

Bachelorarbeit

im Studiengang Umweltingenieurwissenschaften Bachelor

Analyse des Salzwassereintrags aus der Unterwarnow in
die Oberwarnow bei Hochwasser

Analysis of saltwater input from the Lower Warnow river
into the Upper Warnow river during storm surges

Name: Paul Gärtner
Geboren am: 18.07.1995 in Speyer
Matrikelnummer: 221201253
Abgabedatum: 07.08.2025

Betreuende: Prof. Jens Tränckner
Rike Broer
Michael Hermann

Zusammenfassung

Das Wasserwerk Rostock bezieht das Rohwasser für die Aufbereitung vollständig aus einem Fließgewässer, der Oberwarnow. Dieses Vorgehen ist in Deutschland einmalig. In dieser Bachelorarbeit sollen die Hintergründe zu einem Salzwassereinbruch im Oktober 2023 untersucht werden. Dabei stieg nach einer Sturmflut die Leitfähigkeit im Rohwasser des Wasserwerks Rostock an.

Es wurden in diesem Zusammenhang sowohl Leitfähigkeitsmessungen an verschiedenen Stellen im Bereich der Oberwarnow zwischen Mühlendammwehr und Wasserwerk ausgewertet als auch hochaufgelöste Pegeldaten der letzten 25 Jahre. Durch einen Vergleich von Leitfähigkeitsdaten mit den Pegeldaten konnte gezeigt werden, dass bereits bei geringfügig höheren Pegeln der Unterwarnow im Vergleich zur Oberwarnow salzhaltiges Wasser in die Oberwarnow eingetragen wird. Der Haupteintragspfad konnte durch ereignisabhängige Leitfähigkeitsmessungen am Bleicherwehr lokalisiert werden.

Eine ausführliche Auswertung der Pegeldaten wurde durchgeführt. Sie zeigt, dass die Dauer der Ereignisse, zu denen die Unterwarnow den Pegel der Oberwarnow überschritt und damit eine Voraussetzung für das Eindringen von salzhaltigem Wasser aus der Unterwarnow erfüllte, in den letzten 25 Jahren zunahm. Es konnte anhand dieser Auswertung und Daten zum Abflussverhalten der Oberwarnow eine besondere Gefährdung durch solche Ereignisse für die Monate September bis November gezeigt werden.

Abschließend können Empfehlungen für eine angepasste Wehrsteuerung am Bleicherwehr gemacht werden, die einen konzeptionellen Fehler in der Steuerungslogik beheben sollen. Ebenso wird eine Anpassung der Stauziele für die Oberwarnow empfohlen.

Abstract

The Rostock waterworks obtains all of its raw water for treatment from a watercourse, the Oberwarnow. This approach is unique in Germany. This bachelor's thesis examines the background to a saltwater intrusion in October 2023. Following a storm surge, the conductivity of the raw water at the Rostock waterworks increased.

In this context, conductivity measurements at various points in the Oberwarnow between the Mühlendamm weir and the waterworks were evaluated, as well as high-resolution water level data from the last 25 years. By comparing conductivity data with water level data, it was shown that even at slightly higher water levels in the Unterwarnow compared to the Oberwarnow, saline water enters the Oberwarnow. The main entry point was located by event-dependent conductivity measurements at the Bleicher weir.

A detailed evaluation of the water level data was carried out. It shows that the duration of events during which the Lower Warnow exceeded the water level of the Upper Warnow, thus fulfilling a prerequisite for the intrusion of saline water from the Lower Warnow, has increased over the last 25 years. Based on this evaluation and data on the discharge behaviour of the Upper Warnow, it was possible to demonstrate that such events pose a particular risk in the months of September to November.

Finally, recommendations can be made for an adapted weir control system at the Bleicher weir, which should remedy a conceptual error in the control logic. An adjustment of the storage targets for the Upper Warnow is also recommended.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Abbildungsverzeichnis | III |
| Tabellenverzeichnis | IV |
| Abkürzungsverzeichnis | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen | 2 |
| 2.1 Hochwasser | 2 |
| 2.1.1 Pluviales Hochwasser | 2 |
| 2.1.2 Fluviales Hochwasser | 2 |
| 2.1.3 Sturmflut | 3 |
| 2.1.4 Erhöhte Wasserstände | 3 |
| 2.2 Leitfähigkeit | 3 |
| 2.3 Wasserwerk Rostock | 4 |
| 2.4 Rechtliche Rahmenbedingungen | 5 |
| 2.5 Durchflussmessung | 5 |
| 3 Untersuchungsgebiet und Hintergrund | 6 |
| 3.1 Warnow | 7 |
| 3.2 Mühlendamm | 7 |
| 3.2.1 Mühlendammwehr | 7 |
| 3.2.2 Bleicherwehr | 8 |
| 3.3 Problemstellung | 8 |
| 3.3.1 Salzeinbruch im Wasserwerk | 8 |
| 3.3.2 Annahmen zum Hintergrund | 10 |
| 4 Material und Methode | 11 |
| 4.1 Messkonzept | 11 |
| 4.1.1 Leitfähigkeitsmessung | 11 |
| 4.1.1.1 Permanente Messung | 11 |
| 4.1.1.2 Ereignisabhängige Messung | 12 |
| 4.1.2 Pegeldata | 13 |
| 4.1.3 Durchflussmessung | 13 |
| 4.1.3.1 Permanente Messung | 13 |
| 4.1.3.2 Ereignisabhängige Messung | 13 |
| 4.2 Software und Datengrundlage | 14 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | Methode | 16 |
| 4.3.1 | Auswertung Pegeldata | 16 |
| 4.3.1.1 | Langzeittrend | 16 |
| 4.3.1.2 | Maximalpegel Unterwarnow | 17 |
| 4.3.1.3 | Auswertung von Überschreitungsereignissen | 17 |
| 4.3.1.4 | Erhöhte Leitfähigkeit und Pegelüberschreitung | 18 |
| 4.3.2 | Auswertung Leitfähigkeitsmessung | 18 |
| 4.3.2.1 | Leitfähigkeitsmessung am Bleicherwehr | 18 |
| 4.3.2.2 | Ereignisabhängige Leitfähigkeitsmessung | 18 |
| 4.3.3 | Auswertung Durchflussdaten | 18 |
| 5 | Ergebnisse und Diskussion | 19 |
| 5.1 | Ermittlung der Eintragspfade | 19 |
| 5.2 | Ausbreitung in der Oberwarnow | 23 |
| 5.3 | Entwicklung der Eintragsfaktoren | 24 |
| 5.4 | Handlungsempfehlungen | 27 |
| 5.4.1 | Überprüfung des Bleicherwehrs | 27 |
| 5.4.2 | Anhebung des Stauziels | 28 |
| 5.4.3 | Anpassung im Stichkanal | 29 |
| 6 | Fazit | 30 |
| | Literatur | i |
| A | Anhang | iv |
| A.1 | Grafiken | iv |
| A.2 | Digitaler Anhang | vii |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Übersichtskarte des Betrachtungsgebiets | 6 |
| 3.2 | Verlauf des Salzeinbruchs im Oktober 2023 | 9 |
| 4.1 | Übersicht über die Messstellen | 12 |
| 4.2 | Pegelstände während der Durchflussmessung | 14 |
| 4.3 | Pegel- und Durchflussentwicklung der Ober- und Unterwarnow | 16 |
| 5.1 | Messergebnisse ADCP im Bleichergraben bei Rückströmung von 0,258 m ³ /s in Richtung Oberwarnow | 19 |
| 5.2 | Messergebnisse ADCP am Mühlendammwehr bei Rückströmung von 0,048 m ³ /s in Richtung Oberwarnow | 19 |
| 5.3 | Bleicherwehr am 31.10.2024 vor einem Überschreitungsereignis | 20 |
| 5.4 | Bleicherwehr am 02.11.2024 während eines Überschreitungsereignisses . . . | 20 |
| 5.5 | Leitfähigkeit in Gerberbruch und Bleichergraben während eines Überschrei- tungsereignisses mit Pegelverlauf | 21 |
| 5.6 | Leitfähigkeitsmessung am 28.11.2024 | 22 |
| 5.7 | Zusammenhang Leitfähigkeit und Überschreitungsereignisse | 23 |
| 5.8 | Entwicklung der jährlichen Gesamtdauer der Überschreitungsereignisse . . | 24 |
| 5.9 | Dauer der Überschreitungsereignisse nach Monaten | 25 |
| 5.10 | Tägliche Maximalpegel der Unterwarnow mit Markierung des regulären Stauziels | 26 |
| 5.11 | Durchfluss der Oberwarnow nach Monaten | 27 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Verwendete Software | 14 |
| 4.2 | Python-Bibliotheken | 14 |
| 4.3 | Verwendete Pegeldatensätze | 15 |
| 4.4 | Verwendete Durchflussdatensätze | 15 |
| 4.5 | Verwendete Leitfähigkeitsdaten | 15 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------------|---|
| ADCP | Ultraschall Doppler Strömungsmesser (engl. Acoustic Doppler Current Profiler) |
| GIS | Geoinformationssystem |
| m³/s | Kubikmeter pro Sekunde |
| µS/cm | Mikrosiemens pro Zentimeter |
| mS/cm | Millisiemens pro Zentimeter |
| NHN | Normalhöhennull |
| PNP | Pegelnullpunkt |
| StALU MM | Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg |
| TrinkwV | Trinkwasserverordnung |
| WSA | Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt |
| WSV | Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes |
| WHG | Wasserhaushaltsgesetz |

1 Einleitung

Als einzige Stadt Deutschlands wird in Rostock das Rohwasser für die Wasserversorgung vollständig aus einem Fließgewässer gewonnen. Dadurch bestehen besonders hohe Anforderungen an eine gleichbleibend hohe Qualität des Wassers in der Warnow als Rohwasserquelle. Diese ist durch Wehranlagen von der Unterwarnow, einem Übergangsgewässer zur Ostsee, getrennt.

Im Oktober 2023 wurde im Wasserwerk kurze Zeit nach einem erhöhten Wasserstand in der Unterwarnow ein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit festgestellt, der erst im Rohwasser an den Entnahmebauwerken und in der Folge auch in den weiteren Aufbereitungsschritten messbar war. Dieses Ereignis stellte den ersten derartigen Anstieg der Leitfähigkeit dar, der dort gemessen wurde. Die gesteigerte Leitfähigkeit deutete darauf hin, dass salzhaltiges Wasser aus der Unterwarnow in die Oberwarnow eingedrungen war, da die Leitfähigkeit eines Wassers von der Menge der gelösten Ionen abhängt. Das Wasserwerk Rostock hat mit den vorhandenen Aufbereitungsstufen keine Möglichkeiten, den Salzgehalt des Rohwassers abzusenken. Daher ist es entscheidend, dass bereits das Rohwasser den Grenzwerten der Parameter Leitfähigkeit und Salzgehalt entspricht. Obwohl bei diesem Ereignis alle Grenzwerte und gesetzlichen Anforderungen an das Trinkwasser eingehalten werden konnten, kann ein zukünftiger Einbruch von Salzwasser in die Oberwarnow ein Risiko für die Trinkwasserversorgung der Hansestadt Rostock darstellen.

Aus diesem Grund sollen in dieser Arbeit die Hintergründe dieses Ereignisses analysiert werden. Dazu gehört die Ermittlung möglicher Eintragspfade von salzhaltigem Wasser aus der Unterwarnow. Dafür wird ein Messkonzept für Leitfähigkeitsmessungen ausgearbeitet und die gewonnenen Daten werden zusammen mit Durchflussmessungen ausgewertet.

Im Zusammenhang mit dem ansteigenden Meeresspiegel sollen auch die Bedingungen untersucht werden, unter denen es zu einem Einbruch von Salzwasser kommen kann. Deren Entwicklung wird auf der Basis von zeitlich hochaufgelösten Pegeldaten der Unter- und Oberwarnow ausgewertet.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, um den weiteren Eintrag von salzhaltigem Wasser aus der Unterwarnow in die Oberwarnow zu minimieren.

2 Grundlagen

2.1 Hochwasser

Nach § 72 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) ist ein Hochwasser „eine zeitlich beschränkte Überschwemmung von normalerweise nicht mit Wasser bedecktem Land, insbesondere durch oberirdische Gewässer oder durch in Küstengebiete eindringendes Meerwasser“. Überschwemmungen aus Abwasseranlagen sind davon ausgenommen. Hochwasser kann aus verschiedenen Gründen auftreten und wird, je nach Art der Ursache, in die hier folgenden Kategorien eingeteilt.

2.1.1 Pluviales Hochwasser

Pluviale Hochwasser entstehen durch starke oder langanhaltende Niederschläge, bei denen das Wasser zunächst als Oberflächenabfluss oder Pfützenbildung auftritt, bevor es in die Kanalisation oder in Gewässer gelangt. Sie treten meist lokal begrenzt auf und können grundsätzlich überall in Deutschland vorkommen. Besonders gefährdet sind jedoch flache Regionen sowie Gebiete, in denen heftige konvektive Gewitterstürme auftreten. (Kreibich et al. 2014)

2.1.2 Fluviales Hochwasser

Fluviale Hochwasser entstehen, wenn die Abflussmengen in Flüssen die Aufnahmekapazität des Flussbetts übersteigen und diese dadurch die Ufer übertreten. Ursachen können langanhaltender Regen, kurze, intensive Niederschläge auf gesättigten Böden, extreme lokale Regenfälle während Gewittern, Schneeschmelze oder eine Kombination aus Regen und Schneeschmelze sein. Die Ausprägung und Entwicklung fluvialer Hochwasser hängen von meteorologischen, hydrologischen und geografischen Bedingungen sowie von den Eigenschaften des Einzugsgebiets ab. In Deutschland unterscheiden sich die betroffenen Regionen und die Saisonalität der Hochwasserereignisse deutlich. (Jüpner und Schüller 2025)

2.1.3 Sturmflut

Sturmfluten sind plötzlich auftretende, ungewöhnlich hohe Wasserstände an der Küste, die durch das Zusammenspiel von niedrigem Luftdruck und starken Winden entstehen. Die Schwere einer Sturmflut hängt von verschiedenen Faktoren wie Windgeschwindigkeit, Winddauer, Wassertiefe und der Überlagerung mit Gezeiten ab. Die meteorologischen Bedingungen und lokalen Gegebenheiten unterscheiden sich zwischen Nord- und Ostsee. An der Nordsee werden Sturmfluten meist durch von Westen kommende Zyklone ausgelöst, während an der Ostsee starke Druckunterschiede und Ostwinde dominieren. Zusätzlich können Faktoren wie der Wasserstand des Meeresbeckens, Eigenschwingungen in Ästuarren und die Küstenform das Ausmaß beeinflussen. Sturmfluten unterscheiden sich in ihren Schadensmechanismen deutlich von Flusshochwassern, da sie meist mit höheren Wellen, stärkeren Strömungen und Salzwasser einhergehen. (Kreibich et al. 2014)

Global gesehen verdoppelt sich das Risiko extremer Flutereignisse etwa alle fünf Jahre (Taherkhani et al. 2020). In der Ostsee steigen die extremen Pegelstände im Bereich der östlichen Ostsee schneller als der mittlere Meeresspiegel, während sie im südwestlichen Teil der Ostsee langsamer ansteigen als der mittlere Meeresspiegel (Dieterich und Radtke 2024).

