

Statkraft Markets GmbH
Kraftwerk «Robert Frank»
Hävern 1
31628 Landesbergen

Bio II, Landesbergen

Modellierung Kühlwassereinleitung

Bericht zur Wärmeausbreitungsberechnung



SIMULTEC AG, KraftWerk1, Hardturmstr. 261, CH-8005 Zürich

Tel: 044 563 86 20, Fax: 044 563 86 29, E-Mail: info@simultec.ch, <http://www.simultec.ch>

Zürich, 14. Dezember 2022

Bio II, Landesbergen, Modellierung Kühlwassereinleitung

Bericht zur Wärmeausbreitungsberechnung

Inhalt

Einleitung	1
Datengrundlage Weser und Meteorologie.....	3
Wärmeverluste in der Rohrleitung.....	6
Modell zur Berechnung der Wärmeausbreitung	8
Modellaufbau	8
Randbedingungen.....	11
Fallstudien	12
Resultate.....	13
Mittlerer Jahresgang: Situation am 31. März	15
Mittlerer Jahresgang: Situation am 23. Juli.....	18
Worst-Case-Simulation: Situation am 2. Januar	21
Worst-Case-Simulation: Situation am 18. Juli	24
Ganglinien an den Beobachtungspunkten.....	27
Temperaturdifferenzen im Abstrom der Einleitung	29
Zusammenfassung	30
Quellen.....	31

Einleitung

Situation

Die Statkraft Markets GmbH plant am bestehenden Kraftwerksstandort «Robert Frank» Hävern 1, 31628 Landesbergen, die Neuerrichtung eines weiteren Biomasseheizkraftwerkes (Bio II). Zur Kühlung des Kraftwerks ist eine Wasserentnahme aus der Weser geplant. Ferner ist die Rückführung einer Wärmeleistung von 29.5 MW vorgesehen. Bei Ausnutzung einer Temperaturdifferenz ΔT von 10°C werden dazu 2'600 m³/h Kühlwasser benötigt. Das Wasser wird über eine bestehende Zuleitung aus der Weser entnommen, im Kondensator erwärmt und über eine bestehende Rohrleitung in das Hafenbecken der Statkraft Markets GmbH eingeleitet. Die Kühlwasser-einleitung in das Hafenbecken erfolgt über ein Streichwehr gleichmässig über die gesamte Hafenbreite verteilt. Das ausgeleitete Kühlwasser gelangt dann über das Hafenbecken in die Weser. (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Lageplan von Weser, Hafenbecken und Zu- und Ableitung

Ziel	Mit Hilfe von Wärmeausbreitungsmodellierungen soll die Erhöhung der Wassertemperatur durch die Einleitung des Kühlwassers in das Hafenbecken ermittelt werden.
Rohrleitung	Bei der Durchströmung der Rohrleitung vom wassergekühlten Kondensator bis zur Rückgabe in das Hafenbecken wird Wärme an den Untergrund abgegeben und in die Atmosphäre abgeleitet. Der Wärmeverlust wird über Schätzformeln berechnet.
Hafenbecken und Weser	Die Wärmeausbreitung über das Hafenbecken in die Weser wird mit dem Programm DELFT3D-FLOW modelliert. Dieses berechnet die dreidimensionale zeitabhängige Strömung des Wassers und die Wärmeausbreitung unter Berücksichtigung des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen. Im Wärmetransportmodell wurden die dreidimensionalen Geometrien der Weser und des Hafens berücksichtigt. Abflussmengen der Weser, Wassertemperaturen, sowie meteorologische Daten wie Lufttemperatur und relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit wurden für jeden Tag über die letzten 10 Jahre gemittelt und als Tageswerte ins Modell aufgenommen. Das Modell wurde über ein hydrologisches Jahr gerechnet und die zeit- und ortsabhängigen Wassertemperaturen wurden in geeigneten Querschnitten bestimmt. Zudem wurde ein Worst-Case-Szenario mit dem mittleren Niedrigabfluss (MNQ) für den Monat Januar und den Monat Juli betrachtet.

Datengrundlage Weser und Meteorologie

Generelle Übersicht Die täglichen Werte der Weserdaten (Abfluss und Temperatur) und der meteorologische Daten (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung) wurden über den Zeitraum von 2012 bis 2022 gemittelt. Üblicherweise werden für solche Mittelungen längere Zeitreihen, zum Beispiel über 30 Jahre, verwendet. Zur Berücksichtigung und besseren Abbildung der bereits eingetretenen Klimaerwärmung ist jedoch eine Mittelung über den Zeitraum der letzten 10 Jahre geeigneter.

Weserabfluss Die gemittelten Abflussdaten der Weser in Stolzenau zeigen hohe Abflüsse im Winter und tiefe, wenig veränderliche Abflüsse im Sommer und Herbst (Abbildung 2). Das mittlere Niedrigwasser MNQ beträgt etwa $66 \text{ m}^3/\text{s}$ (Station Liebenau, Jahrbuch 2015 [1]).

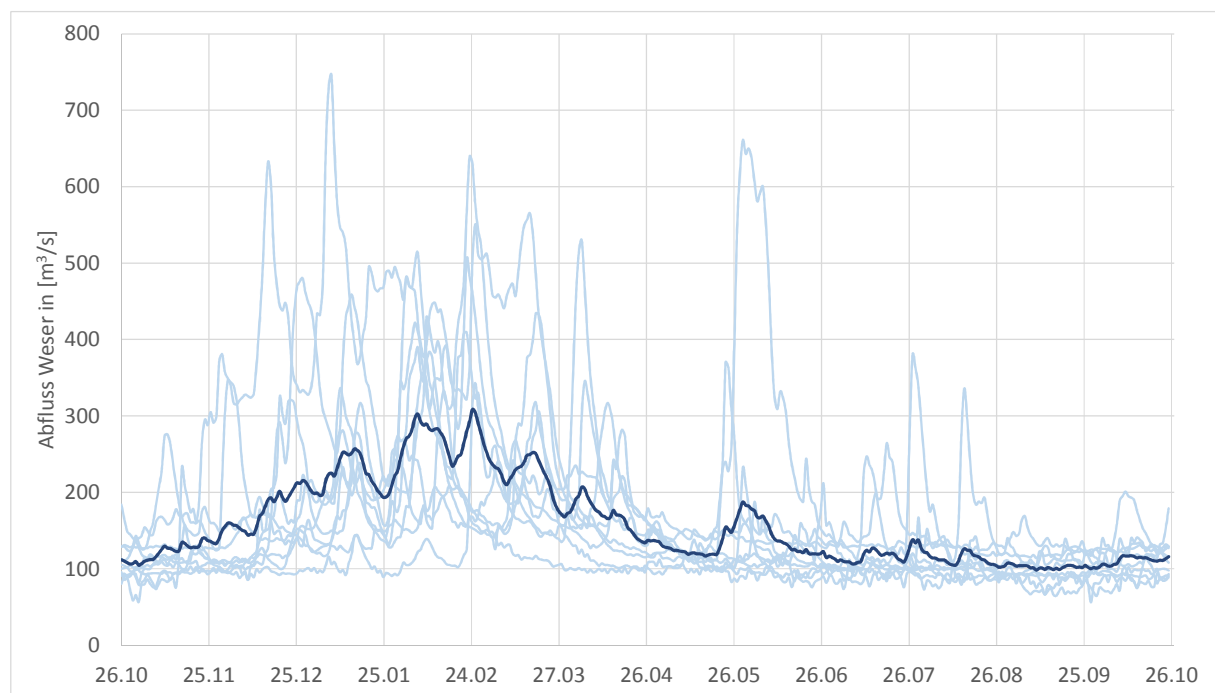


Abbildung 2: Abflüsse der vergangenen 10 Jahre (hellblaue Linien) und über 10 Jahre gemittelter täglicher Abfluss der Weser bei Stolzenau (dunkelblaue Linie)

Weser- und Lufttemperatur Die Wassertemperaturen fallen im Winter unter 5°C und steigen im Sommer über 20°C an (Abbildung 3). Die Lufttemperatur in Nienburg ist im Tagesmittel tiefer als die Weser bei der Staustufe Landesbergen.

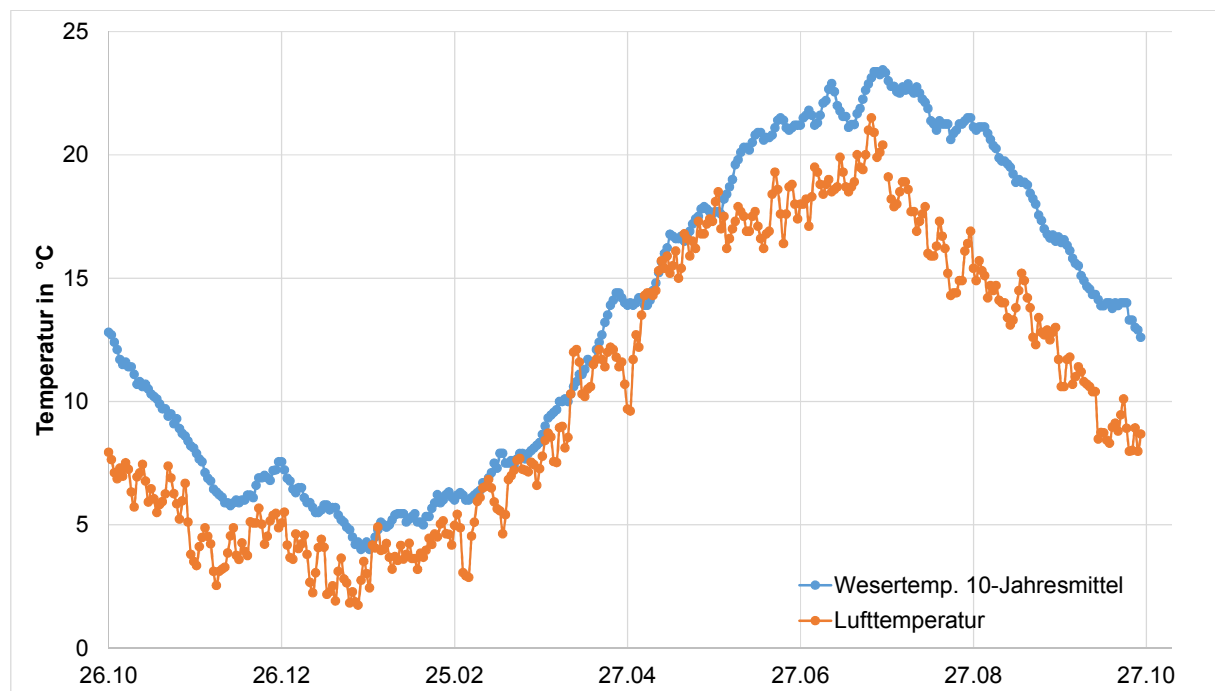


Abbildung 3: Über 10 Jahre gemittelte tägliche Wesertemperatur (blau, Staustufe Landesbergen) und Lufttemperatur (orange, Nienburg)

Einleitbedingungen Die Einleitbedingungen in Oberflächengewässer sind in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) beschrieben. Diese bestimmt im vorliegenden Fall, dass die maximale Temperaturzunahme durch die Kühlwassereinleitung in die Weser (nach vollständiger Durchmischung) maximal 3°C betragen darf. Zusätzlich gelten die Bedingungen, dass die Wesertemperatur nach Einleitung im Winter (Dezember bis März) nicht über 10°C und im Sommer (April bis November) nicht über 25°C betragen darf.

	Fischgemeinschaft							
	ff/tempff	Sa-ER	Sa-MR	Sa-HR	Cyp-R	EP	MP	HP
Anforderungen								
$T_{\max}$ Sommer (April bis November) [°C]		≤ 20	≤ 20	≤ 21,5	≤ 23	≤ 25	≤ 28	≤ 28
Temperaturerhöhung Sommer [ΔT in K]		≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3
$T_{\max}$ Winter (Dezember bis März) [°C]		≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Temperaturerhöhung Winter [ΔT in K]		≤ 1	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 3

Die Werte für Temperaturerhöhung bezeichnen die maximal zulässige Differenz zwischen den Temperaturen oberhalb und unterhalb einer Einleitungsstelle für Abwärme.
Für die Zuordnung der Fischgemeinschaften zu den Gewässertypen nach Anlage 1 Nummer 2.1 gilt Nummer 1.1.1 entsprechend.

