



# Masterarbeit

## Hydrogeologische Detailuntersuchung der Grundwassersituation/-entwicklung im Elbe-Saale-Winkel

Verfasser: Jan Ohme

20072314

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. habil. Frido Reinstorf

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Böttge

Magdeburg, 01.08.2013

## Aufgabenstellung

Große Teile Sachsen-Anhalts sind in den letzten Jahren von Veränderungen des Landschaftswasserhaushaltes betroffen. Die Ursachen sind vielfältig und betreffen anthropogene Einflüsse, wie die Außerbetriebnahme von Wasserhaltungen und Wasserfassungen, die Flutung von Tagebaurestseen aber auch natürliche Witterungsbedingungen, wie erhöhte Niederschläge. Dies führte zu stetig steigenden Grundwasserständen, welche insbesondere in urbanen Gebieten oftmals Vernässungserscheinungen in Kellern bedingen.

In der Umgebung der Stadt Schönebeck (Elbe), dem so genannten Elbe-Saale-Winkel (ESW), liegen die Stadt Calbe (Saale), Barby und die Gemeinde Bördeland. Diese sollen in das bereits erarbeitete Grundwassermanagementkonzept für die Stadt Schönebeck (Elbe) eingegliedert werden. Dabei soll geprüft werden, welche Maßnahmen zum GW-Management im ESW erforderlich sind und wie diese in das Entwässerungskonzept der Stadt Schönebeck (Elbe) integriert werden können.

Dazu soll in der Masterarbeit untersucht werden, welche Entwässerungsmaßnahmen im südöstlichen Bereich des ESW sinnvoll sind und es soll quantifiziert werden, inwiefern sich der Einfluss der dortigen Kiesseen auf die GW-Stände auswirkt. Im Rahmen dieser Masterarbeit soll dazu mit Hilfe des vorliegenden GW-Modells des südöstlichen ESW auf der Basis bereits vorliegender Recherchen und Datenerhebungen eine Detailauswertung inkl. Szenarienberechnung zur Ermittlung eines teilflächenbezogenen Zielgrundwasserstandes erfolgen. Tendenzen der Grundwasserstandsentwicklung bei unterschiedlichen Seewasserständen und die Auswirkungen auf die Flächennutzungsplanungen der Kommunen sollen aufgezeigt werden.

**Arbeitsschritte:**

- Konkrete hydrogeologische Betrachtung der bereits ermittelten Prioritätsgebiete im südöstlichen Teil des Elbe-Saale-Winkels (ESW) (Auswertung Schichtenverzeichnisse; Bewertung der GW-Verhältnisse)
- Darstellung (inkl. Lageplan) der Grundwassersituation (Grundwasserstände, Grundwasserdifferenzen) im ESW unter Auswertung der Daten
- Ermittlung eines verträglichen Zielwertes der Grundwasserstände bezogen auf die Prioritätsgebiete (inkl. Lageplan)
- Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Seewasserstände auf die GW-Situation
- Ableitung von Tendenzen der Grundwasserentwicklung mit Festsetzung von Prioritätsgebieten unter Berücksichtigung der Flächennutzungsplanungen der Kommunen
- Ermittlung einer Übersicht über die Verteilung der maximalen GW-Stände im ESW
- Ableitung eines Entwässerungskonzeptes für den südöstlichen ESW
- Abgleich der Ergebnisse mit der Flächennutzungsplanung unter Ausweisung von Konsequenzen (z.B. Ausweisung von Bauvorgaben)

## Abstract

In spring 2011 the levels of groundwater have been culminated at the location “Elbe-Saale-Winkel” in the federal state of Saxony-Anhalt/Germany. This aspect maintained water logging in local agricultural areas as well as causes basement wetness in urban areas (*Reinstorf & Kramer, 2013*). This master thesis „Hydrogeologische Detailuntersuchung der Grundwassersituation/-entwicklung im Elbe-Saale-Winkel“ (Hydrogeological detailed research of groundwater situation/- development at the Elbe-Saale-Winkel) investigate how far the local gravel pits are able to relief the groundwater situation in the south-eastern part of the Elbe-Saale-Winkel, which belongs to the community of Stadt Barby. In this connection this work based on a groundwater model as well as on a hydrodynamic model. By using both models scenarios were generated, where an investigation and relaxation of the groundwater situation should be realized. It may be evidence that a relaxation of the groundwater situation by drain the gravel pits in free gradient is just partly possible. In the district Tornitz an adequate relaxation of the groundwater situation can be realized. Also in most parts of the district of Barby (Elbe) initiates this method a downwelling of the groundwater level. On the other hand there are just marginal chances of the groundwater situation in other districts. To sum up, this work shows that the drain of gravel pits in free gradient can be used just as a partial solution and should be implemented in addition with other techniques.

## Abstract

Im Frühjahr 2011 erreichten im Elbe-Saale-Winkel im Bundesland Sachsen-Anhalt die Grundwasserstände Höchststände. Dies führte in der dortigen Region verstärkt zu Vernässungserscheinungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen sowie verbreitet zu Kellervernässungen in urbanen Gebieten (*Reinstorf & Kramer, 2013*). Die Masterarbeit „Hydrogeologische Detailuntersuchung der Grundwassersituation/-entwicklung im Elbe-Saale-Winkel“ befasst sich mit der Untersuchung, inwieweit die dortigen Kiesseen zu einer Entspannung der Grundwassersituation im südöstlichen Teil des Elbe-Saale-Winkels, welcher die Einheitsgemeinde Stadt Barby umfasst, beitragen können. Hierbei stützt sich die Arbeit sowohl auf ein Grundwassermodell als auch auf ein hydrodynamisches Modell. Unter Verwendung der beiden Modelle werden Szenarien erstellt, mit denen die Grundwassersituation sowohl untersucht als auch entspannt werden soll. Es kann nachgewiesen werden, dass eine Entspannung der Grundwassersituation in diesem Gebiet über eine Entwässerung der Kiesseen im freien Gefälle nur bedingt erfolgt. Im Ortsteil Tornitz kann eine ausreichende Entspannung der Grundwassersituation erzeugt werden. Auch im Ortsteil Barby (Elbe) führt das Verfahren in weiten Teilen zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels. In anderen Ortsteilen hingegen wird eine geringe Beeinflussung der Grundwassersituation erzeugt. Somit ist zu sagen, dass das Verfahren der Seeentwässerung im freien Gefälle nur als Teillösung angesehen werden kann und in Verbindung mit anderen Maßnahmen anzuwenden ist.

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst habe. Es wurden keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die wörtlichen oder sinngemäß übernommenen Zitate habe ich als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Vorgehensweise.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>3</b>
2.1	Verwendete Geodaten.....	3
2.2	Gebietsbeschreibung.....	3
2.2.1	Geografie .....	3
2.2.2	Klima und Wasserhaushalt .....	5
2.2.3	Geologie.....	6
2.2.4	Hydrogeologie .....	7
2.2.5	Flächennutzung.....	8
2.2.6	Fließgewässer .....	10
2.2.7	Standgewässer.....	11
2.3	Modellgrundlage.....	11
2.4	Grundwassermodell .....	12
2.4.1	Mathematische Grundlagen .....	13
2.4.2	Anfangsbedingung .....	15
2.4.3	Randbedingungen .....	15
2.4.4	Postprocessing des Grundwassermodells .....	19
2.5	Hydrodynamisches Modell.....	23
2.5.1	Mathematische Grundlagen .....	23
2.5.2	Preprocessing des hydrodynamischen Modells .....	25
2.5.3	Durchflussermittlung .....	27
<b>3</b>	<b>Sensitivitätsanalyse des Grundwassermodells .....</b>	<b>28</b>
3.1	Betrachtung des Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ .....	29
3.2	Betrachtung des effektiven Porenanteils $n_{peff}$ .....	31
3.3	Betrachtung der Randbedingungen.....	32
3.4	Evaluierung der Sensitivitätsanalyse .....	35
<b>4</b>	<b>Analyse des Basiszustandes.....</b>	<b>37</b>
4.1	Modellierung des Zielgrundwasserstandes.....	38
4.2	Abweichungen vom Zielgrundwasserstand im Modellgebiet .....	40
4.3	Ermittlung der Prioritätsflächen .....	42
<b>5</b>	<b>Analyse der Standgewässer.....</b>	<b>44</b>
5.1	Einfluss des Wasserstandes auf die Grundwassersituation .....	44
5.1.1	Analyse des „Kiessees Barby I“ .....	45

5.1.2	Analyse des „Kiessee Barby II“ .....	49
5.1.3	Analyse des „Kiessees Tornitz“ .....	52
5.1.4	Analyse des „Großen Sees“ .....	54
5.1.5	Analyse der „Schachtteiche“ .....	56
5.2	Einfluss der Kiessee-Erweiterung auf die Grundwassersituation.....	58
5.2.1	Erweiterungsszenario I .....	59
5.2.2	Erweiterungsszenario II .....	62
<b>6</b>	<b>Entwässerungskonzept .....</b>	<b>66</b>
6.1	Entwässerungsszenario I - Kiessee Barby I.....	66
6.2	Entwässerungsszenario II - Kiessee Barby II .....	72
6.3	Entwässerungsszenario III - Kiessee Tornitz .....	77
6.4	Entwässerungsszenario IV – Kombination „Kiessee Barby I“ und „Kiessee Barby II“ .....	81
6.5	Geometrische Informationen der Entwässerungsgräben .....	82
6.6	Evaluierung der Prioritätsflächen .....	84
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>89</b>
7.1	Zusammenfassung .....	89
7.2	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	93
<b>8</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>98</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Modellgebietsübersicht .....	4
Abbildung 2-2: Flächennutzung Flächendarstellung.....	8
Abbildung 2-3: Flächennutzung .....	9
Abbildung 2-4: Datenflussschema .....	11
Abbildung 2-5: FEFLOW-Netz mit Randbedingungsknoten der ersten und dritten Art, Quelle: FE-Modell zur Grundwassermodellierung / DHI Wasy.....	16
Abbildung 2-6: Schematik der <i>Cauchy</i> -Bedingung am Beispiel eines Flusses ( <i>DHI-WASY</i> , 2013).....	19
Abbildung 2-7: Modell FEFLOW-Export zu Grid.....	20
Abbildung 2-8: Differenzenmodell .....	22
Abbildung 2-9: Energielinienverteilung nach <i>Bernoulli</i> .....	24
Abbildung 3-1-A: $k_f$ -Wertverteilung im Layer 1 des Modellgebietes, -B: $k_f$ -Wertverteilung im Layer 2 des Modellgebietes.....	29
Abbildung 3-2: FEFLOW-Netz mit selektierten Randbedingungen der ersten und dritten Art .....	33
Abbildung 4-1: Modellierter Grundwasserspiegel der Basisvariante mit Isohypsen.....	37
Abbildung 4-2: Beispiel Zielgrundwasserflur am Solgraben , -A: Lage des Profils, -B: Flurprofil.....	39
Abbildung 4-3: Abweichung vom Zielgrundwasserstand.....	41
Abbildung 4-4-A: Prioritätsflächen, -B: Grundwassergefährdete urbane Flächen.....	42
Abbildung 5-1: Beispiel Wasserstände in einem Seen.....	44
Abbildung 5-2-A: Senkung Wasserspiegel Kiessee Barby I, -B: Erhöhung Wasserspiegel Kiessee Barby I.....	47
Abbildung 5-3: extreme Senkung des Wasserspiegels des Kiessee Barby I.....	49
Abbildung 5-4-A: Senkung Wasserspiegel Kiessee Barby II, -B: Erhöhung Wasserspiegel Kiessee Barby II .....	51
Abbildung 5-5-A: Senkung Wasserspiegel Kiessee Tornitz, -B: Erhöhung Wasserspiegel Kiessee Tornitz.....	53
Abbildung 5-6-A: Senkung Wasserspiegel Großer See, -B: Erhöhung Wasserspiegel Großer See .....	55
Abbildung 5-7-A: Senkung Wasserspiegel Schachtteiche, -B: Erhöhung Wasserspiegel Schachtteiche.....	57
Abbildung 5-8: Bergbauberechtigungen im Modellbereich nach Planungsgemeinschaft PL3 ( <i>Planungsgemeinschaft PL3</i> , 2003).....	58
Abbildung 5-9: Kiessee-Erweiterungsszenario I.....	61
Abbildung 5-10: Kiessee-Erweiterungsszenario II .....	65

