

**Vereinigte Mulde /  
Ringdeich Gruna  
Hydrogeologische Untersuchung  
Abschlussbericht**

Sitz der Gesellschaft:  
Wolfener Str. 36  
12681 Berlin

Geschäftsführer:  
Dr. Martin Bernhard (Vorsitz)  
Dr. Dirk Brinschwitz

Tel.: 030 93651-0  
Fax: 030 93651-250  
FGLG-Info@fugro.com  
www.fugro.com

**Auftraggeber:** Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen  
Betrieb Elbaue / Mulde / Untere Weiße Elster  
Gartenstraße 34  
04571 Rötha

**Auftragnehmer:** Fugro Germany Land GmbH  
Abteilung  
Bertolt-Brecht-Allee 9  
01309 Dresden

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. H. Mrozik  
Dipl.-Geol. K. Brinschwitz

**Auftrags-Nr.:** 310/18/207

**Bestätigt:** .....

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Brinschwitz".

Dipl.-Geol. K. Brinschwitz  
Teamleiterin Wasser

**Datum:** Dresden, 10.07.2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veranlassung.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Verwendete Unterlagen für die Berechnungen.....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Hydrologische und hydrogeologische Standortbedingungen .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Erkundungsarbeiten .....</b>	<b>9</b>
4.1	Geophysikalische Untersuchungen .....	9
4.1.1	Methodisches Konzept.....	9
4.1.2	Geophysikalische Feldarbeiten .....	10
4.2	Rammkernsondierungen.....	11
4.3	Durchführung von Sieb-/Schlämmanalysen zur Bestimmung der Durchlässigkeiten.....	12
4.4	Grund- und Oberflächenwassermonitoring .....	12
4.4.1	Oberflächenwassermessstelle .....	12
4.4.2	Grundwassermessstellen .....	13
4.4.3	Datenerfassung / Überwachung.....	14
<b>5</b>	<b>Auswertung der Feld- und Laborarbeiten .....</b>	<b>15</b>
5.1	Auswertung der geophysikalischen Messungen und Sondierungen .....	15
5.2	Auswertung des Grund- und Oberflächenwassermonitorings .....	16
5.2.1	Großräumige hydrologische Verhältnisse im Monitoringzeitraum .....	16
5.2.2	Oberflächenwasser- und Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet .....	18
5.3	Schlussfolgerungen für die Grundwassermodellierung .....	21
<b>6</b>	<b>Modellaufbau .....</b>	<b>22</b>
6.1	Eingangsdaten für die Modellerstellung .....	22
6.2	Simulationsverfahren .....	22
6.3	Geometrischer und geologischer Modellaufbau .....	23
6.4	Äußere und innere Randbedingungen .....	24
6.4.1	Vorfluter Mulde .....	24
6.4.2	Grundwasserneubildung .....	25
6.4.3	Spundwände .....	26
<b>7</b>	<b>Modellkalibrierung .....</b>	<b>26</b>
7.1	Stationäre Modellkalibrierung.....	26
7.2	Instationäre Modellkalibrierung .....	28
<b>8</b>	<b>Prognoserechnungen .....</b>	<b>31</b>

8.1	Referenzhochwasser .....	31
8.2	Ringdeichlage.....	32
8.3	Leakagefaktor der Überschwemmungsflächen.....	33
8.4	Grundwasserentnahme.....	35
<b>9</b>	<b>Berechnungsergebnisse .....</b>	<b>38</b>
9.1	Maximaler Grundwasserstand .....	38
9.2	Minimale Grundwasserflurabstände und Vernässungen .....	39
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>42</b>
<b>11</b>	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis .....</b>	<b>43</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Eingesetzte Technik .....	10
Tabelle 4-2: kf-Wert-Bestimmung aus den Kornverteilungskurven .....	12
Tabelle 4-3: Vermessungsergebnisse OWM 1 .....	12
Tabelle 6-1: Klimadaten Station Leipzig-Schkeuditz .....	25
Tabelle 7-1: Gemessene und berechnete Grundwasserspiegelhöhen des Ausgangszustandes .....	28
Tabelle 8-1: kf-Werte aus den Siebkennlinien.....	33
Tabelle 8-2: Mächtigkeit des Auelehms.....	34

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verbreitung der Schotterterrasse der Mulde im UG /1/ .....	8
Abbildung 2: Messwerterfassung mit 75-Elektrodenarray in Gruna .....	11
Abbildung 3: Profilauslage .....	11
Abbildung 4: OWM in der Mulde (Blickrichtung stromab).....	13
Abbildung 5: LTV-Gruna-GWM 1 .....	13
Abbildung 6: LTV-Gruna-GWM 2 .....	14
Abbildung 7: LTV-Gruna-GWM 3 .....	14
Abbildung 8: Korrelation spezifischer elektrischer Widerstand – Lithologie.....	15
Abbildung 9: Klimabilanz Station Leipzig/Halle .....	16
Abbildung 10: Grundwasserganglinie Messstelle 44416534 Mörtitz (Quelle: digitale Umweltkarten LfULG) .....	17

Abbildung 11: Grundwasserganglinie LTV-Gruna-GWM 1 .....	18
Abbildung 12: Grundwasserganglinie LTV-Gruna-GWM 2 .....	19
Abbildung 13: Grundwasserganglinie LTV-Gruna-GWM 3 .....	20
Abbildung 14: Wasserspiegelganglinie der Mulde .....	21
Abbildung 15: Lage des Detailmodells im Großraummodell .....	23
Abbildung 16: Modellabweichung .....	27
Abbildung 17: Berechnete und gemessene Grundwasserstandsganglinien .....	30
Abbildung 18: Zeitliche Entwicklung der Wasserstände der Mulde im Bereich der Südseite des Ringdeiches von Gruna (Referenzhochwasser) .....	31
Abbildung 19: Deichverlauf im Modell .....	32
Abbildung 20: Petrografische Einschätzung des Auelehms .....	35
Abbildung 21: Lage des Entwässerungsgrabens innerhalb des Dorfkernes .....	36
Abbildung 22: Dorfteich mit Wasserfüllung, Juni 2018 (Grundwasserblänke) .....	37
Abbildung 23: Siel mit und befestigter Grabeneinlauf, Blickrichtung zur Mulde .....	37
Abbildung 24: Berechnete Grundwasserganglinien im Bereich der Grundwassermessstellen GWM 1 und GWM 2 während des Referenzhochwassers der Mulde .....	38
Abbildung 25: Bereiche mit potentiellen Oberflächenvernässungen während des Referenz- hochwassers .....	40
Abbildung 26: Bereiche mit potentiellen Kellervernässungen (grün) .....	41

## Anlagenverzeichnis

1	Übersichtsplan	Maßstab 1 : 16.000
2	Karte der eiszeitlichen Überdeckung	Maßstab 1 : 16.000
3	Quartärbasiskarte	Maßstab 1 : 16.000
4	Digitales Geländemodell	Maßstab 1 : 16.000
5	Großräumige Hydrodynamik	Maßstab 1 : 16.000
6	kf-Wertverteilung	Maßstab 1 : 16.000
7	Geophysikalische Erkundung	
7.1	Lageplan Messgebiet	Maßstab 1 : 10.000
7.2	Profilschnitte spezifischer elektrischer Widerstand - Profile 1, 2a, 2b	Maßstab 1 : 1.500
7.3	Profilschnitte spezifischer elektrischer Widerstand - Profile 3a, 3b, 4, 8	Maßstab 1 : 1.500
7.4	Profilschnitte spezifischer elektrischer Widerstand - 5, 6, 7a –c	Maßstab 1 : 1.500
7.5	Methodenbeschreibung Elektrische Widerstandstomographie (ERT)	
8	Schichtenverzeichnisse der Rammkernsondierungen (12 Stk.)	
9	Ergebnisse der Siebanalysen (12 Stk.)	
10	Lageplan der Neuaufschlüsse Messnetz Gruna	Maßstab 1 : 10.000
11	Schichtenverzeichnisse / Ausbaudokumentation der Grundwassermessstellen	
11.1	LTV-Gruna-GWM 1	
11.2	LTV-Gruna-GWM 2	
11.3	LTV-Gruna-GWM 3	
12	Maximaler Grundwasserstand und Minimaler Grundwasserflurabstand	Maßstab 1 : 4.000
13	Potentielle Vernässungsflächen	Maßstab 1 : 4.000

## 1 Veranlassung

Die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Betrieb Elbaue/Mulde/Untere Weiße Elster, plant die Errichtung eines Ringdeiches um die Ortslage Gruna. Mit der Untersuchung der Auswirkungen der geplanten Hochwasserschutzmaßnahme auf die Grundwasserverhältnisse wurde die FUGRO Germany Land GmbH beauftragt.

Der Auftrag beinhaltete eine hydrogeologische Detailuntersuchung, auf deren Grundlage die höchsten Grundwasserstände bzw. geringsten Flurabstände ausgehalten werden sollen. Des Weiteren sollte festgestellt werden, ob der geplante Ringdeich mit einem Binnenentwässerungssystem kombiniert werden muss, um die Ortslage Gruna vor hohen Grundwasserständen zu schützen. Eingebunden in die Untersuchung war der Aufbau und die Kalibrierung eines numerischen geohydraulischen Modells, mit dessen Hilfe die Grundwasserströmungsberechnungen vorgenommen werden sollten. Insgesamt beinhaltete die Projektbearbeitung 3 Bearbeitungsphasen, deren Ergebnisse in drei separaten Zwischenberichten dokumentiert wurden.

Im Rahmen des ersten Zwischenberichtes zum Vorhaben [1] wurde eine Defizitanalyse zur Klärung der vorhandenen Datenlage zur Modellerstellung durchgeführt. Zusätzlich wurde auf der Grundlage der Bestandserfassung ein Monitoringprogramm/-messnetz vorgeschlagen, um die zeitlich variablen Strömungsbedingungen im potentiellen Modellgebiet ausreichend genau erfassen zu können.

Der zweite Zwischenbericht [2] umfasste die Planung und Durchführung eines Erkundungsprogramms zur Schließung vorhandener Kenntnislücken. Das Programm beinhaltete die Geoelektrische Erkundung des Untersuchungsgebietes und die Errichtung des Grund- und Oberflächenwassermonitoringnetzes. Der im März 2012 erstellte Bericht enthält die Dokumentation und Auswertung der Feld- und Laborarbeiten sowie die Ergebnisse der geohydraulischen Modellierung.

Der dritte Zwischenbericht [3] enthält die Auswertung des Grund- und Oberflächenwassermonitoring über ein Jahr, die instationäre Modellkalibrierung und erste Berechnungen zu den maximalen Grundwasser- bzw. minimalen Flurabständen für zwei Modellvarianten. Der Bericht wurde im Mai 2013, d.h. noch vor dem großen Hochwasser desselben Jahres, fertig gestellt.

Der vorliegende Abschlussbericht geht auf wesentliche Bestandteile der vorangegangenen Zwischenberichte ein. Weiterhin erfolgte eine detailliertere instationäre Modellkalibrierung und eine erneute Berechnung der maximalen Grundwasser- bzw. Flurabstände unter Berücksichtigung einer Grundwasserentnahme aus dem Dorfgraben und Dorfteich. Für die Festlegung der Absenkungen des Grabens und des Teiches wurde das DGM2 herangezogen.

## 2 Verwendete Unterlagen für die Berechnungen

- /1/ Lithofazieskarte Quartär im Maßstab 1 : 50 000, Blatt 2466 Eilenburg
- /2/ Vereinigte Mulde Deich Laußig – Mörtitz Deich-km 1+700 bis 3+200 Ortslage Gruna, Vorplanung. Ingenieurgemeinschaft WTU GmbH, April 2010
- /3/ FK 1 – Vereinigte Mulde, rechts, Grundhafte Instandsetzung HWD Laußig – Mörtitz östlicher Ringschlussdeich Gruna VG-Nr. 785/2009/60. GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH
- /4/ Wasserspiegellagenberechnung, Planungsgesellschaft Scholz- und Lewis GmbH, download FTP-Server 30.01.2012
- /5/ Digitales Geländemodell DGM2 (2 m Rasterabstand)
- /6/ Digitales Geländemodell DGM20 (20 m Rasterabstand)

## 3 Hydrologische und hydrogeologische Standortbedingungen

Das Untersuchungsgebiet gehört zur weichselkaltzeitlichen Schotterterrasse der Mulde, der sogenannten Unteren Niederterrasse (Übersichtsplan siehe Anlage 1). Die Verbreitung im Untersuchungsgebiet zeigt Abbildung 1. Charakteristisch ist eine deutliche Zweiteilung in eine liegende Kies- und in eine hangende Sandfolge. Die Sandfolge setzt sich vorwiegend aus feinkiesigen Mittel- bis Grobsanden zusammen, der Kieshorizont wird durch grobsandige, grobkiesige Fein- bis Mittelkiese geprägt. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen ist unscharf. Stellenweise kommen geringmächtige, bindige Zwischenschichten vor, die aber nicht aushaltend sind. Eine Grundwasserstockwerkstrennung ist innerhalb der quartären Ablagerungen vermutlich nicht vorhanden. Die Mächtigkeit der weichselkaltzeitlichen Schotterterrasse liegt im Bereich der Ortslage Gruna bei 8 bis 10 m.

Die Sedimente der Niederterrasse werden von miozänen Bildungen unterlagert, die sich in annähernd horizontaler Lagerung befinden. Die Quartärbasis ist im Modellraum auf einem Niveau von ca. 82 mNN zu erwarten. Das Liegende besteht aus schluffigen Feinsanden, Schluffen und Tonen und z. T. Braunkohle.

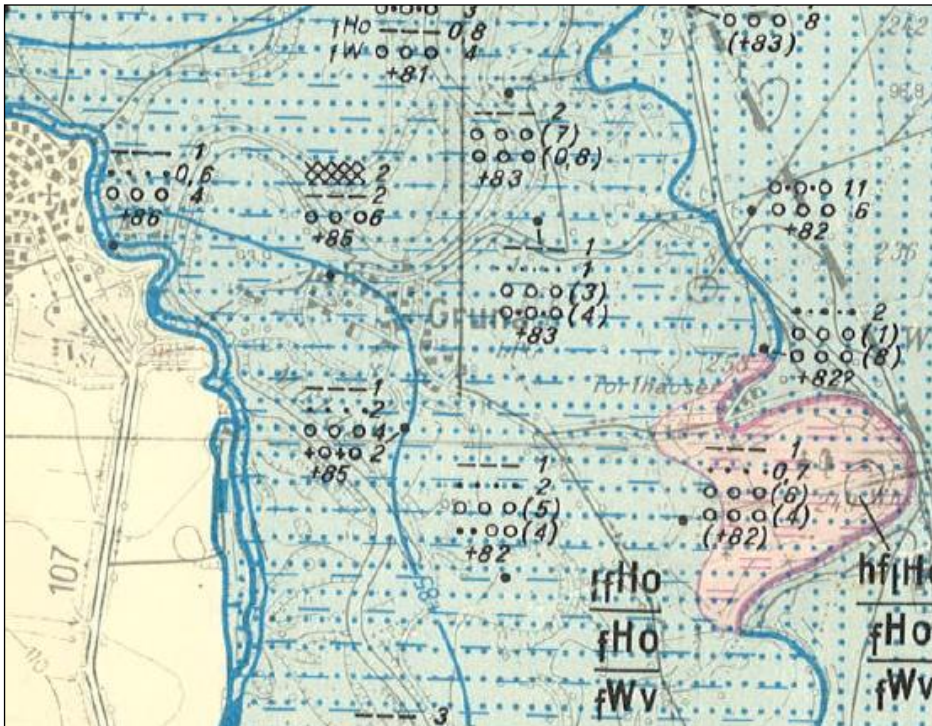
Im Hangenden der Niederterrasse sind im Untersuchungsgebiet etwa 1 bis 3 m mächtige holozäne Bodenbildungen (humose, meist schluffige Sande und z.T. Lehme) anzutreffen.

Das vorherrschende geologische Leitprofil ist durch quartäre Ablagerungen mit Mächtigkeiten von > 10 m gekennzeichnet. Darunter folgen die tertiären Schichten des Miozäns. Aus /2/ lässt sich folgendes Aufschlussprofil vom Hangenden zum Liegenden ableiten:

1. Oberboden (Feinsand, schluffig, schwach humos, durchwurzelt)  $\approx$  0,3 m mächtig
2. Auelehm (sandige Schluffe, z.T. tonig) z.T. 1,0 bis 3,0 m mächtig
3. Fluviale und fluvioglaziale Sande (Fein- und Mittelsande, z.T. schwach schluffig) 0,0 bis 4,0 m mächtig
4. Muldekiese (weitgestufte sandige Kiese) bis 10 m mächtig



Das Gelände liegt bei ca. 92 bis 93 mNHN (Anlage 4). Die Quartärbasis ist im Modellraum auf einem Niveau von ca. 82 bis 87 mNHN zu erwarten (Anlage 3). Eine Grundwasserstockwerkstrennung ist innerhalb der quartären Ablagerungen vermutlich nicht vorhanden. Im flussnahen Bereich treten unterhalb des Auelehms gespannte bis halbgespannte Grundwasserströmungsbedingungen auf.