Abbildung 4: Einleitbedingungen der OGewV

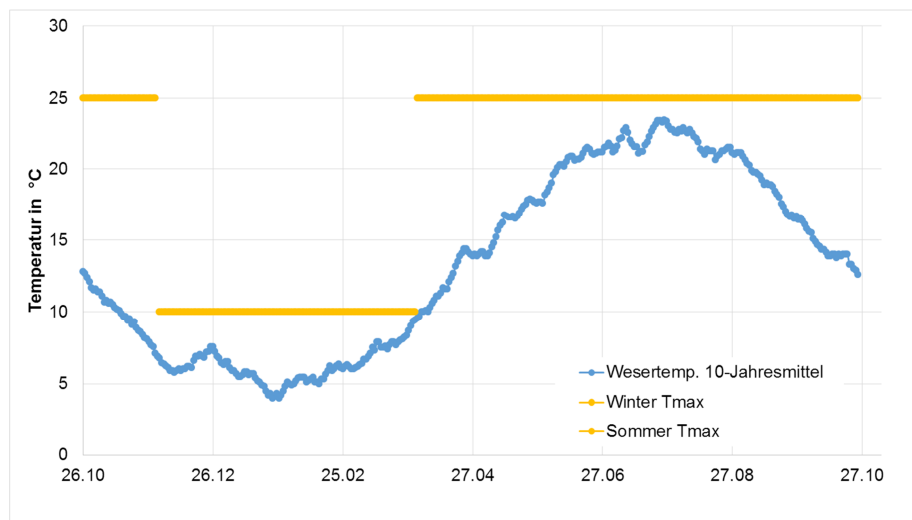


Abbildung 5: Über 10 Jahre gemittelte Tagestemperaturen der Weser und vorgeschriebene Maximaltemperaturen.

Aus der Differenz der vorgeschriebenen Maximaltemperaturen zu den gemittelten Wesertemperaturen wurde die maximal erlaubte Temperaturdifferenz nach Einleitung bestimmt (Abbildung 6). Kritische Zeitpunkte der Einleitung sind Ende März, am Übergang zwischen Winter- und Sommerbedingungen gem. OGewV, sowie im Sommer (Juli und August). Zu diesen Zeiten darf die Weser um weniger als 3°C erwärmt werden.

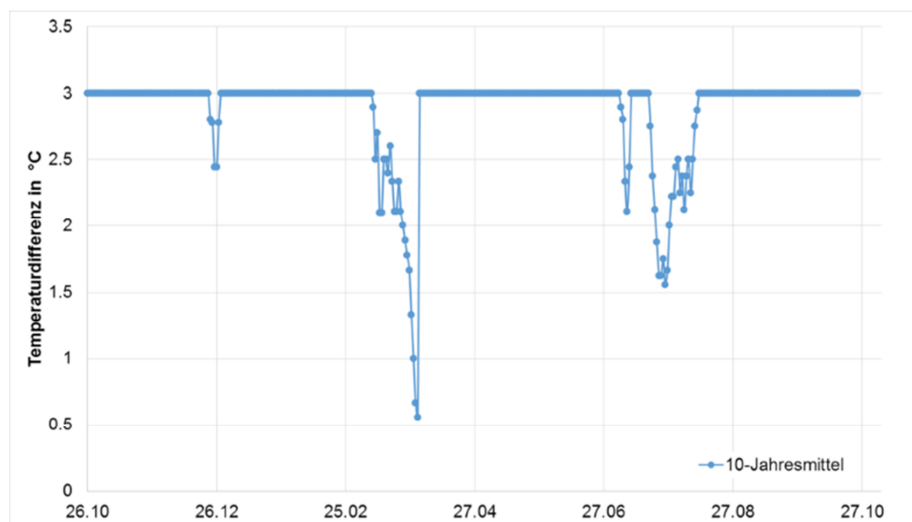
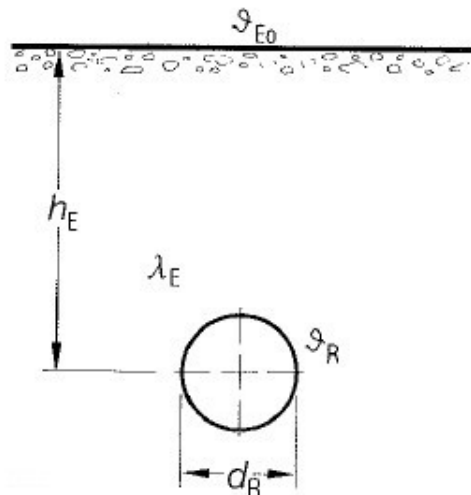


Abbildung 6: Maximal erlaubte Temperaturdifferenz nach Einleitung

Wärmeverluste in der Rohrleitung

Schätzformel

Bei der Durchströmung der Rohrleitung vom wassergekühlten Kondensator bis zur Rückgabe in das Hafenbecken wird Wärme an den Untergrund abgegeben und in die Atmosphäre abgeleitet. Für die Berechnung von Wärmeverlusten von erdverlegten Rohrleitungen existieren Schätzformeln (Abbildung 7) [8].



3.1 Ein Rohr ungedämmt im Erdreich

$$q_R = A_R (\vartheta_i - \vartheta_{E0})$$

$$1/A_R = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \operatorname{arcosh} \frac{2 \cdot h_E}{d_R}$$

Abbildung 7: Berechnung der Wärmeverluste nach [8].

Resultate

Im vorliegenden Fall beträgt die Distanz zwischen der Achse der Rohrleitung und der Atmosphäre etwa 3,8 m. Der Durchmesser der Rohrleitung beträgt 2,5 m. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Temperaturdifferenz zwischen dem Kühlwasser und der Atmosphäre 10 Grad beträgt. Für den ungesättigten Sand wird eine Wärmeleitfähigkeit von 1 W/mK verwendet [9].

Die Berechnung ergibt einen Wärmeverlust von 36 W pro Laufmeter Leitung. Bezogen auf die gesamte Leitung von etwa 1 km Länge bedeutet dies einen Verlust von 36 kW. Verglichen mit der abgegebenen Wärmeleistung von 29'500 kW ist dies vernachlässigbar.

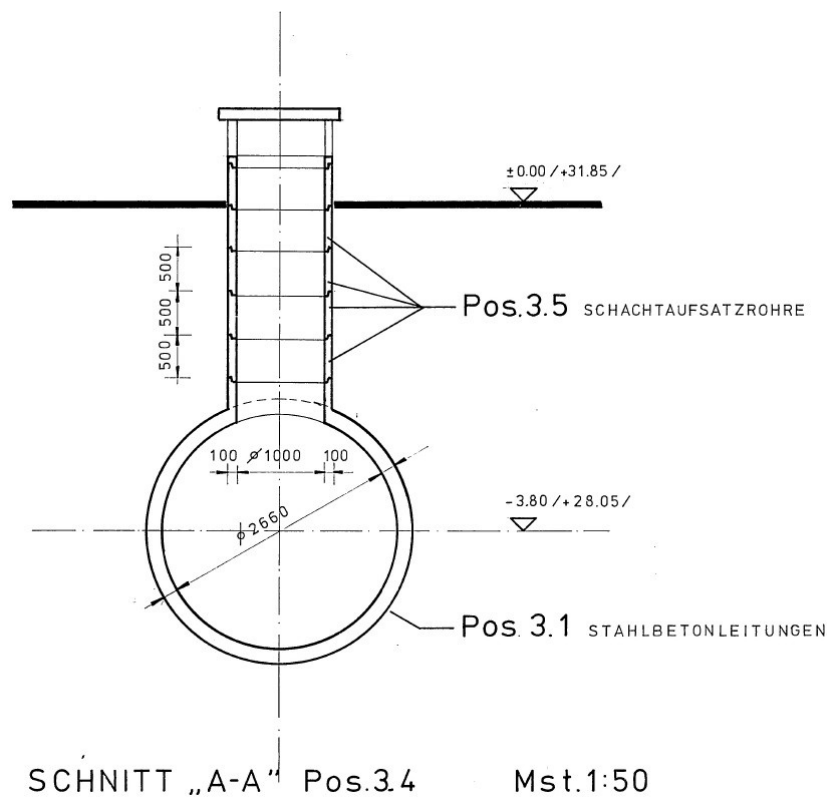


Abbildung 8: Ausschnitt aus einem Plan der Kühlwasserrücklaufkanäle

Modell zur Berechnung der Wärmeausbreitung

Modellaufbau

Software

Zur Modellierung der Kühlwassereinleitung wurde ein dreidimensionales Strömungs- und Wärmetransportmodell aufgebaut. Für die Modellierung der Wärmeausbreitung wurde DELTF3D-FLOW verwendet. Dieser Code löst die partiellen Differenzialgleichungen der Strömung und des Wärmetransports mit Hilfe der Finiten-Differenzen-Methode.

Modellumrisse

Das Modell umfasst die Weser von etwa 1 km südlich des Hafens bis zur Staustufe Landesbergen (Abbildung 10), sowie das Hafenbecken. Das Hafenbecken hat eine mittlere Breite von ca. 120 m. Die Länge des Hafenbeckens beträgt ca. 450 m bis zum Übergang in die Weser. Der Weserquerschnitt wird durch ein Trapezprofil nachgebildet (Abbildung 12). Das Gefälle der Weser wurde aus Jahrbuch Weser 2015 zu 0.29‰ bestimmt [1]. Für das Hafenbecken wurde die reale, im Jahr 2020 gemessene Geometrie verwendet (Abbildung 9).

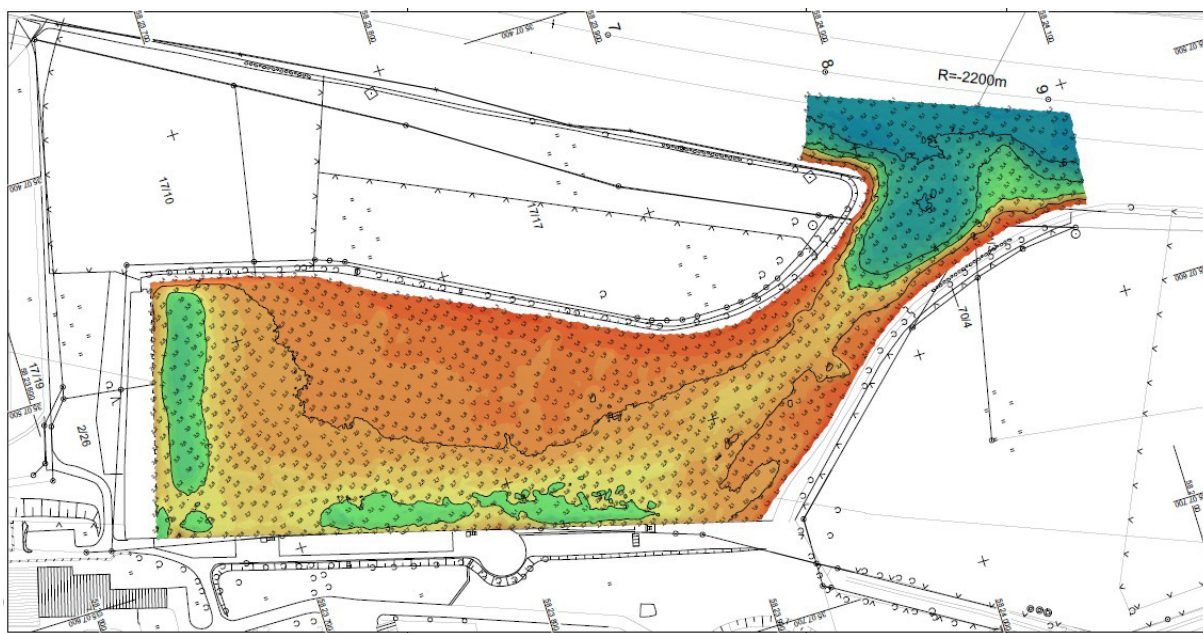


Abbildung 9: Lotung der Hafentiefe im Jahr 2020



Abbildung 10: Modellumrisse und Querschnitte für die Auswertung (rote Linien), sowie Beobachtungspunkte für die zeitliche Entwicklung (grüne Kreuze)

Modelldiskretisierung Zur Berechnung der Strömung und des Wärmetransports wird die Gewässergeometrie durch ein dreidimensionales Gitternetz abgebildet. Das Gitternetz besteht in der Horizontalen aus einem orthogonalen, gewässerparallel gekrümmten Gitter (Abbildung 11). Im Bereich Hafen-Weser beträgt die horizontale Gitterweite weniger als 5 m. Das vertikale Gitter besteht aus 12 Gitterzellen, die obersten und untersten vertikalen Gitterzellen haben die kleinste Ausdehnung (2 bis 6 % der Wasserhöhe) um Interaktionen an der Wasseroberfläche mit der Atmosphäre sowie Interaktionen mit der Wesersohle (Reibung) genügend genau aufzulösen (Abbildung 12). Die Zeitschritte der Simulationen wurden auf 6 Sekunden begrenzt, was bei einer Simulation über ein ganzes Jahr ca. 5 Millionen Rechenschritten entspricht.

