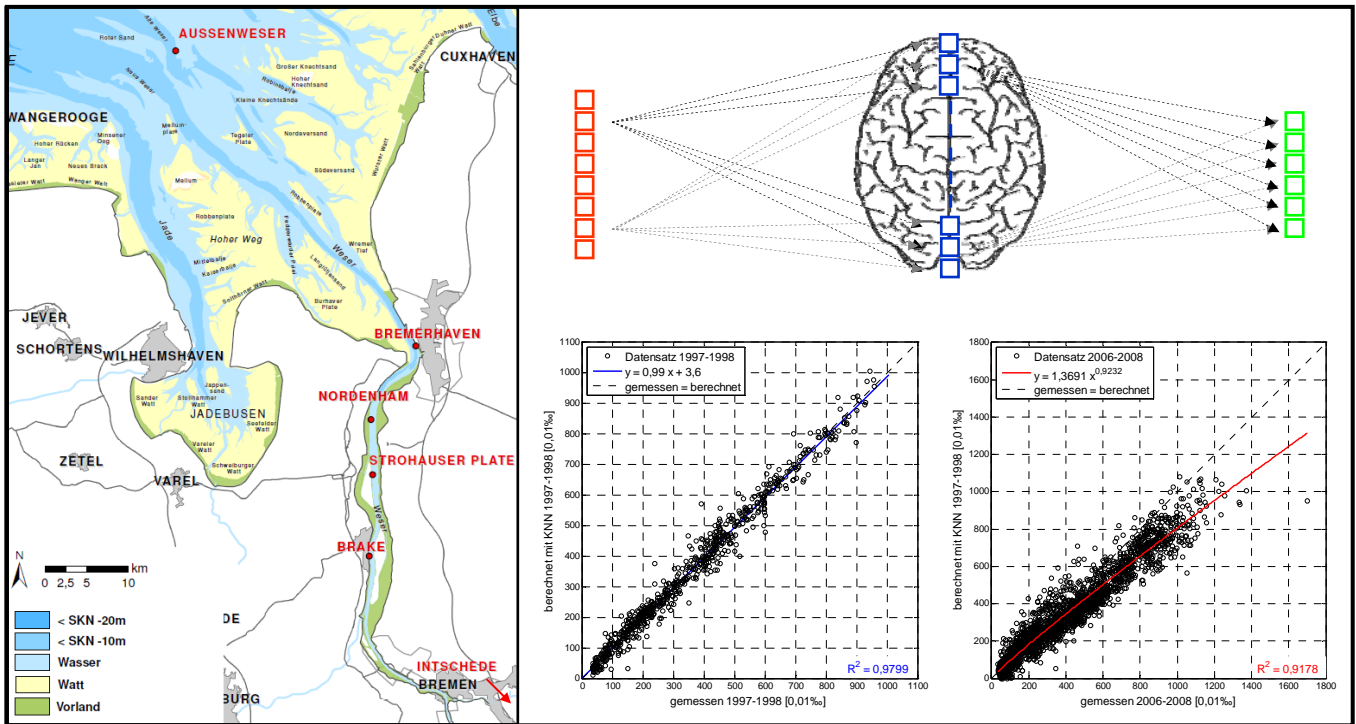




Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
-Forschungsstelle Küste-



Cordula Berkenbrink & Hanz D. Niemeyer

Salzgehaltsänderungen in der Unterweser nach 1998

-Quantifizierung mit künstlichen neuronalen Netzen-



Niedersachsen

**NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR
WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ
Betriebsstelle Norden-Norderney
-Forschungsstelle Küste-**

Herausgeber:

Niedersächsischer Landesbetrieb für
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement
-Forschungsstelle Küste-
2011

Titelblatt: links: Untersuchungsgebiet

rechts: KNN - Veränderung des Salzgehalts in der Weser zwischen 1997/98 und 2006-08 (Station Nordenham)

NLWKN - Forschungsstelle Küste
An der Mühle 5, 26548 Norderney
Tel.: 04932-916-0
Fax: 04932-1394
email: postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de

Cordula Berkenbrink & Hanz D. Niemeyer

Salzgehaltsänderungen in der Unterweser nach 1998

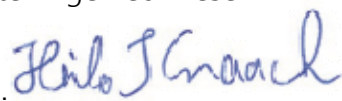
- Quantifizierung mit künstlichen neuronalen Netzen -

Norderney, im August 2011

Dezernent
Forschungsstelle Küste


Dipl.- Ing. Hanz Dieter Niemeyer

Aufgabenbereichsleiter
Küsteningenieurwesen


i. V.:
Dipl.-Geol. Heiko Knaack M.E.

Salzgehaltsänderungen in der Unterweser nach 1998 -Quantifizierung mit künstlichen neuronalen Netzen-

Cordula Berkenbrink & Hanz D. Niemeyer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Untersuchungsgebiet	1
3. Randbedingungen und Methodik	3
3.1. Datengrundlage	3
3.2. Aufbau künstlicher neuronaler Netze.....	4
3.3. Aufbau der künstlichen neuronalen Netze mit den Datensätzen von 1997/1998	5
4. Anwendung der KNN auf die Datensätze von 2006-2008	7
4.1. Bremerhaven.....	7
4.2. Nordenham.....	10
4.3. Strohauser Plate	12
4.4. Brake	14
5. Bewertung der mit den verwendeten KNN erzielten Ergebnisse	16
5.1. Training und Anwendung des KNN ohne bauliche Eingriffe	16
5.2. Einfluss saisonaler Effekte.....	17
6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	19
7. Literaturverzeichnis	21
8. Abkürzungen und Symbole	22
9. Anlage	22

1. Einleitung und Problemstellung

Zur Beweissicherung von Folgen des SKN -14 m - Ausbaus der Außenweser sind vom Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven Salzgehaltsmessungen vorgenommen worden. Damit sollte untersucht werden, ob und wenn in wieweit ausbaubedingte Veränderungen des Salzeintrags von Nordsee und Außenweser in die Unterweser erfolgen, sich die Brackwasserzone verschiebt und in Folge möglicherweise landwirtschaftliche Nutzungen und Ökologie beeinträchtigen.

Es stehen Salzgehaltsmessungen an fünf Stationen in der Außen- und Unterweser vor und nach dem Ausbau der Außenweser zur Verfügung, die als Grundlage für eine Abschätzung von Ausbaufolgen herangezogen werden können. Konventionelle Vergleiche der Daten ergaben keine Ergebnisse, aus denen eine ausbaubedingte Änderung der Salzgehalte in der Unterweser ableitbar waren (WSA Bremerhaven 2010). Plausibilitätsprüfungen der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE im NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ mit Regressionsanalysen wiesen jedoch eindeutig auf ausbaubedingte Änderungen hin, ohne dass mit hinreichender Genauigkeit die Änderungen quantifiziert werden konnten; zudem deckten die dabei entwickelten Anpassungsfunktionen die Datensätze -insbesondere für geringe und hohe Oberwassermengen- nur unzureichend ab.

Um die erkannten Änderungen der Salzgehalte funktional mit einer Genauigkeit zu reproduzieren, die eine Quantifizierung erlaubt, wurde die Methode der künstlichen neuronalen Netze angewandt. Mit ihnen lassen sich Muster in Datensätzen so reproduzieren, so dass deren funktionale Zusammenhänge quantitativ dargestellt werden können. Diese Fähigkeit wird hier dazu genutzt, im ersten Schritt die vor dem Ausbau erfassten Datensätze funktional mit einem künstlichen neuronalen Netz zu reproduzieren, um es im zweiten Schritt auf den neueren, nach dem Ausbau erfassten Datensatz anzuwenden. Dabei werden sich Veränderungen im Untersuchungsgebiet wie solche in Folge des Ausbaus oder andere Einwirkungen, die beim Training des neuronalen Netzes noch nicht wirksam sein konnten, als Abweichungen der Messwerte von dem durch das künstliche neuronale Netz gebildeten funktionalen Zusammenhang zeigen.

Entsprechende Untersuchungen wurden in der Forschungsstelle Küste auf Grundlage aus der Beweissicherung verfügbarer Daten vorgenommen. Im Folgenden werden einerseits Methodik sowie Grundlagen künstlicher neuronaler Netze dargestellt und andererseits die Vorgehensweise im speziellen Fall dokumentiert. Abschließend werden die gewonnenen Ergebnisse dokumentiert und bewertet.

2. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von Intschede oberhalb der künstlichen Tidegrenze am Wehr Bremen-Hemeling bis in die Außenweser. Innerhalb des Gebietes werden an vier repräsentativen Stationen Brake, Strohauser Plate, Nordenham und Bremerhaven in der Unterweser (Abb. 1) Veränderungen der Salzgehalte zwischen den Jahren 1997/1998 und 2006-2008 mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze (KNN) ermittelt. Als Randbedingen für die Daten werden Oberwassermengen der Mittelweser am Pegel Intschede sowie Salzgehalte der Außenweser an der Station Alte Weser genutzt. Dabei wird -in Übereinstimmung mit dem planfestgestellten Beweissicherungskonzept- davon ausgegangen, dass die von der Nordsee her geprägten Salzgehalte an der Station Alte Weser vom Ausbau nur unwesentlich verändert werden und als unabhängiger Eingangswert für vergleichende Untersuchungen dienen können.

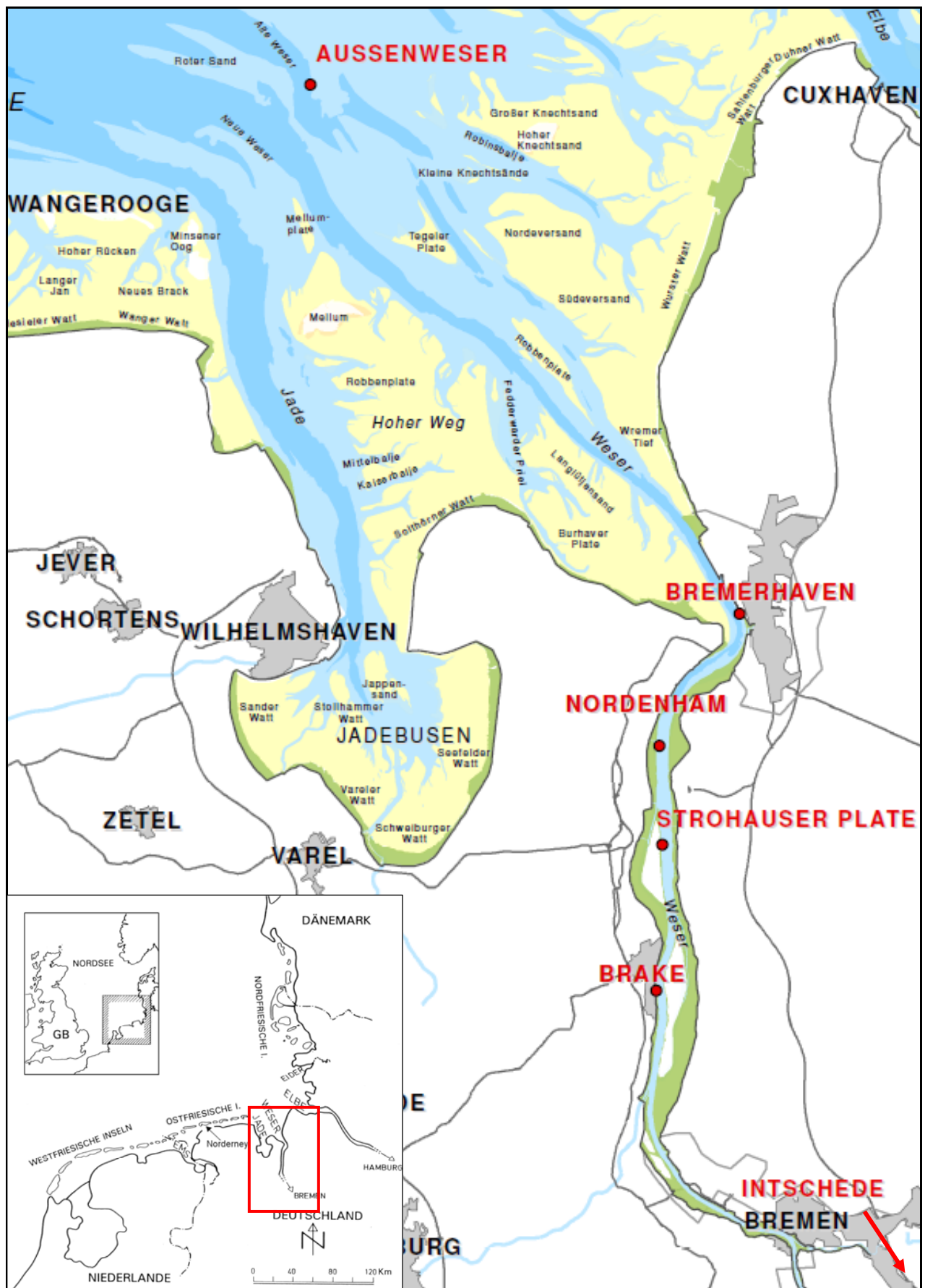


Abb. 1: Untersuchungsgebiet

3. Randbedingungen und Methodik

3.1. Datengrundlage

Die vom WSA Bremerhaven gemessenen Salzgehalte an den fünf Standorten stehen für die Zeiträume 1997/1998 und 2006-2008 zur Verfügung (Tab. 1). Für die gemessenen Oberwassermengen bei Intschede und den Salzgehalten der Station Alte Weser im Mündungsgebiet der Außenweser kann im Unterweserabschnitt zwischen Bremerhaven und Brake ein geschlossenes System für Salzeintrag von der Nordsee und Oberwasserabfluss für jeden Pegel mittels künstlicher neuronaler Netze erstellt werden.

Tab. 1: Verfügbare Daten zum Salzgehalt in der Weser

Pegel	Datensatz 1	Datensatz 2
Brake	09.09.1997 - 31.12.1998 09.03.1998 - 28.04.1998 keine Daten	01.01.2006 - 31.12.2008 01.04.2006 - 10.08.2006 keine Daten
Strohauser Plate	26.03.1998 - 31.12.1998	01.01.2006 - 31.12.2008
Nordenham	02.06.1997 - 31.12.1998 10.07.1997 - 04.11.1997 interpoliert	01.01.2006 - 10.12.2008
Bremerhaven	08.05.1998 - 31.12.1998	01.01.2006 - 31.12.2008
Außenweser	14.08.1997 - 31.12.1998 15.01.1998 - 10.02.1998 interpoliert 18.08.1998 - 13.09.1998 interpoliert	01.01.2006 - 31.12.2008 15.08.2008 - 13.09.2008 interpoliert

Einige Datensätze weisen Lücken auf, die offensichtlich durch Interpolation geschlossen wurden (Abb. 2 und Anlage). Diese Datensätze müssen bereinigt werden, damit keine Unschärfen in die Erstellung der künstlichen neuronalen Netze einfließen.