2.1.4 Erhöhte Wasserstände

Im Bereich der Unterwarnow kommt es neben Sturmfluten auch zu erhöhten Wasserständen. Diese treten häufiger auf als Sturmfluten und sind durch Windstau bedingt, welcher nicht nur von Stürmen in der unmittelbaren Region, sondern auch durch übergeordnete Großwetterlagen mit Süd- bzw. Südostwind ausgelöst wird.

Während solcher Ereignisse kommt es häufig zu Überschreitungseignissen, bei denen der Pegel der Unterwarnow den der Oberwarnow übersteigt. Überschreitungseignisse führen zu einem verminderten oder eingestellten Abflussgeschehen der Oberwarnow. Bei länger anhaltenden erhöhten Wasserständen mit Überschreitungseignissen kann es zu Ausuferungen der Oberwarnow, ähnlich fluvialen Hochwassern, kommen.

2.2 Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Summenparameter für die chemische Beurteilung von Wasser. Sie ist abhängig von der Menge an gelösten Ionen und der Temperatur. Der Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Temperatur ist zwar nicht linear, kann aber

zwischen 0°C und 30°C als linear angenommen und mit Gleichung 2.1 näherungsweise bestimmt werden.

$$EC_t = EC_{25}[1 + \alpha(t - 25)]$$

$$\begin{aligned} EC_t & : \text{elektrische Leitfähigkeit der Zieltemperatur} \\ EC_{25} & : \text{elektrische Leitfähigkeit bei } 25^\circ\text{C} \\ t & : \text{Zieltemperatur in } ^\circ\text{C} \\ \alpha & : \text{Korrekturfaktor} \end{aligned} \tag{2.1}$$

Der mittlere Korrekturfaktor α beträgt für natürliches Wasser 0,0187. (Hayashi 2004)

Die Leitfähigkeit wird in Mikrosiemens pro Zentimeter ($\mu\text{S}/\text{cm}$) oder Millisiemens pro Zentimeter (mS/cm) angegeben und ist der Kehrwert des elektrischen Widerstands (Niedrig und Sternberg 2022).

2.3 Wasserwerk Rostock

In Deutschland ist Grundwasser mit 61,2 % Anteil die meistgenutzte Rohwasserquelle, gefolgt von See- und Talsperren mit 12,3 % , angereichertem Grundwasser mit 9,3 % und Uferfiltrat mit 8 %. Nur 1,2 % des genutzten Rohwassers in Deutschland werden aus Fließgewässern entnommen. (Statistisches Bundesamt 2018)

Die Stadt Rostock ist mit der vollständigen Versorgung aus einem Fließgewässer in Deutschland einzigartig.

Das Wasserwerk Rostock wird von der Nordwasser GmbH betrieben und versorgt die Stadt Rostock und umliegende Gemeinden mit Trinkwasser aus der Warnow. Dafür werden täglich durchschnittlich 35.000 m³ Rohwasser über die Entnahmebauwerke 2 und 3 (Abb. 3.1) aus der Warnow entnommen. Das ehemalige Entnahmebauwerk 1 wurde zurückgebaut. Jedes Bauwerk ist mit drei Pumpen ausgestattet und kann die maximal erlaubte Entnahmemenge von 55.000 m³ pro Tag fördern. Die Entnahme erfolgt in einem Stichkanal, der die Entnahmestellen mit der Warnow verbindet. Der Stichkanal selbst hat keinen weiteren Abfluss, daher führt der einzige Weg aus diesem Kanal heraus über das Wasserwerk.

Der Rohwasserentnahme vorgeschaltet sind Grob- und Feinrechen zur Entfernung von Feststoffen. Die erste Stufe der Wasseraufbereitung bildet die Sepaflexanlage, ein Flockungsbecken mit vertikalen Abscheidelamellen zur Abscheidung von Grobpartikeln. Eine vorgeschaltete Vorozonierung dient der Verbesserung der Flockung und Sedimentation von Schwebstoffen. Der dabei anfallende Schlamm wird entweder in die Sepaflexanlage rezirkuliert oder über die Kanalisation der Kläranlage Rostock zugeführt. Anschließend durchströmt das Wasser Mehrschichtfilter, die zur Entfernung organischer Verunreinigungen dienen. Diese Filter bestehen aus einer oberen Blähtonsschicht, einer Quarzkies-Schicht

und einer unteren Stützsicht. Nach der Filtration wird das Wasser der Ozonanlage zugeführt, die seit September 1995 in Betrieb ist. Hier erfolgt als Desinfektionsstufe eine Ozondosierung von $1,0 \text{ g/m}^3$ bis $5,5 \text{ g/m}^3$. Eine weitere Reinigungsstufe stellt die Aktivkohlefilterung dar, die seit den 1990er Jahren in Betrieb ist. Diese Filter adsorbieren verbliebene organische Inhaltsstoffe und weitere Geruchs- und Geschmacksstoffe. (Nordwasser GmbH 2025, EURAWASSER 2003)

Mit dieser Ausstattung ist es im Wasserwerk Rostock nicht möglich, die Leitfähigkeit im Wasser abzusenken. Daher ist es entscheidend für die Einhaltung der in der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) festgelegten Grenzwerte, dass bereits das Rohwasser eine Leitfähigkeit unterhalb der Grenzwerte aufweist.

2.4 Rechtliche Rahmenbedingungen

Eine zentrale Bedeutung zur Regelung der Beschaffenheit von Trinkwasser kommt in Deutschland der TrinkwV zu. Dort werden unter anderem Grenzwerte für die Leitfähigkeit von $2790 \text{ }\mu\text{S/cm}$ bei 25°C und für den Chloridgehalt von 250 mg/l festgelegt (TrinkwV). Die DVGW W 254 (A) „Grundsätze der Rohwasseruntersuchung“ nennt die zu untersuchenden Parameter im Rohwasser, darunter die Leitfähigkeit, verweist für Grenzwerte aber auf die TrinkwV. DVGW W 202 (A) „Technische Regeln Wasseraufbereitung“ besagt, dass die Aufbereitung so zu erfolgen hat, dass die Qualitätskriterien der TrinkwV eingehalten werden.

2.5 Durchflussmessung

Durchflussmessungen in Fließgewässern dienen der Bestimmung der Wassermenge, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums einen Flussquerschnitt passiert. Übliche Methoden sind die Messung der Fließgeschwindigkeit mit Strömungsmessern oder Ultraschall Doppler Strömungsmesser (engl. Acoustic Doppler Current Profiler) (ADCP) in Kombination mit der Ermittlung der Querschnittsfläche des Gewässers. Aus der Multiplikation von Fließgeschwindigkeit und Querschnitt ergibt sich der Durchfluss (Abfluss, Q), meist angegeben in Kubikmetern pro Sekunde (m^3/s).

Ein ADCP ist ein akustisches Messgerät zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüssen in Gewässern. Das ADCP sendet Schallimpulse ins Wasser, die von Schwebstoffen oder Partikeln reflektiert werden. Aufgrund des Doppler-Effekts ändert sich dabei die Frequenz der reflektierten Signale in Abhängigkeit von der Bewegung der Partikel. Aus dieser Frequenzverschiebung kann das ADCP die Geschwindigkeit des Wassers in verschiedenen Tiefen und Entfernungen zum Gerät berechnen. Moderne ADCPs können gleichzeitig vertikale Profile der Strömungsgeschwindigkeit erfassen und liefern so präzise und räumlich aufgelöste Daten über die Strömungsverhältnisse im gesamten Gewässerquerschnitt.

3 Untersuchungsgebiet und Hintergrund

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über die Oberwarnow zwischen dem Mühlendamm und dem Stichkanal zum Wasserwerk Rostock. Vor allem dem Bereich des Mühlendamms und der dort vorhandenen Wehre kommt in dieser Untersuchung eine besondere Bedeutung zu. (Abb. 3.1)

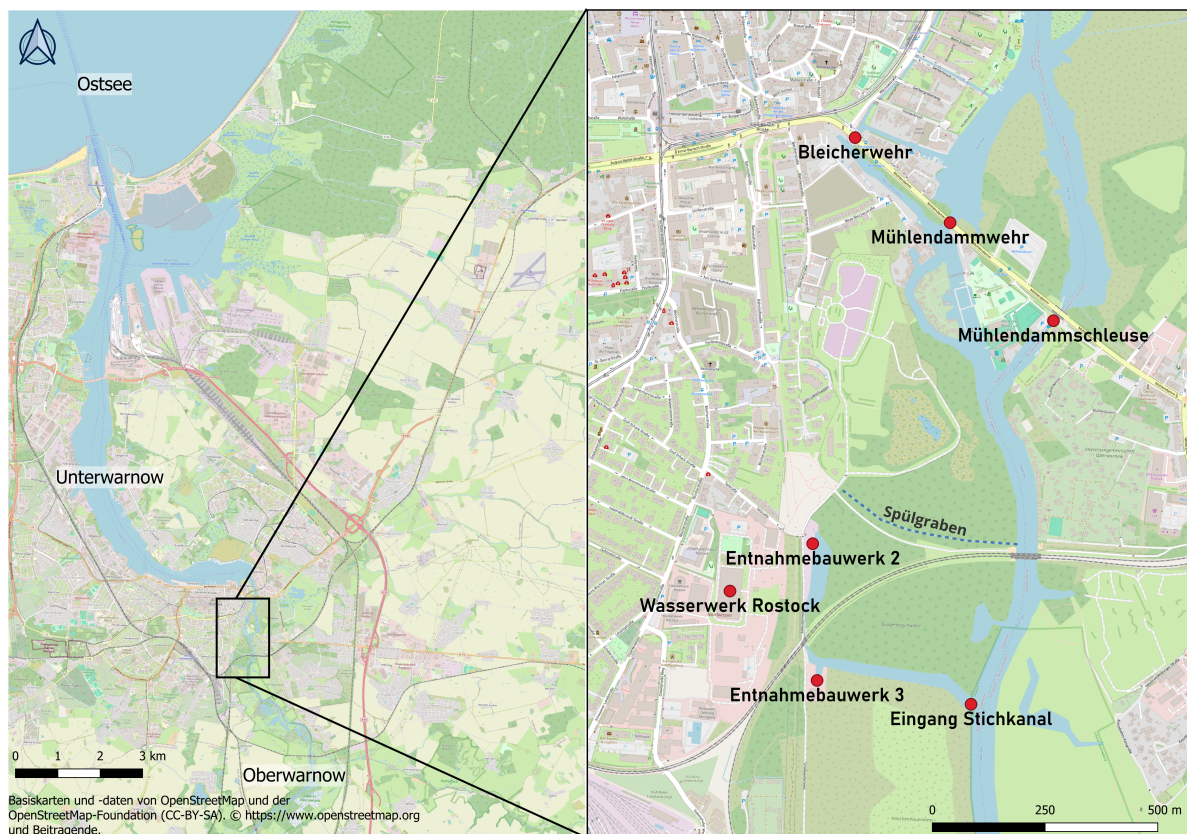


Abbildung 3.1: Übersichtskarte des Betrachtungsgebiets

3.1 Warnow

Die Warnow ist ein typisches Fließgewässer des Norddeutschen Tieflands und wird maßgeblich durch glaziale und postglaziale Landschaften geprägt. Ihr Einzugsgebiet umfasst rund 3.200 km² und beinhaltet zahlreiche durchströmte Seen. Zwischen dem Wehr in Bützow und dem Mühlendammwehr in Rostock erstreckt sich die stark rückgestaute Oberwarnow auf einer Länge von etwa 38 km und durchfließt mit dem Naturschutzgebiet „Unteres Warnowland“ ein ausgedehntes Niedermoor. Der Rückstau entsteht durch das Mühlendammwehr. Der Abschnitt weist ein geringes Sohlgefälle von 0,09‰ und eine mittlere Pegeldifferenz von 18 cm zwischen Rostock und Bützow auf (Miegel et al. 1999). Der mittlere Abfluss der Warnow beträgt 16,2 m³/s bei einem mittleren maximalen Abfluss von 77,6 m³/s und einem mittleren minimalen Abfluss von 0,812 m³/s (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie 2021).

Unterhalb des Mühlendammwehrs beginnt die Unterwarnow, ein mesohalines Übergangsgewässer, das zusammen mit der rund drei Kilometer breiten Bucht Breitling das Ästuar der Warnow bildet. Dieses Gewässer erstreckt sich bis zum Seekanal bei Warnemünde und stellt die Verbindung zur Ostsee her. Der Salzgehalt der Unterwarnow nimmt vom Mühlendamm an in Richtung Ostsee kontinuierlich zu. Zusätzlich ist ein Salzgradient entlang der Wassertiefe zu beobachten (Hanse- und Universitätsstadt Rostock 2021).

3.2 Mühlendamm

Der Mühlendamm trennt das Süßwasser der Oberwarnow von dem Brackwasser der Unterwarnow. So bildet der Mühlendamm die Grundlage für die Trinkwasserversorgung Rostocks aus Oberflächenwasser und den Hochwasserschutz der tief liegenden Bereiche der Oberwarnow bis Bützow. Am Mühlendamm befinden sich zwei Wehranlagen und eine ehemalige Schleuse, die 2019 mit Sand verfüllt und abgedichtet wurde (Abb. 3.1)(Hanse- und Universitätsstadt Rostock 2022).

3.2.1 Mühlendammwehr

Das größere Wehr ist das Mühlendammwehr, ein massives Betonbauwerk mit Brückenüberbau. Die Wehranlage besteht aus vier Wehrplatten, deren Oberkante eine Höhe von 3,15 m Normalhöhennull (NHN) und eine Sohltiefe von -2,00 m NHN hat. Die maximale Öffnungshöhe beträgt 2,81 m (Schülke 2023). Das Wehr dient dazu, den Wasserspiegel oberhalb des Mühlendamms anzuheben und zu kontrollieren. Im Laufe der Zeit verlagerte sich die Bedeutung des Mühlendammwehrs von der Schifffahrt hin zu wasserwirtschaftlichen und schutztechnischen Zielen. Seit der Einstellung des Schleusenbetriebs steht das Wehr als alleiniges aktives Regulierungselement an dieser Stelle im Mittelpunkt. Die Verantwortung für die Steuerung und Wartung des Mühlendammwehrs liegt beim

Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA), während die Vorgaben zum Stauziel vom Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM) gemacht werden.

3.2.2 Bleicherwehr

Das Bleicherwehr ist ein kleineres Wehr zwischen Bleichergraben und Fischergraben. Es besteht aus einer einzelnen Wehrplatte mit einer Sohltiefe von $-0,85$ m NHN und einer Öffnungshöhe von $0,22$ m. Die Oberkante der Wehrplatte beträgt $2,45$ m NHN, die Oberkante des Bauwerks $3,25$ m NHN. Das Bleicherwehr ist technisch gesehen ein Nebenwehr im Gesamtsystem des Mühlendamms. Es unterstützt das Mühlendammwehr insofern, dass es einen kleinen Teil des Wasserspiegels am Mühlendamm mitreguliert und eine potenzielle Ausweichstrecke für Wasser und Fische bereitstellt. Unter normalen Bedingungen fließt ein Teil des Warnow-Abflusses über das Bleicherwehr ab. Dadurch bleiben der Bleichergraben und angrenzende Gewässerbereiche durchströmt und verlanden nicht vollständig. Das Bleicherwehr liegt in der Verantwortung der Stadt Rostock.

