

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Schüttrumpf, Holger; Rahlf, Holger

Ausbreitung einer Kühlwasserfahne unter Tideeinfluss

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103821>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schüttrumpf, Holger; Rahlf, Holger (2006): Ausbreitung einer Kühlwasserfahne unter Tideeinfluss. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 211-218.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Ausbreitung einer Kühlwasserfahne unter Tideeinfluss

Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf und Dipl.-Ing. Holger Rahlf

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens JadeWeserPort war es erforderlich, Aussagen zur Wirkung des geplanten Hafenbauwerks auf die Kühlwasserausbreitung des benachbarten Kohlekraftwerks in der Innenjade zu treffen. Die naturähnliche Simulation der Temperaturentbreitung unter Tideverhältnissen stellt in diesem Zusammenhang eine besondere Herausforderung an die numerische Modellierung dar.

1 Einleitung

In der Innenjade ist vor dem Voslapper Groden der Bau des JadeWeserPorts (JWP) mit einer Stromkaje von 1.725 m nutzbarer Länge und einer Sollsohltiefe im Zufahrtbereich von SKN - 18 m für Schiffe mit einer Kapazität von mehr als 8000 TEU, einer Länge von 430 m und einem Tiefgang von 16,5 m geplant (JWPE, 2006) (Abb. 1). Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens war im Auftrag der JadeWeserPort Entwicklungsgesellschaft (JWPE) von der Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg - (BAW-DH) eine wasserbauliche Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen der abiotischen Systemparameter für die Antragsunterlagen zu erstellen. Daher war es erforderlich, die Wirkung der Baumaßnahme auf die Tidedynamik, die Morphodynamik, die Sturmflutdynamik sowie die Kühlwasserausbreitung des benachbarten Kohlekraftwerks auf der Grundlage hydronumerischer Simulationen zu beschreiben. Gegenstand des vorliegenden Beitrags sind die Untersuchungen zur Kühlwasserausbreitung. Die Untersuchungen zu den Aspekten Tide- und Morphodynamik wurden von Kahlfeld u. Schüttrumpf (2005) beschrieben.

2 Wärmehaushalt von Jadebusen, Innenjade und Außenjade

Um die Ausbreitung des Kühlwassers nach Bau des JadeWeserPorts zu beurteilen, ist eine Beschreibung des Wärmehaushalts der Jade und der beteiligten Prozesse unter besonderer Berücksichtigung der Kühlwasserausbreitung auf der

Grundlage von Naturmessungen unverzichtbar. Daher wurde sowohl auf Dauermessstationen und Profilmfahrten (Visscher, 2003) als auch auf Satellitenfernerkundungsdaten zurückgegriffen (Brockmann Consult, 2002).