Abbildung 6-1: Entwässerungsszenario I - Kiese Barby I.....	67
Abbildung 6-2: Kritisches Profil 5+900 des Entwässerungsszenario I.....	70
Abbildung 6-3: Kritisches Profil 6+300 des Entwässerungsszenario I.....	71
Abbildung 6-4: Entwässerungsszenario II - Kiese Barby II .....	73
Abbildung 6-5: Kritisches Profil 0+800 des Entwässerungsszenario II.....	75
Abbildung 6-6: Entwässerungsszenario III - Kiese Tornitz.....	77
Abbildung 6-7: Kritisches Profil 0+800 des Entwässerungsszenario III .....	80
Abbildung 6-8: Entwässerungsszenario IV – Kombination „Kiese Barby I“ und „Kiese Barby II“ .....	82
Abbildung 6-9: Querprofil der Entwässerungsgräben.....	83
Abbildung 6-10: Auswirkung des Entwässerungsszenario IV auf die Prioritätsfläche Barby (Elbe), [Diagramm] .....	86
Abbildung 6-11: Auswirkung des Entwässerungsszenario III auf die Prioritätsfläche Tornitz-Werkleitz [Diagramm].....	86

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Klimadaten der Station Magdeburg (WEWA), Zeitreihe: 1981 - 2010.....	5
Tabelle 2-2: Wasserhaushaltsdaten für den Modellbereich.....	6
Tabelle 2-3: Flächennutzung .....	9
Tabelle 2-4: Mittlerer Abfluss und mittlerer Hochwasserabfluss für Elbe und Saale.....	10
Tabelle 3-1: Theoretische Sensitivitätskategorien.....	28
Tabelle 3-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der $k_f$ -Werte .....	30
Tabelle 3-3: Effektiver Porenanteil nach Busch/Luckner ( <i>Höling &amp; Coldewey, 2009</i> ).....	31
Tabelle 3-4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des $n_{peff}$ .....	32
Tabelle 3-5: Sensitivitätsprüfung der Randbedingungen ersten Art im Modellbereich.....	34
Tabelle 3-6: Sensitivitätsprüfung der Randbedingungen dritter Art im Modellbereich.....	35
Tabelle 3-7: errechnete Sensitivitätskategorien.....	35
Tabelle 5-1: Wasserstände „Kiessee Barby I“ .....	46
Tabelle 5-2: Wasserstände „Kiessee Barby II“ .....	50
Tabelle 5-3: Wasserstände „Kiessee Tornitz“ .....	52
Tabelle 5-4: Wasserstände „Großer See“ .....	54
Tabelle 5-5: Wasserstände „Schachtteiche“ .....	56
Tabelle 5-6: Feldzuweisung der Kieseeseenarien.....	59
Tabelle 5-7: Kiessee-Erweiterungsszenario I.....	60
Tabelle 5-8: Kiessee-Erweiterungsszenario II.....	63
Tabelle 6-1: Entwässerungsszenario I – Kiessee Barby I.....	68
Tabelle 6-2: Randwerte des hydrodynamischen Modell für das Entwässerungsszenario I ....	69
Tabelle 6-3: Entwässerungsszenario II - Kiessee Barby II.....	74
Tabelle 6-4: Randwerte des hydrodynamischen Modell für das Entwässerungsszenario II ....	74
Tabelle 6-5: Entwässerungsszenario III - Kiessee Tornitz.....	78
Tabelle 6-6: Randwerte des hydrodynamischen Modell für das Entwässerungsszenario III...	79
Tabelle 6-7: Kennwerte der Entwässerungsgräben .....	84
Tabelle 7-1: Ergebnisübersicht der Wasserstands- und Kieseeseerweiterungsszenarien .....	91
Tabelle 7-2: Bewertung der Entwässerungsszenarien auf Basis der Prioritätsflächen.....	93

## Abkürzungsverzeichnis

Amtliches topografisches Karteninformationssystem	ATKIS
Digitales Geländemodell mit Messpunktabstand von 1 m x 1 m	DGM1
Digitales Geländemodell mit Messpunktabstand von 10 m x 10 m	DGM10
Digitales Landschaftsmodell	DLM
Digitales Oberflächenmodell	DOM
Digital Terrain Model	DTM
Elbe-Saale-Winkel	ESW
Finite Elemente	FE
Geografisches Informationssystem	GIS
Geländeoberkante	GOK
Höchstes gemessenes Hochwasser	HHW
Pegelnullpunkt	PNP
Mittleres Hochwasser	MHQ
Mittelwasser	MQ
Normalhöhennull	NHN
Niedrigstes gemessenes Niedrigwasser	NNW
Trianguliertes Irreguläres Netzwerk	TIN
Topografische Karte im Maßstab 1:10000	TK10
Zielgrundwasserstand	ZGWS

# 1 Einleitung und Vorgehensweise

Bauwerksschäden durch hohe Grundwasserstände sind in vielen Niederungsgebieten Deutschlands in den 1990er und 2000er Jahren während des Auftretens nasser Witterungsperioden bekannt geworden. Beispiele für Vernässungen und Probleme mit ansteigenden Grundwasserständen sind in Deutschland vielerorts bekannt. Für das Stadtgebiet Korschenbroich im Rhein-Kreis Neuss werden seit dem Dezember 2011 Maßnahmen zur Kappung von Grundwasserspitzen betrieben. Auch im Hessischen Ried ist mit schwankenden Grundwasserständen zu rechnen. Grund hierfür ist, dass das ursprünglich sumpfige Gebiet seit den 1960er Jahren einer Grundwasserförderung unterliegt. So wurden in Trockenphasen nach 1960 Bauprojekte ohne einen Schutz gegen das ansteigende Grundwasser realisiert. Hohe Niederschlagsereignisse sorgen in dem Gebiet bis heute auch für hohe Grundwasserstände. So hat das Hessische Ried zwischen Vernässung und Trockenheit zu kämpfen. (*BUND-Hessen, 2011*).

Auch große Teile Sachsen-Anhalts sind von Veränderungen des regionalen Landschaftswasserhaushaltes betroffen. Neben den natürlichen Witterungsbedingungen, wie überdurchschnittliche Niederschläge und schneereiche Winter sowie extreme Wasserstände der Elbe und Saale, haben auch anthropogene Einflüsse wie die Außerbetriebnahme von Wasserfassungen und die Flutung von Tagebaurestseen Auswirkung auf die Grundwasserstände. Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit umfasst den Elbe-Saale-Winkel mit den darin gelegenen Städten Schönebeck (Elbe) und Teile von Calbe (Saale) sowie der Einheitsgemeinde Stadt Barby. Im Frühjahr 2011 erreichten die Grundwasserstände Höchststände. Dies führte verstärkt zu Vernässungserscheinungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen sowie verbreitet zu Kellervernässungen in urbanen Gebieten (*Reinstorf & Kramer, 2013*).

Im Rahmen der Master-Thesis soll untersucht werden, ob Entwässerungsmaßnahmen der Standgewässer im südöstlichen Bereich des Elbe-Saale-Winkels sinnvoll sind. Zudem soll quantifiziert werden, inwiefern sich die Entwässerungsmaßnahmen auf die Grundwassersituation in den umliegenden Gebieten auswirken. Unter Verwendung eines bereits bestehenden Grundwassermodells für den Elbe-Saale-Winkel sowie vorliegender Recherchen und Datenerhebungen ist eine Detailauswertung inkl. Szenarienberechnung

anzufertigen. Zudem sind Tendenzen der Grundwasserentwicklung bei unterschiedlichen Seewasserständen unter Verwendung eines teilflächenbezogenen Zielgrundwasserstandes anzufertigen. Auch sollen Auswirkungen auf die Flächennutzungsplanung der Kommunen aufgezeigt werden. Weiterhin ist die Etablierung eines hydrodynamischen Modells, welches die Beschreibung der Entwässerungsmaßnahmen unterstützen soll, Ziel dieser Arbeit. Dieses Modell soll sowohl eine Ermittlung als auch eine Darstellung von Entwässerungsabflüssen im Grabensystem des Gebietes realisieren. Auch soll über dieses Modell eine flächendeckende Erstellung von Querprofilen im Modellgebiet ermöglicht werden.

Um diese Punkte umsetzen zu können, wird die folgende Vorgehensweise angesetzt. Im Kapitel 2 erfolgt einführend eine umfassende Gebietsbeschreibung. Zudem wird in dem Kapitel 2 das anzuwendende Modell beschrieben. Auch werden die mathematischen Grundlagen sowohl des Grundwassermodells als auch des hydrodynamischen Modells erläutert. Ein weiterer Punkt, welcher in Kapitel 2 behandelt wird, ist die Schnittstellenproblematik zwischen den verwendeten Teilmodellen.

Im Kapitel 3 wird das Thema Sensitivitätsanalyse untersucht. Hierbei wird ein Verfahren entwickelt, mit dem abgeschätzt werden kann, wie der Einfluss der Variation einzelner oder mehrerer Eingangsgrößen auf das Simulationsergebnis des Grundwassermodells einwirken. Somit dient die Sensitivitätsanalyse dazu, Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen von Modellrechnungen und den Zielwerten zu identifizieren.

Die Analyse der zugrundeliegenden Basisvariante erfolgt dann im Kapitel 4. Hier wird ein Zielgrundwasserstand definiert, der als Bezugsniveau zur Bewertung der Wirksamkeit der untersuchten Entwässerungsmaßnahmen dient. Dies wird jeweils durch die Abweichung der Basisvariante zum Zielgrundwasserstand visualisiert.

Das Kapitel 5 befasst sich mit den Szenarien der Seewasserstandsänderung und der Seerweiterung. Hierbei werden einzelne Auswirkungen der Szenarien auf die Grundwassersituation geprüft. Es wird die Frage gestellt „Was ist theoretisch möglich?“.

Das Kapitel 6 widmet sich der Frage „Was ist praktisch anwendbar?“. Hierbei werden Entwässerungsszenarien entwickelt, um eine Entspannung der Grundwassersituation im südöstlichen Teil des Elbe-Saale-Winkels zu erzeugen. In diesem Kapitel findet sowohl das hydrodynamische Modell als auch das Grundwassermodell Anwendung finden.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Verwendete Geodaten

Für die Umsetzung der Aufgabenstellung finden folgende Geodaten Anwendung. Zum einen wurde das ATKIS<sup>1</sup> Basis-DLM<sup>2</sup> © GeoBasis-DE / LVermGeo LSA, [04/2011 / 010312] für die Erstellung der Flächennutzung verwendet. Zum anderen findet ein DGM1<sup>3</sup> sowohl in dem hydrodynamischen Modell als auch bei der Ermittlung eines Zielgrundwasserstandes Anwendung. Zu Übersichtszwecken für zum Beispiel Übersichtskarten finden zudem topografische Karten im Maßstab 1:10000, ein vorhandenes Gewässernetzshape sowie Orthophotos vom Modellgebiet Anwendung.

### 2.2 Gebietsbeschreibung

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften des Modellgebietes beschrieben. Hierbei ist auf die Geografie, Klima und Wasserhaushalt, Geologie, Hydrogeologie, Flächennutzung Fließgewässer sowie Standgewässer eingegangen worden.