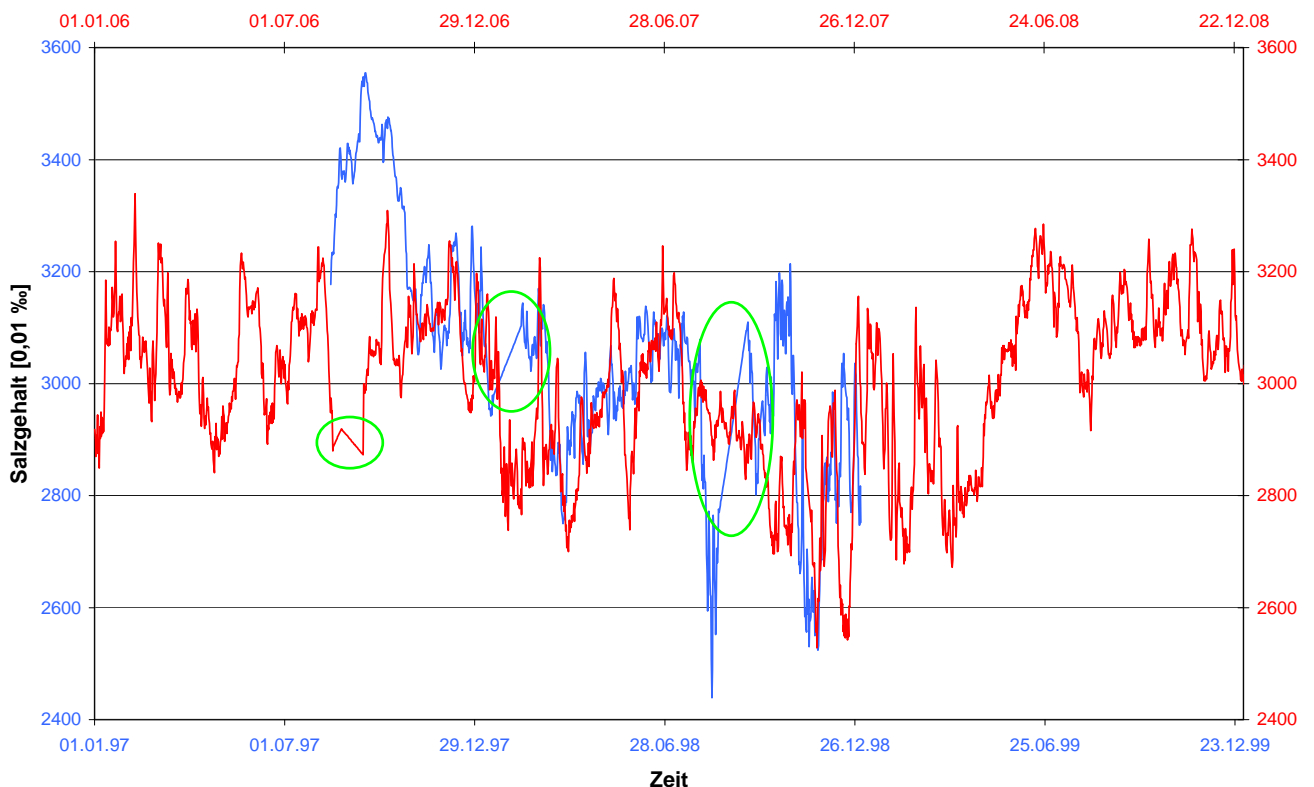


Abb. 2: Verfügbare Zeitreihen des Salzgehalts in der Außenweser

3.2. Aufbau künstlicher neuronaler 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 einfachen Einheiten -den Neuronen- die untereinander verbunden sind. Durch gerichtete Verbindungen zueinander können die Neuronen sich gegenseitig aktivieren, wodurch die Informationsverarbeitungen erfolgen. Hierbei werden komplexe Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgabe mittels einfacher arithmetischer Funktionen hergeleitet. Das Netz lernt aus repräsentativen Teildatensätzen von Eingangswerten und Ergebnissen ein Muster zu erkennen und konfiguriert sich selbst an Hand der Beispieldatensätze.

Die Neuronen werden in der Regel in Schichten angeordnet und können auf unterschiedliche Art und Weise miteinander funktional verbunden werden. Der einfachste Aufbau besteht darin die Neuronen der einzelnen Schichten nacheinander in eine Richtung zu verknüpfen (Abb. 3). Sie können jedoch auch mit sich selber, mit Neuronen derselben Schicht oder mit Neuronen vorgelegener Schichten verbunden werden. Es können auch Abkürzungen erfolgen, indem einzelne Schichten übersprungen werden.

In der Eingabeschicht befinden sich die Neuronen für die Eingangsparameter. Die Information jedes Eingangsparameters wird an alle unmittelbar verbundenen anschließenden Neuronen weitergeben, die sich in einer versteckten Schicht befinden. Dort findet die eigentliche Informationsverarbeitung statt. Es können beliebig viele versteckte Schichten angeordnet werden. In der Ausgabeschicht befinden sich die Neuronen, die die Ergebnisse des Netzes beinhalten (Abb. 3).

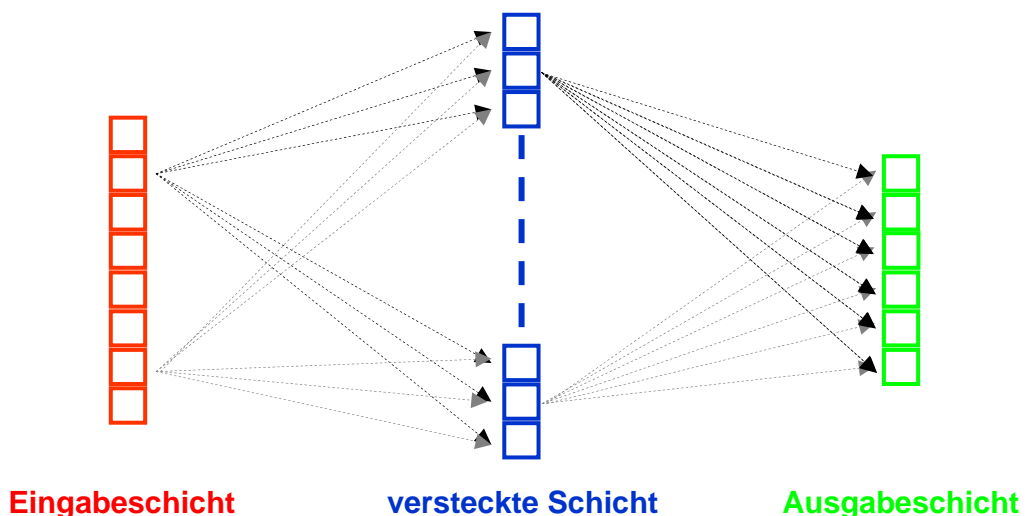


Abb. 3: Aufbau eines vorwärtsgetriebenen künstlichen Neuronalen Netzes

Die Verbindungen zwischen den einzelnen Neuronen wird durch individuell festgelegte Wichtungen erfasst. Sie bilden die Kopplung zwischen den Neuronen und werden so lange modifiziert bis das Netz einen funktionalen Zusammenhang abbilden kann: ihn erlernt hat. Es gibt unterschiedliche Lernvorgänge bei den KNN, allen gemein ist, dass auch bereits bekannte kausale Zusammenhänge selbstständig vom Netz gelernt werden müssen und nicht vorgegeben werden können. Beim sogenannten überwachten Lernen, werden den Ausgabeneuronen des Netzes die tatsächlichen Ergebnisparameter gegenübergestellt. Unterschiede zwischen den Neuronen und den erwarteten Ergebnissen sind Abweichungen, die durch Veränderung der Parameter des Netzes in weiteren Schritten minimiert werden. Im Gegensatz dazu steht das unüberwachte Lernen, bei dem das Netz nur aus den Eingabedaten Muster ableitet.

Ein wesentlicher Vorteil der KNN ist die Fähigkeit auch nichtlineare Zusammenhänge bilden zu können. Dieses wird dadurch erreicht, dass mindestens eine Schicht des Netzes nichtlinear aktiviert wird. Das bedeutet, dass die Ausgabe des betrachteten Neurons durch eine nichtlineare Aktivierungsfunktion berechnet wird. Die Eingabe in diese Funktion bilden die Summe der gewichteten Ausgaben aller vorgelagerten Neuronen. Hierfür haben sich sigmoiden Funktionen wie z. B. Tangens hyperbolicus oder logistische Funktionen durchgesetzt, da sie die benötigten Eigenschaften erfüllen differenzierbar, monoton steigend und S-förmig -also nichtlinear- zu sein. Für einfache Zusammenhänge können lineare oder Schwellenwertfunktionen implementiert werden.

3.3. Aufbau der künstlichen neuronalen Netze mit den Datensätzen von 1997/1998

Für die Ermittlung der Veränderung der Salzgehalte in der Unterweser zwischen Bremerhaven und Brake wird die Neural Network Toolbox 6.0 aus der mathematischen Programmbibliothek MATLAB (DEMUTH ET AL. 2010) herangezogen. Sie verfügt über eine Sammlung gängiger Modelle neuronaler Netzwerke. Hier wird ein Perzeptron angewandt (Abb. 4), das zu den vorwärtsgetriebenen neuronalen Netzen gehört (Feed-Forward-Netzwerk). Auf die Eingabeschicht folgt eine versteckte Schicht, die nichtlinear aktiviert wird. (Abb. 4). Für die Ausgabeschicht genügt eine lineare Aktivierungsfunktion. Das Perzeptron wird mit dem Levenberg-Marquard-Backpropagation-Algorithmus trainiert, der das nichtlineare Ausgleichsproblem mit der Methode der kleinsten Quadrate löst. Dieser Algorithmus ist besonders schnell, benötigt aber eine große Menge an Arbeitsspeicher.

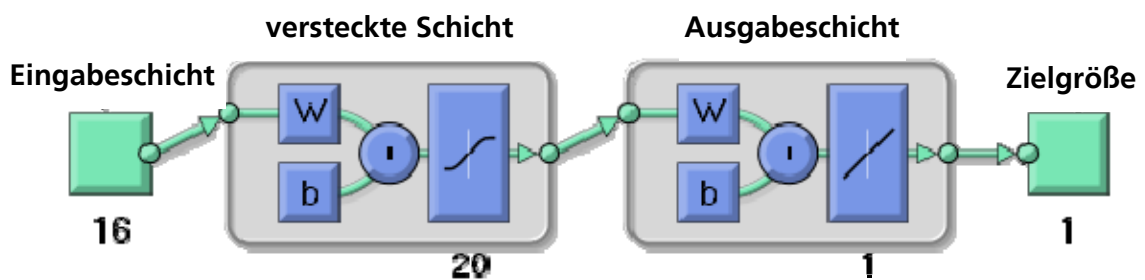


Abb. 4: Schema des KNN

Für den Datensatz jeder Station an der Unterweser (Abb. 1) wird ein KNN mit den Daten von 1997 und 1998 trainiert. Die Eingabeschicht wird aus 16 Neuronen gebildet, die sich aus jeweils vier Zeitreihen der Salzgehaltsmessungen, des Tidehubs und Tidehochwassers in der Außenweser und der Oberwassermengen bei Intschede zusammensetzen (Abb. 4). Zielgröße ist der jeweilige Salzgehalt an den untersuchten Stationen (Abb. 1). Der versteckten Schicht werden 20 sigmoidal angeregte Neuronen zugeteilt, der Ausgabeschicht ein linear angeregtes Neuron (Abb. 4).

Für das überwachte Training werden die Daten in drei Gruppen aufgeteilt: 70 % der Daten werden für das eigentliche Training herangezogen, bei dem Wichtung und Bias jedes Neurons (Abb. 4) nach jeder Epoche angepasst. Die Zuweisung von Wichtung und Bias zu jedem Neuron wird Epoche genannt. Ist der mittlere quadratische Fehler zwischen der Zielgröße und dem Ergebnis größer als 0, beginnt eine neue Epoche, in der die Werte erneut angepasst werden (Abb. 5). Theoretisch würde das Netz Wichtung und Bias so lange anpassen, bis das Ergebnis der Zielgröße nahezu exakt entspricht. Damit wäre das Netz übertrainiert und unzureichend flexibel für andere Datensätze; es hat den Datensatz auswendig gelernt. Um die Allgemeingültigkeit des Netzes zu gewährleisten wird mit Hilfe eines Validierungsdatensatzes, der weitere bisher ungenutzte 15 % der gesamten Datenmenge umfasst, das Training überwacht. Während der mittlere quadratische Fehler des Trainingsdatensatzes so lange abnimmt bis er gegen Null geht, steigt der Fehler im Validierungsdatensatz ungefähr dort an, wo eine Überanpassung des Algorithmusses stattfindet (Abb. 5). An der Stelle wird das Training des Netzes abgeschlossen und der bis dahin

erlernte Algorithmus wird abschließend auf die -den Testdatensatz bildenden- verbleibenden bisher ungenutzten 15% der gesamten Datenmenge angewandt.

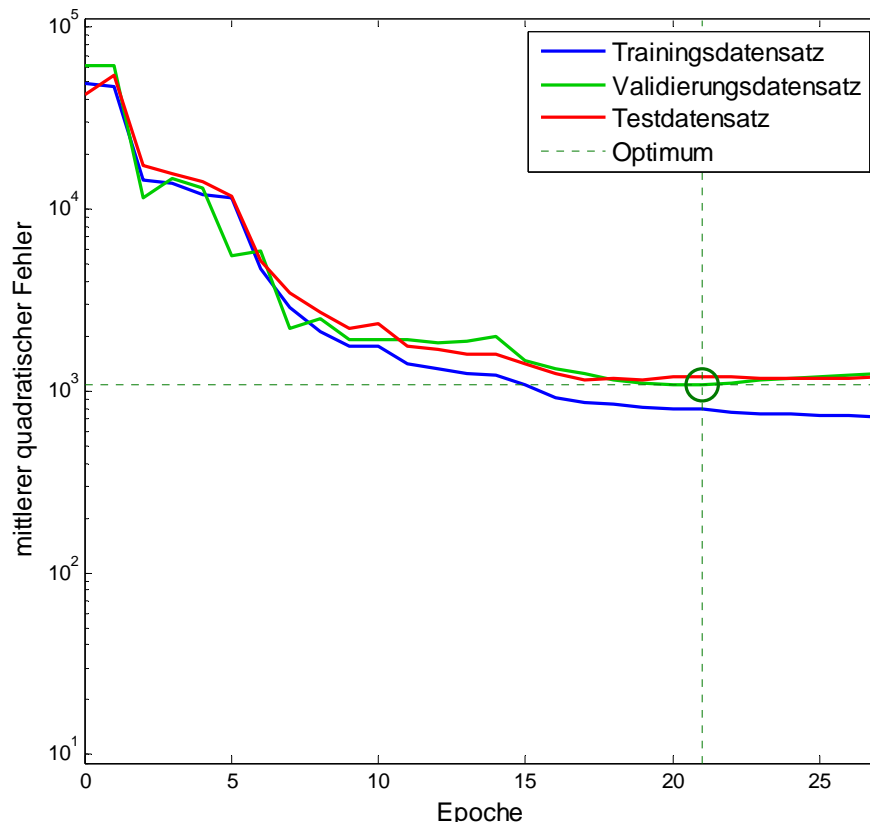


Abb. 5: Überwachtes Training bei einem künstlichen neuronalen Netz

Die Qualität der erreichten Anpassung des KNN an die Zielwerte wird in Streudiagrammen veranschaulicht (Abb. 6): die Ergebnisse des neuronalen Netzes werden in Bezug auf die gemessenen Werte aufgetragen. Der Zusammenhang zwischen beiden Größen wird funktional durch eine Regressionsgleichung widergespiegelt. Das KNN ist dann sehr gut trainiert, wenn die Ausgleichsgerade möglichst der -vollständige Übereinstimmung von errechneten und gemessenen Werten repräsentierenden- Winkelhalbierenden $y = x$ gleich kommt und die Streuung der Datenpunkte sehr gering ist. Als Maß für die Güte der Übereinstimmung ist das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben, die bei den drei Trainingsgruppen und auch bei allen Daten zusammen bei einem sehr guten Wert von $R^2 > 0,9$ liegt.

