

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 129-141, 9 Abb.
Halle (Saale), Mai 2011

Auswertung von Grundwasserstandsdaten auf dem Weinberg Campus der Martin-Luther-Universität Halle in Heide-Süd

Wolfgang Gossel, Ronny Lähne, Julia Rienäcker, Gunnar Krauss & Peter Wycisk*

Gossel, W., Lähne, R., Rienäcker, J., Krauss, G. & Wycisk, P. (2011): Auswertung von Grundwasserstandsdaten auf dem Weinberg Campus der Martin-Luther-Universität Halle in Heide-Süd. [Analysis of groundwater level measurements at the Weinberg Campus, Martin Luther University Halle in Heide-Süd.] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 129-141, Halle (Saale).

Kurzfassung: Die hydrodynamische Situation in der Stadt Halle ist wegen der Heterogenität der Aquiferstrukturen in Locker- und Festgesteinsgebieten sehr komplex. Im Nordwesten der Stadt wurde ein dichtes Netz von Beobachtungsmessstellen eingerichtet, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die Abgrenzung von Einzugsgebieten, zur Zeitreihenanalyse und für Kreuzkorrelationen zwischen Grundwasserstands- und Klimadaten genutzt wurde. Die Ergebnisse zeigen ein differenziertes Strömungsbild mit einem Abfluss zur Saale und indirektem unterirdischem Abfluss. Die Zeitreihenanalyse wurde anhand der stündlich gemessenen Grundwasserstände einer Messstelle durchgeführt und zeigt sowohl die Jahresperiode als auch kurzfristige Perioden von 9 und 11 Tagen. Der Vergleich zwischen Grundwasserständen und der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz zeigt eine signifikante Zeitverzögerung von 9 Tagen und 60 Tagen zwischen beiden Ganmlinien, die als lokale Reaktionszeit und Reaktionszeit des Einzugsgebiets gedeutet werden können.

Abstract: The hydrodynamical situation of the town of Halle is very complex due to different aquifers both in hard rocks and unconsolidated rocks. To the northwest of the city a dense net of observation wells was established used in an investigation of groundwater levels for the outline of catchment areas, time series analysis and cross correlations between groundwater levels and climatic data to clarify their dependencies. The results show a differentiation in the catchment with a direct flow to the river Saale and an indirect subsurface discharge. The time series analysis of one well that was observed hourly shows annual periodicity as well as some subordinate short periods of 9 and 11 days. The comparison of groundwater levels and at cumulated climatic water balance outlines a time shift of 9 days and 60 days between both “hydrographs”, interpreted as the reaction of the local conditions and of the catchment.

Schlüsselwörter: Zeitreihenanalyse, Rotliegend-Grundwasserleiter, Kreuzkorrelation, Grundwasserströmungsverhältnisse

Keywords: Time series analysis, Rotliegend aquifer, cross-correlation, groundwater flow patterns

* Anschriften der Autoren:

PD Dr. Wolfgang Gossel (wolfgang.gossel@geo.uni-halle.de), FG Hydro- und Umweltgeologie, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale);

Dipl.-Geol. Ronny Lähne (ronny.laehne@geo.uni-halle.de), FG Hydro- und Umweltgeologie, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale);

BSc Julia Rienäcker (julia.rienaecker@student.uni-halle.de), FG Hydro- und Umweltgeologie, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale);

Dr. Gunnar Krauss (gunnar.krauss@halle.de), Umweltamt der Stadt Halle (Saale), Untere Bodenschutzbehörde, Hansering 15, D-06108 Halle (Saale);

Prof. Dr. Peter Wycisk (peter.wycisk@geo.uni-halle.de), Institut für Geowissenschaften und Geographie, FG Hydro- und Umweltgeologie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale).

1. Einleitung

Die hydrogeologische Situation der Stadt Halle ist sehr komplex: Einerseits sind mehrere Lockergesteins- und Festgesteinsgrundwasserleiter zu unterscheiden, andererseits ist die heterogene Struktur dieser Grundwasserleiter durch die ungeklärten Strömungs- und Transportverhältnisse zwischen diesen Grundwasserleitern gekennzeichnet. Ein erster Ansatz für die Aufarbeitung der bekannten Daten bestand in der Erstellung von einem "Grundwasserbeobachtungs- und -schadstoffkataster" (G.E.O.S. 2000) im Auftrag der Stadt Halle. Es beinhaltete die Auswertung und Visualisierung von repräsentativen Bohrdaten in Form von Profilschnitten und die Auswahl von Grundwassermessstellen für ein regelmäßiges Grundwassermonitoring. In einem zweiten Schritt wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Umweltamt der Stadt Halle und der Martin-Luther-Universität ein erstes geologisches 3D Modell erstellt, das die Daten aus G.E.O.S. (2000) zur Grundlage nutzte und zusätzlich die geologische Karte (GLA Sachsen-Anhalt 1994) und ein digitales Höhenmodell im 40 m Raster basierend auf den Höhenlinien der topografischen Karte 1 : 10000 verwendete (Pohlert 2005, Schlesiener 2006). Im Rahmen von Qualifikationsarbeiten der Martin-Luther-Universität Halle, die in Zusammenarbeit mit dem Umweltamt der Stadt Halle durchgeführt wurden, wurden zusätzlich zum regelmäßigen Monitoring der Stadt Halle Messungen an Grundwassermessstellen im Umfeld des Heide-Campus der Universität durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war eine detaillierte Aufnahme der Grundwasserströmungsbedingungen im Bereich des südlichen Heide-Campus (s. Abb. 1). An der hier verlaufenden Halle-Störung grenzen eine Vielzahl Lockergesteins- und Festgesteinsgrundwasserleiter aneinander, so dass eine Klärung der hydrogeologischen Verhältnisse in diesem Bereich auch eine Erweiterung der Kenntnisse in anderen Teilen der Stadt mit sich bringt.

Die hydraulischen und hydrodynamischen Bedingungen sollten anhand von Wasserstandsmessungen des oberflächennahen Grundwassers aus verschiedenen Grundwasserleitern sowie Analysen von zeitlich hoch auflösenden Grundwasserganglinien untersucht werden. Im Vordergrund standen hierbei die Fragen nach statistisch signifikanten Zusammenhängen zwischen Klimadaten und Grundwasserdynamik, so z.B. auffällige Periodizitäten im Grundwassergang und zeitliche

Verzögerungen zwischen Klimatischer Wasserbilanz und Grundwasserspiegelreaktion.

Die genutzten Methoden (Fast-Fourier-Transformation (FFT), Kreuzkorrelationsanalyse, Periodenscanning) werden für die Analyse der vorhandenen klimatischen und hydrodynamischen Zeitreihen verwendet. Mit Hilfe der FFT und des Periodenscannings können Aussagen zur Periodizität innerhalb der Zeitreihen getroffen werden. Die analysierten Perioden werden anschließend bzgl. meteorologischer und hydrogeologischer Eigenschaften des Untersuchungsgebietes interpretiert. Durch die Kreuzkorrelation zwischen 2 Zeitreihen kann zudem der Zeitversatz der analysierten Zeitreihen ermittelt werden. Bei der Analyse der Kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der zugehörigen Grundwasserstandsganglinie kann zum einen die Phasenverschiebung zwischen Niederschlag und Grundwasserneubildung und zum anderen die Reaktionszeit des Einzugsgebietes auf ein Niederschlagsereignis ermittelt werden.

2. Geologische und hydrogeologische Grundlagen

Die geologischen Untersuchungen im Raum Halle haben eine lange Tradition, denn die Gründung der Stadt und ihr Name sind auf die Verfügbarkeit von salzhaltigen Quellen zurückzuführen. Diese Salzquellen lagen im Zentrum der Stadt (rund um den Marktplatz) und dienten seit etwa 4500 Jahren zur Siedesalzgewinnung (Kaufmann 1991).