#### 2.2.1 Geografie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Bundesland Sachsen-Anhalt, wenige Kilometer südlich der Landeshauptstadt Magdeburg. Es hat eine Gesamtfläche von ca. 206 km<sup>2</sup> und erstreckt sich von der im Modellbereich nördlich gelegenen Stadt Schönebeck (Elbe) über der östlich gelegenen Einheitsgemeinde Stadt Barby bis zur südlich gelegenen Stadt Calbe (Saale). Im Norden und Osten wird der Modellbereich durch den Fluss Elbe abgegrenzt, südlich findet zum einen eine Abgrenzung durch den Fluss Saale und zum anderen durch eine Randstromlinie von Calbe (Saale) Richtung Westen statt. Westlich gelegen von den Ortsteilen Eickendorf und Biere sowie Welsleben begrenzt eine Wasserscheide das Modellgebiet (*Reinstorf & Kramer, 2013*). Der Modellbereich ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

---

<sup>1</sup> ATKIS = Amtliches Topografisches Karten Informationssystem

<sup>2</sup> DLM = Digitales Landschaftsmodell

<sup>3</sup> DGM1 = Digitales Geländemodell mit Messpunktabstand von 1 m x 1 m

Das Modellgebiet beinhaltet Teile der Verwaltungsbereiche von Stadt Schönebeck (Elbe), Stadt Magdeburg, Stadt Barby, und Stadt Calbe (Saale) sowie der Gemeinde Bördeland. Hierbei umfasst Stadt Schönebeck (Elbe) die Stadtteile Schönebeck, Frohse, Felgeleben und Bad Salzelmen im Modellbereich. Die Einheitsgemeinde Stadt Barby umfasst die Ortsteile Barby (Elbe), Glinde, Gnadau, Pömmelte, Tornitz, und Wespen im Modellbereich. Die Gemeinde Bördeland umfasst die Ortsteile Welsleben, Eggersdorf, Groß- und Kleinmühligen, Biere, Eickendorf und Zens. Auch liegen Teile von Stadt Calbe (Saale) in dem Modellbereich. In dem Teil des Verwaltungsgebietes von Stadt Magdeburg, der im Modellgebiet liegt, ist kein Ortsteil enthalten (siehe Abbildung 2-1 bzw. „Karte 01 Modellgebietsübersicht“).

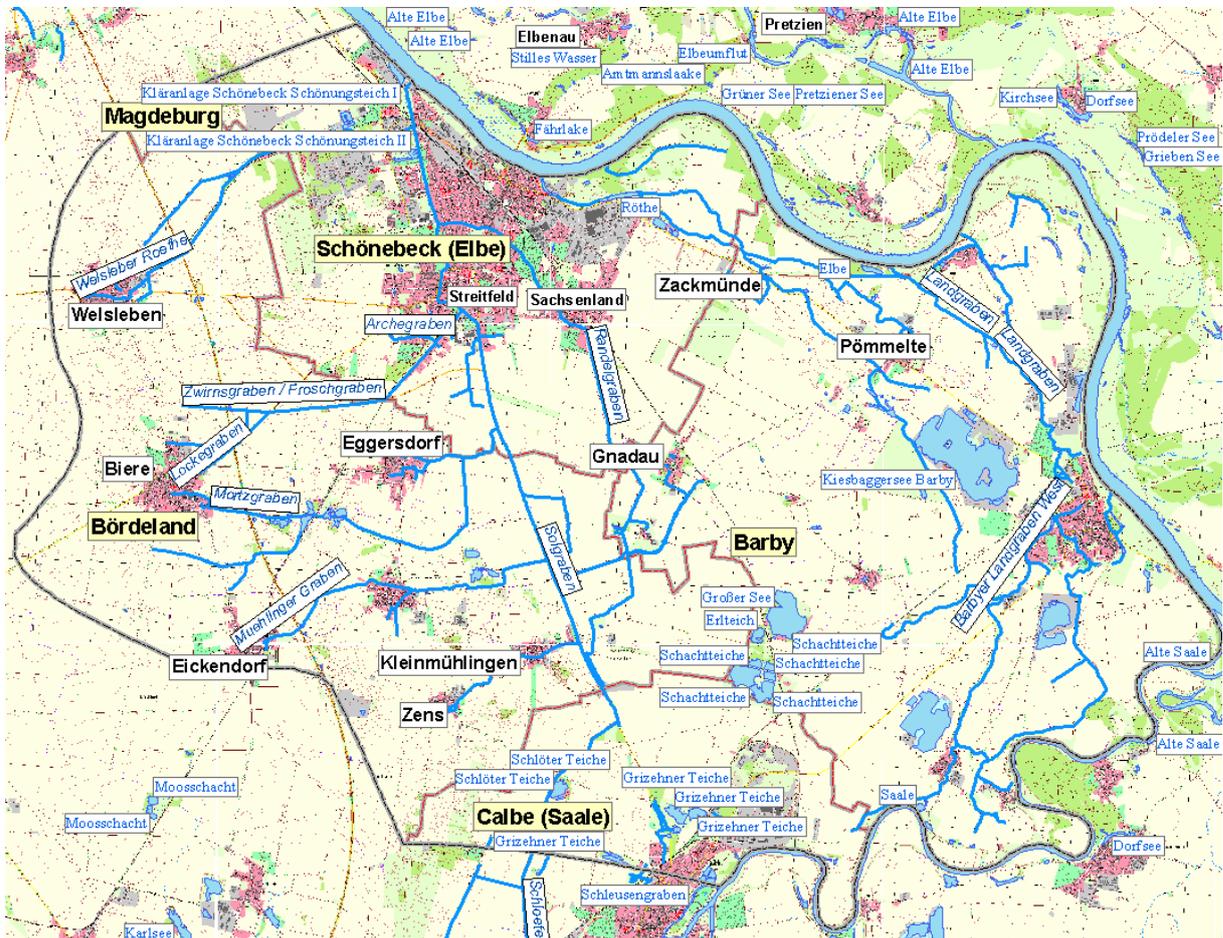


Abbildung 2-1: Modellgebietsübersicht

## 2.2.2 Klima und Wasserhaushalt

Ein weiteres Thema der Gebietsbeschreibung stellt hierbei der Klima und Wasserhaushalt dar. Laut DWD (*DWD, 2013*) liegen für die Station Magdeburg (WEWA) folgende Klimadaten für die Zeitreihe 1981 – 2010 vor. Da die Stadt Magdeburg nur wenige Kilometer vom Modellgebiet entfernt liegt, gelten die nachfolgenden Werte auch für das Modellgebiet. So wurde ein mittlerer Jahresniederschlag von 520 mm erfasst. Die mittlere jährliche Sonnenscheindauer liegt bei 1699 h, außerdem wurde eine mittlere Jahrestemperatur von 9,5 °C sowie eine mittlere minimale Monatstemperatur von 0,8°C und eine mittlere maximale Monatstemperatur von 18,7°C ermittelt.

**Tabelle 2-1: Klimadaten der Station Magdeburg (WEWA), Zeitreihe: 1981 - 2010**

Bezeichnung	Wert
Station	Magdeburg (WEWA)
mittlerer Jahresniederschlag [mm]	520
mittlere jährliche Sonnenscheindauer [h]	1699
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	9,5
Mittlere minimale Monatstemperatur, Januar [°C]	0,8
Mittlere maximale Monatstemperatur, Juli [°C]	18,7

Nach dem hydrologischen Atlas für Deutschland (*BMU, 2000*) wurden folgende Werte für den Wasserhaushalt ermittelt, (Tabelle 2-2). Das Modellgebiet ist durch einen jährlichen Niederschlag von 500 – 550 mm geprägt. Laut (*DWD, 2013*) ist eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe für Deutschland von 787,2 mm aus der Zeitreihe 1971 – 2000 ermittelt worden. Somit ist das Modellgebiet mit einer geringen jährlichen Niederschlagshöhe gekennzeichnet. Die klimatische Wasserbilanz (2-1) lässt sich wie folgt ermitteln.

$$KWB = P - ETP \quad (2-1)$$

Mit KWB: klimatische Wasserbilanz [mm], P: jährlicher Niederschlag [mm], ETP: potenziellen Verdunstung/Evopotranspiration [mm]. Mit einer jährlichen Niederschlagshöhe von 525 mm und einer jährlichen potenziellen Verdunstung von 587,5 mm ergibt sich eine jährliche negative Wasserbilanz von 62,5 mm. Eine negative Wasserbilanz hat zur Folge, dass die jährliche reale Verdunstung geringer ist als die jährliche potenzielle Verdunstung.

$$ETP > ETR \quad (2-2)$$

Mit ETP: potenzielle Verdunstung [mm], ETR: reale Verdunstung. Dies bedeutet, dass die reale Verdunstung die potenzielle Verdunstung mit der Verdunstung von Oberflächen und dem Wasserdargebot begrenzt (Dyck & Peschke, 1995). Für Zeiträume von wenigen Jahren sollte folgende Bilanzgleichung (2-3), welche die Speicheränderung und den Abfluss mit berücksichtigt, angewandt werden. Der Abfluss setzt sich hierbei aus dem jährlichen Oberflächenabfluss und der jährlichen Grundwasserneubildungsrate zusammen.

$$\Delta S = P - ETR - R \quad (2-3)$$

Mit  $\Delta S$ : Speicheränderung [mm], P: Niederschlag [mm], ETR: reale Verdunstung [mm], R: Abfluss [mm]. Als Ergebnis der Wasserhaushaltsbilanz ist zu vermerken, dass es zu keiner Speicheränderung kommt und somit ein ausgeglichener Wasserhaushalt im Modellbereich vorherrscht. Es ist zu beachten, dass die verwendeten Werte als Faustwerte angesehen werden.

**Tabelle 2-2: Wasserhaushaltsdaten für den Modellbereich**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Wert</b>
Jährlicher Niederschlag [mm]	500 – 550 (525)
Mittlere jährliche potenzielle Verdunstung [mm]	575 – 600 (587,5)
<b>Klimatische Wasserbilanz [mm]</b>	<b>ca. - 62,5</b>
Mittlere jährliche tatsächliche Verdunstung [mm]	450 – 525 (487,5)
Jährliche Grundwasserneubildungsrate [mm]	< 25 (12,5)
Jährlicher Oberflächenabfluss [mm]	0 – 50 (25)
<b>Jährliche Speicheränderung [mm]</b>	<b>ca. 0</b>

### 2.2.3 Geologie

Geologisch liegt der Modellbereich im Magdeburger Urstromtal. Die Elbe verläuft durch das in der letzten Eiszeit entstandene Urstromtal. Nach OEWA (OEWA, 2011) besteht das oberflächennahe anstehende mesozoische Festgestein der Triasplatte aus Buntsandstein und Muschelkalk. Oberhalb wird es durch eozänische Bildungen begrenzt. Diese werden wiederum von einer Schicht tertiären Rumpelton mit einer Mächtigkeit von 10 – 15 m überlagert, die eine abdichtende Wirkung gegenüber dem Festgestein hat. Anschließen tun

sich in Hangenden wechselzeitliche quartäre Sande, Kiese, Dünensande und teilweise Tone auf.

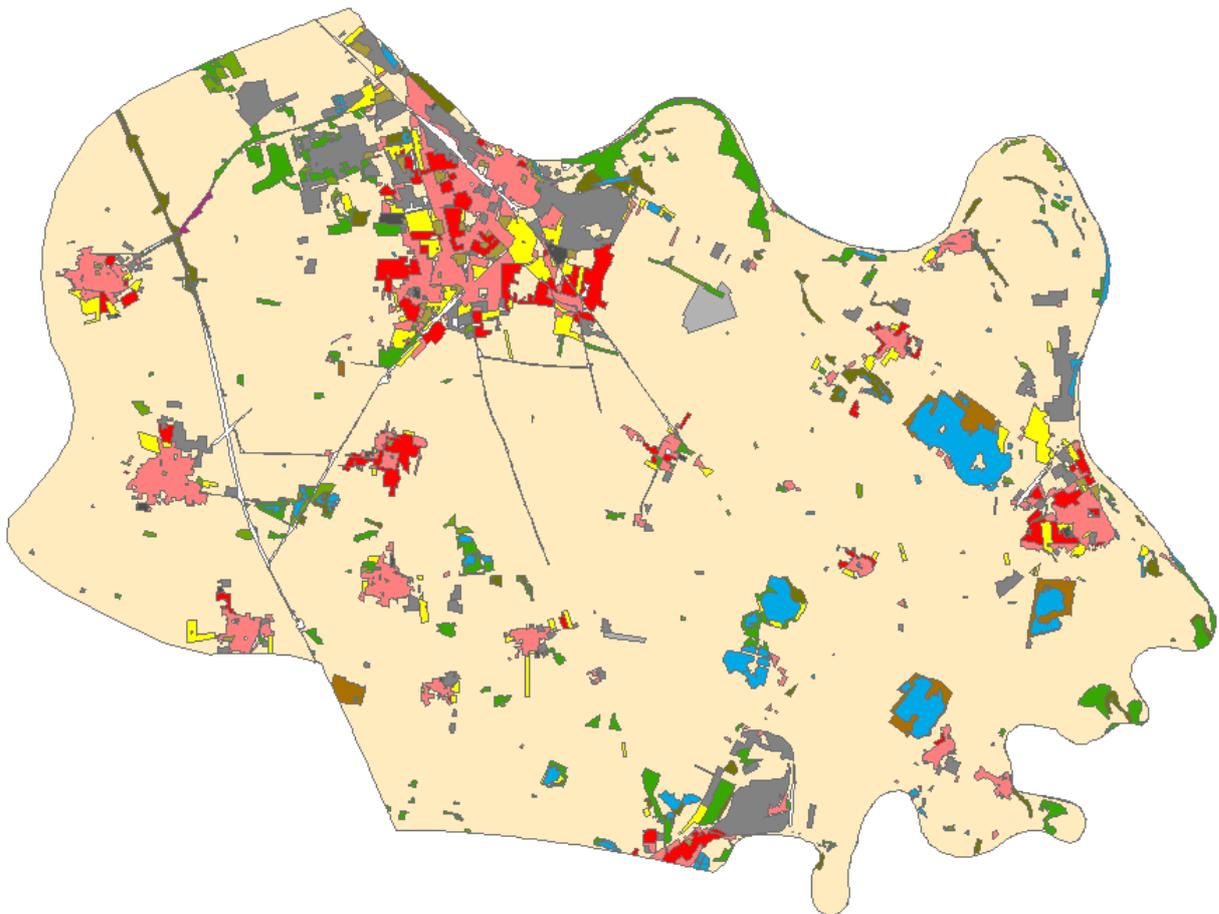
#### 2.2.4 Hydrogeologie

Eine Weitere Thematik der Gebietsbeschreibung bildet hierbei die Hydrogeologie. Hierbei ist zu erläutern, dass das Modellgebiet grob in drei charakteristische hydrogeologische Einheiten abgegrenzt werden kann:

1. Nach DHI-WASY (*DHI WASY, BAH, September 2012*) ist der Großteil des Modellgebiets durch holozäne sowie jungpleistozäne Kiese und Sande, den Talsanden des Urstromtals aufgebaut. Diese stellen im Modellgebiet den Hauptgrundwasserleiter mit einer Mächtigkeit zwischen 10 – 15 m dar. Der Aquifer wird unterhalb von einer Rupeltonschicht begrenzt, welche wiederum die unteren Festgesteinsschichten oberhalb abgrenzt. Nach Reinstorf und Kramer (*Reinstorf & Kramer, 2013*) verläuft die Ausbreitungsgrenze der quartären Flussschotter vom Westrand Schönebeck (Elbe) über Eggersdorf, Großmühligen, Kleinmühligen bis nach Calbe (Saale). Der Aquifer ist teilweise von einer Auenlehmschicht bedeckt. Vor allem in den Gebieten nahe der Elbe und Saale kommen Deckschichten mit einer Mächtigkeit von 1 – 3 m vor. Der Aquifer ist im Modellgebiet in der Regel ungespannt, nur in den Gebieten mit mächtigeren Deckschichten können angespannte Grundwasserverhältnisse entstehen. Der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) des Aquifers beträgt  $7 \cdot 10^{-4}$  m/s.
2. Nach OEWA (*OEWA, 2011*) sind im Nordwesten des Modellbereichs Stauchmoränengebiete mit einer 25 m mächtigen Geschiebemergeldecke typisch ( $k_f = 10^{-3}$  bis  $k_f = 10^{-4}$  m/s), welche nur geringfügig von jungpleistozänen Kiesen und Sanden überlagert sind.
3. Die dritte hydrogeologische Einheit bildet nach OEWA (*OEWA, 2011*) der grundwasserführende Festgesteinsbereich im Südwesten der Stadt Schönebeck (Elbe) im Bereich des Stadtteils Bad Salzelmen, der von geringmächtigen Schmelzwassersanden überdeckt ist.

## 2.2.5 Flächennutzung

Die Flächennutzung wird im Laufe der Arbeit eine zentrale Rolle zur Prioritätsflächen-ermittlung einnehmen. Hierbei bildet die Grundlage der Flächennutzung das DLM der ATKIS-Daten. In Abbildung 2-2 ist die Nutzung der Flächen im Modellgebiet flächenmäßig dargestellt. Zusätzlich ist die „Karte 2 Flächennutzungskarte“ im Anhang 9.5 Kartenwerk Teil 1 hinterlegt.



**Abbildung 2-2: Flächennutzung Flächendarstellung**

Der Großteil des Modellgebietes wird landwirtschaftlich genutzt. Etwa 13 % des Modellbereiches fallen unter die Kategorie bebaute Flächen. Zu den Naturflächen gehören etwa 6 % des Gebietes. Den kleinsten Anteil bilden Unland- und nicht bewertete Flächen mit ca. 0,24 % des Elbe-Saale-Winkels. Die genauen Flächenwerte sind aus Tabelle 2-3 oder Abbildung 2-3 zu entnehmen. Aus Tabelle 2-3 ist hierbei folgendes Diagramm, welches in Abbildung 2-3 dargestellt ist, gebildet worden.

Tabelle 2-3: Flächennutzung

Flächenbezeichnung	Flächenprozent [%]
<b>Landwirtschaftsflächen</b>	<b>80,92</b>
<b>Bebaute Flächen</b>	<b>12,89</b>
Wohnbauflächen	1,87
Industrie- und Gewerbeflächen	3,71
Flugverkehrsflächen	0,26
Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen	1,77
Flächen gemischter Nutzung	4,40
Tagebaugruben und Steinbrüche	0,54
Flächen besonderer Funktion	0,34
<b>Naturflächen</b>	<b>5,95</b>
Waldflächen	2,32
Gehölzflächen	0,43
Vegetationsmerkmalsflächen	1,03
Gewässerflächen	1,97
Sumpfbereiche	0,20
<b>Unland- und nicht bewertete Flächen</b>	<b>0,24</b>
Unlandflächen	0,08
Nicht bewertete Flächen	0,16
<b>Summe</b>	<b>100</b>

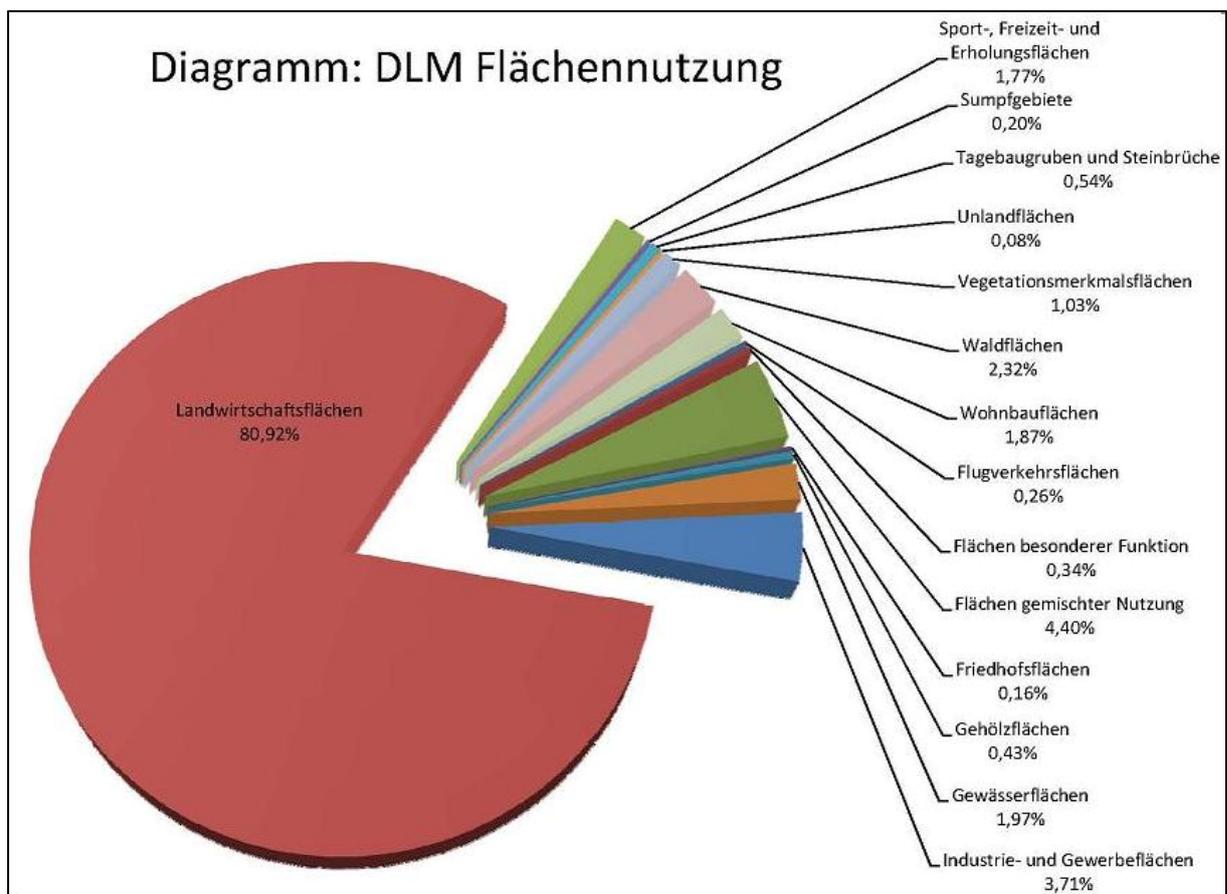


Abbildung 2-3: Flächennutzung

## 2.2.6 Fließgewässer

### Hauptvorfluter:

Das Modellgebiet wird im Norden und Osten von der Elbe sowie im Süden von der Saale abgegrenzt. Beide Flüsse dienen im Modellgebiet als Hauptvorfluter für das im Modellbereich gegebene Grabensystem. Nach LHW (*LHW, 2003*) sowie nach WSV (*WSV, 2013*) sind folgende Kennwerte für Elbe und Saale übernommen worden.

**Tabelle 2-4: Mittlerer Abfluss und mittlerer Hochwasserabfluss für Elbe und Saale**

Fluss	Station	PNP <sup>4</sup> [mNHN]	MQ <sup>5</sup> [m <sup>3</sup> /s]	MHQ <sup>6</sup> [m <sup>3</sup> /s]	NNW <sup>7</sup> [cm] [Datum]	HHW <sup>8</sup> [cm] [Datum]
Elbe	Magdeburg Strombrücke		554	2030		
	Barby	46,11	561	1780	42 22.09.1947	733 03.04.1845 (761) (09.06.2013)
Saale	Calbe - Grizehne	49,36	115	382	112 24.06.1934	751 07.01.2004 (801) (07.06.2013)

Hierbei sind die in Klammern dargestellten Werte aus dem Gewässerkundlichen Informationssystem nach WSV (*WSV, 2013*) entnommen. Die übrigen Werte wurden aus dem Gewässerkundlichen Jahrbuch nach LHW (*LHW, 2003*) entnommen.

### Grabensystem:

Das Modellgebiet wird zum einen von dem Sol- und dem Randelgraben geprägt, die von Süden nach Norden verlaufen. Der Randelgraben mündet im Stadtgebiet von Schönebeck (Elbe) in den Solgraben ein. Der Solgraben mündet dann in die Elbe. Der östliche Teil des Modellgebiets wird von dem Landgraben geprägt, welcher bei dem Ortsteil Glinde der Einheitsgemeinde Stadt Barby in die Elbe einmündet. Von Glinde aus verläuft der

<sup>4</sup> PNP = Pegelnullpunkt

<sup>5</sup> MQ = Mittlerer Durchfluss

<sup>6</sup> MHQ = Mittleres Hochwasser

<sup>7</sup> NNW = Niedrigster gemessener Wasserstand

<sup>8</sup> HHW = Höchster gemessener Wasserstand

Landgraben Richtung Barby (Elbe) wo er sich in den westlichen Landgraben und in den östlichen Landgraben teilt.