3.3 Problemstellung

3.3.1 Salzeinbruch im Wasserwerk

Zwischen dem 09.10.2023 und dem 11.10.2023 wurde im Wasserwerk Rostock ein Anstieg der Leitfähigkeit des Wassers beobachtet. Für die Leitfähigkeit gilt gemäß DVGW W 202 (A) ein Eingreifwert von $800 \mu\text{S}/\text{cm}$. Am 09.10.2023 zeigte die Leitfähigkeitsmessung am Stichkanal einen raschen Anstieg über diesen Eingreifwert hinaus. Etwa eine Stunde nach Beginn des Anstiegs wurde ein Maximum von rund $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ erreicht. Anschließend sank die Leitfähigkeit innerhalb von etwa zwei Stunden wieder ab. Der Eingreifwert von $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ wurde bis etwa 06:30 Uhr am 10.10.2023 überschritten. Mit einer zeitlichen Verzögerung von etwa sechs Stunden wurde am tiefer im Stichkanal gelegenen Entnahmebauwerk 2 ein Leitfähigkeitsspitzenwert von etwa $900 \mu\text{S}/\text{cm}$ registriert, der für etwa einen halben Tag anhielt. Ein vergleichbares Verhalten konnte auch in weiteren Anlagenteilen des Wasserwerks beobachtet werden (vgl. Abb. 3.2).

Baulich bedingt können die Leitfähigkeitsmessungen in den Entnahmebauwerken nur während des Betriebs der Pumpen eine Leitfähigkeit des Wassers messen. Da als Reaktion auf die ansteigende Leitfähigkeit ein Wechsel der Entnahme zu Entnahmebauwerk 3 stattfand, lieferte die Leitfähigkeitsmessung in Entnahmebauwerk 2 ab dem 10.10.2023, ca. 13:30 Uhr, keine Messwerte mehr. Bis zum Werksausgang konnten mit den vorhandenen Aufbereitungsschritten die Leitfähigkeit und der Salzgehalt nicht weiter verringert werden (vgl. 2.3).

3 Untersuchungsgebiet und Hintergrund

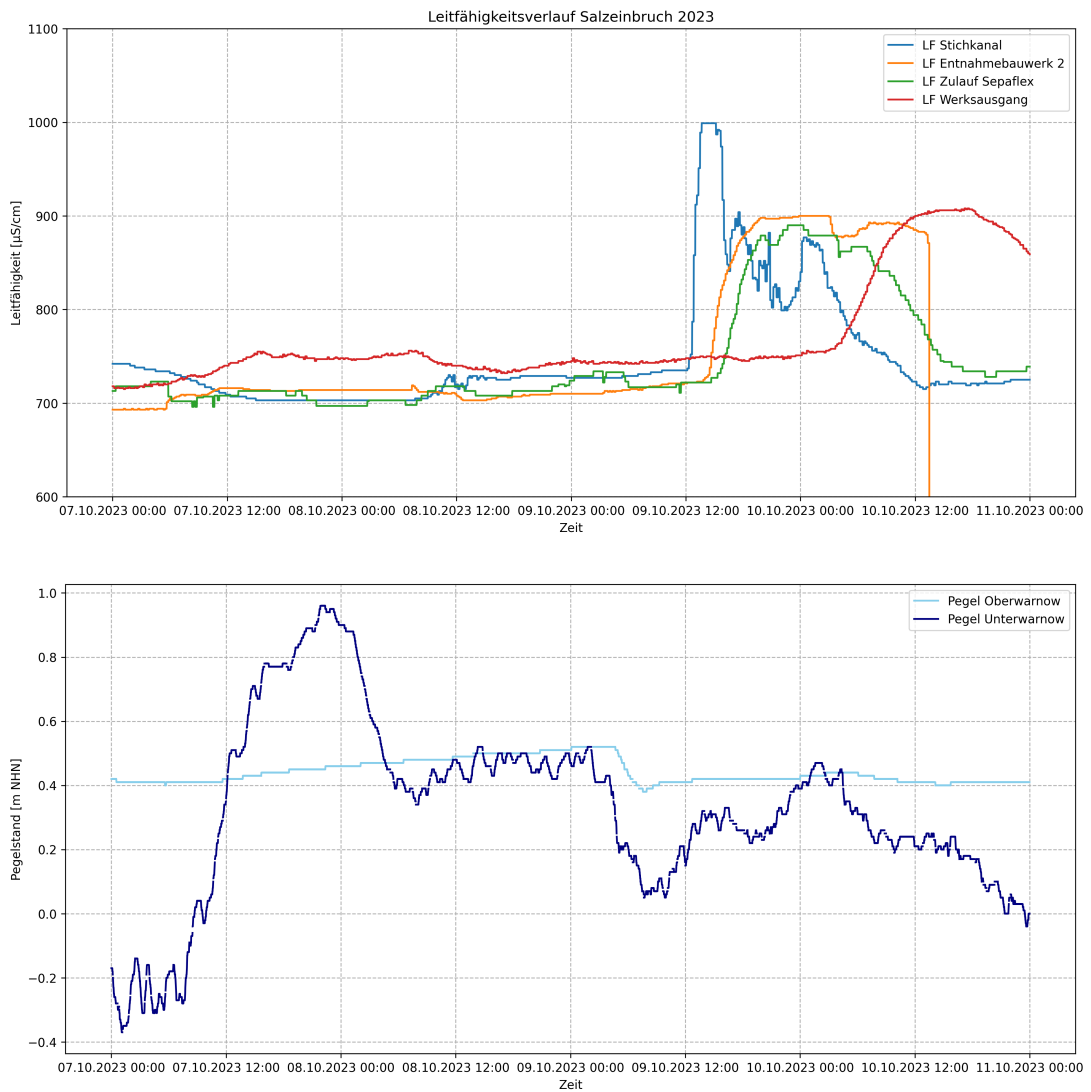


Abbildung 3.2: Verlauf des Salzeinbruchs im Oktober 2023

Dem Anstieg der Leitfähigkeit war ein erhöhter Wasserstand der Unterwarnow vorausgegangen, bei dem der Abfluss aus der Oberwarnow für einen ausgedehnten Zeitraum dadurch unterbunden wurde, dass die Unterwarnow einen höheren Pegel erreichte als die Oberwarnow. Kurz nach der Öffnung des Mühlendammschleuses und dem Wiedereinsetzen des Abflusses aus der Oberwarnow war ein Anstieg der Leitfähigkeit im Stichkanal zu beobachten.

3.3.2 Annahmen zum Hintergrund

Aufgrund der damaligen Messwerte wird angenommen, dass bei dem unmittelbar vorhergehenden Hochwasser der Unterwarnow trotz geschlossener Wehre eine erhebliche Menge an Salzwasser in die Oberwarnow eingetreten ist. Dieses konnte sich an der Gewässersohle aufgrund des in 3.1 beschriebenen geringen Sohlgefälles der Oberwarnow gut ausbreiten. Dabei sorgten der unterschiedliche Salzgehalt und die damit einhergehende höhere Dichte des eindringenden salzhaltigen Wassers für eine Schichtung zwischen dem salzhaltigen Wasser und dem normalen Warnowwasser. Durch das lang anhaltende Hochwasser konnte sich diese Schichtung weiter als sonst üblich in der Oberwarnow ausbreiten. Als das Wehr nach dem Hochwasser wieder geöffnet wurde, stieg der Durchfluss in der Oberwarnow und damit die Fließgeschwindigkeit schnell an. Das vorher an der Gewässersohle geschichtete salzhaltige Wasser wurde vertikal verwirbelt und konnte so in den Stichkanal zum Wasserkwerk eindringen. Durch seine höher gelegene Gewässersohle war der Stichkanal während der Schichtung vor einem Eindringen des salzhaltigen Wassers geschützt. Salzeinbrüche in die Oberwarnow können weiterhin bei erhöhten Wasserständen der Unterwarnow vorkommen. Vor diesem Hintergrund sollen die Eintragsquellen und die relevanten Bedingungen untersucht werden.

4 Material und Methode

4.1 Messkonzept

Zur Untersuchung der Entwicklung der Pegel von Ober- und Unterwarnow und deren Zusammenhang mit erhöhter Leitfähigkeit in der Oberwarnow wurde sowohl auf vorhandene Messwerte zurückgegriffen als auch eigene Messungen vorgenommen. Ziel war es, die stationären, permanenten Messungen durch zusätzliche, ereignisabhängige Messungen zu ergänzen, um so das Gesamtbild zu vervollständigen. Solche Ereignisse betrafen Pegelstände, bei denen die Unterwarnow höher stand als die Oberwarnow, was einen Eintrag von Salzwasser aus der Unter- in die Oberwarnow ermöglichte.

4.1.1 Leitfähigkeitsmessung

4.1.1.1 Permanente Messung

Im Rahmen der Überwachung der Rohwasserqualität des Wasserwerks Rostock ist auf der Oberwarnow eine Messstelle für Leitfähigkeit und Wassertemperatur am Eingang zum Stichkanal installiert. Diese liefert Daten in einer zeitlichen Auflösung von 15 min und einem Messbereich bis 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Um die Entwicklung der Leitfähigkeit im Untersuchungsgebiet genauer zu beobachten, wurde im Juli 2024 eine Messstelle an der Brücke am Freibad installiert (vgl. Abb. 4.1). Dort wird mit einer zeitlichen Auflösung von 15 min der Messbereich bis 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ abgedeckt. Die Elektrode befindet sich etwa 1 m über der Gewässersohle. Nach ersten Auswertungen wurde entschieden, zwei zusätzliche Messstellen am Bleicherwehr einzurichten, so dass je eine auf der Seite der Oberwarnow und eine auf der Seite der Unterwarnow angebracht wurde. Deren zeitliche Auflösung liegt bei 15 min und sie decken den Messbereich bis 200 mS/cm ab. Die Einrichtung dieser Messstellen erfolgte am 16.04.2025. An allen verbauten Sonden findet eine Messung der Wassertemperatur und eine automatische Temperaturkompensation auf 25 °C statt.

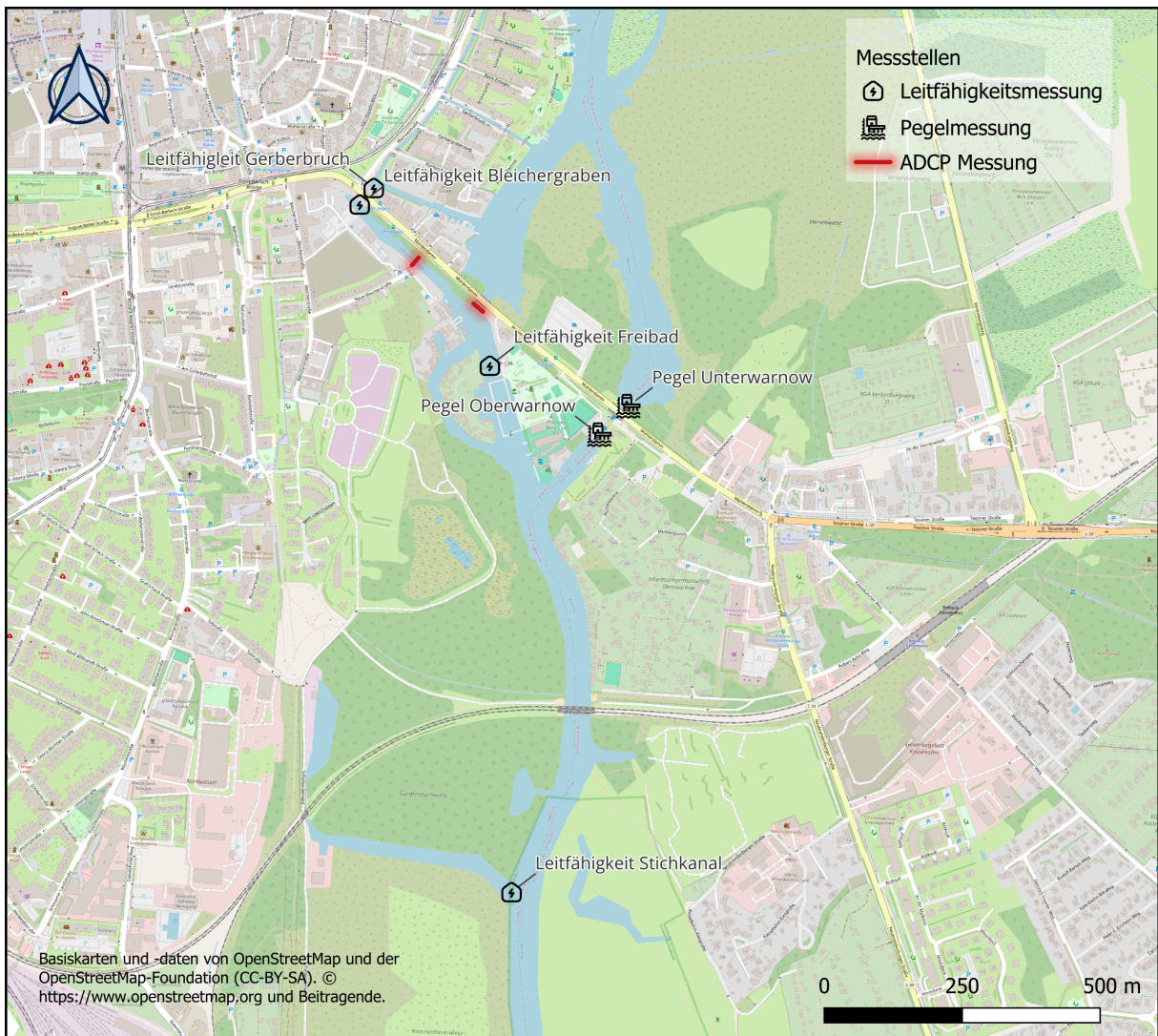


Abbildung 4.1: Übersicht über die Messstellen

4.1.1.2 Ereignisabhängige Messung

Weitere Messungen der Leitfähigkeit wurden von einem Boot aus über die gesamte Strecke zwischen Bleicherwehr und dem Eingang zum Stichkanal durchgeführt. Ziel dieser Messungen war es, Bereiche mit höherer Leitfähigkeit in Lage und Mächtigkeit zu verorten, sowie deren Verweilzeit in der Oberwarnow nachzuvollziehen. Dabei wurden in Tiefen mit jeweils einem Meter Abstand Messungen durchgeführt und dokumentiert. Die Messungen wurden in regelmäßigen Abständen entlang der Warnow vorgenommen. Die Ergebnisse wurden in ein Projekt in einem Geoinformationssystem (GIS) aufgenommen und verwaltet.

4.1.2 Pegeldaten

Die verwendeten Pegeldaten wurden von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) über das Portal PEGELONLINE bereitgestellt und dort entnommen. Die Pegel der Ober- und Unterwarnow werden an der Schleuse (Abb. 4.1) gemessen und beziehen sich auf einen Pegelnullpunkt (PNP) von $-4,98$ m NHN. Die verwendeten Daten decken den Zeitraum vom 01.01.2000 bis zum 26.06.2025 in minütlicher Auflösung ab. Zusätzlich wurde ein Datensatz von Engelke, (2007) übernommen, der die Pegelstände der Unterwarnow für den Zeitraum vom 01.11.1972 bis zum 31.10.2005 in stündlicher Auflösung abbildet. Aufgrund der höheren Auflösung des von der WSV bereitgestellten Datensatzes wurde dieser für die Zeit genutzt, zu der Daten aus beiden Quellen vorlagen.