In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Publikationen zur Beschreibung der Geologie der Stadt und des Umfeldes herausgegeben, z.B. Heckner et al. (1997). Von besonderem Interesse war dabei die heute als Halle-Störung (früher als Hallesche Marktplatzverwerfung) bezeichnete NW-SE verlaufende Störung, im Zuge derer auch die salzhaltigen Grundwässer an die Erdoberfläche traten. Die geologischen Einheiten von Sachsen-Anhalt werden in vier verschiedene Stockwerke unterteilt (Bachmann & Schwab 2008):

- Grundgebirgsstockwerk (Kambrium bis Karbon),
- Übergangsstockwerk (Karbon bis Perm),
- Tafelgebirgsstockwerk (Perm bis Kreide) und
- Lockergesteinsstockwerk (Tertiär und Quartär).

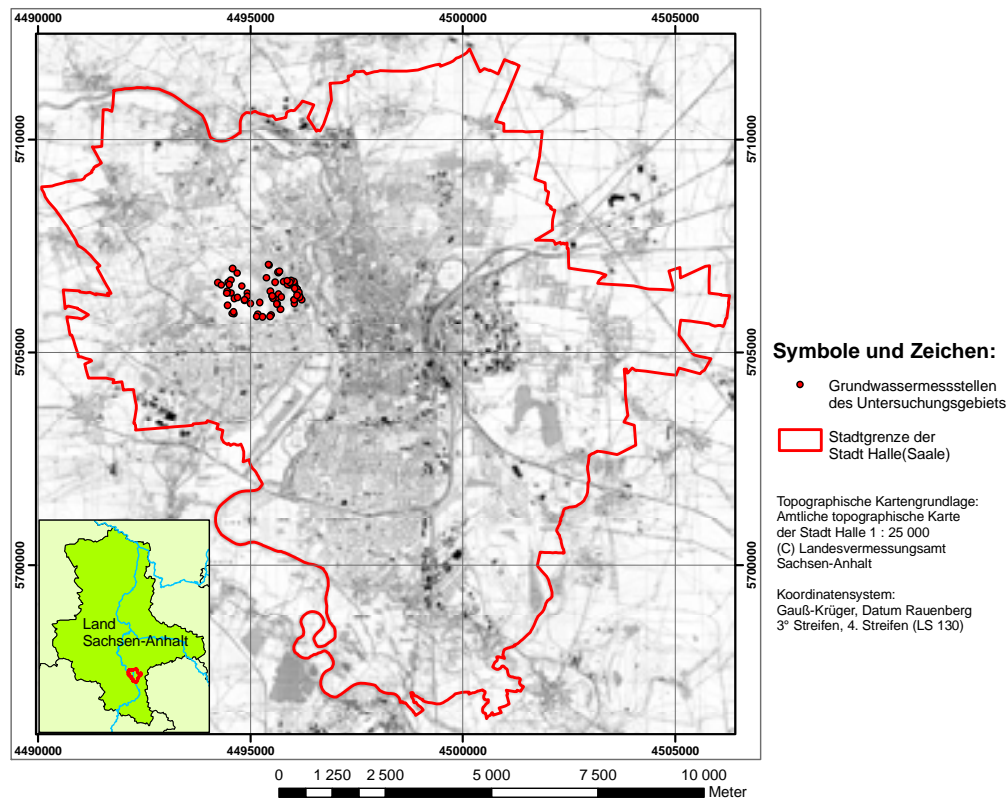


Abb. 1: Übersichtskarte des Gebiets.
Fig. 1: Overview map of the area.

Im Stadtgebiet von Halle sind vor allem die drei jüngeren Stockwerke flächendeckend ausgebildet.

Die Gliederung beginnt gemäß Katzung & Ehmke (1993) im Idealzustand mit dem Grundgebirgsstockwerk, bestehend aus unterschiedlich stark deformierten Gesteinen des Neoproterozoikums bis Unterkarbons, die zumeist aus Plutoniten und metamorphen Sedimenten aufgebaut sind.

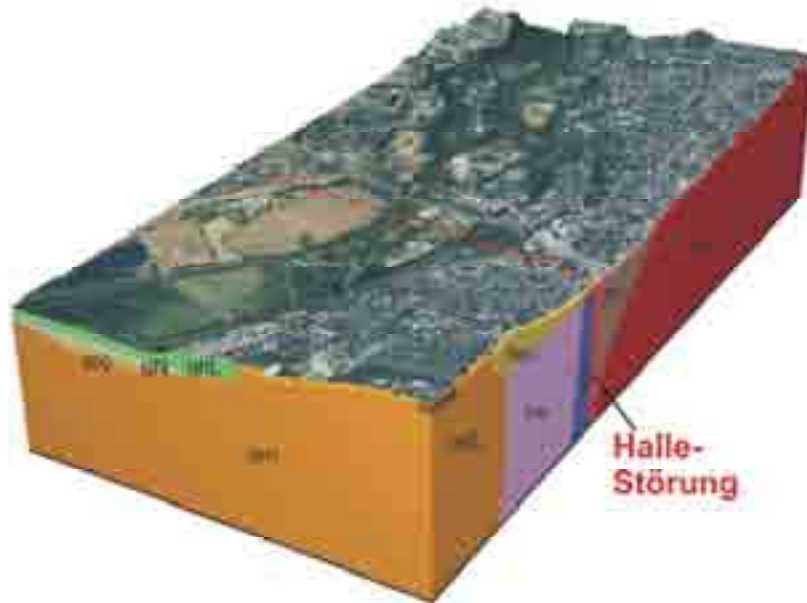
Das Übergangs- oder Molassestockwerk entspricht den ungefalteten Lithologien des Jungpaläozoikums, welches das Grundgebirge an seiner Basis überlagert. Laut Bachmann & Schwab (2008) ist es zwischen dem Grundgebirgs- und dem Deckgebirgsstockwerk gelegen und überwiegend aus dem karbonischen und permischen Ablagerungsschutt der Varisziden aufgebaut. Diese sind mit den effusiven, rhyolithischen und andesitischen Gesteinen und Intrusionen granitischer Schmelzen verbunden (Bachmann & Schwab 2008).

Das vorletzte Stockwerk wird von Ablagerungen der Perioden Perm (Zechstein), Trias, Jura und Kreide gebildet (Bachmann & Schwab 2008). Auf Grund seiner vorherrschend flachen Lagerung wird es als Tafelgebirgsstockwerk bezeichnet.

Das oberste und jüngste Element der Gliederung wird als Lockergesteinsstockwerk bezeichnet (Katzung & Ehmke 1993). Es ist aus tertiären und quartären Sedimenten aufgebaut, zumeist als unverfestigtes, lockeres Deckgebirge ausgebildet und tektonisch nicht oder nur wenig deformiert (Bachmann & Schwab 2008). Den Hauptanteil bilden in Sachsen-Anhalt die Ablagerungen des Tertiärs (Knoth 1992). Einen Überblick über den Schichtaufbau im Stadtgebiet gibt Abb.2.

Im Untersuchungsgebiet sind alle Stockwerke mit Ausnahme des Grundgebirgsstockwerks in wechselnden Anteilen vorhanden. Die geologische Übersicht in Abb. 3 ist aus der geologischen Karte 1 : 50.000 (GLA Sachsen-Anhalt 1994) übernommen und zeigt, dass im Norden die permischen Schichten dominieren, die von Lockergesteinen des Tertiär und Quartär überdeckt sind.

Für die Hydraulik und Hydrodynamik im Untersuchungsgebiet spielen die Gesteine des Grundgebirgsstockwerks und des Übergangsstockwerks nur eine untergeordnete Rolle. Diese Festgesteine sind gering durchlässig und auch nicht durch Klüfte so stark zersetzt, dass sich daraus ein nennenswerter Kluftgrundwasserleiter ergeben würde.



qhL	Holozäne Auenlehme	su	Unterer Buntsandstein
qN	Niederterrasse (Warthe-Stadium)	z	Zechstein
teo	Mittel- und Obereozän	ro	Oberrotliegend
sm	Mittlerer Buntsandstein	ru	Unterrotliegend

Abb. 2: Ausschnitt des geologischen 3D Modells der Stadt Halle (Schlesier 2006).
 Fig. 2: Clip of the geological 3D model of Halle town (Schlesier 2006).

