

Analyse von Salzgehaltsänderungen nach Fahrwasserausbauten in Ästuarien mit Künstlichen Neuronalen Netzen

Cordula Berkenbrink und Hans Dieter Niemeyer

Zusammenfassung

Fahrwasserausbauten in Ästuarien bewirken erstrangig Veränderungen des Tideregimes und nachfolgend auch die des Salzeintrags nach oberstrom. Diese potenziellen Auswirkungen werden in Umweltverträglichkeitsprüfungen untersucht, deren Ergebnisse hinsichtlich ihrer Verlässlichkeit durch Beweissicherung überprüft werden. Nachdem Ausbau des Fahrwassers in der Außenweser wurden entsprechend u. a. Messungen der Salzgehalte vorgenommen. Da die Daten Indizien für Änderungen des Salzgehalts aufzeigten und deren umfassende Quantifizierung mit Methoden wie nichtlinearer Regression fehlschlugen, wurden Analysen mit Hilfe Künstlicher Neuronaler Netze (KNN) ausgeführt. Damit konnten die Salzgehalte jeweils vor und nach dem Ausbau mit hoher Qualität reproduziert werden. Es zeigte sich weiterhin, dass mit dem Künstlichen Neuronalen Netz, das mit den Daten vor dem Ausbau trainiert worden war, für die nach dem Ausbau gewonnenen Daten keine entsprechende Übereinstimmung erreichbar war. Die dabei erkennbar werdenden Differenzen ermöglichen eine belastbare Quantifizierung ausbaubedingter Änderungen ästuariner Salzgehalte und geben Hinweise für die Optimierung zukünftiger Umweltverträglichkeitsuntersuchungen.

Schlagwörter

Tide, Salzgehalt, Ästuarien, Fahrwasserausbauten, Künstliche Neuronale Netze (KNN)

Summary

Deepening of estuarine waterways effects primarily changes of tidal water levels and secondarily that of tidal volumes and salt intrusion. These effects are subject of Environmental Impact Assessments which results are often checked by afterward monitoring for preservation of evidence. After the deepening of the waterway in the Outer Weser estuary, among others such measurements were carried out for salinity. The data indicated alterations of salt intrusion into the Weser estuary, but a reliable quantification of the changes by conventional procedures like e. g. nonlinear regression analysis failed. However, tests with Artificial Neural Networks (ANN) provided reliable results for the respective data sets gained before and after the waterway deepening. Whereas the application of the ANN which was trained with a fraction of the data gained before the deepening provided a sustainable reproduction of the whole data set, these ANN mismatched with the data gained after deepening. These differences provide a basis for a reliable determination of the increasing salt intrusion into the Lower Weser estuary due to the deepening of the waterway.

Keywords

tide, salinity, artificial neural network (ANN), estuary, waterway deepening

Inhalt

1	Einleitung	164
2	Untersuchungsgebiet und Datengrundlage	165
3	Methoden	165
4	Analysen mit Künstlichen Neuronalen Netzen	168
4.1	Bremerhaven.....	168
4.2	Nordenham.....	170
4.3	Strohauser Plate.....	172
4.4	Brake.....	174
5	Bewertung der Methoden.....	176
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	177
7	Schriftenverzeichnis.....	179

1 Einleitung

Häfen für die Großschifffahrt befinden sich häufig an Tideästuarien, da dort sowohl die erforderlichen Wassertiefen als auch Anschlüsse an Verkehrsverbindungen ins Binnenland vorhanden sind, insbesondere auch an die Binnenschifffahrt. Auf Grund der zunehmenden Größe von Schiffen und ihres Tiefgangs mussten die Schifffahrtsstraßen entlang der Ästuarien wiederholt vertieft und teilweise auch verbreitert werden, was zwangsläufig zu Änderungen der Hydro- und Morphodynamik führte. Eine solcher Auswirkungen ist ein verstärkter Salzeintrag in die Ästuarien, der sowohl für die Lebensräume von Tieren und Pflanzen als auch für die landwirtschaftliche Nutzung des Wassers der Ästuarie und ihrer Nebengewässer für Nutztiere oder -pflanzen Folgen haben kann.

Das Planungsrecht verlangt für große Infrastrukturvorhaben Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit. Sofern deren Ergebnisse nur eine unsichere Grundlage für eine verlässliche und angemessene Bewertung liefern, hat die Planfeststellungsbehörde die Möglichkeit, zur Feststellung tatsächlicher Folgewirkungen eines Vorhabens dessen Träger ein Beweissicherungsverfahren aufzuerlegen.

Dieser Weg wurde 1997 von der Planfeststellungsbehörde für den Ausbau der Außenweser gewählt. Insbesondere für die Hydro- und Morphodynamik wurden ein umfassendes Messprogramm und eine entsprechende Datenanalyse im Planfeststellungsbeschluss vorgegeben. Teil des Programms waren unter anderem, Messungen des Salzgehalts an mehreren Messstationen im Weserästuar (Abb. 1) zur Ermittlung eines etwaigen Anstiegs des Salzeintrags in das Ästuar und eine Quantifizierung der Ausbaufolgen.

Die entsprechenden Untersuchungen vom Vorhabenträger ergaben keine Hinweise auf signifikante Veränderungen des Salzeintrags ins Ästuar (WSA BREMERHAVEN 2010). Auf Grund der Interessen des Bundeslandes Niedersachsen erfolgte eine erneute

Bewertung mittels nichtlinearer Regressionsanalysen durch die Forschungsstelle Küste. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wiesen auf bedeutende Veränderungen der Salzgehalte im Ästuar als Folge der Fahrrinnenvertiefung hin, ohne dass – insbesondere für den Bereich niedrigerer und höherer Salzgehalte – eine belastbare Quantifizierung der ausbaubedingten Änderungen möglich war. Um diese Schwäche zu beheben, wurden die Daten erneut mit Künstlicher Neuronalen Netzen erfolgreich analysiert, womit eine zuverlässige Ermittlung veränderter Salzgehalte im Weserästuar als Folge des Ausbaus der Außenweser ermöglicht wurde.