Das trainierte KNN kann nun auf andere Datensätze derselben Messstationen unter vergleichbaren Randbedingungen angewandt werden. Es rechnet wie bei dem Testdatensatz (Abb. 6) unter den gegebenen Randbedingungen -Oberwasserzufluss, Salzeintrag, Tidehochwasser und Tidehub- den erwarteten Salzgehalt der zugehörigen Station aus. Sollten gravierende Abweichungen zwischen Messung und Berechnung auftreten, ist dies auf eine beim Training unberücksichtigt gebliebene Randbedingung zurückzuführen, wie ein gravierender Eingriff in die Topografie des Untersuchungsgebietes wie beispielsweise der Ausbau der Außenweser.

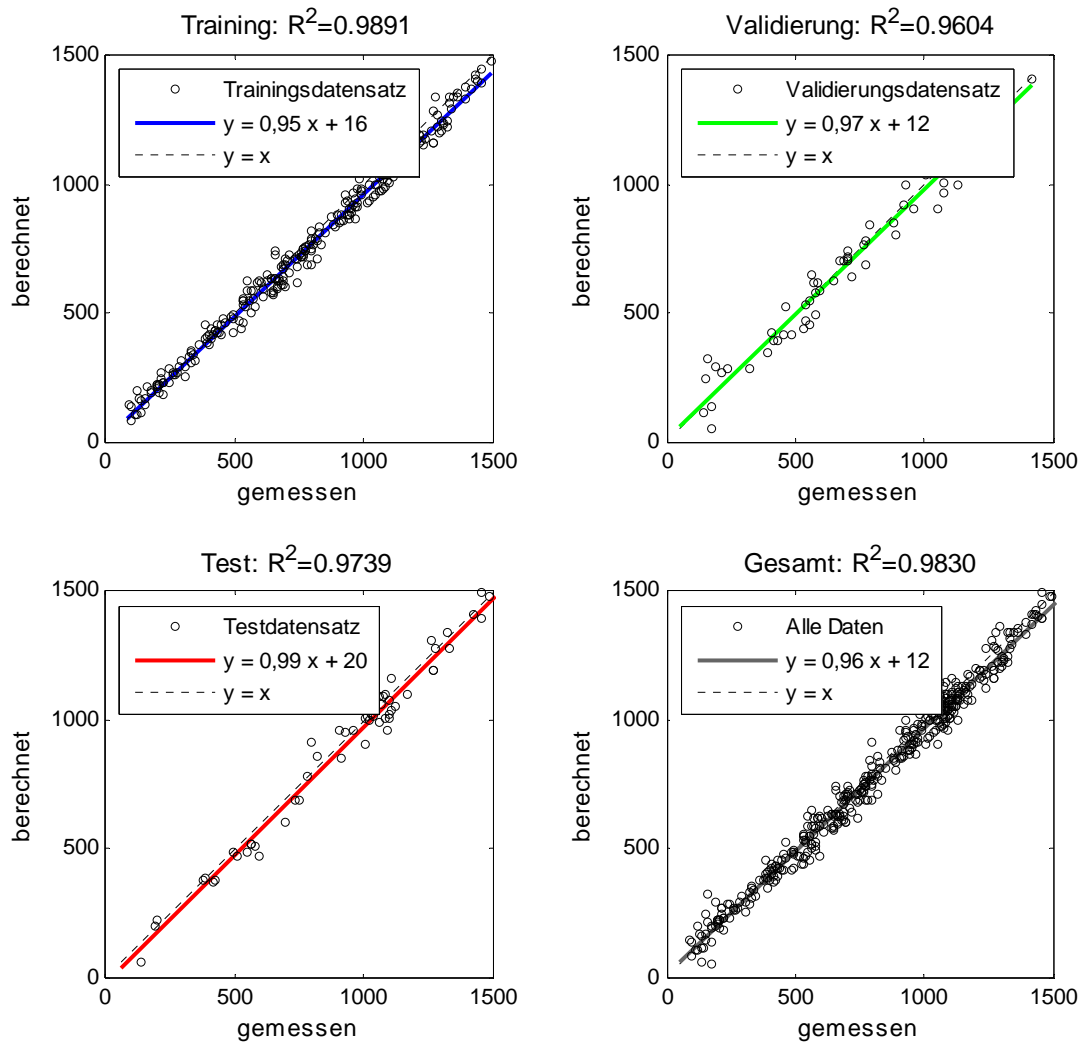


Abb. 6: Ergebnisse eines trainierten KNN [0,01 %] (Beispiel: Station Bremerhaven)

4. Anwendung der KNN auf die Datensätze von 2006-2008

4.1. Bremerhaven

Der Datensatz der Station Bremerhaven beginnt am 08.05.1998 und reicht bis zum 31.12.1998. Davon sind für den Zeitraum vom 18.08.1998 bis 18.09.1998 für die Station in der Außenweser keine Daten verfügbar (Abb. 2); daher muss dieser Teil des Datensatzes unberücksichtigt bleiben. Das KNN kann somit auf der Grundlage von 401 Datensätzen erstellt werden; von denen 70 % zum Training und die restlichen 30 % für die Validierung und zum Testen des Netzes genutzt werden. Rein statistisch stellt dies eine ausreichende Anzahl an Datensätzen dar. Da sie aber kein vollständiges Jahr abdecken, können saisonal bedingte Unausgewogenheiten enthalten sein, die bei Untersuchung auf ausbaubedingte Änderungen bei der Anwendung des KNN auf die Jahre 2006-2008 zu bedenken sind. Das anhand des Datensatzes von 1998 trainierte KNN erzielt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Daten (Abb. 7); die Streuung der Datenpunkte um die Winkelhalbierende als Maß für die absolute Übereinstimmung ist gering. Ebenso weicht die Regressionsgerade für die Daten nur geringfügig von der Winkelhalbierenden ab.

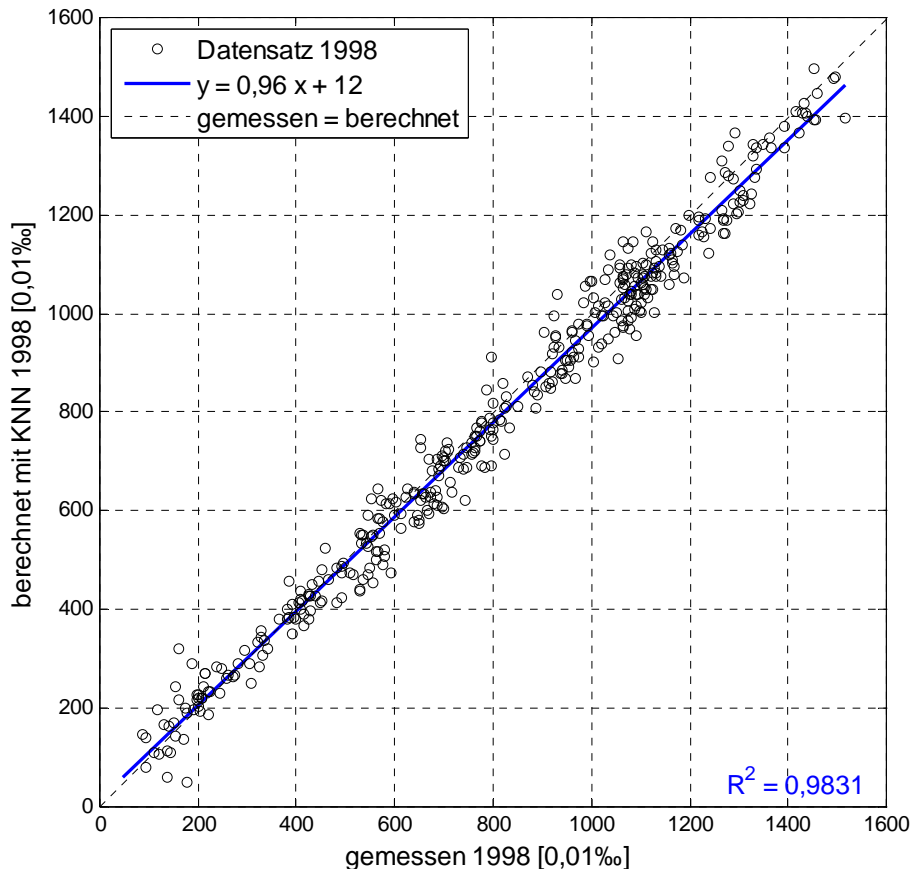


Abb. 7: Streudiagramm mit Regressionsgerade für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Bremerhaven: 1998

Wird das KNN auf den Datensatz von 2006-2008 angewandt, nehmen die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten gegenüber dem Datensatz von 1998 deutlich zu (Abb. 8). Das KNN unterschätzt -insbesondere im Bereich der höheren Werte- die gemessenen Salzgehalte. Daraus kann gefolgert werden, dass zwischen der Außenweser und Intschede in den Jahren von 1998 bis 2006 Veränderungen bei der Salzgehaltsentwicklung im Regime stattgefunden haben, die das KNN anhand des Datensatzes von 1998 noch nicht lernen konnte und somit im Netz für die Reproduktion der Ausgangswerte unberücksichtigt bleiben. Da die maßgebenden natürlichen äußeren Einflüsse auf den Salzgehalt durch die Tideparameter und das Oberwasser abgedeckt sind, kann nur die bauliche Veränderung die Berechnungsergebnisse des KNN beeinflussen. Wie die Berechnungen an den stromauf liegenden Stationen zeigen wird ist auch der Einfluss der für das Training verwendeten, vergleichsweise kurzen Zeitreihe nachrangig.

Die Veränderung wirkt sich weder konstant, noch linear auf den Salzgehalt aus. Bis zu einem Salzgehalt von etwa 4 ‰ wird der Salzgehalt zwar mit einer sehr hohen Streuung, aber in Bezug auf die Referenzlinie in der Summe richtig erfasst (Abb. 8), dann nimmt die Unterschätzung deutlich zu. Der Abstand zwischen den Regressionsgeraden der Berechnungen für 1998 und 2006 bis 2008 stellt die Veränderung im Salzeintrag dar, die durch bauliche Veränderungen hervorgerufen wurden (Abb. 9), da alle anderen Einflüsse auf den Salzgehalt unmittelbar oder mittelbar in den Eingangswerten enthalten sind. Für die gesamte Zeitreihe 2006-2008 bedeutet das einen Unterschied zu 1998 von im Mittel 1,1 ‰, wobei Salzgehalte größer 12 ‰ eine Änderung ΔS von 1,6 bis über 4,2 ‰ erreichen (Abb. 9). Der mittlere Unterschied ergibt sich aus den Abweichungen der vom KNN berechneten Salzgehalte für den Zustand nach dem Ausbau zu dem Wert, den das KNN hätte ermitteln müssen, wenn keine Änderungen im Regime stattgefunden hätten.

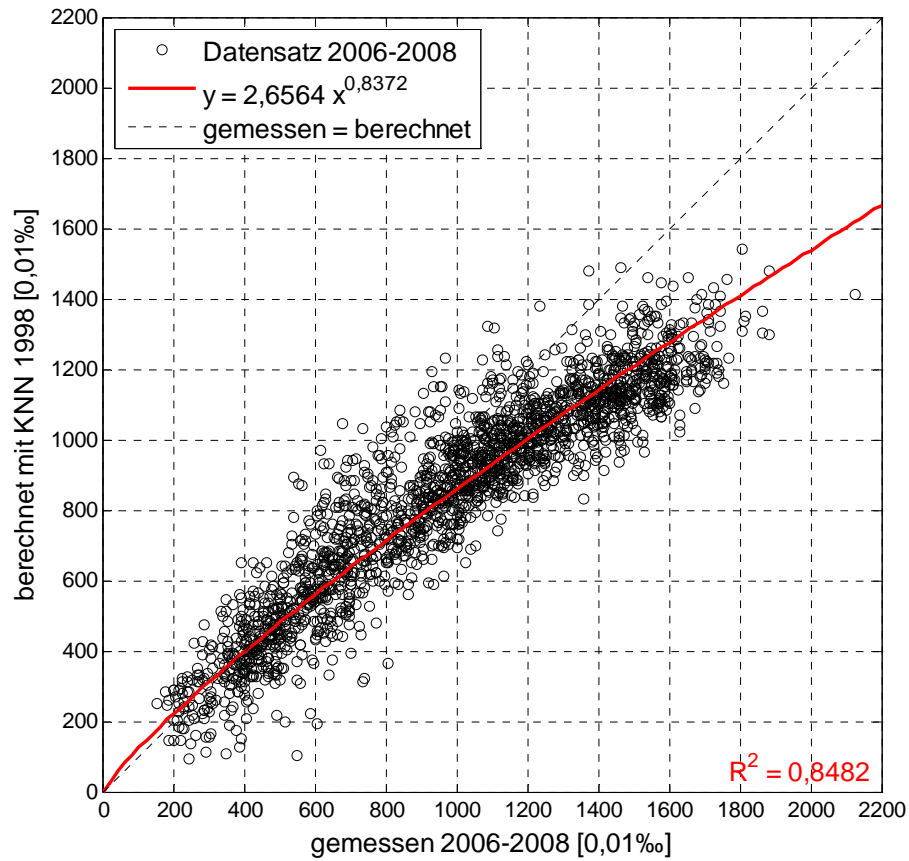


Abb. 8: Streudiagramm mit Regressionskurve für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Bremerhaven: 2006-2008