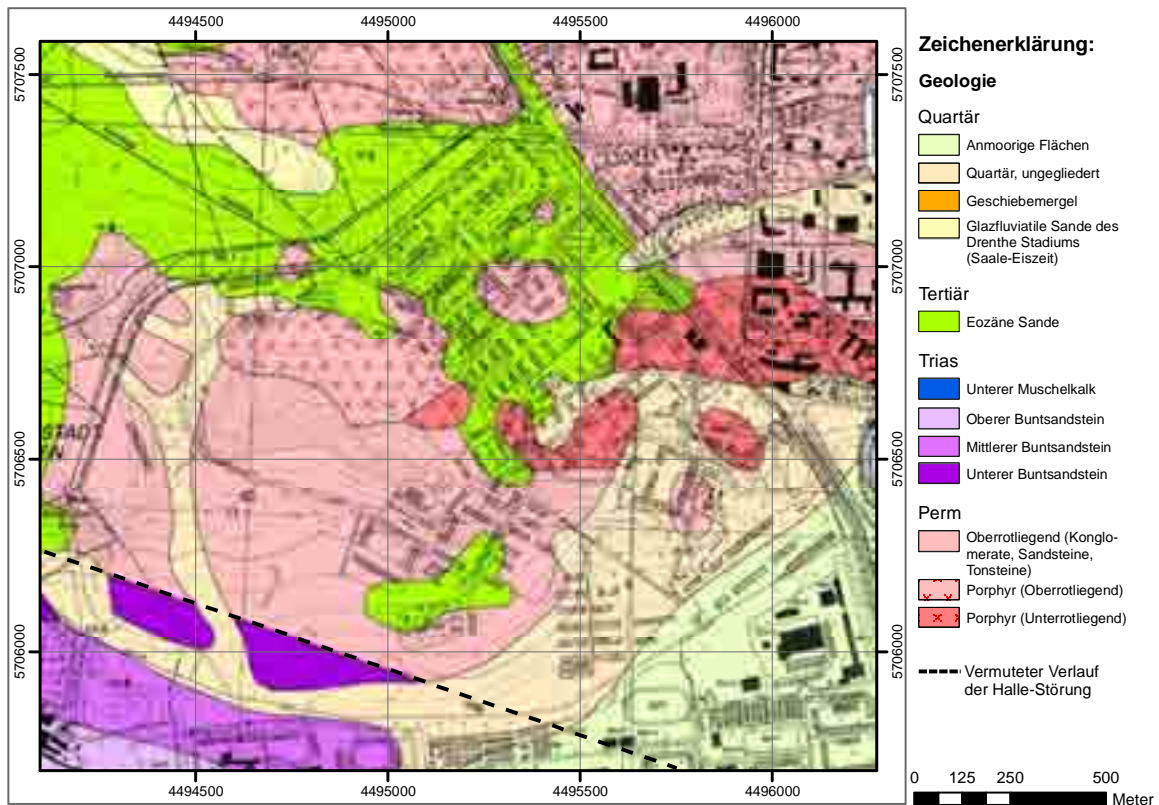


Abb. 3: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets auf Basis der geologischen Karte 1 : 50 000 (GLA Sachsen-Anhalt 1994).
 Fig. 3: Geological map of the investigation area based on the geological map scale 1 : 50 000 (GLA Sachsen-Anhalt 1994).

Die Grundwasser leitenden Schichten des Rotliegenden sind nördlich der Halle-Störung verbreitet und umfassen die Unter- und Oberrotliegendablagerungen. Im Verbreitungsgebiet der Rotliegendkonglomerate und -vulkanite sind keine nutzbaren Grundwasservorkommen zu erwarten (Pretschold 1998). Ausschließlich im Rotliegendvulkanitkomplex herrscht eine geringe Kluftwasserführung (Jordan & Weder 1995). Auf Grund der geringen Wasserführung sowie des geringen Geschütztheitsgrades ist die hydrogeologische Bedeutung als gering einzuschätzen (Kater & Koch 2007).

Der Grundwasserleiter des Zechsteins tritt südlich bis südöstlich der Halle-Störung auf und ist gut wasserführend (Koch 2000). Die grundwasserleitenden Schichten (Platten- und Hauptdolomit) gehören vorrangig dem Leine- und Staßfurtzyklus an und bilden einen großräumigen, hydrodynamischen Komplex (Koch et al. 2006). Durchschnittlich weisen die Dolomite in Normallagerung 30 bis max. 65 m Mächtigkeit auf (Koch et al. 2006). Der Grundwasserdruckspiegel liegt bei 72 bis 74 m NHN, das entspricht etwa 25 m unter Geländeoberfläche (Koch 2000, Lauer et al. 1998) und zeigt damit deutlich gespannte Verhältnisse an. Die Zechsteinablagerungen sind vorwiegend in größeren Tiefen (> 400 m) verbreitet (Lauer et al. 1998).

Der Grundwasserleiter des Buntsandsteins ist der wirtschaftlich bedeutendste Aquifer des Festgesteinsbereichs im Raum Halle (Koch et al. 2006).

Im Hangenden des Zechsteins folgen die Schluffstein- bzw. Sandstein-/Schluffsteinfolgen des Unteren Buntsandsteins (Kater & Koch 2007). Dieser Schichtkomplex ist allgemein wenig wasserführend, da nur geringmächtige, klüftige Kalk- und Rogensteine eingeschaltet sind (Pretschold 1998).

Der Mittlere Buntsandstein bildet die wichtigsten Teilaquifere innerhalb der Trias (Kater & Koch 2007). Die gut klüftigen Sandstein-/Schluffsteinfolgen weisen im Halleschen Raum bei vollständiger Erhaltung bis zu 250 m Mächtigkeit auf und können in mehrere Grundwasserstockwerke gegliedert werden (Pretschold 1998). Nach Lauer et al. (1998) ermöglicht die Halle-Störung eine hydraulische Verbindung zwischen den einzelnen GWL-Stockwerken, lokal auch zum Unteren Buntsandstein und zum Zechstein. Dies hat eine z.T. starke Versalzung von Wässern des Unteren und Mittleren Buntsandsteins sowie des quartären Lockergesteinsgrundwasserleiters der Saaleaue zur Folge (Koch et al. 2006).

Es folgen die grundwasserhemmenden Schluff- und Tonmergelsteine des Oberen Buntsandsteins (Lauer et al. 1998). Die tonig ausgebildete Pelitröt-Folge trennt den Buntsandstein vom hangenden Grundwasserleiter des Muschelkalks ab (Kater & Koch 2007). Störungssysteme und Kluftzonen ermöglichen dennoch vereinzelt Verbindungen zum Muschelkalk-GWL (Lauer et al. 1998).

Die Kalksteine des Muschelkalks zählen zu den Kluftgrundwasserleitern und gelten nach Pretschold (1998) ebenfalls als gut wasserführend. Die ca. 140 m mächtigen Kalksteine des Unteren Muschelkalks (Wellenkalk) sind stark geklüftet und bilden einen der Hauptgrundwasserleiter im Raum Halle (Lauer et al. 1998). Die Wässer sind stark, vor allem durch CaSO_4 , mineralisiert und gering geschützt (Kater & Koch 2007).

Als Resultat zahlreicher Flachbohrungen sind die wesentlichen hydrogeologischen Verbreitungsgebiete der Lockergesteinsgrundwasserleiter bekannt (Pretschold 1998). Als Lockergesteinsgrundwasserstockwerk werden die Grundwasserleiter des Tertiärs und Quartärs verstanden. Die hydrogeologischen Verhältnisse dieser Grundwasserleiter sind angesichts ihrer großflächigen Verbreitung sowie der oberflächennahen Lokalisierung sehr gut untersucht.

Die Auswertung der Schichtenverzeichnisse aller Messstellen sowie die Einsichtnahme in geologische und hydrogeologische Kartenwerke bestätigten die Vermutung, dass im Untersuchungsgebiet der Rotliegend-GWL und der quartäre Tal-GWL verbreitet sind. Obwohl diese von der hydrogeologischen Charakteristik zwei vollkommen verschiedene GWL-Typen darstellen, wird nicht von zwei gänzlich eigenständigen GWL ausgegangen.

