage verfügbar, um die verfügbare Wassermenge der Ressource beurteilen zu können?		0		0		0		0	2 = Nein, voraussichtlich keine ausreichende Wassermenge vorhanden oder Datenlage unzureichend	1 = Ja, voraussichtlich ausreichend Wassermenge vorhanden aber sehr wahrscheinlich mit Einschränkungen	0 = Ja, voraussichtlich ausreichend Wassermenge vorhanden
Infrastruktur (Netz, Entnahme)	Verteilungsnetz Geschätzter genehmigungsrechtlicher Aufwand für den Leitungsbau aufgrund der Länge der Rohrleitung und der Trassenlegung. Sind geschützte Gebiete zu durchqueren? Sind Siedlungsgebiete zu durchqueren? Etc.	5,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Rohwasser-entnahme genehmigungsrechtlicher/baulicher Aufwand für die Überführung des Rohwassers in das Brauchwasserwerk. Entweder durch ein Entnahmebauwerk (Ogew) oder ein Übergabebauwerk/-Pumpwerk zwischen einer Kläranlage und dem Brauchwasserwerk	5,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Rohwasserqualität + Wasseraufbereitung	Anfall von Reststoffen Qualitative und Quantitative Beurteilung der einzuleitenden oder zu entsorgenden Abwasserströme aus der Aufbereitung (nur differenziert möglich, wenn Verfahrenskette schon konstruiert und Rohwasserqualität bekannt ist; ansonsten generelle Abschätzung)	3,8%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Betriebsmittel-einsatz Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption (z.B. hoher Bedarf bei Ionenaustauschern)	3,8%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Energieverbrauch Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption und Rohwasserqualität (z.B. hoher Verbrauch bei Meerwasserentsalzung)	3,8%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Rohwasserausbeute Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption (z.B. geringe Ausbeute ohne zweite Konzentratstufe bei der UO)	3,8%	0		0		0		0	2 = gering	1 = mittel	0 = hoch
Wasserrechtliche Genehmigung	Einleitgenehmigung für Restwasserströme Aufwand für die Beantragung der Einleitgenehmigung: Sind erwartungsweise viele Gutachten erforderlich? Sind hohe Auflagen aufgrund von Menge und Qualität der anfallenden Restwasserströme zu erwarten? Etc.	10,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Entnahmegenehmigung Aufwand für die Beantragung der Entnahmegenehmigung: Sind erwartungsweise viele Gutachten erforderlich? Sind hohe Auflagen aufgrund von geschützten Fischarten zu erwarten? Etc.	10,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Umweltauswirkungen des Gesamtvorhabens	Auswirkungen Entnahme Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch "Beanspruchung der Wasserressource - Entnahme" (z. B. Beeinflussung hydrologischer Parameter, Organismenentnahme)	5,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Auswirkungen Einleitung Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch "Einleitung von Restwasserströmen" (z. B. Beeinflussung hydrologischer, chemischer und physikalisch-chemischer Gewässerparameter)	5,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Auswirkungen Trassen / Leitungen Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch "Entnahme- und Einleitbauwerke, Anlagen-/Rohrleitungsbau," (z. B. Flächenbeanspruchung, Luftschall-Immissionen)	5,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Auswirkungen Aufbereitung Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch Auswirkungen der Verfahrenskette, basierend auf der Matrix zu der Verfahrensauswahl	5,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Zeit	Zeitlicher Aufwand für alle Gewerke: von der Entnahme/Übergabe des Rohwassers bis zum fertigen Brauchwasser, inkl. Rohrleitungen	15,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Kosten	Jahreskosten (Kapitalkosten + Betriebskosten) für alle Gewerke	20,0%	0		0		0		0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Ergebnis			0,0		0,0		0,0					

Anhang 10.3-1 Übergeordnete Matrix zur Priorisierung der Ressourcen

Kriterien	Detaillierte Erläuterung	Gewichtung	Ressourcen WHV						Bewertung		
			Oberflächenwasser		KA WHV		Meerwasser Innenjade				
			aufnehmender Vorfluter: XXX	aufnehmender Vorfluter: Meer	aufnehmender Vorfluter: Meer	aufnehmender Vorfluter: Meer	aufnehmender Vorfluter: Meer	aufnehmender Vorfluter: Meer			
			Bewertung	Wert	Bewertung	Wert	Bewertung	Wert			
Datenlage Wasserverfügbarkeit	Ausschlusskriterium: ist eine ausreichende Datenlage verfügbar, um die verfügbare Wassermenge der Ressource beurteilen zu können?		2	2	0	0	0	0	2 = Nein, voraussichtlich keine ausreichende Wassermenge vorhanden oder Datenlage unzureichend	1 = Ja, voraussichtlich ausreichend Wassermenge vorhanden aber sehr wahrscheinlich mit Einschränkungen	0 = Ja, voraussichtlich ausreichend Wassermenge vorhanden
Infrastruktur (Netz, Entnahme)	Verteilungsnetz Geschätzter genehmigungsrechtlicher Aufwand für den Leitungsbau aufgrund der Länge der Rohrleitung und der Trassenlegung. Sind geschützte Gebiete zu durchqueren? Sind Siedlungsgebiete zu durchqueren? Etc.	5,0%		0	1	0,05	1	0,05	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Rohwasser-entnahme genehmigungsrechtlicher/baulicher Aufwand für die Überführung des Rohwassers in das Brauchwasserwerk. Entweder durch ein Entnahmebauwerk (Ogew) oder ein Übergabebauwerk/-Pumpwerk zwischen einer Kläranlage und dem Brauchwasserwerk	5,0%		0	0	0	2	0,1	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Rohwasserqualität + Wasseraufbereitung	Anfall von Reststoffen Qualitative und Quantitative Beurteilung der einzuleitenden oder zu entsorgenden Abwasserströme aus der Aufbereitung (nur differenziert möglich, wenn Verfahrenskette schon konstruiert und Rohwasserqualität bekannt ist; ansonsten generelle Abschätzung)	3,8%		0	1	0,0375	2	0,075	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Betriebsmitteleinsatz Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption (z.B. hoher Bedarf bei Ionenaustauschern)	3,8%		0	1	0,0375	2	0,075	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Energieverbrauch Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption und Rohwasserqualität (z.B. hoher Verbrauch bei Meerwasserentsalzung)	3,8%		0	1	0,0375	2	0,075	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Rohwasserausbeute Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption (z.B. geringe Ausbeute ohne zweite Konzentratstufe bei der UO)	3,8%		0	1	0,0375	2	0,075	2 = gering	1 = mittel	0 = hoch
Wasserrechtliche Genehmigung	Einleitgenehmigung für Restwasserströme Aufwand für die Beantragung der Einleitgenehmigung: Sind erwartungsweise viele Gutachten erforderlich? Sind hohe Auflagen aufgrund von Menge und Qualität der anfallenden Restwasserströme zu erwarten? Etc.	10,0%		0	1	0,1	1	0,1	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Entnahmegenehmigung Aufwand für die Beantragung der Entnahmegenehmigung: Sind erwartungsweise viele Gutachten erforderlich? Sind hohe Auflagen aufgrund von geschützten Fischarten zu erwarten? Etc.	10,0%		0	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Umweltauswirkungen des Gesamtvorhabens	Auswirkungen Entnahme Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch "Beanspruchung der Wasserressource - Entnahme" (z. B. Beeinflussung hydrologischer Parameter, Organismenentnahme)	5,0%		0	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Auswirkungen Einleitung Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch "Einleitung von Restwasserströmen" (z. B. Beeinflussung hydrologischer, chemischer und physikalisch-chemischer Gewässerparameter)	5,0%		0	1	0,05	1	0,05	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Auswirkungen Trassen / Leitungen Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch "Entnahme- und Einleitbauwerke, Anlagen-/Rohrleitungsbau," (z. B. Flächenbeanspruchung, Luftschall-Immissionen)	5,0%		0	1	0,05	1	0,05	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
	Auswirkungen Aufbereitung Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch Auswirkungen der Verfahrenskette, basierend auf der Matrix zu der Verfahrensauswahl	5,0%		0	1	0,05	2	0,1	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Zeit	Zeitlicher Aufwand für alle Gewerke: von der Entnahme/Übergabe des Rohwassers bis zum fertigen Brauchwasser, inkl. Rohrleitungen	15,0%		0	1	0,15	2	0,3	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Kosten	Jahreskosten (Kapitalkosten + Betriebskosten) für alle Gewerke	20,0%		0	1	0,2	2	0,4	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering
Ergebnis				X		0,8		1,5			