**Abbildung 1: Verbreitung der Schotterterrasse der Mulde im UG /1/**

Das Untersuchungsgebiet liegt im Muldetal und wird von der Mulde und dem Ziegengraben entwässert. Im Grenzgebiet zwischen Muldetal und Hochfläche bildeten sich schützenswerte Vernässungsflächen (Naturschutzgebiet) heraus, die vorrangig von austretenden Grundwässern gespeist werden. Weiterhin sind im Untersuchungsgebiet Mulden-Altarme (Mäanderschlaufen) erkennbar, die vermutlich Vertorfungen und flurnahe bis flurgleiche Grundwasserstände aufweisen.

Im flussnahen Bereich treten unterhalb des Auelehms gespannte bis halbgespannte Grundwasserströmungsbedingungen auf (Verbreitung Auelehm siehe Anlage 2).

Im Bereich der Ortschaft Gruna wird das Grundwasserströmungsregime vorrangig von der Mulde geprägt. Dabei ist zwischen influenten (Vorfluter speist den Grundwasserleiter) und effluenten (Aufnahme von Grundwasser durch den Vorfluter) Speisungsverhältnissen zu unterscheiden. Bei Mittelwasser, d.h. effluenten Speisungsverhältnissen, ist die Grundwasserfließrichtung streng zur Mulde gerichtet (Richtung West-siehe Anlage 5). Bei Hochwasser der Mulde ändert sich jedoch die Grundwasserfließrichtung gravierend - dann dringt ein verstärkter Uferfiltratanteil in den Grundwasserleiter ein und die Grundwasserströmung richtet sich nach Osten aus.

Bei einem extremen Hochwasserereignis wird der Ringdeich in Gruna vollständig von der Mulde umschlossen. Je nach Scheitelhöhe und Dauer des Hochwasserverlaufs bildet sich innerorts eine Grundwasserpotentialsenke heraus, die sich während des Hochwasserereignisses sukzessive mit Uferfiltrat auffüllt. Die



„Auffüllgeschwindigkeit“ und die sich daraus ergebenden maximalen Grundwasserstände sind sowohl von der Hochwasserform (Scheitelhöhe, Dauer des Hochwasserverlaufs) und den geohydraulischen Parametern des Grundwasserleiters ( $k_f$ -Wert, Speichergrößen) als auch von der hydraulischen Kommunikation zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser abhängig. Eine flächendeckende und mehrere Meter mächtige Auelehmschicht schränkt die hydraulische Kommunikation erheblich ein, so dass sich für die Bebauung u.U. unkritische maximale Grundwasserstandshöhen ergeben können. Weist die Auelehmschicht hingegen größere Fehlstellen auf bzw. ist sie sehr sandig ausgebildet, ist ein ungehinderter Uferfiltratzufluss in den Grundwasserleiter möglich. Die Folge sind sehr hohe Grundwasserstände innerhalb der Ortschaft.

## **4 Erkundungsarbeiten**

### **4.1 Geophysikalische Untersuchungen**

Im Ergebnis der Defizitanalyse [1] wurde festgestellt, dass sich aus der räumlichen Verteilung der vorliegenden Bohrungsdaten nur eingeschränkt die Ausbildung einer schützenden Auelehmschicht im Bereich der Polderfläche und der Ortslage ableiten lässt. Von der Mächtigkeit und Verbreitung der Auelehmschicht hängt jedoch ab, ob bei einem extremen Hochwasserereignis der Mulde für die Ortslage Gruna eine Binnenentwässerung mit Pumpwerk erforderlich wird. Ist der Auelehm im Polderbereich mit größerer Mächtigkeit und geringer Durchlässigkeit flächenhaft verbreitet, vermindert sich die Infiltration in den Grundwasserleiter und die Grundwasserstände erreichen keine kritischen Höhen. Ist der Auelehm jedoch sehr sandig und mit größeren Fehlstellen ausgebildet, dringt während eines Hochwasserereignisses der Mulde ein hoher Anteil an Uferfiltrat in den Grundwasserleiter ein und lässt die Grundwasserstände in der Ortschaft innerhalb kürzester Zeit ansteigen.

Für eine belastbare Prognose als Planungsgrundlage wurde deshalb die Untersuchung der Verbreitung und Ausbildung des Auelehms mittels einer flächenhaften geophysikalischen Erkundung (Elektrische Widerstandstomographie) durchführt.

#### **4.1.1 Methodisches Konzept**

Es wurden geoelektrische Sondierungskartierungen mit anschließender tomographischer Inversion – sog. Widerstandstomographie – durchgeführt. Dabei werden entlang von Profillinien Multielektrodenaufstellungen realisiert. An jeweils zwei Elektroden (Stromelektroden) wird Strom in den Untergrund eingespeist, an zwei weiteren Elektroden (Potenzialelektroden) wird die sich aufbauende Spannung und somit der Ohmsche Widerstand gemessen. Durch die Verwendung von Multielektrodenanordnungen werden so viele 4-Elektrodenanordnungen wie möglich hintereinander gemessen. Durch Veränderung der Elektrodenabstände werden unterschiedliche Eindringtiefen realisiert. Auf diese Weise erhält man eine Vielzahl an Widerständen, bzw. unter Berücksichtigung des Geometriefaktors  $K$  an scheinbar spezifischen Widerständen. Durch tomographische Inversionsalgorithmen werden nun aus diesen scheinbaren spezifischen Widerständen „tatsächliche“ spezifische Widerstände berechnet, d.h. man erhält eine 2-dimensionale Verteilung des spezifischen Widerstandes entlang der Profillinien. Eine detailliertere und anschaulichere Beschreibung des Verfahrens enthält Anlage 7.5.

Der spezifische elektrische Widerstand ist eine materialspezifische Größe. Man kann aus der Verteilung selbiger unter Zuhilfenahme von tatsächlichen Aufschlüssen und der Kenntnis der regionalen Bedingungen die geologische Situation interpretieren. Dies genau ist der Grund für die geoelektrischen Untersuchungen. Ziel ist, aus diesen die Beschaffenheit des anstehenden Materials flächenhaft näher zu beschreiben und somit wichtige Ausgangsgrößen für die Grundwassermodellierung zu geben.

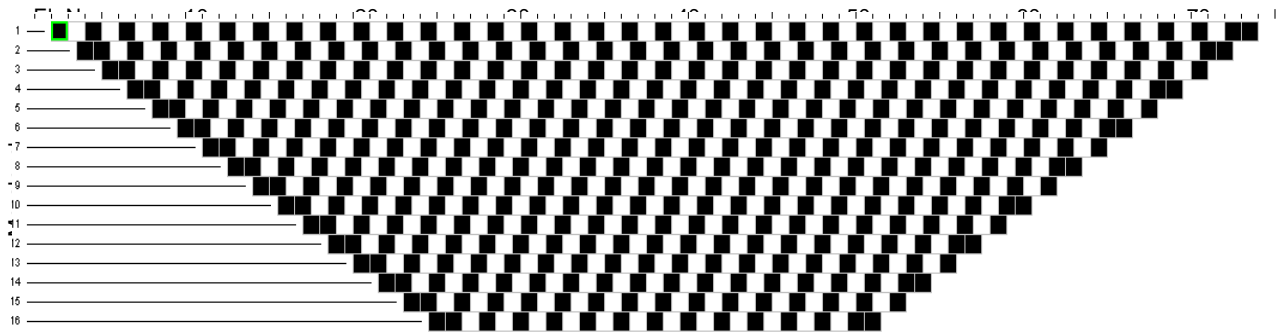
#### 4.1.2 Geophysikalische Feldarbeiten

Die Feldarbeiten wurden im Dezember 2011 und Januar 2012 realisiert. Dabei wurde die in Tabelle 4-1 aufgeführte Technik eingesetzt.

**Tabelle 4-1: Eingesetzte Technik**

	<b>ERT</b>	<b>Vermessung</b>
<b>Registrier-Apparatur:</b>	Geotom – Multielektrodenapparatur (Geolog GbR)	Trimble RTK 5800 (Trimble)
<b>Mess-System:</b>	4 x Multielektrodenkabel (je 25 Takeouts), 100 Erdspeie (Elektroden)	GPS-Empfänger zu RTK 5800 (Trimble)
<b>Mess-Software:</b>	Geotom2000 (Geolog GbR)	Geräteinterne Software
<b>Mess-Geometrie:</b>	Wenner, minimales Spacing 1m	-/-

Es wurde mit einem Elektroden-Array von 75 Elektroden und einem Elektrodenabstand von 1 m gearbeitet. Der Messfortschritt wurde nach dem „roll-along“-Prinzip erreicht. Dabei wird bereits während der Messung einer Auslage die vorhergehende abgebaut und die folgende aufgebaut, wobei mit einer Überlappung von jeweils 25 Elektroden gemessen wird. Abbildung 1 zeigt die Messwerterfassung bei einer 75-Elektrodenauslage, wie sie in Gruna realisiert wurde.



**Abbildung 2: Messwerterfassung mit 75-Elektrodenarray in Gruna**

Es wurden 16 Level gemessen. Das entspricht einem maximalen Abstand der Stromelektroden von  $AB = 48 \text{ m}$ , wodurch eine Eindringtiefe von ca. 8 m erreicht wurde. Dies diente der Erbringung sicherer Aussagen bis zu einer Erkundungstiefe von 6 m.

Insgesamt wurden 12 Geoelektrik-Profile mit einer Gesamtlänge von 5.500 m vermessen. Die Profile wurden so angelegt, dass eine möglichst gute Verteilung der Informationen über die Ortslage und die geplante Deichanlage erreicht wird. Dabei musste der aktuellen Bebauung und der Zugänglichkeit der einzelnen Teilflächen Rechnung getragen werden. Die Profilanlage ist in Anlage 10.1 dargestellt.

Die lagemäßige Erfassung erfolgte mit Trimble GPS im Koordinatensystem UTM Zone 33 bezogen auf das WGS84-Ellipsoid. Anschließend wurden die Koordinaten in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem (RD 83, 4. Streifen bezogen auf Bessel-Ellipsoid, Lagestatus 110) transferiert. Alle lagemäßigen Darstellungen wurden in diesem System realisiert.

Die Rohdatenqualität der Geoelektrikmessung war sehr gut (Standardabweichung  $< 1 \%$ ). Die Inversion der Daten wurde mit der Software RES2DINV® durchgeführt. Die Anpassungsfehler (RMS-Fehler) der Inversionsergebnisse betrugen zwischen 3 % und 5 %. Die Ergebnisse des Inversionsprozesses sind somit als gut einzustufen.



**Abbildung 3: Profilauslage**

## 4.2 Rammkernsondierungen

Zur Eichung der geophysikalischen Profile wurden zusätzlich 12 Rammkernsondierungen (RKS) mit einer Endteufe von jeweils 3 m abgeteuft und gleichzeitig gestörte Bodenproben zur Durchführung von Sieb-/Schlammanalysen entnommen. Die Ansatzpunkte der RKS sind der Anlage 7.1 zu entnehmen. Die Dokumentation der Schichtenverzeichnisse und Probenahmebereiche enthalten die Anlagen 8.1 – 8.12.

### 4.3 Durchführung von Sieb-/Schlämmanalysen zur Bestimmung der Durchlässigkeiten

Zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeiten des Auelehms wurden an den gewonnenen Bodenproben Sieb-/Schlämmanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anlage 9 dokumentiert.

Tabelle 4-2 enthält eine Übersicht zur  $k_f$ -Wert-Bestimmung aus den Kornverteilungskurven.

**Tabelle 4-2:  $k_f$ -Wert-Bestimmung aus den Kornverteilungskurven**

RKS	Lithologie	$d_w$	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	U	$k_f$ -Wert [m/s]
1	fS, u	0,259	--	0,081	0,324	--	7,78E-04
2	fS-U	0,032	0,009	0,026	0,120	14,02	1,19E-05
3	fS, u	0,074	0,062	0,083	0,161	2,58	6,35E-05
4	fS-U	0,030	0,005	0,035	0,137	28,27	1,04E-05
5	fS,u	0,039	0,005	0,055	0,131	25,63	1,76E-05
6	fS-U	0,020	--	0,015	0,092	--	4,64E-06
7	fS, u	0,050	0,021	0,065	0,135	6,31	2,90E-05
8	fS,gu,fu'	0,047	0,031	0,052	0,110	3,52	2,56E-05
9	fS, u	0,038	0,007	0,051	0,115	16,69	1,68E-05
10	fS, u	0,038	0,005	0,055	0,151	30,29	1,68E-05
11	S, u	0,057	0,017	0,118	0,189	11,05	3,77E-05
12	fS-U	0,030	0,004	0,029	0,133	37,84	1,04E-05

### 4.4 Grund- und Oberflächenwassermonitoring

#### 4.4.1 Oberflächenwassermessstelle

Um den Einfluss der Mulde auf den Grundwasserleiter erfassen zu können, wurde in der Mulde eine Oberflächenwassermessstelle (OWM) errichtet. Die OWM wurde ca. 30 m stromunterhalb der Fähranlegestelle Gruna installiert. Die OWM besteht aus einem 2"-Filterrohr, das ca. 1,5 m in die Gewässersohle gerammt wurde sowie aus einem am Filterrohr befestigten Lattenpegel, der so angebracht wurde, dass er vom Ufer ablesbar ist. In das Filterrohr wurde ein Datenlogger eingesetzt und mit einer Pegelkappe versehen.

Die OWM wurde lage- und höhenmäßig eingemessen (Koordinatensystem: Germany DHDN 12, 4. Streifen; Höhensystem: DHHN92).

**Tabelle 4-3: Vermessungsergebnisse OWM 1**

Bezeichnung	Rechtswert	Hochwert	Höhe [mNHN]	Bemerkung
OWM 1	4542242,5	5710596,1	90,31	Höhe des Pegelnullpunktes



Abbildung 4: OWM in der Mulde (Blickrichtung stromab)

#### 4.4.2 Grundwassermessstellen

Um die zeitliche Reaktion des Aquifers auf einen Hochwasserimpuls der Mulde in der Ortslage Gruna und im weiteren Untersuchungsgebiet messtechnisch erfassen zu können, wurde in [1] die Errichtung eines Grundwassermessnetzes konzipiert und in der zweiten Phase [2] umgesetzt.

Für das Grundwassermessnetz wurden insgesamt 3 neue Messstellen gesetzt (siehe Anlage 10). Die neuen Grundwassermessstellen wurden als Einfachmessstellen DN 100 mit Filterlängen von 3 m ausgebaut und mit Datenloggern bestückt.



Abbildung 5: LTV-Gruna-GWM 1





**Abbildung 6: LTV-Gruna-GWM 2**



**Abbildung 7: LTV-Gruna-GWM 3**

#### **4.4.3 Datenerfassung / Überwachung**

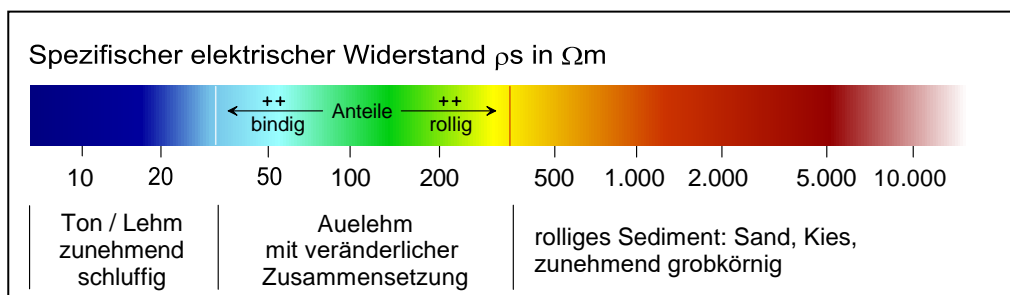
Das Monitoring erfolgte im Gesamtzeitraum vom 03.04.2012 bis 11.04.2013. Die Wasserstände der neu errichteten Grund- und Oberflächenwassermessstellen wurden jeweils mittels Datenlogger aufgezeichnet. Der Messrhythmus betrug 2 h in der OWM und 6 h in den GWM.

Die Messstellen wurden im 2-monatlichen Rhythmus befahren. Dabei erfolgten neben der Datenauslesung regelmäßige Kontrollmessungen per Lichtlot. Des Weiteren wurden die Datenlogger und Einhängkabel geprüft und gewartet.

## 5 Auswertung der Feld- und Laborarbeiten

### 5.1 Auswertung der geophysikalischen Messungen und Sondierungen

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in den Anlagen 7.2 bis 7.4 dargestellt. Die ermittelten Widerstände reichen von ca. 30  $\Omega\text{m}$  bis zu mehreren 1000  $\Omega\text{m}$ . Dies sind insgesamt hohe Widerstände, die sich jedoch mit den geoelektrischen Untersuchungen der GGL /3/ im Messgebiet decken. Gewöhnlich repräsentieren diese Widerstände in unseren mitteldeutschen quartären Ablagerungen schluffiges (30 – 100  $\Omega\text{m}$ ) bis sandiges (70 – 500  $\Omega\text{m}$ ) und dann schon kiesiges (>500  $\Omega\text{m}$ ) Material. Im Messgebiet Gruna kann an Hand der abgeteufte Rammkernsondierungen (RKS), der geologischen Ansprache und der aus den Proben bestimmten Kornverteilungskurven (Anlage 9) folgende lithologische Gliederung mit der ermittelten Widerstandsverteilung korreliert werden.