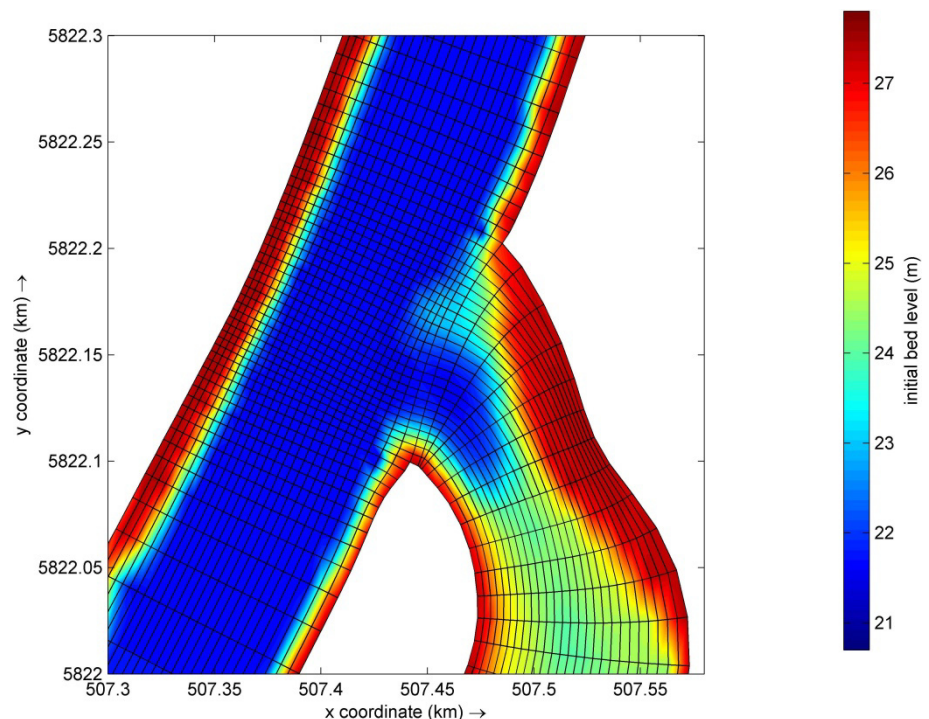


Abbildung 11: Horizontales Gitternetz und Sohlenhöhen im Übergangsbereich Weser-Hafen

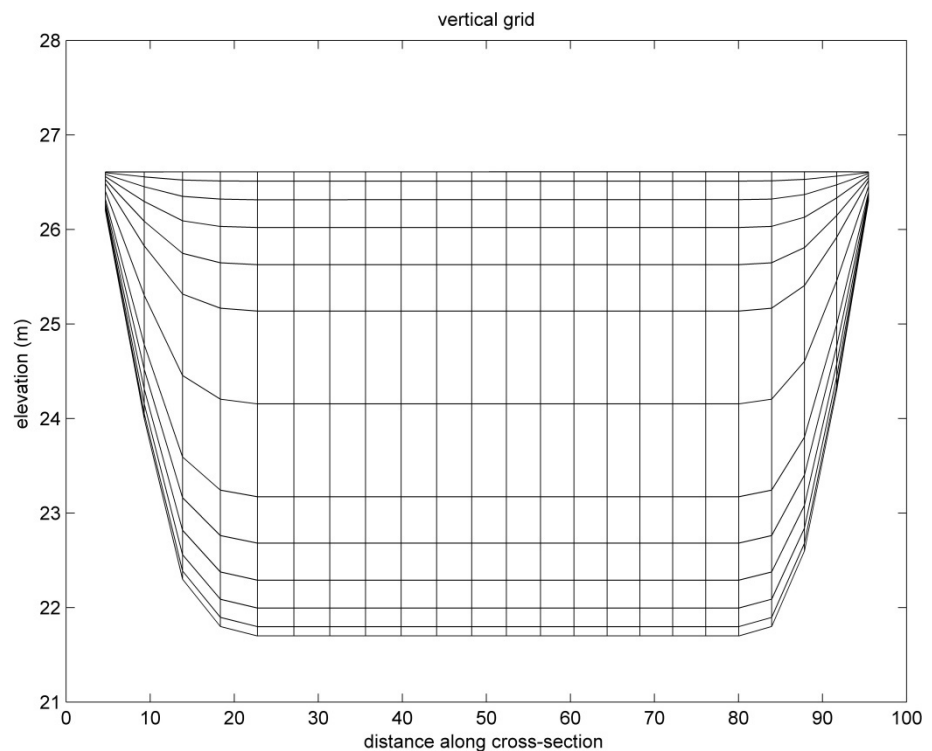


Abbildung 12: Vertikales Gitternetz des Trapezprofils der Weser

Randbedingungen

Weser	Am Südrand des Modells wurden der mittlere Tageszufluss der Weser bei der Station Stolzenau sowie die mittlere Tagestemperatur der Weser als Randbedingungen vorgegeben. Am Nordrand des Modells, an der Staustufe Landesbergen wurde das Stauziel von 26.57 m vorgegeben, die Temperatur wurde an diesem Modellrand frei gelassen.
Kühlwasser	Die Einleitung des Kühlwassers über das Streichwehr ins Hafenbecken wurde über einen flächenverteilten Zufluss von 3'000 m ³ /h berücksichtigt. Die Rückgabetemperatur wurde aus der Wesertemperatur plus 10°C berechnet. In der Simulation wird damit eine Wärmerückgabe von 35'000 kW vorgegeben. Die Berechnung liegt damit gegenüber der effektiv geplanten Rückgabe von 29'500 kW auf der sicheren Seite.
Atmosphäre	Der Wärmeaustausch der freien Wasseroberfläche mit der Atmosphäre wurde in DELTF3D-FLOW anhand einer Wärmeleistungsgleichung an der Wasseroberfläche berechnet, welche die täglich gemittelten Werte der Lufttemperatur, der Wesertemperatur, der Globalstrahlung, der relativen Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit miteinbezieht.

Modellzeitraum Um den Einfluss der täglichen und saisonalen Schwankungen wiederzugeben, wurde eine Simulation über den Zeitraum eines Jahres durchgeführt. Die Worstcase-Szenarien, welchen ein konstanter Weserabfluss von $66 \text{ m}^3/\text{s}$ zugrunde liegt, wurden über einen Zeitraum von 31 Tagen simuliert.

Fallstudien

Fallstudien Zur Ermittlung der Auswirkungen wurden jeweils eine Berechnung des Bezugszustandes ohne Kühlwassereinleitung und eine Fallstudie mit Entnahme und Einleitung von Kühlwasser berechnet. Aus der Differenz der beiden Fälle ergeben sich die Auswirkungen der Kühlwassereinleitung.

Es wurden folgende Fallstudien gerechnet:

- Berechnung eines mittleren Jahresganges. Als Randbedingung werden die über die letzten 10 Jahre gemittelten täglichen Abflüsse, Wassertemperaturen und klimatische Bedingungen zeitabhängig vorgegeben.
- Worst-Case Berechnungen über jeweils einen Monat (Januar und Juli) mit einem konstanten Weserabfluss von $66 \text{ m}^3/\text{s}$ (MNQ, siehe [1]).

Resultate

Darstellungen	Die Resultate der Wärmeausbreitungsmodellierung wurden an drei Weserquerschnitten, einem Längsschnitt entlang des rechten Weserufer und einer Aufsicht in 20 cm Wassertiefe ausgewertet. Die Lage der Querschnitte ist in Abbildung 10 dargestellt. Sie befinden sich direkt nach der Einleitung aus dem Hafenbecken, 500 m flussabwärts der Einleitung und 1750 m flussabwärts der Einleitung. Der Längsschnitt der Weser wurde in die Mitte der Wärmefahne gelegt. Da diese am rechten Ufer der Weser entlang führt, ergibt sich aus der unregelmässigen Uferlinie eine gezackte Sohlenhöhe. Zusätzlich wurde an zwei Beobachtungspunkten im Querschnitt direkt nach der Einleitung aus dem Hafenbecken in die Weser und 100 m flussabwärts (Abbildung 10, grüne Kreuze) die Ganglinie der Temperaturdifferenz zwischen der Fallstudie und dem Bezugszustand dargestellt
Zeitpunkte	Im Folgenden sind 4 relevante Situationen dargestellt. Für die Simulation des mittleren Jahresgangs sind eine Wintersituation am 31. März (Übergang Winter- zu Sommerbedingung der OGewV) und eine Sommersituation am 23. Juli dargestellt. Für die Worst-Case-Berechnungen wurden eine Wintersituation am 2. Januar und eine Sommersituation am 18. Juli ausgewertet. In allen Graphiken wird die Temperaturdifferenz zwischen den Simulationen und dem natürlichen Zustand der Weser (Bezugszustand ohne Kühlwassereinleitung) gezeigt.
Übergang Hafen - Weser	Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich am Übergang zwischen Weser und Hafenbecken ein Wirbel bildet (Abbildung 13). Dieser führt zu einer Durchmischung von Wasser aus der Weser mit dem aufgewärmten Wasser aus dem Hafenbecken. Das Wasser fliesst hauptsächlich auf der linken Seite des Hafenbeckens in die Weser. Dieses Verhalten kann auch in der Realität beobachtet werden (Abbildung 14). Im Winter fliesst wärmeres Wasser aus der Weser über den Wirbel in das Hafenbecken und verhindert die Eisbildung. Die Fliessverhältnisse sind über das Jahr gesehen annähernd konstant.