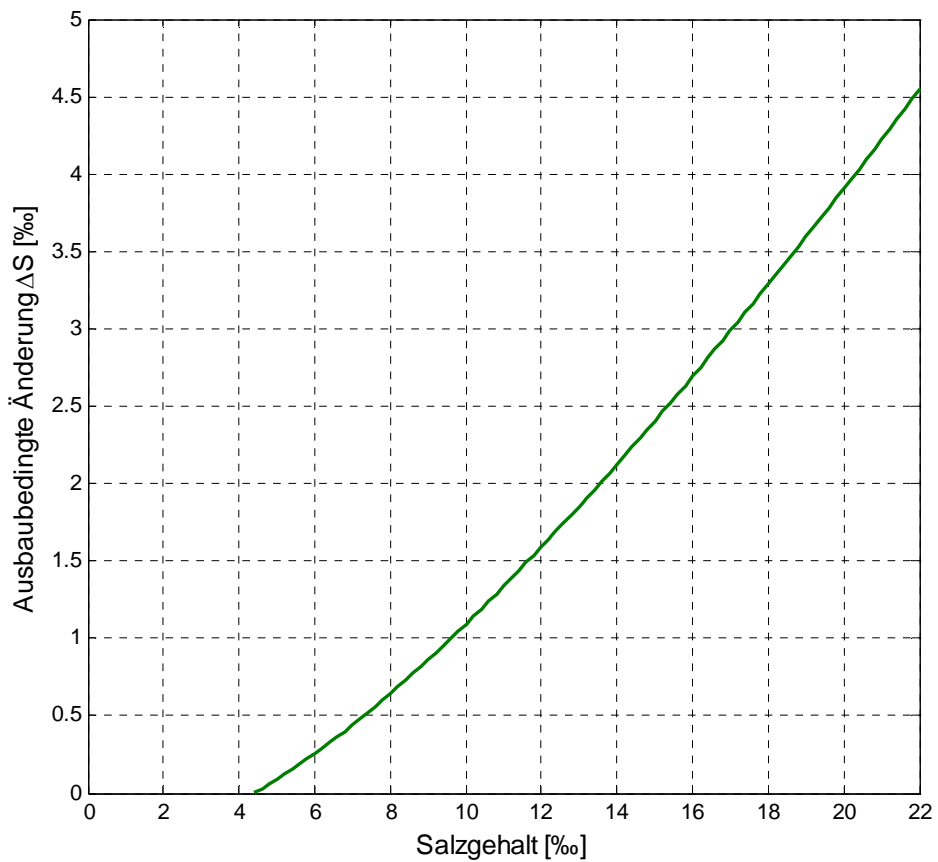


Abb. 9: Ausbaubedingte Änderung des Salzgehaltes bei Bremerhaven

4.2. Nordenham

An der Station Nordenham liegt die längste Messreihe der Salzgehalte vor dem Ausbau vor (02.06.1997 - 31.12.1998), wobei zwischen dem 10.07.1997 und dem 04.11.1997 offensichtlich nicht gemessen sondern interpoliert wurde (Anlage). Daher sind diese Werte für das Training des KNN nicht verwendet worden. Weiterhin müssen die Zeiträume unberücksichtigt bleiben, für die keine Werte aus der Außenweser zur Verfügung stehen. Dennoch kann das KNN für den Datensatz der Station Nordenham saisonale Unterschiede erlernen. Es fließen 701 Werte in die Erstellung des KNN ein, mit denen eine sichere Anpassung erzielt werden kann (Abb. 10). Der Vergleich der gemessenen und mit dem KNN berechneten Werte zeigt eine gute Übereinstimmung von über 98 % mit einer engen Streuung um die Winkelhalbierende.

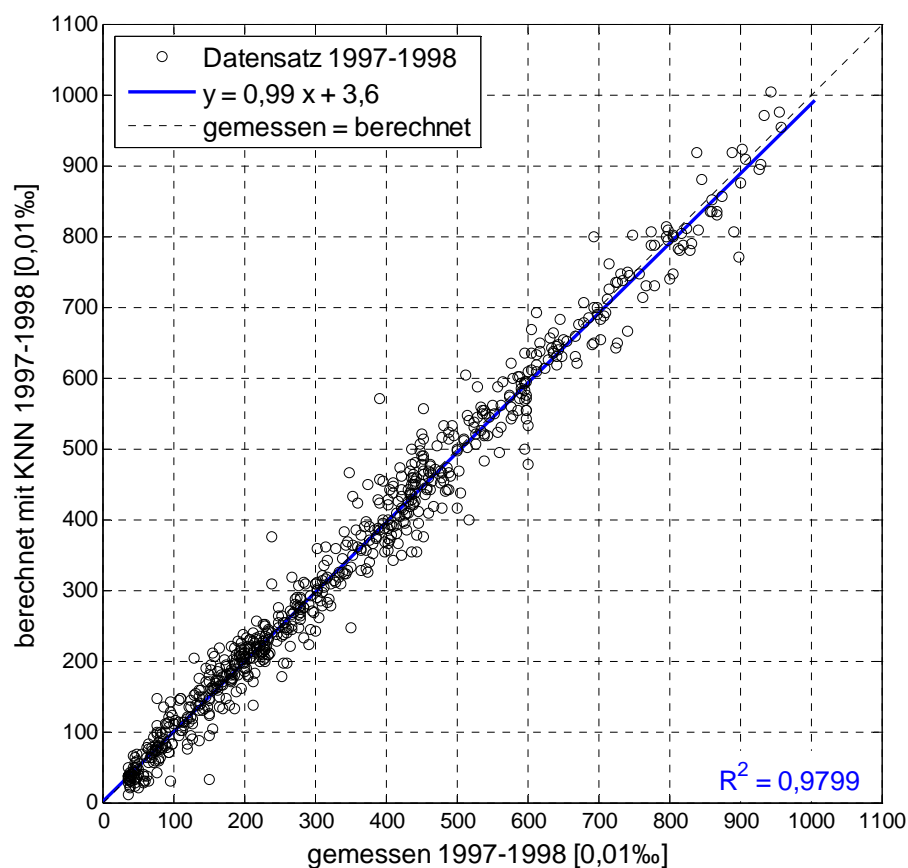


Abb. 10: Streudiagramm mit Regressionsgerade für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Nordenham: 1997-1998

Beim Datensatz von 2006-2008 unterschätzt das für den Datensatz von 1997/98 entwickelte KNN die tatsächlichen Salzgehalte an der Station Nordenham (Abb. 11). Auch hier sind wachsende Salzgehalte beim Vergleich der Zeitreihen 1997/98 und 2006/08 erkennbar. Die Wirkung der Eingangswerte von Salzgehalt und Tide in der Außenweser sowie vom Oberwasserzufluss bei Intschede wird durch einen vom KNN nicht erlernten Einfluss überlagert: der Veränderung des Regimes durch den zwischenzeitlich erfolgten Ausbau. Für die gesamte Zeitreihe 2006-2008 bedeutet das einen Unterschied zu der von 1997/98 von im Mittel von 0,73 ‰, wobei Salzgehalte über 10 ‰ eine Änderung ΔS von 1,8 bis über 3,5 ‰ erfahren (Abb. 12).

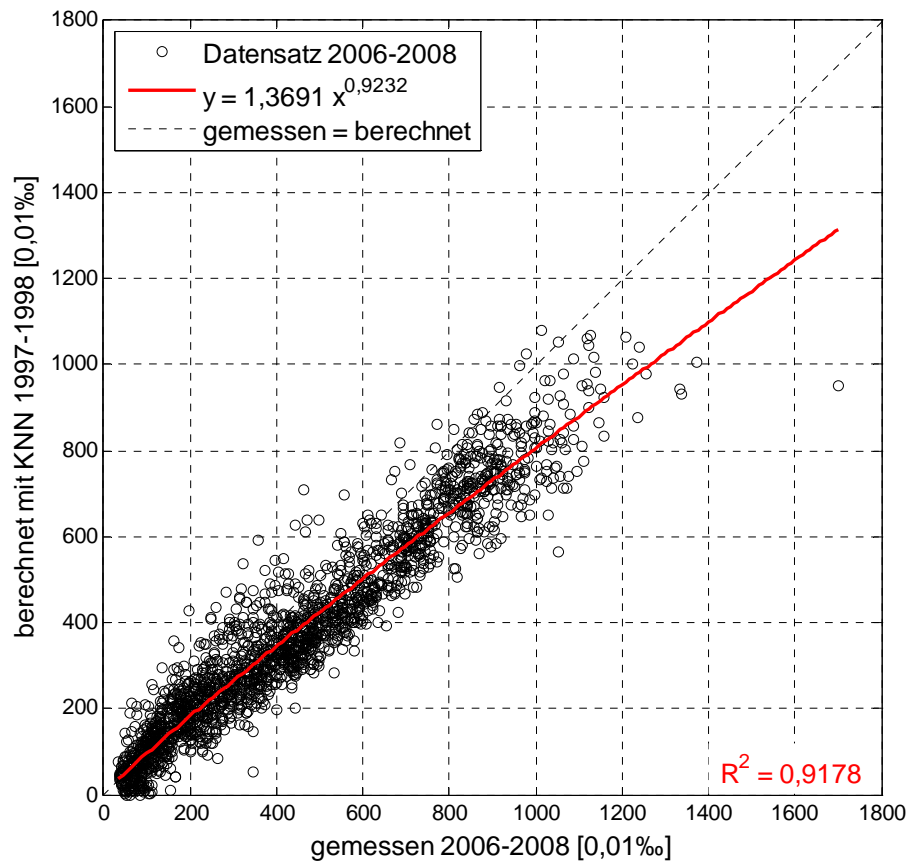


Abb. 11: Streudiagramm mit Regressionskurve für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Nordenham: 2006-2008

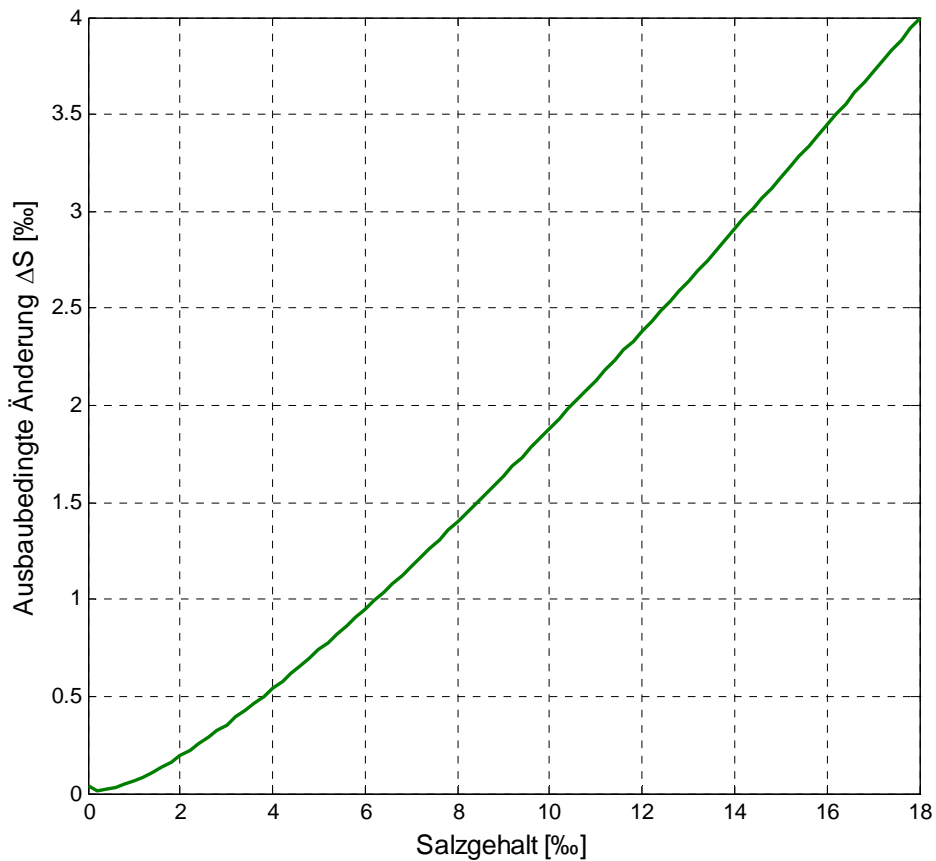


Abb. 12: Ausbaubedingte Änderung des Salzgehaltes bei Nordenham

4.3. Strohauser Plate

Das KNN für die Strohauser Plate wird mit dem Datensatz vom 26.03.1998 bis 31.12.1998 trainiert. Die dort gemessenen Daten des Zeitraums vom 18.08.1998 bis 17.09.1998 konnten nicht verwendet werden, da keine korrespondierenden Salzgehalte an der Station Alte Weser vorhanden sind. Zwar ist ein Datensatz vorzuziehen, der mindestens ein komplettes Jahr an Messungen beinhaltet, damit alle saisonalen Variationen im KNN berücksichtigt werden können, der eigentliche Aufbau des Netzes bleibt davon jedoch unbeeinflusst. Das Netz ist auf Grund der begrenzten Länge des Datensatzes für drei Wintermonate untrainiert geblieben, die im Datensatz 2006-2008 enthalten sind. Insofern ist die Datengrundlage ähnlich wie an der Station Bremerhaven, für die der Trainingsdatensatz ebenfalls aus einer Zeitreihe bestand, die das Jahr nur unvollständig abbildete. Das KNN für die Daten der Station Nordenham, mit dem alle saisonalen Variationen reproduziert werden konnten, zeigt ähnlich zuverlässige Ergebnisse, wie die KNN für die weniger umfassenden Datensätze der Stationen Bremerhaven und Strohauser Plate. Von den 484 Datensätzen werden 70 % für das Training herangezogen. Die restlichen 30 % dienen zur Validierung und zum Testen des Netzes. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ist sehr gut (Abb. 13), was durch ein Bestimmtheitsmaß von 98 % und der nahezu deckungsgleichen Lage von Regressionsgerade und Winkelhalbierender eindeutig bestätigt wird.

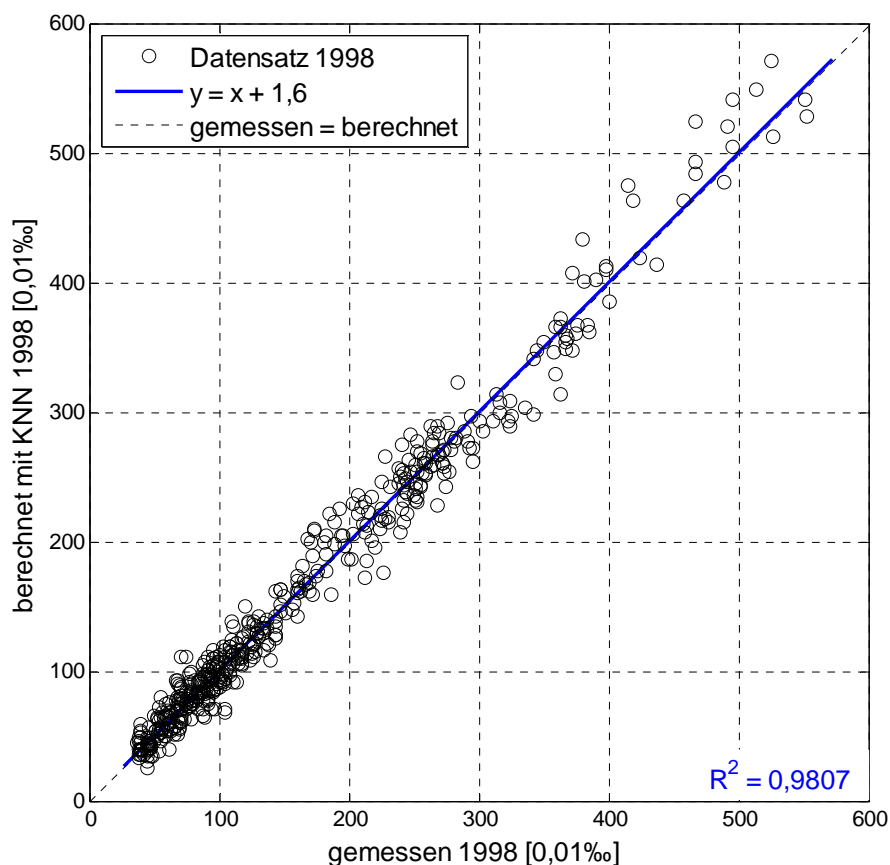


Abb. 13: Streudiagramm mit Regressionsgerade für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Strohauser Plate: 1998

Die Anwendung des KNN auf die Datensätze von 2006-2008 führt wie an den bisher betrachteten Stationen zu einer Unterschätzung der gemessenen Salzgehalte an der Station Strohauser Plate (Abb. 14). Im Vergleich zu den stromab gelegenen Stationen nimmt hier die relative Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten deutlich zu (Abb. 15), was insgesamt zu einem als ausbaubedingt einzustufenden Unterschied von im Mittel 0,53 ‰ führt.