Anhang 10.3-2 Übergeordnete Matrix zur Priorisierung der Ressourcen. Beispielhaft dargestellt für den Standort Wilhelmshaven

10.4 Leitfaden für energiewirtschaftliche Planungs- und Zulassungsverfahren

**Integrales Wassermanagement
für die Wasserstoffproduktion –
Leitfaden für
energiewirtschaftliche Planungs- und Zulassungsverfahren**

gefördert unter dem Förderkennzeichen 39052/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Übersicht des Planungsprozesses.....	3
2.1	Wasserbedarfsermittlung	3
2.2	Identifikation möglicher Ressourcen.....	5
2.3	Engineering der Aufbereitung.....	6
2.3.1	Bewertungsmatrix zur Ermittlung einer Verfahrenstechnischen Vorzugsvariante.....	9
2.4	Beschreibung und Bewertung der Restwasserströme	11
2.5	Abwasserentsorgung.....	13
2.6	Priorisierung bzw. Ausschluss von Ressourcen.....	14
3	Zulassungsverfahren.....	17
3.1	Wasserrechtliche Gestattungen.....	17
3.2	Einleitgenehmigung.....	18
3.3	Ablauf des Verfahrens	18
4	Herausforderungen und Risiken.....	19
5	Literatur.....	20
	Impressum.....	21

1 Einleitung

Dieser Leitfaden soll als eine Entscheidungshilfe bei der Wahl der zu nutzenden Wasserressource für die grüne Wasserstoffproduktion dienen. Er soll dazu beitragen den Wasserbedarf für die Wasserstoffproduktion nachhaltig zu decken, ohne bereits bestehende, lokale Wasserbedarfe und -nutzungen zu gefährden. Da bei der Wasserstoffproduktion Wasser für die jeweiligen Nutzungen aufbereitet werden muss, werden in diesem Leitfaden auch die Themen Aufbereitung und Entsorgung adressiert.

Der Leitfaden versteht sich als Handlungshilfe, die aufzeigt, welche umwelt- und naturschutzrechtlichen Anforderungen an heutige wasserrechtliche Genehmigungsverfahren geknüpft sind und wie eine geschickte Ressourcenwahl dabei hilft, Nutzungskonkurrenzen zu vermeiden.

Letzteres ist dann von Bedeutung, wenn keine Trinkwasserreserven verfügbar sind. In diesem Fall müssen ggf. alternative Ressourcen gesucht werden, deren Aufbereitung umweltfreundlich und gewässerschonend stattfinden muss. Konkret liefert dieser Leitfaden Anhaltspunkte zur Prüfung von alternativen Wasserquellen wie z. B. kommunalem und industriellem Abwasser, oder Meerwasser.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen durch verschiedene Landeswassergesetze und deren Umsetzung durch die Behörden, kann dieser Leitfaden nicht als Verfahrensbuch verwendet werden. Die länder- und kreisspezifischen Vorgaben müssen mit der gesetzlich zuständigen Wasserbehörde, die die Genehmigungsverfahren führt, sorgfältig abgestimmt werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass in diesem Leitfaden ausschließlich die Zulassungsverfahren von wasserrechtlichen Genehmigungen betrachtet werden.

2 Übersicht des Planungsprozesses

Der Prozess von der Ressourcensuche bis zur Nutzung gliedert sich grob in vier verschiedene Schritte (Abbildung 1).

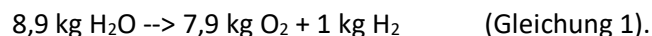


Abbildung 1: Allgemeine Darstellung der einzelnen Schritte bis zur Nutzung einer Ressource.

2.1 Wasserbedarfsermittlung

Die Ermittlung des Wasserbedarfs hängt in erster Linie vom angestrebten H₂-Produktionsvolumen sowie der einzusetzenden Technologie, Kühltechnologie und der Beschaffenheit der Wasserressource sowie deren Aufbereitung ab (vgl. 2.3).

Der Wasserbedarf für die Herstellung von grünem Wasserstoff variiert stark je nach verwendeter Elektrolyse- und Kühltechnologie und für die Elektrolyse genutzter Rohwasserquelle. Unabhängig von der Kühlung werden rein stöchiometrisch rund 9 Liter Reinstwasser benötigt, um einen kg Wasserstoff herzustellen (1 Liter Wasser entspricht etwa 1 kg):



Unter realen Bedingungen entstehen jedoch Wasserverluste von etwa 10-25 % (Krömer et al. 2024). Schon kleinste Verunreinigungen im Wasser können die chemische Reaktion im Elektrolyseur stören, den produzierten Wasserstoff verunreinigen oder die Nutzungsdauer der Anlage verringern. Daher ist es zwingend erforderlich, Wasser mit einem hohen Reinheitsgrad ohne Salze, Mineralien oder andere Stoffe zu verwenden. Die Produktion eines Reinstwassers oder vollentsalzten Wassers (VE-Wasser) kann grob in drei Verfahrensgruppen unterteilt werden. Zunächst erfolgt eine Vorbehandlung in Abhängigkeit von der Qualität des Rohwassers, u.a. mittels Filtrations- und Flockungsverfahren. Im nächsten Schritt erfolgt die Entsalzung des Wassers durch thermische oder Membranverfahren. Der letzte Schritt wird als Polishing bezeichnet, bei dem häufig Elektrodeionisation und Ionenaustauscher eingesetzt werden. Bei den verschiedenen Aufbereitungsstufen entstehen, in Abhängigkeit von der Rohwasserqualität, unterschiedlich hohe Wasserverluste. So ist die Ausbeute bei der Nutzung von

Meerwasser geringer als bei Grund- oder Oberflächenwasser, sprich, es entstehen größere Wasserverluste, aufgrund des hohen Salzgehaltes und der hohen Konzentration von Verunreinigungen.

Der Energy Hub im Nordwesten Niedersachsens ist ein großes Infrastrukturprojekt, welches sich zum Ziel gesetzt hat, ein Drehkreuz für die Erzeugung, Speicherung und Verteilung von erneuerbaren Energien und Energieträgern, insbesondere Wasserstoff, zu werden. Es wird geplant eine Elektrolysekapazität von insgesamt 6 GW zu installieren. Nach aktuellen Schätzungen liegt der Wasserbedarf bei etwa 20 Mio. m³/a, wovon etwa 60 % in Reinstwasserqualität für die Elektrolyse benötigt werden.

Bei dem Elektrolyseprozess wird ein Teil der eingesetzten Energie in Wärme umgewandelt. Wenn diese keinem Nutzen zugeführt wird, z.B. im Nah- oder Fernwärmenetz, muss diese Wärme mittels Kühlung abgeführt werden. Auch dafür wird in der Regel Wasser genutzt. Bei der Kühltechnologie werden primär drei Verfahren unterschieden.

Bei der Durchlaufkühlung wird Wasser nach einer groben mechanischen Reinigung direkt für die Kühlung genutzt und anschließend der ursprünglichen Quelle wieder zugeführt. Das hat den Vorteil, dass kein Wasser für die Kühlwasseraufbereitung „verbraucht“ wird und größtenteils auf Chemikalien verzichtet werden kann (Saravia et al. 2024). Allerdings verändert die Rückleitung durch Wärme und Verdunstung den genutzten Wasserkörper, weshalb die Durchlaufkühlung aufgrund des sehr hohen Wasserbedarfs und der starken Umweltauswirkungen heute nur noch an Standorten mit sehr hoher Wasserverfügbarkeit eingesetzt und zunehmend durch wassersparende Alternativen ersetzt wird.