### 2.2.7 Standgewässer

Aus der Abbildung 2-1 ist zu entnehmen, dass fünf größere Standgewässer im Modellgebiet existieren. Ein Standgewässer befindet sich westlich des Ortsteils Barby (Elbe), der als „**Kiessee Barby I**“ definiert wird, sowie südlich von Barby (Elbe), welches als „**Kiessee Barby II**“ definiert wird. Dies sind mit Grundwasser gefüllte Restlöcher des Kieslagerstättenabbaus. Des Weiteren befindet sich nordöstlich von Tornitz ein weiteres Standgewässer, das in der Masterarbeit als „**Kiessee Tornitz**“ beschrieben wird. Auch befinden sich südwestlich von Wespen zwei größere Standgewässer, die im Rahmen der Masterarbeit als „**Großer See**“ und „**Schachtteiche**“ benannt sind. Gruppen kleinerer Standgewässer sind nördlich von Großmühlungen vorzufinden.

## 2.3 Modellgrundlage

In der folgenden Abbildung 2-4 ist das verwendete Modell schematisch dargestellt. Die zentrale Rolle des Modells nimmt hierbei ein GIS<sup>9</sup> ein, welches sowohl mit einem Grundwassermodell als auch mit einem hydrodynamischen Modell lose gekoppelt ist.

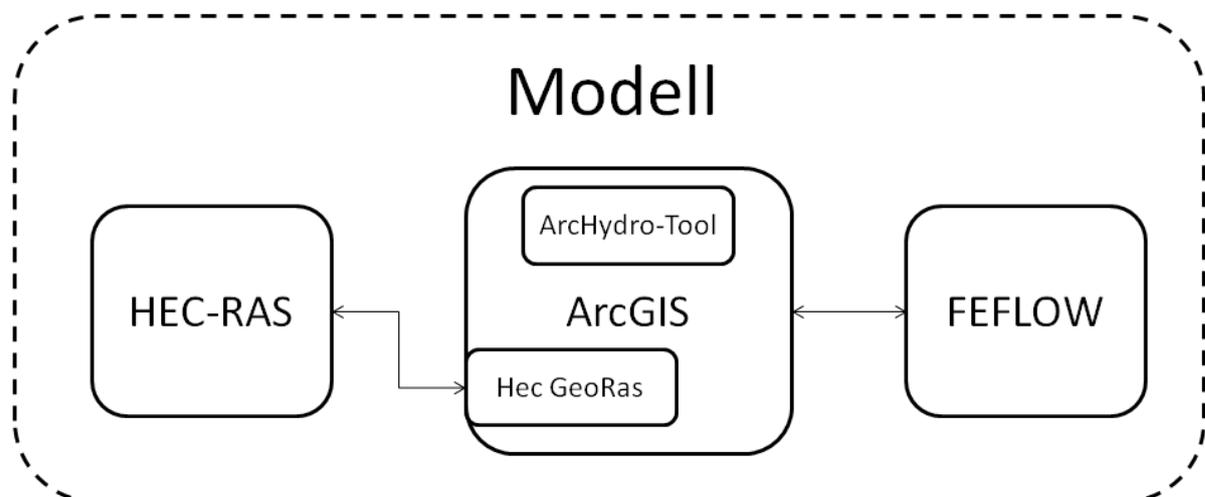


Abbildung 2-4: Datenflussschema

<sup>9</sup> GIS = Geografisches Informationssystem

GIS haben seit Mitte der 1980er Jahre eine große Bedeutung in vielen naturwissenschaftlichen, technischen, aber auch sozioökonomischen Bereichen und der öffentlichen Verwaltung erlangt (*Fürst, 2004*). Für die Lösung der gegebenen Aufgaben der Master-Thesis wurde auf die Software ArcGIS in der Version 9.3 von ESRI zurückgegriffen. ArcGIS umfasst zahlreiche GIS-Anwendungen, die eine Reihe von GIS-Aufgaben unterstützt. Die vorhandenen GIS-Anwendungen dienen in der Master-Thesis hauptsächlich zum Postprocessing der Modellierungsergebnisse des Grundwassermodells sowie zum Preprocessing des hydrodynamischen Modells. Auch werden über das GIS wissenschaftliche Karten erstellt.

Die Grundwasserströmung ist ein zeitabhängiger, dynamischer Vorgang, zu dessen Simulation partielle Differenzialgleichungen zu lösen sind. Diese Aufgabe ist beim derzeitigen Stand der Entwicklung von GIS nur bedingt lösbar (*Fürst, 2004*). Aus diesem Grund wurde eine lose Kopplung zwischen der Software ArcGIS und der Software FEFLOW von WASY GMBH 2001 etabliert. Wobei ArcGIS hauptsächlich für Pre- bzw. Postprocessingaufgaben genutzt wird und FEFLOW in der eigentlichen Grundwassermodellierung Anwendung findet.

Für die Berechnung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Gräben bzw. Fließgewässern im Modellbereich ist das eindimensionale Strömungsmodell HEC-RAS in der Version 4.1 herangezogen worden. HEC-RAS ist über die GIS-Applikation HEC GeoRAS mit dem GIS verknüpft. Dies hat den Vorteil, dass die geometrischen Daten auf Grundlage eines DGM im GIS erstellt und in HEC-RAS importiert werden können. Die hydraulische Modellierung findet dann in HEC-RAS statt.

## 2.4 Grundwassermodell

Wie in Abs. 2.3 bereits erwähnt, erfolgt die Simulation der Grundwasserströmung mit dem Simulator FEFLOW in der Version 6.1. FEFLOW verwendet das Finite-Elemente (FE)-Verfahren zur numerischen Lösung der Strömungsgleichungen. Dazu wird über dem Modellgebiet ein FE-Netz aus homogenen Dreiecks-Elementen generiert um das Modellgebiet in Teilelemente zu zerlegen. Entlang der entstehenden Netz-Knoten erfolgt dann die Lösung der Strömungsgleichungen. Die dafür notwendigen mathematischen und physikalischen Grundlagen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 2.4.1 Mathematische Grundlagen

Die mathematischen und physikalischen Grundlagen der Grundwasserströmung sind in diversen Lehrbüchern erfasst. Im (*Kinzelbach & Rausch, 1995*) oder (*Bear & Verruijt, 1987*) werden diese Vorgänge zusammengefasst und wie folgt erklärt: Antriebskräfte für Grundwasserströmungen sind die Schwerkraft und die daraus resultierenden Druckkräfte. Die Piezometerhöhe (2-4) berücksichtigt dabei den hydrostatischen Wasserdruck.

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \quad (2-4)$$

Mit  $h$ : Piezometerhöhe [m],  $p$ : Dichte des Wassers [ $\text{kg/m}^3$ ],  $g$ : Erdbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ],  $z$ : geodätische Höhe [mNHN]. Im Folgenden wird das *Darcy*-Gesetz für eine dreidimensionale Strömung in einen isotropen Aquifer erfasst:

$$\vec{v} = -k_f \nabla h \quad (2-5)$$

Mit  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ : dreidimensionale Grundwasserströmung,  $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert und  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ : Ortsableitung. Im isotropen Aquifer ist die Strömungsrichtung immer zum Piezometerhöhengradienten parallel. Bei einem anisotropen Aquifer ist dies nicht der Fall. Der Gradient in x-Richtung verursacht auch Strömungskomponenten in y- und z-Richtung. Wenn dieser Sachverhalt im *Darcy*-Gesetz aufgenommen werden soll, kann der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  nicht als Skalar angesehen werden. Der Gradientenvektor muss bei der Transformation zu dem Filtergeschwindigkeitsvektor gedreht werden. Somit wird der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  durch eine Matrix, dem Durchlässigkeitstensor  $\mathbf{K}$ , ersetzt.

$$\vec{v} = -\mathbf{K} \nabla h \quad (2-6)$$

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

Durch Einsetzen des Gesetzes von *Darcy* (2-6) in dem folgenden Massenerhaltungssatz (2-8) ergibt sich folgende Strömungsgleichung (2-9):

$$-\nabla(m \vec{v}) + q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-8)$$

Mit  $m = h - b$ : Aquifermächtigkeit [m], b: Höhenlage der Aquifersohle [mNHN], S: Speicherkoeffizient, q: spezifische Fluss [ $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ], t: Zeit [s].

Es wird angenommen, dass die Strömung weitestgehend horizontal verläuft (*Dequit-Annahme*) und die Dichte des Grundwassers gleich ist, somit ist die folgende Strömungsgleichung (2-9) eine Funktion der Zeit und des Ortes  $h(t,x,y)$ :

$$\nabla(m K \nabla h) + q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-9)$$

Im gespannten Aquifer ist der Speicherkoeffizient eine Funktion der Kompressibilität des Aquifers. Im freien Aquifer kann darüber hinaus Wasser durch die Bewegung des Grundwasserspiegels gespeichert werden. Die Speicherung durch Kompressibilität stellt hierbei nur einen marginalen Anteil dar, somit entspricht der Speicherkoeffizient im Wesentlichen der entwässerbaren Porosität  $n_e$  des Aquifers. Mithin kann der Speicherkoeffizient durch die speicherwirksame Porosität ersetzt werden. So ergibt sich folgende Strömungsgleichung:

$$\nabla(m K \nabla h) + q = n_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-10)$$

für den anisotropen Aquifer bzw.

$$\nabla(m k_f \nabla h) + q = n_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-11)$$

für den vereinfachten isotropen Aquifer, welcher im Modell Anwendung findet. Für die vollständige mathematische Beschreibung des Grundwasserströmungsmodells sind noch zusätzliche Bedingungen erforderlich.

### 2.4.2 Anfangsbedingung

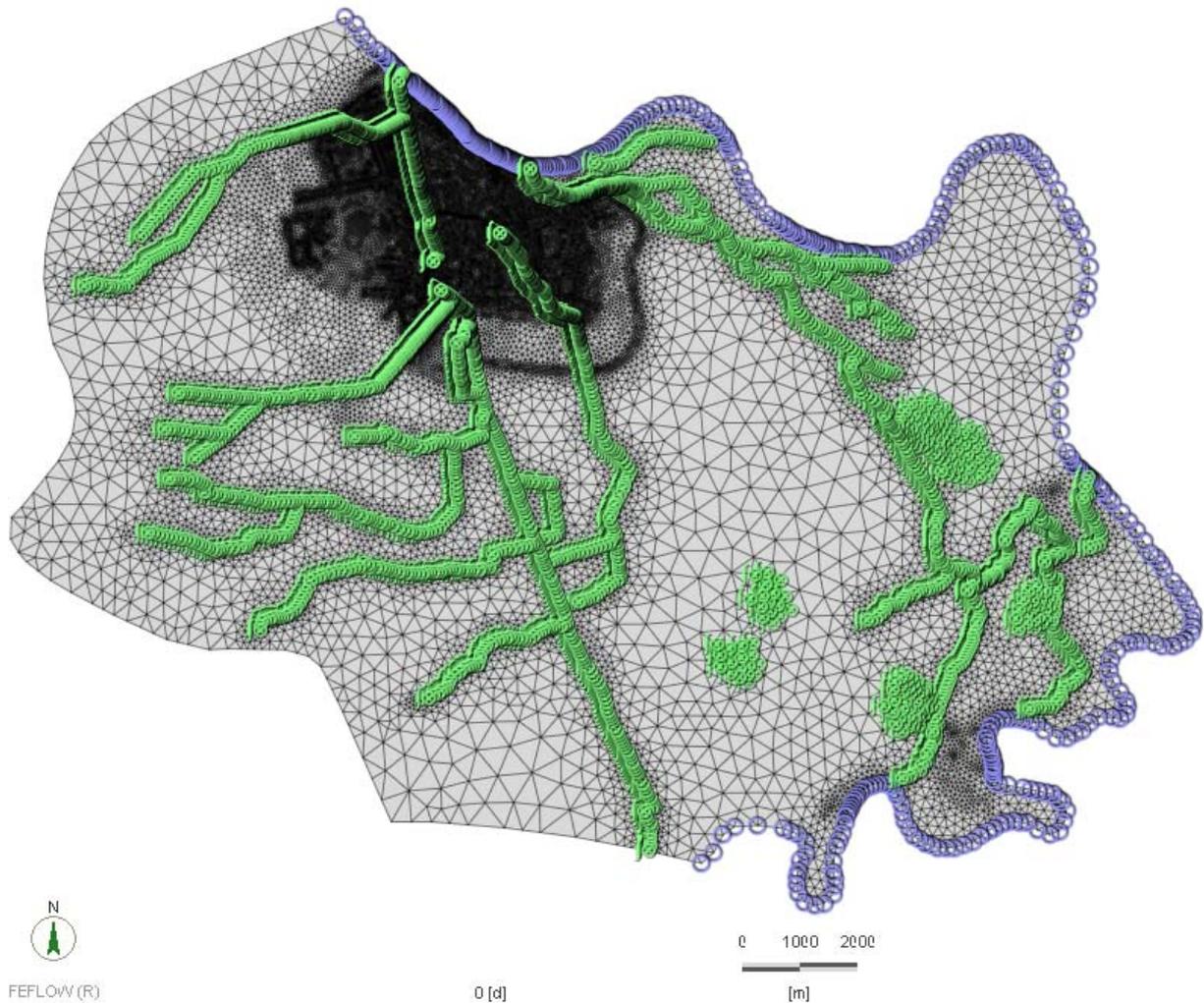
Die Anfangsbedingung ist erforderlich zur Beschreibung zeitlicher Entwicklungen bei instationären Problemstellungen und definiert die Randbedingung in der Zeit-Dimension (*Mohrlok, 2009*). Sie besteht aus einer Piezometerhöhenverteilung  $h(\vec{x}, t_0)$  im gesamten Gebiet zum Zeitpunkt  $t_0$ , in welchem die Simulation beginnt.

$$h(\vec{x}, t_0) = h_0(\vec{x}) \quad (2-12)$$

Im vorliegenden Modell wird der stationäre Zustand gelöst, folglich findet die Anfangsbedingung keine Anwendung.