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von der Außenweser, wo der eigentliche Ausbau des Fahrwassers stattgefunden hat, bis nach Intschede oberhalb der künstlichen Tidegrenze am Wehr Bremen-Hemelingen. Im Weserästuar sind seit 1887 wiederholt Fahrwasserausbauten in unterschiedlicher Intensität vorgenommen worden (WETZEL 1988; Niemeyer et al. 1996), die zu erheblichen Veränderungen von Tidemittelwasser, -scheiteln und -hub sowie des Staus von Sturmfluten geführt haben (NIEMEYER 2015). Im Gefolge der Ausbauten ist ebenfalls die Gewässertopografie und damit einhergehend die Zonierung der Habitate einem nachhaltigen Wandel unterworfen worden (ELSEBACH et. al. 2017). Für den Ausbau der Außenweser auf SKN -14 m wurden in der Beweissicherung die Salzgehalte an den Stationen Bremerhaven, Nordenham, Strohauser Plate und Brake (Abb. 1) erfasst.

Für die Untersuchung potentieller Änderungen sind je Station zwei Datensätze für den Salzgehalt verfügbar (WSA BREMERHAVEN 2010). Der erste Datensatz enthält die Zeitreihe von 1997-1998 vor Beginn der Baggerungen und umfasst somit von der Vertiefung unbeeinflusste Salzgehalte. Die zweite Zeitreihe beginnt im Jahr 2006 nach erfolgtem Ausbau; dessen Messwerte enthalten somit potenzielle Ausbauwirkungen.

3 Methoden

Künstliche neuronale Netze (KNN) können ähnlich wie das Gehirn von Säugetieren durch Parallelverarbeitung Muster in Daten erkennen und deren funktionale Zusammenhänge näherungsweise erfassen. Sie bestehen aus vielen einzelnen Einheiten, den Neuronen, die miteinander über arithmetische Funktionen verbunden sind. Durch gerichtete Verbindungen zueinander können die Neuronen sich gegenseitig aktivieren, wodurch die Informationsverarbeitung erfolgt.

Für die Quantifizierung der Veränderung des Salzgehalts wurde ein Perzeptron gewählt (BERKENBRINK und NIEMEYER 2011), das zu den vorwärtsgetriebenen künstlichen neuronalen Netzen gehört (Multilayer-Feed-Foward-Network) (STRECKER 1997; DEMUTH ET AL. 2010). Bei diesem KNN werden die Neuronen nacheinander in mehreren Schichten angeordnet und in nur eine Richtung verknüpft. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Neuronen werden durch individuell festgelegte Wichtungen erfasst. Sie bilden die Kopplung zwischen den Neuronen und werden so lange modifiziert bis das KNN einen funktionalen Zusammenhang abbilden kann. Da Neuronen auch nichtlinear aktiviert werden können, kann das KNN auch nichtlineare Zusammenhänge erkennen.

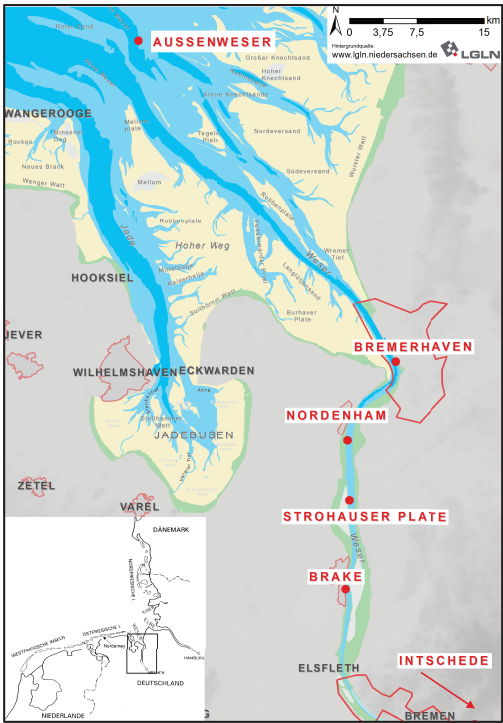


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet Weserästuar mit Lage der Messstationen.

Die Neuronen in der Eingabeschicht erhalten sämtliche Informationen über die Eingangsparameter. Die Neuronen in der Ausgabeschicht beinhalten die Ergebnisse. Zwischen diesen Schichten befinden sich versteckte Schichten, in denen die Informationsverarbeitung beziehungsweise der Lernprozess stattfindet (Abb. 2).

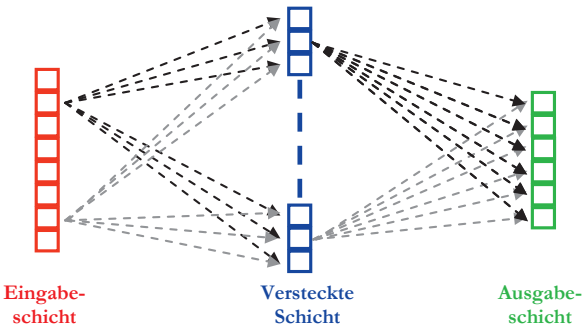


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus künstlicher neuronaler Netze.

Das für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand gewählte Verfahren wird als überwachtes Lernen bezeichnet. Dabei wird die Ausgabeschicht mit den gemessenen Datensätzen verglichen; die Neuronen in der versteckten Schicht und die Parameter der funktionalen Verbindungen zwischen allen Neuronen werden dahingehend verändert, dass die

Ausgabeschicht sich den gemessenen Datensätzen zunehmend annähert. Nach diesem Prozess werden die Werte für die versteckten Neuronen und die Verbindungen fixiert, woraufhin das KNN in der Lage ist, Daten ähnlicher Vorgänge zu berechnen.