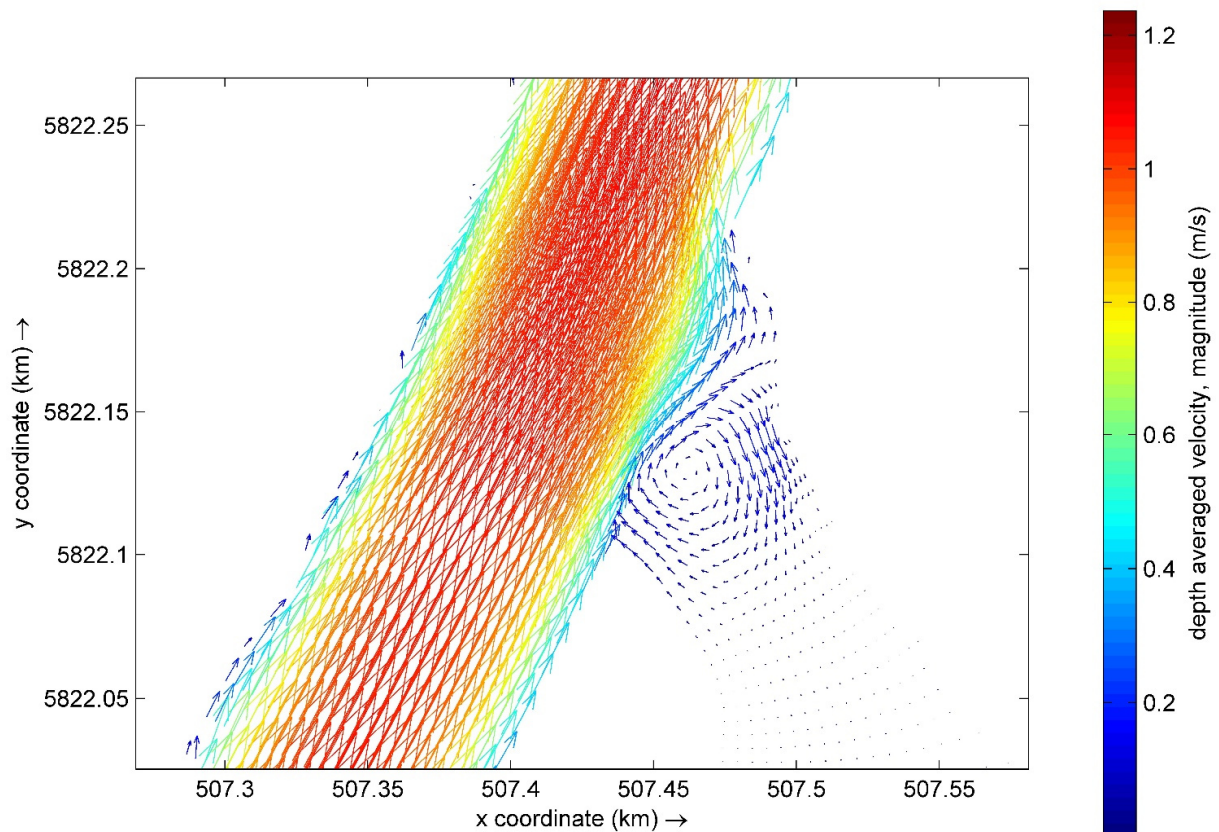


Abbildung 13: Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung des Wassers am Übergangsbereich Weser-Hafenbecken



Abbildung 14: Foto des Hafenbeckens in Richtung Nordwesten. Das Hafenbecken ist bis auf den nördlichen Teil mit Eis bedeckt.

Mittlerer Jahresgang: Situation am 31. März

Beschreibung der Resultate

Das im Hafenbecken erwärmte Wasser erzeugt eine Wärmefahne auf der rechten Seite der Weser (Abbildung 15). Die Temperatur nimmt am Ende des Hafenbeckens stark ab (Durchmischung mit der Weser). Die Wärmefahne zeigt auf der rechten Seite der Weser eine starke Vertikalvermischung (Abbildung 16). Dies ist primär auf den grossen Abfluss in der Weser zurückzuführen. Die linke Weserseite ist durch die Kühlwassereinleitung nicht beeinflusst. Nach 500 m (Abbildung 17) beträgt die Temperaturdifferenz auf der rechten Seite der Weser noch 0.14°C . Die linke Weserseite ist nun auch erwärmt und die Durchmischung ist praktisch abgeschlossen. Nach 1750 m ist die Weser komplett durchmischt (Abbildung 18). Dies wird auch im Längsschnitt bestätigt (Abbildung 19), in dem klar zu erkennen ist, dass sich die Temperaturunterschiede nach 500 m grösstenteils abgebaut haben.

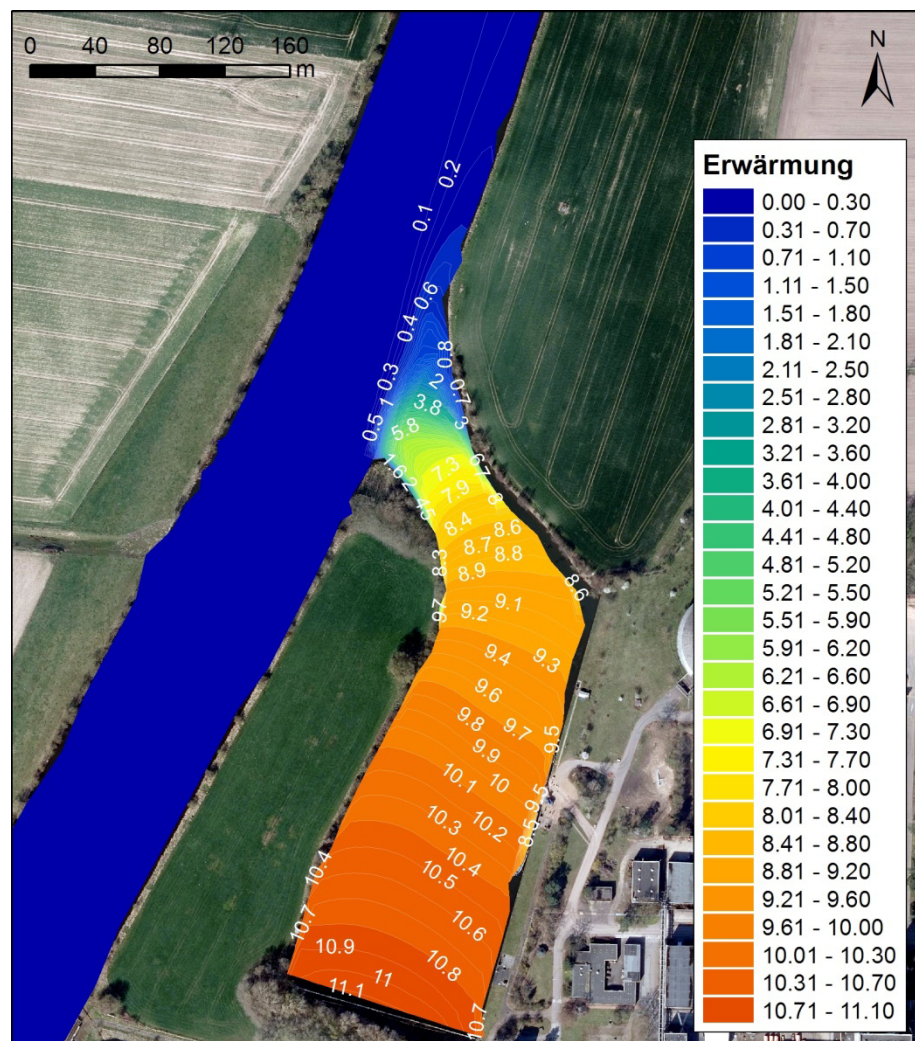


Abbildung 15: Wärmeausbreitung im Übergangsbereich Weser-Hafenbecken am 31. März in einer Wassertiefe von 20 cm.

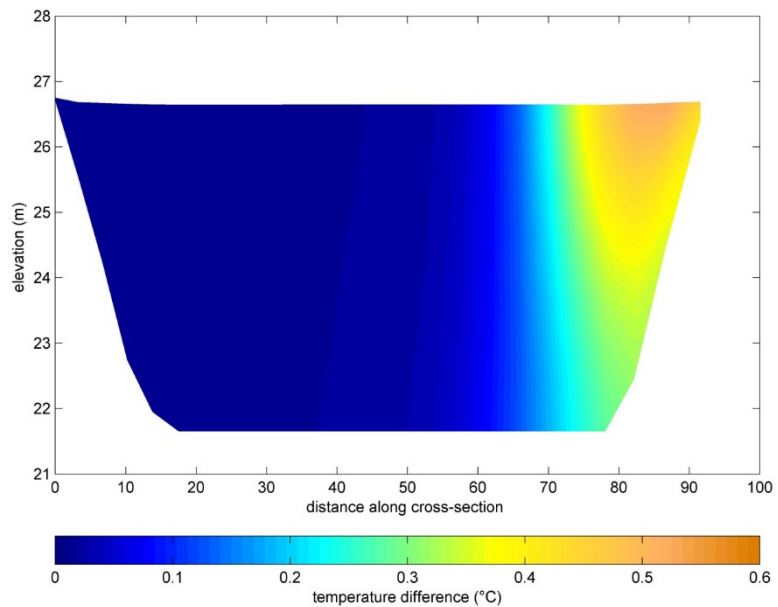


Abbildung 16: Mittlerer Jahresgang, 31. März: Temperaturdifferenz im Querschnitt nach Einleitung aus dem Hafenbecken in die Weser.

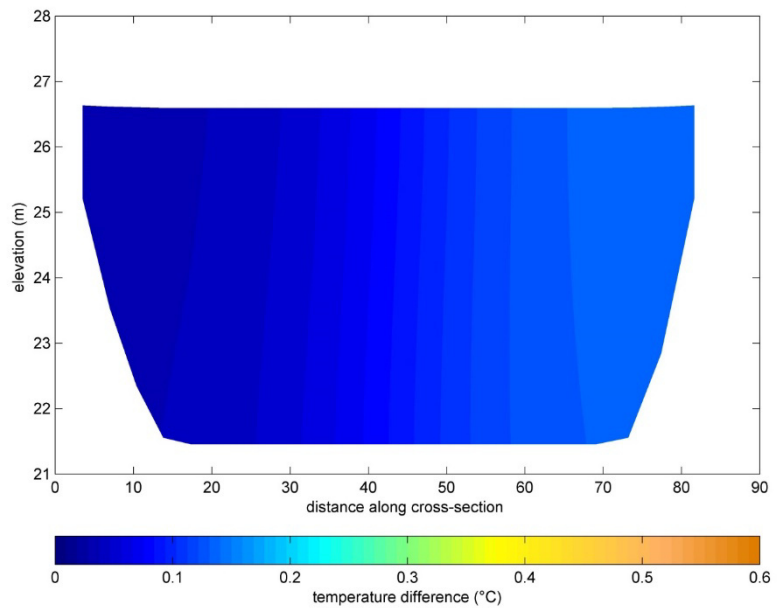


Abbildung 17: Mittlerer Jahresgang, 31. März: Temperaturdifferenz im Querschnitt 500 m flussabwärts der Einleitung.

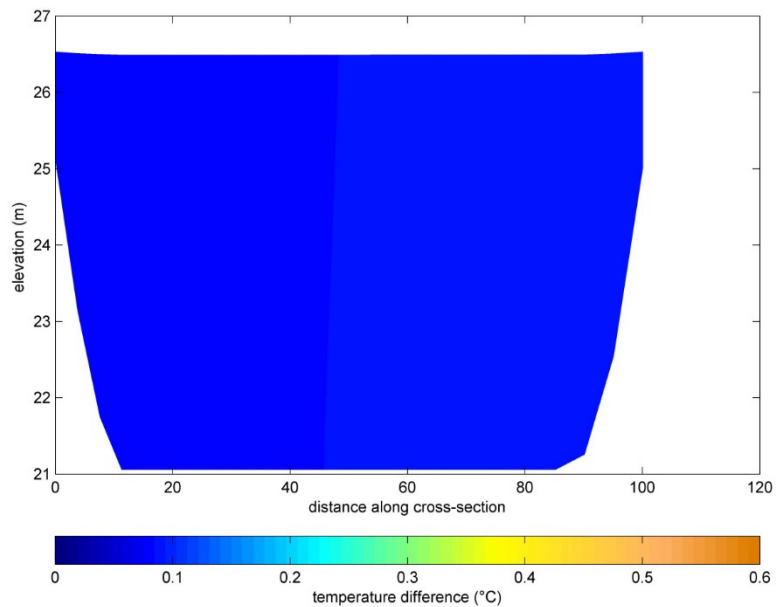


Abbildung 18: Mittlerer Jahresgang, 31. März: Temperaturdifferenz im Querschnitt 1750 m flussabwärts der Einleitung.