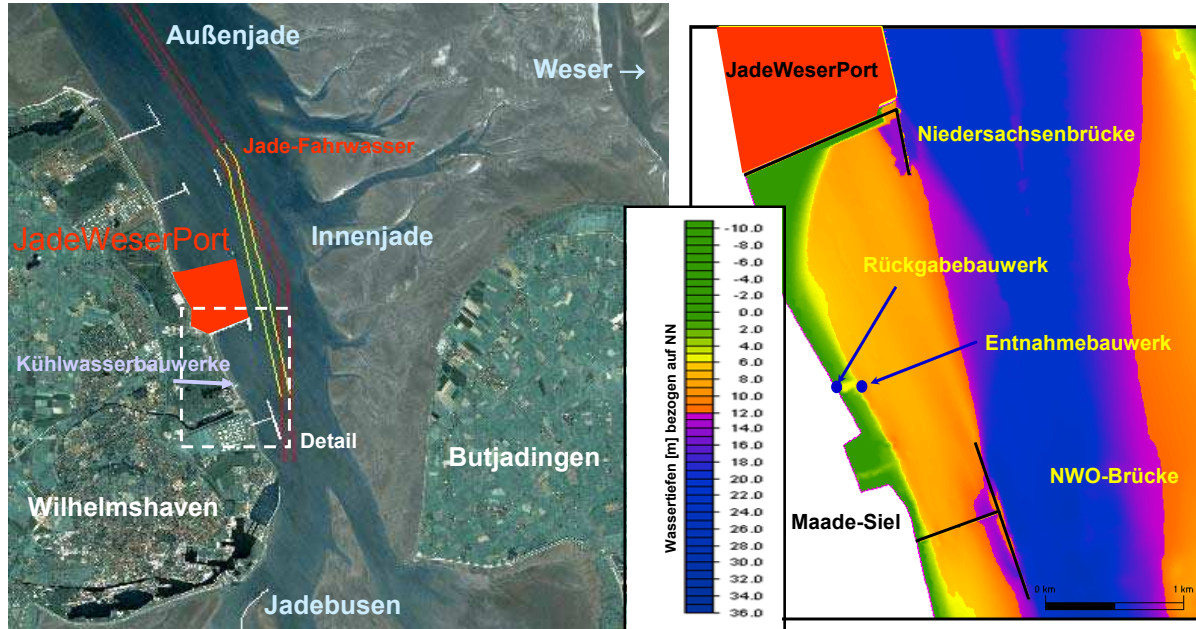


Abbildung 1 Innenjade mit geplantem JadeWeserPort und Lage der Kühlwasserbauwerke

Als problematisch bei der Durchführung der Naturmessungen haben sich der unetliche Kraftwerksbetrieb mit häufigen Abschaltungen des Kraftwerks aufgrund betrieblicher Randbedingungen für die Profilmfahrten und Dauermessstationen sowie der Bewölkungsgrad für die Satellitenfernerkundung erwiesen. Aufgrund der kurzen Betriebszeiten des Kraftwerks steht keine Gleichgewichtssituation (100% Kraftwerksbetrieb über mehrere Tage, mittlere Tideverhältnisse, Temperaturgleichgewicht zwischen Atmosphäre und Wasser) für die Datenauswertung zur Verfügung.

Der Wärmehaushalt der Jade wird durch anthropogene und nicht-anthropogene Einflüsse bestimmt. Zu den anthropogenen Einflüssen gehören z.B. die Kühlwassereinleitung und Entnahme durch das Kraftwerk, die Einleitung von Sole (Kavernenfeld Etzel) im Bereich der Niedersachsenbrücke sowie zeitlich befristete Einleitungen von Süßwasser aus der Maade.

Zu den nicht-anthropogenen Einflüssen auf den Wärmehaushalt der Jade gehören der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre (z.B. Globalstrahlung, Rückstrahlung, atmosphärische Gegenstrahlung, etc.) sowie dem Boden und ihre Auswirkungen auf die unterschiedliche Erwärmung flacher und tiefer Wasserschichten in Innenjade und Jadebusen bzw. der Wattflächen und die daraus resultierenden Temperaturexaustausch- und Strömungsprozesse. Der nicht-anthropogen beeinflusste Wärmehaushalt der Jade wird durch zeitliche und räumliche Effekte bestimmt. Zu den zeitlichen Effekten gehören jahreszeitliche Temperaturschwän-

kungen ($\Delta T \approx 17$ K), Tag-Nacht Schwankungen ($\Delta T \approx 2$ K) und tidebeeinflusste Schwankungen der Temperatur ($\Delta T \approx 0,5$ K). Zu den räumlichen Effekten gehören Temperaturlängsgradienten, Temperaturquergradienten und die Temperaturverteilung in der Vertikalen.

2.1 Kühlwasserausbreitung in der Innenjade

Das Kraftwerk entnimmt zwischen Maadesiel und Niedersachsenbrücke bis zu $30 \text{ m}^3/\text{s}$ Kühlwasser aus der Innenjade und gibt es um maximal 10 K erwärmt zurück. Eine Erwärmung des Kühlwassers auf über $33 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (6-Stunden-Mittelwert) ist nicht zulässig. Die Entnahme des Kühlwassers erfolgt über ein Entnahmebauwerk, das ca. 130 m vor dem Deichfuß liegt (Abb. 1). Die Sohle des Entnahmebauwerks liegt auf rd. NN-9,0 m. Nördlich des Entnahmebauwerks direkt am Deich liegt das Rückgabebauwerk, das aus einem Auslauftrichter und drei Überlaufschwelen besteht. Die befestigte Sohle des äußeren Trichterbereiches fällt von NN-2,50 m auf NN-6,0 m ab.