### 2.4.3 Randbedingungen

Randbedingungen sind im Allgemeinen Umstände, die mit großem Aufwand oder gar nicht beeinflussbar sind und daher als gegebene Größen angesehen werden können. Bei der vorliegenden Differentialgleichung dienen sie als konkrete Angabe zur Lösung dieser Funktion. Die Stand- und Fließgewässer dienen hierbei als Randbedingungen des Grundwassermodells. In der folgenden Abbildung 2-5 sind die Randbedingungsknoten der Gewässer zusammen mit dem Modellnetz dargestellt.



**Abbildung 2-5: FEFLOW-Netz mit Randbedingungsknoten der ersten und dritten Art, Quelle: FE-Modell zur Grundwassermodellierung / DHI Wasy**

Es werden drei Arten von Randbedingungen für das Grundwassermodell definiert, wobei die dazugehörigen Formeln nach Diersch (*Diersch, 2009*) erstellt sind:

**Randbedingung erster Art (*Dirichlet-Randbedingung*):**

Die *Dirichlet*-Randbedingung schreibt die Piezometerhöhen am Rand des Gebietes vor.

$$h(x_i, t) = h_1^R(t) \quad (2-13)$$

Mit  $h_1^R(t)$ : Randwert für die hydraulische Höhe  $h$  [m]. Der Wert dieser Randbedingung kann nur in seltenen Fällen bestimmt werden, da die Grenzfläche einen Wasserkörper darstellen

muss wie einen Fluss, See oder Pumpensumpf, in dem auf eine feste Wasserspiegelhöhe abgepumpt wird. Da das Modellgebiet im Norden und Osten von den Flüssen Elbe und Saale abgegrenzt wird, bilden die Wasserstände dieser beiden Flüsse die Randbedingung der ersten Art (siehe Abbildung 2-5: blau dargestellte Knoten). Bei dieser Randbedingung wird auf die Definition einer Transferrate verzichtet (*DHI WASY, BAH, September 2012*). Somit interagieren die Wasserstände ohne Widerstand mit den umliegenden Modellelementen.

### **Randbedingung zweiter Art (*Neumann-Randbedingung*):**

Die *Neumann*-Randbedingung gibt die Ableitung der gesuchten Größe am Rand des Gebietes vor, welche den Zufluss oder Abfluss beschreibt.

$$q_{n_h}(x_i, t) = q_h^R(t) \quad (2-14)$$

Mit  $q_h^R(t)$ : Normalstromrandwertbedingung [m/d],  $q_{n_h}(x_i, t)$ : *Darcy*-Normalstrom [m/d]. Diese Randbedingung wird verwendet, wenn der Zufluss bzw. Abfluss des Gebietes bekannt ist. Ein Sonderfall dieser Randbedingung ist, wenn kein Fluss über Randstromlinien stattfindet. Dies tritt zum Beispiel dann auf, wenn der Aquifer an einem Aquiklud grenzt.

$$q_h^R(t) = 0 \quad (2-15)$$

Brunnen können als innere Ränder der zweiten Art angesehen werden, indem ein Kreis um den Brunnen gelegt wird und der Abstrom über den Kreis angegeben wird (*Kinzelbach & Rausch, 1995*).

Für das gegebene Grundwassermodell liegen keine Randbedingungen der zweiten Art vor.

### **Randbedingung dritter Art (*Cauchy-Randbedingung*):**

Die *Cauchy*-Randbedingung stellt eine Kombination der Randbedingungen erster und zweiter Art dar. Sie stellt sowohl die unbekannte Variable  $h$ , als auch dessen Ableitung  $\partial h / \partial n$  mit entsprechender Gewichtung auf einem Randabschnitt dar.

$$q_{n_h}(x_i, t) = -\Phi_h(h_2^R - h) \quad (2-16)$$

Mit  $\Phi_h$ : Transferkoeffizient [ $d^{-1}$ ],  $q_{n_h}(x_i, t)$ : Darcy-Normalstrom [m],  $h_2^R$ : Randwert des hydraulischen Potentials [m] und  $h$ : hydraulisches Potenzial [m]. Die Cauchy-Randbedingung kann auch folgendermaßen beschrieben werden (DHI-WASY, 2013):

$$Q = \Phi_h(h_{ref} - h)A \quad (2-17)$$

Mit  $Q$ : Fluss [ $m^3/s$ ],  $h_{ref}$ : Referenzhöhe [m],  $h$ : Hydraulisches Potenzial [m], Fläche [ $m^2$ ]. Die Stand- und Fließgewässer die innerhalb des Modellgebietes liegen werden mit der dritten Randbedingungsart beschrieben (siehe Abbildung 2-5: grün dargestellte Knoten). Bei dieser Randbedingungsart wird ein Widerstand zwischen Gewässersohle und Grundwasserkörper (Kolmation) angenommen, der durch den Parameter der Transferrate definiert wird:

$$\Phi_h = \frac{k_f}{d} \quad (2-18)$$

Mit  $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert [m/s],  $d$ : Dicke der kolmatierten Schicht [m]. Standardmäßig wird in FEFLOW von einer Transferrate von  $1,0 d^{-1}$  ausgegangen (DHI WASY, BAH, September 2012). Durch das Einsetzen der Transferrate in Formel (2-17) kann folgender Ausdruck entwickelt werden:

$$k_f = \frac{Q * d}{A * \Delta h} \quad (2-19)$$

Mit  $k_f$ : Durchlässigkeitsbeiwert [m/s],  $Q$ : Fluss [ $m^3/s$ ],  $d$ : Dicke der kolmatierten Schicht [m],  $A$ : durchströmte Fläche [ $m^2$ ] und  $\Delta h = h_{ref} - h$ : Druckhöhendifferenz [m]. Unter dem Ansatz der Umrechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes zur hydraulischen Leitfähigkeit mit:

$$k_f = \frac{K * \rho * g}{\eta} \quad (2-20)$$

Mit  $K$ : hydraulische Leitfähigkeit [ $m^2$ ],  $\rho$ : Dichte von Wasser [ $kg/m^3$ ],  $g$ : Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ] und  $\eta$ : Viskosität von Wasser [ $kg/(m*s)$ ] kann bei Einsätzen in Formel 2-19 die folgende Formel der Permeabilität hergeleitet werden:

$$K = \frac{Q * d * \eta}{A * \Delta p} \quad (2-21)$$

Mit  $\Delta p = \rho * g * \Delta h$ : hydrostatischer Wasserdruck [ $\text{N/m}^2$ ]. Es kann festgestellt werden, dass sich die *Cauchy*-Randbedingung in FEFLOW aus der Permeabilität ableiten lässt.

In folgender Abbildung wird der Sachverhalt verdeutlicht.

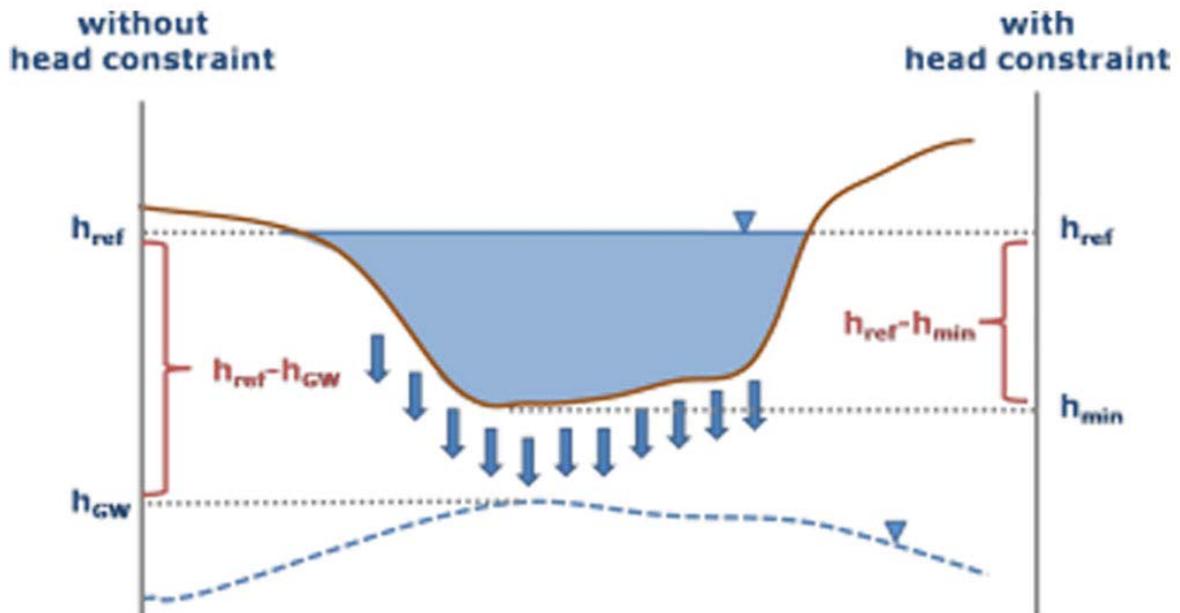


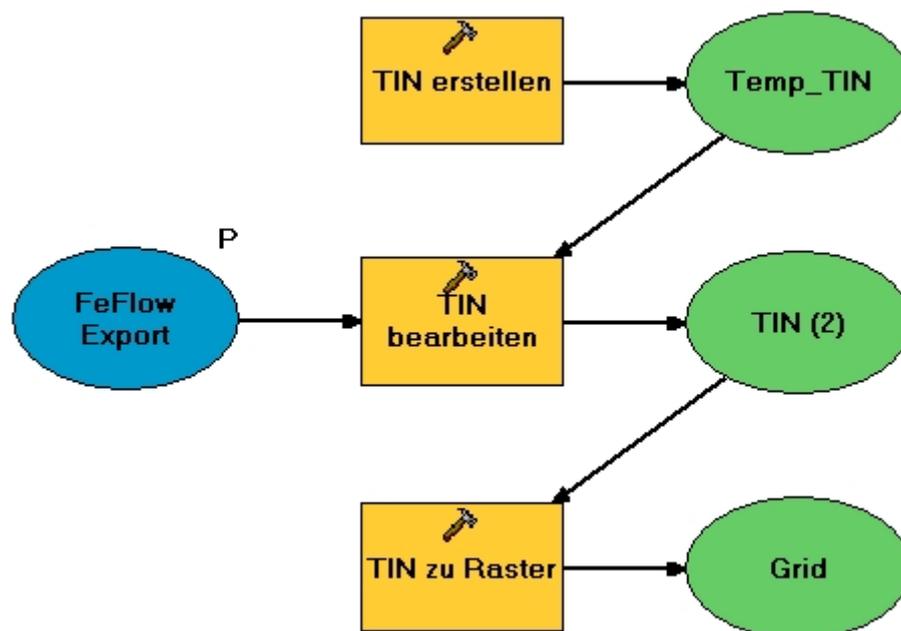
Abbildung 2-6: Schematik der *Cauchy*-Bedingung am Beispiel eines Flusses (DHI-WASY, 2013)

Aus der Abbildung 2-6 ist zu entnehmen, dass zwei verschiedene Annahmen getroffen werden können, zum einen eine Annahme ohne Potenzialbedingung und zum anderen eine Annahme mit Potenzialbedingung. Das vorliegende Grundwassermodell arbeitet ohne Potenzialbedingung. Das bedeutet, dass zum einen die Grundwasserspiegelhöhe definiert werden muss und zum anderen eine Referenzhöhe angegeben werden muss. Hierbei wurde die Referenzhöhe gleich der Geländehöhe gesetzt.