Als Alternative wird bei der Kreislaufkühlung das Kühlwasser „mehrfach“ genutzt, wodurch sich der Kühlwasserbedarf reduziert. Das aufgewärmte Wasser wird dabei in die Verdunstungskühler geleitet, wobei ein Teil des Wassers durch Verdunstung an die Umgebungsluft abgegeben wird. Um eine Aufkonzentrierung zu vermeiden, wird kontinuierlich ein Teil des Kühlwassers abgeleitet und durch Frischwasser ersetzt. Zudem muss das Kühlwasser aufgrund der langen Verweilzeit und Aufkonzentrierung zuvor aufbereitet werden (Saravia et al. 2024).

Bei der Luftkühlung (Trockenkühlsystem) wird das erwärmte Kühlwasser in einem geschlossenen System über eine Reihe von Rohren mit der Umgebungsluft gekühlt. Da kein direkter Kontakt zwischen Kühlmedium und Luft besteht, fallen sowohl der Wasserbedarf als auch der Wasserverbrauch für die Kühlung praktisch auf null (Saravia et al. 2024). Neben den oben beschriebenen Kühlverfahren gibt es auch Technologien, bei denen die Verdunstungs- und Luftkühlung kombiniert werden. Eine beispielhafte Darstellung des Kühlwasserverbrauchs ist in Abbildung 2 dargestellt.

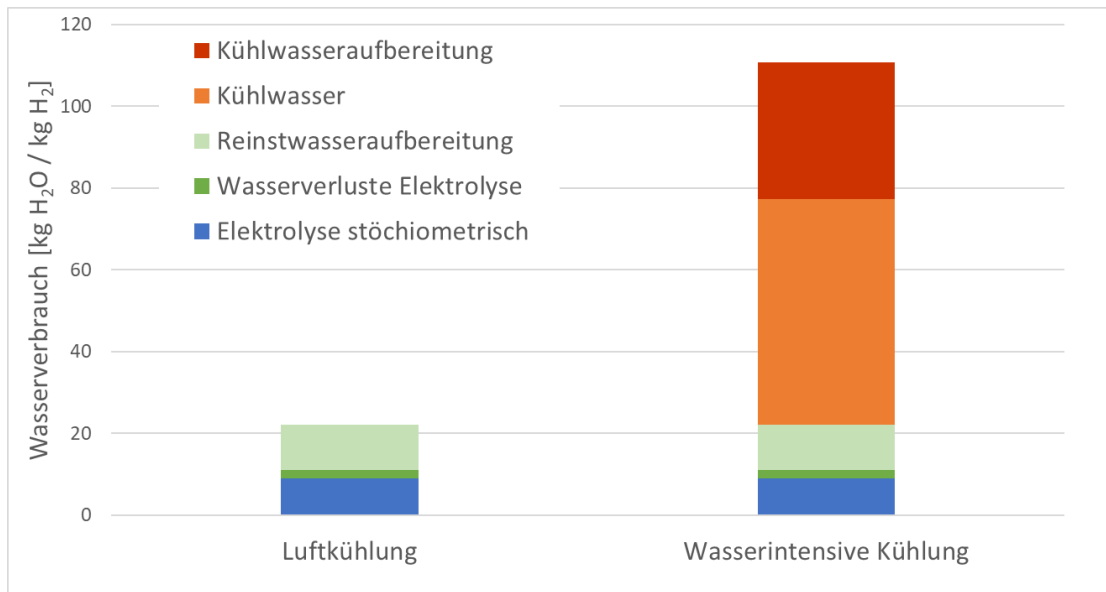


Abbildung 2 Beispielhafter Wasserverbrauch für die Herstellung eines Kilogramms Wasserstoff mit Kläranlagenablauf

2.2 Identifikation möglicher Ressourcen

Die öffentliche Trinkwasserversorgung – sowohl für Privathaushalte als auch für industrielle Anlagen – wird in Deutschland hauptsächlich durch Grundwasser, Uferfiltrat und Talsperrenwasser gestützt. In einer Region mit geringer Beanspruchung der lokalen Wasserressourcen können zunächst diese auf ihre Verfügbarkeit und Qualität hin geprüft werden.

Eine langfristig nachhaltige Nutzung kann nur dann vorliegen, wenn **durch die geplante Entnahme keine Überbeanspruchung der jeweiligen Ressource zu erwarten ist**. Je nach Bundesland stehen dafür unterschiedliche Informationssysteme oder Datensätze zur Verfügung, die von den Behörden im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens genutzt werden.

Sollte die angestrebte Entnahmemenge nicht genehmigungsfähig sein, müssen Alternativen geprüft werden.

In Deutschland zählen u.a. Fließgewässer, Abwasser, Meer- und Brackwasser sowie Siedlungsabfluss zu den nicht-traditionellen, bzw. alternativen Wasserressourcen, die für eine Betriebswassernutzung herangezogen werden können. Inwieweit diese eine tatsächliche Alternative und somit realistische Ressource für die H₂-Produktion darstellen, ist im Einzelfall und mit Fokus auf die jeweiligen lokalen Gegebenheiten zu prüfen.

Folgende Punkte sollten dabei berücksichtigt werden:

1) Wasserdargebot und nutzbares Wasserdargebot

Die Verfügbarkeit in Menge und Kontinuität sind insbesondere bei größeren H₂-Produktionsanlagen ein entscheidendes Kriterium für die Wahl einer Ressource. Hierbei gilt es aber zu bedenken, dass die Menge immer auch in Relation zur jeweiligen Qualität steht. Es bedarf weit größerer Mengen an Meerwasser, als (i. d. R.) Grundwasser zur Deckung des

Produktionsbedarfs. Auch ohne genauere Kenntnisse zur Qualität sollte diese in die Mengenerwägung, zumindest überschlägig, einbezogen werden.

Ziel ist die Identifikation einer oder mehrerer Ressource(n), die den entstehenden Bedarf – unter Einbeziehung der genannten überschlägigen Qualitätsbeurteilung – in ausreichender Menge und Kontinuität deckt bzw. decken.

2) Ökologische Risiken und Auswirkungen für die Ressource

Sollten zu Beginn noch keine Gutachten vorliegen, kann eine abschätzende Prüfung möglicher ökologischer Risiken bspw. mittels einer detaillierten Raumanalyse erfolgen, in der insbesondere Schutzgebiete, aber bspw. auch Bewirtschaftungsziele nach Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) erfasst werden. Hieraus lassen sich erste Rückschlüsse auf durch die Nutzung möglicherweise betroffene Ökosysteme und Arten ziehen und frühzeitig ein Überblick über mögliche Ausschlusskriterien erlangen.

Eine Vorprüfung in dieser Art sollte **Natura 2000 Gebiete**, bzw. **Gebiete der Vogelschutzrichtlinie (EU-VS) und der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie (FFH-RL)** umfassen.

Weitere Prüfkriterien sind der ökologische Zustand bzw. das ökologische Potenzial der Ressource und die Abschätzung, ob durch die geplante Nutzung negative Auswirkungen zu erwarten sind.

3) Lage, Umfeld und Distanz der Entnahmestandorte zur Aufbereitung

Für den Schritt ist ein Überblick über die potenziell geeigneten Wasserressourcen innerhalb des Planungsraums erforderlich. Durch die Zusammenstellung und räumliche Darstellung der verfügbaren Informationen über alle potenziellen Entnahmeorte lassen sich Aussagen zu Eignung treffen.

Bei in anderen Punkten ähnlich geeigneten Ressourcen kann die Entfernung zwischen Entnahme und H₂-Produktion ein entscheidendes Kriterium zur Priorisierung einer Ressource sein. Zudem lassen sich durch die räumliche Darstellung mögliche Raumwiderstände in Bezug u.a. auf die notwendigen Leitungsbaumaßnahmen abschätzen.

2.3 Engineering der Aufbereitung

Sobald eine oder mehrere Ressourcen als geeignet und grundsätzlich genehmigungsfähig identifiziert wurden, kann die Planung zum Aufbereitungsbedarf folgen. Aus den Überlegungen zum Aufbereitungsbedarf ergibt sich die zu erwartende Abwassermenge und -qualität. Beide Informationen werden für die Genehmigung zur Einleitung der Abwasserströme benötigt.