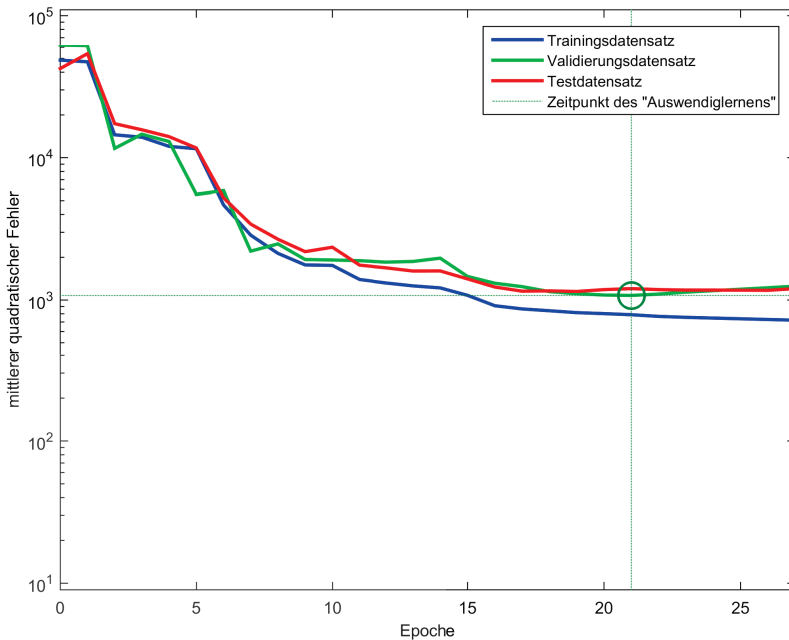


Abbildung 3: Schema des Trainings eines KNN in Kombination mit Validierung und Test.

Um Allgemeingültigkeit der mit einem KNN erzielten Ergebnisse zu gewährleisten, werden die Daten in drei Gruppen aufgeteilt: 70 % der Daten werden für das eigentliche Training herangezogen, um die Neuronen und die Verbindungen des KNN anzupassen. Weitere 15 % der Datensätze dienen der Validierung. Um zu vermeiden, dass das KNN den Datensatz „auswendig lernt“, wird das Training des KNN mit Hilfe des Validierungsdatensatzes überwacht. Während des Trainings wird der mittlere quadratische Fehler zwischen der Zielgröße und dem Ergebnis für jede Trainingsepoche berechnet. Dasselbe geschieht mit dem Validierungsdatensatz. Während der mittlere quadratische Fehler des Trainingsdatensatzes nach jeder Epoche abnimmt, erreicht der Validierungsdatensatz den Punkt, an dem dieser Fehler größer wird. An diesem Punkt beginnt das „Auswendiglernen“ und folgerichtig wird das Training dann abgebrochen und das soweit optimierte KNN kann für vergleichbare Datensätze angewandt werden (Abb. 3).

Die Qualität des KNN wird hier anhand von Streudiagrammen überprüft (Abb. 4), mit denen die Qualität des Zusammenhangs zwischen berechneten und gemessenen Daten repräsentiert wird: Die Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Daten ist umso besser, je geringer die Daten um die Linie für die absolute Übereinstimmung streuen; sie entspricht der Winkelhalbierenden und wird im Folgenden als Referenzlinie bezeichnet. Als weiteres Qualitätskriterium wird eine Regression für die KNN-Ergebnisse vorgenommen; die Differenz von Regressionsfunktion und Referenzlinie ergänzt grafisch die Ergebnisse für das Streudiagramm.

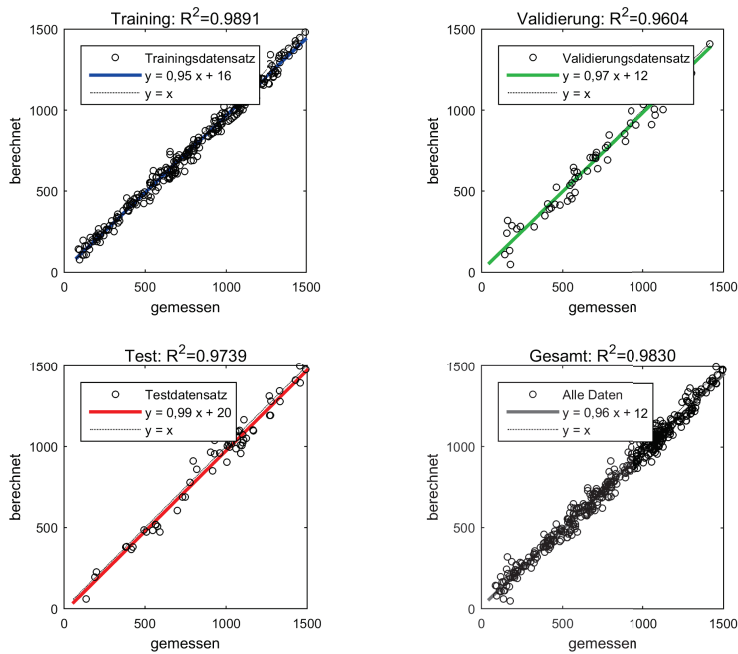


Abbildung 4: Ergebnisse eines optimierten KNN [0,01 ‰] (Beispiel: Station Bremerhaven).

Das KNN wird nach Abschluss der Trainingsphase auf andere Datensätze derselben Messstation unter vergleichbaren Bedingungen angewandt. Es berechnet den Salzgehalt wie beim Testdatensatz unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen: Salzgehalt, Tidenhub und Tidehochwasser in der Außenweser sowie Oberwassermenge in Intschede. Sie sind die wesentlichsten Eingangsparameter für den Salzgehalt im Ästuar. Saisonale Einflüsse, wie etwa Sturmfluten oder trockene Sommer sind damit implizit berücksichtigt. Die Topographie des Ästuars bleibt im KNN unberücksichtigt. Sollten sich signifikante Abweichungen zwischen den Ergebnissen des KNN mit Daten vor und nach dem Ausbau der Außenweser ergeben, so stehen damit quantitative Bewertungsgrundlagen für die Ausbaufolgen zur Verfügung.

4 Analysen mit Künstlichen Neuronalen Netzen

4.1 Bremerhaven

Der Datensatz aus dem Jahr 1998 für Bremerhaven deckt das Jahr nicht vollständig ab, sodass eine Analyse mit dem KNN saisonale Effekte nur unvollständig reproduziert. Von den verfügbaren Datensätzen wurden 70 % zum Training des KNN genutzt, die übrigen für die Validierung und zum Testen. Das KNN erzielt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Daten (Abb. 5). Die Streuung ist sehr gering und die Regressions- und Referenzlinie weisen eine nahezu exakte Übereinstimmung auf.