Die Kühlwasserausbreitung wird im Wesentlichen von der Tidedynamik in der Innenjade bestimmt (Abb. 2). Die Tidedynamik führt zur Ausbreitung der Wärme infolge advektiven Transports und Dispersion. Beide Prozesse (Advektion und Dispersion) finden im bewegten Wasser gleichzeitig statt und können nicht voneinander getrennt werden. Die Advektion wird insbesondere anhand der Ausbreitung der Kühlwasserfahne mit der Tide entlang des Ufers deutlich. Bei Flutströmung wandert die Kühlwasserfahne vom Auslassbauwerk nach Süden in Richtung Jadebusen und erreicht bei Flutstromkenterung ihre maximale Ausdehnung südlich der 4. Hafeneinfahrt. Ein Teil der erwärmten Temperaturfahne breitet sich auch vor dem Maadesiel und in der 4. Einfahrt aus. Die Dispersion ist insbesondere an der Zunahme der Breite der Kühlwasserfahne mit der Entfernung zum Auslaufbauwerk und der damit verbundenen Wärmedurchmischung zu erkennen.

Bei Flutstromkenterung findet die Wärmeausbreitung am Entnahmequerschnitt im Wesentlichen durch den Kühlwasserrückgabestrom und die damit verbundenen ufernormalen Strömungsgeschwindigkeiten statt. Durch diese Strömungen findet eine wirkungsvolle Querausbreitung der Kühlwasserfahne statt. Dadurch erreicht die Breite der Kühlwasserfahne bei Flutstromkenterung am Einleitungsquerschnitt ihr Maximum.

Bei einsetzender Ebbeströmung beginnt die Kühlwasserfahne nach Norden zu wandern. Dabei zieht die Kühlwasserfahne wieder am Auslassbauwerk vorbei und es findet ein zusätzlicher Wärmeeintrag infolge Kühlwasserzufuhr in das bereits erwärmte Wasser statt.

Die Ausbreitung der Kühlwasserfahne erreicht bei Kenterung der Ebbeströmung das Ufer vor dem Voslapper Groden. Bei Ebbestromkenterung findet wiederum eine starke Querausbreitung der Kühlwasserfahne am Rückgabequerschnitt statt, wodurch die Breite der Kühlwasserfahne ein zweites Maximum erreicht. Aufgrund der geringen Wassertiefen bei Ebbestromkenterung saugt das Entnahmebauwerk zu diesem Zeitpunkt - im Verhältnis zu den anderen Tidephasen - relativ warmes Wasser an.

Nach Ebbestromkenterung zieht die Kühlwasserfahne bei Flutströmung teilweise wieder am Auslassbauwerk vorbei und es findet wiederum eine weitere Kühlwasserzufuhr in das bereits erwärmte Wasser statt. Der Temperaturerhöhung infolge Kühlwasserzufuhr wirken die Wärmeabgabe an der Oberfläche (insbesondere durch Verdunstung) sowie die Temperaturausbreitung im Wasserkörper (Abtransport) entgegen, so dass sich das System nicht ständig erwärmt, sondern auch bei ständiger Kühlwasserzufuhr einen Gleichgewichtszustand anstrebt. Dies belegen Temperaturmessungen, die keine nennenswerte Zunahme der Erwärmung bei mehrtägigem Kraftwerksbetrieb zeigen.

Die Messungen in der Natur zeigen (Visscher, 2003), dass die Kühlwasserfahne im Nahbereich des Einleitungsbauwerks bis zur Gewässersohle reicht und auch in 100 m Entfernung noch Mächtigkeiten von bis zu rd. 4,0 m aufweist. Querprofilmessungen im Oktober 2002 zeigen 700 m nördlich des Einleitungsquerschnitts Mächtigkeiten der Temperaturschicht von 2,0 m ca. 0,5 h vor Flutstromkenterung. Die Temperaturfahne erstreckt sich somit nicht nur auf die oberen Zentimeter, sondern erreicht die Größenordnung mehrerer Meter.

