

Grundwassertemperaturmessungen zur hydrogeologischen Erkundung des Bereichs Schwarzenbek/Geesthacht/Lauenburg (Untere Elbe)

> **Dr. Roland Otto**

Einführung

Zur langfristigen Sicherstellung der Wasserversorgung im Raum Südost-Holstein (vergleiche Abbildung 1) wurde ein Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserangebots unter Leitung des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein durchgeführt. Ein Teilprojekt war das geothermische Untersuchungsprogramm im Raum Schwarzenbek/Geesthacht/Lauenburg (Untere Elbe). Das Ziel dieses Vorhabens war es, mit Hilfe von Grundwassertemperaturmessungen Erkenntnisse über den oberflächennahen Wasserkreislauf und die hydraulische Wechselwirkung zwischen flachen und tiefen Grundwasserleitern zu erlangen. Darüber hinaus sollte anhand der Temperaturbefunde das Temperaturfeld in seiner regionalen Ausprägung beschrieben werden.

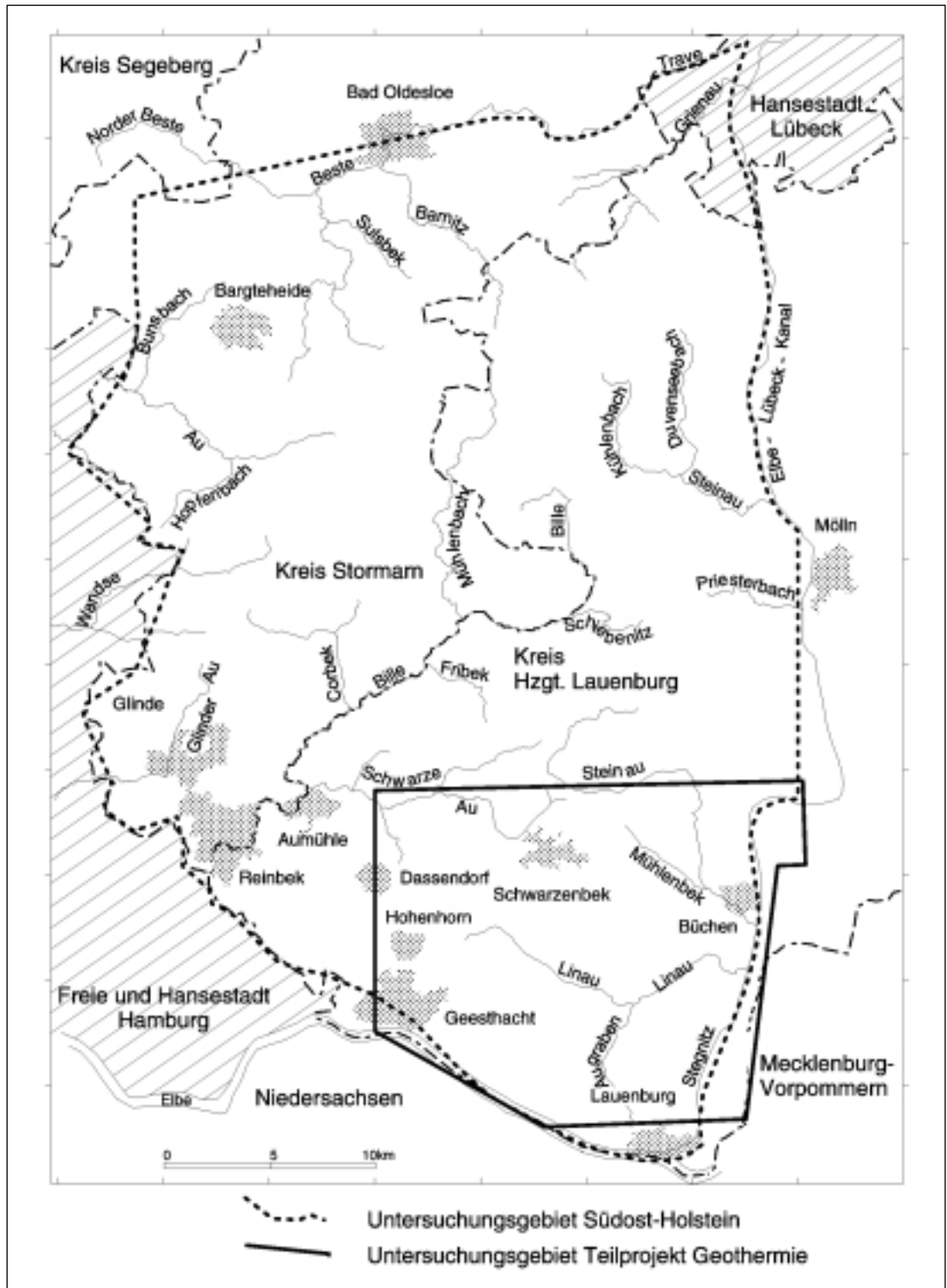
Das natürliche Temperaturfeld der Erde, das seinen Ursprung überwiegend in radiogener Wärme innerhalb des oberen Mantels hat, wird durch **verschiedene Arten der Wärmeausbreitung** erzeugt. Man unterscheidet dabei drei physikalische Prozesse: die Wärmeleitung (Konduktion), die Wärmeströmung (Konvektion) und die Wärmestrahlung.