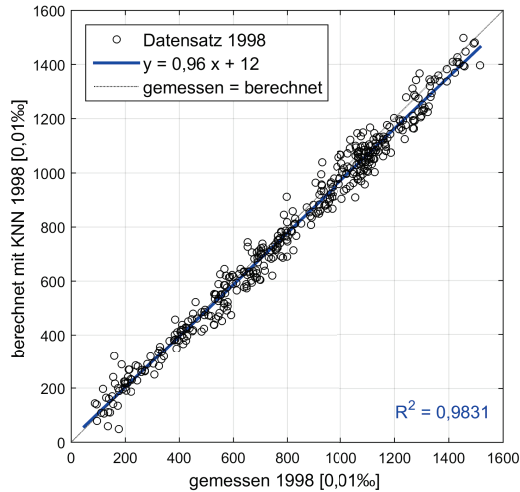


Abbildung 5: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionsgerade für die Daten der Station Bremerhaven von 1998, vor dem Ausbau.

Das KNN wird hiernach für die Berechnung der Salzgehalte nach dem Ausbau verwendet und die berechneten Werte mit den für die Jahre 2006-2008 verfügbaren Messwerten verglichen. Aus dem entsprechenden Streudiagramm geht deutlich hervor, dass die – mit dem für die Datensätze vor dem Ausbau erstellten KNN – berechneten Salzgehalte der Salzeintrag nach dem Ausbau – insbesondere zunehmend für den Bereich der höheren Werte – unterschätzt wird (Abb. 6). Daraus lässt sich folgern, dass sich seit den Messungen vor dem Ausbau im Jahr 1998, für die das KNN erstellt und optimiert wurde, die Salzgehaltsverhältnisse im Weserästuar bei Bremerhaven signifikant verändert haben. Offensichtlich hat sich durch den Ausbau der Außenweser eine erhebliche Veränderung im Prozess des Salzeintrags in das Ästuar ergeben. Physikalisch ist dieses Ergebnis völlig plausibel, aber erst die Analyse mittels KNN ermöglicht eine verlässliche Quantifizierung dieses Effekts.

Die Veränderungen sind weder konstant noch linear. Bis zu einem Wert von etwa 4 ‰ bleibt der Salzgehalt – wenn auch mit einer sehr hohen Streuung um die Referenzlinie – annähernd gleich wie vor dem Ausbau (Abb. 6). Oberhalb dieser Schwelle unterschätzt das –für die Verhältnisse vor dem Ausbau optimierte – KNN die Messwerte, was auf einen ausbaubedingten Anstieg der Salzgehalte schließen lässt, der nicht-linear mit wachsenden Salzgehalten zunimmt. Der Abstand zwischen den jeweiligen Regressionsgeraden für die KNN-Ergebnisse auf Basis der Daten von 1998 und dem Datensatz für den Zeitraum 2006 bis 2008 spiegelt das Maß der ausbaubedingten Veränderung des Salzeintrags wider (Abb. 7).

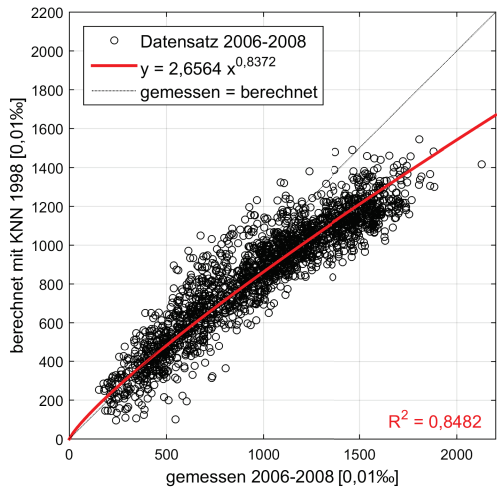


Abbildung 6: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionskurve für die Daten der Station Bremerhaven von 2006-2008, nach dem Ausbau.

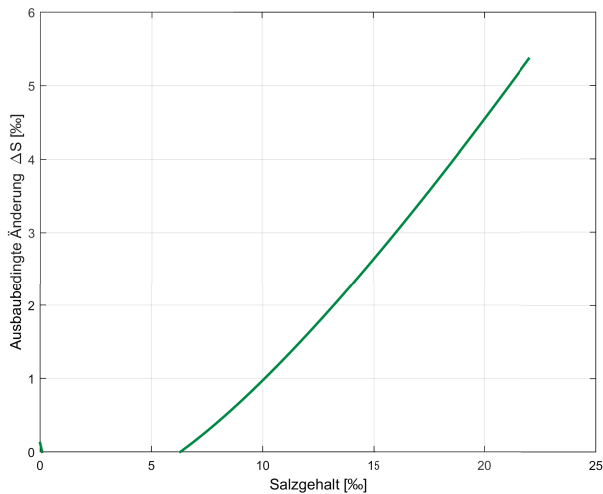


Abbildung 7: Ausbaubedingte Veränderungen der Salzgehalte an der Station Bremerhaven.

Für die gesamte Zeitreihe bedeutet das einen Unterschied von 1,1 ‰, wobei Salzgehalte oberhalb des Wertes von 12 ‰ Änderungen von 1,6 bis über 4,2 ‰ erreichen.

4.2 Nordenham

Für die Station Nordenham liegt mit 701 Werten die längste Zeitreihe für das Training vor, weshalb hier ein KNN trainiert werden kann, das auch sämtliche saisonalen Unterschiede einbezieht. Der Vergleich der gemessenen und mit dem KNN berechneten Werte zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 8), mit einer geringen Streuung um die Referenzlinie.

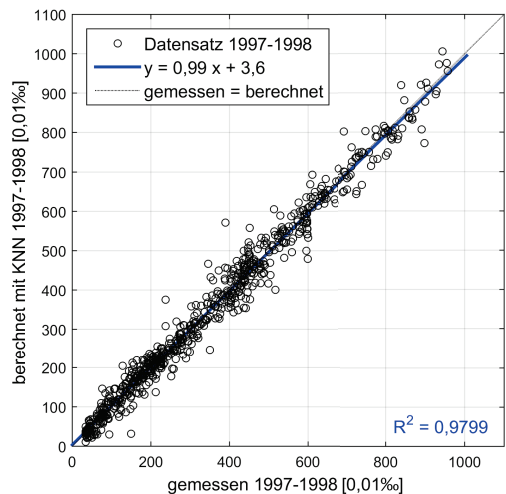


Abbildung 8: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionsgerade für die Daten der Station Nordenham von 1998, vor dem Ausbau.