3. Untersuchungsmethoden

Die hydrodynamischen Untersuchungen umfassen einerseits Messungen der Grundwasserstände in der Fläche und andererseits Messungen mit einer hohen zeitlichen Auflösung. Im Untersuchungsgebiet standen etwa 200 Grundwassermessstellen zur Verfügung, von denen ein großer Teil genutzt werden konnte (65), andere waren zur Schadenserfassung und -beobachtung an Altlasten sehr dicht gesetzt und in dieser sehr lokalen und großskaligen Auflösung wenig sinnvoll für die Erfassung des Strömungsverhaltens im Gebiet.

Die Daten wurden mit statistischen und geostatistischen Methoden ausgewertet. Hierfür wurden die Softwarepakete der Firmen SPSS (2008), Golden Software (2002) und ESRI (2008) eingesetzt.

Die Grundwasseroberflächen wurden zunächst über Messungen mit Licht- oder Akkustikloten an den zur Verfügung stehenden Grundwassermessstellen bestimmt. Die Verarbeitung der gemessenen Daten umfasste die Zuordnung der Messungen zu den Grundwasserleitern und die geostatistische Analyse und Interpolation.

Zur Analyse und Interpretation der zeitlich hoch auflösend gemessenen Grundwasserganglinie wurden die statistischen Methoden der Korrelation mit meteorologischen Daten und Zeitreihenanalysen eingesetzt. Dabei wurden neben der klassischen Periodizitätsanalyse nach dem Verfahren der Fast Fourier Transformation (FFT) auch das in Gossel (1999) beschriebene Periodenscanning eingesetzt. Hierbei werden nicht nur harmonische Bruchteile des gesamten Untersuchungszeitraums auf ihre Signifikanz getestet sondern die Periodizitäten mit einer beliebigen, vorher definierten Auflösung gescannt und die Kreuzkorrelationen zwischen synthetischen und gemessenen Ganglinien berechnet.

Für die Bewertung der Kreuzkorrelationen (z.B. zwischen Grundwasserstand und kumulierter Klimatischer Wasserbilanz) wurde auf eine Signifikanz von 95% getestet.

Die hydraulischen Durchlässigkeiten wurden durch Kurzzeit-Pumpversuche und Slug & Bail Tests ermittelt. Bei den Pumpversuchen, die im Rotliegenden angesetzt waren, betrug die Pumpzeit aufgrund der hohen Absenkungsraten bei sehr geringer Wasserförderung nur etwa 10 Minuten.

4. Datengrundlagen

An 65 Grundwassermessstellen wurden die Wasserstände des Grundwassers gemessen. Die Lage der Grundwasserbeobachtungsrohre ist Abb. 4 zu entnehmen. Innerhalb des Untersuchungsgebiets fanden mehrere Stichtagsmessungen statt (Rienäcker 2008, Böse 2008, Rumpf 2009), wobei jedoch hauptsächlich die Messwerte vom April 2010 zur Erstellung der Gleichpläne genutzt wurden.

Die hydraulische Durchlässigkeit des Rotliegenden wurde auf dem Campus an einer Grundwassermessstelle ermittelt.

Die Grundwasserstandsganglinie wurde an einer Messstelle im Rotliegenden automatisch aufgezeichnet. Beginn der stündlichen Messungen war am 29.02.04 und die Aufzeichnung erfolgt seitdem kontinuierlich. Für die folgenden Betrachtungen wurde der Zeitraum 29.02.04 bis 31.10.09 gewählt. Vom 06.01.09 bis 03.07.09 waren die Aufzeichnungen aus technischen Gründen unterbrochen.

Die meteorologischen Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst online und frei verfügbar von der Station Schkeuditz (ca. 20 km entfernt) zur Verfügung gestellt (DWD 2010). Die direkt neben der Grundwassermessstelle befindliche Wetterstation des Instituts für Geowissenschaften wurde erst im Jahr 2008 in Betrieb genommen, hat aber den Vorteil, dass die Parameter in 10 Minuten Abständen aufgezeichnet wurden. Dies ermöglichte die Verwendung dieser Daten lediglich für Korrelationsanalysen in kurzen Zeiträumen aber zeitlich mit einer sehr hohen Auflösung.

5. Ergebnisse

In Abb. 5 ist der resultierende Grundwassergleichplan dargestellt, der die vorzugsweise Fließrichtung von Nordwesten nach Südosten zeigt. Die Gradienten sind mit 0.015 – 0.02 recht hoch, bei einer hydraulischen Durchlässigkeit von $2 \cdot 10^{-6}$ [m/s], die durch Slug & Bail Tests und Pumpversuche ermittelt wurde, ergeben sich jedoch trotz der hohen Gradienten geringe Fließgeschwindigkeiten von etwa $3 \cdot 10^{-6}$ [m/s] bzw. 1 [cm/d]. Im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes werden die beiden konzentrischen Strukturen auf nutzungsbedingte Grundwasserentnahmen zurückgeführt.

Einzugsgebiete lassen sich aus dem Gleichplan nur schwer abgrenzen. Der Zustrom zur Grundwassermessstelle auf dem Campus ist etwa 1 km lang. Bei Festlegung einer Grundwasserscheide zwischen dem Abstrom zu den Brunnengalerien am Nordrand des Stadtteils Neustadt und dem Abstrom zur Saale und 1 km Abstrombreite kann die Einzugsgebietsgröße auf etwa 2 km² geschätzt werden. Leider kann insbesondere der nordwestliche Teil schlecht ermittelt werden, da hier keine Grundwassermessstellen existieren. Damit ist das Einzugsgebiet der Messstellen auf dem Universitäts-Campus als klein zu bezeichnen.

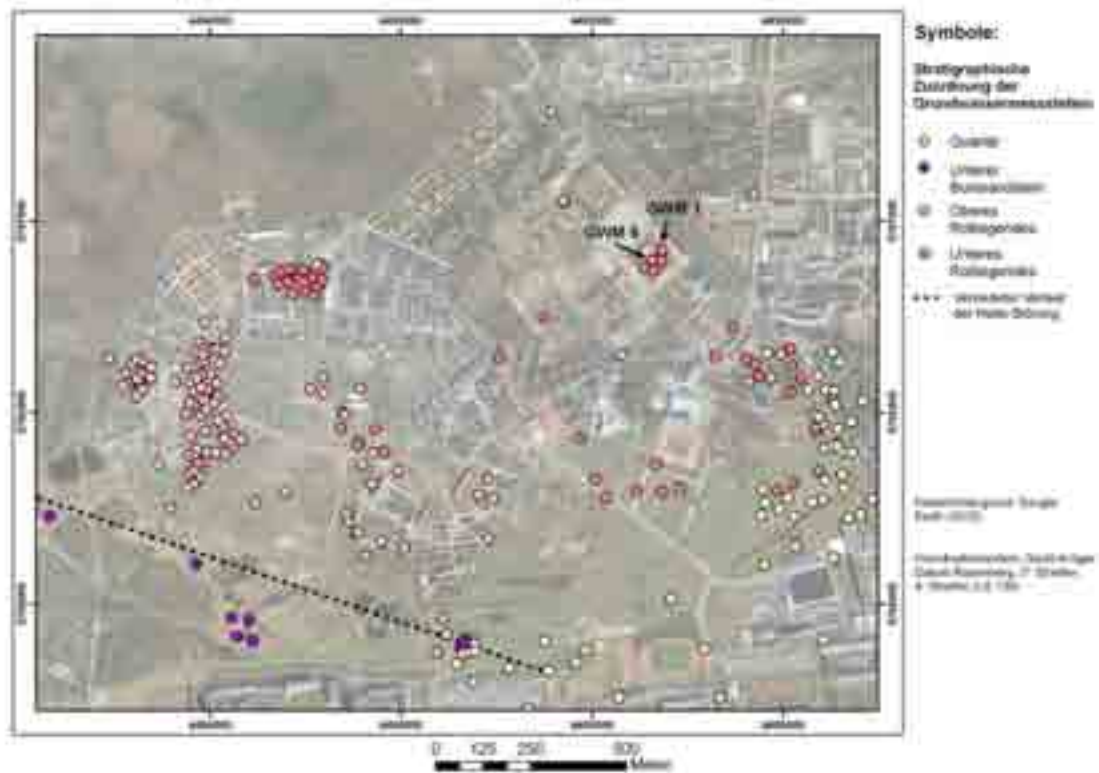


Abb. 4: Übersicht der Grundwassermessstellen mit stratigraphischer Zuordnung der Filterstrecken. Die Messstelle GWM 6 wurde für die Untersuchung der hydraulischen Leitfähigkeit des Rotliegenden genutzt. Stündliche Wasserstandmessungen wurden an GWM 1 automatisch aufgezeichnet.