Das methodische Vorgehen zur Bewertung der verfahrenstechnischen Alternativen ist ein iterativer Prozess. Der Wasserbedarf der verfügbaren (benötigten) Wasserressource bestimmt die Größe und den Platzbedarf der zu planenden verfahrenstechnischen Anlagen und ggf. einen notwendigen Speicherbedarf. Bei allen Ressourcen, mit Ausnahme des Meerwassers, muss eine Variation der verfügbaren Rohwassermengen samt entsprechender Speichermöglichkeiten berücksichtigt werden, um eine durchgehende Brauchwasserversorgung sicherzustellen. Die Roh- und Zielwasserqualität

hingegen bestimmen maßgeblich die einzusetzende Aufbereitungstechnik und den benötigten Bedarf an Energie und Zusatzstoffen.

Mithilfe von Modellierungstools kann eine erste Planung der Verfahrenstechnik durchgeführt werden. Diese bildet die Grundlage zur weiteren Detailplanung und Kostenermittlung durch ein Ingenieurbüro.

Die Verfahrensketten zur Wasseraufbereitung sind in zwei Qualitätsstufen unterteilt. Die erste Qualitätsstufe (auch als Basiswasserqualität bezeichnet) ist für Kühlzwecke geeignet, während die zweite Qualitätsstufe dem Reinstwasser für die Elektrolyse entspricht. Die Verfahrensketten für die betrachteten Wasserressourcen sind im Wesentlichen gleich aufgebaut und unterscheiden sich hauptsächlich in Anzahl und Typ der einzusetzenden Technologien. Die Funktionen der einzelnen Verfahrensstufen werden nachfolgend beschrieben:

1. Vorfiltration

- Zweck: Entfernung von groben Verunreinigungen wie Schwebstoffen, Partikeln und organischen Reststoffen
- Ziel: Schutz der nachgeschalteten Membranstufen vor Beschädigung

2. Flockung

- Zweck: Einbindung von kolloidalen und Überführung von gelösten Wasserinhaltsstoffen in Flocken für die filtrative Abtrennung
- Ziel: Verbesserung der Filtratqualität und Stabilisierung des Betriebs der Ultrafiltration durch Minderung von Fouling an der Membran

3. Ultrafiltration (UF)

- Zweck: Entfernung von Mikroorganismen, Viren und kolloidalen Partikeln (Porengröße: ca. 0,01–0,1 μm)
- Ziel: Sicherstellung einer hohen Filtratqualität und Schutz der Umkehrosmosemembranen vor Verblockung und Fouling

4. Ozonung – bei Bedarf

- Zweck: Inaktivierung von Mikroorganismen (Reduzierung von Wiederverkeimungspotenzial), Oxidation von Mangan und organischen Substanzen, bzw. Strukturveränderung
- Ziel: Sicherstellung der vollständigen Manganoxidation

5. Bio-Filtration – bei Bedarf

- Zweck: biologischer Abbau und Entfernung bei erhöhtem Aufkommen von Nährstoffen wie NO_3 und NH_4 , und insbesondere von Mangan Mn^{2+}
- Ziel: Schutz der nachgeschalteten RO-Membranen und Vermeidung von Fouling und Braunsteinbildung

6. Umkehrosmose (RO)

Stufe 1:

- Zweck: Entfernung von gelösten Salzen, Schwermetallen, organischen Stoffen und anorganischen Ionen
- Ziel: Erzeugung von salzarmem Wasser mit hoher Reinheit, Teilmenge als Kühlwasser (Basisqualität)

Stufe 2:

- Zweck: Restentsalzung
- Ziel: Erzeugung von nahezu salzfreiem Wasser mit hoher Reinheit (Salzrückhalt bis zu 99 %)

Um die Gesamtausbeute der RO-Anlagen zu erhöhen und den Konzentratanfall zu reduzieren, werden beide Permeatstufen zusätzlich konzentratgestuft (concentrate stage). Das Konzentrat der zweiten Stufe kann vollständig in den Feed zurückgeführt werden. Die Konzentratstufung wird aber i. d. R. nicht für die erste Permeatstufe von Meerwasserentsalzungsanlagen angewandt, da hier der hohe osmotische Druck die Auslegung durch die Membranbelastungsgrenzen limitiert.

7. Spülwasseraufbereitung mittels UF

- Zweck: Aufbereitung der chemikalienfreien Spülwässer aus Vorfilter, UF und biologischen Filtern mittels Absetzbecken und UF
- Ziel: Rückführung in den Feed der Haupt-UF, Verbesserung der Gesamtausbeute

8. Entsäuerung / Membranentgasung

- Zweck: Reduktion von freier Kohlensäure (CO₂) und weiterer gelöster Gase im Wasser
- Ziel: Senkung der Korrosivität des Wassers und Stabilisierung des pH-Werts

9. Elektrodeionisation (EDI)

- Zweck: Restentsalzung, Entfernung verbleibender Ionen und ionisierbarer Stoffe, ohne Einsatz von Chemikalien
- Ziel: Erzeugung von Ultrareinstwasser mit sehr geringer Leitfähigkeit

10. Ionenaustausch (bei Bedarf)

- Zweck: Sicherheitsstufe zur Entfernung letzter Spuren von Ionen aus dem Wasser, die im EDI-Schritt möglicherweise nicht vollständig entfernt wurden
- Ziel: Sicherstellung der höchsten Reinheitsstufe des Wassers, geeignet für sensitive Anwendungen wie die Wasserstoffelektrolyse sowie Vermeidung von Korrosion und Verbesserung der Wasserqualität für die nachfolgenden Prozesse

2.3.1 Bewertungsmatrix zur Ermittlung einer Verfahrenstechnischen Vorzugsvariante

Unter Vollentsalzung versteht man die nahezu vollständige Entfernung von ionischen und schwach dissoziierenden Bestandteilen aus Rohwasser. Dazu wird das Rohwasser zunächst vorbehandelt, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten; die Nachbehandlung richtet sich nach den Anforderungen an das Produktwasser. Traditionell wurde Vollentsalzung über Ionenaustauscher realisiert, die zwar erprobt sind, jedoch Chemikalien für die Regeneration benötigen und damit belastetes Abwasser erzeugen. Heute dominieren membranbasierte Verfahren, insbesondere Umkehrosmose (UO) in Kombination mit Elektrodeionisation (EDI), da sie chemikalienarm bzw. -frei arbeiten. Ionenaustauscher finden nur noch punktuell als Polishing-Schritt oder in Spezialanwendungen Verwendung.

Für die Auswahl geeigneter Verfahrenskombinationen wird eine Bewertungsmatrix (siehe Abbildung 3) eingesetzt, die sich in Vorbehandlung, Entsalzung/Demineralisierung, Nachbehandlung/Polishing und Reststoffmanagement gliedert. Die Matrix berücksichtigt unterschiedliche Rohwasserkategorien (Grundwasser, Oberflächenwasser, Meer-/Brackwasser, Kläranlagenablauf) und orientiert sich am VGB-Merkblatt 407. Sie stellt verbindliche Stufen und optionale Varianten dar, die durch farbliche Markierungen und unterschiedliche Rahmenkennzeichnungen unterschieden werden. Die Bewertung der Alternativen erfolgt anhand ökologischer, technischer und ökonomischer Kriterien (z. B. Energie- und Chemikalienverbrauch, Abwasseranfall, Betriebssicherheit). Die Entscheidungsfindung basiert auf dem Vergleich aggregierter Punktzahlen sowie einer projektspezifischen Gewichtung der relevanten Faktoren.