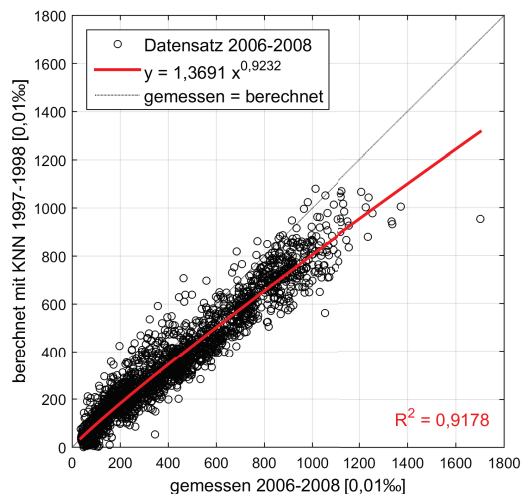


Abbildung 9: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionskurve für die Daten der Station Nordenham von 2006-2008, nach dem Ausbau.

Ähnlich wie bei den Ergebnissen für den Standort Bremerhaven weist das auf Grundlage des Datensatzes von 1998 trainierte KNN bei Anwendung auf den Datensatz 2006-2008 eine Unterschätzung der gemessenen Werte auf, die als Effekt des Ausbaus der Außenweser auf die lokalen Salzgehaltsverhältnisse anzusehen ist (Abb. 9). Für die gesamte Zeitreihe bedeutet das einen mittleren Unterschied von 0,73 ‰, wobei bei Salzgehalten über 10 ‰ Änderungen von 1,8 bis über 3,5 ‰ erfahren (Abb. 10).

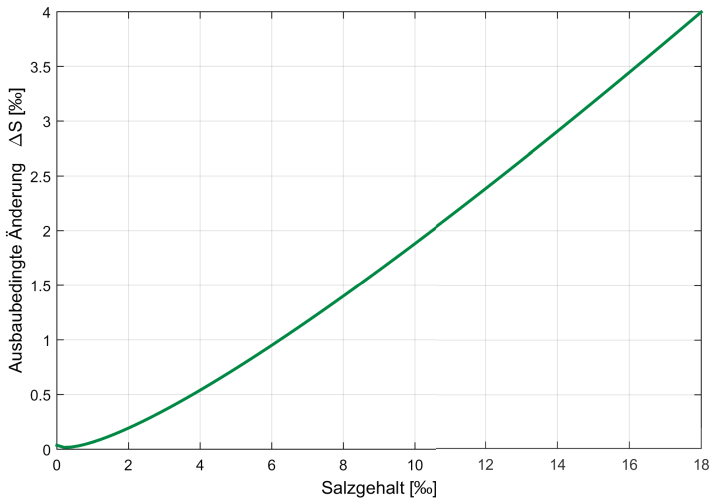


Abbildung 10: Ausbaubedingte Veränderungen der Salzgehalte an der Station Nordenham.

4.3 Strohauser Plate

Der Datensatz der Messstation Strohauser Plate vor dem Ausbau der Außenweser ist vom Umfang her mit dem Datensatz der Station Bremerhaven vergleichbar. Von den 484 Messwerten wurden 70 % zum Training des KNN herangezogen. Daher sind saisonale Effekte im KNN – ebenso wie bei den Daten der Station Bremerhaven – möglicherweise nicht umfassend einbezogen worden. Allerdings produziert das KNN für die Station Strohauser Plate vergleichsweise zuverlässige Ergebnisse wie das mit einem umfassenden Datensatz trainierte KNN von Nordenham: gemessene und berechnete Daten korrelieren nahezu exakt, die Streuung ist entsprechend sehr gering (Abb. 11).

Das auf Grundlage des Datensatzes von 1998 trainierte KNN liefert bei Anwendung auf den Datensatz 2006-2008 auch hier Salzgehalte, mit denen die gemessenen Werte unterschritten werden (Abb. 12). Im Vergleich zu den stromab gelegenen Stationen nimmt hier die relative Unterschätzung der Salzgehalte deutlich zu, mit einer wachsenden Zunahme bei höheren Werten. Der Unterschied beträgt im Mittel 0,53 ‰; oberhalb des Schwellenwerts für signifikante Änderungen von 1,5 ‰ beträgt die ausbaubedingte Änderung im Mittel 1,04 ‰ (Abb. 13).

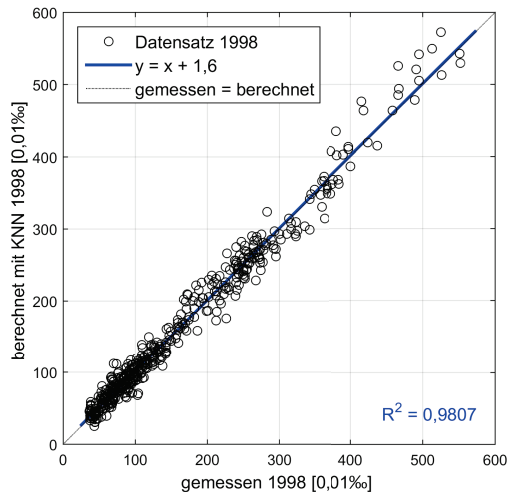


Abbildung 11: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionsgerade für die Daten der Station Strohauser Plate von 1998, vor dem Ausbau.

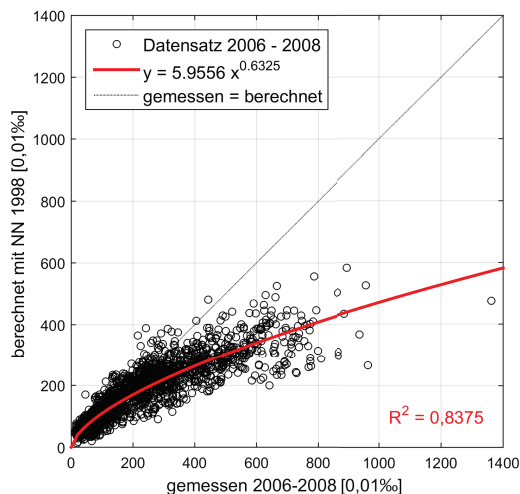


Abbildung 12: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionskurve für die Daten der Station Strohauser Plate von 2006-2008, nach dem Ausbau.