Fig. 4: Overview of the groundwater observation wells with stratigraphy of the filters. The observation well GWM 6 was used for the investigation of the hydraulic conductivity of the Rotliegendes. The hourly water level measurements were recorded automatically.



Abb. 5: Grundwassergleichenplan im Untersuchungsgebiet auf Grundlage der Stichtagsmessung im April 2010.

Fig. 5: Groundwater contours of the investigation area based on the measurement of April, 2010.

Eine Erstellung von Gleichenplänen verschiedener Grundwasserleiter ist in diesem Bereich der Stadt wenig sinnvoll, da die nördlichen Messstellen alle im Rotliegenden verfiltert sind und die Messstellen im Süden des Untersuchungsgebiets ihre Filterstrecken durch mehrere Meter mächtige und relativ gut durchlässige quartäre Schichten im oberflächennahen Bereich angesiedelt haben. Wie aus dem Grundwasser-gleichenplan zu entnehmen, entlasten die Grundwasserleiter des Rotliegenden im Süden und Osten des Untersuchungsgebiets. Die hydraulische Funktion der im südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets verlaufenden Halleschen Störung kann somit auf der vorliegenden Daten-grundlage nur als nicht hemmend angenommen werden.

Statistische Auswertungen

An einer der Grundwassermessstellen auf dem Universitäts-Campus (GWM 1) wurde die in Abb. 8 dargestellte Ganglinie gemessen. Die stündlichen Aufzeichnungen wurden nur für die Zeitreihenanalyse genutzt. Für Kreuzkorrelationen mit Klimadaten wurden im Gesamtzeitraum tagesweise gemittelte und nur im Zeitraum

01.05.06 – 30.04.07 auch stündliche Daten ausgewertet. Die technisch bedingte Datenlücke 06.01.09 bis 03.07.09 wurde mit Hilfe statistischer Methoden geschlossen. Die Grundwasser-ganglinie zeigt einen leicht positiven Trend, der aber nicht signifikant ist.

Im Rahmen der statistischen Auswertungen der Zeitreihen wurden Kreuzkorrelationen, Fast-Fourier-Transformationen (FFT) und Periodenscannings (Gossel 1999) durchgeführt. Durch die FFT und das Periodenscanning können Periodizitäten innerhalb einer Zeitreihe analysiert werden, so konnte z.B. mit der FFT die Jahresperiodizität an der Messstelle GWM 1 dargestellt werden. Durch Kreuzkorrelationen werden standardmäßig zeitliche Versätze zwischen 2 verschiedenen Zeitreihen analysiert.

Die Periodizitätsanalyse ergab für die Methoden der FFT und des Periodenscannings leicht unterschiedliche Ergebnisse. Die FFT zeigte bei der Betrachtung des gesamten Beobachtungszeitraums nur eine signifikante Periode von etwa 365 Tagen. Auch die Auswahl eines kürzeren Zeitraums erbrachte keine zusätzlichen Ergebnisse wie aus dem Periodogramm in Abb. 6 zu entnehmen ist.

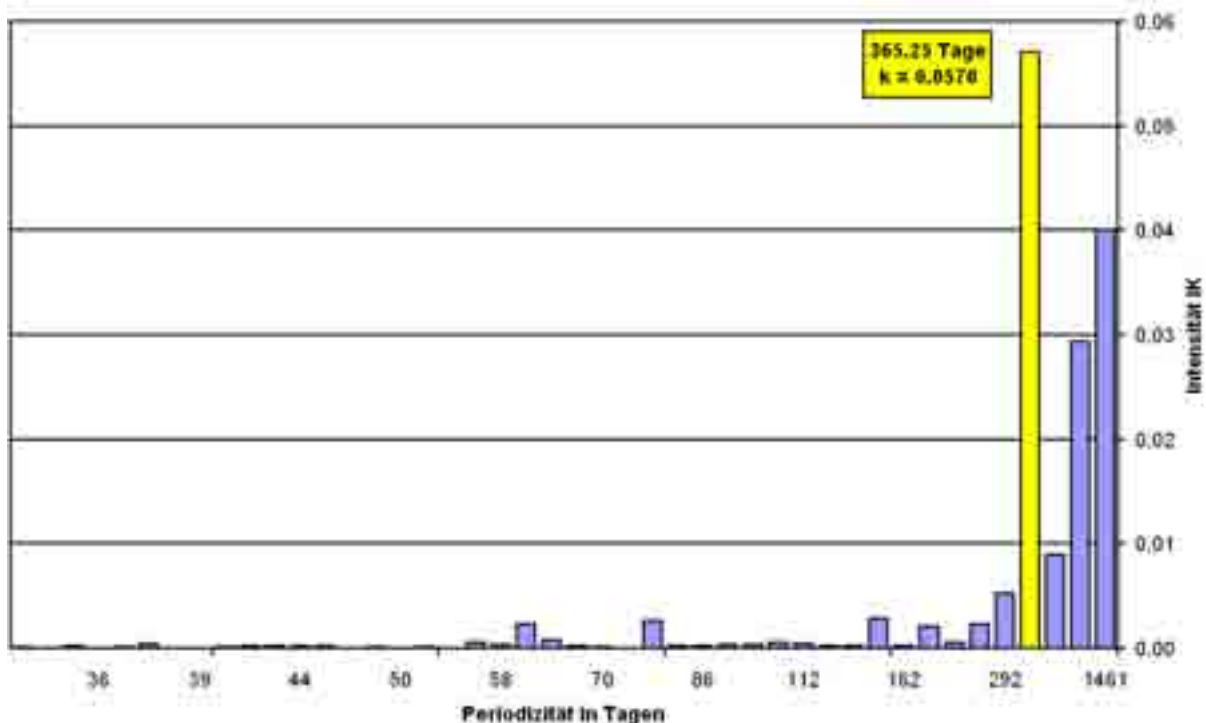


Abb. 6: Periodogramm der Grundwasserganglinie an GWM 1 für den Zeitraum 01.11.04 bis 31.10.08 (4 hydrologische Jahre).

Fig. 6: Periodogram of the groundwater hydrograph at GWM 1 for the time frame Nov 1, 2004 to Oct. 31, 2008 (4 hydrological years).

Mit Hilfe des Periodenscannings konnten demgegenüber mehrere kürzere Perioden im Grundwassergang festgestellt werden. Da bei dem Periodenscanning die Korrelationskoeffizienten der jeweiligen Periode berechnet werden (s. Abb. 7.), kann direkt die Signifikanz festge-

stellt werden. Bei einem 95 % Vertrauensintervall (Signifikanzgrenze 0.008) sind nicht nur die langen Perioden von 365 Tagen bzw. harmonischen Bruchteilen davon sondern auch vergleichsweise kurze Perioden von 9 und 11 Tagen zu verzeichnen.