**Abbildung 8: Korrelation spezifischer elektrischer Widerstand – Lithologie**

Dabei ist zu beachten, dass der Begriff Auelehm keine lithologische, sondern eine genetische Bezeichnung ist. Auelehm ist eine i.d.R. holozäne, fluviatile Ablagerung und wird aus einem Gemisch von Ton, Schluff und Sand gebildet. Je nach Ablagerungsbedingungen (z.B. die Transportkraft des Gewässers) kann die Zusammensetzung erheblich schwanken und können auch kiesige und humose Bestandteile enthalten sein. An Hand dieser Materialbeschreibung und der o.g. Korrelation ergibt sich als generelles Bild folgende Zweiteilung:

- Schicht 1: Auelehm: hauptsächlich feinsandige, schluffige, teilweise lehmige, teilweise kiesige Flussablagerung. Sie ist in den Profildarstellungen von türkis über grün bis gelb dargestellt.
- Schicht 2: Sand / Kies: mittelsandig bis kiesige Ablagerungen. Auch hier können noch geringfügig lehmige Bestandteile enthalten sein. In den Profildarstellungen gelb bis rot gekennzeichnet.

Auf Grund der Entstehungsbedingungen sind die Übergänge fließend, klare Trennlinien nicht ziehbar. Türkisfarbene bis grüne Bereiche sind als schluffig bis feinsandiger Auelehm einzustufen, darin befindliche leicht gelbliche Bereiche sind eher dem Auelehm als der sandig-kiesigen Schicht 2 zuzuordnen. Rot gefärbte Bereiche sind der Schicht 2 zuzuordnen, hier ist der gelbliche Rand als Übergangszone anzusehen. Das Gesamtbild ist sehr heterogen. Prinzipiell handelt es sich bei Schicht 1 um Auelehmablagerungen, die durch sandig-kiesige Ablagerungen unterbrochen werden. Tonige Bereiche (dunkelblau) bzw. Bereiche mit hohem Tonanteil (Profil 2a – 300 bis 400m) treten nur marginal in Erscheinung und wenn, dann außer in Profil 2a, in Tiefen größer 6 m.



## 5.2 Auswertung des Grund- und Oberflächenwassermonitorings

### 5.2.1 Großräumige hydrologische Verhältnisse im Monitoringzeitraum

Das Kalenderjahr 2012 war im Allgemeinen etwas zu nass und mit 1,2 Grad in Sachsen deutlich zu warm. Die ersten zwei Monate im Kalenderjahr 2013 waren sogar deutlich zu nass. Das Gebietsmittel des Niederschlags wird im Januar 2013 für Sachsen mit 85 mm angegeben (= 161 % des langjährigen Mittels der Reihe 1981-2010), im Januar noch mit 53 mm (= 114 %).

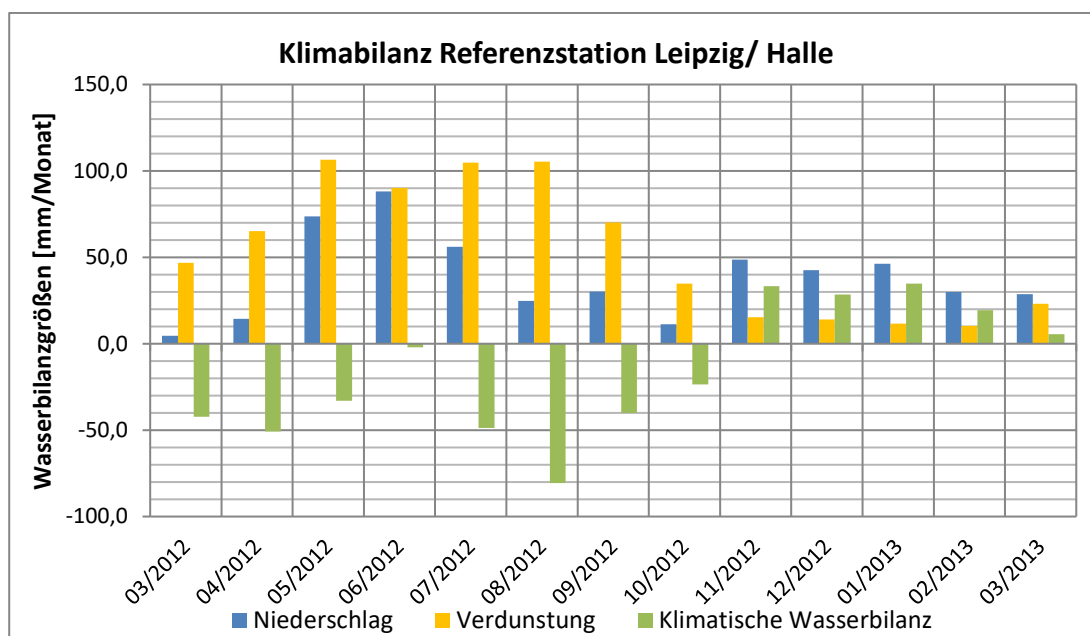


Abbildung 9: Klimabilanz Station Leipzig/Halle

#### Oberflächenwasser

Die Wasserführung in der Mulde sank in der allgemeinen Tendenz von Beginn des Monitoringzeitraums im April 2012 bis zum Ende des Abflussjahres 2102 (November) ab. Die Monatsmittelwerte der Durchflüsse und Wasserstände lagen z.T. deutlich unterhalb der langjährigen Monatsmittelwerte.

Mit Einsetzen der temporären Schneeschmelze und den Niederschlägen Mitte Dezember stiegen die Wasserstände in der Mulde deutlich an. Am 24.12.2012 erreichte der Wasserstand am Pegel Golzern den Richtwert der Alarmstufe 2. Nachdem sich Ende Dezember wieder eine fallende Tendenz an den Pegeln im Flussgebiet der Mulde eingestellt hatte, stiegen die Wasserstände aufgrund der ergiebigen Niederschläge ab Anfang Januar 2013 stark an. An den Pegeln Golzern und Bad Dübener wurde der Richtwert der Alarmstufe 2 überschritten (Pegel Golzern: HW = 422 cm; Pegel Bad Dübener: HW = 601 cm am 07.01.2013).

Ab dem 13.01. 2013 stellte sich wieder eine fallende bis dann gleichbleibende Tendenz der Wasserführung ein. Ab Ende Januar wurde durch die Schneeschmelze und den Niederschlag wieder eine steigende Was-

serführung an den Pegeln beobachtet. Aufgrund der anhaltenden winterlichen Witterung ab Anfang Februar setzte eine fallende bis gleichbleibende Tendenz der Wasserführung ein. Bis Ende März sank die Wasserführung dann kontinuierlich ab.

### Grundwasser

Zu Beginn des Messzyklus (April 2012) war eine fallende Tendenz bei den Grundwasserständen zu verzeichnen, die sich im Mai und Juni 2012 fortsetzte. Die mittleren Grundwasserstände lagen teilweise deutlich unter den langjährigen Monatsmittelwerten. Anfang Juli wurde ein kurzzeitiger Anstieg registriert, ansonsten setzte sich die fallende Tendenz bis November 2012 fort.

Ab Ende November stiegen die Grundwasserspiegel kontinuierlich an und bewegen sich seit Anfang März 2013 auf relativ gleichbleibendem Niveau (Beispiel: Grundwasserganglinie der Staatlichen Grundwassermessstelle 44415634 Mörtitz, Abbildung 10).

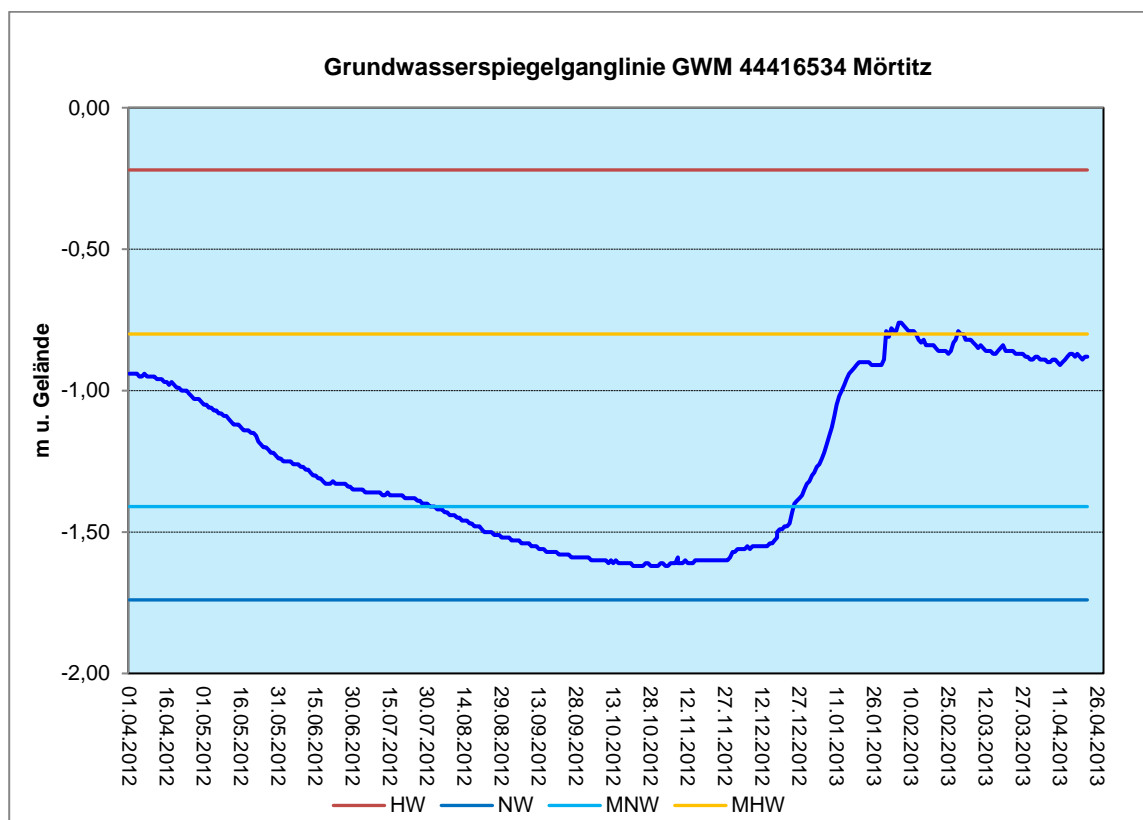


Abbildung 10: Grundwasserganglinie Messstelle 44416534 Mörtitz (Quelle: digitale Umweltkarten LfULG)

## 5.2.2 Oberflächenwasser- und Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet

Die kontinuierlichen Loggeraufzeichnungen aller Messstellen wurden in eine Datenbank überführt. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte in Form von Tabellen und Ganglinien.

### LTV-Gruna-GWM 1

In Abbildung 11 zeigt die Grundwasserganglinie der Messstelle LTV-Gruna-GWM 1, die in der Ortslage Gruna, ca. 250 m von der Mulde entfernt liegt, dargestellt. Der Grundwasserspiegelgang zeigt ab April bis Mitte Dezember eine fallende bis gleichbleibende Tendenz. Mit Einsetzen der temporären Schneeschmelze und den Niederschlägen Ende 2012/Anfang 2013 ist ein kurzfristiger starker Anstieg des Grundwasserspiegels um ca. 2,5 m zu verzeichnen.

Nach einem kurzzeitigen Peak fällt der Wasserspiegel innerhalb von 14 Tagen um ca. 1,3 m (Ende Januar).

Ab Anfang Februar 2013 ist eine prinzipiell fallende Tendenz (mit nur kurzzeitigen Anstiegen) um weitere 0,6 m zu erkennen auf ein Niveau, das mit dem des Vorjahres vergleichbar ist.

Der Grundwasserspiegel der Messstelle LTV-Gruna-GWM 1 reagiert offensichtlich nahezu gleichzeitig bzw. marginal zeitversetzt mit der Mulde.

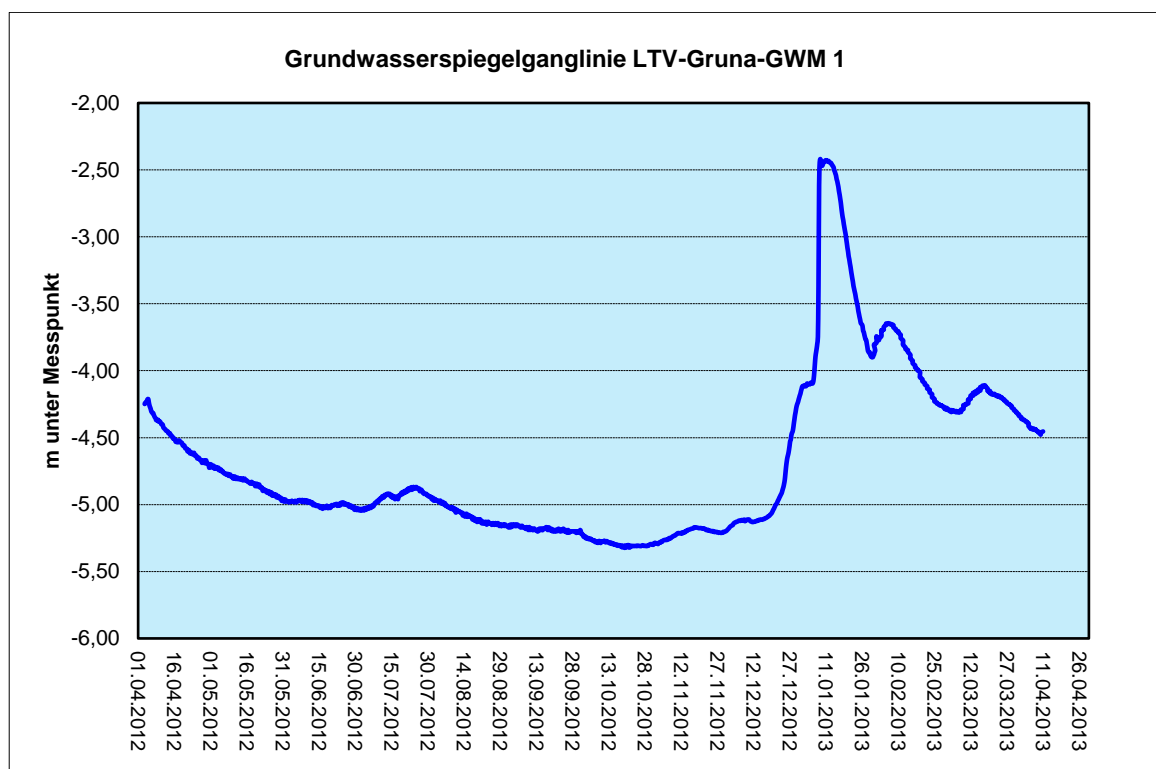


Abbildung 11: Grundwasserganglinie LTV-Gruna-GWM 1

### LTV-Gruna-GWM 2

Die Messstelle LTV-Gruna-GWM 2 befindet sich in östlicher Randlage von Gruna, ca. 500 m von der Messstelle LTV-Gruna-GWM 1 entfernt. Die Grundwasserganglinie verläuft wesentlich gleichmäßiger (Abbildung 12). Nach einer langen fallenden Tendenz von April bis Mitte Dezember 2012 stieg der Wasserspiegel bis Mitte Januar 2013 um ca. 1,2 m. Seitdem verharrte der Grundwasserspiegel auf einem annähernd konstanten Niveau zwischen 3,55 m bis 3,80 m unter Messpunkt. Die Messstelle reagiert nicht so deutlich wie die Messstelle LTV-Gruna-GWM 1 auf die Änderungen der Wasserführung der Mulde.