#### 2.4.4 Postprocessing des Grundwassermodells

Wie in Abs. 2.3 beschrieben sind die beiden Hauptprogramme ArcGIS und FEFLOW durch eine lose Kopplung verbunden. Nachfolgend wird beschrieben, wie der FEFLOW-Export in

das GIS eingepflegt wird. Einleitend ist zu sagen, dass der FEFLOW-Export das Modellierungsergebnis, welches das hydraulische Potenzial an jeden Knoten des Netzes darstellt, als Point-Feature im Shape-Format übergeben wird. Da aber zumeist flächendeckende Informationen benötigt werden, müssen die Punktinformationen entweder in TIN<sup>10</sup>, Grids oder Polygone konvertiert werden. Die Abbildung 2-7 beschreibt das Modell wie der FEFLOW-Export in ein Grid-Feature mit ArcGIS-Befehlen umgewandelt wird. Voraussetzung für dieses Modell ist die Erstellung eines TIN, in welchem darauffolgend die Punktinformationen geladen werden. Die so entstandene Dreiecksvermaschung wird mit einem dritten Befehl zu einem Grid-Feature konvertiert. Die erstellten Grid-Feature haben eine Pixelgröße von 10 m x 10 m.



**Abbildung 2-7: Modell FEFLOW-Export zu Grid**

Für die Ermittlung einfacher Differenzenmodelle, wie z.B. für die Grundwasserflur (2-22)

$$h_{GWF,i} = h_{DGM,i} - h_{GWS,i} \quad (2-22)$$

mit  $h_{GWF,i}$ : Grundwasserflurabstand in i-ter Zelle [m],  $h_{DGM,i}$ : DGM-Höhe in i-ter Zelle [mNHN],  $h_{GWS,i}$ : Höhe des Grundwasserspiegels in i-ter Zelle [mNHN] oder für Absenktrichter (2-23)

<sup>10</sup> TIN = Trianguliertes irreguläres Netzwerk

$$h_{AK,i} = h_{BV,i} - h_{EV,i} \quad (2-23)$$

mit  $h_{AK,i}$ : Differenzhöhe des Absenktrichters in  $i$ -ter Zelle [m],  $h_{BV,i}$ : Höhe des Grundwasserspiegels der Basisvariante in  $i$ -ter Zelle [mNHN],  $h_{EV,i}$ : Höhe des Grundwasserspiegels der ermittelten Variante in  $i$ -ter Zelle [mNHN] wird aufbauend auf das Modell aus Abbildung 2-7 folgendes Modell zur Konvertierung in Polygonfeature im Shape-Format verwendet (siehe Abbildung 2-8).

Als Modellparameter blau dargestellt und mit einem „P“ gekennzeichnet gelten zum einen die „Basis“ und zum anderen der „abzuziehende Parameter“. Beide Modellparameter müssen als Grid-Feature vorliegen, damit das Modell aus Abbildung 2-7 bei Bedarf vorgeschaltet werden kann. Der eigentliche Rechenprozess findet im ersten Befehl statt, in dem die Differenz zwischen jedem Pixel der „Basis“ und jedem in der Lage dazugehörigen Pixel des „abzuziehenden Parameters“ gebildet wird. Als Ergebnis wird so ein Differenzen-Grid erzeugt. Da zur weiteren Verarbeitung ein Polygon-Feature benötigt wird, muss das Grid-Feature in ein Polygon-Feature konvertiert werden. ESRI hat in dem Programm ArcGIS mit der Version 9.3 kein Tool vorgesehen um Grids mit Informationen mit dem Datentyp „float“ in ein Polygon-Feature umzuwandeln. Aus diesem Grund beschreibt das Modell in Abbildung 2-8 weitergehend eine Prozedur um dies zu ermöglichen.

Um ein Grid mit Float-Informationen in ein Grid mit Integer-Informationen konvertieren zu können, ist vorweg eine Genauigkeit festzulegen. In dem nachfolgenden Modell wurde eine Genauigkeit von zwei Dezimalstellen festgelegt. Dies setzt der ArcGIS-Befehl „Multiplizieren“ um, welcher ein Grid um den Faktor 100 multipliziert. Der Nachfolgende Befehl „Int“ wandelt das Float-Grid in ein Integer-Grid um. Mit dem Befehl „Raster zu Polygon“ kann nun aus einem Integer-Grid ein Shape, das Polygon-Informationen beinhaltet, erzeugt werden. Zusätzlich generalisiert der Befehl „Dissolve“ die Datensätze des erzeugten Shapes. Als letzter Schritt wird in der Datentabelle ein neues Feld erzeugt („Feld hinzufügen“) in welchem die vorhandenen Informationen mit 100 dividiert und implementiert werden („Feld berechnen“).

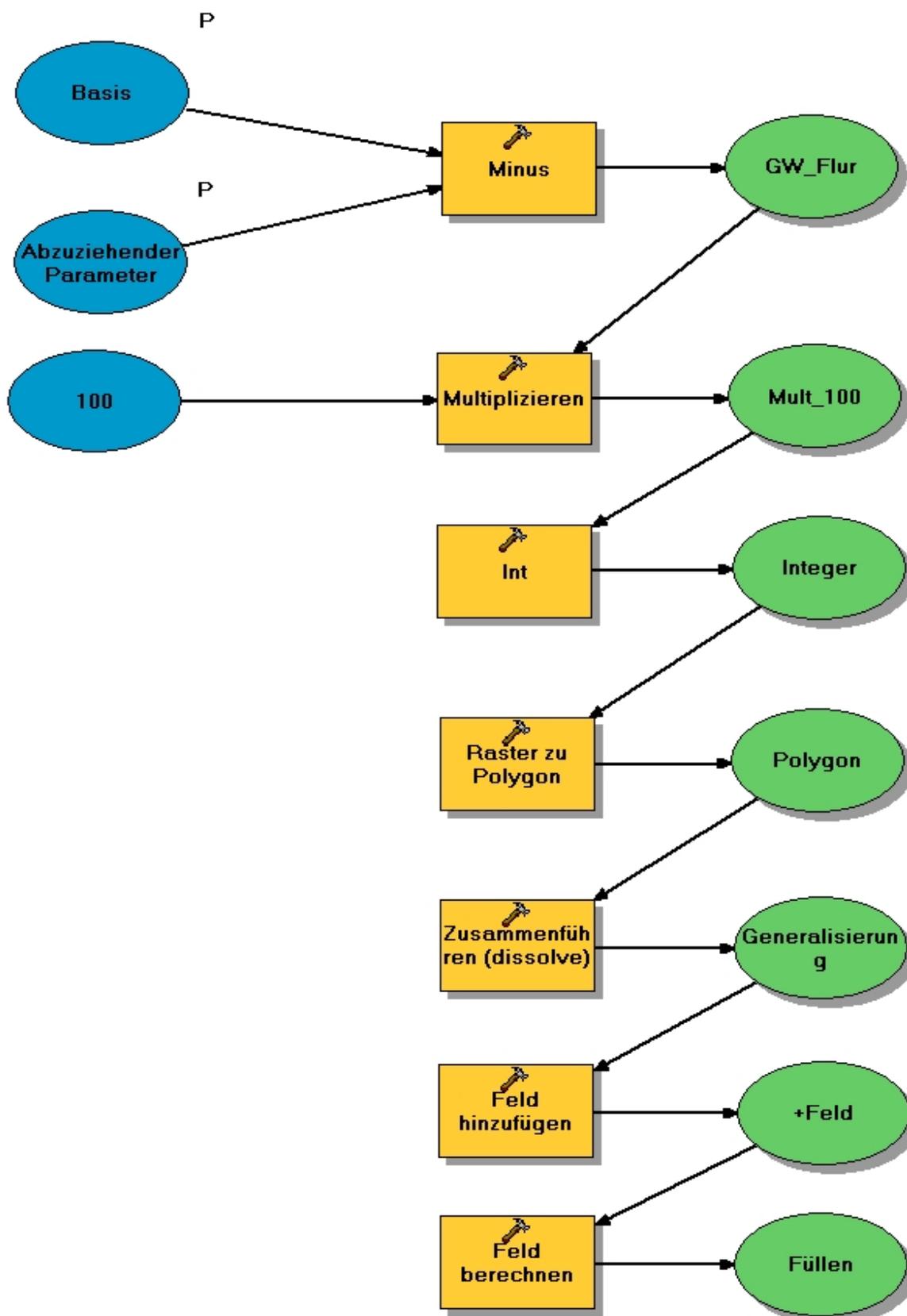


Abbildung 2-8: Differenzenmodell

## 2.5 Hydrodynamisches Modell

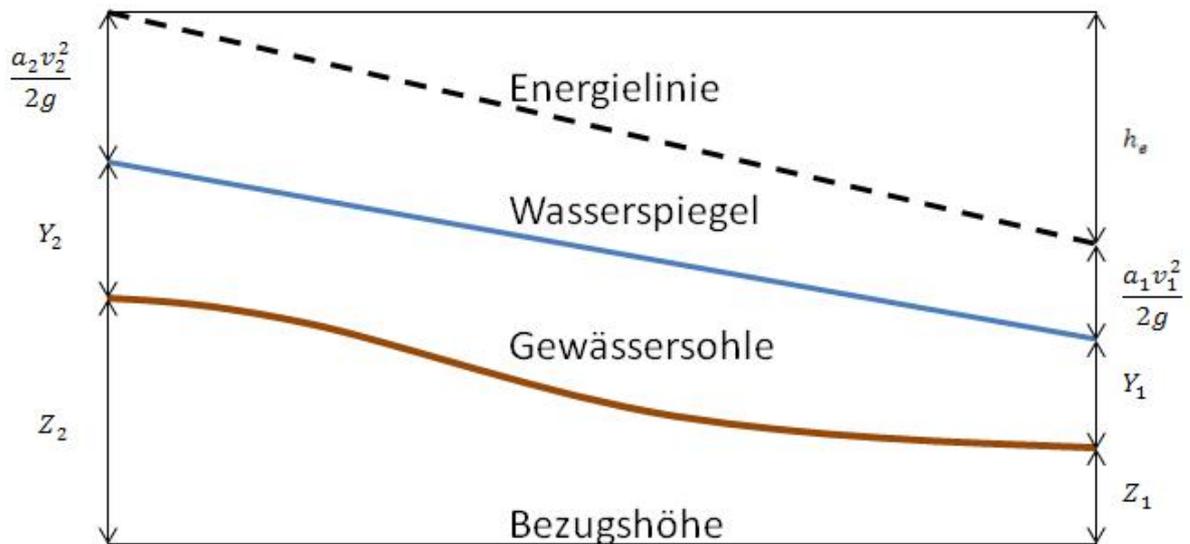
Wie bereits in Abs. 2.3 hervorgehoben, wird die hydrodynamische Modellierung mit der Software HEC-RAS und der Applikation HEC-GeoRAS bearbeitet. HEC-RAS, welches von der U.S. Army Corps of Engineers entwickelt wurde, ermöglicht sowohl stationäre als auch instationäre Berechnungen. In der Master-Thesis werden vorwiegend stationäre Simulationen verwendet. Der folgende Abschnitt beschreibt die hydrodynamischen Grundlagen des eindimensionalen Strömungsmodells mit welchem HEC-RAS arbeitet.