Verfahrenstechnische Konsequenz

Verfahrensschritt	Vorreinigung	Vorbereitung	Entsälzung	Nachbehandlung	Spülwasser-aufbereitung										
Behandlung von...	Grobe Verunreinigung > 2 mm	Feine Verunreinigung ≤ 200 µm	Partikuläre Fracht / Organik	Eisen/ Mangan	Carbonat-härte/ Gesamt-härte	Feine Verunreinigung ≤ 1 µm	Kationen/ Anionen / CO ₂ / Carbonat-/ Gesamthärte	Carbonat-härte/ Gesamt-härte	CO ₂	Feine Verunreinigung ≤ 5 µm	Restionen	Spülwasser-aufbereitung			
Potenziale Ressourcen	Grundwasser oder Uferfiltrat	Grob-/Feinrechen/ Sebanlage	Inline-Flockung + Ultrafiltration	Luft + Tiefenfiltration (MSF)	WAC/ SAC 1	Kerzenfilter ≤ 1 µm	UO1	Permeat-Restenthärtung WAC/ SAC 1	N/ Luft-Vakuum 2	Membran-entgasung 2	Kerzenfilter ≤ 5 µm	EDI	IXMB	Absetz-becken	Ultrafiltration
	Oberflächenwasser mit geringem Salzgehalt (Fluss-, Stauseewasser usw.)	Feinfilter ≤ 200 µm	Flockung + Sedimentation	(Inline-Flockung) Ultrafiltration	Ozon (+ Reaktor)	Tiefenfiltration (MSF)	UO1	UO2 1	UO konzentratstufe	UO konzentratstufe	UO konzentratstufe	UO konzentratstufe	UO konzentratstufe	UO konzentratstufe	UO konzentratstufe
	Oberflächenwasser mit hohem Salzgehalt (Meer- und Brackwasser)	Grob-/Feinrechen/ Sebanlage	Inline-Flockung	Ultrafiltration											
	Kläranlagenablauf	Grob-/Feinrechen/ Sebanlage	Inline-Flockung	Ultrafiltration											

Richtwerte bezogen auf die Wasserqualität im Eintritt zur jeweiligen Verfahrensstufe

Parameter (mg/l)	> 30	>> 30	>> 10	> 0,5	> 0,5	> 0,7	> 0,7	> 0,7	> 0,2	> 0,2
Suspensierte Stoffe TS										
Gelöster Organischer Kohlenstoff DOC										
Eisen 2+ zweiwertig										
Mangan Mn zweiwertig										
Säurekapazität Ks _{4,3} (mmol/l)										
Kohlenstoffdioxid CO ₂ gelöst										
Kieselsäure gesamt										
Barium/ Strontium										

Vorzugsvarianten/ Bewertung bezogen auf...

Dimension Wirkfaktor	Einfluss auf... / Beeinflusst von...	Gewichtung [nicht priorisiert 0%... stark priorisiert 100%]	Inline-flockung	Flockung + Sedimentation	Ozon + Reaktor + MF	Luft + MSF	WAC/SAC vorgeschaltet	Antiskalant	Konzentrat-Stufe	NaOH	UO2	Konzentrat-Stufe	Permeat-Restenthärtung	Membran-entgasung mit N2	Membran-entgasung mit Luft-Vakuum	IXMB	Absetz-becken	Absetz-becken + UF
50%	Rohwasserausbeute	50%	0	1	1	1	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1
	Energieverbrauch	10%	1	2	2	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
	Anfall von Reststoffen (qualitativ/ quantitativ)	20%	1	0	0	1	2	1	0	2	1	2	1	0	0	0	1	1
	Betriebsmitteleinsatz	10%	2	2	2	1	2	2	0	2	0	0	1	1	0	0	0	1
30%	Redundanz/ Betriebssicherheit	60%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	Betriebsaufwand	20%	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	Flächenbedarf	20%	1	0	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2
20%	Saisonale Schwankungen Qualität	50%	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Saisonale Schwankungen Quantität	50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			0.39	0.94	0.94	0.71	1.14	0.39	0.44	0.39	0.86	0.44	1.03	0.28	0.12	0.36	0.43	0.40

¹alternativ zur zweistufigen UO kann zum Schutz der EDI entweder die Variante einstufige UO mit Enthärtung vor der UO oder einstufige UO mit Permeatrestenthärtung gewählt werden (rot gestrichelte Linie)

²alternativ zur physikalischen Entsäuerung mittels Membranentgasung kann im Falle der zweistufigen UO eine chemische Entsäuerung zwischen UO1 und UO2 gewählt werden (Härtebildner- Sättigungsindizes bei pH- Wert- Einstellung beachten)

³vollständiger Ozonabbau vor Eintritt in die UF muss sichergestellt werden, ggf. mittels Aktivkohlefilter/ optional kann eine Ozonierung + Tiefenfiltration auch vor der Flockung eingesetzt werden, um die Flockenbildung zu verbessern

⁴nur bei sehr hartem Wasser und zweistufiger UO

⁵zum Schutz der EDI vor partikulärem Eintrag unbedingt notwendig, falls Permeatrestenthärtung gewählt

0	keine negativen Auswirkungen zu erwarten
1	geringfügige negative Auswirkung zu erwarten
2	schwerwiegende negative Auswirkungen zu erwarten

Abbildung 3: Beispiel für eine Bewertungsmatrix zur Ermittlung einer verfahrenstechnischen Vorzugsvariante zur Bereitstellung von Ultrapurewasser.

2.4 Beschreibung und Bewertung der Restwasserströme

Bei fast allen Verfahren der Aufbereitungskette entstehen Abwässer bzw. Konzentrate, die folgendermaßen gekennzeichnet sind:

Vorfilter:

In der Regel kommen Feinfilter mit Maschenweiten $\leq 200 \mu\text{m}$ zum Einsatz, mit denen grobe Verunreinigungen zurückgehalten werden. Die Filter müssen regelmäßig zurückgespült werden. Die Spülwässer sind durch einen hohen Feststoffanteil gekennzeichnet und können nach Abtrennung des Schlammes i. d. R. in das Rohwasser zurückgeführt werden.

Ultrafiltration (UF):

UF-Membranen müssen ebenfalls regelmäßig zurückgespült werden, um Partikelablagerungen zu entfernen. Da vor der UF Flockungsmittel dosiert werden, um eine effizientere Abscheideleistung und Stabilisierung des Membranbetriebs zu erreichen, sind diese Flockungsschlämme ebenfalls in den Spülwässern enthalten. Üblicherweise handelt es sich dabei um Aluminium- oder Eisensalze. Die Spülwässer ohne zusätzliche Reinigungschemikalien können zusammen mit denen der Vorfilter z.B. in Absetzbecken behandelt und das Klarwasser in das Rohwasser zurückgeführt werden.

In bestimmten einstellbaren Zeitintervallen werden aber auch sogenannte CEB (Chemical Enhanced Backwash), d. h. durch Dosierung von Reinigungschemikalien unterstützte Rückspülungen durchgeführt. Weiterhin sind in größeren Zeitabständen manuell auszulösende CIP-Reinigungen (Cleaning in Place) notwendig. Beide Reinigungsregime dienen der Regeneration der Membranleistung durch Entfernung von Fouling, um die Leistungsfähigkeit der UF-Membranen langfristig zu erhalten und zu stabilisieren. Dafür können üblicherweise die Standardchemikalien Natronlauge, Schwefelsäure und/oder Natriumhypochlorit eingesetzt werden. Die chemikalienhaltigen Abwässer sollten nach erfolgter Neutralisation entsorgt bzw. ggf. zusammen mit den Konzentraten der Umkehrosmose in ein Fließgewässer eingeleitet werden.

Umkehrosmose (RO):

Beim Betrieb von Umkehrosmoseanlagen fallen Konzentrate an, die alle aus dem Rohwasser zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe in aufkonzentrierter Form enthalten. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Härtebildner Ca und Mg, aber auch um organische Spurenstoffe, DOC, Nitrat, Sulfat und Schwermetalle. Die Zusammensetzung des Konzentrats ergibt sich aus der Zusammensetzung des Rohwassers, dem Rückhaltevermögen der Membran für die einzelnen Wasserinhaltsstoffe sowie der Ausbeute der RO-Anlage. Bei einer Prozessausbeute von 80 % und einem Rückhalt für einen bestimmten Stoff von nahezu 100 %, würde dieser im Konzentrat um den Faktor 5 aufkonzentriert vorliegen.

Für einen reibungslosen Umkehrosmosebetrieb werden im Zulauf zur RO i. d. R. Scaling-Inhibitoren (sog. Antiscalants) zudosiert. Diese dienen dem Zweck, Fouling, Scaling und somit das Verblocken der RO-Membran zu reduzieren bzw. bestenfalls gänzlich zu verhindern. Zur Anwendung kommen

hauptsächlich Produkte aus den Stoffgruppen der Phosphate, Phosphonsäuren oder der Polycarbonsäuren. Diese finden sich ebenfalls in den Konzentraten wieder.