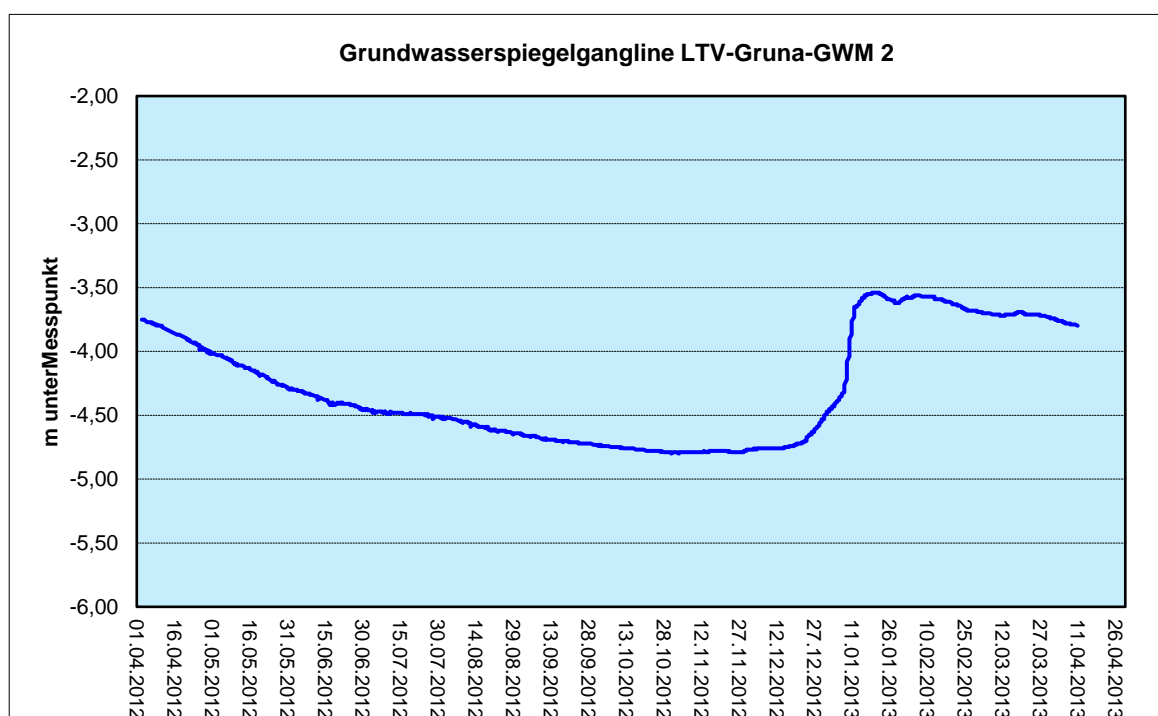


Abbildung 12: Grundwasserganglinie LTV-Gruna-GWM 2

### LTV-Gruna-GWM 3

Die Messstelle LTV-Gruna-GWM 3 liegt ca. 1,2 km von der Mulde entfernt. Die Amplitude der Spiegelschwankungen beträgt an dieser Messstelle nur etwa 1,1 m. Nach einer fallenden Tendenz bis August, stagnierte der Grundwasserspiegel bis Mitte Dezember 2013 auf relativ gleichbleibendem Niveau (3,10 - 3,25 m unter Messpunkt). Nach den Niederschlagsereignissen um den Jahreswechsel stieg der Grundwasserspiegel in der Messstelle bis Ende Januar 2013 um ca. 1 m an. Seitdem lag der Grundwasserspiegel auf einem annähernd konstanten Niveau zwischen 2,15 m bis 2,35 m unter Messpunkt.

Die Reaktion des Grundwasserspiegels auf das Hochwasserereignis der Mulde ist aufgrund der Entfernung zur Vorflut sehr viel schwächer ausgebildet als bei den beiden anderen Grundwassermessstellen. Trotzdem kann ein beschleunigter Anstieg ab dem 20.12.12 festgestellt werden, der vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass das Grundwasser zum Zeitpunkt des Hochwassers nicht in die Mulde entlasten kann und somit im Bereich der Messstelle zu einem Grundwasserrückstau kommt.

Die Quantifizierung des Mulde-bedingten Grundwasseranstieges ist insofern schwierig, da dieser von einer verstärkten Grundwasserneubildung überlagert wird.

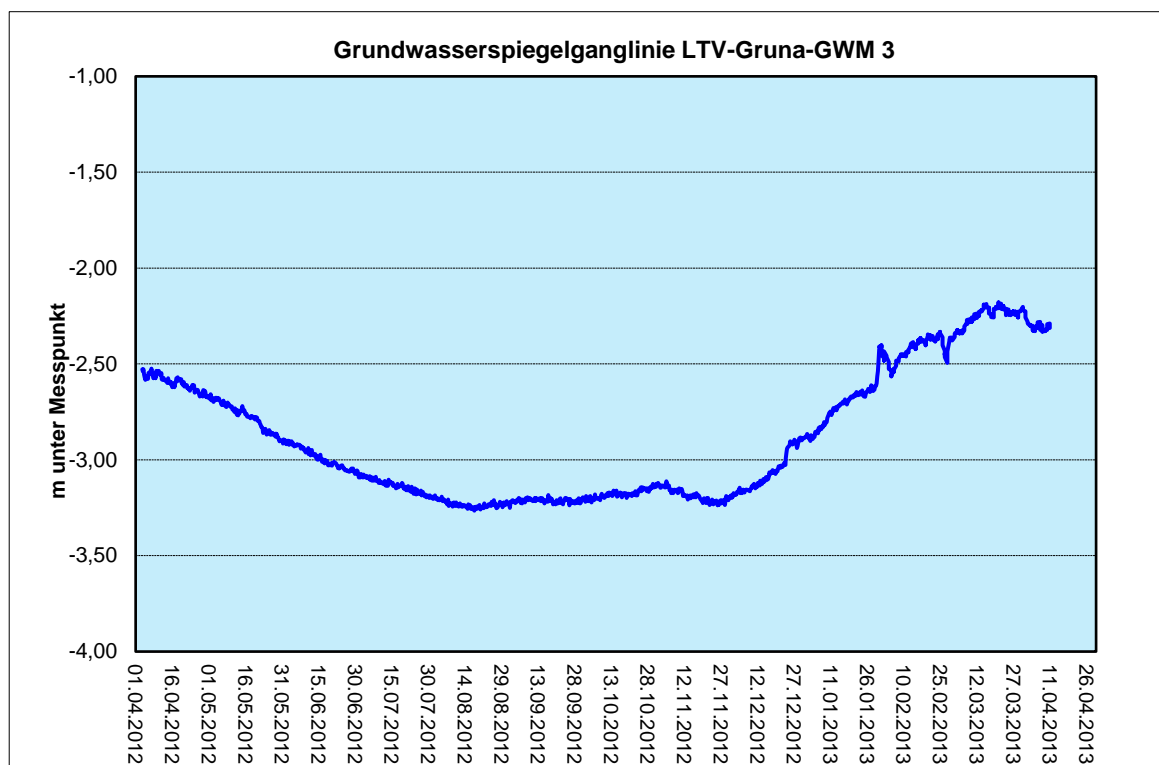


Abbildung 13: Grundwasserganglinie LTV-Gruna-GWM 3

### LTV-Gruna-OWM 1

Der temporär installierte Pegel in der Mulde spiegelt prinzipiell die an den Pegeln des Landesmessnetzes aufgezeichneten Wasserstände wieder. Die Wasserführung am Pegel sank tendenziell von Beginn des Monitoringzeitraums im April 2012 bis Mitte Dezember, mit Ausnahme kurzzeitiger Anstiege Anfang Juli, ab. Mitte Dezember stieg der Wasserstand auf Grund der einsetzenden Schneeschmelze am Pegel deutlich an. Nach kurzzeitigem Rückgang Ende Dezember folgten mehrere aufeinander folgende Hochwasserwellen mit unterschiedlichen Scheitelwerten. Der höchste Scheitelwert setzte vermutlich am 08.01.2013 mit einer Scheitelhöhe von ca. 93,2 m NN ein.

Durch einen kurzzeitigen Ausfall und Diebstahl des Loggers in der Mulde konnte nicht das komplette Hochwassergeschehen messtechnisch verfolgt werden. Deshalb musste die Ableitung der einzelnen Hochwasserwellen vor Ort durch die benachbarten Pegel Bad Düben und Golzern erfolgen.

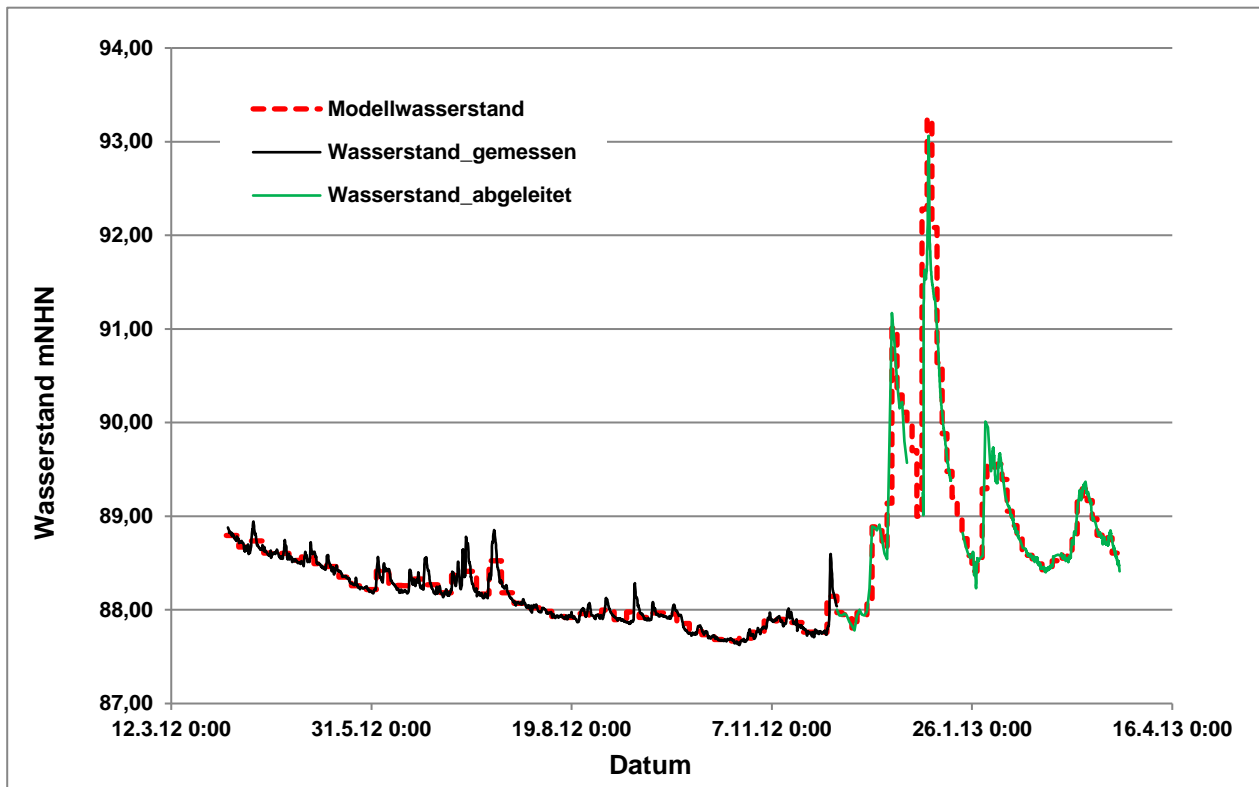


Abbildung 14: Wasserspiegelganglinie der Mulde

Ein Hochwasser der Mulde bewirkt einen verhältnismäßig schnellen Anstieg der Grundwasserstände im Bereich der Ortslage. Ursachen dafür sind die guten bis sehr guten Durchlässigkeiten der Kiese und Sande des Aquifers, die gespannten/teilgespannten Druckverhältnisse und die Lage des Ortes in einem Muldebogen. Die Ganglinien der Grundwassermessstellen reagieren in Abhängigkeit von der Uferlinie der Mulde zeitlich verzögert und phasenverschoben zum Gang des Muldehochwassers. Je näher sich die Messstelle zur Mulde befindet, umso kürzer ist die Reaktionszeit und umso ausgeprägter ist der Grundwasserscheitel.

### 5.3 Schlussfolgerungen für die Grundwassermodellierung

Die Positionierung der RKS wurde an Hand der Ergebnisse der Geoelektrik durchgeführt. Es wurden Ansatzpunkte festgelegt, bei denen niedrige Widerstände gemessen wurden, also Bereiche mit eher bindigem Material. Die Korngrößenanalysen aus den entnommenen Proben ergaben  $k_f$ -Werte von  $2,56 \cdot 10^{-7}$  m/s bis  $9,84 \cdot 10^{-6}$  m/s. Lediglich die Probe aus der RKS 6 hatte einen Wert von  $4,79 \cdot 10^{-8}$  m/s. Aufgrund der geoelektrischen Untersuchungen und der o.g. Korrelation ist davon auszugehen, dass keine niedrigeren  $k_f$ -Werte anzutreffen sind. Vergleichsanalysen (Anlage 9; RKS 1, Proben 3 und 4) haben ergeben, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte, insbesondere in den höher ohmigen, sandig-kiesigen Bereichen, aber auch in großen Teilen des Auelehms höher liegen. In den sandig-kiesigen Bereichen können  $k_f$ -Werte von  $10^{-5}$  bis  $10^{-3}$  m/s angenommen werden.

Schlussfolgernd haben die durchgeführten Untersuchungen ergeben, dass die oberflächennahen Ablagerungen im Untersuchungsgebiet keine flächenhaft verbreitete stauende Wirkung besitzen. Bestenfalls haben die Auelehmablagerungen eine hemmende, d.h. verzögernde Wirkung.

## **6 Modellaufbau**

### **6.1 Eingangsdaten für die Modellerstellung**

Grundlage für den Aufbau des Grundwasserströmungsmodells sind insbesondere nachfolgende Daten/Informationen:

1. Aufschlüsse / Bohrungen zum Aufbau eines hydrogeologischen Strukturmodells
2. Randbedingungsinformationen der Vorfluter im Modellgebiet (insbesondere Sohlhöhen, Wasserspiegellagen und Überschwemmungsflächen)
3. Angaben zur Grundwasserneubildung
4. Messwerte von Grund- und Oberflächenwassermessstellen

### **6.2 Simulationsverfahren**

Die Simulation unterirdischer Strömungsvorgänge in einem betrachteten Raum basiert auf der Lösung der prozessbeschreibenden Differentialgleichungen mit ihren Anfangs- und Randbedingungen. In dem für diese Arbeit genutzten Programmsystem MODFLOW (modular 3-dimensional finite-difference ground-water model) wird die Strömungsdifferentialgleichung, welche aus den Gesetzmäßigkeiten der Massenerhaltung, den Zustandsgleichungen (Fluid, Gestein) sowie dem Darcy-Gesetz folgt, mit der finiten Differenzenmethode gelöst.

In der Praxis wird aus den gegebenen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen eines zu modellierenden Raumes durch geeignete Schematisierung ein Simulationsmodell aufgebaut. Es erfolgt eine Aufteilung des Untersuchungsgebietes in Berechnungselemente (Diskretisierung), wobei ein schichtweiser vertikaler Aufbau eines Modells die Zuordnung der Elemente zu bestimmten Grundwasserleitern ermöglicht. Die richtige Wahl der Randbedingungen und die Anpassung bzw. Kalibrierung des Modells an Grundwasserströmungszustände (natürliche Dynamik, Pumpversuche) durch eine geeignete Variation der bestimmenden geohydraulischen Parameter ( $k_f$ -Wert, Grundwasserneubildung, Speicherkoeffizient) sind Voraussetzungen, ein prognosefähiges Simulationsmodell zu erhalten.

Zur Berechnung mit dem Programm MODFLOW werden die Parameter der geologischen Schichten (Durchlässigkeitsbeiwerte, GWL-Mächtigkeit über Eingabe der Bezugshöhen Unterkante und Oberkante des GWL, Grundwasserneubildung) erfasst.

Weiterhin gehen definierte Anfangs- und Randbedingungen in das Modell ein. Im Ergebnis kann eine räumliche und zeitliche Entwicklung der Grundwasserströmungsverhältnisse dokumentiert werden.



### 6.3 Geometrischer und geologischer Modellaufbau

Die Berechnung des Grundwasserströmungsregimes bei variablen Wasserständen der Mulde erfolgte auf der Basis eines zweidimensionalen instationären Grundwasserströmungsmodells.

Das für die Ortschaft Gruna aufgebaute Modell ist Teil eines 120 km<sup>2</sup> großen Großraummodells, das die großräumigen Grundwasserströmungsverhältnisse hinreichend genau abbildet (Abb. 15).

Das Modell „Gruna“ hingegen besitzt mit einer N-S- Ausdehnung von 3 km und eine E-W-Ausdehnung von 4 km eine Gesamtfläche von 12 km<sup>2</sup> und wird im Weiteren als „Detailmodell“ bezeichnet. Es liegt im Südwesten des Großraummodells und beinhaltet die komplette Überschwemmungsfläche eines HQ100-Hochwasserereignisses der Mulde (entspricht in erster Näherung der räumlichen Erstreckung der Fluss- aue).

Das Detailmodell besteht aus insgesamt 400 x 300 orthogonalen Elementen mit einer Elementgröße von 10 x 10 m. Die Ausrichtung des Modellnetzes erfolgte nach dem Gauss-Krüger-Koordinatensystem ohne Drehung. Die Koordinateneckpunkte des Modellrechteckes liegen bei

Obere linke Ecke: 4541600, 5711700

Untere rechte Ecke: 4545600, 5708700

Alle 120 000 Elemente sind strömungsaktiv, d.h. trockene bzw. inaktive Zellen sind nicht existent. Im Zentrum des Modells liegt die Ortslage Gruna mit dem Ringdeich als favorisierte Hochwasserschutzmaßnahme. Von Süd nach Nord wird es von der Mulde als Hauptvorfluter durchströmt.