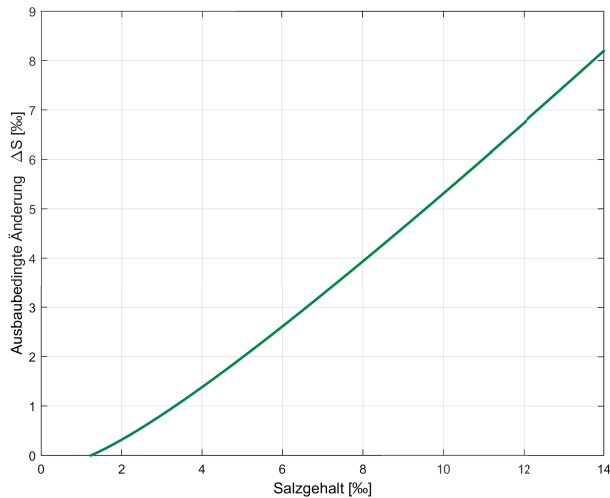


Abbildung 13: Ausbaubedingte Veränderungen der Salzgehalte an der Station Strohauser Plate.

4.4 Brake

In den Aufbau des KNN für den Pegel Brake fließt ein vollständiger Datensatz mit 711 Werten ein, in denen saisonale Effekte umfassend enthalten sind. Die Regression weist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den mit dem KNN ermittelten und den gemessenen Werten aus (Abb. 14). Die Streuung ist sehr gering und die Regressions- und Referenzgerade weisen eine nahezu vollständige Übereinstimmung auf.

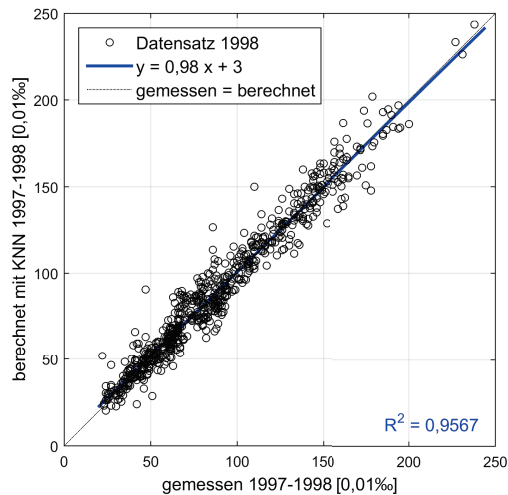


Abbildung 14: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionsgerade für die Daten der Station Brake von 1998, vor dem Ausbau.

Wird das – für den Datensatz vor dem Ausbau optimierte – KNN auf den Datensatz von 2006-2008 angewandt, unterschätzt es die gemessenen Salzgehalte oberhalb der Schwelle von etwa 1,5 ‰ erheblich (Abb. 15). Der Eintrag des Salzwassers aus der Nordsee reicht nach dem Ausbau weiter stromauf und führt somit an der Station Brake für Salzgehaltswerte oberhalb dieses Schwellenwerts zu signifikanten Erhöhungen. Bedingt durch die kleinen Absolutwerte streuen die niedrigeren Werte stärker als die höheren. Die Auswirkungen des Ausbaus sind an der Station Brake lediglich für Absolutwerte oberhalb von 1,5 ‰ eindeutig: sie betragen im Mittel 0,06 ‰ (Abb. 16).

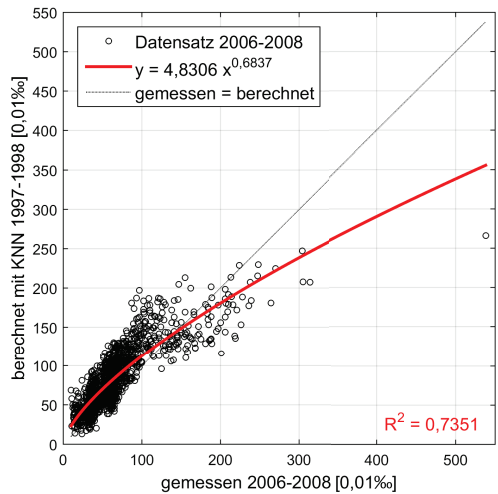


Abbildung 15: Streudiagramm für berechnete und gemessene Salzgehalte mit Referenzlinie und Regressionskurve für die Daten der Station Brake von 2006-2008, nach dem Ausbau.

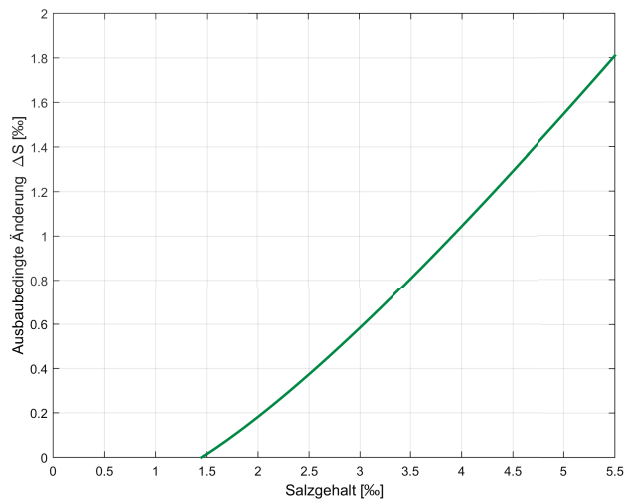


Abbildung 16: Ausbaubedingte Veränderungen der Salzgehalte an der Station Brake.