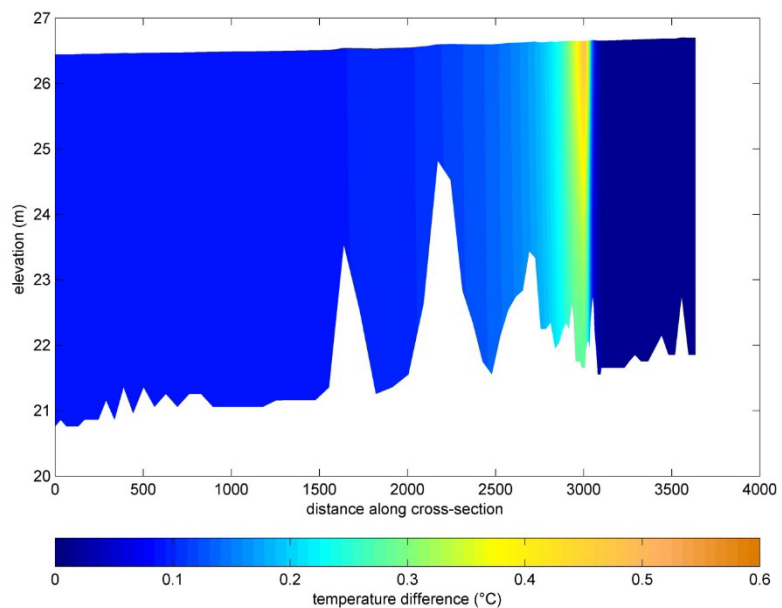


Abbildung 19: Mittlerer Jahresgang, 31. März: Temperaturdifferenz im Längsschnitt entlang des rechten Weserufer.

Mittlerer Jahresgang: Situation am 23. Juli

Beschreibung der Resultate

Das im Hafenbecken erwärmte Wasser erzeugt eine Wärmefahne auf der rechten Seite der Weser (Abbildung 20). Im Vergleich mit der Situation am 31. März resultieren höhere Temperaturdifferenzen. Die Temperatur nimmt am Ende des Hafenbeckens stark ab (Durchmischung mit der Weser). Die Wärmefahne zeigt eine geringe Vertikalvermischung. Die linke Weserseite ist durch die Kühlwassereinleitung nicht beeinflusst (Abbildung 21). 500 m weiter flussabwärts beträgt die Temperaturdifferenz auf der rechten Seite der Weser noch 0.18°C (Abbildung 22). Die linke Weserseite ist nun auch erwärmt und die Durchmischung ist praktisch abgeschlossen. Nach 1750 m ist die Weser komplett durchmischt (Abbildung 23). Dies wird auch im Längsschnitt bestätigt (Abbildung 24), in dem klar zu erkennen ist, dass sich die Temperaturunterschiede nach 500 m grösstenteils abgebaut haben.

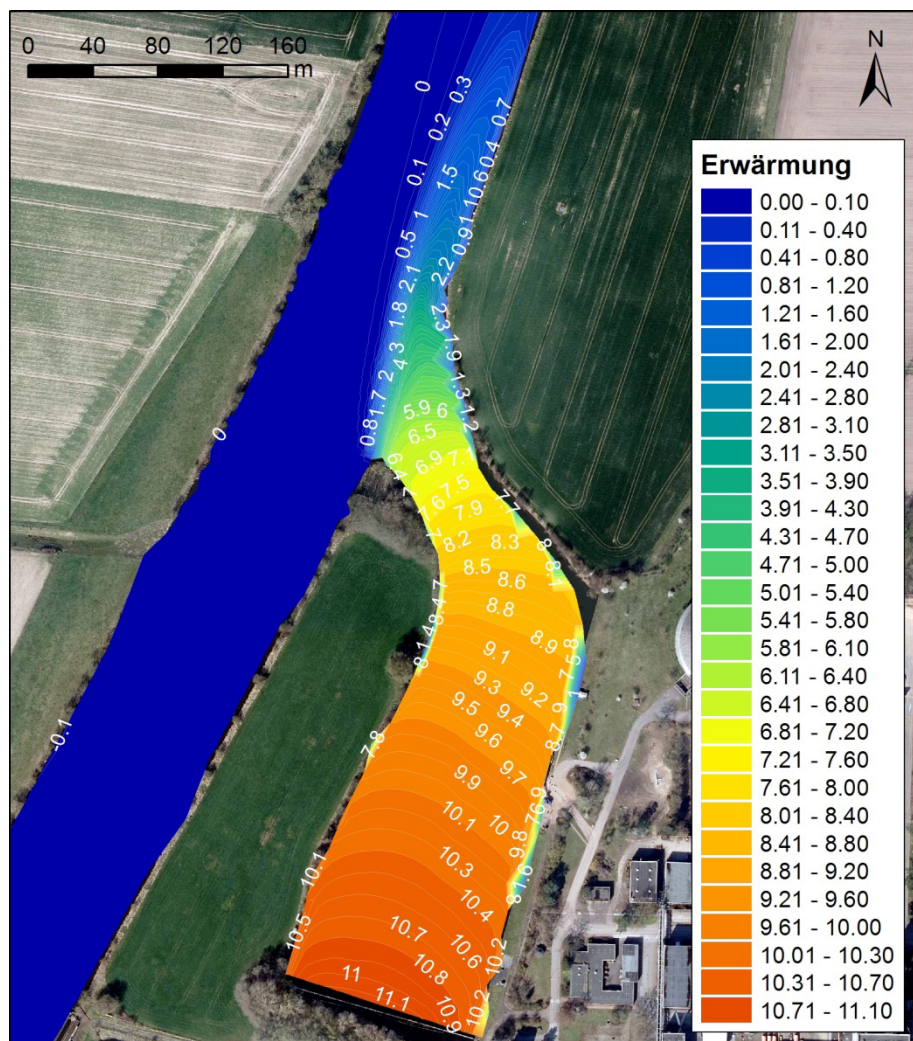


Abbildung 20:

Wärmeausbreitung im Übergangsbereich Weser-Hafenbecken am 23. Juli in einer Wassertiefe von 20 cm.

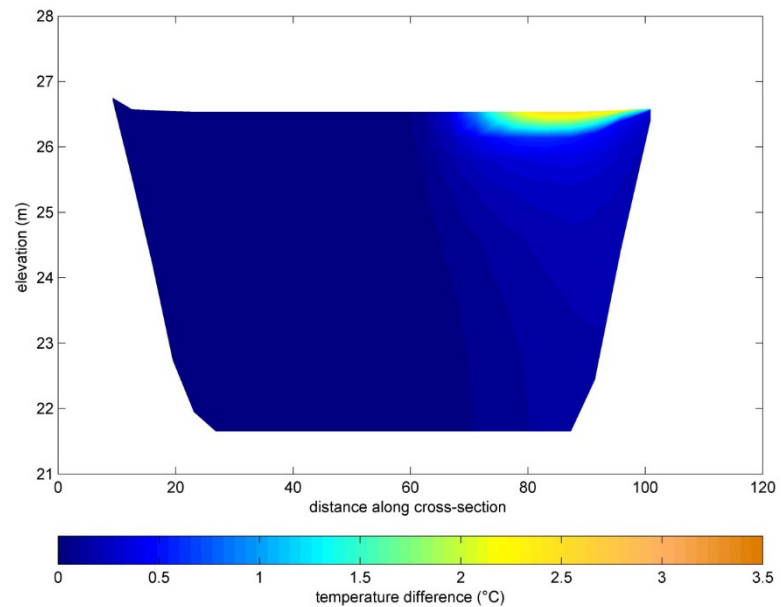


Abbildung 21: Mittlerer Jahresgang, 23. Juli: Temperaturdifferenz im Querschnitt nach Einleitung aus dem Hafenbecken in die Weser

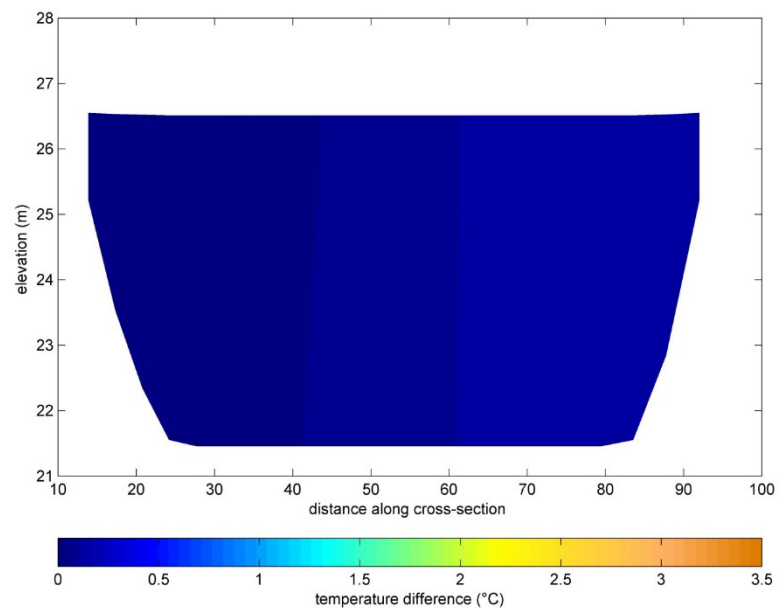


Abbildung 22: Mittlerer Jahresgang, 23. Juli: Temperaturdifferenz im Querschnitt 500 m flussabwärts der Einleitung.

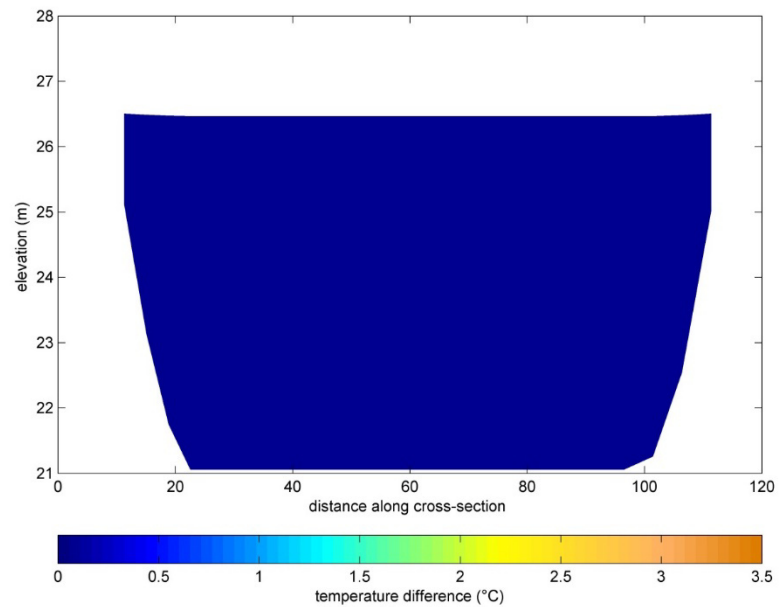


Abbildung 23: Mittlerer Jahresgang, 23. Juli: Temperaturdifferenz im Querschnitt 1750 m flussabwärts der Einleitung.

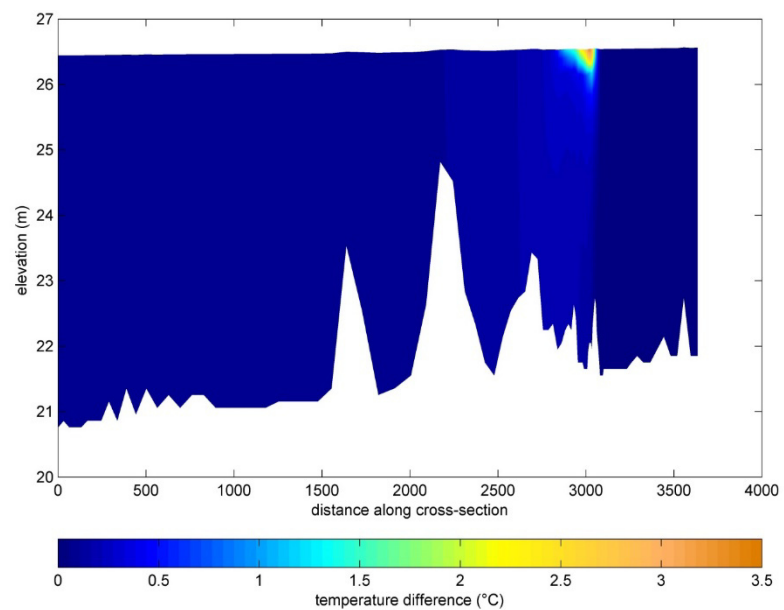


Abbildung 24: Mittlerer Jahresgang, 23. Juli: Temperaturdifferenz im Längsschnitt entlang des rechten Weserufer.