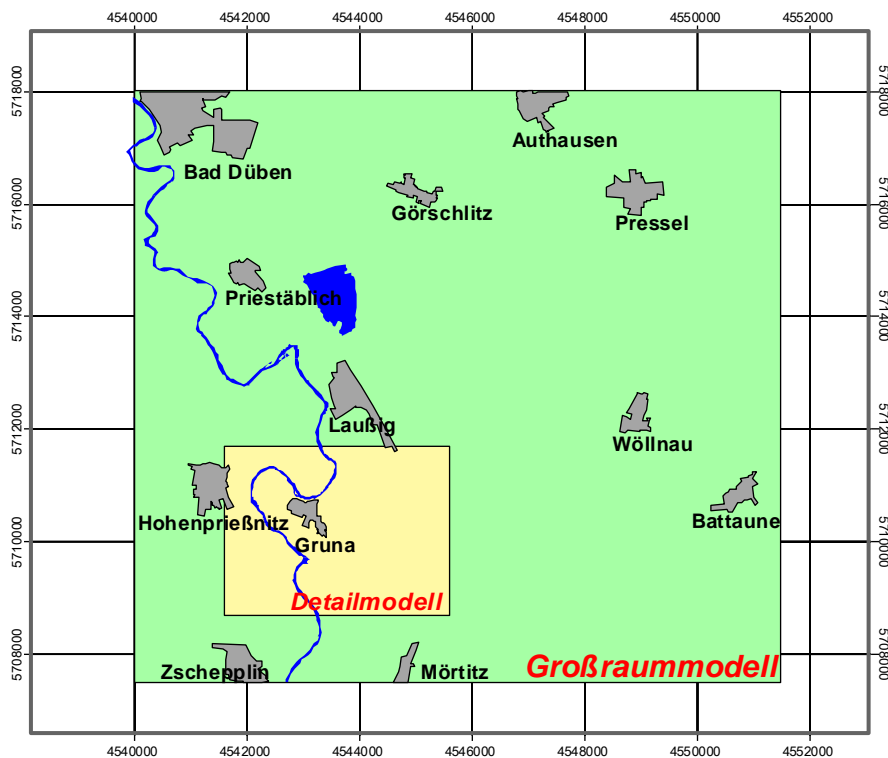


Abbildung 15: Lage des Detailmodells im Großraummodell

Die geologischen Standortverhältnisse werden in Form einer Modellschicht mit ortsvariablen Durchlässigkeiten hinreichend genau abgebildet. Die Elementoberkanten entsprechen den auf ein 10 m Raster interpolierten Höhen des digitalen Geländehöhenmodells DGM20. Die Modellbasis geht mit der Unterkante des aus Sanden und Kiesen bestehenden quartären Grundwasserleiters (Quartärbasis) konform.

Grundlage für die Ableitung der flächenhaften Anfangsverteilung der Durchlässigkeiten bildeten die im Modellraum dokumentierten petro- und stratigraphischen Schichtenansprachen der Bohrungen des UHYDRO- und HYRA-Datenspeichers sowie der Bohrungen aus der geotechnischen Untersuchung (Anlage 8). Allen dort angesprochenen Haupt- und Nebenfraktionen wurden repräsentative  $k_f$ -Werte zugeordnet und mächtigkeitsgewichtet wie folgt gemittelt:

$$k_{f_{horizontal}} = \frac{\sum_i k_{f_i} \cdot M_i}{\sum_i M_i} \quad (1)$$

Für die Berechnung der nutzbaren Porosität wurde als erste Näherung der Ansatz nach HELMBOLD verwendet, der die speichernutzbare Porosität aus dem  $k_f$ -Wert wie folgt herleitete:

$$n_o = 1,33 \cdot k_f^{0,33} \quad (2)$$

Die Übertragung der punktgenauen Durchlässigkeiten (Bohrungen) auf die Fläche erfolgte durch Interpolation mit dem Kriging-Verfahren.

## 6.4 Äußere und innere Randbedingungen

Die Wahl sinnvoller hydraulischer Begrenzungen ist entscheidend für die erfolgreiche Simulation der Grundwasserströmung eines gegebenen Gebietes. Der zu untersuchende Strömungsraum sollte soweit ausgedehnt sein, dass der Modellrand nicht vom Geschehen im Innern des Reservoirs beeinflusst werden kann. In der Regel folgen die äußeren Modellränder geologischen oder hydrogeologischen Gegebenheiten wie beispielsweise Vorflutern oder Festgesteinsrändern.

Das Detailmodell „Gruna“ hingegen ist Teil eines Großraummodells, so dass dieses nicht von äußeren Rändern begrenzt werden muss. Alle Ränder des Detailmodells sind „offen“, d.h. die hydraulische Kommunikation mit dem Großraummodell wird zu jeder Zeit und an allen Modellrändern gewährleistet.

### 6.4.1 Vorfluter Mulde

Als innere Randbedingungen wirken im Modell die Mulde, der Ziegelgraben und der ortsinnere (namenlose) Graben. Die Mulde wurde im Modell als Randbedingung 3. Art (RIVER) mit

$$Q = L \cdot A \cdot (h_{ow} - h_{gw}) \quad [m^3/s] \quad (3)$$

Q:	Randvolumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
L :	Leakagefaktor	[1/s]
A :	wirksame Vorflutfläche , elementbezogen	[m <sup>2</sup> ]
how:	Wasserstand der Vorflut	[mNHN]
h <sub>GW</sub> :	simulierter Grundwasserstand	[mNHN]

berücksichtigt.

Für die modelltechnische Implementierung der zeitlich variablen Wasserspiegelhöhen wurde die Wasserstandsganglinie der Mulde als Stufenfunktion mit Stressperioden (Zeitschritte) von 2 und 5 Tagen approximiert. Für den Kalibrierzeitraum ohne Hochwasser (3.4.2012 bis 2.12.2012) wurden Zeitschritte von 5 Tagen Dauer gewählt. In der Periode des ansteigenden und abfallenden Hochwassers der Mulde (3.12.12 bis 24.3.2013) besitzen die Zeitschritte eine Dauer von 2 Tagen. Insgesamt ergaben sich 106 Zeitschritte bzw. Stressperioden. Die für den Kalibrierzeitraum generalisierte Wasserstandsganglinie der Mulde zeigt die Abbildung 14.

Die Werte für die Leakagefaktoren, welche die Verbindung zwischen der Mulde im Hauptgerinne und dem Grundwasserleiter charakterisieren, sind Zielgrößen der Modellkalibrierung.

#### 6.4.2 Grundwasserneubildung

Für den Wasserhaushalt des Untersuchungsraums sind die Klimagrößen der Station Leipzig-Schkeuditz relevant. Aus den für die letzten 30 Jahre (1981-2010) zur Verfügung stehenden Tageswerten wurde die Grasreferenzverdunstung (nach PENMAN-MONTEITH) und die Gewässerverdunstung (nach PENMAN) berechnet.

**Tabelle 6-1: Klimadaten Station Leipzig-Schkeuditz**

	<b>Station Leipzig-Schkeuditz</b> langjährige Mittelwerte 1981 – 2010
mittlere Jahresniederschlag (korrigiert) <sup>1)</sup>	587,7 mm/a
Sommerniederschlag (korrigiert) <sup>1)</sup>	345,9 mm/a
Grasreferenzverdunstung	660,5 mm/a
Gewässerverdunstung	742,5 mm/a
klimatische Wasserbilanz (Pk-ET0)	-72,8 mm/a
mittlere Jahrestemperatur	9,5°C

<sup>1)</sup> Korrektur für Niederschlag in Bodennähe durch eine Erhöhung um 10 %

Die Ermittlung der Grundwasserneubildung erfolgte auf der Grundlage des Wasserhaushaltsverfahrens BAGLUVA. Dieses Verfahren basiert auf der BAGROV-GLUGLA-Beziehung und dient der Bestimmung des langjährigen Mittels der realen Verdunstung. Diese wird u.a. in Abhängigkeit von der Bodenart, der vorhandenen Nutzung und des Grundwasserflurabstandes aus den klimatischen Größen Jahres- und Sommerniederschlag sowie der Grasreferenzverdunstung (s. Tab. 6-1) berechnet. Das Verfahren nach BAGROV-

GLUGLA wird in Ostdeutschland seit den 1970er Jahren erfolgreich zur Bestimmung der Grundwasserneubildung im Lockergesteinsbereich eingesetzt und kontinuierlich weiterentwickelt [siehe z.B. DVWK 238/1996]. Die aktuellste Version ist unter der Bezeichnung BAGLUVA im ATV-DVWK-Merkblatt M 504 dokumentiert.

Unter der Bedingung, dass kein Direktabfluss auftritt, kann die Grundwasserneubildung anschließend als Differenz aus Niederschlag und realer Verdunstung ermittelt werden. Sie beträgt auf dem Gebiet des Detailmodells je nach Landnutzung 2 bis 5 l/s\*km<sup>2</sup>.

### 6.4.3 Spundwände

Entlang der nördlichen und westlichen Bebauungsgrenze sollen die bereits vorhandenen Spundwände verlängert und als zusätzlicher hydraulischer Schutz ausgebaut werden. Die Einbindetiefe in den Untergrund schwankt zwischen 5 und 7 m unter Gelände.

Die als Grundwasserfließhindernis fungierenden Spundwände werden als undurchströmbare geohydraulische Fließbarrieren mit einer einheitlichen Einbindetiefe von 86,5 mNHN berücksichtigt. Das mit nur einer Modellschicht arbeitende Modell musste deshalb in zwei Modellschichten vertikal diskretisiert werden. Im Bereich der alten und neuen Spundwände liegt die Basis der ersten Modellschicht auf 86,5 mNHN. Die Basis der zweiten Modellschicht geht mit der Quartärbasis konform. Diese liegt im Bereich der Spundwände bei ca. 82,5 ...85 mNHN.

## 7 Modellkalibrierung

### 7.1 Stationäre Modellkalibrierung

Die Modellkalibrierung hat das Ziel ein prognosefähiges Simulationsmodell zu erhalten. Dazu müssen mit dem geohydraulischen Simulationsmodell die gemessenen Grundwasserstände so gut wie möglich nachsimuliert werden. Die Modelleichung des Großraummodells erfolgte stationär anhand der Stichtagsmessung von 05.07.2011. Die Grundwasserstände zum Messzeitpunkt lagen ca. 10 cm über den Mittelwasserverhältnissen, so dass die gemessenen Grundwasserstände auf Mittelwasser korrigiert werden mussten.

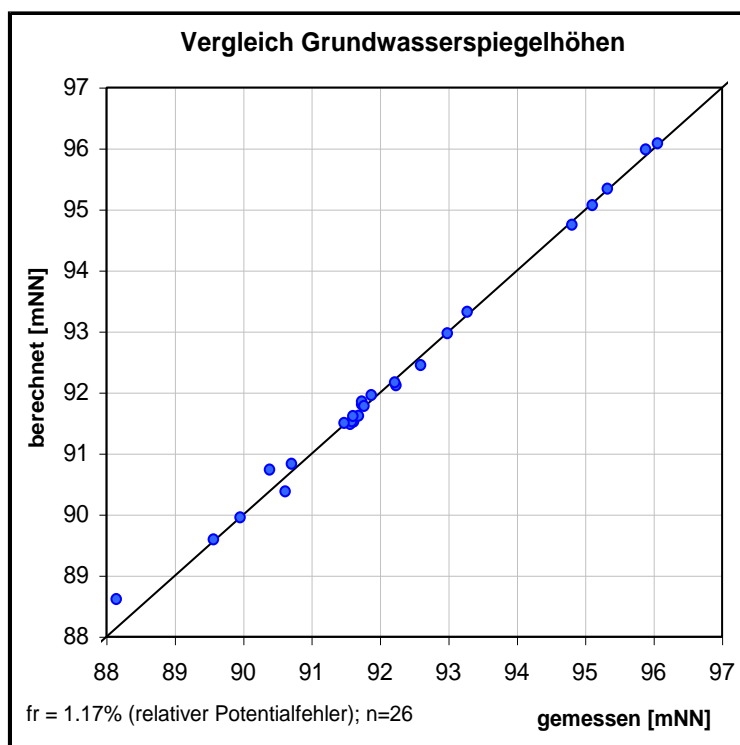
Die schrittweise Verbesserung der Modellgüte wurde durch Variation des Durchlässigkeitsbeiwertes und der hydraulischen Verbindung des Oberflächengewässers mit dem simulierten Grundwasserleiter (Leakage-Faktor) unter Zuhilfenahme numerischer Optimierungsmethoden des Programmsystems PEST (DOHERTY 2000) erreicht. Die im vorhergehenden Abschnitt angegebenen mittleren Grundwasserneubildungsraten wurden nicht geändert.

Für alle Modellelemente erfolgte eine räumliche Interpolation der kf-Werte über 40 im Modellgebiet verteilte Stützstellen. Die 40 Stützstellen setzten sich aus 26 Grundwassermessstellen und 14 modellinternen Beobachtungspunkten zusammen, die vor allem in hydraulisch auffälligen Bereichen (Grundwasserscheiden etc.) positioniert wurden.

Die einzelnen  $k_f$ -Werte dieser Stützstellen waren Zielgrößen der Modellkalibrierung. Der dabei zugelassene Wertebereich der  $k_f$ -Werte für den Grundwasserleiter lag zwischen  $1,0E-05$  m/s und  $1,0E-03$  m/s.

Nach mehreren Kalibrierungsläufen konnte eine sehr gute Übereinstimmung von Mess- und Berechnungswerten mit einem relativen Modellfehler  $fr = 1,17\%$  ( $n = 26$ ) erzielt werden. Die folgende Abbildung zeigt dieses zufriedenstellende Kalibrierergebnis in Form des Scatter-Diagramms. In Tabelle 5-2 werden die berechneten und gemessenen Grundwasserstände aller hinzugezogenen Messstellen des Großraummodells aufgeführt.

Das Detailmodell kann vorerst noch nicht durch eine Modellkalibrierung an die realen Verhältnisse angepasst werden, da ein qualifiziertes Grundwassermessnetz in der Ortslage fehlt. Dieser Schritt kann erst nach dem Bau des Monitoringmessnetzes und des sich anschließenden Grundwassermonitorings nachgeholt werden.



**Abbildung 16: Modellabweichung**

**Tabelle 7-1: Gemessene und berechnete Grundwasserspiegellhöhen des Ausgangszustandes**

	Bezeichnung der Grundwassermessstelle	Rechtswert	Hochwert	Modellschicht	Grundwasserspiegel gemessen [mNN]	Grundwasserspiegel berechnet [mNN]	Abweichung [m]	Wichtung der GW-Messstelle [-]	gewichtete quadratische Abweichung [m²]	quadratische Abweichung vom Mittelwert [m²]	gewichteter Abweichungsbetrag [m]
Nr	NAME	RW	HW	LAYER	GEM xi	BER yi	xi-yi	w	w*(xi-yi)²	(xi-xm)²	w* xi-yi
1	Kiessee Laußig	4543545.0	5714440.0	1	91.57	91.48	0.09	1.00	0.01	0.37	0.09
2	_44416510	4541840.0	5715250.0	1	90.62	90.37	0.25	1.00	0.06	2.43	0.25
3	01/2011	4542362.0	5715510.0	1	90.39	90.73	-0.34	1.00	0.12	3.20	0.34
4	02/2011	4543850.0	5715658.0	1	90.71	90.83	-0.12	1.00	0.01	2.15	0.12
5	2/94	4544500.3	5715473.2	1	91.88	91.95	-0.07	1.00	0.00	0.09	0.07
6	6/94 oP	4542916.0	5713490.0	1	88.15	88.61	-0.46	1.00	0.21	16.22	0.46
7	7/94	4543682.8	5713654.7	1	91.62	91.52	0.10	1.00	0.01	0.31	0.10
8	8/94	4543970.0	5713796.7	1	91.69	91.61	0.08	1.00	0.01	0.24	0.08
9	9/94	4544690.2	5714181.8	1	92.60	92.44	0.16	1.00	0.03	0.18	0.16
10	16/94	4543996.0	5714306.0	1	91.59	91.52	0.07	1.00	0.00	0.35	0.07
11	17/94	4544145.9	5714344.1	1	91.74	91.80	-0.06	1.00	0.00	0.19	0.06
12	19/94	4544135.0	5714963.0	1	91.74	91.85	-0.11	1.00	0.01	0.19	0.11
13	Hy Lßg 4/96	4545213.6	5711278.1	1	94.81	94.74	0.07	1.00	0.00	6.93	0.07
14	Hy 1/05	4542915.0	5714738.7	1	91.48	91.50	-0.02	1.00	0.00	0.49	0.02
15	02/2007	4544416.8	5714503.6	1	92.24	92.11	0.13	1.00	0.02	0.00	0.13
16	_9751	4545210.0	5715660.0	1	92.22	92.16	0.06	1.00	0.00	0.00	0.06
17	_9754	4547242.0	5711632.0	1	95.89	95.98	-0.09	1.00	0.01	13.78	0.09
18	_9756	4548612.0	5711703.0	1	96.06	96.08	-0.02	1.00	0.00	15.07	0.02
19	_9763	4543913.0	5714951.0	1	91.61	91.61	0.00	1.00	0.00	0.32	0.00
20	_9779	4546467.0	5712689.0	1	95.11	95.07	0.04	1.00	0.00	8.60	0.04
21	_9780	4546935.0	5712464.0	1	95.33	95.33	0.00	1.00	0.00	9.94	0.00
22	GP1 (Deponie)	4542800.0	5713900.0	1	89.57	89.59	-0.02	1.00	0.00	6.80	0.02
23	1/86 (Deponie Priestäblich)	4541454.0	5716133.0	1	89.96	89.95	0.01	1.00	0.00	4.92	0.01
24	03/2011	4545564.0	5713243.0	1	93.28	93.32	-0.04	1.00	0.00	1.22	0.04
25	04/2011	4544126.0	5712675.0	1	92.99	92.97	0.02	1.00	0.00	0.66	0.02
26	05/2011	4544362.0	5710972.0	1	91.77	91.77	0.00	1.00	0.00	0.17	0.00

In der Anlage 5 ist das berechnete stationäre Grundwasserströmungsfeld bei Mittelwasserverhältnissen (Bezugsdatum 5.7.2011) in Form von Grundwassergleichen dokumentiert. Im Bereich der erst Ende März 2012 errichteten neuen Messstellen GWM 1, 2 und 3 lagen die berechneten mittleren Grundwasserstände tendenziell über denen ab April 2012 gemessenen. Da der April 2012 bereits innerhalb einer Niedrigwasserperiode lag (siehe Pkt. 5.2.1), sind diese Abweichungen plausibel.