5 Bewertung der Methoden

Um den methodischen Ansatz mit KNN auf seine Eignung und Zuverlässigkeit eingehender zu prüfen, wurden weitere Kontrollen anhand des Datensatzes der Station Nordenham vorgenommen, für welche die längste Zeitreihe zur Verfügung steht. Zu Beginn wurde das KNN auf den Datensatz von 1998 trainiert und anschließend auf die Jahre 2006-2008 angewandt. Dabei auftretende Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten resultieren aus Effekten, die beim Lernprozesses des KNN keine Wirkung entfalteten. Beim Vergleich beider Zeitabschnitte hinsichtlich wirksamer Randbedingungen wird offensichtlich, dass die veränderte Gewässertopografie in Folge des Ausbaus nach 1998 eine wesentlich veränderte – im KNN unberücksichtigte – Randbedingung ist. Zur Prüfung der Zuverlässigkeit des KNN erfolgt eine erneutes Training, jedoch mit nur der Hälfte des Datensatzes (Testdatensatz 1). Danach wird das KNN auf die andere Hälfte des Datensatzes angepasst (Testdatensatz 2).

Das KNN erzeugt zuverlässige Ergebnisse für den Testdatensatz 2. Auch wenn die Streuung vereinzelter Datenpunkte zunimmt, stimmt der berechnete Salzgehalt mit dem gemessenen Wert im Mittel überein. Beide Datensätze stammen aus demselben Zeitraum, in dem keine bedeutende Veränderung der Topographie des Ästuars erfolgte, und das KNN reproduziert die Salzgehaltswerte richtig und übereinstimmend (Abb. 17).

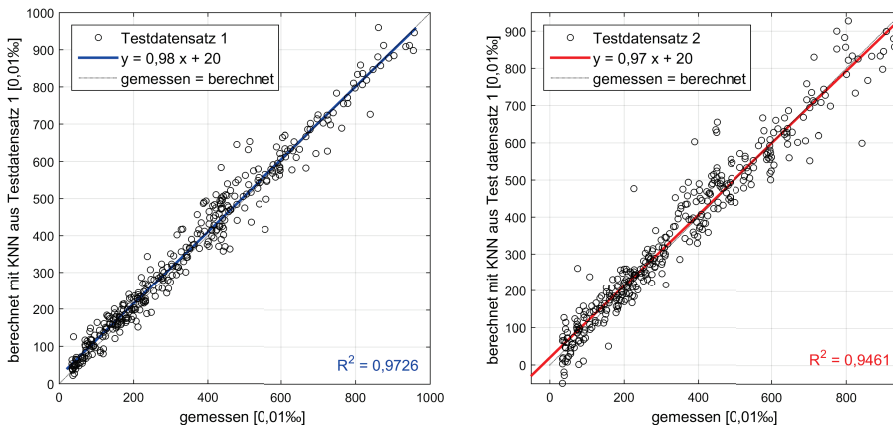


Abbildung 17: Training und Anwendung des KNN auf den Testdatensatz, vor dem Ausbau.

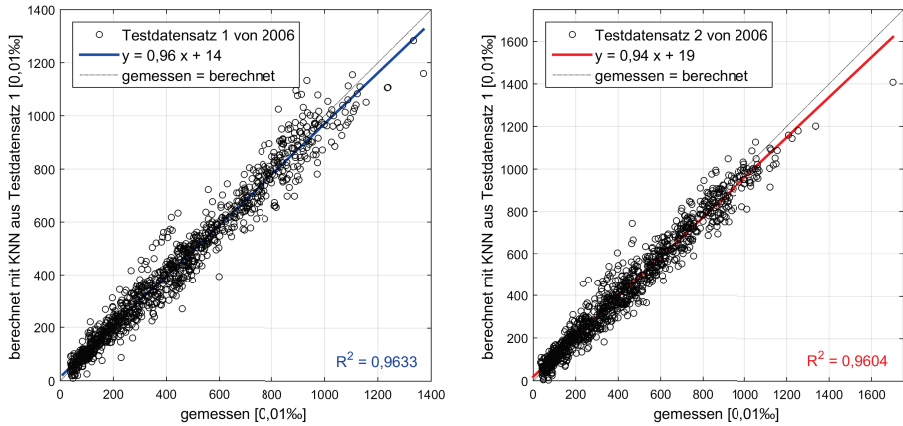


Abbildung 18: Training und Anwendung des KNN auf den Testdatensatz nach dem Ausbau.

Für eine zweite Überprüfung der Zuverlässigkeit der Methode wurde dieselbe Vorgehensweise auf die Datensätze von 2006-2008 angewendet. Das KNN lernt nun das Verhalten des Salzeintrags in das Weserästuar nach dem Ausbau und liefert Ergebnisse mit vergleichbarer Zuverlässigkeit wie bei Berechnungen mit dem Datensatz von 1998. Training und Anwendung des KNN zeigen sehr gute und zuverlässige Ergebnisse und die berechneten und gemessenen Werte weisen eine ähnliche Größenordnung mit geringer Streuung auf (Abb. 18).

Die Ergebnisse beider Untersuchungen belegen die Eignung und Zuverlässigkeit der Methode, Salzgehaltswerte in Abhängigkeit von Tidewasserständen und Oberwassermenge mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze zu reproduzieren, sofern sich keine im Training des KNN unberücksichtigt gebliebenen Randbedingungen signifikant verändern.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Unter Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen wurde eine Quantifizierung des ausbaubedingt veränderten Salzeintrags in das Weserästuar vorgenommen. Die Untersuchung belegt die Zuverlässigkeit dieser Vorgehensweise für diesen Zweck. Sie ermöglicht die Identifizierung und Reproduktionen signifikanter Muster in Datensätzen über funktionale Zusammenhänge.

Basierend auf dem Datensatz von 1998 mit den Messungen vor Beginn des Ausbaus wird für jede Messstation im Weserästuar ein KNN aufgebaut. Dieses KNN wird auf den Datensatz von 2006 bis 2008 angewendet, der die nach dem Ausbau erfassten Messwerte enthält. Nach einem entsprechenden Training mit den Eingangsgrößen Tidenhub, Wasserstände und Salzgehalt in der Außenweser sowie Oberwassermenge können KNN den Salzgehalt für stromauf liegende Ästuarbereiche zuverlässig reproduzieren. Diese Parameter bestimmen den Salzeintrag in das Ästuar so lange eindeutig, wenn keine Änderungen anderer Randbedingungen erfolgen, wie die der Gewässertopographie des Ästuars nach einem Fahrwasserausbau. Dafür konnte ein Plausibilitätsnachweis erbracht werden, bei dem die Eignung und Zuverlässigkeit der Anwendung KNN-Analyse für unterschiedliche

Datensätze – jeweils auch für die beiden verschiedenen Gewässertopografien – nachgewiesen worden ist.