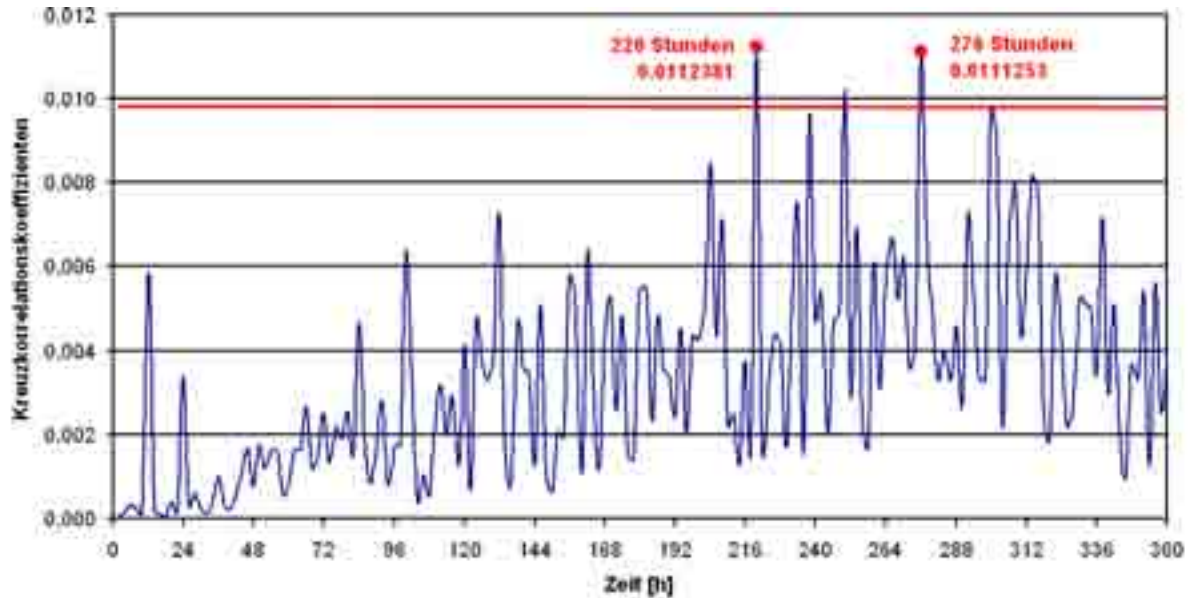


Abb. 7: Ergebnis des Periodenscans. Die Korrelationskoeffizienten auf der Ordinate geben einen Hinweis auf die Signifikanz (Grenze des 95% Vertrauensintervalls: 0.008).

Fig. 7: Result of the period scanning. The correlation coefficients on the y-axis indicate the significance (limit of the 95% confidence interval: 0.008).

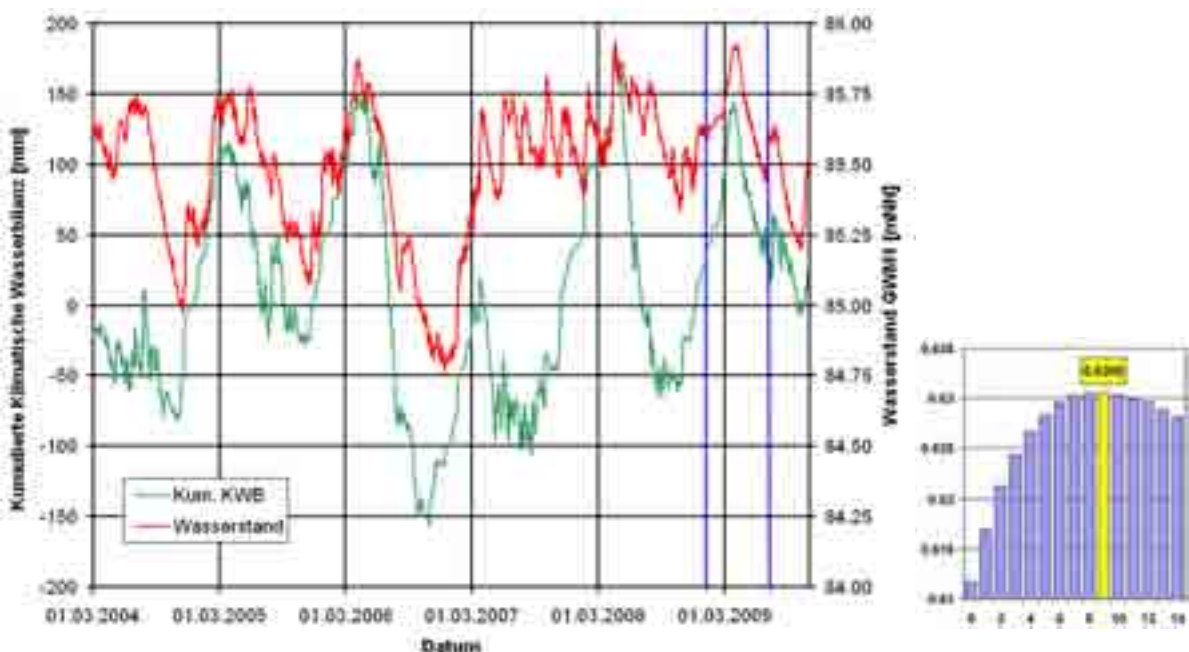


Abb. 8: Vergleich der Ganglinien der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserstände im Zeitraum 01.03.04 bis 31.10.09 auf Tagesbasis. A: Darstellung der Ganglinien; B: Kreuzkorrelogramm der beiden Ganglinien.

Fig. 8: Comparison of the hydrographs of the cumulated climatic water balance and the groundwater levels in the time frame Mar 1, 2004 to Oct 31, 2009 based on daily measurements. A: Visualization of the measurements, B: Cross-correlogram of both hydrographs.

Die kumulierte Klimatische Wasserbilanz (Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration) wurde nur in der trendbereinigten Form dargestellt, da aufgrund der dauerhaft negativen Jahreswasserbilanzen ein deutlich negativer Trend vorliegt, der den Vergleich unnötig verzerrt hätte.

Die Korrelationen zwischen der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserserganglinie auf Tagesbasis (Tagessummen der

Klimatischen Wasserbilanz bzw. Tagesmittelwerte des Grundwasserstandes) zeigen, dass bei einer Verschiebung um 9 Tage die Korrelation deutlich signifikant ist (s. Abb. 8b). Bei einer stündlichen Auflösung (s. Abb. 9a) zeigen sich zusätzlich hohe Korrelationen in dem betrachteten Zeitraum 01.05.06 bis 30.04.07 bei einer Zeitverschiebung von etwa 60 Stunden, allerdings liegt auch hier das Maximum bei 235 Stunden, also 9-10 Tagen (s. Abb. 9b).

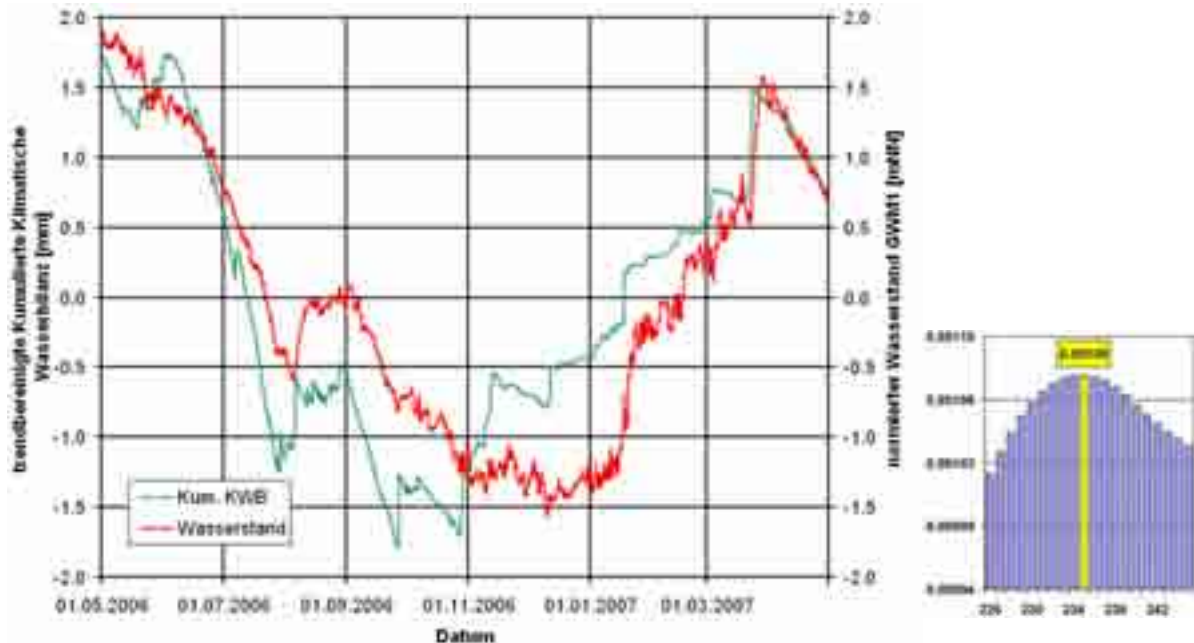


Abb. 9: Vergleich der Ganglinien der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und der Grundwasserstände im Zeitraum 01.05.06 bis 30.04.07 auf Stundenbasis. A: Darstellung der Ganglinien; B: Kreuzkorrelogramm der beiden Ganglinien.