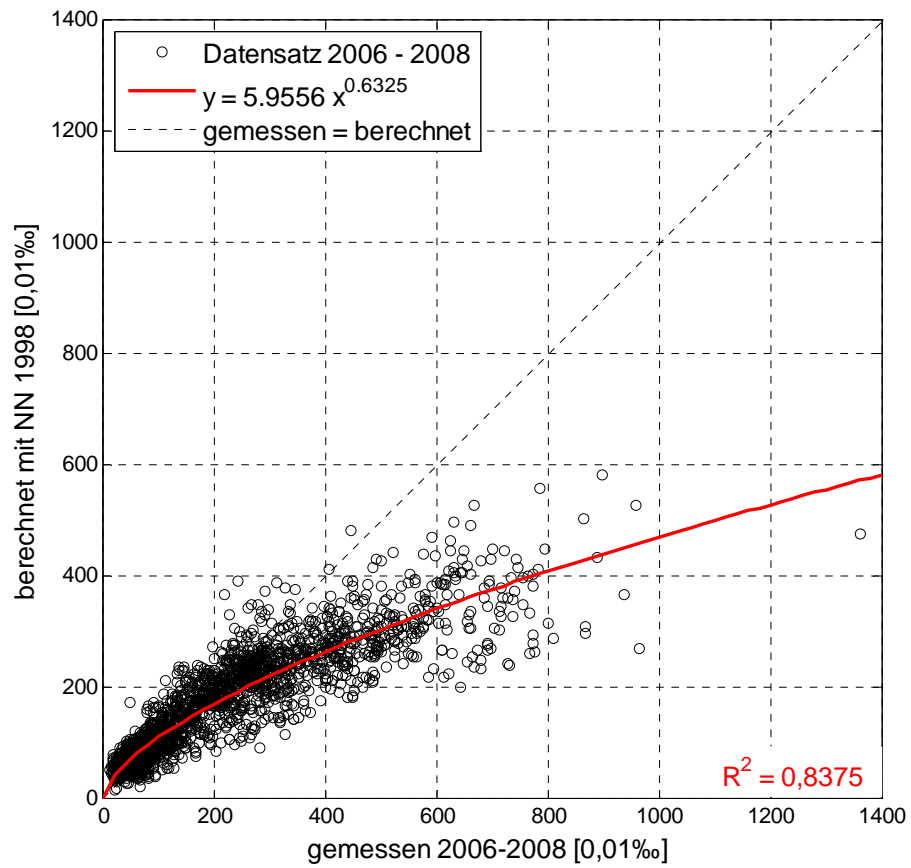


Abb. 14: Streudiagramm mit Regressionskurve für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Strohauser Plate: 2006-2008

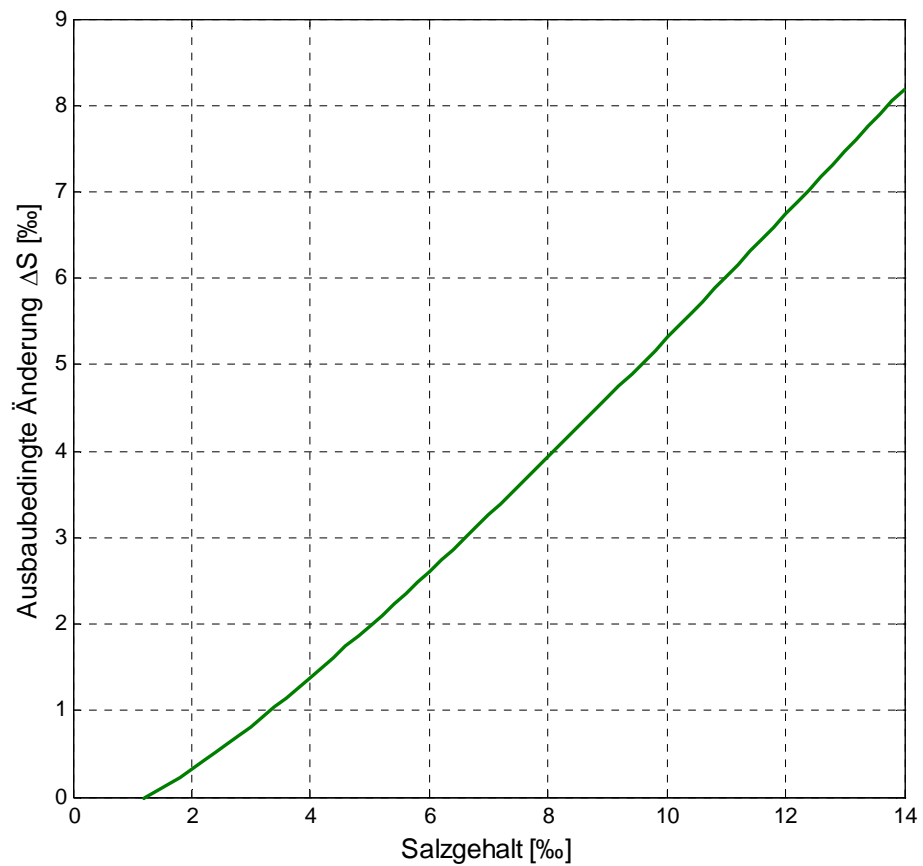


Abb. 15: Ausbaubedingte Änderung des Salzgehaltes an der Strohauser Plate

4.4. Brake

Für den Aufbau des KNN für die Station Brake stand die Zeitreihe von gemessenen Salzgehalten vom 09.09.1997 bis 31.12.1998 zur Verfügung, wobei die Daten vom 09.03.1998 bis zum 28.04.1998 fehlen. Auch die Zeiträume mit den interpolierten Werten für den Salzgehalt in der Außenweser werden nicht berücksichtigt; somit fließen in den Aufbau des Netzes für den Pegel Brake 711 Datensätze ein. Die Regression zeigt eine gute Anpassung des KNN an den Datensatz von 1998 (Abb. 16). Die Regressionsgerade weicht nur geringfügig von der Winkelhalbierenden ab und das Bestimmtheitsmaß ist mit 95,7 % sehr gut.

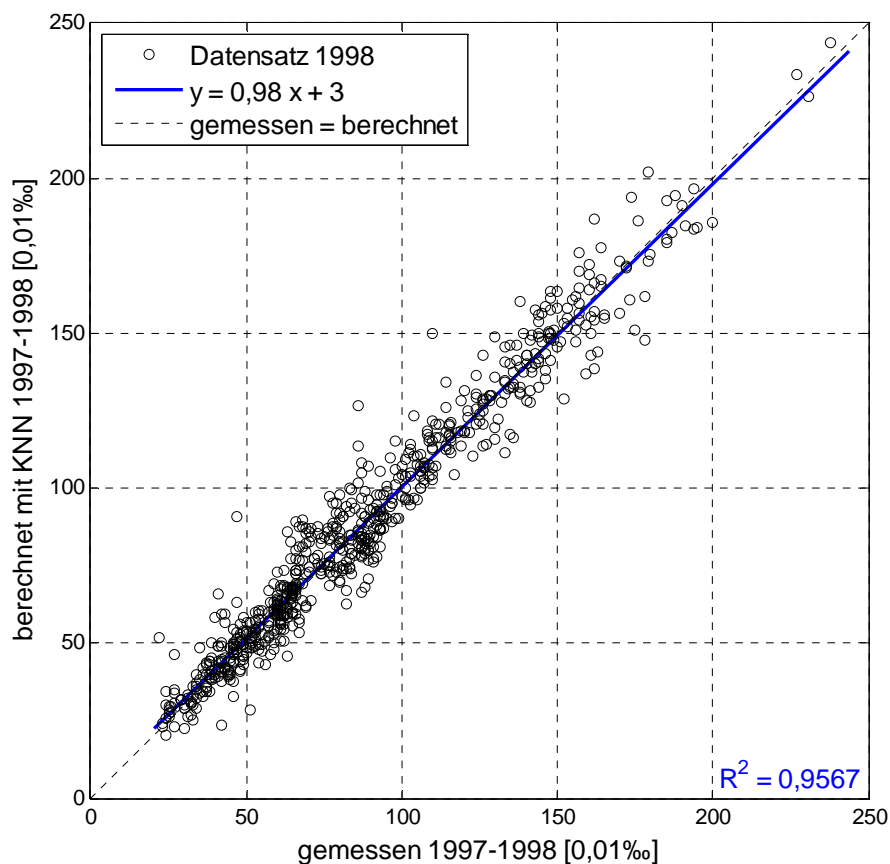


Abb. 16: Streudiagramm mit Regressionsgerade für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Brake: 1997-1998

Wird das KNN auf den Datensatz von 2006-2008 angewendet sind große Abweichungen von der Winkelhalbierenden erkennbar (Abb. 17). Das für die Daten vor Ausbaubeginn trainierte KNN unterschätzt die gemessenen Salzgehalte oberhalb der Schwelle von etwa 1,5 ‰ erheblich. Daraus kann geschlossen werden, dass sich die Bedingungen für das Vordringen von Salzgehalten in das Ästuar für gleiche äußere Randbedingungen nachhaltig geändert haben. Dies gilt allerdings kaum für Salzgehalte von weniger als 1 ‰; bei höheren Werten sind die Unterschiede - insbesondere in Bezug auf die niedrigen Absolutwerte- jedoch erheblich (Abb. 18). Die Streuungen weisen allerdings auf ein Problem hin, dass auch bei deterministischen mathematischen Modellierungen auftritt: bei kleinen Absolutwerten der Salzgehalte sind die methodisch bedingten Abweichungen - gemessen an den reproduzierten Werten- relativ groß. Insgesamt ist festzuhalten, dass bei Brake in den überwiegenden Fällen keine ausbaubedingten Änderungen festzustellen sind. Lediglich bei einer deutlich geringeren Zahl von Tiden mit Salzgehalten oberhalb von 1,5 ‰ sind ausbaubedingte Änderungen des Salzgehalts erkennbar.

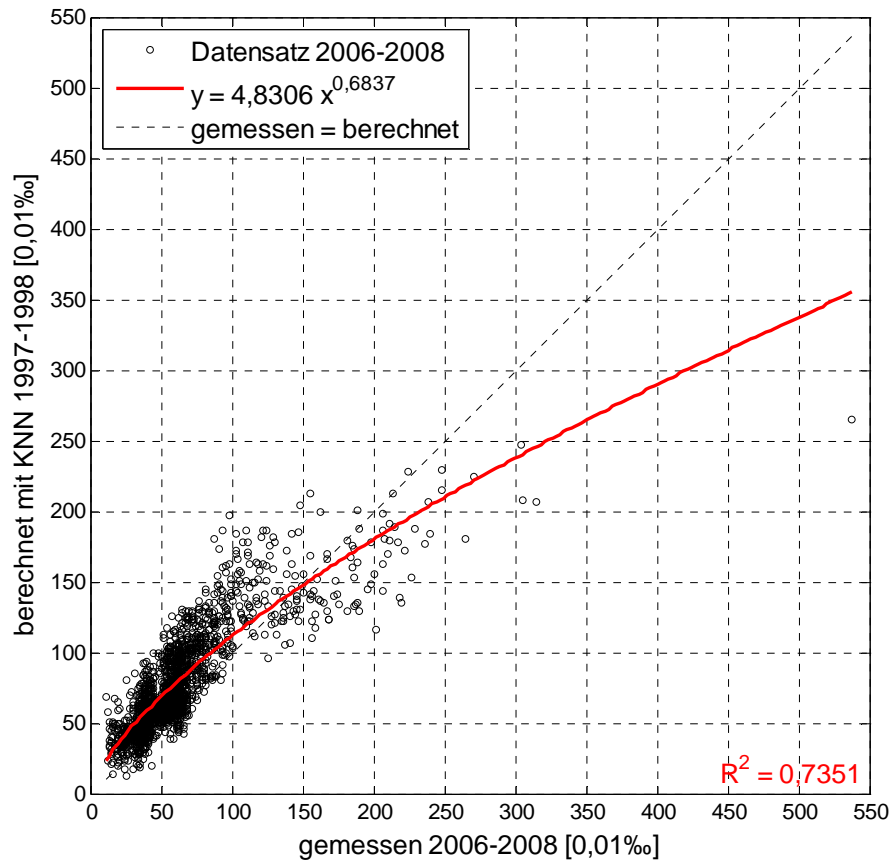


Abb. 17: Streudiagramm mit Regressionskurve für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte an der Station Brake: 2006-2008