Die **Wärmeleitung** setzt dann ein, wenn innerhalb des Temperaturfeldes Temperaturunterschiede vorhanden sind, zum Beispiel von tieferen Bereichen der Erdkruste zur Erdoberfläche hin. Die Größe des aus diesem Ausgleichsprozess resultierenden Wärmestroms q ist dabei proportional zur Größe des Temperaturgradienten ($\text{grad } T$), wobei gemäß nachstehender Gleichung die materialspezifische Wärmeleitfähigkeit λ die Proportionalitätskonstante darstellt.

$$q = -\lambda \text{grad } T$$

mit: q : Wärmestromdichte [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
 λ : Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 $\text{grad } T$: geothermischer Gradient [$^{\circ}\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$]

Abbildung 1:
Lage des Untersuchungsgebietes Südost-Holstein (punktiert) mit Umriss des Teilgebietes Schwarzenbek/Geesthacht/Lauenburg



Die Wärmeleitfähigkeit ist für den konduktiven Wärmetransport ein bestimmender materialspezifischer Parameter, der von der mineralischen Zusammensetzung des Gebirges, der Größe des Porenraums sowie seiner Verfüllung abhängig ist. Unter **Wärmeströmung** oder Konvektion versteht man den Wärmetransport durch strömende Medien. In der oberflächennahen Schichtenfolge erfolgt der konvektive Wärmetransport im wesentlichen durch das strömende Grundwasser, dessen Kinematik durch die hydraulischen Gegebenheiten in den Grundwasserleitersystemen be-

stimmt wird. Bei der **Wärmestrahlung** wird die Wärmeenergie von einem Körper zum anderen durch Emission und Adsorption elektromagnetischer Wellen übertragen. Die optimalen Randbedingungen dieses Wärmeausbreitungsprozesses sind hohe Temperaturen und ein Vakuum zwischen den Körpern. Im Bereich des Grundwassers mit Temperaturen zwischen 8 und 15°C ist dieser Prozess zu vernachlässigen. Maßgeblich für den Habitus des Temperaturfeldes im Untersuchungsgebiet sind ausschließlich der konduktive und konvektive Wärmetransport.

Art und Umfang der Untersuchungen

Sind in einer Grundwassermessstelle leakagebedingte Wasserströmungen auszuschließen, überträgt sich die vertikale Temperaturabfolge des umgebenden Gebirges auf die Wassersäule im Messstellenrohr und kann dort mit Hilfe einer Messsonde teufengerecht aufgezeichnet werden. Im Untersuchungsraum wurden so insgesamt 237 Grundwassermessstellen an 124 Standorten mit einer Temperatursonde befahren. Die Gesamtbefahrungslänge betrug etwa 17.600 m.

Temperaturen bis zu einer Tiefe von 200 Metern unter Messpunkthöhe wurden mit dem Kabellichtlot mit integriertem PT100-Temperaturmessfühler aufgenommen (Abbildung 2). Der Messpunktabstand im Vertikalprofil richtete sich hierbei nach der Höhe der Temperaturgradienten. Die Messgenauigkeit der PT100-Sonde liegt nach Herstellerangaben bei $0,1^{\circ}\text{C}$. Überprüfungen in Form von Wiederholungsmessungen in einer Messstelle ergaben Temperaturabweichungen von kleiner $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ (vergleiche Abbildung 3). Im Hinblick auf die vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeiten war es im Rahmen dieses Untersuchungsprogramms von zweitrangiger Bedeutung, Temperaturen mit absoluter Genauigkeit zu messen. Vielmehr musste gewährleistet sein, dass die gemessenen Untergrundtemperaturen in Relation zueinander, räumlich wie zeitlich, hinreichend genau erfasst wurden. Für Messungen in tieferen Messstellen wurde eine ebenfalls mit einem PT100 bestückte Motorwinde mit einer Auslage von 400 Metern eingesetzt (Abbildung 4). Die gemessenen Temperaturen wurden analog und teufenbezogen aufgezeichnet. Der Abgleich der Messelektronik erfolgte aus Gründen der Vergleichbarkeit in den Grundwassermessstellen mit Hilfe des Handlots.

Lage und Schichtenfolge des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt östlich von Hamburg im Kreis Herzogtum Lauenburg, Südost-Holstein und umfasst eine Fläche von etwa 300 Quadratkilometern (Abbildung 1). Es wird im Norden durch die Linie Dassendorf-Schwarzenbek-Büchen markiert. Die östliche Begrenzung stellt das Stecknitztal mit dem Elbe-Lübeck-Kanal dar. Den Südrand bildet die Elbe mit den anliegenden Ortschaften Lauenburg und Geesthacht. Die westliche Begrenzung verläuft von Geesthacht über Hohenhorn nach Dassendorf. Das sanftwellige Landschaftsbild des Untersuchungsgebietes wird vorwiegend durch Moränenablagerungen der Saale-Kaltzeit geprägt. Nur am Nordost- sowie am Ostrand sind Ablagerungen der Weichsel-



Abbildung 2: Kabellichtlot mit PT100-Temperaturfühler.

eiszeit anzutreffen. Die Ausläufer des Gramsberg sowie des Büchener Sander verleihen hier der Landschaft zumindest bereichsweise einen ebenen Charakter. Zur Elbe und zum Stecknitztal hin fällt das Gelände steil ab. Die niedrigste Messpunkthöhe mit 8,37 m NN befindet sich an der Elbe bei Geesthacht, die höchste mit 81,90 m NN einen Kilometer nördlich davon.