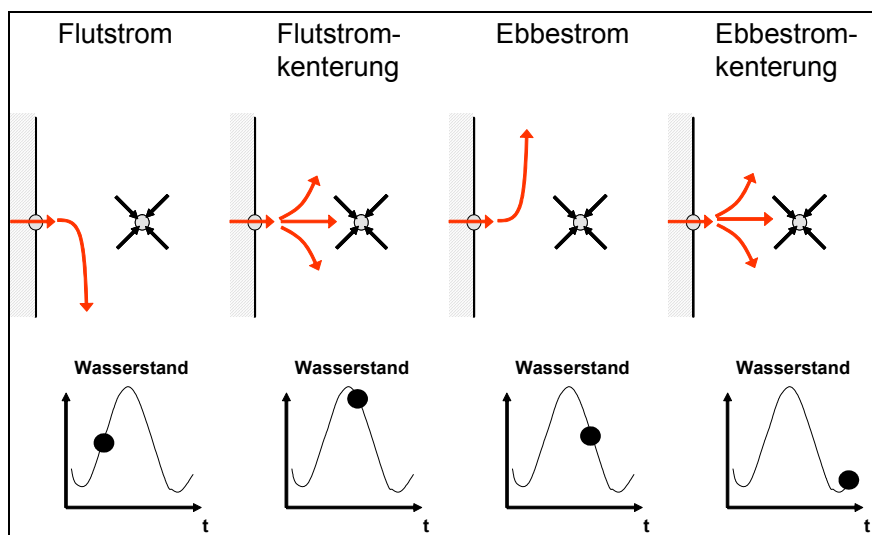


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Kühlwasserausbreitung in der Innenjade

3 Modellbeschreibung

Alle Simulationen zur Kühlwassersituation in der Innenjade wurden mit dem dreidimensionalen - hydrodynamisch-numerischen Modell UNTRIM-3D durchgeführt. UNTRIM-3D ist ein Finite Differenzen-Verfahren für unstrukturierte Gitter zur Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist auf den Internet-Seiten der BAW-DH zu finden (<http://www.hamburg.baw.de/pkb/untrim/untrim-de.htm>). Die Verwendung eines 3D-Modells war erforderlich, um insbesondere die vertikale Temperaturverteilung naturähnlich nachbilden zu können.

Das Modellgebiet, das die gesamte Jade einschließlich der Außen- und der Unterweser umfasst, wurde für die 3D-Untersuchungen durch ca. 4,5 Mio. Elemente mit einer vertikalen Auflösung von 0,5 m oberhalb NN-3 m, von 1,0 m oberhalb von NN-22 m, von 2,0 m unterhalb von NN-22 m und einer horizontalen Auflösung zwischen ca. 10 m und 2200 m nachgebildet. Fein aufgelöst wurde insbesondere die Innenjade, um die Prozesse im Nahbereich des geplanten JadeWeserPorts naturähnlich nachbilden zu können.

Für die Steuerung des Modells wurden Randwerte verwendet, die hinsichtlich der Strömungen und Wasserstände einen charakteristischen Systemzustand der Jade repräsentieren und über den Zeitraum eines Nipp-Spring-Tidezyklusses andauern. Als Simulationszeitraum wurde daher der 31.5.2002 bis 15.6.2002 gewählt.

Die Modellierung des Kühlwassers wurde unter der Annahme einer 100 % Kraftwerksleistung mit einer konstanten Entnahmemenge (= Rückgabemenge) von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer konstanten Erwärmung von 10 K durchgeführt. Daraus ergibt sich eine maximale Abwärmemenge von 1255 MJ/s.

Der Einfluss des Windes auf die Temperaturentbreitung wurde im Rahmen der Untersuchungen zur Kühlwassersituation nicht berücksichtigt. Aufgrund der Systematik der wasserbaulichen Systemanalyse zur Ermittlung ausbaubedingter Änderungen konnte auf den Einfluss des Windes verzichtet werden.

Die Wassertemperatur des Jade-Weser-Ästuars wurde zu Beginn der Simulation konstant mit $15 \text{ }^\circ\text{C}$ vorgegeben.

4 Modellkalibrierung

Das verwendete Modell wurde ausführlich für Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten kalibriert (Kahlfeld u. Schüttrumpf, 2005). Im folgenden soll die Plausibilität der Kühlwasserausbreitung im verwendeten Modell beschrieben werden.

Die Kühlwasserausbreitung und der Wärmehaushalt des Jade-Weser-Ästuars werden von zahlreichen Prozessen beeinflusst, die lokal variabel und zeitlich instationär sind und zur Wärmebilanz beitragen. Eine gleichzeitige Messung dieser Prozesse in der Natur in einer hohen Auflösung ist nicht möglich und war in Anbetracht der Zielsetzung auch nicht erforderlich. Die verschiedenen Prozesse überlagern die Kühlwasserausbreitung und ihr Beitrag zur Gesamtwärmebilanz des Jade-Weser-Ästuars ist im Referenzzustand und im Ausbauzustand nahezu gleich, da die aufgespülte Hafenfläche klein im Verhältnis zur Wasseroberfläche des Jade-Weser-Ästuars ist. Daher wurden die Simulationen unter Vernachlässigung der verschiedenen anthropogenen (z.B. Soleeinleitung) und nicht-anthropogenen Prozesse (z.B. Sonneneinstrahlung) durchgeführt, um eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen der Kühlwasserausbreitung zu ermitteln. Die einzige Wärmequelle ist somit die Kühlwassereinleitung. Ein Temperatureaustausch mit der Atmosphäre findet nicht statt. Aufgrund des im Verhältnis zur Kühlwassermenge großen Wasservolumens des Jade-Weser-Ästuars kommt es zu keiner signifikanten Zunahme der mittleren Wassertemperatur im Gesamtsystem während des Analysezeitraums.