Worst-Case-Simulation: Situation am 2. Januar

Beschreibung der Resultate

Bei der Worst-Case-Simulation beträgt die Kühlwassereinleitung 1,3% des Weserabflusses von $66 \text{ m}^3/\text{s}$. Das gegenüber dem mittleren Jahresgang schlechtere Mischungsverhältnis zeigt sich auch an einer etwas ausgeprägteren Wärmefahne (Abbildung 25). Auch bei kleinem Weserabfluss bildet sich jedoch am Ausgang des Hafenbeckens ein Wirbel, so dass das eingeleitete Kühlwasser bereits im Hafenbecken stark abgekühlt wird. Die im Querschnitt nach der Einleitung (Abbildung 26) erkennbare Wärmefahne auf der rechten Seite der Weser zeigt eine geringere Vertikalvermischung als bei der Wintersituation im mittleren Jahresgang. Die linke Weserseite ist an dieser Stelle noch nicht beeinflusst. 500 m weiter flussabwärts beträgt die Temperaturdifferenz auf der rechten Seite der Weser noch 0.17°C (Abbildung 27). Die linke Weserseite ist nun auch erwärmt und die Durchmischung ist praktisch abgeschlossen. Nach 1750 m ist die Weser komplett durchmischt (Abbildung 28).

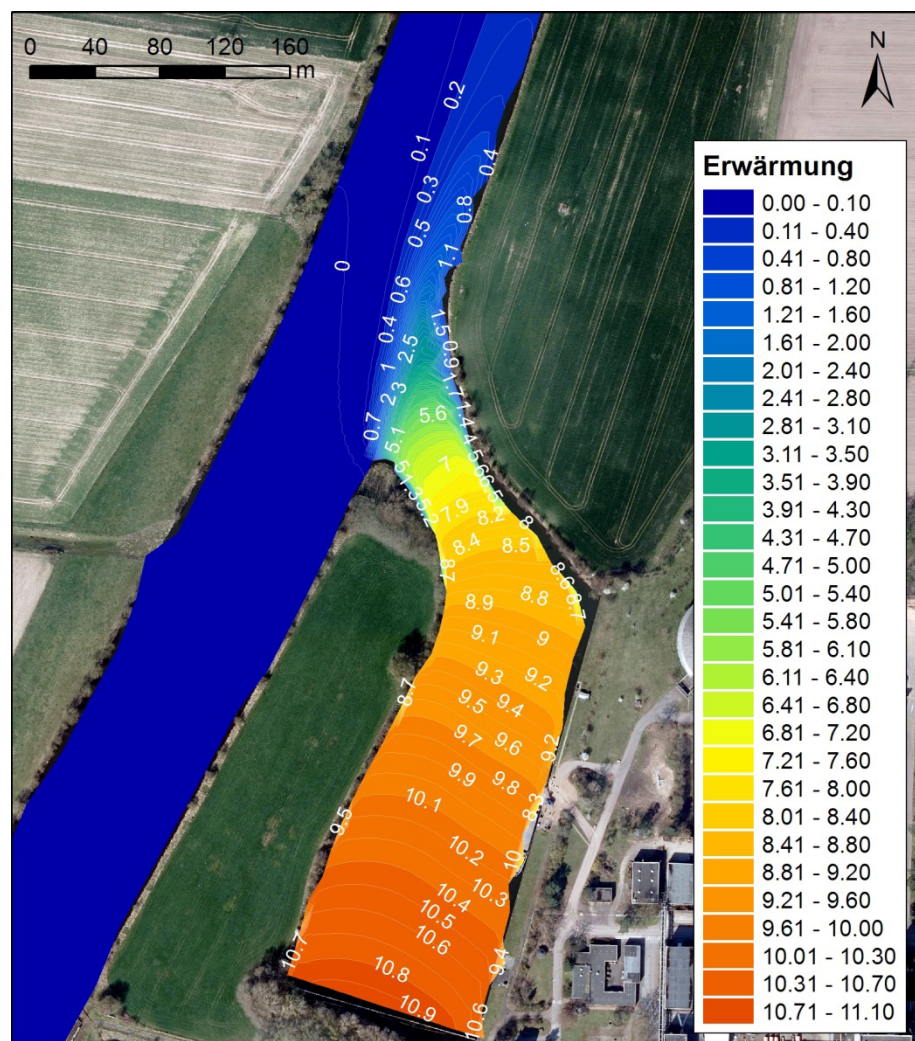


Abbildung 25: Wärmeausbreitung im Übergangsbereich Weser-Hafenbecken am 2. Januar in einer Wassertiefe von 20 cm.

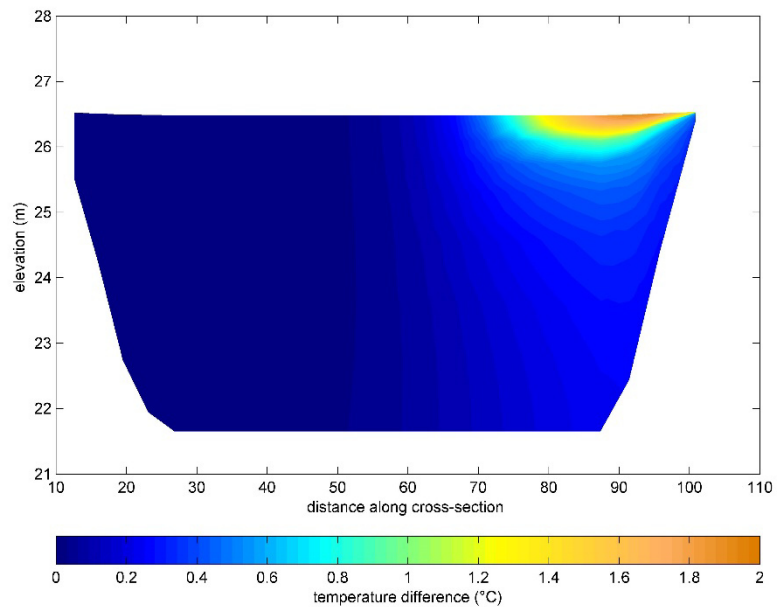


Abbildung 26: Worst-Case mit MNQ, 2. Januar: Temperaturdifferenz im Querschnitt nach Einleitung aus dem Hafenbecken in die Weser.

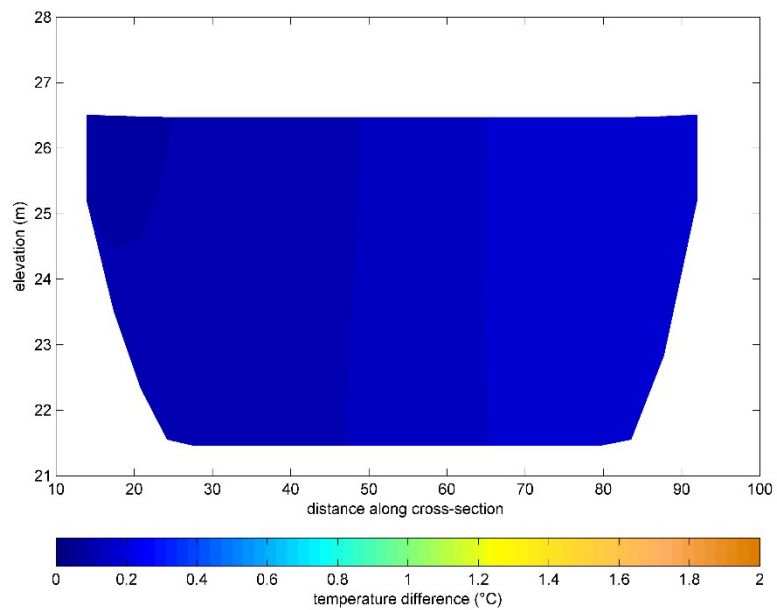


Abbildung 27: Worst-Case mit MNQ, 2. Januar: Temperaturdifferenz im Querschnitt 500 m flussabwärts der Einleitung.

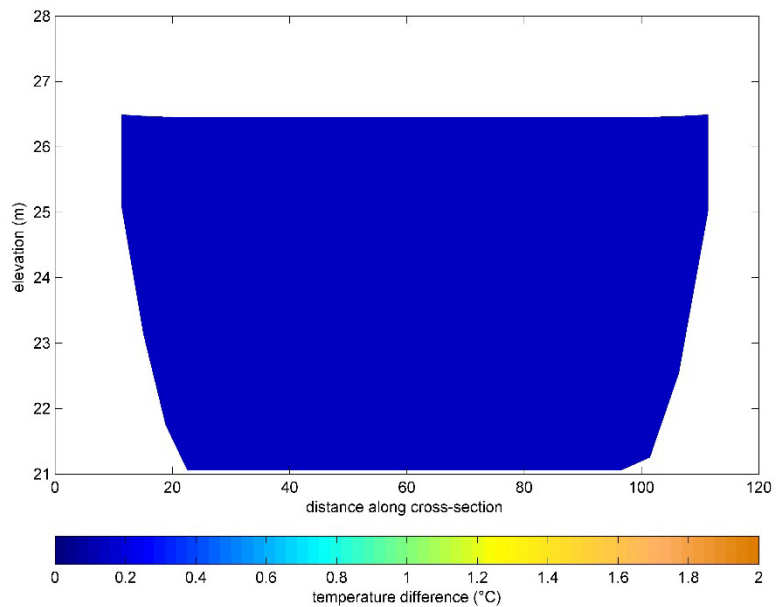


Abbildung 28: Worst-Case mit MNQ, 2. Januar: Temperaturdifferenz im Querschnitt 1750 m flussabwärts der Einleitung.

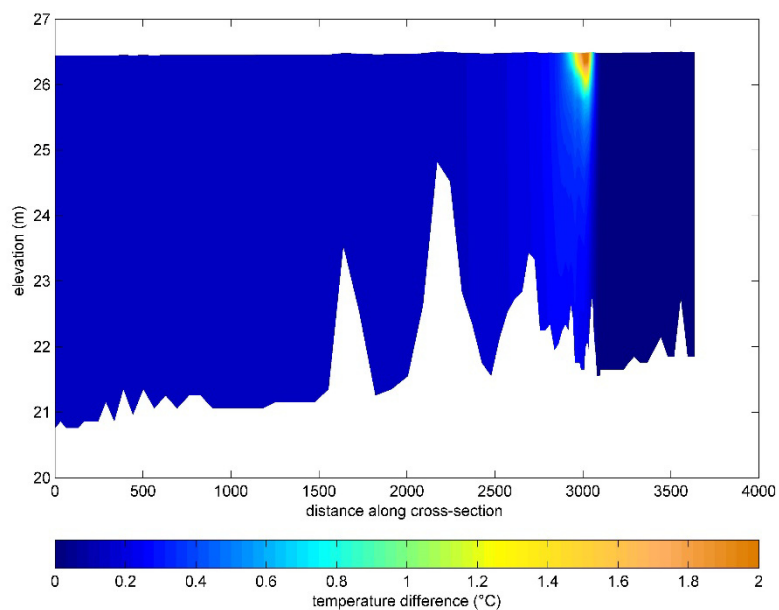


Abbildung 29: Worst-Case mit MNQ, 2. Januar: Temperaturdifferenz im Längsschnitt entlang des rechten Weserufers.

Worst-Case-Simulation: Situation am 18. Juli

Beschreibung der Resultate

Die Simulation des Worst-Case-Szenarios mit einem mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) im Sommer ergibt die höchsten Temperaturdifferenzen (Abbildung 30). Zwar ist das Mischverhältnis gleich wie bei der Simulation der Wintersituation, die vertikale Durchmischung ist jedoch im Sommer kleiner als im Winter. Die Wärmefahne konzentriert sich bei der Einleitung aus der Weser auf die obersten Wasserschichten. Darunter und auf der linken Weserseite bleiben die Temperaturen unbeeinflusst (Abbildung 31). 500 m weiter flussabwärts beträgt die Temperaturdifferenz auf der rechten Seite der Weser noch 0.25°C. Die linke Weserseite ist nun auch erwärmt und die Durchmischung ist praktisch abgeschlossen. Nach 1750 m ist die Weser komplett durchmischt (Abbildung 33). Dies wird auch im Längsschnitt bestätigt (Abbildung 34), in dem klar zu erkennen ist, dass die Temperaturunterschiede sich nach 500 m grösstenteils abgebaut haben.