Die oberflächennahe Schichtenfolge ist aus einer Wechselfolge von Geschiebemergeln und -lehmen sowie glazifluvialen Sanden der Saaleeiszeit aufgebaut. Charakteristisch sind elstereiszeitliche Erosionsrinnen, die sich bis in die tertiäre Schichtenfolge eingeschnitten haben. Die Rinnen sind heterogen verfüllt, teils mit Sanden und Geschiebemergeln, teils mit Lauenburger Ton. Die Kaolinsande des Pliozäns, die in nördlicheren Bereichen des Untersuchungsraumes einen wichtigen Grundwasserleiter bilden, fehlen hier vollständig. Der Obere Glimmerton des Miozäns tritt nur vereinzelt im Untersuchungsgebiet auf. Im Liegenden folgen die Ablagerungen des Unteren Miozäns mit den Oberen Braunkohlensanden, dem Hamburger Ton und den Unteren Braunkohlensanden. Die Braunkohlensande stellen in Bezug auf die Grundwasserförderung einen wichtigen Nutzhorizont dar. Darunter folgt der Untere Glimmerton der Vierlandstufe. Im tieferen Untergrund des Gebietes befinden sich

zwei Salzstrukturen; der Salzstock Hohenhorn und der südöstlich gelegene, jedoch wesentlich kleinere Salzstock Juliusburg (LANGE & KOSACK 1984; AGSTER 1996).

Die Temperaturabfolge im Untersuchungsgebiet

1. Die Temperaturverteilung nahe der Erdoberfläche

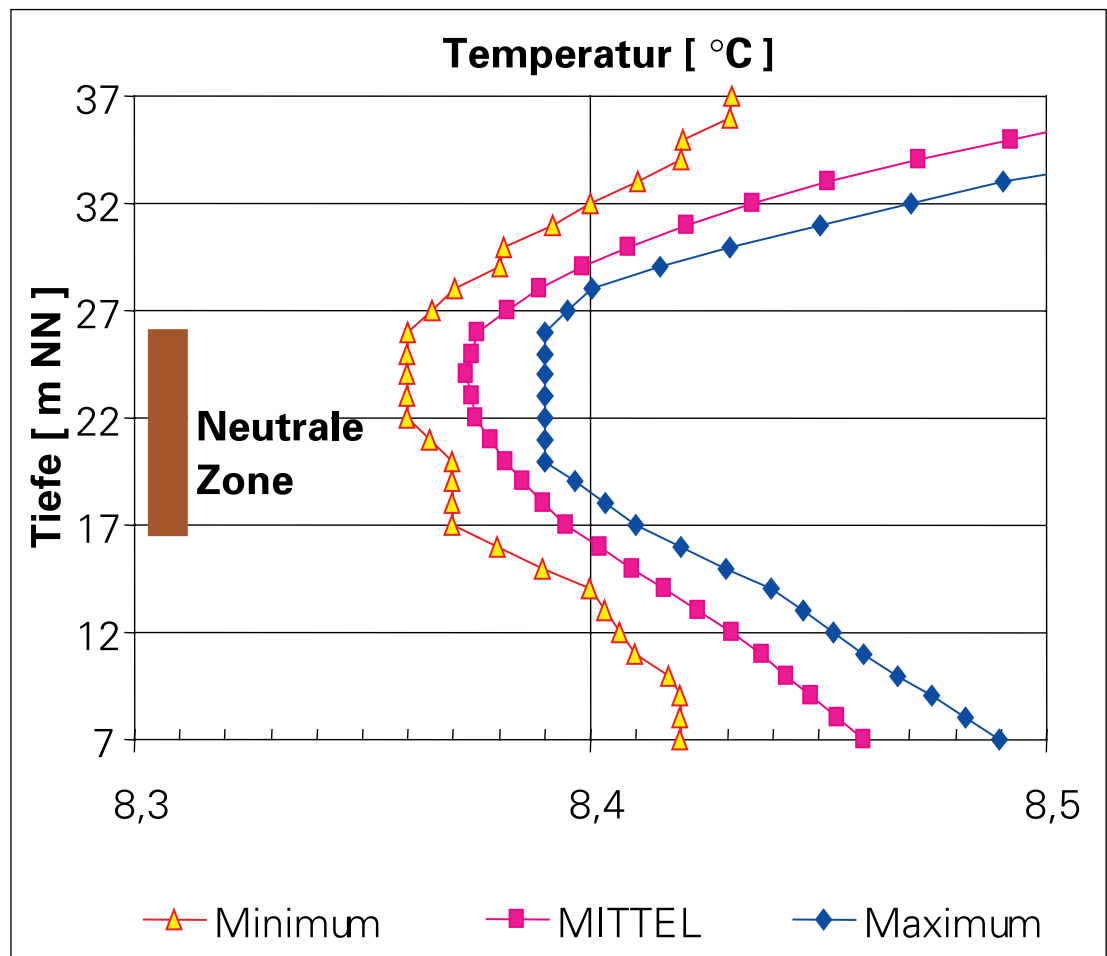
An der Erdoberfläche wirkt sich der jahreszeitliche Temperaturgang bis in Tiefen von 15 bis 25 Metern unter Geländeoberkante (GOK) aus (vergleiche auch HENNING & LIMBERG 1995, LUDEWIG 1982). Der Teufenbereich unmittelbar darunter wird als "Neutrale Zone" bezeichnet. Hier entsprechen die Untergrundtemperaturen dem Jahresmittel der Bodenluft. Um den Jahrgang messtechnisch zu erfassen, wurde eine nordwestlich des Untersuchungsgebiets gelegene Messstelle regelmäßig thermisch vermessen und die aufgezeichneten Temperaturlogs in zeitlicher Folge in einem Diagramm zusammengestellt. Danach bildet sich der jahreszeitliche Temperaturgang bis in eine Tiefe von 11 m unter Gelände sehr deutlich ab (Abbildung 5). In diesem Niveau beträgt die mittlere Temperatur 8,96°C, das Minimum 8,77°C und das Maximum bei 9,33°C ($\Delta T = 0,55^\circ\text{C}$). Die Temperatur