4.1.3 Durchflussmessung

4.1.3.1 Permanente Messung

Eine kontinuierliche Messung findet für die Oberwarnow an der Geinitzbrücke statt. Dabei wird in einer zeitlichen Auflösung von 5 min der Durchfluss mittels Ultraschallmessung bestimmt. Diese Daten wurden vom StALU MM bereitgestellt.

4.1.3.2 Ereignisabhängige Messung

Die Durchflussmessung wurde am 31.03.2025 während eines Hochwassers zwischen 8:30 Uhr und 9:25 Uhr mit einem ADCP durchgeführt (vgl. 2.5). Die Pegel zu diesem Ereignis werden in Abbildung 4.2 dargestellt. Dabei wurde von der Wasseroberfläche mittels einer Ultraschall-Doppler-Messung sowohl der durchflossene Querschnitt bestimmt als auch die Fließgeschwindigkeit in unterschiedlichen Tiefen über den gesamten Querschnitt. Aus den resultierenden Daten konnte ein Gesamtdurchfluss berechnet werden. Die Messungen wurden so geplant, dass sowohl der mögliche Eintragspfad über das Mühlendammwehr als auch der mögliche Eintragspfad über das Bleicherwehr betrachtet werden konnten. Dafür wurde eine Messung in der betonierte Einfassung des Mühlendammwehrs vorgenommen. Die Messung am Bleicherwehr fand im Bleichergraben statt. Es wurde eine Stelle gewählt, an der es möglich war, den gesamten Querschnitt mit dem ADCP zu erfassen (Abb. 3.1). Die Ergebnisse der Messung wurden mit der Software RiverSurveyor Live von SonTek ausgewertet.

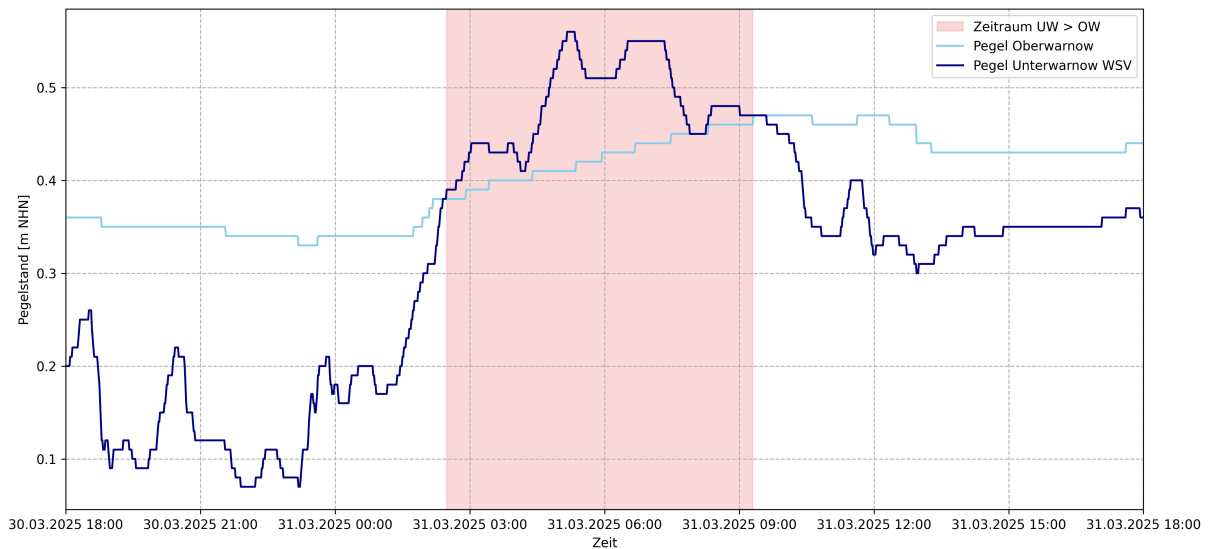


Abbildung 4.2: Pegelstände während der Durchflussmessung

4.2 Software und Datengrundlage

Zur Auswertung der ereignisabhängigen Leitfähigkeitsmessung und zur Erstellung von Karten wurde QGIS verwendet. Die Pegelanalyse und Visualisierung wurde mit einem Python-Script, das unter Zuhilfenahme von Gemini AI erstellt wurde, umgesetzt. Die Auswertung der Durchflussmessungen im Bleichergraben und am Mühlendammwehr erfolgte mit RiverSurveyor Live von SonTek/YSI, Inc. (Tabelle 4.1, Tabelle 4.2)

Die verwendeten Umweltdaten werden in Tabelle 4.3, Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 gezeigt.

| Software | Version |
|--------------------|------------------|
| QGIS | 3.42.1 – Münster |
| Visual Studio Code | 1.100.3 |
| Python | 3.12.6 |
| RiverSurveyor Live | 3.9.0 |

Tabelle 4.1: Verwendete Software

| Bibliothek | Version |
|------------|---------|
| pandas | 2.2.3 |
| numpy | 1.26.4 |
| matplotlib | 3.10.3 |
| scipy | 1.15.2 |

Tabelle 4.2: Python-Bibliotheken

| Datensatz | Quelle | Zeitraum | Auflösung |
|-------------------|---------------|----------------------------|-----------|
| Pegel Ostsee | WSV, 2025b | 01.01.2000 – 16.05.2026 | 1 Minute |
| Pegel Oberwarnow | WSV, 2025a | 01.01.2000 – 26.06.2025 | 1 Minute |
| Pegel Unterwarnow | Engelke, 2007 | 01.11.1972 – 31.10.1991 | 1 Stunde |
| Pegel Unterwarnow | WSV | 01.11.1991 – 01.01.2000 | 1 Stunde |
| Pegel Unterwarnow | WSV, 2025c | 01.01.2000 – 26.06.2025 | 1 Minute |

Tabelle 4.3: Verwendete Pegel datensätze

| Datensatz | Quelle | Zeitraum | Auflösung |
|-----------------------------|----------|----------------------------|-----------|
| Durchfluss Geinitzbrücke | StALU MM | 01.11.1988 – 31.03.2023 | 1 Tag |
| Durchfluss Geinitzbrücke | StALU MM | 01.11.2002 – 01.05.2025 | 5 Minuten |

Tabelle 4.4: Verwendete Durchfluss datensätze

| Datensatz | Quelle | Zeitraum | Auflösung |
|--------------------------------------|------------|----------------------------|------------|
| Leitfähigkeit Gerberbruch | Nordwasser | 01.05.2025 – 01.06.2025 | 15 Minuten |
| Leitfähigkeit Bleichergraben | Nordwasser | 01.05.2025 – 01.06.2025 | 15 Minuten |
| Leitfähigkeit Freibad | Nordwasser | 30.06.2024 – 01.02.2025 | 15 Minuten |
| Leitfähigkeit Stichkanal | Nordwasser | 30.09.2023 – 11.10.2023 | 10 Minuten |
| Leitfähigkeit Ent- nahmebauwerk 2 | Nordwasser | 30.09.2023 – 11.10.2023 | 10 Minuten |
| Leitfähigkeit Zulauf Sepaflex | Nordwasser | 30.09.2023 – 11.10.2023 | 10 Minuten |
| Leitfähigkeit Werksausgang | Nordwasser | 30.09.2023 – 11.10.2023 | 10 Minuten |

Tabelle 4.5: Verwendete Leitfähigkeitsdaten

4.3 Methode

4.3.1 Auswertung Pegeldaten

Zur Auswertung der Pegeldaten wurden die in Tabelle 4.3 genannten Datensätze genutzt. Ergänzend wurden die in Tabelle 4.4 genannten Durchflussdaten für die Messstelle Geinitzbrücke verwendet.

4.3.1.1 Langzeittrend

Für den Langzeittrend (Abb. 4.3) der Ober- und Unterwarnow wurden die Pegelmesswerte zu Höhen in m NHN umgerechnet. Die Durchflussdaten wurden nach einer Bereinigung von Ausreißern für den Zeitraum nach dem 31.03.2023 auf Tagesmittel umgerechnet, um eine einheitliche Datengrundlage zu erhalten. Es wurden anschließend sowohl für die Pegel- als auch für die Durchflussmesswerte Jahresmittelwerte für die Jahre gebildet, zu denen für mindestens 80 % der Tage Daten vorlagen. Die Abbildung erfolgte gemeinsam mit einer Regression auf Basis der Rohdaten bis zum 31.12.2024.

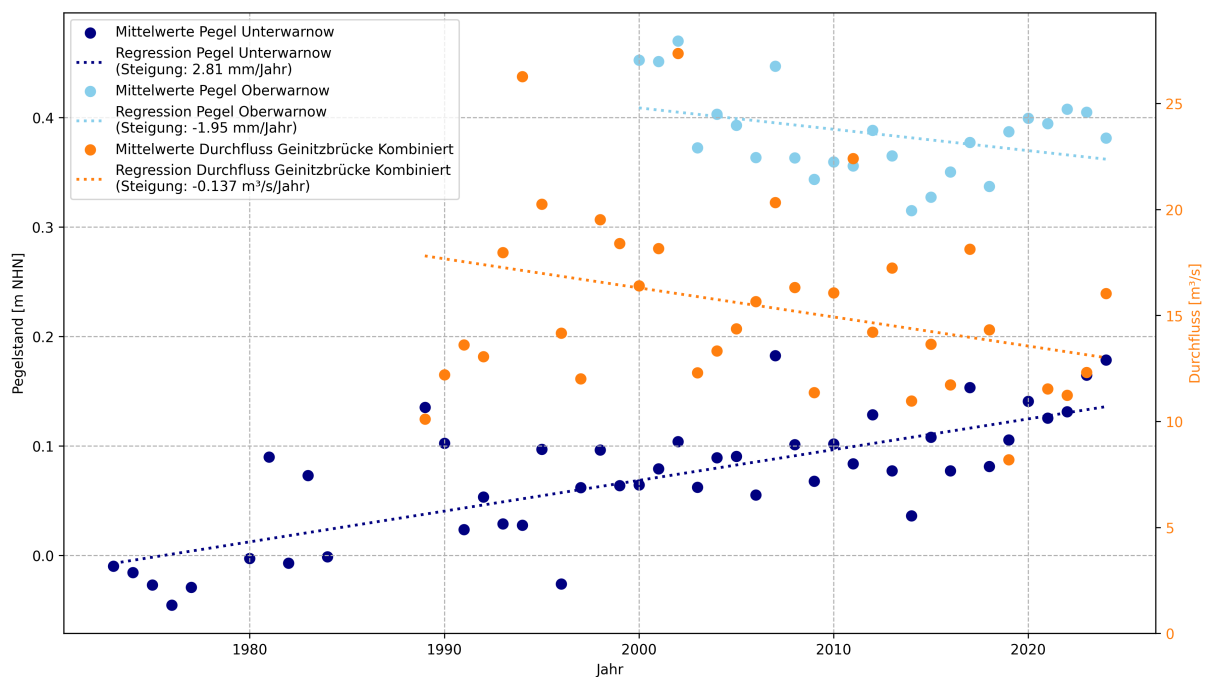


Abbildung 4.3: Pegel- und Durchflussentwicklung der Ober- und Unterwarnow

4.3.1.2 Maximalpegel Unterwarnow

Zur Veranschaulichung der Maximalpegel der Unterwarnow wurde mit den kombinierten Datensätzen der Unterwarnow gearbeitet. Die täglichen maximalen Pegel wurden als Boxplot abgebildet. Zusätzlich wurde hier der Pegel von 532 cm PNP markiert, der das reguläre Stauziel der Oberwarnow zeigt. (Abb. 5.10)

4.3.1.3 Auswertung von Überschreitungseignissen

Ein Schwerpunkt der Auswertung war, Zeiträume zu finden, in denen der Wasserstand der Unterwarnow höher war als der der Oberwarnow. Diese Zeiträume sind wichtig, weil dann salzhaltiges Wasser von der Unterwarnow in die Oberwarnow fließen kann. Die für diese Auswertung verwendeten Datensätze waren Pegel Oberwarnow und Pegel Unterwarnow vom WSV (Tabelle 4.3). Ein Überschreitungseignis wurde definiert als ein Zeitraum, in dem der Wasserstand der Unterwarnow mindestens zehn Minuten lang höher war als der der Oberwarnow. Einzelne Ereignisse, die höchstens neun Stunden auseinanderliegen, wurden zu einem Gesamtereignis zusammengefasst. Dieser Zeitraum ist die dreifache Dauer der Eigenschwingung der Unterwarnow und soll so zusammenhängende Ereignisse zuverlässig zusammenfassen (BSH, 2023). Für jedes Ereignis wurden Start, Ende, Dauer, der höchste Wasserstand der Unterwarnow und die größte Pegeldifferenz bestimmt. Dabei wurden der maximale Pegel und die maximale Differenz unabhängig voneinander für das gesamte Ereignis bestimmt.

Für jährliche und monatliche Auswertungen wurde das Startdatum des Ereignisses verwendet. Die gefundenen Überschreitungseignisse wurden dann ausgewertet und dargestellt. Zuerst wurden die Ereignisse jährlich betrachtet. Dazu wurden die Anzahl pro Jahr sowie die Gesamtdauer pro Jahr in Stunden berechnet und in Balkendiagrammen dargestellt. Wichtig für diese jährlichen Auswertungen war ein Datenqualitätsfilter: Nur Jahre mit genügend täglichen Daten – definiert als mindestens 80% der Tage des Jahres mit gültigen Messwerten für beide betrachteten Pegel im für die Ereignisanalyse aufbereiteten Datensatz – wurden berücksichtigt.

Danach folgte eine monatliche Auswertung. Die Verteilung der Dauer der einzelnen Ereignisse wurde für jeden Kalendermonat, aggregiert über alle Beobachtungsjahre, untersucht und mit Boxplots dargestellt. So kann gezeigt werden, wie sich solche Ereignisse über die Jahreszeiten verteilen. Ähnlich wurde die monatliche Verteilung der Anzahl der Ereignisse untersucht: Die Ereignisse pro Monat wurden gezählt und ihre Verteilung wurde ebenfalls mit Boxplots für jeden Kalendermonat gezeigt. Um die Ereignisse genauer zu beschreiben, wurden Zusammenhänge zwischen Ereignisdauer und größter Pegeldifferenz beziehungsweise höchstem Wasserstand der Unterwarnow mit Streudiagrammen dargestellt.

4.3.1.4 Erhöhte Leitfähigkeit und Pegelüberschreitung

Zur Analyse wurden die ermittelten Überschreitungsereignisse mit allen Leitfähigkeitsereignissen an der Messstelle Freibad abgeglichen, bei denen die Leitfähigkeit $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ überschritt. Ein Leitfähigkeitsereignis wurde einem Überschreitungsereignis zugeordnet, wenn sein Beginn spätestens 12 Stunden nach dem Start des Überschreitungsereignisses lag. Anschließend wurde ein Scatterplot erstellt, der die Ereignisse entlang ihrer Dauer und ihres maximalen Pegels darstellt. Die zugeordneten Leitfähigkeitswerte sind dabei mittels eines Farbverlaufs verdeutlicht (Abb. 5.7).