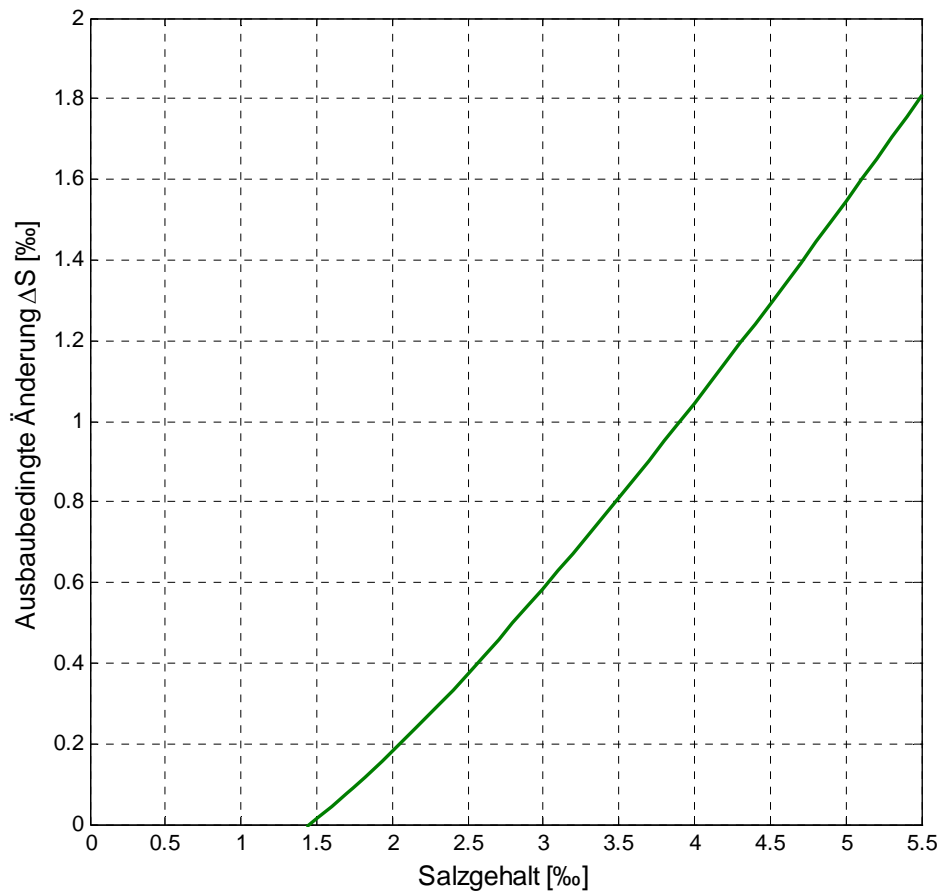


Abb. 18: Ausbaubedingte Änderung des Salzgehaltes bei Brake

5. Bewertung der mit den verwendeten KNN erzielten Ergebnisse

5.1. Training und Anwendung des KNN ohne bauliche Eingriffe

Um die Belastbarkeit der mit künstlichen neuronalen Netze erzielten Ergebnisse zu prüfen, wird beispielhaft am Datensatz von Nordenham eine Kontrolle vorgenommen, der für die Zeit vor dem Ausbau am umfangreichsten von allen zu untersuchenden Stationen in der Unterweser ist. Bisher ist das Training auf die Zeitreihe von 1997/1998 durchgeführt und das KNN auf die Jahre 2006-2008 angewendet worden, wobei für die Datensätze nach dem Ausbau große Abweichungen erkennbar waren. Die Abweichungen resultieren -nach der Theorie künstlicher neuronaler Netze- aus vom KNN nicht erlernten, vorher in den Datensätzen nicht abgebildeten- Prozessen. Das KNN lernt den Zusammenhang zwischen Salzgehalt, Oberwasser und Tide, nicht aber geometrische Veränderungen. Da diese Veränderung aber auch Einfluss auf das Eindringen von Salz in das Ästuar haben kann, treten bei den Berechnungen für die Datensätze nach dem Ausbau der Weser Abweichungen zwischen Berechnungen und Messdaten. Dass KNN unterschiedliche Datensätzen für unterschiedliche -im KNN nicht abgebildete Randbedingungen- zuverlässig reproduzieren können, wird im Folgenden nachgewiesen: Das Training des KNN findet nur mit jedem zweiten Wert aus der Zeitreihe 1997/1998 statt. Die übrigen Werte werden zum Vergleich der berechneten Daten mit den gemessenen Daten herangezogen.

Das KNN kann den Salzgehalt für den Testdatensatz 2 zuverlässig bestimmen, es ist keine Abweichung im Salzgehalt erkennbar (Abb. 19). Auch wenn die Streuung einzelner Datenpunkte zunimmt, stimmt im Mittel der berechnete Salzgehalt mit dem gemessenen überein. Da beide Datensätze aus denselben Jahren stammen und nur eine Variation trainierter Randbedingungen in dieser Zeitspanne erfolgt, stimmen die bei der Erstellung des KNN unberücksichtigt gebliebenen Daten mit den vom KNN reproduzierten Werten überein. Ursache für die Übereinstimmung ist -im Gegensatz zu den Ergebnissen für die Datensätze 2006-2008, dass die Topografie des untersuchten Gebiets keine nachhaltigen Änderungen außerhalb der natürlichen Variabilität erfahren hat.

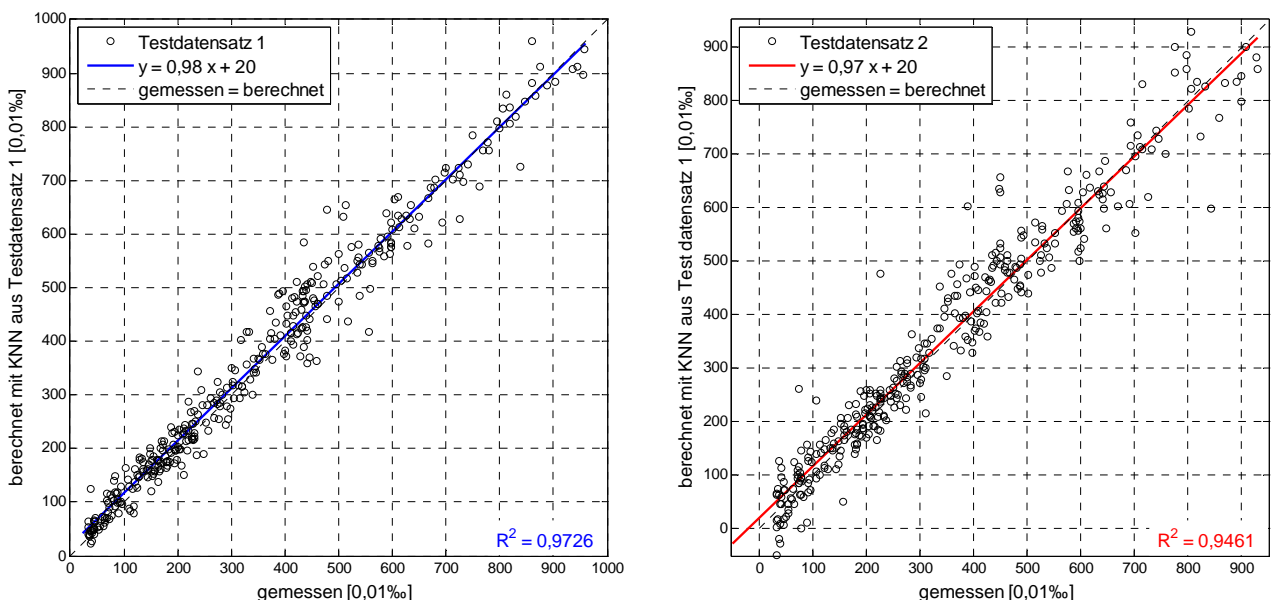


Abb. 19: Training und Anwendung des KNN auf Kontrolldatensätze (Daten vor dem Ausbau)

Im zweiten Schritt wird ein künstliches neuronales Netz für den Zustand der Weser nach dem Ausbau für die Datensätze von 2006 - 2008 erstellt. Damit soll gezeigt werden, dass auch mit den Daten nach dem Ausbau ein KNN aufgebaut werden kann, das den Salzgehalt für den zugehörigen Zustand zuverlässig reproduziert (Abb. 20). Das künstliche neuronale Netz für den Zustand nach dem Ausbau der Weser erlernt, die nach dem Ausbau auftretenden Salzgehalte

des veränderten Zustandes in einen Zusammenhang mit den gewählten äußeren Randbedingungen Salzgehalt und Tidehub im äußeren Ästuar sowie Oberwassermenge zu setzen; es kann die dabei auftretenden Salzgehalte in der Unterweser mit vergleichbarer Zuverlässigkeit reproduzieren wie diejenigen vor dem Ausbau.

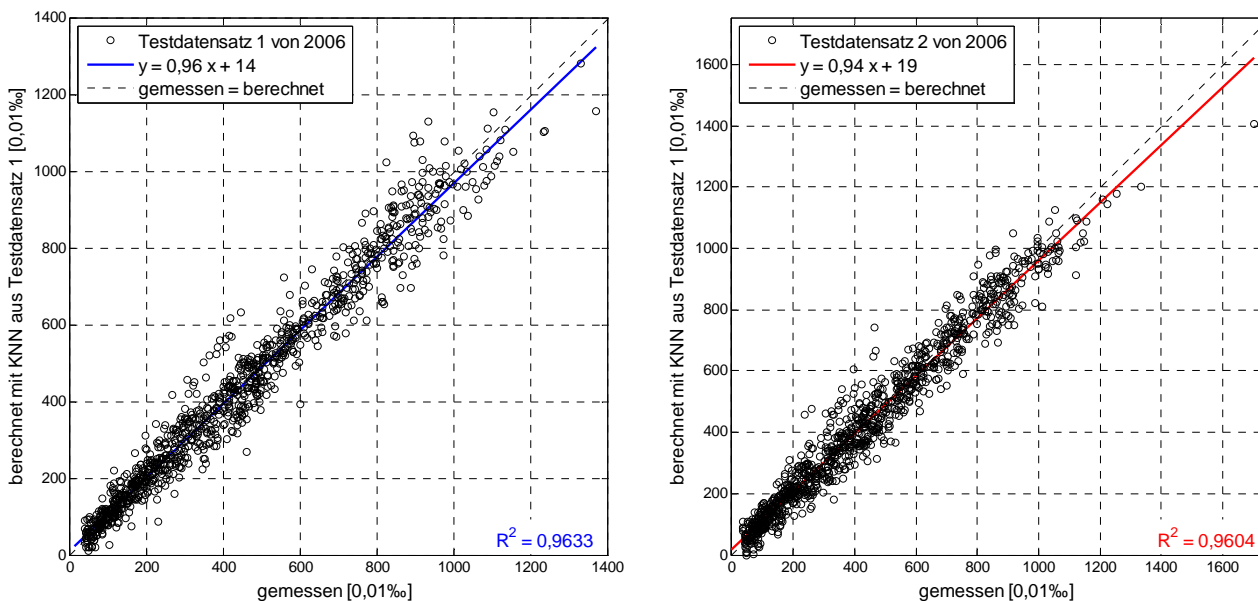


Abb. 20: Training und Anwendung des KNN auf Kontrolldatensätze nach dem Ausbau

Die Analysen verdeutlichen, dass die neuronalen Netze sowohl für den Zustand der Weser vor dem Ausbau als auch für den Zustand nach dem Ausbau aufgebaut werden können und für die jeweiligen Zeiträume die Datensätze mit hoher Genauigkeit reproduzieren können. Insofern sind die analysierten Abweichungen für die Zeiträume nach dem Ausbau gegenüber den vor dem gemessenen auf Systemänderungen zurückzuführen, die nicht von den bei der Erstellung der künstlichen neuronalen Netze genutzten Eingangsparametern abgebildet werden können. Als Ursache für diese Abweichungen sind die mit dem Ausbau einhergehenden topografischen Änderungen anzusehen. Die neuronalen Netze wurden mit dem Datensatz vor dem Ausbau trainiert und auf die Daten nach dem Ausbau angewandt. Dass ein Ausbau stattgefunden hat, hat das Netz selbst nicht gelernt, daher berechnet es für den Zustand nach dem Ausbau in Abhängigkeit von Salzgehalt und Tide in der Außenweser und dem Oberwasserabfluss bei Intschede, die Salzgehalte an den untersuchten Pegeln tendenziell zu niedrig aus.

5.2. Einfluss saisonaler Effekte

Ein KNN kann den Salzgehalt zuverlässig bestimmen, solange keine erheblichen Änderungen der Randbedingungen auftreten, die im KNN unberücksichtigt sind oder derjenigen, für die das Netz trainiert worden ist. Daher wird hier geprüft, ob und wenn inwieweit, die unterschiedliche Länge der Datensätze möglicherweise durch die Ausblendung saisonaler Besonderheiten zu einer unzureichenden Reproduktion durch die KNN führt.

Sturmfluten sind eine saisonale Besonderheit, die den Salzeintrag in ein Ästuar deutlich beeinflussen: Der Salzgehalt erhöht sich kurzfristig im Ästuar, da größere Tidewassermengen von der See flussaufwärts eindringen. In den Datensätzen der Trainingsjahre 1997 und 1998 sind keine hohen Sturmfluten enthalten, hingegen in denen von 2006-2008 drei schwere Sturmfluten. Obwohl die Wirkungen von Sturmfluten durch Tidehochwasser und Tidehub im äußeren Ästuar in den Randbedingungen für die KNN enthalten sind, soll hier gesondert untersucht werden, ob und wenn inwieweit das Auftreten oder Nichtauftreten von Sturmfluten in beiden untersuchten Zeiträumen für die hier erzielten Ergebnisse von Bedeutung sein kann. Tatsächlich stellt der Wert der Sturmflut vom 01.11.2006 (Britta) einen Ausreißer im zugehörigen Datensatz dar (Abb. 21).

Der gemessene Wert entspricht nahezu dem Doppelten des berechneten. Die entsprechenden Werte der weiterhin betrachteten Sturmfluten vom 09.11.07 (Tilo) und 01.03.08 (Emma) weisen keine vergleichbaren Besonderheiten auf.

Hierin ist ein Indiz zu sehen, das einzelne Daten, wie die von Sturmfluten, insgesamt von nachrangiger Bedeutung für die Ausbildung von KNN sind. Bestätigt wird dieser Hinweis durch die Ergebnisse des Test-KNN für den Datensatz von 2006-2008 (Abb. 20). Das Training des KNN ist ohne den Sturm Britta erfolgt (Abb. 20 - links) und trotzdem bildet der Messwert bei diesem Netz keinen nennenswerten Ausreißer (Abb. 20 - rechts). Daraus ist ableitbar, dass die Ursache der erheblichen Abweichung nicht die unzureichende Berücksichtigung von Sturmfluteffekten ist, sondern die ausbaubedingten Veränderung der Ästuargeometrie.

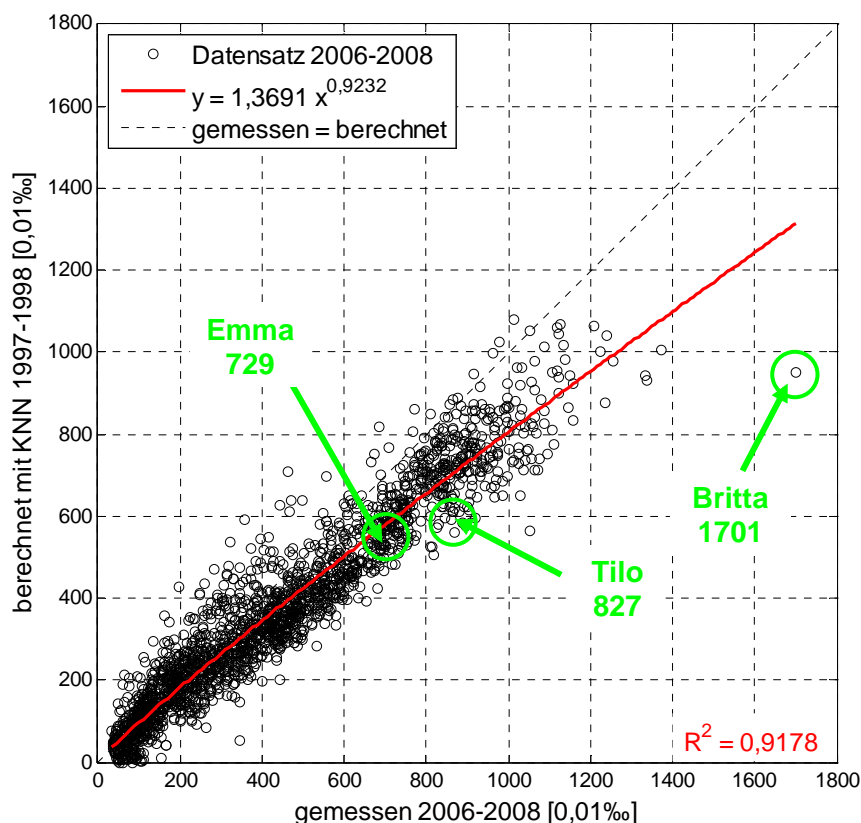


Abb. 21: Einfluss von Sturmfluten auf den Salzgehalt bei der Berechnung durch ein KNN (Station Nordenham)

Bei genauer Betrachtung der Zeitreihen der Stationen Bremerhaven bis Brake (Anlage) sticht ein Zeitraum Herbst 2006 der Zeitreihe 2006-2008 mit relativ hohen Salzgehalten heraus. Hier könnte einen saisonalen Effekt aufgetreten sein, der möglicherweise in den Daten von 1997 und 1998 nicht enthalten ist. An der Station in der Außenweser (Abb. 2) liegen für diesen Zeitraum keine ungewöhnlich hohen Salzgehalten vor, dieser Effekt tritt erst stromauf zunehmender Tendenz an den Station ab Bremerhaven auf. Auch das Oberwasser unterscheidet sich im Herbst 2006 keinesfalls signifikant von dem Abfluss im Trainingsdatensatz von 1997/1998. Die Tidehochwasser in der Außenweser (Anlage) sind in diesem Zeitraum nur für Einzelereignisse -wie die Sturmflut Britta- besonders hoch; damit werden einzelne Ausreißer erklärbar, aber nicht die Unterschätzung des gemessenen Salzgehaltes für die Mehrzahl der Messerwerte, die nach dem Ausbau aufgezeichnet wurden. Das KNN ist demnach mit vergleichbaren Eingangsgrößen trainiert worden, wie sie 2006-2008 vorliegen.