von 9,01°C entspricht der mittleren Jahresbodenlufttemperatur im Umfeld der Messstelle. In einer Tiefe von 25 m unter GOK reduziert sich diese Differenz auf $\Delta T = 0,05^\circ\text{C}$. Augenfällig ist die zu beobachtende Phasenverschiebung. Während die niedrigsten Temperaturen im Zeitraum von April bis Juni zu verzeichnen sind, wurden die höchsten im Spätherbst bis Winter beobachtet. Dieses Phänomen ist die Folge der Wärmeausbreitung im Untergrund, welche langsam vonstatten geht.

Die Temperaturdifferenzen in Messstellen, welche im Bereich von Flächen mit Acker-/Grünland-Nutzung stehen, sind hierbei deutlich höher als vergleichbare Teufenabschnitte auf Waldstandorten, wo der Klimagang gedämpft ist. Im Winter sind hier die mittleren Bodenlufttemperaturen höher und im Sommer niedriger als im Bereich von Freiflächen.

In Gebieten mit Überbauung beziehungsweise Versiegelung (Stadtgebiete) kommt es infolge des anthropogenen Wärmeeintrags (Abwärme) zu einer deutlichen Erwärmung der oberflächennahen Schichten. Dunkle Straßenbeläge absorbieren im Sommer die Wärmestrahlung der Sonne um ein Vielfaches der nicht versiegelten Umgebung und leiten diese Wärmeenergie in den Untergrund ein. Beide Phänomene führen dazu, dass eine Temperaturab-

Abbildung 3:
Ergebnisse 14-tägiger Temperaturmessungen in der Messstelle 4428. Es wurden insgesamt 24 Messungen, über das Jahr verteilt, durchgeführt. Die Standardabweichung im Bereich der Neutralen Zone betrug weniger als $0,01^\circ\text{C}$.



nahme bis in größere Tiefen (maximal 90 bis 100 Meter) zu beobachten ist. Hierbei liegt das mittlere Temperaturniveau meist mehrere Grade über dem unbebauten Flächen. Erst darunter steigen die Temperaturen wieder an. Dieses ist besonders in Ballungsräumen zu beobachten (vergleiche OTTO 1987; OTTO, LIMBERG & THIERBACH 1996).

2. Die Grundwassertemperaturen im tieferen Untergrund

Einen ersten Eindruck über die Temperaturabfolge im Untergrund des Untersuchungsgebietes vermittelt Abbildung 6. Es sind hier die mittleren, teufenorientierten Temperaturen mit zugehörigen Standardabweichungen und Extremwerten gegen die Tiefe aufgetragen. Die Zahl rechts neben dem Maximumbalken gibt die für die Mittelwertbildung herangezogene Anzahl der Grundwassermessstellen an. Dargestellt ist der Teufenbereich von 0 bis -120 m unter NN. Teufenbereiche oberhalb der neutralen Zone sind in der Abbildung nicht berücksichtigt.

Die Temperaturen steigen zur Tiefe hin nahezu linear an. Während in einer Tiefe von 0 m NN die mittlere Temperatur des Untersuchungsgebietes etwa $9,1^{\circ}\text{C}$ beträgt, liegt sie bei 120 m unter NN bei $11,0^{\circ}\text{C}$. Dieses entspricht einem mittleren Temperaturgradienten von etwa $1,8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Generell nimmt der Temperaturgradient zur Tiefe hin zu, wobei die Standardabweichung, begründet unter anderem in der Abnahme der Anzahl der Messdaten, ebenfalls größer wird. Betrachtet man in der Abbildung die Extremwerte, so ist die Schwankungsbreite zwischen Minimum und Maximalwert oberflächennah hoch, weil sich hier die Untergrunderwärmung durch Überbauung gegenüber kühlen Waldgebieten besonders auswirkt. In der Tiefe von -20 m NN sind die Extremwertdifferenzen am geringsten. Von dort aus verhalten sich die teufenbezogenen Minima nahezu isotherm, während die Maxima stark ansteigen. Das begründet sich darin, dass unter den Grundwasserneubildungsgebieten die Temperaturen der Neutralen Zone in Folge konvektiven Wärmetransports bis in große Tiefen zu beobachten sind. Die tiefliegenden Exfiltrationsgebiete wie Elbe- und Stecknitztal zeichnen sich hingegen durch den Aufstieg wärmerer Tiefenwässer, welche den vorgenannten Temperaturanstieg bewirken, aus. Ein starker Temperaturanstieg zur Tiefe hin ist ebenfalls im Bereich der Salzstöcke zu beobachten.