4.3.2 Auswertung Leitfähigkeitsmessung

4.3.2.1 Leitfähigkeitsmessung am Bleicherwehr

Die Daten der am Bleicherwehr installierten Leitfähigkeitsmessungen wurden gemeinsam mit den Pegeln der Ober- und Unterwarnow dargestellt. Diese Daten sollen Zusammenhänge zwischen erhöhten Wasserständen der Unterwarnow und eindringendem salzhaltigem Wasser zeigen.

4.3.2.2 Ereignisabhängige Leitfähigkeitsmessung

Nur für ein Hochwasserereignis konnte gleichzeitig eine Leitfähigkeitsmessung durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um eine Sturmflut am 28.11.2024. Aufgrund sich verschlechternder Witterungsbedingungen konnte diese Messung nur bis auf Höhe der ehemaligen Schleuse durchgeführt werden.

Die dabei aufgenommenen Daten wurden so dargestellt, dass die Entfernung vom Bleicherwehr zum einen und die Tiefe sowie die gemessene Leitfähigkeit zum anderen dargestellt wurden (Abb. 5.6) Dabei wurden die Werte bis zum Eingreifwert des Wasserwerks von $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ in Blau und alle darüber liegenden Werte in einem roten Farbverlauf dargestellt.

4.3.3 Auswertung Durchflussdaten

Die Auswertung des Durchflusses der Warnow erfolgte auf Grundlage von zwei unterschiedlichen Datensätzen zum Durchfluss an der Geinitzbrücke. Die Datensätze unterscheiden sich in Auflösung und abgedecktem Zeitraum. Die Tagesmitteldaten wurden vom StALU MM vor Herausgabe geprüft, während es sich bei den 5-minütigen Werten um ungeprüfte Rohdaten handelt. Vor der weiteren Verarbeitung wurden Ausreißer aus den Rohdaten entfernt. Das betraf alle Werte, die entweder negativ waren oder mehr als den 1,5-fachen Interquartilsabstand aufwiesen. Der Grund dafür liegt in stellenweise fehlerhaften Messwerten in den Rohdaten, bei denen unrealistisch große oder negative Werte für sehr kurze Zeit aufgezeichnet wurden.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Ermittlung der Eintragspfade

Die Durchflussmessung mittels ADCP zeigte während eines leichten Überschreitungserignisses eine klare Bewegung im Bereich des Bleichergrabens. Trotz der minimalen Pegelunterschiede, die in Abbildung 4.2 zu sehen sind, zeigte sich in den Messungen ein durchschnittlicher Durchfluss von $0,028 \text{ m}^3/\text{s}$ mit einem maximal gemessenen Durchfluss von $0,258 \text{ m}^3/\text{s}$ in Richtung der Oberwarnow.

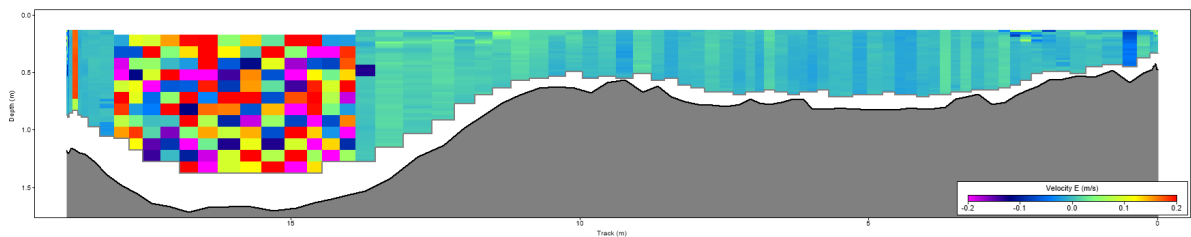


Abbildung 5.1: Messergebnisse ADCP im Bleichergraben bei Rückströmung von $0,258 \text{ m}^3/\text{s}$ in Richtung Oberwarnow

Die Durchflussmessung am Mühlendammwehr ergab kurz zuvor einen mittleren Durchfluss von $-0,179 \text{ m}^3/\text{s}$ in Richtung Oberwarnow, also tatsächlich einen Abfluss aus der Oberwarnow. Bei den einzelnen Messungen wurden dabei Werte zwischen $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ und $0,048 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht.

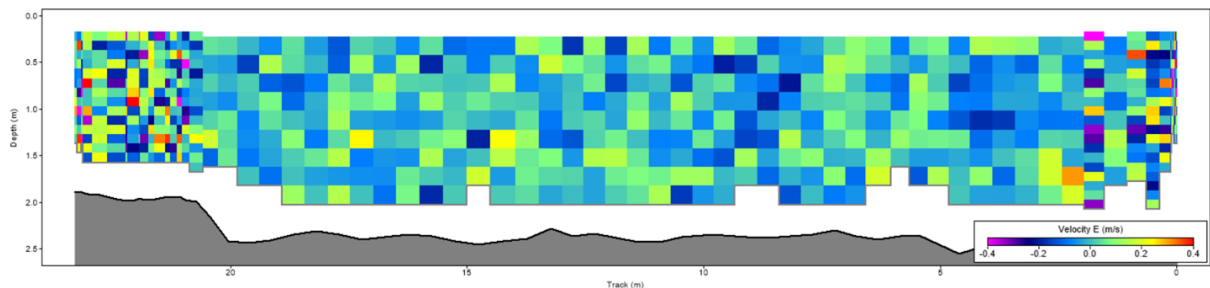


Abbildung 5.2: Messergebnisse ADCP am Mühlendammwehr bei Rückströmung von $0,048 \text{ m}^3/\text{s}$ in Richtung Oberwarnow

Die Aussagekraft der absoluten Durchflusswerte ist allerdings limitiert. Dies begründet sich zum einen in der geringen Überstauhöhe zum Messzeitpunkt, die ein nur geringes Rückstrompotential zur Folge hat. Zum anderen sind die zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten selbst bei größeren Überstauhöhen im Vergleich zur Bewegungsgeschwindigkeit des ADCP sehr gering. Dies führt zu großen messtechnischen Unsicherheiten. Trotz dieser methodisch bedingten Unsicherheiten in den Absolutwerten zeigen die Messungen einen deutlichen Unterschied im Durchflussverhalten zwischen den beiden untersuchten Messstellen auf. So zeigt das ADCP an der Messstelle im Bleichergraben klar Bereiche auf, in denen eine Strömung vorherrscht, während am Mühlendamwehr die Messergebnisse eher ein Rauschen oder eine leichte Turbulenz in diesem Bereich zeigen.



Abbildung 5.3: Bleicherwehr am 31.10.2024 vor einem Überschreitungsereignis



Abbildung 5.4: Bleicherwehr am 02.11.2024 während eines Überschreitungsereignisses

Bei einer Begehung des Bleicherwehres am 02.11.2024 – sowohl vor als auch während eines Überschreitungsereignisses – konnte die Rückströmung des Wassers eindrucklich an-

hand von sich ansammelndem Treibgut beobachtet werden. Bereits bei regulärem Abfluss der Oberwarnow kommt es an dieser Stelle zur Anlagerung von Treibgut am vorhandenen Fanggitter (Abb 5.3). Während des Überschreitungsereignisses war eine ausgeprägte Rückströmung sogar mit bloßem Auge anhand der Bewegung des Treibguts erkennbar. (Abb. 5.4)

Bei der permanenten Leitfähigkeitsmessung am Bleicherwehr zeigte sich während Überschreitungsereignissen ein Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit im Gerberbruch und im Bleichergraben, wie hier beispielhaft an einem Ereignis zwischen dem 04.05.2025 und dem 05.05.2025 gezeigt wird (Abb. 5.5).

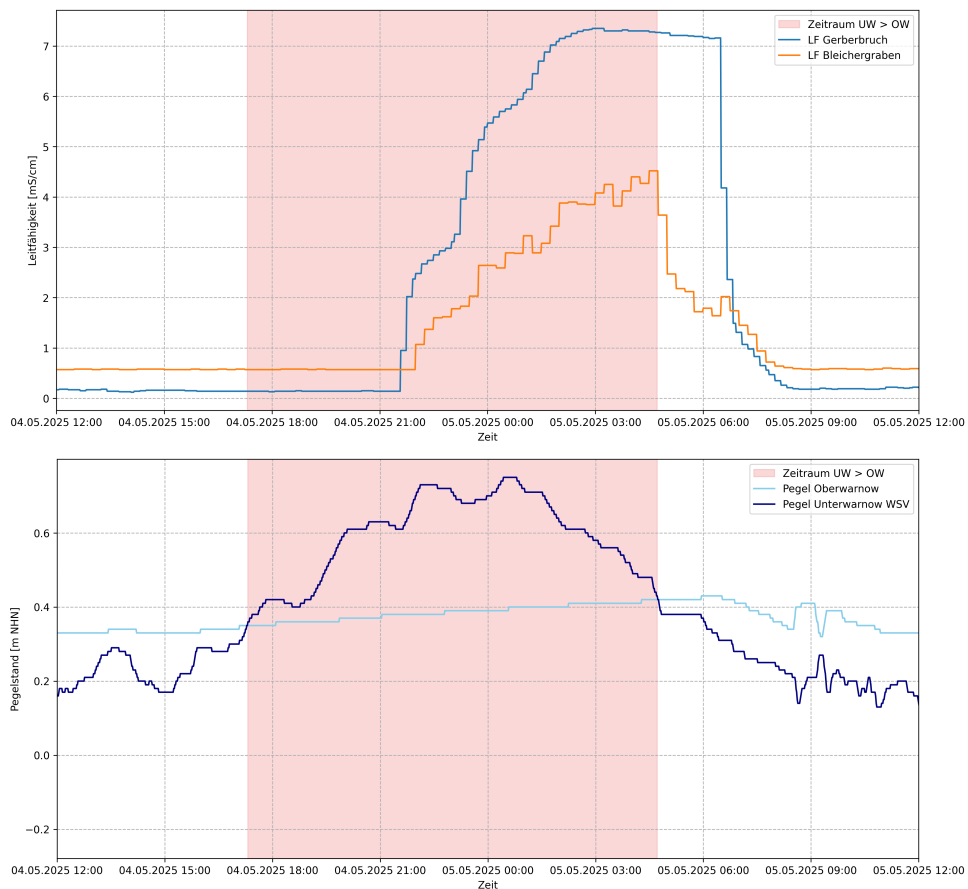


Abbildung 5.5: Leitfähigkeit in Gerberbruch und Bleichergraben während eines Überschreitungsereignisses mit Pegelverlauf

Zunächst zeigte keine der beiden Messstellen eine ansteigende Leitfähigkeit, obwohl der Pegel der Unterwarnow den der Oberwarnow überschritt. Anschließend kam es nahezu zeitgleich bei beiden Messstellen zu einem starken Anstieg der Leitfähigkeit, wobei das Wehr zu diesem Zeitpunkt aufgrund der Pegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwarnow geschlossen war. Der gemeinsame Anstieg beider Leitfähigkeitsmessungen zeigt, dass das

Wehr das Brackwasser aus der Unterwarnow nach kurzer Verzögerung in die Oberwarnow gelangen lässt.

Die ereignisabhängige Leitfähigkeitsmessung während eines Hochwassers in der Oberwarnow zeigte im Bleichergraben die höchsten Leitfähigkeitswerte direkt am Bleicherwehr. Mit zunehmender Entfernung vom Wehr nahm die Leitfähigkeit deutlich ab, und gleichzeitig bildete sich eine ausgeprägte vertikale Schichtung aus (Abb. 5.6). Die kontinuierliche Abnahme der Leitfähigkeit bestätigt das Bleicherwehr als Haupteintragspfad. Ein Eintrag am Mühlendammwehr kann zwar nicht ausgeschlossen werden, allerdings sprechen die deutlich höheren Leitfähigkeiten am Bleicherwehr und die deutliche Verdünnung dieser unmittelbar vor dem Mühlendammwehr dagegen, dass hier große Mengen an Brackwasser zufließen. Diese beobachtete Schichtung entspricht den Erwartungen hinsichtlich der

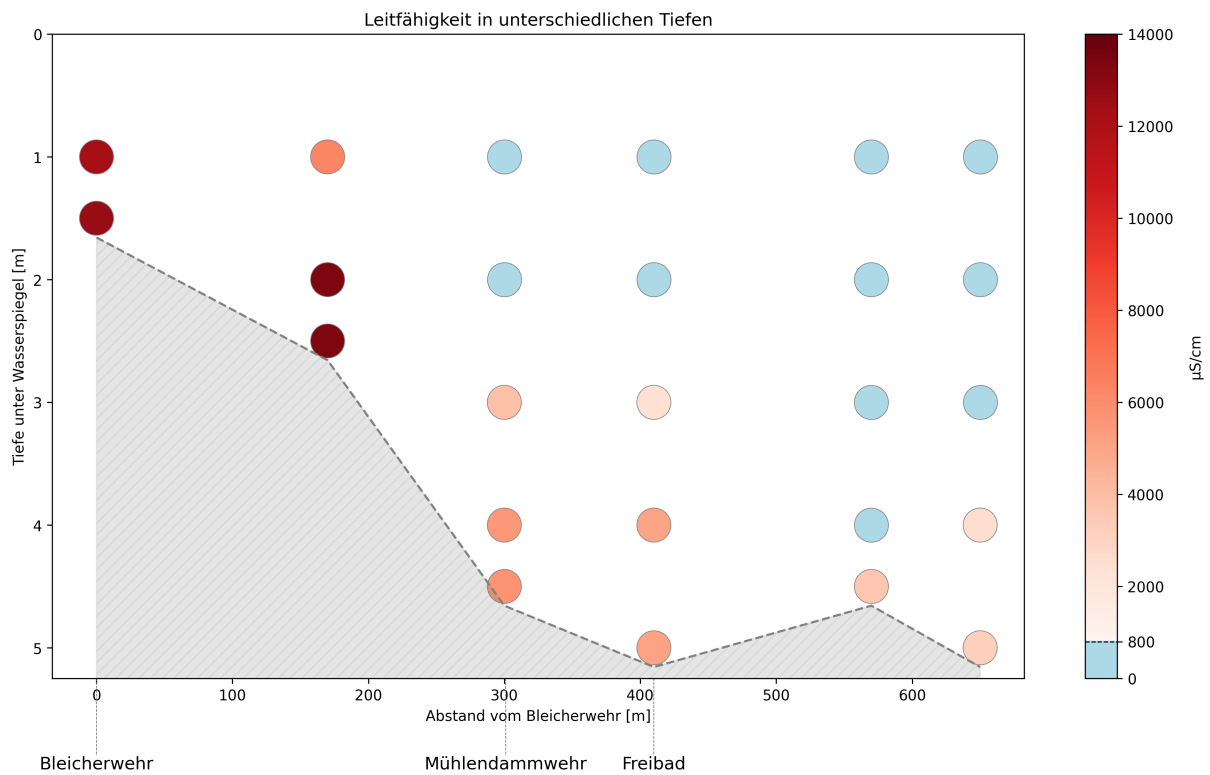


Abbildung 5.6: Leitfähigkeitsmessung am 28.11.2024

Ausbreitung von salzhaltigem Wasser in einem Gewässer und verdeutlicht, dass es im betrachteten Untersuchungsgebiet zu keiner vollständigen Durchmischung beziehungsweise Füllung des Wasserkörpers mit Brackwasser kommt (Barke 2000).