Eine vollständige Kalibrierung der Temperatureausbreitung ist aufgrund der verschiedenen, im Rahmen der HN-Modellierung unberücksichtigten anthropogenen und nicht-anthropogenen Prozesse daher nicht möglich. Außerdem traten während der Messphase (August bis November 2002) keine Gleichgewichtssituationen auf und es stehen nur wenige Profildfahrten bei einer 100% Kraftwerksleistung zur Verfügung. Die Ergebnisse der Simulationen für den Referenzzustand wurden daher auf der Grundlage der verfügbaren Naturmessungen auf ihre Naturähnlichkeit überprüft. Die Plausibilisierung der Ergebnisse umfasste die Ausbreitung der Kühlwasserfahne in der Innenjade, die Breite der Kühlwasserfahne und die Entnahmetemperatur. Es konnte hinsichtlich dieser Parameter eine gute Übereinstimmung zwischen Natur und Modell festgestellt werden (<http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/event/2003-06-19/vortrag8.pdf>).

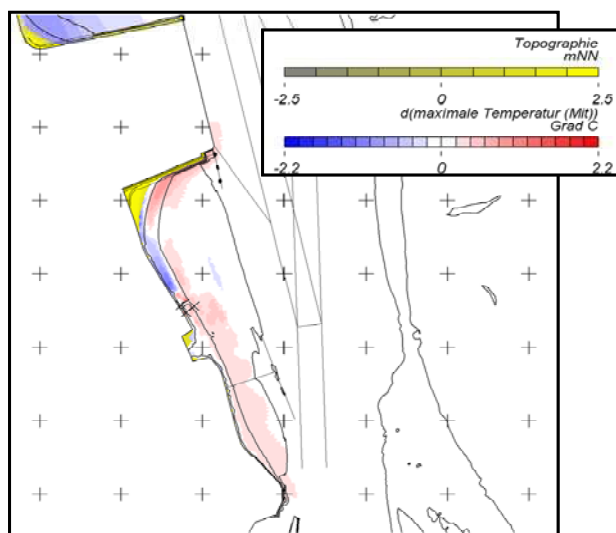
5 Wirkungsweise des JWP auf die Kühlwasserausbreitung

Durch den Bau des JadeWeserPorts werden die Strömungsgeschwindigkeiten in der Innenjade verändert. Ausbaubedingte Änderungen der Strömungen im Nah-

bereich der Kühlwasserbauwerke haben ihre Ursache in der Abschattungswirkung bzw. Stauwirkung des JadeWeserPorts auf die Flut- bzw. Ebbeströmung. Dadurch kommt es im Nahbereich der Kühlwasserbauwerke zu Strömungsabnahmen bei Flut- und Ebbestrom. Die ausbaubedingten Änderungen der Tidedynamik infolge JadeWeserPort sind bei Kahlfeld und Schüttrumpf (2005) dargestellt. Ausbaubedingte Änderungen der Strömungen führen zu Veränderungen der Kühlwasserausbreitung. Eine Abnahme der Flut- und Ebbeströmung bewirkt eine Reduktion der Ausbreitung der Kühlwasserfahne, da das erwärmte Wasser nicht mehr so weit nach Süden in Richtung Jadebusen bzw. nach Norden in Richtung Voslapper Groden transportiert wird. Die Reduktion der Kühlwasserausbreitung infolge advektiven Transports und Dispersion bedeutet gleichzeitig eine Zunahme der Wärmequerausbreitung um Flutstrom- bzw. Ebbestromkenterung.

Aus diesen Überlegungen können die folgenden Schlussfolgerungen auf die ausbaubedingten Änderungen der Kühlwasserausbreitung gezogen werden (Abb. 3):

- Die Kühlwasserausbreitung nach Norden bzw. Süden wird reduziert,
- die Kühlwasserfahne wird an der Südflanke des JWP bei Ebbeströmung in Richtung Fahrwasser umgelenkt,
- die Breite der Kühlwasserfahne nimmt zu.