Die Abbildung 7 zeigt einen für das Untersuchungsgebiet typischen geologischen Schichtenschnitt, in den über die Schichtengrenzen

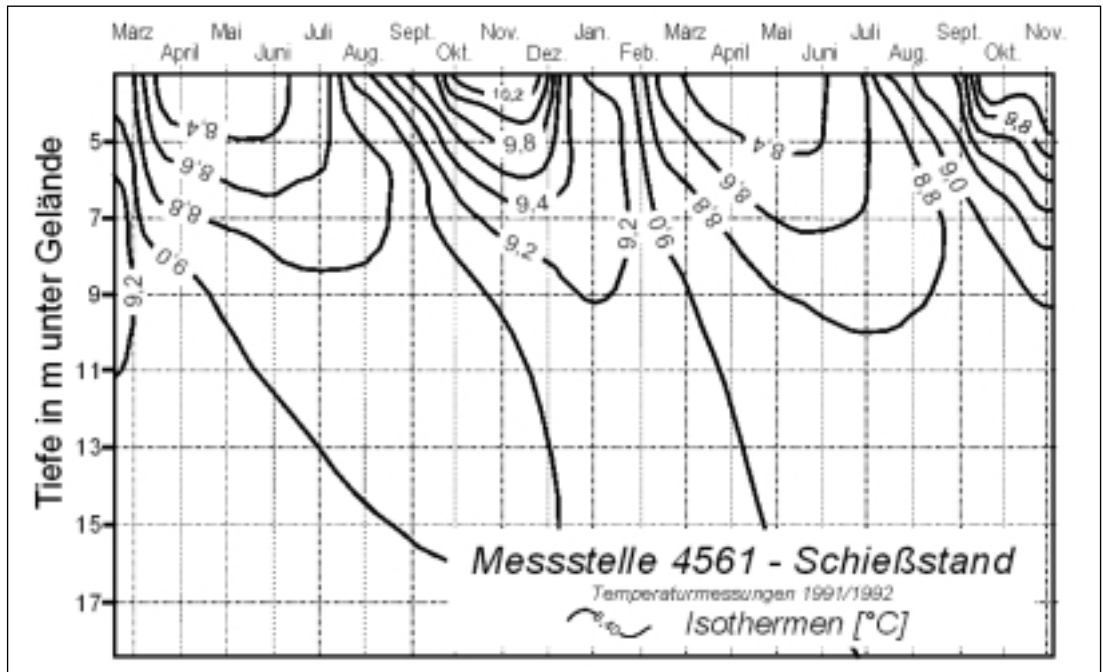


Abbildung 4: PT100-Temperatursonde im Feldeinsatz

hinaus die Grundwassermessstellen mit Standrohrspiegelhöhen und den in ihnen gemessenen Untergrundtemperaturen dargestellt sind. Die Isothermen wurden von Hand konstruiert, wobei versucht wurde, die Auswirkungen der Wärmeleitfähigkeiten und Grundwasserfließverhältnisse zu berücksichtigen. Der Isothermenschnitt verläuft von West nach Ost durch das Untersuchungsgebiet. Im Westen werden die Neubildungsgebiete erfasst mit hohen Grundwasserpotenzialen, im Osten das Exfiltrationsgebiet der Stecknitz mit niedrigen. Augenfällig sind zwei eiszeitliche Rinnenstrukturen, die Krüzener und die Büchener Rinne. Im westlichen Abschnitt des Schichtenschnittes sind die Potenzialgradienten nach unten gerichtet, im Bereich der beiden Rinnen - vor allem in der Büchener - nach oben.

Demzufolge verlaufen die Isothermen im Westen annähernd parallel zueinander mit einer Ausbeulung nach unten. Die relativ niedrigen Grundwassertemperaturen sowie die niedrigen Temperaturgradienten sind auf die konvektive Prägung des Temperaturfeldes durch Grundwasserströmung zurückzuführen. Das

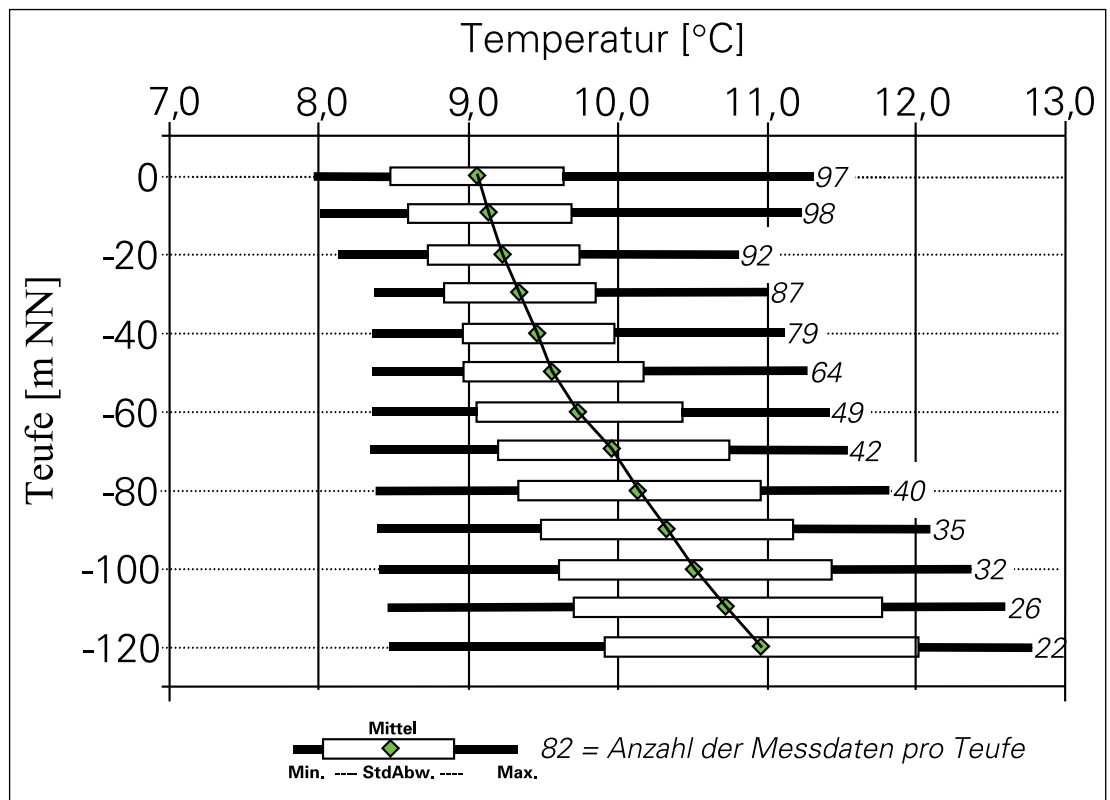
Abbildung 5:
Zeitliche Entwicklung der Untergrundtemperaturen in einer Grundwassermessstelle nordwestlich des Untersuchungsgebietes in Teufenbereich von 4 bis 18 Metern unter Gelände.