Die durch die stationäre Modellkalibrierung identifizierte kf-Wert-Verteilung ist in der Anlage 6 ersichtlich. Im Modellgebiet sind kf-Werte zwischen 0,5e-4 bis 5e-4 m/s ermittelt worden, innerhalb des Ringdeiches liegen diese zwischen 1e-4 und 2e-4 m/s.

Der wirksame Leakage-Faktor für das Muldebett wurde mit  $L = 3 \cdot 10^{-3}$  1/s und für den Ziegelgraben mit  $L = 2,4 \cdot 10^{-5}$  1/s ermittelt.

## 7.2 Instationäre Modellkalibrierung

Die stationäre Kalibrierung ist der erste Schritt einer Modelleichung, bei der vorrangig die kf-Werte eingestellt und abgeschätzt werden. Es folgt die instationäre Modellkalibrierung, welche letztendlich erreichen soll, ein prognosefähiges Simulationsmodell zu erhalten. Dazu müssen mit dem geohydraulischen Berechnungsmodell die gemessenen Grundwasserstandsganglinien der Messstellen GWM 1, 2 und 3 so gut wie möglich nachsimuliert werden. Die instationäre Modelleichung erfolgte für den Zeitraum 04/2012 bis 03/2013.

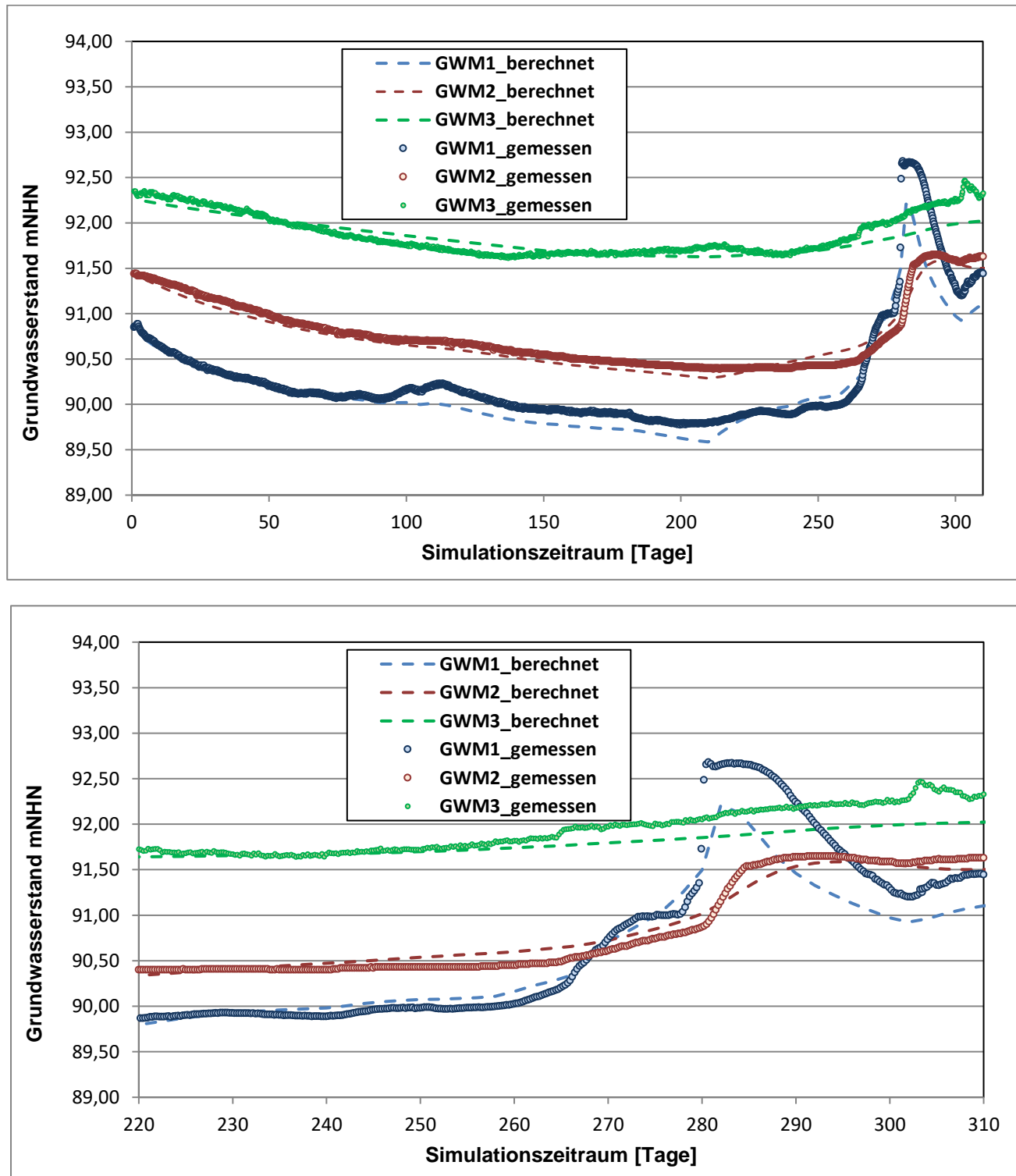
Die schrittweise Verbesserung der Modellgüte wurde durch Variation der entwässerbaren Porositäten/Speicherkoeffizienten sowie der hydraulischen Verbindung der Mulde mit dem Grundwasserleiter (Leakage-Faktor) unter Zuhilfenahme numerischer Optimierungsmethoden erreicht.

Die flächendifferenzierte mittlere Grundwasserneubildung musste für den Zeitraum von April bis Oktober 2012 ebenfalls als Eichgröße herangezogen werden, um den grundwasserneubildungsbedingten Grundwasserstandsrückgang simulieren zu können. Wie aus der negativen klimatischen Wasserbilanz in Abbildung 9 ableitbar, erfolgte in diesen Monaten keine bzw. eine geringe Grundwasserneubildung. Das beste Ergebnis wurde durch eine Reduzierung der Grundwasserneubildung auf 50 % des langjährigen mittleren Wertes erreicht.

Die aus der stationären Kalibrierung hervorgegangene kf-Wertverteilung wurden nicht verändert.

Nach Beendigung des instationären Kalibrierprozesses konnte eine hinreichend genaue Übereinstimmung von Mess- und Berechnungswerten erzielt werden. Die folgende Abbildung zeigt dieses zufriedenstellende Ergebnis nach Beendigung des Kalibrierungsprozesses in Form eines Vergleichs zwischen den berechneten und gemessenen Grundwasserganglinien. Sowohl der kontinuierliche Grundwasserstandsrückgang als auch die durch das Muldehochwasser hervorgerufene Grundwasserspitzen konnten mit dem Modell abgebildet werden.





**Abbildung 17: Berechnete und gemessene Grundwasserstandsganglinien**

Die identifizierten entwässerbaren Porositäten liegen zwischen 0,005 und 0,1 % was wiederum ein Ausdruck für gespannte / teilgespannte Grundwasserverhältnisse ist.

## 8 Prognoserechnungen

### 8.1 Referenzhochwasser

Ziel der Prognoserechnungen ist es, die maximalen Grundwasserstände bzw. minimalen Flurabstände innerhalb der Ortschaft Gruna auszuweisen, um daraus das Vernässungsrisiko und ggf. die Notwendigkeit von Binnenentwässerungsmaßnahmen ableiten zu können. Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe des geohydraulischen Simulationsmodells unter Verwendung eines Referenzhochwassers der Mulde.

Das verwendete Referenzhochwasser der Mulde basiert auf einer zweidimensionalen hydraulischen Wasserspiegellagenberechnung für ein  $HQ_{100}$  – Ereignis /4/. Die Wasserlagenberechnungen berücksichtigen des Weiteren eine Extremsituation, hervorgerufen durch einen Bruch des Deiches an drei verschiedenen Stellen in der Nähe von Mörtitz. Dieser erfolgt unmittelbar nach der ersten Deichüberströmung, kurz vor dem Hochwasserscheitel. Die Folge ist eine Überflutung des Hinterlandes. Die Ortschaft Gruna wird zum Zeitpunkt des Scheiteldurchganges nur durch den Ringdeich vor einer Überflutung geschützt (Insellage).

Das Referenzhochwasser geht von einem typischen sommerlichen **Scheitelhochwasser** mit einem sehr schnellen Wasserstandsanstieg und einem langsameren Abfall aus. Ausgehend von einem bereits erhöhten Wasserstand der Mulde von ca. 92,8 mNHN im Bereich der Ortschaft Gruna erfolgt der Anstieg des Wasserspiegels mit einer mittleren Anstiegsgeschwindigkeit von ca. 130 cm/h. Nach Erreichen des Scheitels mit einer Scheitelhöhe von 96,25 mNHN erfolgt ein Wasserandrückgang mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 cm/h vor und ca. 2 cm/h hinter dem überfluteten Deich (siehe Abb. 18).

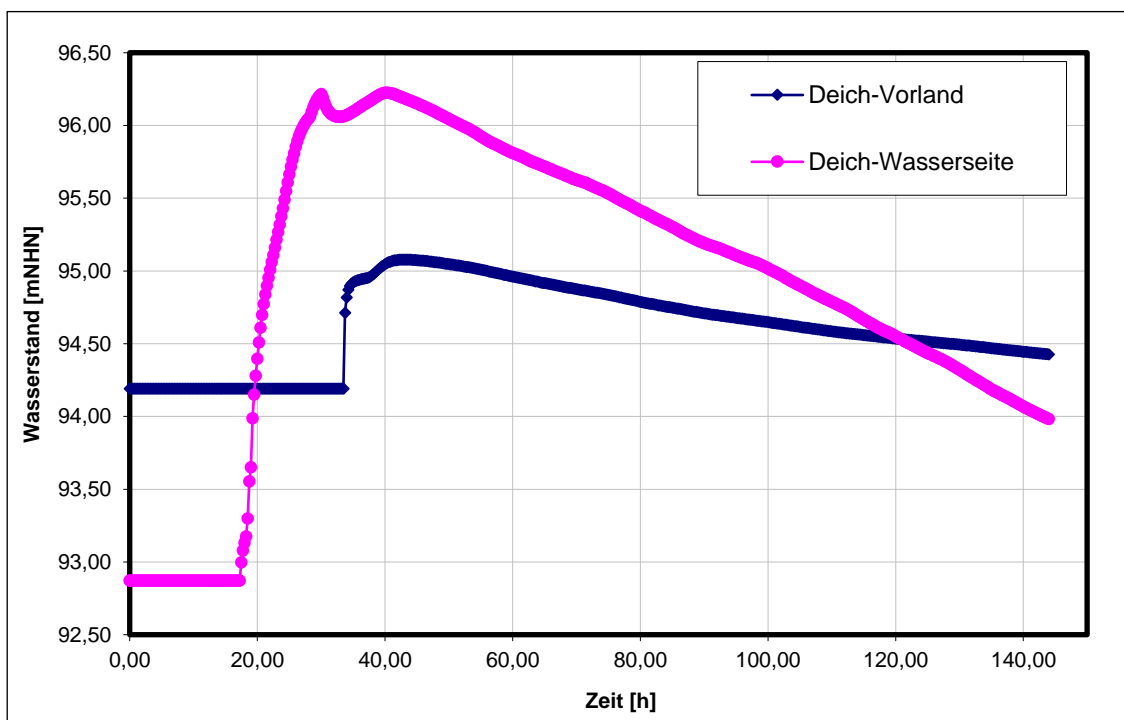


Abbildung 18: Zeitliche Entwicklung der Wasserstände der Mulde im Bereich der Südseite des Ringdeiches von Gruna (Referenzhochwasser)

Die modelltechnische Implementierung der zeitlich variablen Überschwemmungsflächen und Wasserspiegelnhöhen wurde als Stufenfunktion mit einer zeitlichen Diskretisierung von 2 h approximiert. Für das ange-setzte Scheitelhochwasser ergaben sich daraus 150 Zeitschritte bzw. Stressperioden.

Die Wasserstände für den Ziegelgraben lieferte in erster Näherung das digitale Geländemodell in Verbin-dung mit Wasserspiegelnhöhenangaben der TK10. Gewisse Ungenauigkeiten in den Wasserspiegelnhöhen des Grabens konnten hingenommen werden, da sich diese nicht signifikant auf das Modellergebnis aus-wirken. Während eines extremen Hochwassers der Mulde ist fast der gesamte Ziegelgraben über-schwemmt und somit hydraulisch inaktiv.

## 8.2 Ringdeichlage

Der Planzustand berücksichtigt den Ringdeichverlauf gemäß der Vorzugsvariante aus der Vorplanung /2/. Die Ostseite des Deiches verläuft entlang des Bestandes. Nur auf einem kleineren südlichen Teilabschnitt wird der historische Verlauf aus hydraulischen Gründen begradigt.

Die Westseite des Deiches bindet im Süden und Norden an den bestehenden Deich an, so dass ein kom-pletter Ringdeich die Wohnbebauung der Ortslage umschließt.

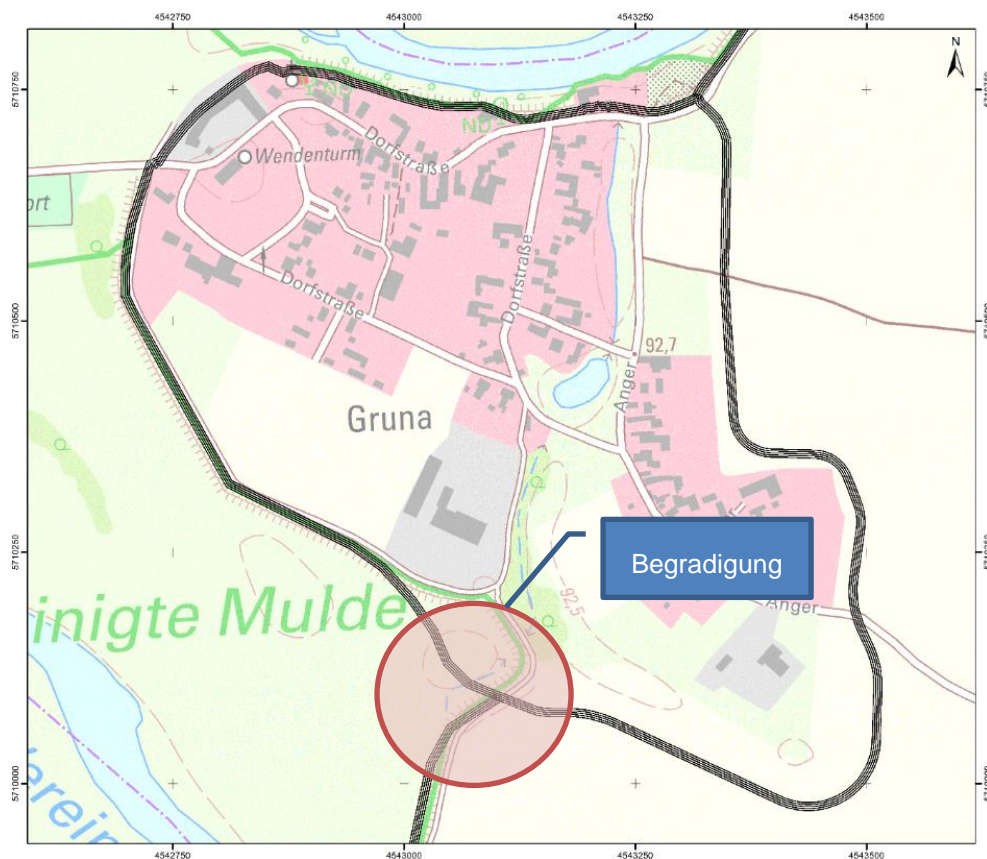


Abbildung 19: Deichverlauf im Modell

### 8.3 Leakagefaktor der Überschwemmungsflächen

Sowohl die maximalen Grundwasserstände als auch die Uferfiltratmengen, die während eines Hochwasserereignisses der Mulde in den Grundwasserleiter infiltrieren, sind neben den hydrogeologischen Parametern wie Durchlässigkeit und Speicherkoeffizient des Grundwasserleiters auch von der Dauer des Hochwassers, von der Scheitelhöhe, von der Anstiegsgeschwindigkeit des Hochwassers sowie vom Ausgangsgrundwasserstand abhängig. Neben diesen Einflussfaktoren besitzt jedoch auch der Leakagekoeffizient, welcher den hydraulischen Kontakt zwischen Überschwemmungsfläche und Grundwasser beschreibt, einen entscheidenden Einfluss. Der Leakagekoeffizient der Überschwemmungsfläche  $C_{\bar{U}}$  berechnet sich wie folgt:

$$C_{\bar{U}} = k_{f\bar{U}} / M$$

$C_{\bar{U}}$  – Leakagekoeffizient der Überschwemmungsfläche [1/s]

$k_{f\bar{U}}$  – hydraulische Durchlässigkeit der Überschwemmungsfläche [m/s]

$M$  – Mächtigkeit der Infiltrationsstrecke [m]

Die mittlere hydraulische Durchlässigkeit der Überschwemmungsfläche leitet sich aus den Durchlässigkeiten ( $k_f$ -Werten) ab, die aus den Siebkennlinien des anstehenden Auelehms gewonnen wurden. Mit einem durchschnittlichem Wert von  $1,7e-6$  m/s liegt die hydraulische Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert) in der für Lehm typischen Größenordnung. Als mittlere Auelehm-Mächtigkeit wurde 1,6 m gewählt.