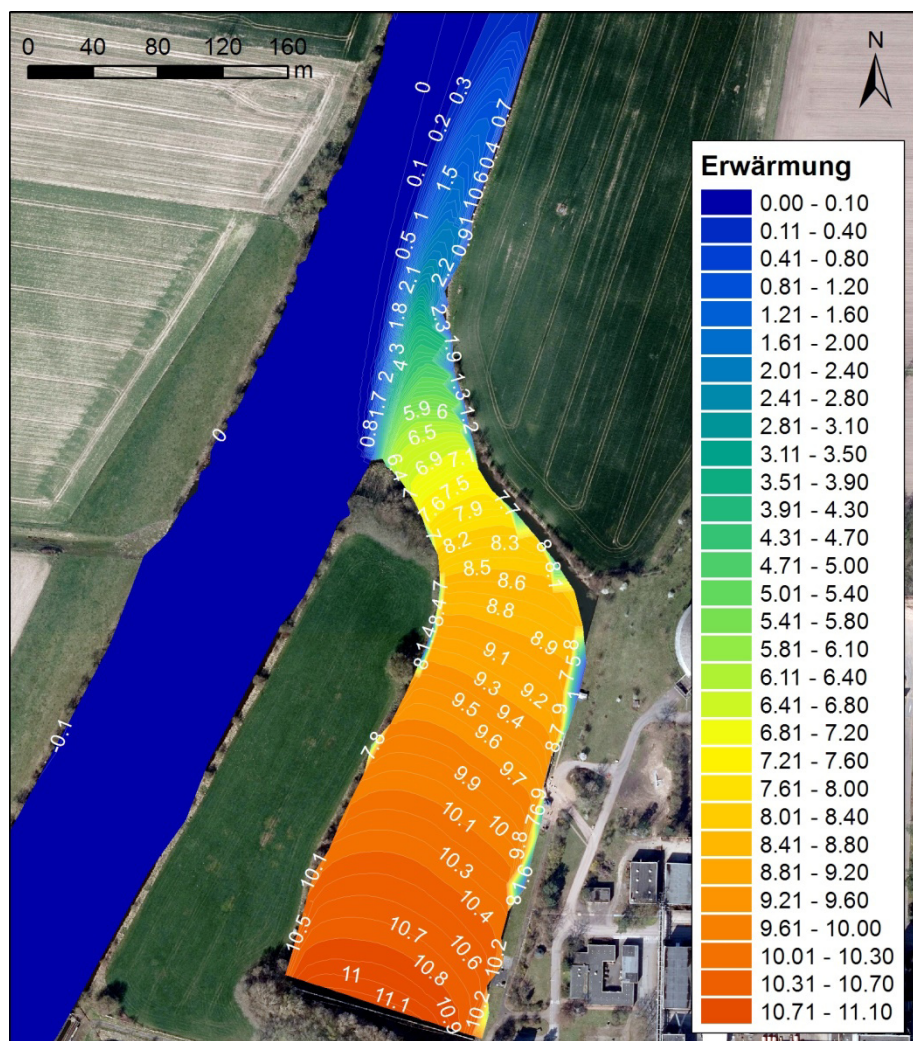


Abbildung 30:

Ansicht der Temperatursausbreitung im Übergangsbereich Weser-Hafenbecken am 18. Juli

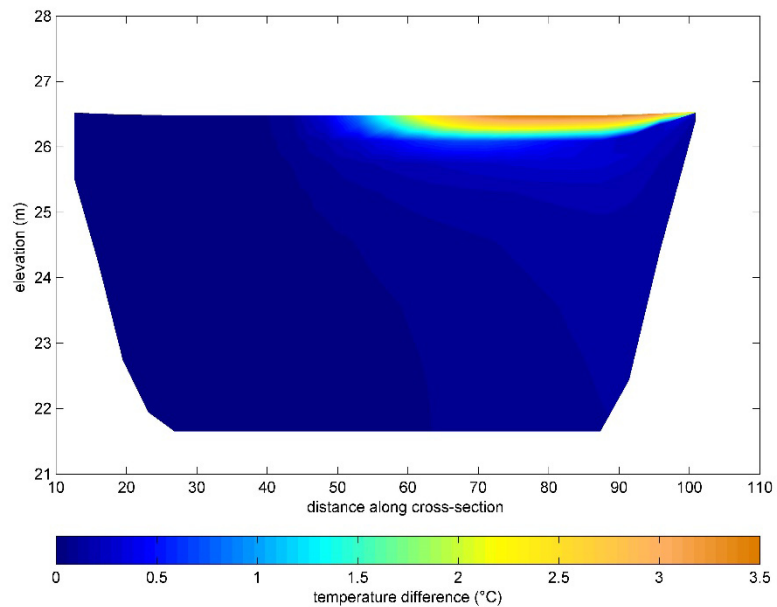


Abbildung 31: Worst-Case mit MNQ, 18. Juli: Temperaturdifferenz im Querschnitt nach Einleitung aus dem Hafenbecken in die Weser.

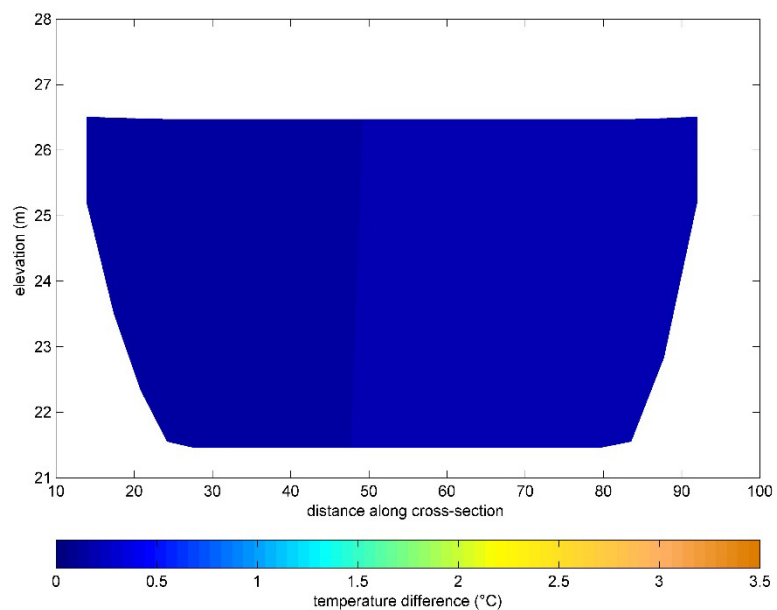


Abbildung 32: Worst-Case mit MNQ, 18. Juli: Temperaturdifferenz im Querschnitt 500 m flussabwärts der Einleitung.

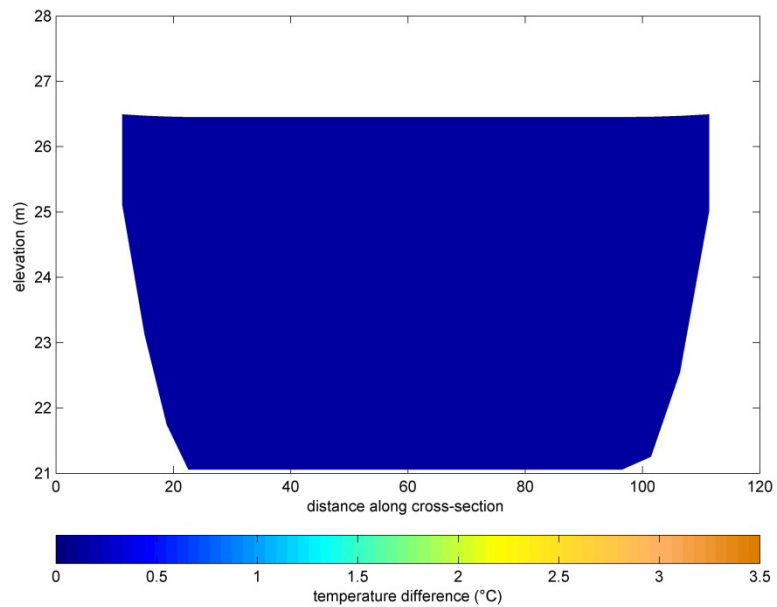


Abbildung 33: Worst-Case mit MNQ, 18. Juli: Temperaturdifferenz im Querschnitt 1750 m flussabwärts der Einleitung.

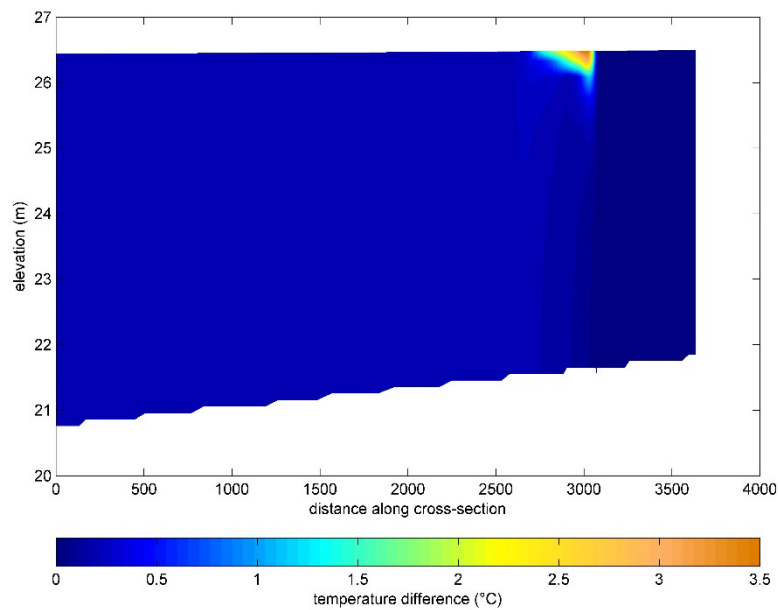


Abbildung 34: Worst-Case mit MNQ, 18. Juli: Temperaturdifferenz im Längsschnitt entlang des rechten Weserufer.

Ganglinien an den Beobachtungspunkten

Mittlerer Jahresgang Abbildung 35 zeigt die Jahresganglinie der Temperaturdifferenz in den beiden Beobachtungspunkten direkt bei der Einleitung und 100 m flussabwärts. Es werden ein Punkt in 20 cm und ein Punkt in 45 cm Wassertiefe dargestellt. Die Ganglinie zeigt verschiedene Effekte:

- Die Kühlwassereinleitung verursacht bei grösserem Weserabfluss eine kleinere Erwärmung als bei tieferem Weserabfluss.
- Bei hohem Weserabfluss ist auch die vertikale Durchmischung grösser. Dies zeigt sich daran, dass die Kurven in 0.2 und 0.45 m Tiefe näher beieinander liegen.
- Temperaturdifferenzen über 0.7 °C treten nur im Sommer in den obersten Wasserschichten auf.
- In 100 m Distanz zur Einleitung aus dem Hafenbecken in die Weser hat sich die Erwärmung in den obersten Wasserschichten der Weser schon auf maximal 0.5 °C verringert