neugebildete Grundwasser kühlt hier den Untergrund nachhaltig aus. Die Grundwasserströmungen sind in den Rinnen eher umgekehrt. Durch die relative Tieflage und die im Bereich der Rinnen befindlichen Vorfluter kommt es zu einer Druckentlastung und einem Aufstieg tie-

ferer Grundwässer. In Abbildung 7 ist das durch Strömungspfeile gekennzeichnet. Dieser Aufstieg bewirkt eine deutliche Erwärmung der oberflächennahen Schichten um mehr als 1°C gegenüber den Neubildungsgebieten.

Abbildung 6:
Mittlere Temperaturverteilung im Untergrund des Untersuchungsgebietes



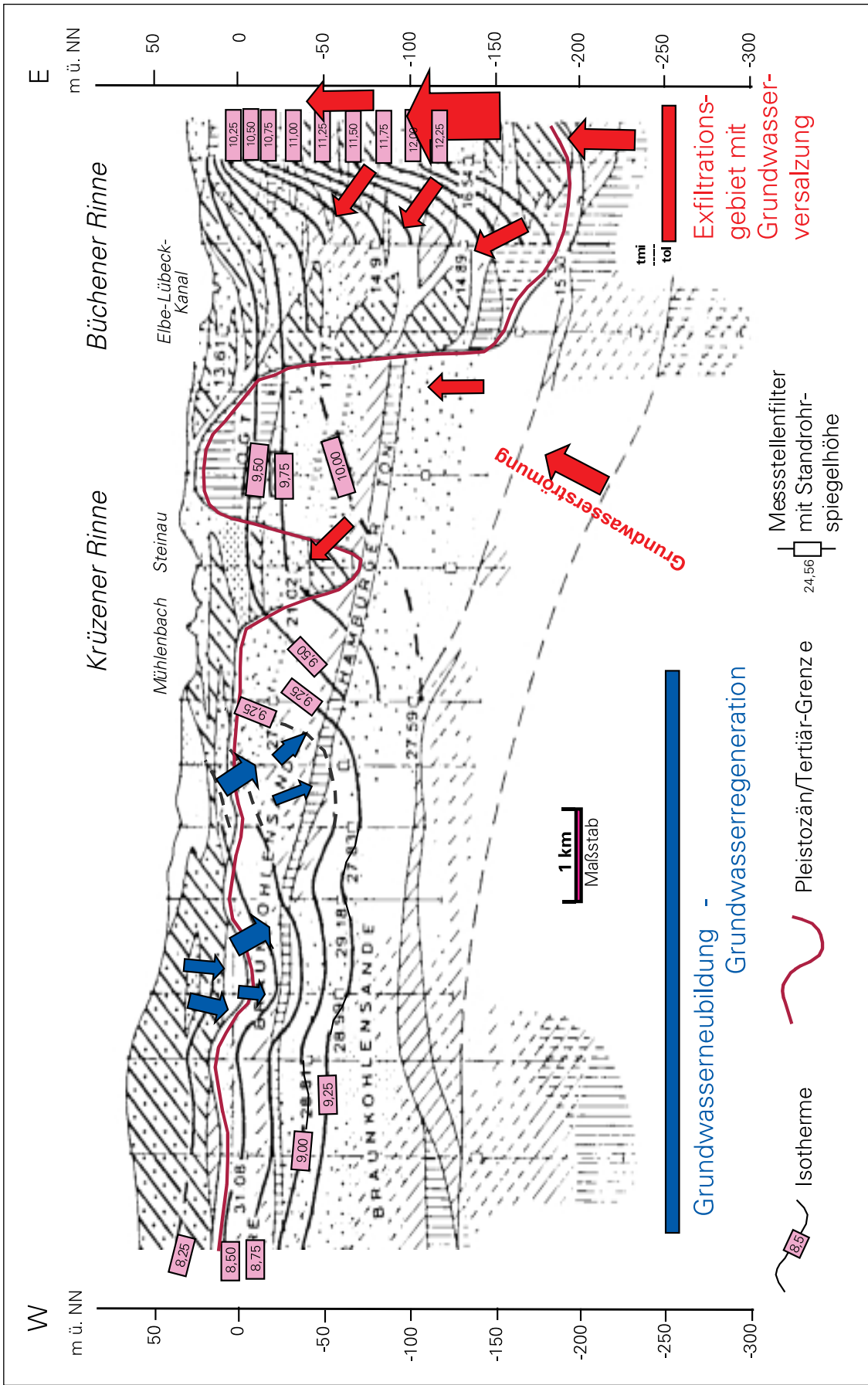
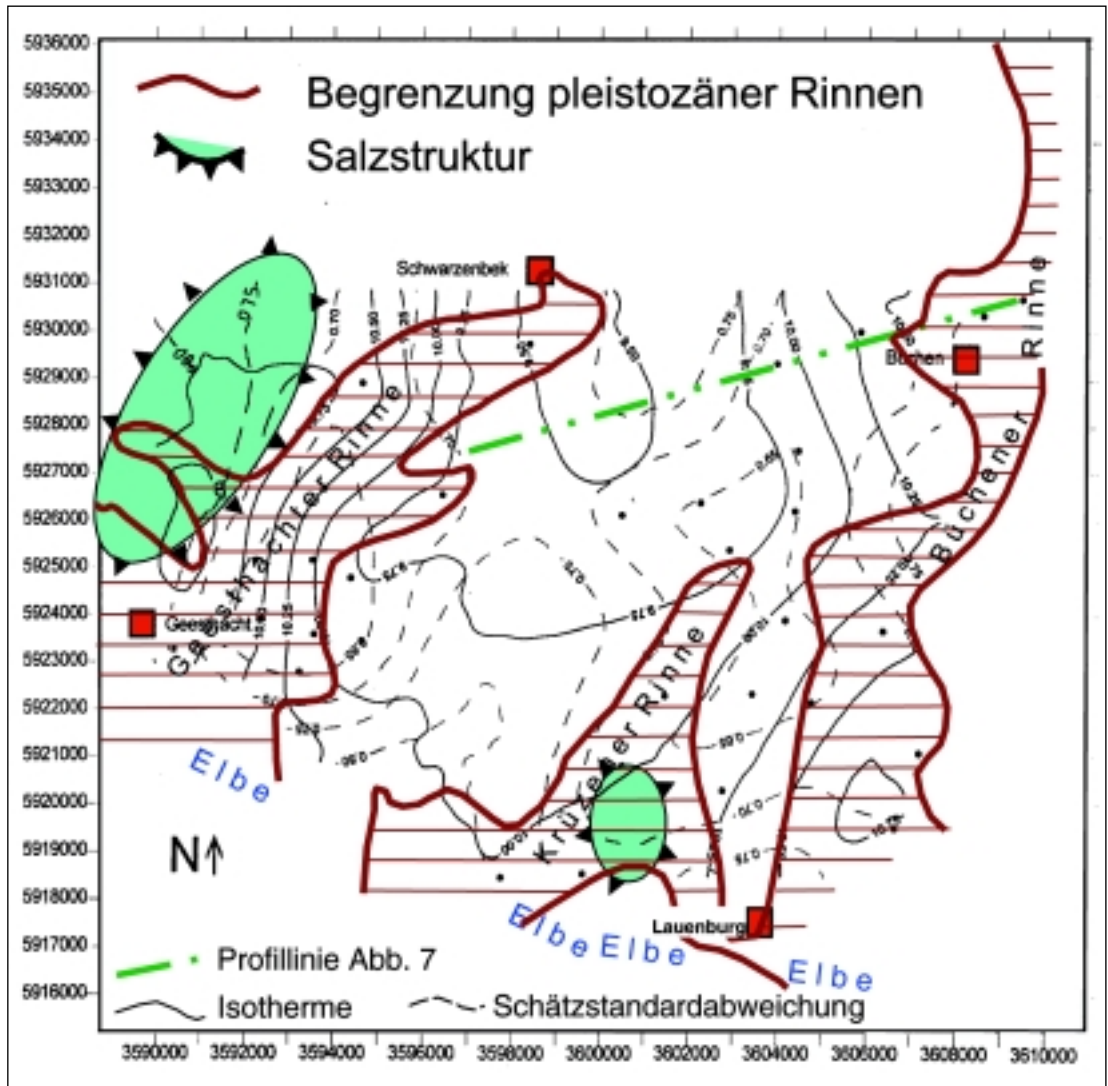


Abbildung 7: Hydrogeologischer Schichtenschnitt mit Isothermen durch den Ostteil des Untersuchungsgebietes

Abbildung 8:
Isothermenkarte für
das Bezugsniveau
von -80 Metern
NN. Dargestellt
sind auch Salz- und
Rinnenstrukturen



3. Die Temperaturverteilung im Untersuchungsniveau von -80 m NN

Für das Teufenniveau von -80 m NN wurde auf Grundlage der Grundwassertemperaturmessungen eine Isothermenkarte konstruiert (Abbildung 8). Anhand der Temperaturverteilung sollten Erkenntnisse über die hydraulische Situation im Untersuchungsgebiet abgeleitet werden. Insbesondere ging es um Auswirkungen der Salzstöcke und Rinnenstrukturen auf das Grundwassersystem. Um eine hinreichend hohe Auflösung und übersichtliche Darstellung in den horizontalen Isothermenkarten zu gewährleisten, wurden Temperaturintervalle von 0,25°C gewählt. Die ebenfalls mit einbezogenen Schätzstandardabweichungen erscheinen als gestrichelte Linien und weisen Bereiche gleicher Varianz als Vertrauensbereiche unterschiedlicher Güte aus. Der Isothermenkarte liegen die Daten von 38 Messstellen zugrunde.