Fig. 9: Comparison of the hydrographs of the accumulated climatic water balance and the groundwater levels in the time frame May 1, 2006 to Apr 30, 2007 based on hourly measurements. A: Visualization of the measurements, B: Cross-correlogram of both hydrographs.

6. Interpretation und Diskussion

Die Stichtagsmessung fand am Ende eines sehr langen Winters mit einem außerordentlich hohen Schneefall statt. Dies führte zu sehr hohen Grundwasserständen, die z.T. etwa einen Meter höher lagen als in trockenen Zeiten. Ein Vergleich mit anderen hydrologischen Strömungszuständen ist deshalb nicht möglich, weil lediglich Stichtagsmessungen an einem Teil der Grundwassermessstellen durchgeführt wurden und immer am Ende des Frühjahrs mit ähnlichem Ergebnis wie dem vorliegenden oder Ende des Sommers bei minimalen Wasserständen gemessen wurde. Ein mittlerer Gleichnplan kann auf diesem Wege nicht erzeugt werden. Der Vorteil des vorliegenden Plans liegt in der Nutzbarkeit für die Beein-

flussung von Bauten im Untersuchungsgebiet (Wohnhäuser und Universitätsgebäude). Flurnahe Schichtenwasserstände wurden durch die Messung wegen der Tiefenlage der Filterstrecken allerdings nicht erfasst.

Die Ergebnisse der Kreuzkorrelationen können so interpretiert werden, dass innerhalb von etwa 9 Tagen eine Reaktion des Grundwasserstandes auf die klimatischen Verhältnisse festgestellt werden kann. Diese Reaktionszeit weist auf die vergleichsweise träge Reaktion des Einzugsgebiets hin. Obwohl das Einzugsgebiet mit etwa 2 km² nicht groß ist und daher eine hohe Dynamik bei kurzen Reaktionszeiten aufweisen müsste, sind die sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten maßgeblich für eine verzögerte Reaktion. Zudem wirkt sich die von Wald geprägte

Landnutzung dämpfend und verzögernd auf die Dynamik aus.

Die kürzere Reaktionszeit von 60 Stunden, die sich aus der Kreuzkorrelation der stündlichen Messwerte ableiten lässt, zeigt eher die Reaktionszeit vor Ort an. Sie ist daher bei weitem nicht so ausgeprägt wie die Reaktion des Einzugsgebiets und lässt sich je nach gewähltem Zeitabschnitt besser oder schlechter statistisch nachweisen. Auch hier können die geringen hydraulischen Durchlässigkeiten zur Erklärung der starken Verzögerung herangezogen werden.

Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse sind besonders bei der Auswertung der kurzen Periodizitäten interessant. Während die 365-Tage-Periode trivial ist, lassen die kurzen Perioden von 9 bzw. 11 Tagen darauf schließen, dass eine Dominanz der meteorologischen Einflüsse zu verzeichnen ist. Diese weisen durch die Hoch- und Tiefdruckwechsel im Betrachtungszeitraum ebenfalls eine solche Periode auf, die auch signifikant ist. Leider besteht bei der Methode des Periodenscanning immer die Notwendigkeit, unabhängige Perioden zu finden, d.h. Perioden, die sich nicht als harmonischer Bruchteil einer sehr viel deutlicheren Periode darstellen lassen.

Die statistischen Methoden der Kreuzkorrelation und Zeitreihenanalyse sowie die geostatistischen Methoden erwiesen sich für hydraulische Untersuchungen als sehr effizient und können offensichtlich für eine Vielzahl von Aufgaben genutzt werden. Prognosen über Grundwasserstandsentwicklungen infolge von klimatischen Verhältnissen können gestellt werden. Bei besonderen klimatischen Verhältnissen können somit geeignete Maßnahmen in einem sinnvollen Zeitrahmen ergriffen werden. Numerische Grundwassermodellierungen sind daher für eine Reihe von Fragestellungen nicht notwendig.

Der Vergleich der Methoden zeigt die jeweiligen zu präferierenden Einsatzgebiete z.T. nur undeutlich an. Für die Vorhersage von Grundwasserständen aufgrund klimatischer Entwicklungen oder Ereignisse ist das Ergebnis der Kreuzkorrelationsanalyse sehr wesentlich. Es kann wahrscheinlich durch aktuelle Methoden wie z.B. genetic algorithms, adaptive oder selbst lernende Algorithmen noch verbessert werden.

Die eingesetzten Verfahren zur Zeitreihenanalyse sind sehr unterschiedlich zu bewerten. Die FFT ist zwar ein weit verbreitetes, gut bekanntes und effizientes Verfahren zur Zeitreihenanalyse, aber das Periodenscanning zeigt im vorliegenden Fall leichte Vorteile bei der Erkennung kurzer Periodizitäten. Die Ineffizienz des Berechnungs-

algorithmus wird durch aktuelle Rechnerarchitekturen wettgemacht, so dass der Erkenntnisgewinn die Nachteile überwiegt.

Bei den Interpolationsverfahren erwies sich die Standardmethode des Ordinary Kriging als völlig ausreichend für die Aufgabenstellung. Bei der Variogrammanalyse zeigte sich die Anpassung eines linearen Variogramms als beste Annäherung an das experimentelle Variogramm, was zu der Frage führt, ob evtl. ein Trend prägend für die Interpolation sein könnte. Ein Vergleich mit dem Ergebnis eines Universal Krigings erbrachte jedoch keine bemerkenswerten Differenzen.

7. Schlussfolgerungen

Die Beobachtung der Grundwasserstände in einem kleinen Festgesteinseinzugsgebiet ergibt sehr wesentliche Erkenntnisse insbesondere über die Prozesse der Grundwasserneubildung. Während die oberirdische Abflussbildung aus vielen Einzugsgebieten deutschlandweit mittlerweile gut abgeschätzt und in Modellen abgebildet werden kann (u.a. Dietrich et al. 2009, Luce et al. 2006), sind die Prozesse beim Grundwasser gerade in wenig ergiebigen und daher für die Trinkwasserversorgung unbedeutenden Festgesteinsgebieten wenig untersucht worden. Die hohe zeitliche Auflösung ist grundsätzlich gerade in kleinen Einzugsgebieten notwendig. Aufgrund der hydraulischen Durchlässigkeiten des Gesteins ergeben sich jedoch offensichtlich deutliche Unterschiede. Während die Reaktionszeiten in Karstgrundwasserleitern bei nur wenigen Stunden liegen (u.a. Sauter et al. 2006), sind es im vorliegenden Fall mehrere Tage. Die Messintervalle müssen (oder können) also den mehrjährigen Untersuchungen zufolge wesentlich verlängert werden, wenn sich die Einflüsse nicht wesentlich verändern. Zudem bieten die Kreuzkorrelationen mit den klimatischen Daten einen guten Anhaltspunkt für die zu erwartenden Grundwasserstände, wenn sie einmal für einen längeren Zeitraum detailliert aufgenommen wurden.