Dadurch kommt es am Entnahmebauwerk zu einer Phasenverschiebung der Temperaturkurve sowie zu einer Erhöhung der maximalen Temperaturwerte um Tideniedrigwasser (Abb. 4).

Abbildung 3 Ausbaubedingte Änderungen der Kühlwasserfahne

Neben den ausbaubedingten Änderungen der Kühlwassersituation des Kraftwerks waren auch die Auswirkungen der veränderten Kühlwassersituation auf den Wärmehaushalt der Jade zu beurteilen. Die maximale Wärmemenge von 1255 MJ/s, die der Jade zugeführt werden darf, ergibt sich aus der Kühlwassermenge von maximal 30 m³/s und der maximalen Aufwärmspanne von 10 K. Beide Grenzwerte werden durch den JadeWeserPort nicht erhöht.

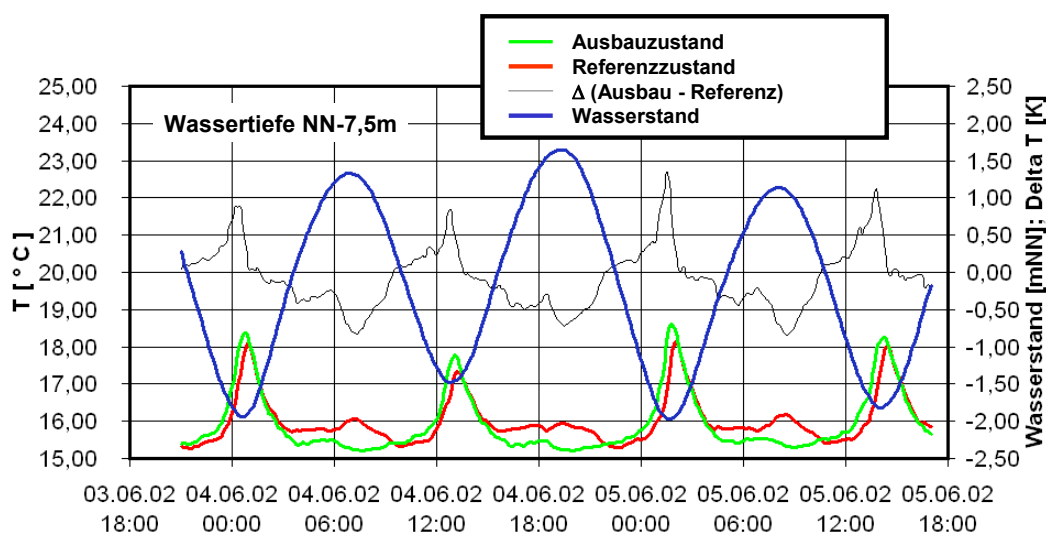


Abbildung 4 Ausbaubedingte Änderungen am Einlauf des Entnahmebauwerks (NN-7,5m)

6 Literatur

Brockmann (2002) Temperaturfernerkundung Jade/Jadebusen – Abschlussbericht. Brockmann Consult 2002 (unveröffentlicht)

JadeWeserPort Realisierungsgesellschaft (2006) Beschreibung des Projekts <http://www.jade-weser-port.de/>

Kahlfeld, A.; Schüttrumpf, H. (2005) Auswirkungen des JadeWeserPorts auf die Tide- und Morphodynamik der Jade. Tagungsband 20. Hydrographentag, Wilhelmshaven. 6.-8.6.2005, S. 9-20

Kunz, H. (1998) Wärmeeinleitung in Tidegewässer und deren Begrenzung durch fachtechnische Behördenentscheidungen. Mitteilungen des Franzius-Instituts. H. 81. 1998

Visscher (2003) Bericht über Temperaturmessungen in der Jade – August bis November 2002; Oktober 1993 bis September 1994. (unveröffentlicht)

Autoren:

Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
 Bundesanstalt für Wasserbau
 Dienststelle Hamburg
 Wedeler Landstr. 157
 22559 Hamburg
 Tel.: (+49) – 40 81908 332
 Fax: (+49) – 40 81908 373
 schuettrumpf@hamburg.baw.de

Dipl.-Ing. Holger Rahlf
 Bundesanstalt für Wasserbau
 Dienststelle Hamburg
 Wedeler Landstr. 157
 22559 Hamburg
 Tel.: (+49) – 40 81908 - 301
 Fax: (+49) – 40 81908 - 373
 rahlf@hamburg.baw.de