5.2 Ausbreitung in der Oberwarnow

Die permanente Leitfähigkeitsmessung an der Messstelle Freibad zeigte einen engen Zusammenhang zwischen erhöhten Pegelständen der Unterwarnow und einem Anstieg der Leitfähigkeit in der Oberwarnow. Jedem Ereignis, bei dem an der Messstelle Freibad eine Leitfähigkeit von über $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen wurde, ging ein erhöhter Wasserstand der Unterwarnow voraus, der wiederum zu einer Pegelüberschreitung der Unterwarnow hinsichtlich der Oberwarnow führte. Dabei dauerte es in den meisten Fällen zwischen 3 und 4 Stunden zwischen dem Eintreten des Überschreitungsereignisses der Unterwarnow und dem Überschreiten der Leitfähigkeit von $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ an der Messstelle Freibad.

In Abbildung 5.7 ist zu sehen, dass nicht jedes Überschreitungsereignis automatisch mit einer erhöhten Leitfähigkeit verbunden war. Allerdings konnte festgestellt werden, dass länger andauernde Überschreitungsereignisse eine deutliche Erhöhung der Leitfähigkeit zur Folge hatten. Alle betrachteten Überschreitungsereignisse mit einer maximalen Pegeldifferenz von mehr als 15 cm führten zu einer erhöhten Leitfähigkeit an der Messstelle Freibad.

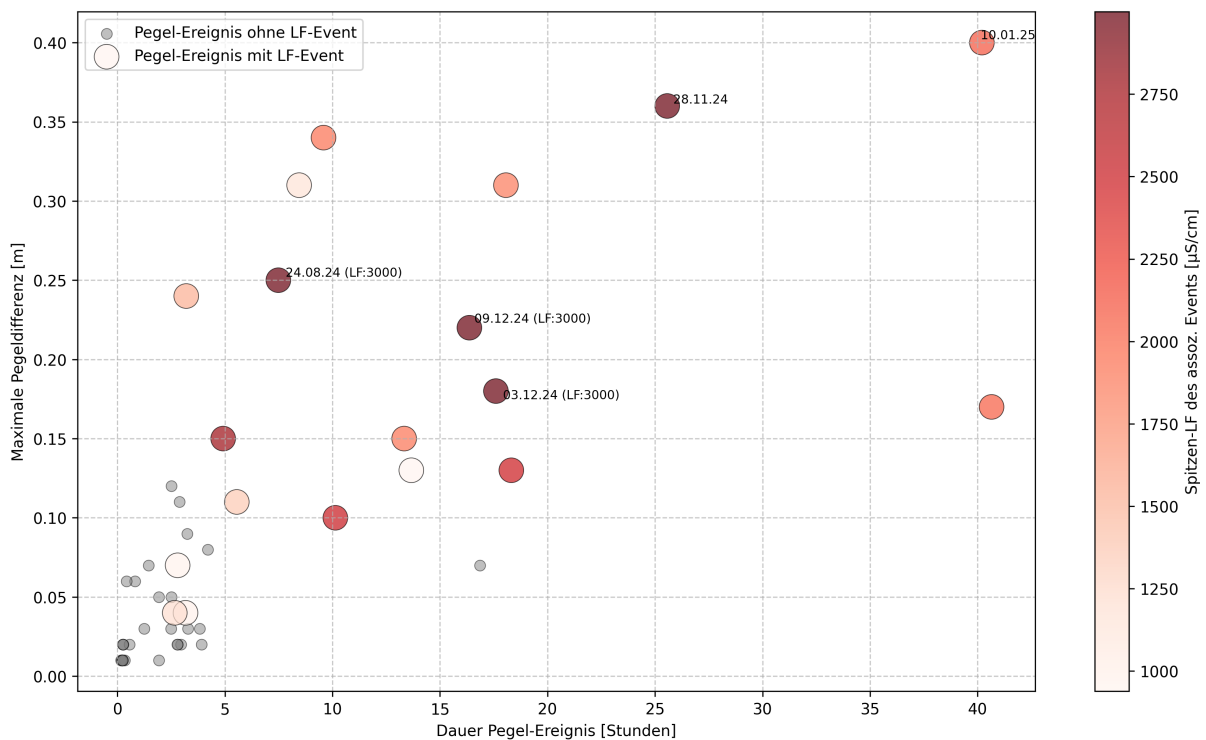


Abbildung 5.7: Zusammenhang Leitfähigkeit und Überschreitungsereignisse

Mit dem Bleicherwehr als Haupteintragsort für salzhaltiges Wasser lassen sich jene Ereignisse, bei denen trotz Überschreitungsereignis keine signifikante Erhöhung der Leitfähigkeit auftrat, nachvollziehbar erklären. Bei relativ kurzen Überstaudauern oder geringen Überstauhöhen gelangt nur eine geringe Menge salzhaltigen Wassers in die Oberwarnow.

Diese kleinen Mengen bilden vermutlich eine ausgeprägte Schichtung, ähnlich wie in Abbildung 5.6, mit einer Mächtigkeit von unter einem Meter an der Messstelle Freibad. Da die Messsonde an dieser Stelle etwa einen Meter über der Gewässersohle installiert ist, werden solche geringfügigen Ereignisse messtechnisch nicht erfasst.

5.3 Entwicklung der Eintragsfaktoren

Die Auswertung der Ereignisse, zu denen der Pegel der Unterwarnow den der Oberwarnow überschreitet, zeigt zunächst eine Zunahme der Dauer der Überschreitungsereignisse. Diese Entwicklung ist darauf zurückzuführen, dass sich durch den Klimawandel am Mühlendamm eine zunehmend schwierige Situation in Bezug auf mögliche Pegelüberschreitungen der Unterwarnow ergibt. dem damit einhergehenden steigenden Meeresspiegel steigt auch der Pegel der Unterwarnow, die direkt mit der Ostsee verbunden ist. Gleichzeitig gab es in den Jahren seit 2000 tendenziell sinkende Pegel und Durchflüsse der Oberwarnow. Während der Pegel für sich genommen aufgrund der starken Regulierung dieses Gewässerabschnittes wenig Aussagekraft zeigt, deuten die ebenfalls sinkenden Abflussmengen der Oberwarnow darauf hin, dass sich die Bedingungen für Pegelüberschreitungen in den nächsten Jahren häufiger ergeben werden (Abb. 4.3).

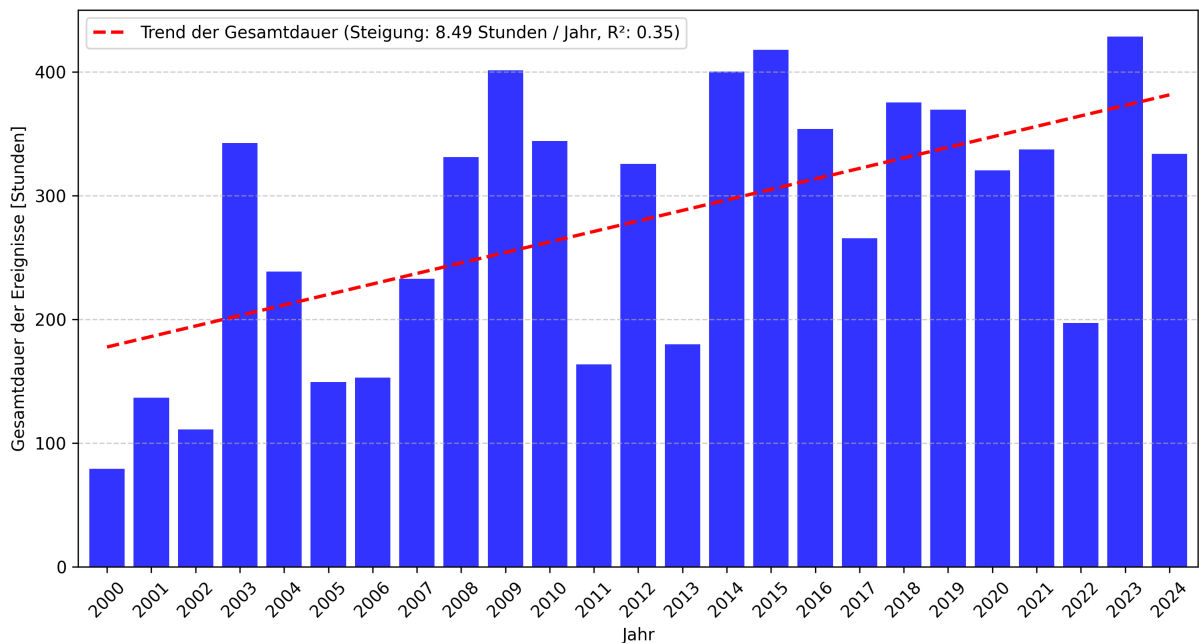


Abbildung 5.8: Entwicklung der jährlichen Gesamtdauer der Überschreitungsereignisse

Wie in Abbildung 5.8 dargestellt, ist für die vergangenen Jahre eine deutliche Zunahme der Dauer von Überschreitungsereignissen zu verzeichnen. Die lineare Regression der Daten zeigt für die jährliche Gesamtdauer der Überschreitungsereignisse einen mittleren Anstieg von 8,49 Stunden pro Jahr, sofern Ereignisse mit einem maximalen Intervall von

neun Stunden aggregiert werden. Wird hingegen ausschließlich die effektive Überschreitungsdauer ohne Zusammenfassung einzelner Überschreitungen zu Gesamtereignissen betrachtet, beträgt die Zunahme noch 6,1 Stunden pro Jahr.

Diese Anstiege sind im Kontext des Hochwasserereignisses, das mit dem Salzeinbruch im Wasserwerk in Zusammenhang steht, besonders signifikant. Das Hauptereignis dauerte seinerzeit 16,45 Stunden an. Allerdings wurde die Dauer durch einen nachfolgend hohen Pegel der Unterwarnow beeinflusst, welcher ein Öffnen der Wehre und damit den natürlichen Abfluss unterband. Insgesamt dauerte es vom Beginn des Überschreitungereignisses bis zum Öffnen der Wehranlagen etwa 40 Stunden (Abb. 3.2). Diese Zeit ist relevant, da sich das eindringende Brackwasser während der Zeit ohne Abflussgeschehen an der Gewässersohle ausbreiten konnte.

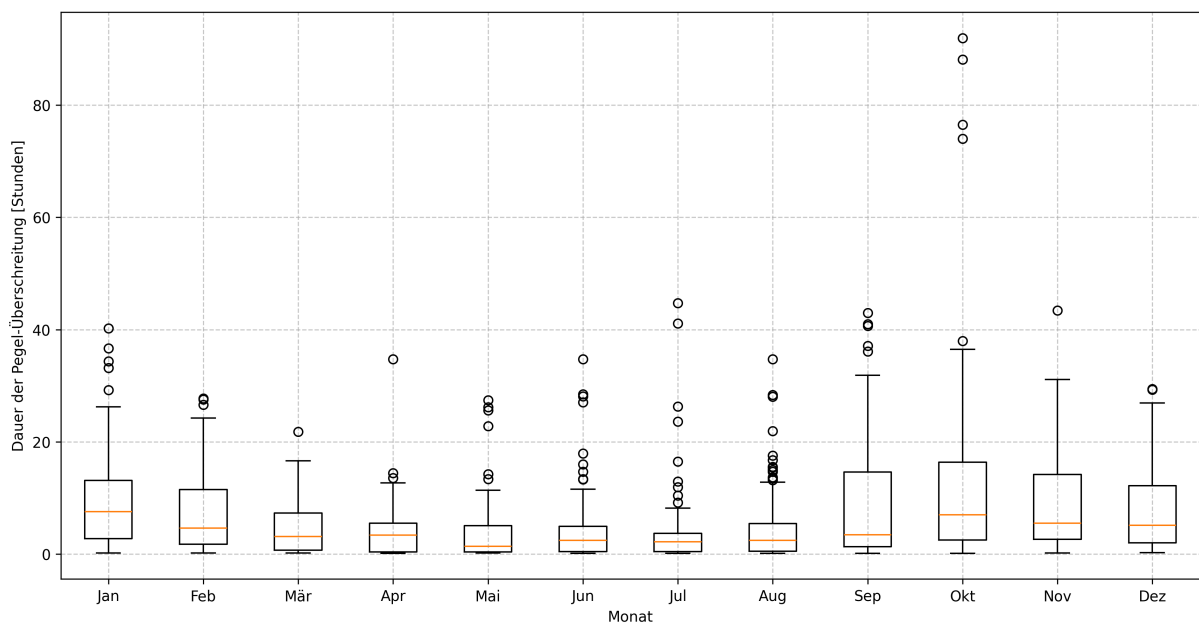


Abbildung 5.9: Dauer der Überschreitungereignisse nach Monaten

Die Dauer von Überschreitungereignissen wird durch mehrere Faktoren bestimmt: den Ausgangspegel der Oberwarnow, den Pegel der Unterwarnow und den Abfluss der Oberwarnow. Der Abfluss der Oberwarnow ist dabei entscheidend dafür, wie schnell der dortige Ausgangspegel ansteigen kann, um das Niveau der Unterwarnow bei einer Überschreitung erreichen zu können. Ebenso sorgt ein höherer Ausgangspegel der Oberwarnow bei gleichem Abfluss und gleichem Maximalpegel der Unterwarnow für eine geringere Dauer der Überschreitungereignisse. Eine besondere Risikosituation entsteht, wenn geringe Abflüsse der Oberwarnow auf erhöhte Wasserstände in der Unterwarnow oder sogar auf Sturmfluten treffen. Unter diesen Umständen können die Überschreitungereignisse extrem lange andauern. Dieser Effekt zeigt sich in den vorliegenden Daten besonders deutlich im Oktober, der durch eine besonders hohe Gesamtdauer der Überschreitungereignisse gekennzeichnet ist. Auch der Salzeinbruch im Wasserwerk Rostock lag in diesem Monat. Wie Abbildung 5.9 veranschaulicht, gibt es, aufgeteilt nach Monaten, die geringste Dauer von Überschreitungereignissen im Juli. Bereits im September nimmt die summierte monatliche Dauer

der Überschreitungen stark zu und erreicht im Oktober ihren Höhepunkt, oft mit starken Ausreißern. Der Grund dafür ist, dass die täglichen Maximalpegel der Unterwarnow in diesen Monaten bereits häufig das reguläre Stauziel von 532 cm PNP erreichen und somit eine Überschreitung auslösen können (Abb. 5.10). Dabei liegen viele der Extremwerte mit mehr als einem Meter über dem Mittelwasserstand in der Größenordnung von Sturmfluten.