**Tabelle 8-1:  $k_f$ -Werte aus den Siebkennlinien**

Bezeichnung	$k_f$ -Wert nach Beyer [m/s]	Teufe m
RKS 1	nicht bestimmbar	0,0-0,7
RKS 2	$2,75e-7$	0,4-1,4
RKS 3 *)	$(9,84e-6)$	$(0,0-0,8)$
RKS 4	$3,23e-7$	0,9-1,6
RKS 5	$5,96e-7$	0,0-1,0
RKS 6	$4,79e-8$	0,0-1,0
RKS 7	$4,60e-6$	0,0-1,0
RKS 8	$2,68e-6$	0,0-1,0
RKS 9	$1,49e-6$	0,0-1,5
RKS 10	$4,01e-7$	0,0-1,6
RKS 11	$5,93e-6$	1,6-2,0
RKS 12	$2,56e-7$	0,0-3,0
Mittelwert	<b><math>1,7e-6</math></b>	

\*) im Bereich der Aufschüttung, Wert nicht für die Mittelwertbildung berücksichtigt

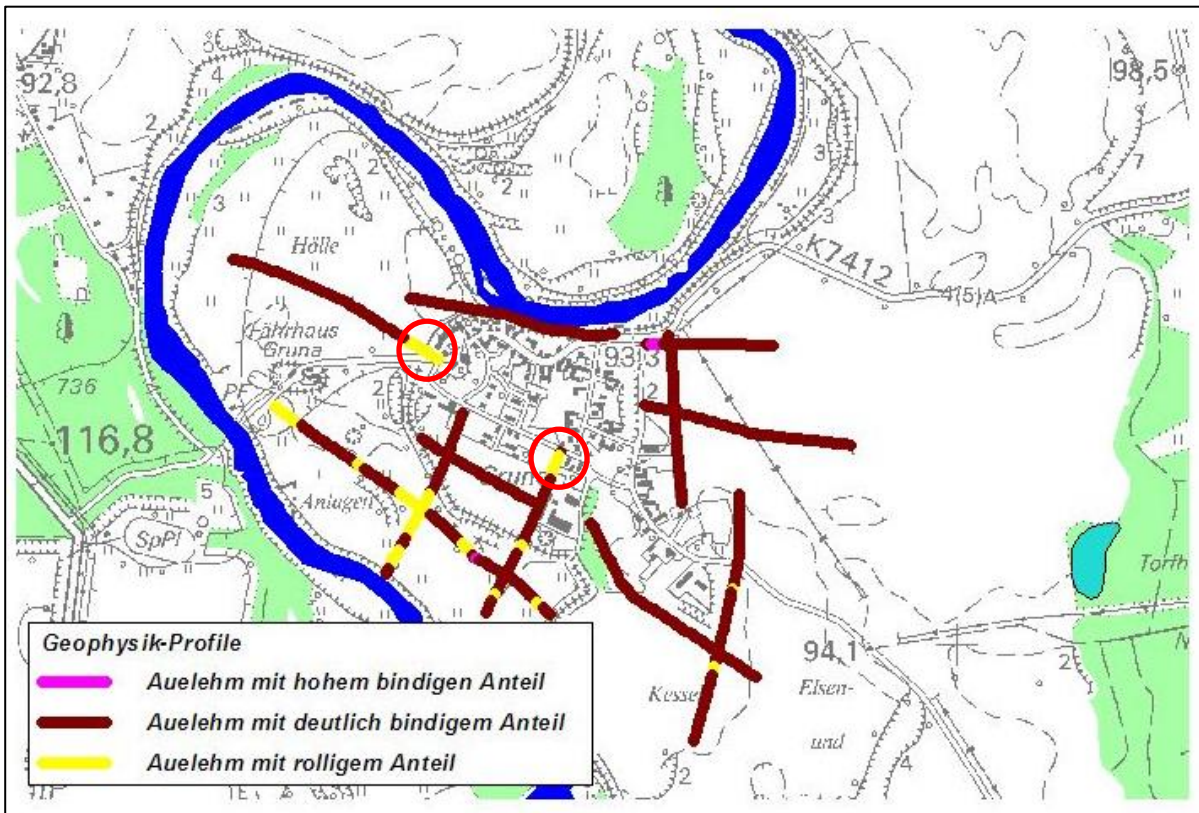
**Tabelle 8-2: Mächtigkeit des Auelehms**

Bezeichnung	Mächtigkeit Auelehm [m]
RKS 1	0,3
RKS 2	1,0
RKS 3	1,0
RKS 4	0,7
RKS 5	>2,8
RKS 6	>2,5
RKS 7	2,2
RKS 8	0,4
RKS 9	2,2
RKS 10	1,2
RKS 11	>1,0
RKS 12	>2,7
GWM 1	2,5
GWM 2	1,0
GWM 3	2,3
<b>Mittelwert</b>	<b>ca, 1,6</b>

\*) im Bereich der Aufschüttung

Anhand von geophysikalischen Untersuchungen und der Ergebnisse der Rammkernsondierungen wurde festgestellt, dass im gesamten Muldebogen Gruna vorrangig Auelehm mit deutlich bindigem Anteil ansteht. Ausnahmen sind hingegen Auelehme mit hohem bindigen Anteil oder mit rolligem Anteil.

Innerhalb des Ringdeiches wurden nur an zwei Stellen der Auelehme mit rolligem Anteil bzw. mit Fehlstellen geophysikalisch detektiert (siehe folgende Abbildung).



**Abbildung 20: Petrografische Einschätzung des Auelehms**

(rote Ringe = Auelehm mit rolligem Anteil bzw. Fehlstellen innerhalb des zukünftigen Ringdeiches)

Unter Berücksichtigung einer mittleren Mächtigkeit von ca. 1,6 m und einer mittleren hydraulischen Durchlässigkeit der Überschwemmungsfläche von  $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  ergibt sich für das Modell ein mittlerer Leakagekoeffizient von

$$C_{\bar{u}} = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}.$$

## 8.4 Grundwasserentnahme

Während eines Hochwasserereignisses der Mulde schließt sich das vorhandene Siel automatisch, so dass der vorhandene Graben nicht mehr in die Mulde entlasten kann. Die Folge sind hohe Grundwasserstände innerhalb des Ringdeiches. Unter Bezugnahme des Referenzhochwassers der Mulde können beispielsweise auf einer Fläche von fast 2/3 der geschützten Dorffläche Grundwasser-Druckspiegel (auch Piezometerhöhe oder Standrohrhöhe genannt) auftreten, die über dem Gelände liegen. Auf diesen Flächen ist die Möglichkeit einer Vernässung potentiell gegeben, wenn das Grundwasser durch den Auelehm durchsickern kann. Besonders groß ist die Wahrscheinlichkeit, wenn der Auelehm sehr rollig ausgebildet ist, d.h. gute hydraulische Durchlässigkeiten besitzt, oder wenn er gänzlich fehlt (s.g. hydraulische Fenster -siehe Ausführungen und Berechnungen in [2]).

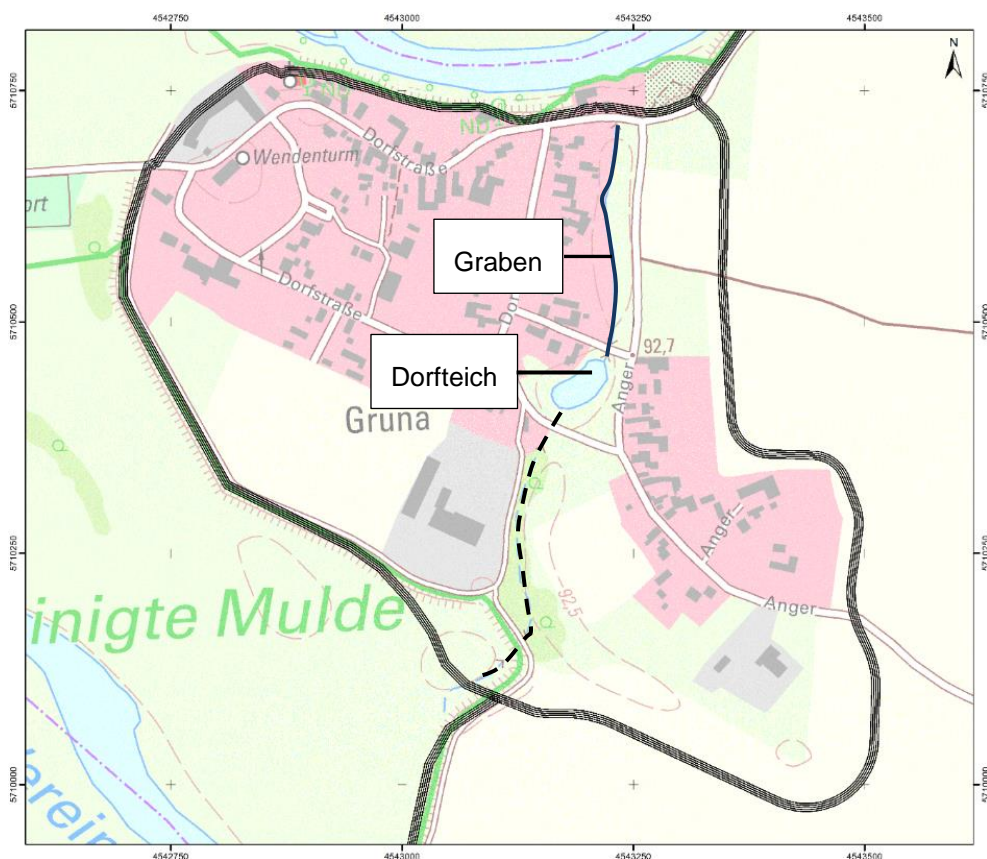
Um das Risiko von großräumigen Vernässungen zu reduzieren, wird dringend empfohlen, den vorhandenen Dorfgraben sowie den Dorfteich als Entwässerungselement zu nutzen. Dafür sollte zumindest im



Dorfteich eine feste stationäre Entnahmestelle installiert werden. Zusätzlich können entlang des Dorfgrabens einige mobile Entnahmestellen bei Bedarf während des Hochwassers der Mulde eingerichtet werden. Das Grundwasser wird durch SK- oder Schlauchleitungen geführt und über das Siel in die Mulde abgeschlagen. Der Betrieb der Anlage erfolgt durch die örtliche Feuerwehr, welche mehrere ausreichend dimensionierte Tauchpumpen und zusätzliche Leitungen/Schläuche vorhalten muss. Insgesamt sollte von einer Gesamtförderleistung während des Grundwasserpeaks von max. 65 l/s (234 m<sup>3</sup>/h) ausgegangen werden.

Bereits kleinere Hochwässer haben eine gute hydraulische Kommunikation des Grabens und des Teiches mit dem Grundwasser angezeigt. So füllte sich beispielsweise während des Hochwassers im Dezember 2012/Januar 2013 der Graben und der Bereich um den Dorfteich mit Grundwasser. Es ist deshalb zu vermuten, dass der Grabenverlauf nicht oder nur gering mit Auelehm ausgekleidet ist. Der im Gegensatz zum Graben etwas tiefer liegende Dorfteich ist ständig bzw. meist wasserführend, so dass anzunehmen ist, dass es sich dabei um eine Grundwasserblänke handelt. Wird das Grundwasser aus dem Teich abgepumpt, werden Grundwasserabsenkungen provoziert, die einem großdimensionierter Brunnen entsprechen.

Im Teich sind Grundwasserabsenkungen bis 90,5 und im Graben von 91,0 bis 91,5 mNHN möglich (entspricht in etwa den Sohllagen). Da es sich bei dieser Entnahme um eine kostengünstige und schnell zu realisierende Maßnahme handelt, wird diese Art der Grundwasserentnahme als fester Bestandteil in den Prognoserechnungen verankert.



**Abbildung 21: Lage des Entwässerungsgrabens innerhalb des Dorfkernes**





**Abbildung 22: Dorfteich mit Wasserfüllung, Juni 2018 (Grundwasserblänke)**



**Abbildung 23: Siel mit und befestigter Grabeneinlauf, Blickrichtung zur Mulde**

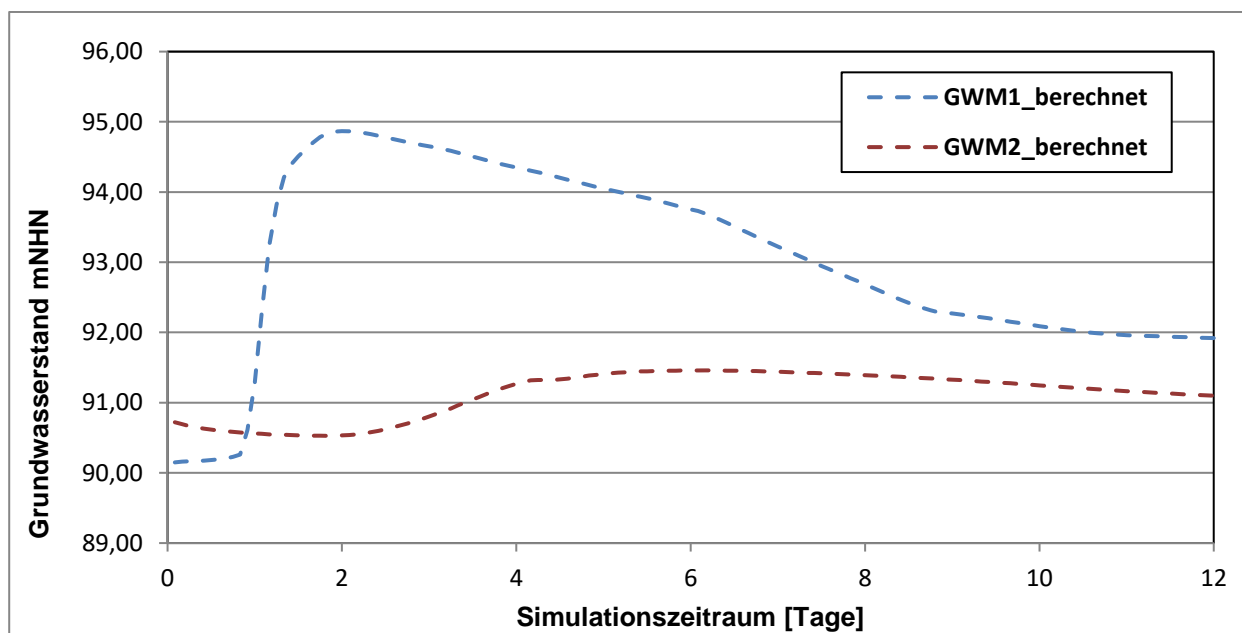


## 9 Berechnungsergebnisse

### 9.1 Maximaler Grundwasserstand

Die Berechnungsergebnisse werden als maximaler Grundwasserstand und minimaler Flurabstand diskutiert (Anlagen 12).

Die ortsabhängigen maximalen Grundwasserstände in der Ortschaft Gruna treten während eines Hochwasserereignisses nicht zeitgleich auf, sondern sind gegenüber der Wasserstandsganglinie der Mulde zeitlich phasenverschoben und gedämpft. Je weiter die Grundwassermessstelle von der Uferlinie der Mulde entfernt ist, umso größer werden die Phasenverschiebungen und Scheiteldämpfungen zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser. Beispielgebend kann dieser Effekt aus den berechneten Ganglinien der Messstellen GWM 1 und GWM 2 während des Referenzhochwassers (siehe folgende Abbildung) oder aus den gemessenen Ganglinien während des Hochwassers zur Jahreswende 2012/2013 abgeleitet werden (siehe Abb. 17). Zusätzlich zu der Scheiteldämpfung macht sich im Bereich der GWM 2 die simulierte Grundwasserentnahme aus dem Graben bzw. Dorfteich bemerkbar, der den natürlichen Grundwasserscheitel in diesem Bereich weiter reduziert.