Die Konzentrate fallen in der Regel kontinuierlich an und werden in Deutschland, bei Vorliegen einer entsprechenden Einleitgenehmigung, überwiegend unbehandelt in ein Fließgewässer eingeleitet (Direkteinleitung). Die Direkteinleitung wird von Genehmigungsbehörden jedoch zunehmend kritisch betrachtet. In einigen Fällen werden die Konzentrate kommunalen Kläranlagen zugeführt (Indirekteinleitung).

Die in größeren Abständen anfallenden chemikalienhaltigen Reinigungswässer der RO-Membranen sollten zusammen mit den Reinigungswässern der UF neutralisiert und entsorgt werden.

Tabelle 1 enthält ein Beispiel für die Wasserbeschaffenheiten eines Kläranlagenablaufs und der entsprechenden Restwasserströme, die bei der Aufbereitung entstehen. Der als Kühlwasser abgezweigte Anteil liegt bei ca. 70 % des RO1-Permeats. Die den Berechnungen zugrunde liegenden, auf Erfahrungen basierenden Ausbeuten sind wie folgt:

- Vorfiltration = 98 %
- UF (inkl. Spülwasser-UF) = 94 %
- RO1 = 74 %
- RO2 = 80 %

Tabelle 1: Volumenströme und Qualitätsparameter eines Kläranlagen(KA)-Ablaufs und der Restwasserströme

Parameter	Einheit	KA-Ablauf	Spülwasser chemiekalien- frei	RO-Konzentrat	Spülwasser chemie- kalienhaltig (UF und RO)	Restwasser- ströme gesamt	Anforderungen OGewV*
Volumenstrom	m³/d	640	30	156	9	194	
Volumenstrom	m³/a	15360	723	3736	205	4663	
Trübung		1,06					
Abfiltrierbare Stoffe	mg/L	38,3	38,3	0,0	0,0	5,9	
pH-Wert		8,5	8,4	6,0			5,5 - 8,5
Temperatur	°C	22,4	22,4	22,4	22,9	22,4	
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	2800	2800	10760	3464	9206	
DOC	mg/L	11,0	8,3	32,4	9,2	27,6	
Säurekapazität pH4,3	mmol/l	6,4	6,3	24,1	7,1	20,6	
BSB5, homogenisiert	mg/LO2	6,0	2,4	9,5	33,4	9,5	<3 - 6
CSB, homogenisiert	mg/LO2	58,0	40,6	163,1	84,6	140,7	
Ammonium-Stickstoff	mg/L	6,0	6,0	22,0	4,7	18,8	≤0,1 - 0,3
Nitrit-Stickstoff	mg/L	0,9	0,9	2,9	1,0	2,5	≤0,03 - 0,05
Nitrat-Stickstoff	mg/L	11,8	11,8	37,8	12,9	32,7	
Stickstoff, insgesamt (TNb)	mg/L	14,2	11,4	45,0	13,5	38,4	
Orthophosphat, gesamt	mg/L	6,7	1,0	4,0	1,3	3,4	
ortho-Phosphat	mg/L	4,9	0,7	2,9	0,2	2,5	≤0,05 - 0,2
Phosphor, gesamt	mg/L	2,2	0,3	2,0	0,5	1,7	<0,1 - 0,3
Aluminium, gesamt	mg/L	0,14	0,01	0,06	0,02	0,05	
Chlorid	mg/L	354	369	1431	1031	1249	≤200
Eisen, gesamt	mg/L	0,25	0,00	0,01	0,00	0,01	≤0,7 - 1,8
Mangan, gesamt	mg/L	0,31	0,00	0,01	0,00	0,01	
Nitrat	mg/L	52,3	52,3	167,4	57,4	144,7	50
Nitrit	mg/L	2,9	2,9	9,4	3,2	8,1	
Sulfat	mg/L	73	73	291	419034	18639	75 - 220
Blei	mg/L	0,002	0,000	0,000	0,675	0,030	
Cadmium	mg/L	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Chrom	mg/L	0,001	0,000	0,000	1,529	0,067	
Kupfer	mg/L	0,002	0,000	0,000	20,770	0,912	
Nickel	mg/L	0,003	0,003	0,011	2,679	0,127	
Zink	mg/L	0,025	0,025	0,099	25,513	1,203	
AOX	mg/L	35	35	140			
Antiscalant	mg/L	0,0	0,0	12,0	0,7	9,7	

*Anforderungen an guten ökologischen Zustand im Wasserkörper, abhängig vom Fließgewässertyp, nach Anlage 7 OGewV

2.5 Abwasserentsorgung

Mit der Prüfung der Wasserressourcen für die Versorgung mit Wasser, spätestens aber mit der Identifikation der geeignetsten Ressource und der geeigneten Aufbereitungstechnologie, sind in einem der Ressourcenpriorisierung vergleichbarem Vorgehen geeignete Möglichkeiten zur Abwasserentsorgung zu identifizieren.

Hierbei ist zu beachten, dass die durch die Aufbereitung entstehenden, konzentrierten Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzung, an geeigneter Stelle in einen Vorfluter eingeleitet (oder anderweitig entsorgt) werden müssen. Idealerweise wird dies bereits bei der Wahl der Ressource für die Entnahme berücksichtigt.

Es empfiehlt sich daher, die Frage nach möglichen Einleitungen möglichst früh im Prüfprozess zu thematisieren. Im Rahmen von Vorgesprächen mit den für die Erteilung einer Einleiterlaubnis zuständigen Behördenvertretern können Vorgaben zur Wasserbeschaffenheit selbst und zu den zu

erwartenden Auswirkungen auf den jeweiligen Vorfluter erörtert werden. Dadurch lassen sich weitere Nachfragen klären oder ein ggf. zusätzlicher Untersuchungsbedarf frühzeitig erkennen.

2.6 Priorisierung bzw. Ausschluss von Ressourcen

Wenn in einer angestrebten Region geeignete Ressourcen identifiziert werden können, so kann eine gegenüberstellende Bewertung bei der Entscheidungsfindung bzw. Priorisierung helfen. In Abbildung 4 ist beispielhaft eine Priorisierungsfindung dargestellt. Diese führt die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Bewertungskriterien zusammen, darunter Wassermenge, Wasserqualität, Aufwand für die wasserrechtlichen Genehmigungen, Aufbereitungsaufwand und Umweltauswirkungen. Darüber hinaus sind noch die Kriterien Infrastruktur (Rohrleitungsbau und Entnahme-/Übergabebauwerk), sowie Kosten- und Zeitaufwand enthalten. Die Matrix erlaubt einen Überblick über die Auswirkungen des gesamten Vorhabens – in Bezug auf die zu vergleichenden Ressourcen – und somit einen ersten Eindruck, welche Ressource ggf. direkt auszuschließen wäre, bzw. für welche sich ein erhöhter Prüf- und Antragsaufwand lohnen würde.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Integrales Wassermanagement für die Wasserstoffproduktion – Entwicklung eines Leitfadens für energiewirtschaftliche Planungs- und Zulassungsverfahren“ wurden unterschiedlich komplexe Varianten dieser oder ähnlicher Matrizen angewendet, mit dem Ergebnis, dass bei zu komplexen Anforderungen, bzw. bei einem zu hohen Detaillierungsgrad der Kriterien, die Ressourcen aufgrund der sehr unterschiedlichen jeweiligen Datenlagen nicht mehr untereinander vergleichbar waren.

Basierend auf den Erfahrungen aus dem Forschungsvorhaben sind daher Datenlage und Wasserverfügbarkeit Ausschlusskriterien für die weitere Betrachtung der Ressource. Eine Ressource kann nur beurteilt werden, wenn ein Mindestumfang an Informationen zu den relevanten Kriterien vorliegt.