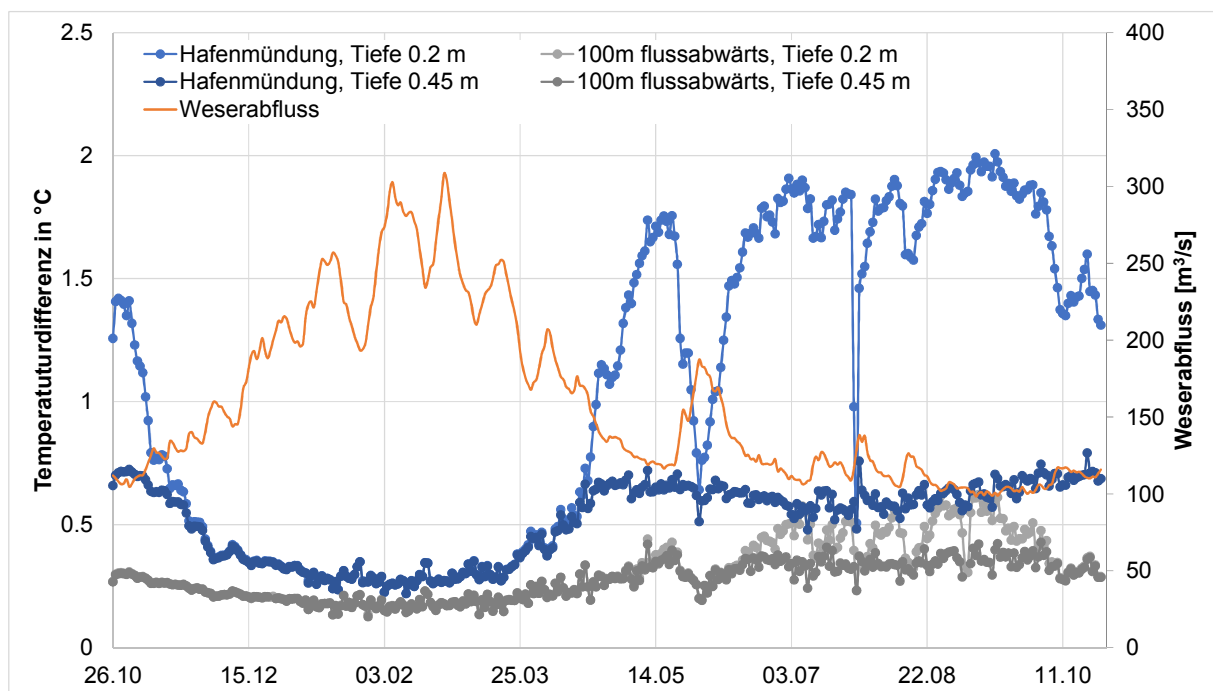


Abbildung 35: Jahresganglinien der Temperaturdifferenz am kritischen Punkt des Weserquerschnitts nach der Einleitung des Hafenwassers in die Weser (blau) sowie 100 m flussabwärts (grau) in 0.2 m (hell) und 0.45 m (dunkel) Wassertiefe.

Worst-Case Die Ganglinien der Temperaturdifferenz für die Worst-Case-Szenarien sind in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt. Direkt

nach der Einleitung aus dem Hafenbecken erkennt man in beiden Fällen eine starke Erwärmung an der Weseroberfläche. Im Winter ist die Erwärmung weniger gross, sie erstreckt sich jedoch über eine grössere Tiefe. Im Sommer konzentriert sich die Erwärmung auf die obersten Wasserschichten. Bereits in 0.45 m Tiefe beträgt die Erwärmung nur noch etwa 0.7 °C. Aufgrund der schlechteren Durchmischung bleibt die Wärmefahne im Sommer flussabwärts länger erhalten. In 100 m Distanz zur Einleitung beträgt die maximale Temperaturdifferenz an der Weseroberfläche im Sommer immer noch 1.2 °C, während sie im Winter nur noch etwa 0.3 °C beträgt.

Vergleich

Unterschiede zwischen den Worst-Case-Szenarien und der Simulation des mittleren Jahresgangs gibt es hauptsächlich im Winter. Dies ist auf die üblicherweise höheren Weserabflüsse im Winter zurückzuführen. Im Sommer sind die Unterschiede eher gering (ca. 25% höhere Erwärmung in den obersten Wasserschichten).

In allen Fallstudien ist die Erwärmung der Weser 100 m flussabwärts signifikant geringer als direkt bei der Einleitung aus dem Hafenbecken

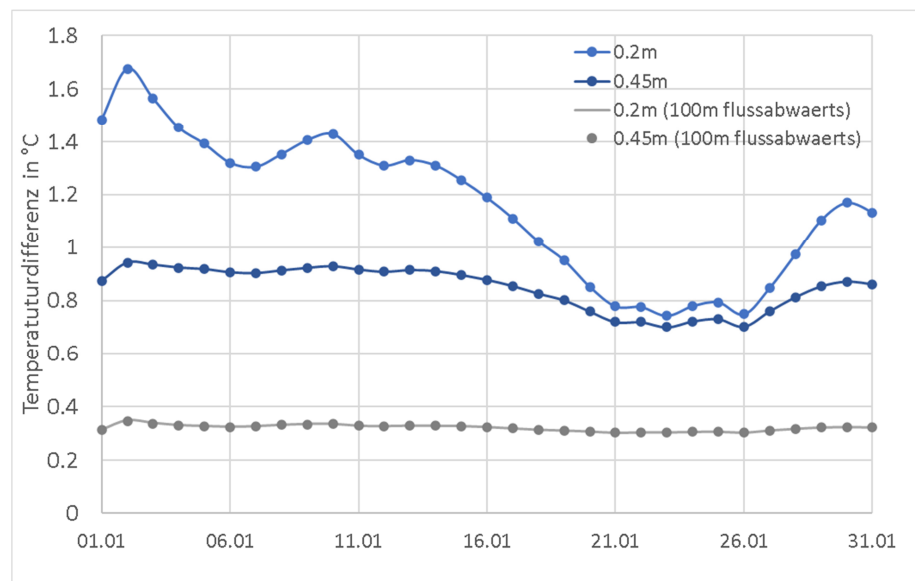


Abbildung 36:

Worst-Case-Szenario im Winter: Monatsganglinien der Temperaturtuturndifferenz am kritischen Punkt des Weserquerschnitts nach der Einleitung des Hafenwassers in die Weser (blau) sowie 100 m flussabwärts (grau) in 0.2 m (hell) und 0.45 m (dunkel) Wassertiefe.

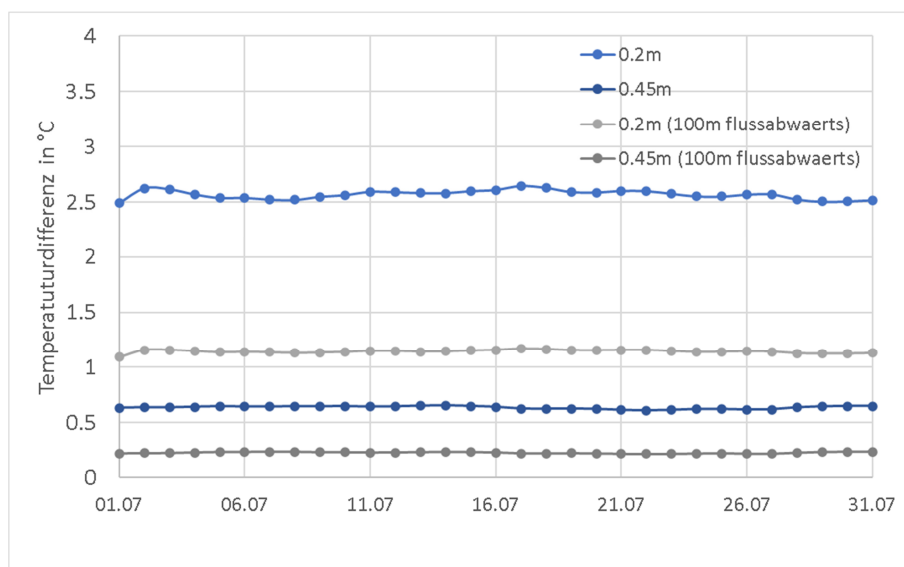


Abbildung 37:

Worst-Case-Szenario im Sommer: Monatsganglinien der Temperaturdifferenz am kritischen Punkt des Weserquerschnitts nach der Einleitung des Hafenwassers in die Weser (blau) sowie 100 m flussabwärts (grau) in 0.2 m (hell) und 0.45 m (dunkel) Wassertiefe.

Temperaturdifferenzen im Abstrom der Einleitung

Auswertung

500 m nach dem Zusammenfluss der Weser und des Hafenbeckens hat schon eine starke Durchmischung des Wassers stattgefunden und die Temperatur ist relativ gleichmässig über den Weserquerschnitt verteilt. In Tabelle 1 sind die im entsprechenden Querschnitt auftretenden maximalen Temperaturdifferenzen zusammengestellt. Es zeigt sich, dass in den Worst-Case-Szenarien sowohl im Winter als auch im Sommer die Erwärmung um ca. 20% höher ist als bei der Simulation des mittleren Jahresganges.

Tabelle 1:

Maximale Temperaturdifferenz in der Weser im Querschnitt 500 m nach Einleitung vom Hafenbecken in die Weser

Situation	31.03. (Jahresgang)	23.07. (Jahresgang)	02.01. (MNQ)	18.07. (MNQ)
ΔT in °C	0.14	0.18	0.17	0.21

Zusammenfassung

Anlass	Die Statkraft Markets GmbH plant zur Kühlung des geplanten Biomasseheizkraftwerkes Bio II Landesbergen Wasser aus der Weser zu entnehmen. Das Wasser wird dabei um 10 °C erwärmt und über ein Streichwehr in das bestehende Hafenbecken eingeleitet.
OGewV	Gemäss der Oberflächengewässerverordnung darf die Weser durch die Kühlwassereinleitung nach vollständiger Durchmischung um nicht mehr als 3 °C erwärmt werden. Zusätzlich darf im Winter eine Temperatur von 10 °C, im Sommer eine Temperatur von 25 °C nicht überschritten werden.
Simulation	Die geplante Kühlwassereinleitung wurde mit Hilfe eines dreidimensionalen Strömungs- und Wärmetransportmodells simuliert. Dazu wurde die Software Delft3D eingesetzt. Die Software bildet auch die Austauschprozesse mit der Atmosphäre nach.
Strömung	Durch die Strömung der Weser entsteht am Eingang des Hafenbeckens ein Wirbel. Dort strömt Weserwasser in das Hafenbecken hinein und vermischt sich mit dem erwärmten Kühlwasser. Dadurch wird das eingeleitete Kühlwasser bereits innerhalb des Hafenbeckens der Statkraft Markets GmbH stark abgekühlt.
Wärmetransport	Nach der Hafenmündung bildet sich entlang des rechten Ufers der Weser eine Wärmefahne. Es erfolgt schnell eine weitere Vermischung mit der Weser. Bereits nach 100 Metern ist die Wärmefahne deutlich abgeschwächt. 500 m nach der Mündung sind die Wassertemperaturen im schlechtesten Fall eines Niedrigwassers im Sommer nur noch um maximal 0.21 °C erhöht. Die Bedingungen der Oberflächengewässerverordnung können auch für diesen ungünstigen Fall mit deutlichem Abstand eingehalten werden.
Vertikale Vermischung	Die Erwärmung des Wassers ist hauptsächlich auf die obersten 30 cm der Weser beschränkt. Bei hohen Weserabflüssen sowie im Winter kann es zu stärkeren vertikalen Vermischungen kommen. Diese Situationen sind jedoch, wie dargelegt, bezüglich der Einhaltung der Oberflächengewässerverordnung ebenfalls als unkritisch einzustufen.

Simultec AG

Zürich, 14.12.2022

Quellen

- [1] Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und naturschutz (2018): „Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Weser- und Emsgebiet, 2015“
- [2] Bundesministerium der Justiz (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung OGewV).
- [3] Preussische Elektrizitäts AG (1971): Kühlwasserrücklaufkanäle. Verschiedene Pläne und Querschnitte.
- [4] Statkraft Markets GmbH (2022): Wassertemperaturen Staustufe Landesbergen
- [5] Wasserstrassen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (2022): Pegel- und Abflussdaten der Weser in Stolzenau.
- [6] Deutscher Wetterdienst, Climate Data Center (2022): Klimadaten der Stationen Nienburg und Hamburg.
- [7] Deltares Systems (2022): 3D/2D modelling suite for integral water solutions, Delft3D, *User Manual*.
- [8] Zeitler Martin (1979): Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustes von verschiedenen Verlegesystemen erdverlegter Rohrleitungen. *Mitteilungen des Forschungsinstituts für Wärmeschutz E.V. München*.
- [9] Stauffer F., Bayer P., Blum P., Molina-Giraldo N., Kinzelbach W. (2014). Thermal Use of Shallow Groundwater. *CRC Press, Boca Raton*