Die angewandten statistischen und geostatistischen Methoden eignen sich für eine Reihe von Fragestellungen, die weit über den als besonders wichtig angesehenen höchsten gemessenen Grundwasserstand hinausgehen. Sie müssen jedoch der Fragestellung entsprechend eingesetzt werden. Die Nutzung neuer Entwicklungen in der Informationstechnologie wird auch die Effizienz bei der Prognose und die Anzahl der Messparameter verringern können. Entsprechende weitere

Forschungsansätze sind in Planung. Selbstverständlich müssen dabei die der statistischen Betrachtung immanenten Beschränkungen der Aussagefähigkeit beachtet werden, z.B. dass bei gravierenden Eingriffen in potentielle Prozessparameter die statistischen Charakteristika ungültig werden, da sie auf einer Black-Box-Modellierung ohne Abbildung des Systemzusammenhangs aufbauen.

Bisher konnte mit den genutzten Methoden nicht geklärt werden, welche hydraulische Funktion die Hallesche Störung hat. Dies wird in Zukunft durch eine Erweiterung des Untersuchungsgebiets und durch häufigere Messungen im südlich anschließenden Stadtteil Neustadt mit weiteren Arbeiten verfolgt. Des Weiteren sind numerische Bodenwasserhaushaltsmodelle ange-dacht, um die erhaltenen Ergebnisse anschließend vergleichen und auswerten zu können.

8. Literatur

- Bachmann, G. H. & Schwab, M. (2008): Regionalgeologische Stellung. – Bachmann, G. H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M.: Geologie von Sachsen-Anhalt. – 689 S.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- Blume, A. (2010): Oberflächennahe, geothermische Potentialkartierung für das Stadtgebiet Halle (Saale) auf Basis des geologischen 3D-Modells. – Unveröffentlichte Diplomkartierung, Martin-Luther-Universität. – 61 S.; Halle (Saale).
- Böse, N. (2008): Stichtagsmessungen ausgewählter Grundwassermessstellen in Halle (Saale). – Unveröffentlichte Projektarbeit, Martin-Luther-Universität – 12 S.; Halle (Saale).
- Dietrich, J., Schumann, A., Pfütznern, B., Walther, J., Wang, Y., Denhard, M. & Büttner, U. (2009): Ensemblevorhersagen im operationellen Hochwassermanagement. – HW, 53 (3): 140-145.
- DIN 38 402, Teil 13 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Allgemeine Angaben (Gruppe A) – Probe-nahme aus Grundwasserleitern (A 13). – Normenausschuß Wasserwesen (NAW), Deutsches Institut für Normung, Dezember 1985. – 14 S.
- DWD (2010): Wetterdaten der Station Schkeuditz.-
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesk-top?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocument-Path=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Um-welt%2FKlimadaten%2FKlDaten__kostenfrei%2Fausgabe_tageswerte__node.html%3F__nnn%3Dtrue, zuletzt abgerufen 10.06.2010
- ESRI (2008): Using ArcGIS Geostatistical Analyst.- ESRI Press. – 300 S; Redlands, California.
- G.E.O.S. (1999): Grundwasserschadstoffbelastungskataster des Stadtgebietes Halle. – G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH; Freiberg. – (Unveröffentlicht)
- GLA Sachsen-Anhalt (1994): Geologische Karte Halle und Umgebung 1 : 50 000; Halle (Saale).
- Gossel, W. (1999): Hydrogeologie und Grundwasserhaushalt ausgewählter anthropogen wenig beeinflusster Grundwassereinzugsgebiete in Berlin. – Berliner geowiss. Abh. (A) 199: 170 S.; Berlin.
- Golden Software (2002): Surfer 8 User's Guide – Golden Software. – 640 S; Golden, Colorado.
- Jordan, H. & Weder, H.-J. (1988): Hydrogeologie. – Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1. Aufl. – 444 S.; Leipzig
- Heckner, J., Herold, U. & Strobel, G. (1997): Geologisch-ingenieurgeologische Beobachtungen im Nahbereich der Halleschen Störung / Stadt Halle (Saale). – Mitt. Geol. Sachsen-Anhalt, 3: 89-107; Halle (Saale).
- Kater, R. & Koch, T. (2007): Sachsen-Anhalts verdeckte Ströme – Das Grundwasser im Spannungsfeld von Wasserwirtschaft, Industrie und Bergbau in Vergangenheit und Gegenwart. – Mitt. Geol. Bergwesen Sachsen-Anhalt, 13 (1): 135 S.; Halle (Saale).
- Katzung, G. & Ehmke, G. (1993): Das Prätertiär Ostdeutschlands. Strukturstockwerke und ihre regionale Gliederung. – 193 S.; Köln (Verlag Sven von Loga).
- Kaufmann, D. (1991): Ein Blick in die Geschichte. – Die Dölauer Heide, Waldidyll in Großstadtnähe – 85-93; Halle (Saale). – (Magistrat der Stadt Halle)
- Knoth, W. (1992): Geologische Verhältnisse. – Geologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt 1:400.000 mit Erläuterungen, Landesamt f. Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt; Halle (Saale).
- Koch, T. (2000): Der Wiederaufschluss des Gutjahrbrunnens am Hallmarkt in Halle (Saale). – Hallesches Jahrb. Geowiss., B 22: 141-150; Halle (Saale).
- Koch, T., Fischer, I., Kater, R. & Papke, W. (2006): Salzgewinnung in Halle und ihre hydrogeologischer Rahmen. – Mitt. Geol. Sachsen-Anhalt, 10: 19-29; Halle (Saale).
- Lauer, D., Lauer, M. & Zimmermann, G. (1998): Die Grundwasserabsenkung im Stadtgebiet Halle-Neustadt – geologische, hydrologische und technische Bedingungen. – Hallesches Jb. Geowiss., B, Beih. 4: 79-97; Halle (Saale).
- Luce, A., Haag, I. & Bremicker, M. (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. – HW 50 (2): 58-66.
- Pohlert, M. (2005): Digitale 3D-Kartierung der Stadt Halle/Saale. Voraussetzungen und strukturelles

- Konzept eines GIS-basierten Rauminformationssystems. – Unveröffentlichte Diplomkartierung, Martin-Luther-Universität. – 73 S.; Halle (Saale).
- Pretschold, H.-H. (1998): Weiterentwicklung der hydrogeologischen Modellvorstellungen im Stadtgebiet Halle mittels umweltgeologischer Untersuchungsergebnisse der Bohrungen Hy Hal 1-4/94. – Hallesches Jb. Geowiss., B, Beih. 4: 35-48; Halle (Saale).
- Preuß. Geol. Landesanstalt (Hrsg.) (1922): Geologische Karte Halle (Nord) an der Saale, Maßstab 1 : 25.000, Messtischblatt Nr. 4437, 2. Auflage; Berlin.
- Rienäcker, J. (2009): Grundwasserdynamik im Gebiet Heide-Süd (Sachsen-Anhalt). – Unveröffentlichte BSc-Arbeit, Martin-Luther-Universität. – 66 S.; Halle (Saale).
- Rumpf, D. (2009): Grundwasserdynamik im Gebiet Heide-Nord, Halle (Saale). – Unveröffentlichte BSc-Arbeit, Martin-Luther-Universität. – 36 S.; Halle (Saale).
- Sauter, M., Kovács, A., Geyer, T. & Teutsch, G. (2006): Modellierung der Hydraulik von Karstgrundwasserleitern – Eine Übersicht. – Grundwasser, 11 (3): 143-156; Berlin, Heidelberg.
- Schlesier, D. (2006): Geologische 3D-Kartierung des Stadtgebietes Halle (Saale). Multimediale Umsetzung und wissenschaftliche Visualisierung geologischer Daten. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Diplomkartierung, Martin-Luther-Universität. – 105 S.; Halle (Saale).
- SPSS (2010): SPSS 18.0 Statistics Base User's Guide. – [support.spss.com/ProductsExt/SPSS/ Documentation/SPSSforWindows/index.html](http://support.spss.com/ProductsExt/SPSS/Documentation/SPSSforWindows/index.html) (zuletzt abgerufen 10.06.2010), 640 S; Chicago.