Wird die Ressource nicht aufgrund mangelnder Daten oder Wasserverfügbarkeit ausgeschlossen, so sind die entscheidenden Prüfkriterien:

- Der geschätzte Aufwand für die Infrastruktur (Verteilungsnetz/Rohwasserentnahme)
- Die Rohwasserqualität und die einzusetzende Wasseraufbereitung hinsichtlich des Anfalls von Reststoffen, des Betriebsmitteleinsatzes, des Energieverbrauchs und der Rohwasserausbeute
- Der geschätzte Aufwand für die Erlangung der wasserrechtlichen Genehmigungen
- Die geschätzte Erheblichkeit der Umweltauswirkungen des Gesamtvorhabens: Entnahme, Einleitung, Trassen / Leitungen, Aufbereitung
- Der geschätzte zeitliche Aufwand bis zum fertigen Vorhaben
- Sowie die abzuschätzenden Jahreskosten für alle Gewerke

Eine Gewichtung der Kriterien aufgrund ihres vermutlichen Ausschlusscharakters für den Vorhabenträger wurde vorgenommen, die, mit der vorgenommenen Bewertung multipliziert, den Zielwert jedes Kriteriums für jede Ressource ergibt.

Die Bewertung erfolgt abschätzend, mit 2 = hoch, 1 = mittel, 0 = gering, die Ergebnisse werden für jede Ressource in der letzten Zeile der jeweiligen Spalte angegeben und sind über die Ergebnishöhe direkt miteinander vergleichbar. Das höchste Ergebnis zeigt die am wenigsten geeignete Ressource an.

Kriterien	Detaillierte Erläuterung	Gewichtung	Standort X						Bewertung		
			Ressource 1		Ressource 2		Ressource 3				
			aufnehmender Vorfluter: XXX		aufnehmender Vorfluter: XXX		aufnehmender Vorfluter: XXX				
			Bewertung	Wert	Bewertung	Wert	Bewertung	Wert			
Datenlage Wasserverfügbarkeit	Ausschlusskriterium: ist eine ausreichende Datenlage verfügbar, um die verfügbare Wassermenge der Ressource beurteilen zu können?		0		0		0	2 = Nein, voraussichtlich keine ausreichende Wassermenge vorhanden oder Datenlage unzureichend	1 = Ja, voraussichtlich ausreichend Wassermenge vorhanden aber sehr wahrscheinlich mit Einschränkungen	0 = Ja, voraussichtlich ausreichend Wassermenge vorhanden	
Infrastruktur (Netz, Entnahme)	Verteilungsnetz	Geschätzter genehmigungsrechtlicher Aufwand für den Leitungsbau aufgrund der Länge der Rohrleitung und der Trassenlegung. Sind geschützte Gebiete zu durchqueren? Sind Siedlungsgebiete zu durchqueren? Etc.	5,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Rohwasser-entnahme	genehmigungsrechtlicher/baulicher Aufwand für die Überführung des Rohwassers in das Brauchwasserwerk. Entweder durch ein Entnahmebauwerk (Ogew) oder ein Übergabebauwerk/-Pumpwerk zwischen einer Kläranlage und dem Brauchwasserwerk	5,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
Rohwasserqualität + Wasseraufbereitung	Anfall von Reststoffen	Qualitative und Quantitative Beurteilung der einzuleitenden oder zu entsorgenden Abwasserströme aus der Aufbereitung (nur differenziert möglich, wenn Verfahrenskette schon konstruiert und Rohwasserqualität bekannt ist; ansonsten generelle Abschätzung)	3,8%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Betriebsmitteleinsatz	Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption (z.B. hoher Bedarf bei Ionenaustauschern)	3,8%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Energieverbrauch	Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption und Rohwasserqualität (z.B. hoher Verbrauch bei Meerwasserentsalzung)	3,8%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Rohwasserausbeute	Charakteristisch je nach gewählter Verfahrensoption (z.B. geringe Ausbeute ohne zweite Konzentratstufe bei der UO)	3,8%	0	0	0	0	2 = gering	1 = mittel	0 = hoch	
Wasserrechtliche Genehmigung	Einleitgenehmigung für Restwasserströme	Aufwand für die Beantragung der Einleitgenehmigung: Sind erwartungsweise viele Gutachten erforderlich? Sind hohe Auflagen aufgrund von Menge und Qualität der anfallenden Restwasserströme zu erwarten? Etc.	10,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Entnahmegenehmigung	Aufwand für die Beantragung der Entnahmegenehmigung: Sind erwartungsweise viele Gutachten erforderlich? Sind hohe Auflagen aufgrund von geschützten Fischarten zu erwarten? Etc.	10,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
Umweltauswirkungen des Gesamtvorhabens	Auswirkungen Entnahme	Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch " <u>Beanspruchung der Wasserressource - Entnahme</u> " (z. B. Beeinflussung hydrologischer Parameter, Organismenentnahme)	5,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Auswirkungen Einleitung	Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch " <u>Einleitung von Restwasserströmen</u> " (z. B. Beeinflussung hydrologischer, chemischer und physikalisch-chemischer Gewässerparameter)	5,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Auswirkungen Trassen / Leitungen	Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch "Entnahme- und Einleitbauwerke, Anlagen-/Rohrleitungsbau," (z. B. Flächenbeanspruchung, Luftschall-Immissionen)	5,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
	Auswirkungen Aufbereitung	Geschätzte Erheblichkeit, Schwere, Komplexität und Wahrscheinlichkeit von Umweltauswirkungen durch Auswirkungen der Verfahrenskette, basierend auf der Matrix zu der Verfahrensauswahl	5,0%	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
Zeit	Zeitlicher Aufwand für alle Gewerke: von der Entnahme/Übergabe des Rohwassers bis zum fertigen Brauchwasser, inkl. Rohrleitungen	15,0%	0	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
Kosten	Jahreskosten (Kapitalkosten + Betriebskosten) für alle Gewerke	20,0%	0	0	0	0	0	2 = hoch	1 = mittel	0 = gering	
Ergebnis				0,0	0,0	0,0					

Abbildung 4: Beispiel für die Matrix zur abschätzenden Bewertung und Priorisierung der in Frage kommenden Ressourcen

3 Zulassungsverfahren

Für Vorhaben wie die H₂-Produktion aus Wasser und die Errichtung der dazu notwendigen Anlagen sind in der Regel eine Reihe Anforderungen zu erfüllen, um die notwendigen Genehmigungen zu erhalten. Abhängig von der Art der geplanten Anlagen, dem Produktionsumfang und natürlich dem ausgewählten Standort, können diese Anforderungen erheblich in Art, Umfang und Kreis der Beteiligten variieren. Abhängig von der konkreten Ausgestaltung des Vorhabens kommen unterschiedliche wasserrechtliche Zulassungstatbestände in Betracht.

Abgesehen von bundeseinheitlichen Regelungen sind hier auch Ländervorschriften zu beachten – dies trifft bspw. insbesondere für wasserrechtliche Regelungen zu. Ein Blick in die Rechts- und Verwaltungsvorschriften der jeweiligen Länder, und insbesondere in die Zuständigkeitsverordnungen der betroffenen Rechtsbereiche, kann Klarheit über die jeweils zuständigen Behörden verschaffen und so einen dringend anzurathenden, frühzeitigen Austausch zur Maßnahme und den Erfordernissen ermöglichen.

In vielen Bundesländern oder Gemeinden liegen Empfehlungen oder Leitfäden zur Beantragung einer wasserrechtlichen Gestattung (Erlaubnis, Genehmigung) vor, die als Orientierung dienen können. **Es empfiehlt sich frühzeitig in Erfahrung zu bringen, welche Behörden in welcher Weise beteiligt sein werden und welche Mindestanforderungen für das jeweilige Vorhaben bestehen.** Dadurch kann ggf. vorab geklärt werden, welche Unterlagen für einen erfolgreichen Antrag erforderlich sind und ob weitere Vorgaben oder Richtlinien relevant sein können. Die unten aufgeführten Vorgaben können daher nicht erschöpfend sein.

Für die Wasserstoffproduktion sind Entnahmen und Einleitungen von Abwasser als wasserrechtliche Tatbestände relevant, für die Genehmigungen eingeholt werden müssen.