Um hier Klarheit zu schaffen, bleiben -über den Zeitraum Herbst 2006 hinaus- alle Daten unberücksichtigt, die höhere Salzgehalten als sie vor dem Ausbau aufgetreten sind aufweisen. Das Ergebnis zeigt aber, dass die Ergebnisse dadurch keine signifikanten Änderungen erfahren: es treten vergleichbare Abweichungen zwischen Berechnungen und Messungen auf wie für den ge-

samten Datensatz (Abb. 22). Die hohen Salzgehalte, die nur nach dem Ausbau der Unterweser in den Datensätzen enthalten sind und deshalb für das Training des KNN nicht verfügbar waren, sind keinesfalls als Ursache für die ermittelten Abweichungen zum Zustand vor dem Ausbau anzusehen, sondern der im KNN für die Datensätze vor dem Ausbau unberücksichtigt gebliebene Eingriff in die Topografie des Ästuars.

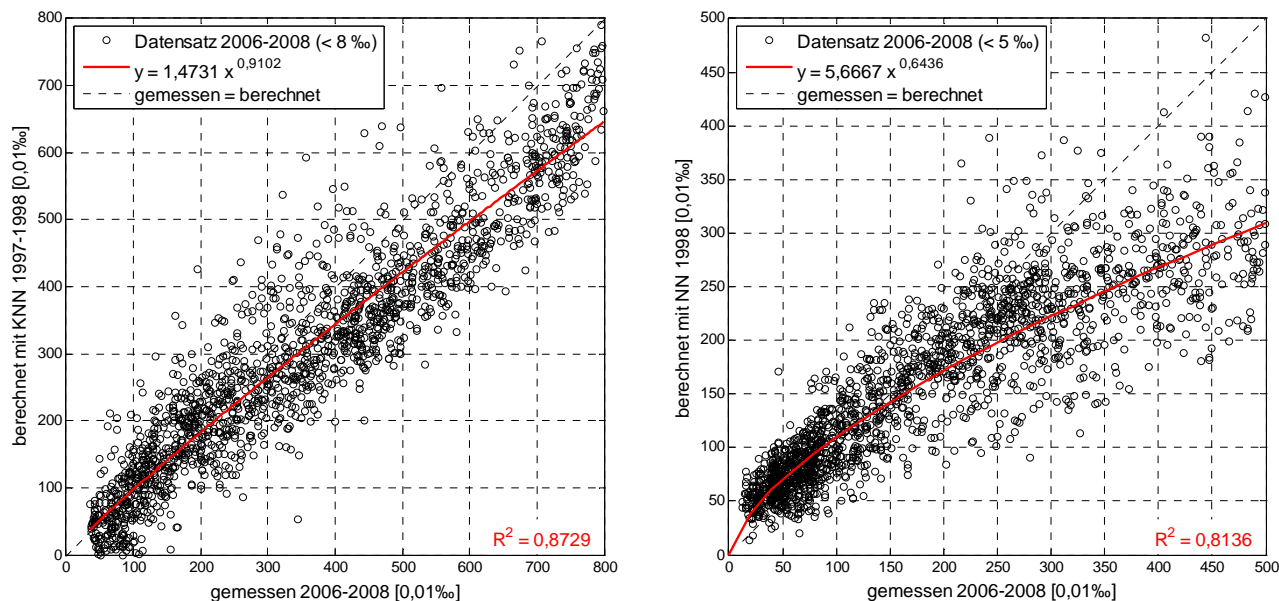


Abb. 22: Streudiagramm für gemessene und mit einem KNN berechnete Salzgehalte bis zu einem Schwellenwert (links: Station Nordenham; rechts: Station Strohauser Plate)

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Um vorliegenden Hinweise auf ausbaubedingte Veränderungen des Salzeintrags in die Unterweser nachgehen und sie vor allem quantifizieren zu können sind künstliche neuronale Netze eingesetzt worden. Sie haben sich dabei als geeignetes Werkzeug erwiesen, um Muster in Datensätzen zu erkennen und soweit zu erlernen, dass sie über funktionale Zusammenhänge mit hoher Genauigkeit reproduziert werden.

Mit Datensätzen vor dem Ausbau aus den Jahren 1997 und 1998 wird jeweils ein KNN für die Pegel Bremerhaven, Nordenham, Strohauser Plate und Brake aufgebaut und anschließend auf die Datensätze von 2006 bis 2008 angewendet, die nach dem Ausbau erfasst wurden. Die KNN können nach entsprechendem Training mit den Eingangsgrößen Salzgehalt, Tidehub und Tidehochwasser in der Außenweser sowie Oberwassermenge bei Intschede den Salzgehalt an der jeweiligen Station reproduzieren. Diese Parameter sind hinreichend, um die äußeren Einwirkungen auf die Salzgehalte im Ästuar soweit zu erfassen, dass bei unverändertem internen Systemverhalten die Ausbildung von Salzgehalten funktional erfasst wird. Erst die ausbaubedingte Änderung der Topografie führt dazu, dass die für Datensätze von 1997/1998 vor dem Ausbau trainierten künstlichen neuronalen Netze für die Salzgehalte aus den Datensätzen von 2006 bis 2008 deutlich abweichende Ergebnisse liefern: die für den Zustand vor dem Ausbau trainierten KNN unterschätzen die danach gemessenen Salzgehalte deutlich, insbesondere bei höheren Werten. Damit kann nachgewiesen werden, dass durch den Ausbau der Außenweser ein verstärkter Salztransport in die Unterweser erfolgt.

Die Ergebnisse sind auf Plausibilität hinsichtlich unterschiedlichen Umfangs der Datensätze und saisonaler Effekte geprüft worden. Hierbei hat sich klar gezeigt, dass die Ergebnisse eindeutig sind und unabhängig von Länge der Datensätze und erfasster saisonaler Perioden zu gleich gerichteten Ergebnissen führen.

Auf Grundlage der Ergebnisse für die künstlichen neuronalen Netze ist eine Quantifizierung ausbaubedingter Änderungen ermittelt worden; indem ein Vergleich der für die von den KNN reproduzierten Salzgehalte oberhalb erkennbarer Schwellenwerte gebildeten Regressionen vorgenommen wurde (Tab. 2).

Tab. 2: Änderung des Salzgehalts an den untersuchten Pegeln in einer Übersicht

Pegel	Schwellenwert	Δ_{SW} [‰]	Δ_{ges} [‰]
Bremerhaven	4 ‰	1,20	1,10
Nordenham	2 ‰	0,93	0,73
Strohauser Plate	1,5 ‰	1,04	0,53
Brake	1,5 ‰	0,06	-0,15

An jeder Station sind ausbaubedingte Veränderungen der Salzgehalte erkennbar (Tab. 2). Mit Ausnahme von Brake, wo eine geringfügige Abnahme festzustellen ist, erhöhen sich die Werte an allen stromab gelegenen Stationen. Der Salzgehalt erfährt dabei jedoch keine konstanten Zunahmen, sondern erhöhen sich oberhalb eines Schwellenwerts zunehmend mit wachsenden Absolutwerten. Offenbar dringen Wasserkörper mit großen Flutvolumen und hohen Salzgehalten im unteren Abschnitt der Unterweser weiter stromauf vor als vor dem Ausbau der Außenweser. Unterhalb der der Schwellenwerte weisen die Salzgehalte -zwar mit stärkerer Streuung als vor dem Ausbau- im Mittel dieselbe Größenordnung auf wie vorher. Oberhalb davon treten hingegen deutliche ausbaubedingte Änderungen auf. Maßgebend im Sinne der Beweissicherung sind aber weiterhin die Mittelwerte für die Gesamtheit der Daten

7. Literaturverzeichnis

- DEMUTH, H., M. BEALE & M. HAGAN (2010): Matlab: Neural Network Toolbox 6 - User's Guide.
- KRUSE, H., R., MANGOLD, B., MECHLER & O. PENGER (1991): Programmierung Neuronaler Netze - Eine Turbo Pascal Toolbox. Addison-Wesley GmbH - Bonn.
- STRECKER, S. (1997): Künstliche Neuronale Netze - Aufbau und Funktionsweise. Arbeitspapiere Nr. 10/1997. Lehrstuhl für allg. BWL und Wirtschaftsinformatik, Universität Mainz.
- WSA Bremerhaven (2010): Dokumentation und Durchführung der im Planfeststellungsbeschuß für den Ausbau der Bundeswasserstraße Weser von km 65 bis km 130 zur Herstellung einer Mindesttiefe von 14 m unter Seekartennull angeordneten Beweissicherungsauflagen und Bewertung der Ergebnisse - Abschlussbericht
- ZELL, A. (1994): Simulation Neuronaler Netze. Addison-Wesley GmbH - Bonn.

8. Abkürzungen und Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>
b	= Bias	[-]
KNN	= k ünstliches n euronales N etz	[-]
SKN	= S ee k artennull	
Tdh	= T ide h ub	[m]
THW	= T ide h och w asser	[NN+m]
TNW	= T ide n iedrig w asser	[NN+m]
w	= Gewichte	[-]

9. Anlage

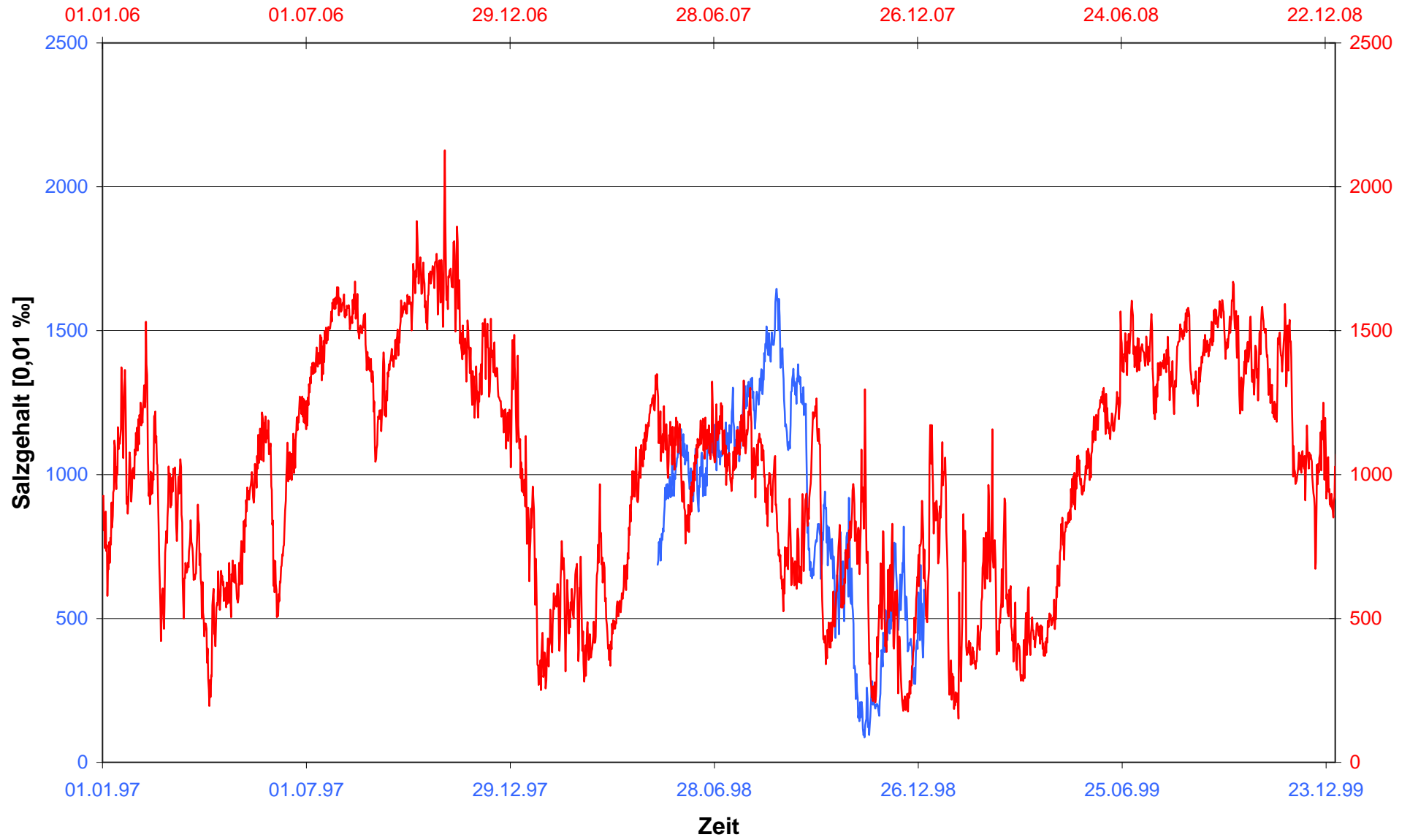


Abb. 23: Verfügbare Zeitreihen des Salzgehalts bei Bremerhaven [0,01 ‰]