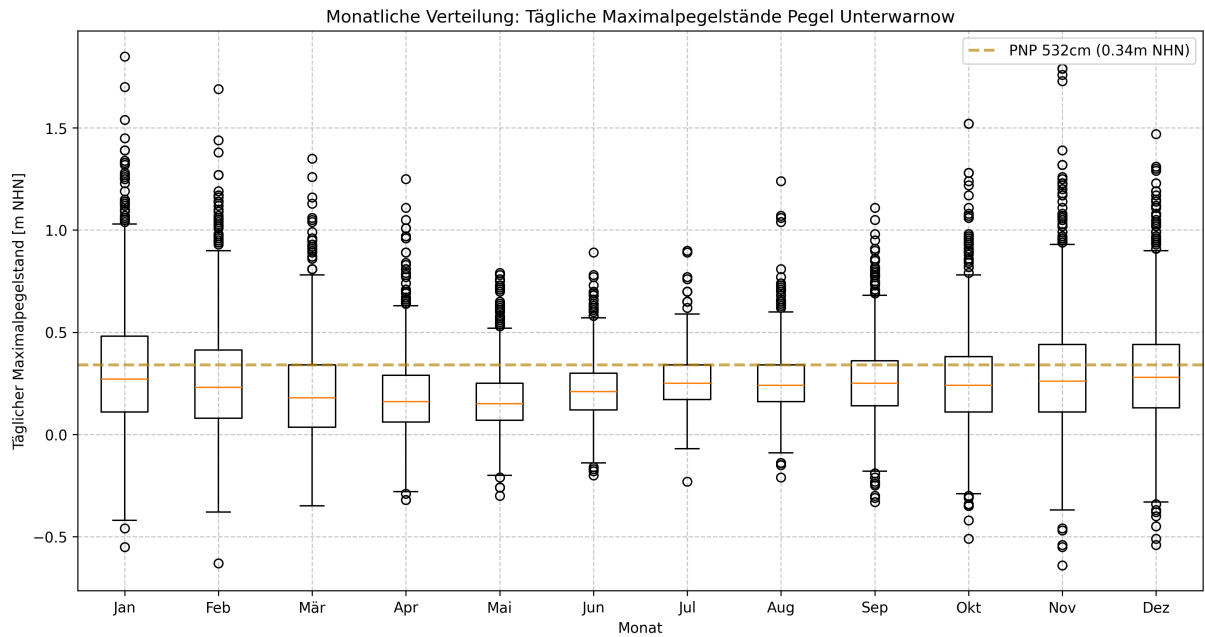


Abbildung 5.10: Tägliche Maximalpegel der Unterwarnow mit Markierung des regulären Stauziels

Gleichzeitig ist der Abfluss der Oberwarnow im vorhandenen Datensatz noch nicht auf das Niveau der Wintermonate angestiegen (Abb. 5.11). Dadurch ist die Reaktionsfähigkeit des Oberwarnow-Pegels noch begrenzt.

Mit den zunehmenden Abflüssen in den Monaten von November bis Februar verkürzt sich die Dauer der Überschreitungseignisse wieder, obwohl die Pegel der Unterwarnow weiterhin hoch bleiben. Situationen, in denen starke und lang andauernde erhöhte Wasserstände der Unterwarnow mit geringem Abfluss der Oberwarnow zusammenfallen, sind also vor allem im Monat Oktober zu erwarten.

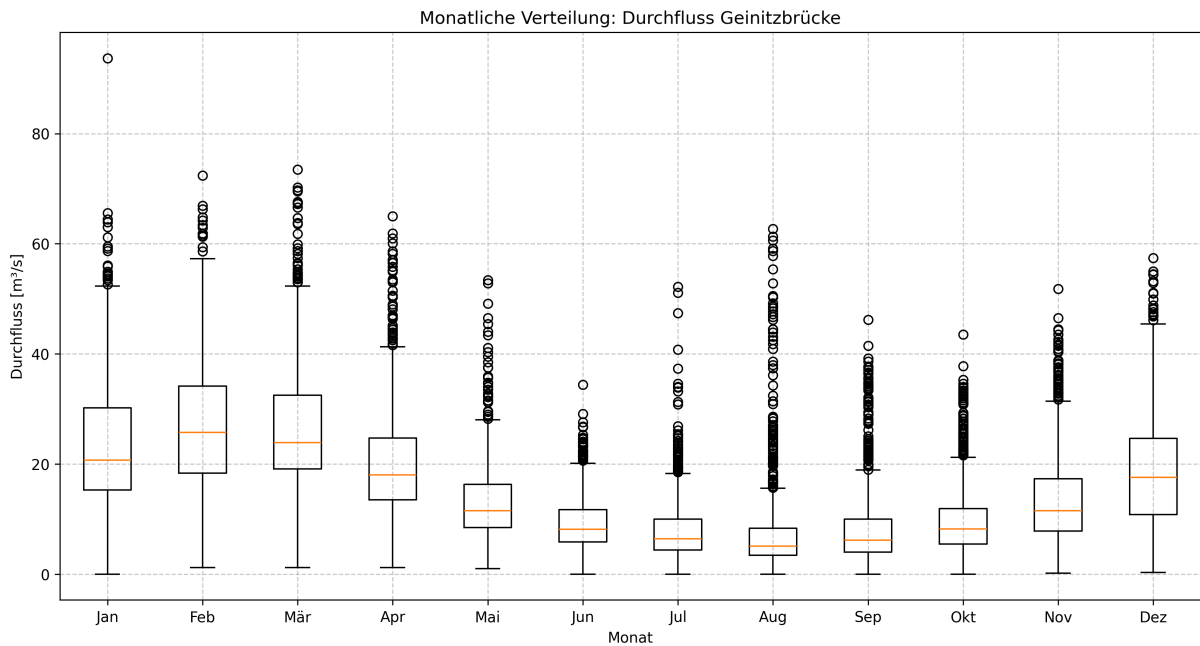


Abbildung 5.11: Durchfluss der Oberwarnow nach Monaten

5.4 Handlungsempfehlungen

Um die Anzahl und Intensität der vorhandenen Salzwassereinbrüche in die Oberwarnow zu reduzieren und das Risiko eines erneuten Salzwassereinbruchs im Wasserwerk zu minimieren, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Diese reichen von Anpassungen der Steuerung vorhandener Infrastruktur bis zu baulichen Maßnahmen.

5.4.1 Überprüfung des Bleicherwehrs

Da das Bleicherwehr, wie in 5.1 gezeigt, als Haupteintragspunkt des salzhaltigen Wassers in die Oberwarnow betrachtet werden kann, sollte hier eine umfassende Überprüfung des Wehres stattfinden. Da das Wehr, wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, auch im geschlossenen Zustand Wasser aus der Unterwarnow in die Oberwarnow gelangen lässt, ist zu überprüfen, ob das Wehr strukturelle Mängel am Baukörper aufweist.

Außerdem sollte die Wehrsteuerung überprüft werden. Bei einem Schriftverkehr des StA-LU MM mit der Stadt Rostock vom 10.10.2023 wurden für die Wehrstellung bei erhöhten Pegelständen der Unterwarnow zwei relevante Steuerungskriterien genannt. Erstens schließt das Bleicherwehr, wenn die Pegelmessung der Unterwarnow keine Messwerte liefert. Diese Regel wirkt im Fall eines Hochwassers als Sicherung, um bei einem Ausfall der Pegeldata trotzdem die Schutzwirkung des Wehrs zu erhalten. Zweitens schließt das

Bleicherwehr dann, wenn der Pegel der Unterwarnow den der Oberwarnow überschreitet. Für die Zielsetzung, die Oberwarnow vor Salzwassereinträgen zu schützen, ist diese Regelung konzeptionell fehlerhaft und greift systematisch zu spät. Um einen Rückfluss von der Unter- in die Oberwarnow zuverlässig zu verhindern, müsste das Wehr bereits bei Erreichen des hydrostatischen Gleichgewichts geschlossen sein, da ab diesem Punkt die Rückströmung einsetzt. Das hydrostatische Gleichgewicht ist bei gleichem Salzgehalt von Ober- und Unterpegel bei gleichen Pegelständen erreicht. Für den Fall, dass in der Unterwarnow ein höherer Salzgehalt vorherrscht, erhöht dies auch die Dichte des Wassers im Vergleich zur Oberwarnow, weshalb das hydrostatische Gleichgewicht in diesem Fall schon erreicht wird, bevor der Pegel der Unterwarnow den Pegel der Oberwarnow erreicht. Die aktuelle Logik führt in beiden Fällen zu einer verzögerten Schließung und lässt somit einen unerwünschten Rückfluss zu, dessen Dauer direkt von der zeitlichen Auflösung der Pegelmessung abhängt.

Ein weiteres Defizit der Steuerung zeigt sich bei oszillierenden Pegelständen. Da die Regel eine Öffnung des Wehrs bereits bei gleichen Pegeln der Unter- und Oberwarnow impliziert, kommt es bei Pegelschwankungen der Unterwarnow um den Pegel der Oberwarnow zu einem wiederholten Öffnen und Schließen. Dieser Effekt verstärkt das Problem des verspäteten Schließens und führt zu einem wiederholten Wassereintrag in die Oberwarnow. Eine Möglichkeit, das System zu stabilisieren und dieses unerwünschte Verhalten zu verhindern, ist die Implementierung einer Mindestpegeldifferenz für den Steuerungsvorgang.

5.4.2 Anhebung des Stauziels

Wie in 5.3 beschrieben wurde, ist der Ausgangspegel der Oberwarnow ein wichtiger Faktor für das Auftreten und die Dauer von Überschreitungsereignissen der Unterwarnow. Im Gegensatz zu Durchfluss der Oberwarnow und Pegel der Unterwarnow lässt sich dieser Faktor gut steuern. So finden bei Trockenheit aktuell schon anlassbezogene Stauzielanhebungen in den Sommermonaten statt, um Reserven für die Trinkwasserversorgung vorzuhalten. Dabei wird das Stauziel auf 540 cm PNP angehoben, was 0,42 m NHN entspricht. Eine zusätzliche Anhebung des Stauziels auf das von Schülke (2023) als umsetzbar ermittelte Maximum von 550 cm PNP, also 0,52 m NHN, kann in den besonders gefährdeten Monaten September bis November einen zusätzlichen Schutz gegen das Eindringen von Brackwasser in die Oberwarnow bieten.

Das reguläre Stauziel sollte ebenfalls angepasst werden. Diese Anpassung sollte dynamisch dem Meeresspiegelanstieg folgen, um die aktuelle Schutzwirkung gegenüber erhöhten Wasserständen beizubehalten. Da die Unterwarnow mit etwa 2,8 cm pro Dekade ansteigt, sollte dies als Richtwert für die dynamische Anhebung gelten. Dabei kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dass bei stark erhöhten Pegeln der Unterwarnow die Pegel der Oberwarnow überschritten werden, aber die Dauer der Überschreitungsereignisse kann so reduziert werden.

5.4.3 Anpassung im Stichkanal

Der Stichkanal zum Wasserwerk Rostock ist nur über den Zulauf mit der Warnow verbunden (vgl. 2.3). Dadurch kann Wasser nur über das Wasserwerk aus dem Kanal gefördert werden. Während das unter normalen Umständen unproblematisch ist, kann bei Salzeinbrüchen eingetretenes Wasser nicht gesondert aus dem Kanal gefördert werden. Eine Möglichkeit, diesen Risikofaktor zu vermindern, wäre, eine ausreichend groß dimensionierte Verbindung von Entnahmbauwerk 2 zu einem bereits vorhandenen Spülgraben (Abb. 3.1) zu schaffen. Aktuell kann über eine vorhandene Leitung etwa 200 m³/h aus dem Stichkanal in die Warnow nördlich der Geinitzbrücke geleitet werden. Diese neu dimensionierte Verbindung soll ermöglichen, das Entnahmbauwerk 2 zu nutzen, um größere Mengen Wasser in kurzer Zeit aus dem Stichkanal in den Spülgraben zu fördern. So wird ein ausreichender Abfluss des Wassers aus dem Stichkanal ermöglicht. Dadurch kann bei eindringendem Wasser mit erhöhter Leitfähigkeit, aber auch bei anderen möglichen Verunreinigungen des Rohwassers eine verbesserte Handlungsfähigkeit am Wasserwerk hergestellt werden.

6 Fazit

Ziel dieser Arbeit ist es, die verursachenden Umstände des Salzwassereintruchs am Wasserwerk Rostock zu untersuchen. Dabei wurden mit eigenen Messungen der Leitfähigkeit und einer Analyse vorhandener Pegeldata die Situationen analysiert, zu denen die Unterwarnow höher stand als die Oberwarnow und damit eine Rückströmung aus der Unterwarnow in die Oberwarnow ermöglicht wurde. Die Analyse der Pegeldata zeigt dabei eine zunehmende jährliche Dauer, zu der diese Bedingungen für eine Rückströmung in die Oberwarnow gegeben ist. In Verbindung mit der am Freibad gemessenen Leitfähigkeit konnte zudem gezeigt werden, dass für den Messzeitraum alle Überschreitungsereignisse mit einer maximalen Pegeldifferenz von 15 cm oder mehr eine Erhöhung der Leitfähigkeit an der Messstelle Freibad nach sich zogen.

Als Haupteintragspfad konnte das Bleicherwehr ermittelt werden, wo Leitfähigkeitsmessungen auf beiden Seiten des Wehres ergaben, dass auch im geschlossenen Zustand eine Erhöhung der Leitfähigkeit im Gerberbruch infolge des ansteigenden Pegels der Unterwarnow zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit im Bleichergraben führte. Das zeigt eine mangelhafte Schutzwirkung durch dieses Wehr. Während einer Sturmflut konnte die Ausbreitung des einströmenden salzhaltigen Wassers in der Oberwarnow beobachtet werden. Dabei bildete sich eine ausgeprägte Schichtung an der Gewässersohle aus. Der Ort der höchsten Leitfähigkeit war das Bleicherwehr, was dessen Rolle als Haupteintragspunkt salzhaltigen Wassers stützt.

Als die jährliche Phase mit der größten Gefährdung durch Überschreitungsereignisse wurden die Monate September bis November ermittelt. In dieser Zeit führen steigende Maximalpegel in der Unterwarnow und noch auf Sommerniveau befindliche Abflüsse der Oberwarnow zu den größten Monatssummen der Überschreitungsdauer.

Die hier ermittelten Gefährdungsfaktoren für die Rohwasserqualität des Wasserwerks Rostock können unter anderem durch Maßnahmen am Bleicherwehr verringert werden. Dabei sollten sowohl die Bausubstanz als auch die Steuerung überprüft und angepasst werden. Eine Anhebung des Stauziels der Oberwarnow kann zudem die Dauer der Überschreitungsereignisse verringern, die ein Eindringen von salzhaltigem Wasser erst möglich machen.