3.1 Wasserrechtliche Gestattungen

Für Wasserentnahmen aus der Umwelt, im Sinne einer Benutzung von Gewässern, sind nach den § 8, § 9 und §10 WHG i. d. R. Erlaubnisse bzw. Bewilligungen zu beantragen. Dies setzt einen Antrag mit prüffähigen Unterlagen voraus, wofür eine Reihe von Informationen zusammenzutragen sind. **Daher sollte im ersten Schritt die Zuständigkeit bei den genehmigenden Behörden geklärt werden.**

Eckpunkte, die im Antrag zu adressieren sind, sind der Wasserbedarfsnachweis, d. h. der Nachweis, dass die beantragte Wassermenge benötigt wird, sowie der Dargebotsnachweis, aus dem hervorgehen sollte, dass die beantragte Wassermenge in ausreichendem Maße für eine nachhaltige Nutzung zu Verfügung steht. Zudem sind im Antrag Informationen über mögliche konkurrierende Nutzungen (bestehende Entnahmen, Naturschutz, Landwirtschaft, Bodenschutz etc.) zu geben.

Für die Entnahme von Meerwasser wird i. d. R. keine Erlaubnis benötigt, jedoch ist für das Entnahmebauwerk eine bauliche Genehmigung erforderlich.

Für die Nutzung von geklärtem Abwasser ist bis dato keine Entnahmegenehmigung zu stellen.

Darüber hinaus ist gemäß § 33 WHG u. U. insbesondere für Fließgewässer darzulegen, dass trotz der Entnahme eine ausreichend große Abflussmenge erhalten bleibt. Die erhalten bleibende Abflussmenge muss genügen, damit das Gewässer sowie andere mit diesem verbundene Gewässer den Zielen einer nachhaltigen Gewässerbewirtschaftung gemäß § 1 und §§ 27- 31 WHG entsprechen. Selbst wenn Entnahmegenehmigungen nicht zwingend erforderlich sind, können grundsätzlich mit jedwedem in der Folge genannten Vorhaben im Sinne der Nutzung alternativer Wasserressourcen, Umweltauswirkungen auf die Schutzgüter nach § 2 Abs. 1 UVPG verbunden sein.

Zu den Schutzgütern zählen:

- Menschen, insbesondere menschliche Gesundheit
- Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt
- Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft
- Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter
- Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern

Je nach Höhe der Entnahme sind zusätzlich Gutachten zu weiteren Themen wie Hydrogeologie, Bodenkunde, Naturschutz oder Umweltverträglichkeit zu erstellen. Dafür werden in der Regel weitere Untersuchungen veranlasst oder Fachbüros hinzugezogen. So sind Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVPG) Teil eines Bewilligungsantrags zur Wasserentnahme, wenn 10 Mio. m³ pro Jahr an Grundwasser entnommen werden. Ab 100.000 m³ pro Jahr ist eine allgemeine Vorprüfung notwendig und ab 5.000 m³ pro Jahr eine Standortbezogene Vorprüfung (Anlage 1 UVPG).

3.2 Einleitgenehmigung

Wasserrechtlich stellt auch das Einleiten von Stoffen in ein Gewässer nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG eine Gewässerbenutzung dar, die nach § 8 WHG eine wasserbehördliche Erlaubnis erfordert. Hier können die umfangreiche Bearbeitung der Fachbeiträge zum Artenschutz in Verbindung mit dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) § 44 Abs. 1), ggf. eine FFH-Verträglichkeitsvorstudie (FFH-VS) nach BNatSchG für ein potenziell vorhandenes FFH-Gebiet und ein Fachbeitrag zur EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) notwendig werden.

Im Rahmen der Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sind in jedem Fall die Auswirkungen des geplanten Vorhabens auf die Zielvorgaben im Hinblick auf das Verschlechterungsverbot und das Zielerreichungsgebot zu untersuchen.

3.3 Ablauf des Verfahrens

Sobald die Unterlagen vollständig eingereicht sind, prüft die untere Wasserbehörde alle Unterlagen auf Vollständigkeit. Sollte die Vollständigkeitsprüfung erfolgreich sein, so wird die untere Wasserbehörde überprüfen, ob im Rahmen des Verfahrens neben den rein wasserwirtschaftlichen Aspekten noch weitere Belange (z. B. öffentlich-rechtliche Belange) berücksichtigt werden müssen. Sollte das der Fall sein, werden die Vertreter (d. h. jeder unmittelbar Betroffene) zu einer Stellungnahme aufgefordert. Sollten Einwände erhoben werden, kann eine Reaktion erforderlich

werden. Zudem ist es möglich, dass weitere Fachbehörden (Natur, Bodenschutz etc.) angefragt werden.

Liegen alle erforderlichen Unterlagen vor, fällt die Entscheidung zum Antrag auf Basis der geltenden Rechts- und Verwaltungsvorschriften.

Nach einem positiven Bescheid wird die jeweilige Erlaubnis mit Angabe der gültigen Bemessungsgrenzen (z.B. Maximalentnahmeraten) zur Verfügung gestellt.

4 Herausforderungen und Risiken

Bei der Planung der Wasserversorgung für die grüne Wasserstoffproduktion gibt es verschiedene Herausforderungen, welche berücksichtigt werden sollten. Eine grundlegende Randbedingung für alle Betrachtungen ist der Wasserbedarf für die Wasserstoffproduktion eines Standortes. Unsicherheiten oder Änderungen des Wasserbedarfs wirken sich sowohl auf die Bewertung der Wasserressourcen als auch auf die genehmigungsrechtlichen Anforderungen aus. Somit sollte dieser Aspekt frühestmöglich ermittelt werden.

Für die Bewertung einer Ressource sind belastbare Daten zur verfügbaren Wassermenge erforderlich. Diese Daten sind allerdings nicht immer verfügbar, sodass ggf. zusätzlicher zeitlicher Aufwand eingeplant werden muss, um eine ausreichende Datengrundlage schaffen zu können.

Ein Faktor, der einen großen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Wasserressourcen hat, ist der Klimawandel. U. a. durch zunehmende Dürreperioden auf der einen und sich häufende Starkregenereignisse auf der anderen Seite, sind bereits jetzt die Auswirkungen spürbar. Hinzu kommen Wechselwirkungen mit anderen Nutzern einer Wasserressource, sowohl bezogen auf die Nutzung als Rohwasserquelle als auch auf die Einleitung von Restwasserströmen in einen Vorfluter. Aktuelle und zukünftig geplante Verbräuche einer Rohwasserquelle durch andere Akteure sollten in der Planung berücksichtigt werden, um Nutzungskonkurrenzen zu vermeiden. Insbesondere eine Konkurrenz zur Trinkwasserversorgung muss verhindert werden. Auch bezogen auf die Rohwasserqualität können Wechselwirkungen mit anderen Nutzern vorkommen. Dies sollte insbesondere bei der möglichen Nutzung von Oberflächen- und Meerwasser betrachtet werden, in Bereichen wo bereits Wasserentnahmen und Abwassereinleitungen stattfinden.

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, wird eine wasserrechtliche Genehmigung für die Wasserversorgung eines Wasserstoffstandortes benötigt, für die Einleitung von Abwässern und / oder die Entnahme von Grund- oder Oberflächenwasser. Die hierfür erforderlichen Fachbeiträge und Gutachten können einen erheblichen zeitlichen Aufwand verursachen und sollten daher frühzeitig in der Planung berücksichtigt werden. Des Weiteren ist die frühzeitige Information und Einbindung der relevanten Akteure essenziell, um mögliche Herausforderungen zu identifizieren, die den Genehmigungsprozess gefährden könnten.

5 Literatur

Krömer K, Steffen L-O, Leverenz K, Matoba M (2025) Wasserversorgung für H₂-Projekte im Nordwesten Niedersachsens. DVGW energie | wasser-praxis, 76(9) 2025.

Saravia F, Graf F, Schwarz S, Gröschl F (2023) Genügend Wasser für die Elektrolyse. Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2o-fuer-elektrolyse-dvgw-factsheet.pdf>

Saravia F, Gehrmann S, Schwarz S, Koch M-A (2024) Gesamtwasserbedarf für die Wasserelektrolyse - Wie groß ist der Wasserfußabdruck einschließlich der Kühlsysteme? Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/wasserelektrolyse-gesamtwasserbedarf-factsheet-dvgw.pdf>

Impressum für den Leitfaden

Herausgeber:

IWW Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH
Moritzstr. 26, 45476 Mülheim an der Ruhr

Mitwirkung in den Kapiteln 2.1 und 4:

Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband
Georgstraße 4, 26919 Brake (Unterweser)

Erscheinungsdatum:

8.12.2025