Mit den KNN-Analysen können Salzgehaltsveränderungen quantifiziert werden. Für jeden Standort wurde ein Anstieg des Salzgehalts oberhalb eines lokal bestimmten Schwellenwerts ermittelt, der sich mit steigenden absoluten Werten noch erhöht. Die stromaufwärts steigenden Salzgehalte sind auf ausbaubedingt höhere Flutwassermengen zurückzuführen. Mit den Ergebnissen der KNN-Analyse sind zudem weitergehende Differenzierungen der ausbaubedingten Änderungen über deren Mittelwerte hinaus möglich: Bei Vorgabe kritischer Änderungswerte für Tiere und Pflanzen lassen sich die Häufigkeit von Überschreitungen solcher Werte ermitteln, womit verbesserte Bewertungsgrundlagen hinsichtlich ökologischer Folgewirkungen möglich werden.

Darüber hinaus ermöglichen die Ergebnisse der KNN-Analyse weitergehende Einsichten in die Auswirkungen von Fahrwasserausbauten in Ästuarien auf die lokalen Salzgehalte: Die ausbaubedingten Änderungen der Salzgehalte sind unterschiedlich ausgeprägt und mit Mittelwerten nur unzureichend erfasst. Im vorliegenden Fall der Tideweser setzen sie erst oberhalb von Schwellenwerten ein und nehmen mit den absoluten Werten zu. Daraus lassen sich für zukünftige Umweltverträglichkeitsuntersuchungen Anforderungen ableiten, um zu differenzierteren Bewertungen als bisher zu gelangen:

- Die Analyse ausbaubedingter Salzgehaltsänderungen mit künstlichen neuronalen Netzen hat wesentlich differenziertere und belastbarere Erkenntnisse erbracht als mit konventionellen Methoden erreichbar. Bei den Planfeststellungen zu den Fahrwasserausbauten in der Tideweser sowie Außen- und Unterelbe ist dem Rechnung getragen worden: Das von BERKENBRINK und NIEMEYER (2011) entwickelte Analyseverfahren mit KNN wurde für die Beweissicherung verbindlich festgelegt.
- Ermittlungen ausbaubedingter Salzgehaltsänderungen für mittlere Verhältnisse wie beispielsweise mit der Modellierung eines 14-tägigen Nipp-Spring-Zyklus unterschätzen einerseits die mittleren Änderungen, da gegenüber einem vollen Jahreszyklus der Anteil von Tiden mit Salzgehalten unterhalb der Schwelle für ausbaubedingte Änderungen überproportional groß ist. Andererseits liefern sie nur unzureichend Daten oberhalb des Schwellenwerts für die Zunahme ausbaubedingter Salzgehaltsänderungen mit wachsenden Absolutwerten, um deren funktionalen Verlauf zuverlässig abzuleiten. Sie sind damit auch unzureichend, um Ergebnisse zur Häufigkeit des Überschreitens von Schwellenwerten bereit zu stellen. Um den hier genannten Anforderungen zu genügen und vergleichbar differenzierte Ergebnisse zu liefern wie sie mit KNN-Analysen erzielbar sind, sind Modellierungen zur Ermittlung ausbaubedingter Salzgehaltsänderungen für die Tidevariation von mindestens einem Jahr auszuführen.
- Die mit KNN-Analysen gewonnenen Erkenntnisse zum Wachsen der ausbaubedingten Salzgehaltsänderungen oberhalb von Schwellen der Absolutwerte lassen es für eine differenzierte Bewertung von Ausbaufolgen sinnvoll erscheinen, kritische Schwellenwerte und zugehörige kritische Überschreitungshäufigkeiten für relevante Arten von Fauna und Flora bereit zu stellen. Damit würde – in Kopplung mit entsprechend ermittelten ausbaubedingten Salzgehaltsänderungen – eine unmittelbare Einschätzung der Ausbaufolgen für die Ökologie in Ästuarien ermöglicht werden.

7 Schriftenverzeichnis

- BERKENBRINK, C. und NIEMEYER, H. D.: Salzgehaltsänderungen in der Unterweser nach 1998 – Quantifizierung mit künstlichen neuronalen Netzen. Forschungsbericht 01/2011 – NLWKN-Forschungsstelle Küste. Norderney, 2011.
<http://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/nordseekueste/FSK/kuesteningenieurwesen/kuesteningenieurwesen-106527.html>
- DEMUTH, H.; BEALE M. and M. HAGAN: Matlab: Neural Network Toolbox 6 – User's Guide, 2010.
- ELSEBACH, J.; KAISER, R. and NIEMEYER, H. D.: Spatial Balance of Habitats in the Weser Estuary. Research Rep. EU-INTERREG-Project HARBASINS. doi: 10.13140/RG.2.1.4028.0805, 2007.
- NIEMEYER, H. D.: Effekte des Klimawandels auf Randbedingungen im Insel- und Küstenschutz - gegenwärtige und zu erwartende Trends. Ber. Forschungsstelle Küste, Bd. 44, 2015.
- NIEMEYER, H. D.; EIBEN, H. and RHODE, H.: History and Heritage of German Coastal Engineering. In: KRAUS, N.C. (Hrsg.): History and Heritage of Coastal Engineering. Am. Soc. Civ. Engrs., New York, 1996.
- STRECKER, S.: Künstliche Neuronale Netze – Aufbau und Funktionsweise. Arbeitspapiere Nr. 10/1997. Lehrstuhl für allg. BWL und Wirtschaftsinformatik, Universität Mainz, 1997.
- WETZEL, V.: Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute. Jb. Hafenbautechn. Ges. 1987, Bd. 42, 1988.
- WSA BREMERHAVEN: Dokumentation und Durchführung der im Planfeststellungsbeschluss für den Ausbau der Bundeswasserstraße Weser von km 65 bis km 130 zur Herstellung einer Mindesttiefe von 14 m unter Seekartennull angeordneten Beweissicherungsaufgaben und Bewertung der Ergebnisse – Abschlussbericht, 2010.
<http://www.wsa-bremerhaven.de/medienarchiv>