Die Abbildung 8 verdeutlicht noch einmal das zu Abbildung 7 Gesagte. Der zentrale Bereich des Untersuchungsgebiets einschließlich der Ostflanke der Geesthachter Rinne weist mit

9,75°C eine für diese Tiefe relativ geringe Temperatur auf. Auf Grund des Deckschichtaufbaus und der orographischen Hochlage bewegt man sich hier in einem Grundwasserneubildungsgebiet mit tiefreichender Auskühlung der oberflächennahen Schichtenfolge. Im Bereich der Rinnenflanken scheint auch ein Kontakt zu den tieferen Grundwasserleitern (Untere Braunkohlensande) hergestellt zu sein, denen im Flankenbereich kühleres Grundwasser aus den Hangendschichten zuströmt. Die Rinne selbst ist weitgehend mit Lauenburger Ton verfüllt. Nach Westen hin steigen die Temperaturen rasch an. Dieses ist auf den verstärkten Wärmefluss im Bereich der Salzstruktur Hohenhorn (hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes) und den Übergang von konvektivem zu konduktivem Wärmetransport zurückzuführen.

Am östlichen Rand des Untersuchungsgebietes sind entlang der Bühren Rinne ebenfalls höhere Untergrundtemperaturen zu beobachten, welche jedoch auf konvektiven Wärmetransport zurückgeführt werden können. Auf Grund der orographischen Tieflage im Steck-

nitztal (Elbe-Lübeck-Kanal) kommt es in Folge von Druckentlastung zu einem Aufstieg wärmerer Tiefenwässer, welcher einhergeht mit Grundwasserversalzung (Abbildung 7 und 8).

Zusammenfassung

Zur langfristigen Sicherstellung der Wasserversorgung im Raum Südost-Holstein wurde ein Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebots durchgeführt. Ein Teilprojekt war das geothermische Untersuchungsprogramm im Raum Geesthacht/Schwarzenbek/Lauenburg (Untere Elbe). Das Ziel dieses Vorhabens war es, mit Hilfe von Grundwassertemperaturmessungen Erkenntnisse über den oberflächennahen Wasserkreislauf und die hydraulische Wechselwirkung zwischen flachen und tiefen Grundwasserleitern zu erlangen. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 237 Grundwassermessstellen an 124 Standorten mit einer Temperatursonde befahren. Die Gesamtbefahrungslänge betrug etwa 17.600 Meter.

Grundwasserneubildungsgebiete, in denen vorwiegend konvektiver Wärmetransport vorherrscht, zeichnen sich durch eine tiefreichende Auskühlung des Untergrundes aus. Gebiete mit hohen Untergrundtemperaturen wurden in orographisch tief gelegenen Bereichen des Untersuchungsgebietes (Elbtal/Stecknitztal) lokalisiert, wo wärmere Tiefenwässer, einhergehend mit Grundwasserversalzung, aufsteigen. Salzstöcke wirken auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Salzes als Wärmedom und können ebenfalls gut abgegrenzt werden. Jahreszeitliche Temperatureinflüsse reichen bis in Tiefen von 20 bis 25 Metern unter Gelände.

Summary

Temperature measurements in deep wells were made in the area of Geesthacht/Schwarzenbek/Lauenburg (SE Schleswig-Holstein). Targets of these investigations are the near surface water cycle (hydrological cycle) and the hydrological interaction between and near surface and deep aquifers. The measurements were made with a temperature probe in 237 ground-observation wells at 124 locations. A total of 17,600 m of well length was measured. In areas with recharge of groundwater where the convective heat flow is dominant, deep reaching cooling effects by percolating water were observed. Areas with high

underground temperatures are situated in the low lands of the investigation area (Elbe and Stecknitz valleys). In these locations warmer ground water from deeper aquifers (partly saline) is ascending to the terrain surface. Salt stocks have a high thermal conductivity and therefore act as heat dome. Seasonal temperature variations are observed down to depths of 20 – 25 m under ground level.

Literatur

AGSTER, G. (1996): Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im schleswig-holsteinischen Nachbarraum zu Hamburg, Südost-Holstein, Abschlussbericht zur Geologie und Hydrogeologie des Untersuchungsraumes.- 107 S.; LANU Flintbek (unveröffentl.).

HENNING, A. & LIMBERG, A. (1995): Das Grundwassertemperaturfeld von Berlin.- Brandenburgische Geowiss. Beitr., **2**: 97-104; Kleinmachnow.

LANGE, W. & KOSACK, B. (1984): Geologischer Überblick vom Kreis Herzogtum Lauenburg.- In: Exkursionsführer Erdgeschichte des Nordsee- und Ostseeraumes.- 53-57, Selbstverlag des Geologisch-Paläontologischen Institutes der Universität Hamburg; Hamburg.

LUDEWIG, H. (1982): Temperaturmessungen in Tiefenpegeln im Raum Hamburg und deren hydrogeologische Interpretation.- 141 S.; Diss.Univ.Oldenburg.

OTTO, R; LIMBERG, A. & THIERBACH, J. (1996): Funktionsüberprüfung von Grundwassermessstellen mit Hilfe geothermischer Untersuchungsverfahren.- Z. dt. geol. Ges., **147/4**: 531-541; Stuttgart.

OTTO, R. (1987): Hydrochemie, Thermometrie und Fließverhältnisse des Grundwassers in den südöstlichen Stadtbezirken von Berlin (West)- Neukölln, Kreuzberg, Tempelhof, Schöneberg.- Berliner geow. Abh., A88: 115 S.; Berlin.

➤ Dr. Roland Otto

Dezernat 45 – Grundwasserbewirtschaftung
Tel.: 0 43 47 / 704 – 455
rotto@lanu.landsh.de