Literatur

- Barke, Falko (2000). „Untersuchungen zum Einfluß der Wasserstände am Mühlendammwehr auf die Rohwasserqualität des Wasserwerks Rostock“. Diss. Rostock: Universität Rostock.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH (2023). *Pegelinformationen Pegel Rostock*. URL: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Ostsee/_Anlagen/Downloads/Rostock.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (besucht am 11.06.2025). [BSH, 2023].
- Bundesministerium für Gesundheit (2023). *Trinkwasserverordnung: TrinkwV*. [TrinkwV].
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2010). *Technische Regeln Wasseraufbereitung (TRWA) - Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung*. Bonn. [DVGW W 202 (A)].
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2021). *Grundsätze der Rohwasseruntersuchung*. Bonn. [DVGW W 254 (A)].
- Dieterich, Christian und Hagen Radtke (2024). „Higher quantiles of sea levels rise faster in Baltic Sea Climate projections“. In: *Climate Dynamics* 62.5, S. 3709–3719. DOI: 10.1007/s00382-023-07094-x.
- Engelke, Paul (2007). „Auswertung der Häufigkeit des Auftretens von Hoch- und Niedrigwasser in der Unterwarnow und Abschätzung möglicher Tendenzen einschließlich dazugehöriger Pegelstände auf der Grundlage der Messdaten des BSH“. Diss. Rostock: Universität Rostock.
- EURAWASSER (2003). *Alles fließt ... Vom Rostocker Bornwasser bis EURAWASSER*. 1. Aufl. Rostock: Verlag Riedeck & Schade GmbH.
- Hanse- und Universitätsstadt Rostock, Hrsg. (2021). *Fachbeitrag Wasserrahmenrichtlinie: Neubau Warnowbrücke in Rostock*. Rostock. URL: https://rathaus.rostock.de/media/rostock_01.a.4984.de/datei/warnowbruecke_u19_umweltfachliche_untersuchungen_wrrl.pdf (besucht am 28.04.2025).
- Hanse- und Universitätsstadt Rostock (2022). *Beschlussvorlage - 2022/BV/3800*. URL: <https://ksd.rostock.de/bi/vo020?VOLFDNR=1023476&refresh=false&TOLFDNR=7180532> (besucht am 21.07.2025).
- Hayashi, Masaki (2004). „Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion“. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 96.1, S. 119–128. DOI: 10.1023/B:EMAS.0000031719.83065.68.
- Jüpner, Robert und Alexandra Schüller (2025). „Hochwasser: Typen, Ursachen, Ausprägung, Folgen“. In: *Operativer Hochwasserschutz*. Hrsg. von Robert Jüpner und Alexandra Schüller. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 13–25. DOI: 10.1007/978-3-658-46760-9_2.
- Kreibich, Heidi, Philip Bubeck, Michael Kunz, Holger Mahlke, Stefano Parolai, Bijan Khazai, James Daniell, Tobia Lakes und Kai Schröter (2014). „A review of multiple natural hazards and risks in Germany“. In: *Natural Hazards* 74.3, S. 2279–2304. DOI: 10.1007/s11069-014-1265-6.
- Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (2021). *Aktualisierung des Bewirtschaftungsplans nach § 83 WHG bzw. Artikel 13 der Richtlinie 2000/60/EG für die Flussgebietseinheit Warnow/Peene für den Zeitraum von 2022 bis 2027*.

- Miegel, Konrad, Dirk Wenzel, Hartmut Eckstädt und Ute Stiele (1999). „Bestimmung des Abflusses im rückgestauten Bereich der Warnow“. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 43.5, S. 241–248.
- Niedrig, Heinz und Martin Sternberg (2022). „Elektrische Leitungsmechanismen“. In: *HÜTTE Band 1: Mathematisch-naturwissenschaftliche und allgemeine Grundlagen für Ingenieure*. Hrsg. von Manfred Hennecke und Birgit Skrotzki. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 487–539. DOI: 10.1007/978-3-662-64369-3_17.
- Nordwasser GmbH (2025). *Wasserwerk Rostock*. URL: <https://www.nordwasser.de/trinkwasser/versorgung/wasserwerk-rostock-1> (besucht am 13.05.2025).
- Schülke, Tom Marek (2023). „Untersuchungen zur Stauzielanhebung am Mühlendammwehr zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Rostock“. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock.
- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (2023). *Durchfluss Geinitzbrücke*. [StALU MM].
- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (2025). *Durchfluss Geinitzbrücke*. [StALU MM].
- Statistisches Bundesamt (2018). *Pressemitteilung Nr. 451 vom 21. November 2018*. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_451_322.html (besucht am 01.08.2025).
- Taherkhani, Mohsen, Sean Vitousek, Patrick L. Barnard, Neil Frazer, Tiffany R. Anderson und Charles H. Fletcher (2020). „Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency“. In: *Scientific Reports* 10.1, S. 6466. DOI: 10.1038/s41598-020-62188-4.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2025a). *Pegel Oberwarnow*. Hrsg. von Pegelonline. URL: <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=9640002>. [WSV, 2025b].
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2025b). *Pegel Ostsee*. Hrsg. von Pegelonline. URL: <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=9640015> (besucht am 16.05.2025). [WSV, 2025c].
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2025c). *Pegel Unterwarnow*. Hrsg. von Pegelonline. URL: <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=9640018> (besucht am 16.06.2025). [WSV, 2025a].
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (o. D.). *Pegel Unterwarnow*. Hrsg. von Bundesanstalt für Gewässerkunde. [WSV].

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Dazu habe ich keine außer den von mir angegebenen Hilfsmitteln und Quellen verwendet und die den benutzten Werken inhaltlich und wörtlich entnommenen Stellen habe ich als solche kenntlich gemacht. Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Fassung mit den gedruckten Exemplaren übereinstimmt.

Rostock, den 07.08.2025

Paul Gärtner

A Anhang

A.1 Grafiken

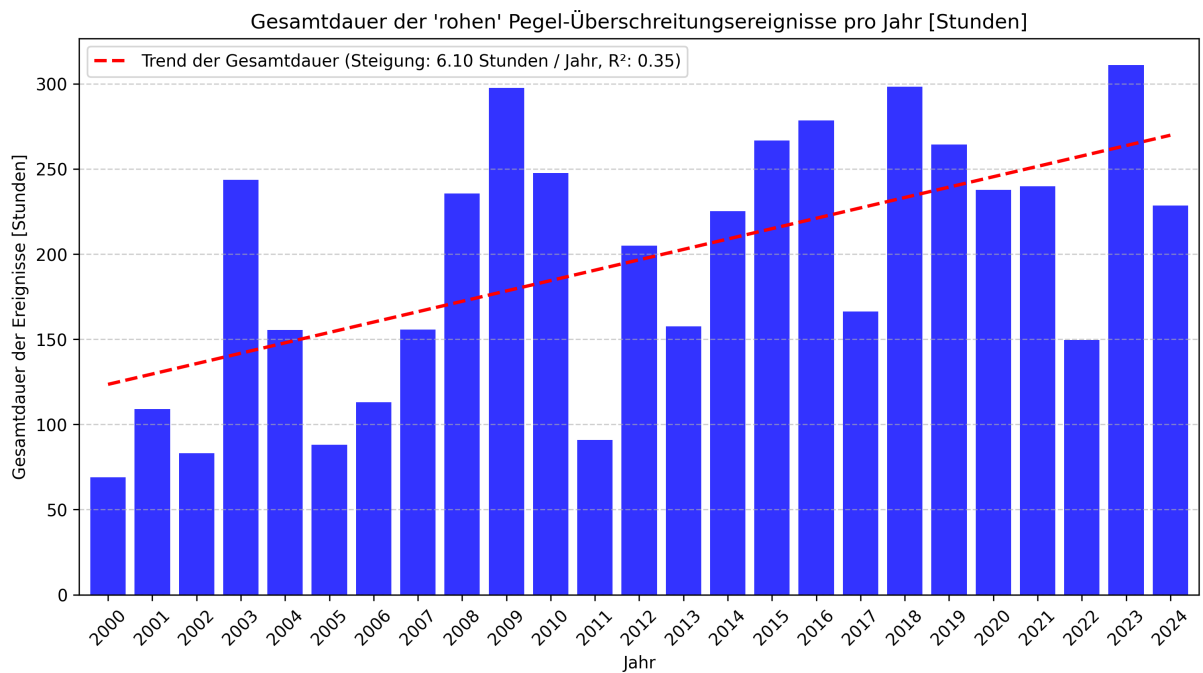


Abbildung A.1: Entwicklung der jährlichen Gesamtdauer der Überschreitungsereignisse ohne Zusammenfassung von mehreren Ereignissen

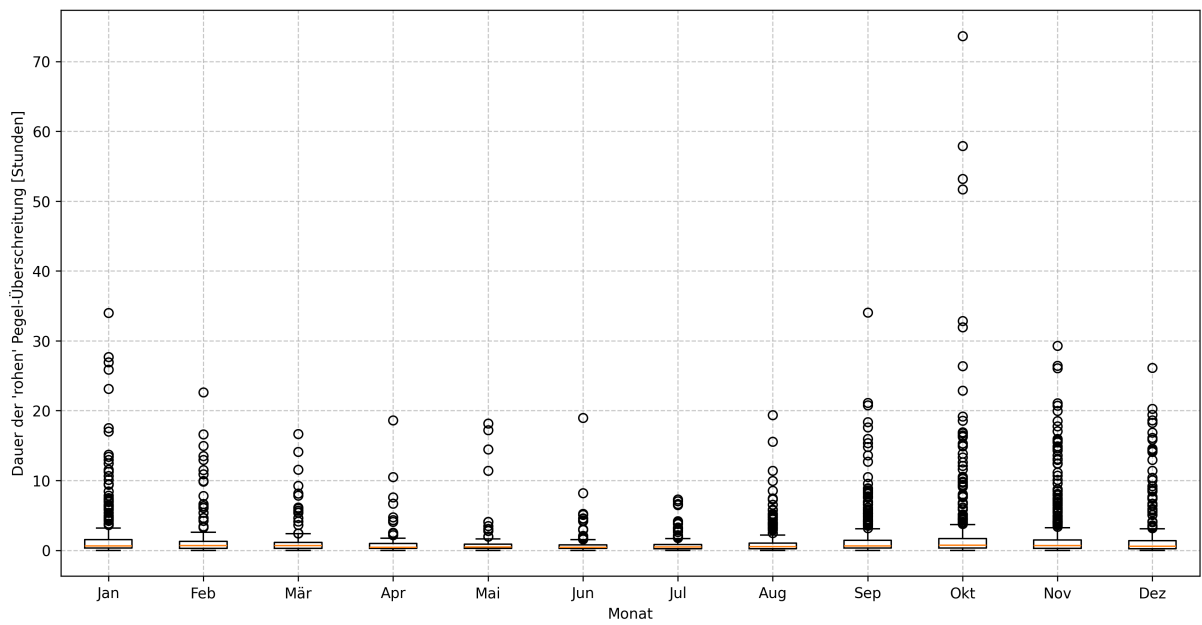


Abbildung A.2: Monatliche Verteilung der Dauer von Überschreitungsereignissen ohne Zusammenfassung von mehreren Ereignissen

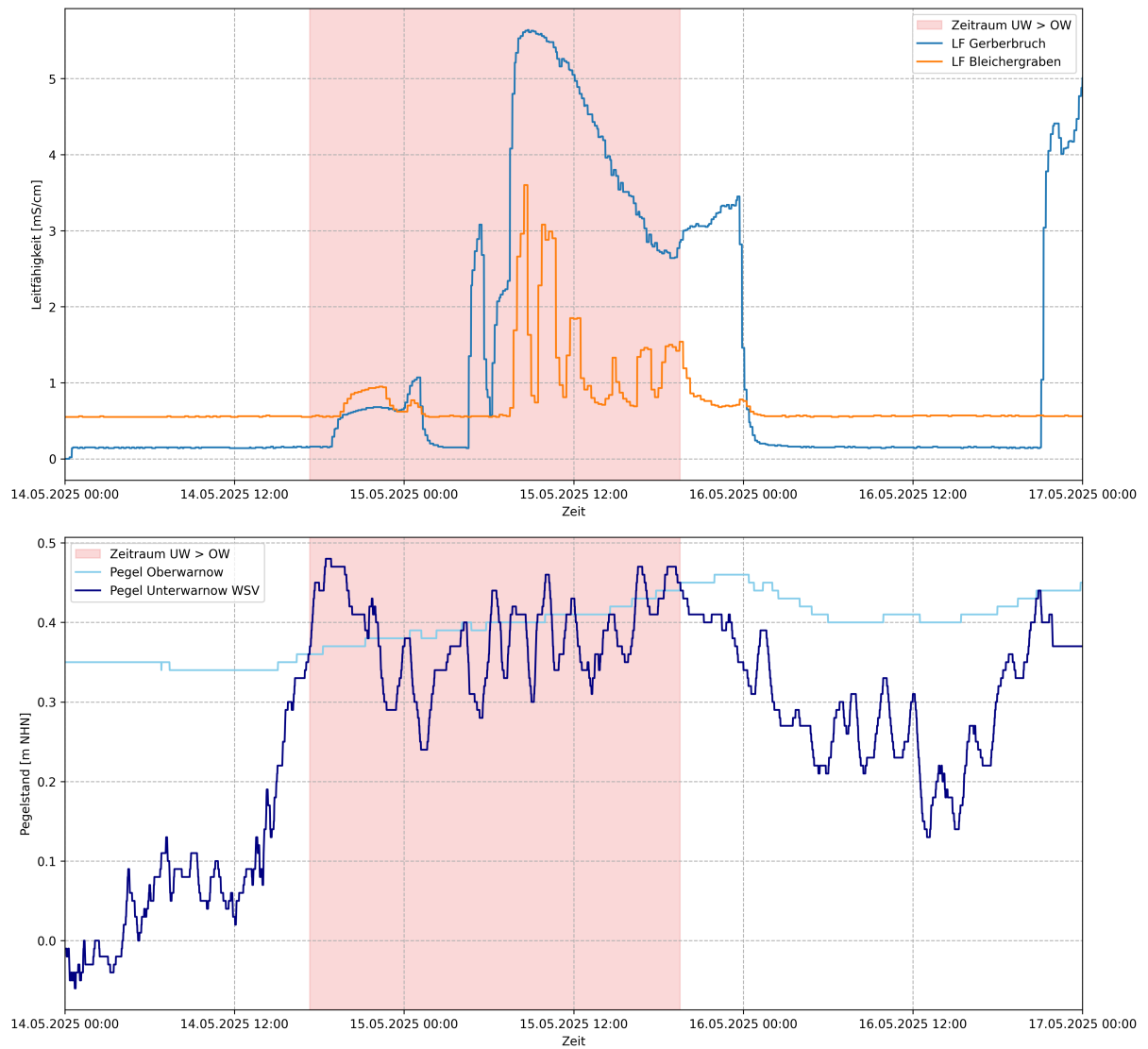


Abbildung A.3: Leitfähigkeit in Gerberbruch und Bleichergraben während eines Überschreitungserreignisses mit Pegelverlauf bei oszillierenden Pegelständen

A.2 Digitaler Anhang

Der digitale Anhang ist folgendermaßen gegliedert:

```
Digitaler Anhang
├── scripts
│   ├── main.py
│   ├── config.py
│   ├── data_loader.py
│   ├── event_analysis.py
│   ├── plotting_utils.py
│   ├── requirements.txt
│   ├── LF_Darstellung.py
│   └── Data
```

| Name | Quelle |
|---|----------------------------|
| Daten_Salzeinbruch_WW.csv | Nordwasser |
| Durchfluss_Warnow _5min_20021101_20250501.csv | StALU MM |
| Durchfluss_Warnow _Tagesmittel_19881101_20230331 | StALUM MM |
| Leitfaehigkeit_Bleichergraben _20250501_20250626.csv | Messstelle am Bleicherwehr |
| Leitfaehigkeit_Ereignis_20241128.csv | Ereignisabhängige Messung |
| Leitfaehigkeit_Freibad _20240701_20250201.csv | Nordwasser |
| Leitfaehigkeit_Gerberbruch _20250501_20250626.csv | Messstelle Bleicherwehr |
| Pegel_Oberwarnow _20000101_20250516.json | WSV |
| Pegel_Oberwarnow _20250517_20250626.json | WSV |
| Pegel_Ostsee_20000101_20250516.json | WSV |
| Pegel_Unterwarnow _19721101_19911031.csv | Engelke 2007 |
| Pegel_Unterwarnow _19911101_19991231.csv | WSV |
| Pegel_Unterwarnow _20000101_20250516.json | WSV |
| Pegel_Unterwarnow _20250517_20250626.json | WSV |

Tabelle A.1: Inhalt des „Data“-Verzeichnisses