**Abbildung 24: Berechnete Grundwasserganglinien im Bereich der Grundwassermessstellen GWM 1 und GWM 2 während des Referenzhochwassers der Mulde**

Aufgrund der sich bildenden Insellage von Gruna, strömt allseitig infiltrierendes Grundwasser in den Grundwasserleiter ein. Annähernd im Zentrum der Ortschaft bildet sich deshalb eine natürliche Potenzialsenke bzw. Grundwassersenke heraus, welche sich in Abhängigkeit von der Dauer des Hochwassers allmählich auffüllt. Überlagert wird diese natürliche Grundwassersenke durch eine weitere künstlich erzeugte Senke, welche durch die bereits erwähnte Entnahme von Grundwasser aus dem Dorfteich sowie aus dem Graben hervorgerufen wird (siehe Kap. 8.4).

Eine weitere geohydraulische Besonderheit am Standort liegt in der großen Geschwindigkeit des Grundwasseranstieges während eines Hochwasserereignisses. Liegen die Grundwasserstände noch unterhalb der Unterkante des Auelehms, wirkt die entwässerbare/bewässerbare Porosität als Speichergröße und der Grundwasseranstieg vollzieht sich relativ langsam. Sobald jedoch das Grundwasser die Unterkante der Auelehmschicht erreicht, pflanzt sich infolge der einsetzenden gespannten Grundwasserverhältnisse nur noch der hydraulische Druck fort. Als Speichergröße wirkt bei gespannten Grundwasserverhältnissen anstelle der entwässerbaren Porosität der wesentlich kleinere Speicherkoeffizient. Die Folge ist ein beschleunigter Grundwasseranstieg innerhalb des Ringdeiches.

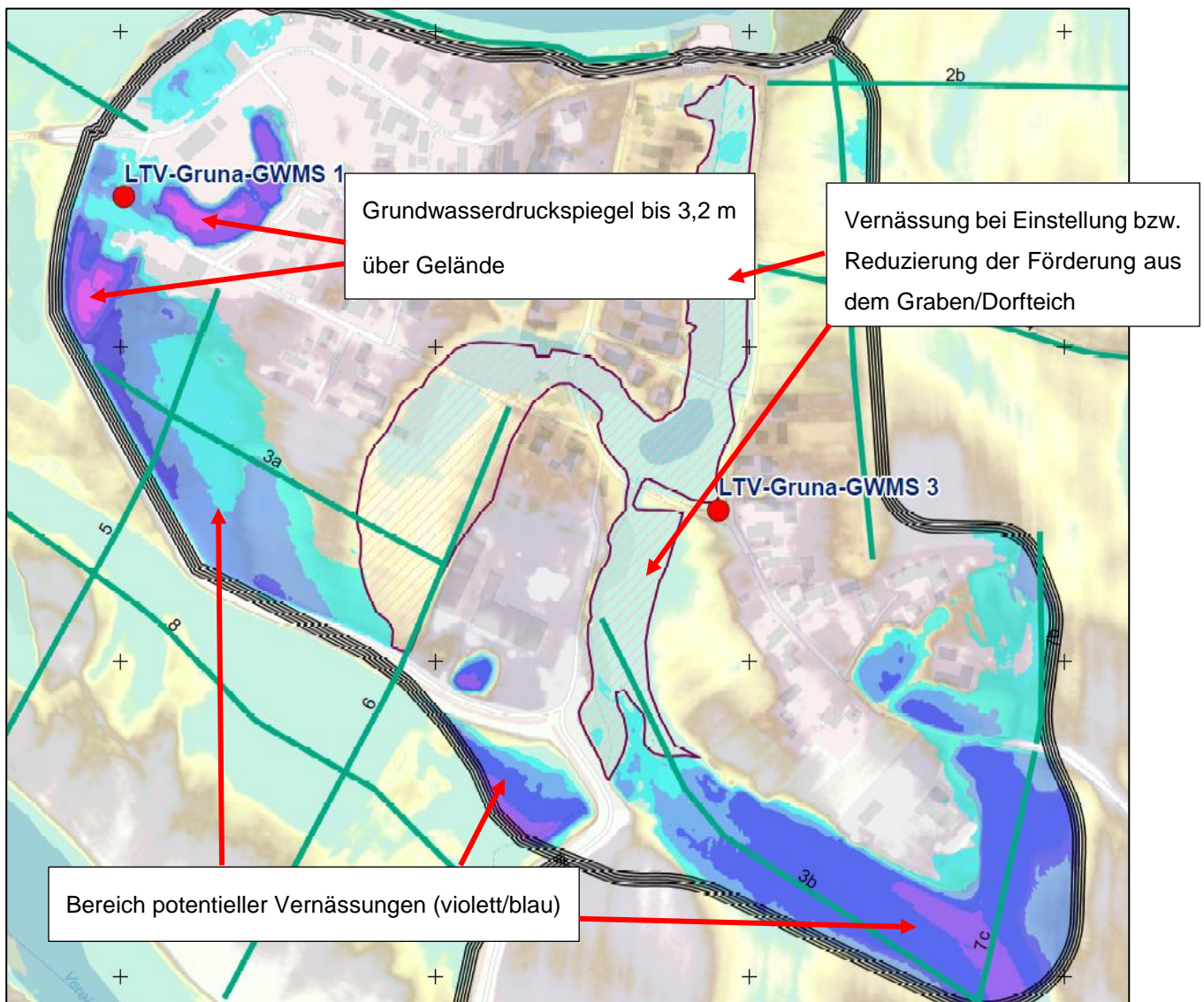
Die in der Anlage 12 dargestellten und berechneten maximalen Grundwasserstände (Druckspiegel) visualisieren auf Grund der zeitlichen Verzögerung zwischen Hochwasser- und Grundwasserwelle keine synchronen, sondern asynchrone Zustände. Wenn der Wasserspiegel der Mulde bordvoll am bestehenden Deich ansteht, treten bei dem angesetzten Hochwasserereignis innerhalb der Ortslage Gruna Grundwasserstände von ca. 91,0 bis 95,0 mNHN auf. Die höchsten Grundwasserstände innerhalb der Ortschaft sind in Nähe des Ringdeiches zu erwarten, die niedrigsten Grundwasserstände in Nähe des Teiches bzw. des Grabens. Voraussetzung ist jedoch, dass aus dem Teich und dem Graben das zuströmende Grundwasser abgepumpt und in Nähe des Siels in die Mulde abgeschlagen wird.

## 9.2 Minimale Grundwasserflurabstände und Vernässungen

Für die Ermittlung des minimalen Flurabstandes wurde das aktuelle Digitale Geländemodell (DGM 2) verwendet (siehe Anlage 12).

Die geringsten Flurabstände stellen sich während des Referenzhochwassers und bei Annahme einer Förderung aus dem Graben/Teich entlang des Ringdeiches und im Grabenbereich ein.

Oberflächenvernässungen sind dort zu erwarten, wo der berechnete maximale Grundwasser-Druckspiegel über dem Gelände ausstreicht und keine schützende Auelehmüberdeckung vorhanden ist. Dies ist auf der West- und Südseite des Ringdeiches innerhalb der Ortschaft möglich. Die größten maximalen Grundwasserdrücke über Gelände (ca. 3,2 m ü. GOK) sind innerhalb einer kleineren Erosionsrinne im Nordwesten der Ortschaft berechnet worden. Bebauungen sind von direkten Vernässungen mit wenigen Ausnahmen nicht betroffen, so dass eine separate, neu zu installierende Binnenentwässerung entfallen kann. Sollte jedoch die Entnahme aus dem Graben und dem Dorfteich während des Hochwassers reduziert oder eingestellt werden, ist eine Vernässung auch entlang der Nord-Süd verlaufenden Geländesenke und einem westlichen Seitenarm möglich. In der Nord-Süd verlaufenden Senke ist der Dorfgraben eingebettet (siehe Anlage 13 und folgende Abbildung).



**Abbildung 25: Bereiche mit potentiellen Oberflächenvernässungen während des Referenzhochwassers**

Im Gegensatz zu den Oberflächenvernässungen sind Kellernässungen auf einer größeren Dorffläche möglich. Meist ist die schützende Auelehmschicht während des Baus abgetragen und durchstochen worden, so dass aufsteigendes Grundwasser ungehemmt in die Keller eindringen kann.

Der Bereich potentieller Kellernässungen entspricht der Fläche mit einem Flurabstand  $> 2$  m (siehe Anlage 13 und Abbildung 26). Trotz der Entnahme aus dem vorhandenen Graben/Dorfteich sind sehr viele Gebäude betroffen. Nur im Zentrum der Ortschaft im Bereich von Geländehochlagen sind wenige Keller sicher vor Vernässungen. Voraussetzung ist jedoch, dass die Entnahme aus dem Graben und dem Dorfgraben während des Hochwasserereignisses veranlasst wird.

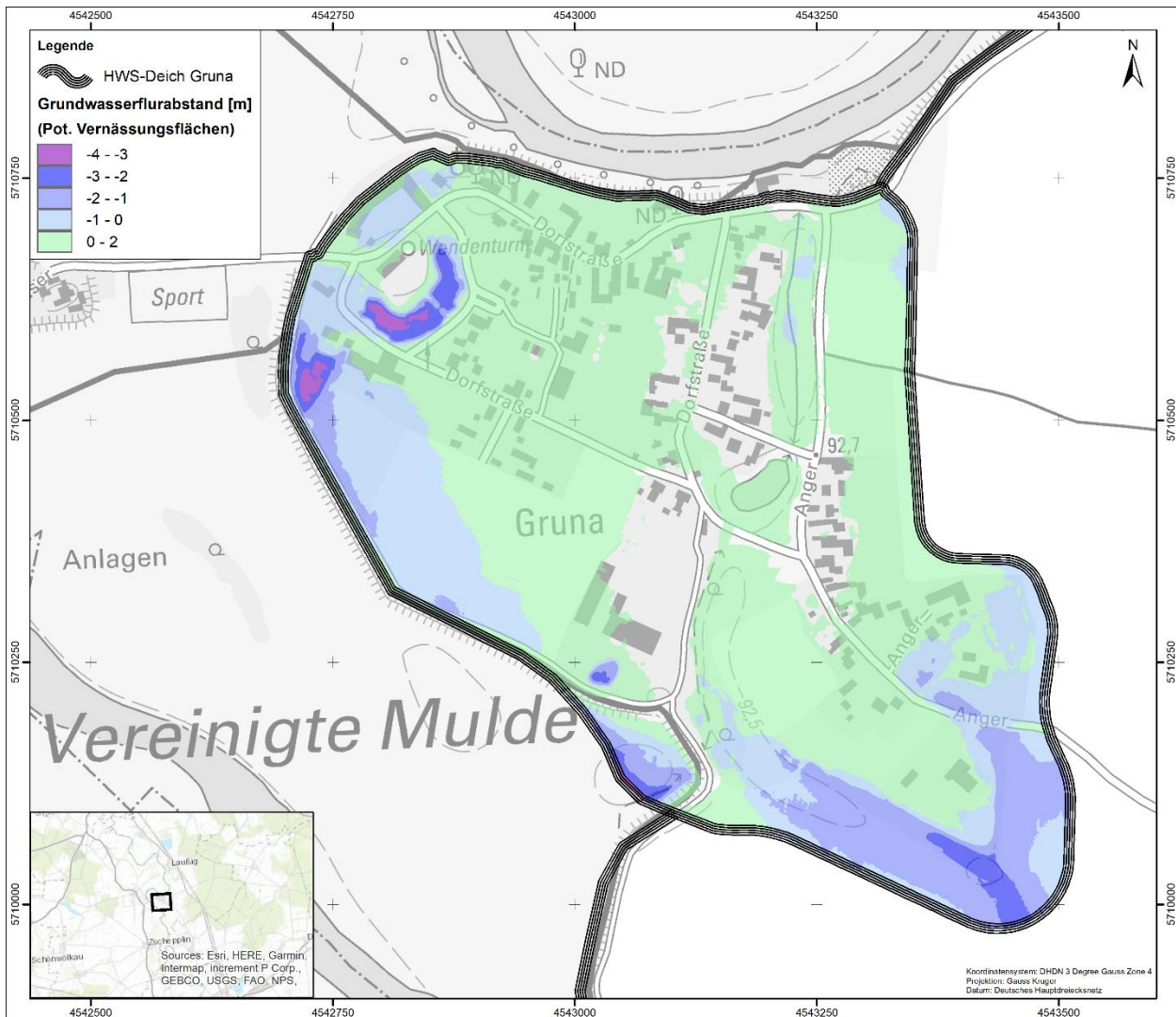


Abbildung 26: Bereiche mit potentiellen Kellervernässungen (grün)



## 10 Zusammenfassung

Im Ergebnis der bereits im Jahre 2011 begonnenen hydrogeologischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass zusätzliche Informationen zur Präzisierung der hydrogeologischen Kenntnisse sowie der Vorflutrandbedingungen erforderlich sind. Im Untersuchungsgebiet existierten weder Grund- noch Oberflächenwassermessstellen. Geologische Aufschlüsse in Form von Schichtenverzeichnissen lagen räumlich sehr unregelmäßig vor. Um Erkundungslücken zu schließen, wurden im Jahre 2012 drei Bohrungen abgeteuft und zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Die Wasserstände der Mulde sollten ebenfalls Vor-Ort kontinuierlich erfasst werden. Dafür erfolgte in Nähe der Fähre in Gruna die Installation einer Oberflächenwassermessstelle (2“-Pegelrohr). Sowohl die Grundwassermessstellen als auch die Muldemessstelle wurden mit Datenloggern ausgerüstet, um die zeitliche Reaktion des Grundwasserleiters auf ein Hochwasserereignis der Mulde feststellen zu können. Das Monitoring erfolgte im Zeitraum vom 03.04.2012 bis 11.04.2013.

Die Erkundung der Auelehmverbreitung erfolgte mit einer geophysikalischen Untersuchung (Geoelektrik) sowie durch 12 Rammkernsondierungen mit Sieb-/Schlämmanalysen zur Bestimmung der Durchlässigkeiten des Auelehms.

Die Auswertung der Messergebnisse ergab, dass ein Hochwasser der Mulde einen relativ schnellen Anstieg der Grundwasserstände im Bereich der Ortslage Gruna bewirkt. Ursachen dafür sind die guten bis sehr guten Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters, die gespannten/teilgespannten Druckverhältnisse und die Lage des Ortes in einem Muldebogen. Die Ganglinien der Grundwassermessstellen reagieren in Abhängigkeit von der Uferlinie der Mulde zeitlich verzögert und phasenverschoben zum Gang des Muldehochwassers. Je näher sich die Messstelle zur Mulde befindet, umso kürzer ist die Reaktionszeit und umso ausgeprägter ist der Grundwasserscheitel.

Zur Berechnung des Grundwasserströmungsregimes sowie der maximalen Grundwasser- bzw. minimalen Flurabstände wurde ein zweidimensionales Grundwasserströmungsmodell aufgebaut und anhand der gemessenen Grundwasserganglinien der neuen Messstellen kalibriert. Um die Sohllagen der Spundwände hinreichend genau abbilden zu können, musste das 2D- in ein 3D-Modell überführt werden. Nach erfolgreicher instationärer Kalibrierung erfolgten unter Verwendung eines Referenzhochwassers der Mulde die Prognoserechnungen. Das verwendete Referenzhochwasser der Mulde basiert auf einer zweidimensionalen hydraulischen Wasserspiegellagenberechnung für ein HQ(100) des Planzustandes. Der Planzustand bildet einen Bruch des Deiches an drei verschiedenen Stellen in der Nähe von Mörtitz nach.

Die Modellrechnungen wiesen nach, dass auf der West- und Südseite des Ringdeiches innerhalb der Ortschaft der Grundwasser-Druckspiegel (auch Piezometerhöhe oder Standrohrhöhe genannt) über dem Gelände ausstreichen kann. In diesem Bereich sind Oberflächenvernässungen möglich, wenn keine schützende Auelehmüberdeckung vorhanden ist. Bebauungen sind von potentiellen Vernässungen mit wenigen Ausnahmen nicht betroffen, so dass eine separate neu zu installierende Binnenentwässerung entfallen kann. Alle Berechnungen gehen von einer temporären Grundwasserentnahme aus dem vorhandenen Graben und Dorfteich während eines Hochwasserereignisses aus (max. Förderrate 65 l/s). Diese kann schnell und mit einem verhältnismäßig geringen Aufwand von der örtlichen Feuerwehr installiert werden. Der Abschlag des geförderten Grundwassers erfolgt über das Siel in die Mulde.

## **11 Literatur- und Quellenverzeichnis**

- [1] Erstellung Grundwassermodell „Ringdeich Gruna“; Datenrecherche/ Defizitanalyse/Monitoringkonzept; 1. Zwischenbericht. Fugro Consult GmbH, November 2011
- [2] Erstellung Grundwassermodell „Ringdeich Gruna“; Erkundungsarbeiten und Modellprognosen: 2. Zwischenbericht. Fugro Consult GmbH, März 2012
- [3] Vereinigte Mulde, rechts, östlicher Ringschlussdeich Gruna-Grundwassermodellierung; 3.Zwischenbericht: Auswertung Monitoring und instationäre Modellberechnungen. Fugro Consult GmbH, 27.05.2013