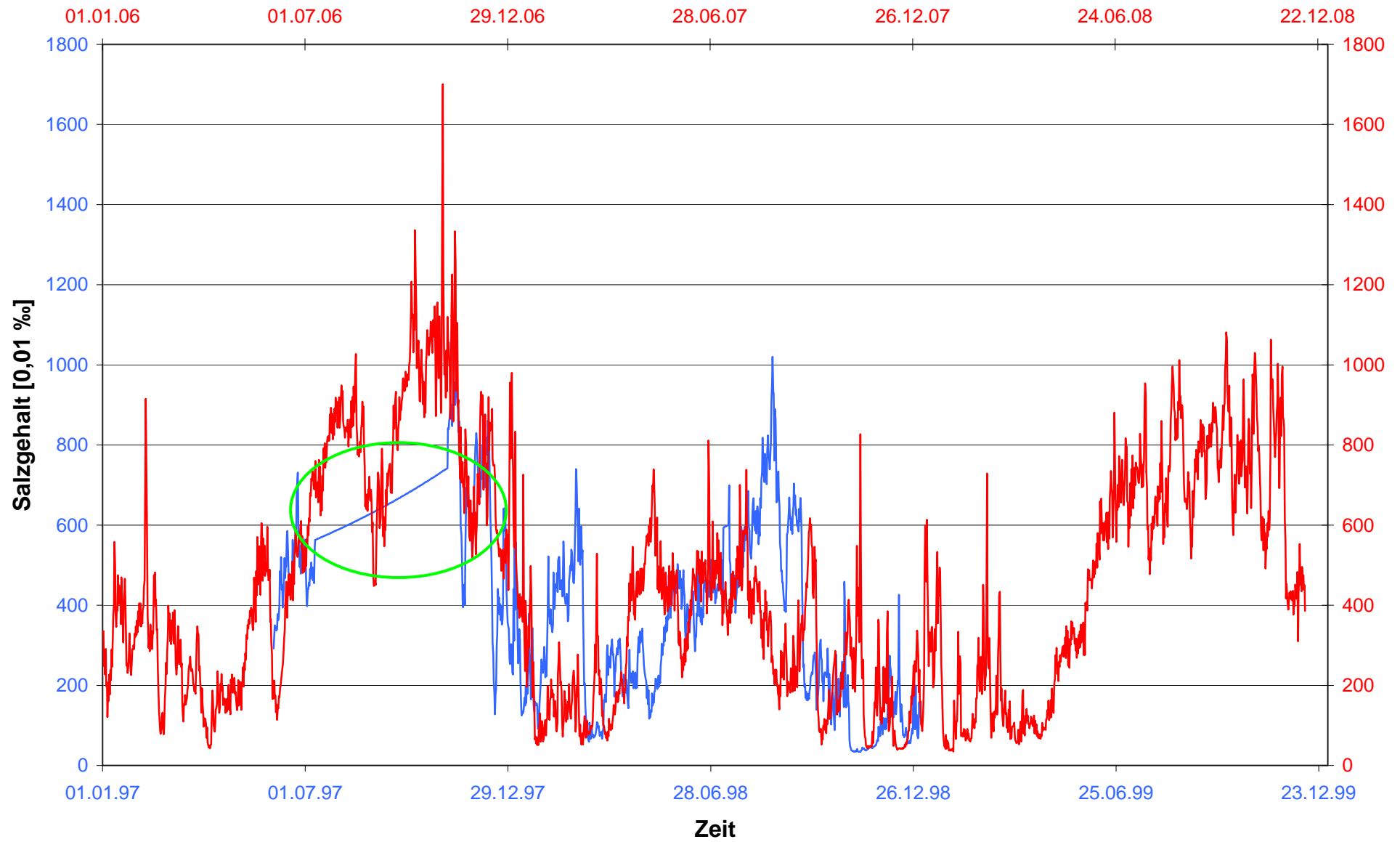


Abb. 24: Verfügbare Zeitreihen des Salzgehalts bei Nordenham [0,01 ‰]

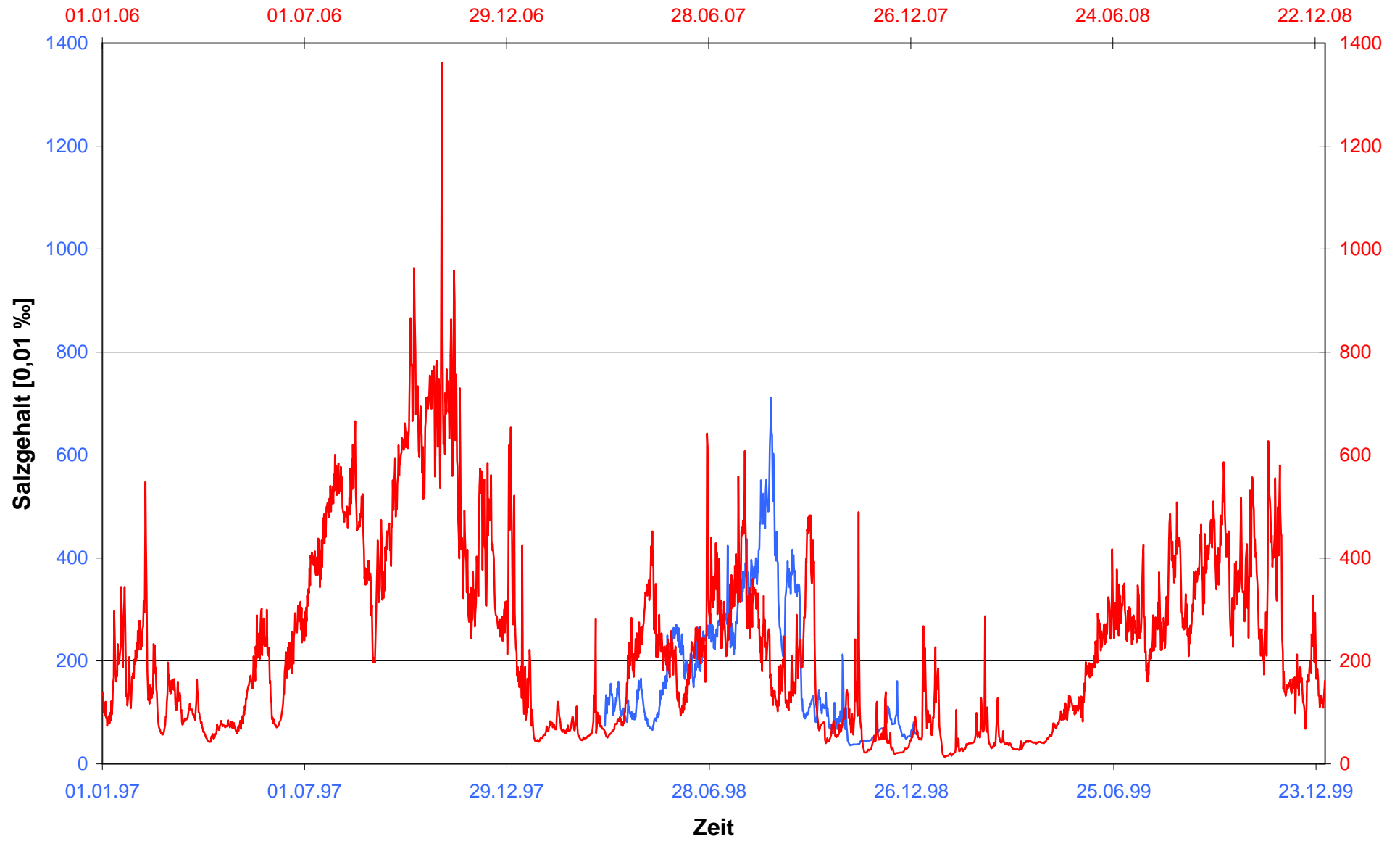


Abb. 25: Verfügbare Zeitreihen des Salzgehalts an der Strohauser Plate [0,01 ‰]

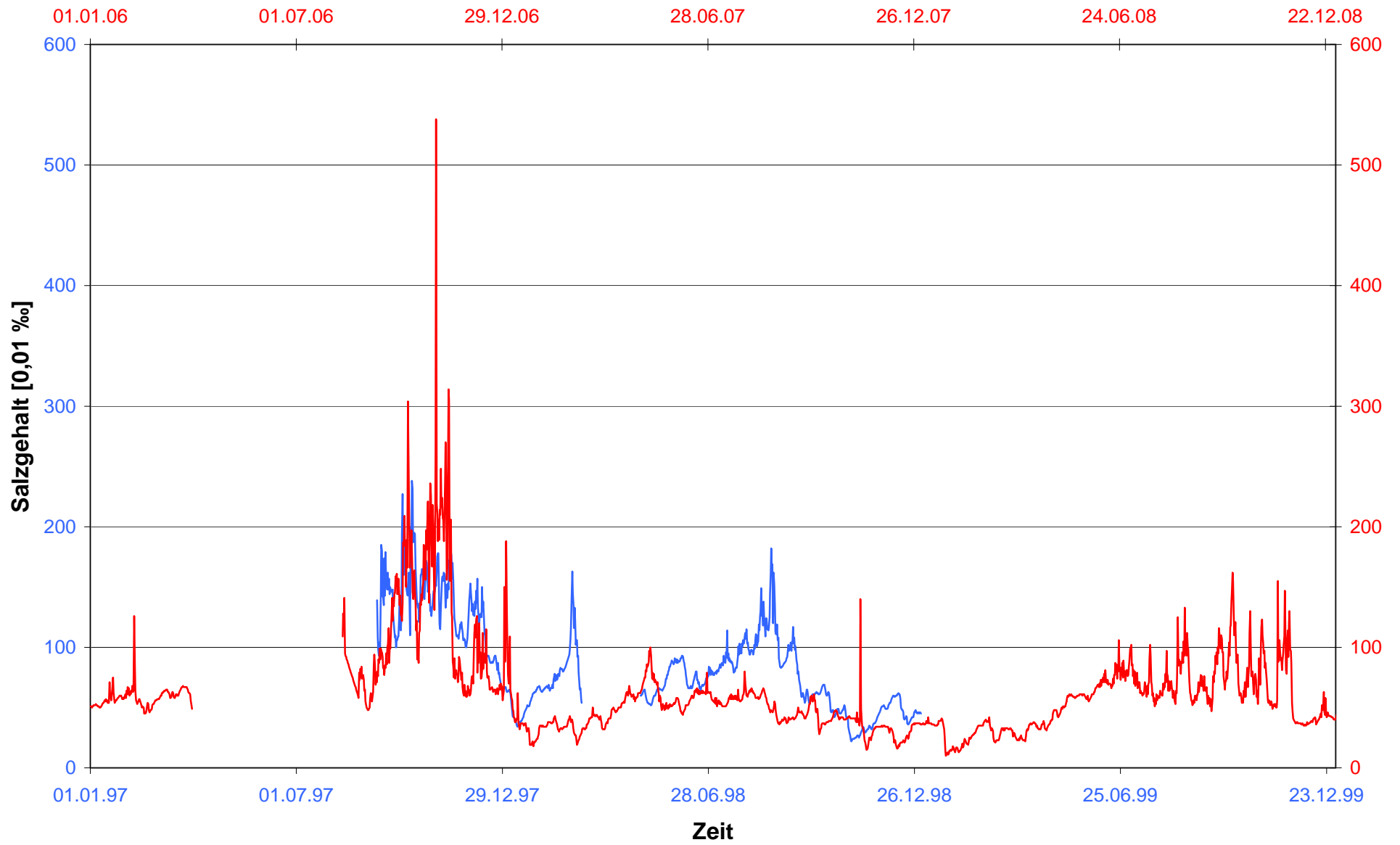


Abb. 26: Verfügbare Zeitreihen des Salzgehalts bei Brake [0,01 ‰]

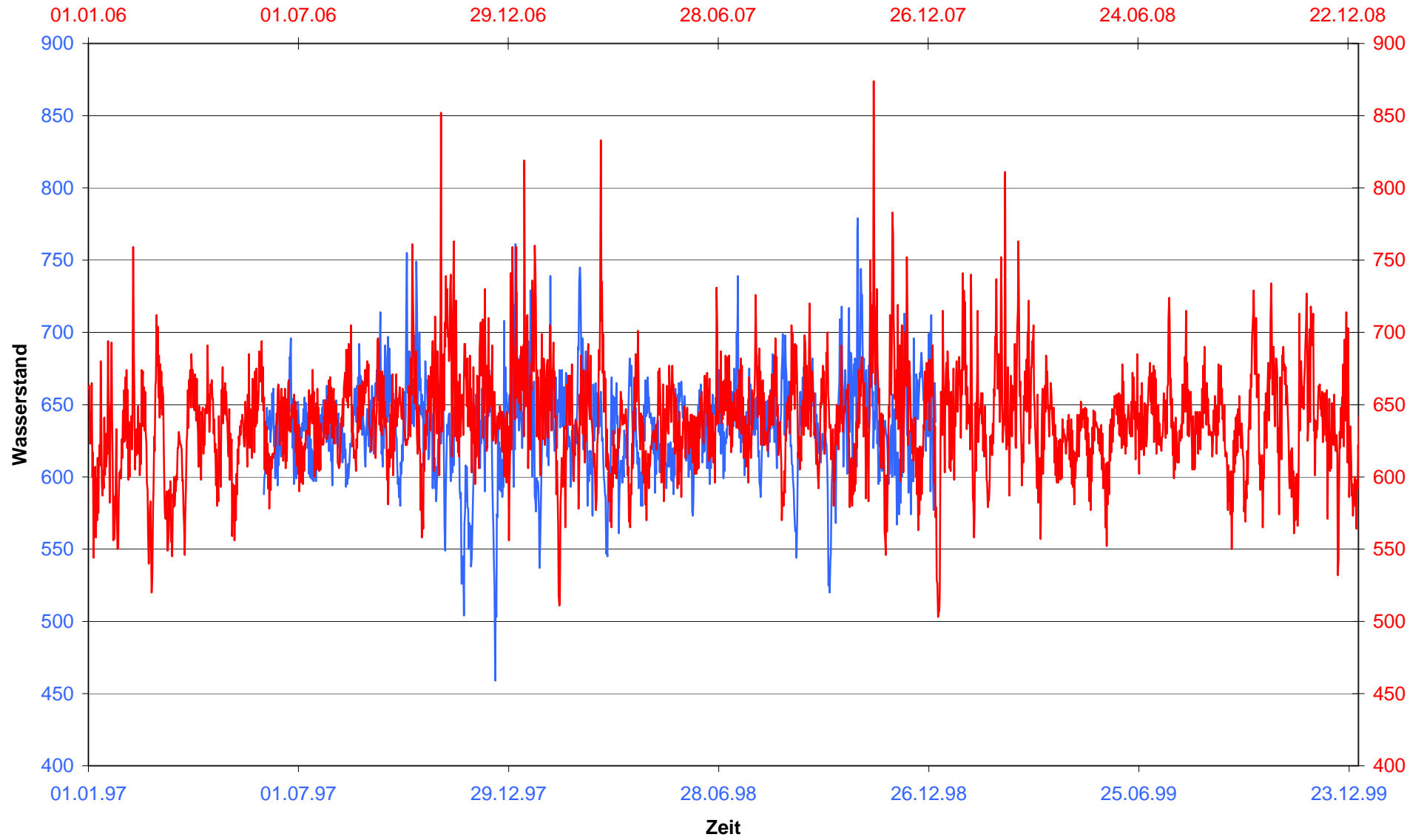


Abb. 27: Verlauf des THW an der Station in der Außenweser [cm]