### 2.5.1 Mathematische Grundlagen

Nach U.S. Army Corps of Engineers ( *U.S. Army Corps of Engineers, 2010*) bildet die *Bernoulli*-Gleichung die Grundlage für die eindimensionale Wasserspiegellagenberechnung bei stationäre ungleichförmige Strömungsverhältnisse in HEC-RAS. Für zwei Profile wird über eine iterative Prozedur die Gleichung gelöst. In folgender Gleichung sind diese Profile mit den Indizes 1 und 2 beschrieben:

$$Z_2 + Y_2 = \frac{a_2 v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 = \frac{a_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad (2-24)$$

Mit  $Z_1, Z_2$ : geodätische Höhe [m],  $Y_1, Y_2$ : Wassertiefe im Profil [m],  $v_1, v_2$ : mittlere Geschwindigkeit [m/s],  $a_1, a_2$ : Geschwindigkeitsbeiwert [-],  $g$ : Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>],  $h_e$ : Energieverlusthöhe [m]. Die einzelnen Terme der *Bernoulli*-Gleichung ergeben sich aus der Betrachtung des Energiegleichgewichts (siehe Abbildung 2-9).



**Abbildung 2-9: Energielinienverteilung nach Bernoulli**

Die Energieverlusthöhe  $h_e$  zwischen zwei Profilen setzt sich aus den mittleren Reibungsverlusten und den Energieverlusten, die sich durch die Änderung des Fließquerschnitts ergeben, zusammen. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 v_2^2}{2g} - \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right| \quad (2-25)$$

Mit  $L$ : durchflussgemittelte Fließlänge [m],  $\bar{S}_f$ : mittlerer Reibungsverlustkoeffizient [-],  $C$ : Expansions-, Kontraktionskoeffizient [-]. Die durchflussgemittelte Fließlänge setzt sich hierbei zusammen aus:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (2-26)$$

Mit  $L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$ : Fließlängen zwischen zwei Profilen für linkes und rechtes Flussvorland sowie im Hauptstrom [m],  $\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$ ,  $\bar{Q}_{rob}$ : mittlere Durchflüsse für das linke und rechte Flussvorland sowie dem Hauptstrom [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]. Außerdem setzt sich für zwei Profile der mittlere Reibungsverlustkoeffizient folgendermaßen zusammen:

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right) \quad (2-27)$$

Mit  $Q_i$ : Durchfluss am Profil  $i$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $K_i$ : Abflussfähigkeit am Profil  $i$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]. Die spezifischen Sohlrauheiten, sowie die unterschiedlichen Querprofilgeometrien werden durch die Abflussfähigkeit berücksichtigt. Diese setzt sich aus der Summe der Abflussfähigkeiten für das rechte und linke Vorland sowie des Hauptstroms zusammen. Sie werden jeweils getrennt berechnet:

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \quad (2-28)$$

Mit  $n$ : Rauheitsbeiwert nach *Manning* [ $1/(\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1})$ ],  $A$ : Abflusswirksamer Fließquerschnitt [ $\text{m}^2$ ] und  $R$ : hydraulische Radius [ $\text{m}$ ]. Der Geschwindigkeitsbeiwert berücksichtigt durch eine gewichtete Berechnung die unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilungen in den Vorländern und im Hauptstrom. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$a = \frac{A_t^2 \left( \frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right)}{K_t^3} \quad (2-29)$$

Mit  $A_t$ : Fließquerschnitt des gesamten Profil [ $\text{m}^2$ ],  $A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$ : Fließquerschnitte im linken und rechten Vorland sowie im Hauptstrom [ $\text{m}^2$ ],  $K_t$ : Abflussfähigkeit des gesamten Profil [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$ : Abflussfähigkeit des linken und rechten Vorland sowie des Hauptstromes.

## 2.5.2 Preprocessing des hydrodynamischen Modells

Das Preprocessing des hydrodynamischen Modells wird mit der ArcGIS-Applikation HEC-GeoRAS vorgenommen. HEC-GeoRAS, auch HEC-GIS genannt, sorgt für den Datenaustausch zwischen HEC-RAS und ArcGIS. Mit HEC-GeoRAS werden geometrische Daten aus einem in ArcGIS bestehenden DGM in Form eines Grid exportiert. Außerdem werden Features erstellt, mit der ein Graben oder Fluss dargestellt, sowie Attribute wie

Querschnittsgeometrie und Gewässerstationen, erstellt werden können. Für die Interaktion zwischen HEC-GeoRAS und HEC-RAS sorgt eine Export-/Importschnittstelle. Da lediglich Höheninformationen aus einem DGM vorliegen, werden in der hydrodynamischen Modellierung Verrohrungen vernachlässigt.

Wie bereits erwähnt werden geometrische Informationen des Grabennetzes über die Applikation HEC-GeoRAS auf Grundlage eines im GIS vorhandenen DGM erhoben. Hierzu müssen zunächst die Grabenverläufe über den in ArcGIS vorhandenen Editor digitalisiert werden. Eine Verknüpfung dieser Features findet in HEC-RAS statt. Nach der Digitalisierung werden den erstellten Features ein Gewässer- sowie ein Bereichsname zugewiesen. Weiterhin werden den Features Attribute zugewiesen, wie die Topologie, die die Verknüpfung der Features über den Anfangsknoten und den Endknoten definiert. Auch werden die Längen der Grabenbereiche bestimmt und die Entfernungen zwischen den Anfangs- und den Endknoten definiert. Über den vorhandenen DGM werden schließlich noch Höheninformationen auf die einzelnen Features übertragen. Nachdem die Erstellung des Grabenverlaufes abgeschlossen ist, werden die Querprofile definiert.

Die Implementierung der Querprofile wird hierbei so vorgenommen, dass diese eine Breite von 100 - 120 Metern aufweisen und mit einem Intervall von 100 Metern angeordnet werden. Nachdem die Digitalisierung abgeschlossen ist, erfolgt eine Prüfung auf Überschneidung von Querprofilen. Wenn Überschneidungen auftreten, wird eines der beiden Querprofile entfernt. Nach der Implementierung der Querprofile ist die Erstellung der linken und rechten sowie der zentralen Fließstrecke vorzunehmen. Hierbei wird der Grabenverlauf als zentrale Fließstrecke definiert. Durch Verbinden der Profilenenden miteinander, ist die linke bzw. rechte Fließstrecke zu implementieren. Nach der Erstellung der Fließstrecken sind die Attribute der Querprofile zu erstellen. Zunächst erfolgt die Zuordnung der Querprofile zu den Grabenabschnitten. Daraufhin erfolgt die Stationierung der Querprofile. Auf Grundlage der Fließstrecken erfolgt die Ermittlung der Längen der Fließstreckenabschnitte zwischen den Querprofilen. Dies erfolgt um das linke und das rechte Flussvorland sowie den Kanal zu definieren. Schließlich erfolgt die Zuweisung der Höheninformationen auf Grundlage des DGM.

Über eine Export-/Import-Schnittstelle werden die erstellten Informationen in HEC-RAS integriert. Die genaue Definition des linken und des rechten Vorlandes erfolgt in HEC-RAS. Auch die Erstellung der „Levees“ (Deiche) sowie die Zuweisung der Rauheit geschehen in

HEC-RAS. Hierbei soll mit dem *Manning*-Rauheitsbeiwert von 0,05 gearbeitet werden, welcher einem *Strickler*-Rauheitsbeiwert von  $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  entspricht.

$$k_{st} = \frac{1}{n} \quad (2-30)$$

Mit  $k_{st}$ : *Strickler*-Rauheitsbeiwert [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ] und  $n$ : *Manning*-Rauheitsbeiwert [ $1/(\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1})$ ]. Die gewählte Rauheit ist beispielweise bei stark bewachsenen Erdkanälen aus Sand, Lehm oder Kies vorzufinden (*Jirka & Lang, 2009*).

### 2.5.3 Durchflussermittlung

Für das hydrodynamische Modell sind als Randwerte Durchflusswerte anzugeben. Diese sollten zum Beispiel aus Vermessungsunterlagen entnommen werden. Wenn dies nicht möglich ist, werden die fehlenden Werte mittels einer Stichtagsmessung ermittelt. Zum einen wird der Fließquerschnitt und zum anderen wird die Fließgeschwindigkeit aufgenommen, welche im Anschluss zu Durchflusswerten multipliziert werden. Die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit findet mittels des Messgerätes „MMI Model 2000 FLO-MATE“ statt. Das Modell „Marsh-Mc Birney 2000 Flo-Mate“ ist ein tragbares Durchflussmessgerät, das sowohl für Freiland- als auch für Labormessungen konzipiert ist. Das Gerät misst Fließgeschwindigkeiten in einer Richtung zum elektromagnetischen Sensor, welcher in einer leitenden Flüssigkeit, wie beispielsweise Wasser, angebracht wird. Die Geschwindigkeiten erscheinen auf einer digitalen Anzeige in Meter pro Sekunde. Der Messbereich des Gerätes entspricht  $-0,15 \text{ m/s}$  bis  $6 \text{ m/s}$ .

### 3 Sensitivitätsanalyse des Grundwassermodells

Die Sensitivitätsanalyse ist ein Verfahren zur Abschätzung des Einflusses der Variation einzelner oder mehrerer Eingangsgrößen auf das Simulationsergebnis. Sie dient dazu, Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen von Modellrechnungen und den Zielwerten zu identifizieren. In jedem Grundwassermodell gibt es Parameter und/oder Randbedingungen, die mit mehr oder weniger starken Ungenauigkeiten/Unsicherheiten behaftet sind (*Kinzelbach & Rausch, 1995*). Diese Parameter und Randbedingungen werden im Folgenden einzeln betrachtet und in sinnvollen hydrogeologischen und geohydraulischen Grenzen variiert und die Auswirkungen auf das Modell dokumentiert. Nach Fürst (*Fürst, 2004*) sind die strömungsbestimmenden hydrogeologischen Parameter der reinen Grundwasserströmung die Durchlässigkeit, der Speicherkoeffizient, welcher die entwässerbare Porosität darstellt, und die Mächtigkeit des Aquifers. Um eine einfache Vergleichbarkeit der einzelnen Parameter zu realisieren, wird in Folge ein Sensitivitätsindex eingeführt, der die mittlere Grundwasserspiegeländerung im Modellgebiet anzeigt. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{Bi} - h_{Si})}{n} * 100 \quad (3-1)$$

Mit SI: Sensitivitätsindex [cm],  $h_{Bi}$ : Wasserspiegelhöhe des Basiszustandes am  $i$ -ten Knotenpunkt [m],  $h_{Si}$ : Wasserspiegelhöhe des veränderten Zustandes am  $i$ -ten Knotenpunkt [m],  $n = 43607$ : Anzahl der Knoten [-]. Nachfolgend wird in der Tabelle 3-1 die Sensitivität des Modells unter Verwendung der Ergebnisse des Sensitivitätsindex in folgende fünf Kategorien unterteilt. Die Kategoriegrenzen ergeben sich hierbei aus  $p$ -Quantilen, die auf die Ergebnisse des Sensitivitätsindex angewandt werden.

**Tabelle 3-1: Theoretische Sensitivitätskategorien**

Kürzel	Bezeichnung	Untergrenze	Obergrenze
s-I	gering sensitiv	0,00-Quantil	0,25-Quantil
s-II	wenig sensitiv	0,25-Quantil	0,50-Quantil
s-III	sensitiv	0,50-Quantil	0,75-Quantil
s-IV	sehr sensitiv	0,75-Quantil	0,90-Quantil
s-V	stark sensitiv	0,90-Quantil	1,00-Quantil

Das  $p$ -Quantil ist der Wert einer Variablen, der eine Verteilung von Beobachtungswerten in zwei Abschnitte unterteilt. Links vom  $p$ -Quantil liegt der Anteil  $p$  aller Beobachtungswerte,

rechts liegt der restliche Anteil  $1 - p$ . Für die Abgrenzung der Sensitivitätskategorien sind die aus der Statistik häufig verwendeten Quartile (0,25-Quantil, 0,5-Quantil und 0,75-Quantil) sowie ein Dezil (0,90-Quantil) herangezogen worden.

### 3.1 Betrachtung des Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Als Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  bezeichnet man einen rechnerischen Wert, der die Durchlässigkeit von Böden für Wasser bestimmt. Der  $k_f$ -Wert ist neben der entwässerbaren Porosität und der Mächtigkeit des Aquifers einer der bestimmenden Parameter der Grundwasserströmung des Modells. Da die Mächtigkeit im Modell als konstanter Parameter gilt, wird dieser in der Sensitivitätsanalyse nicht betrachtet. In der Abbildung 3-1 ist die  $k_f$ -Wertverteilung des Modellgebietes dargestellt. Hierbei ist in Abbildung 3-1-A der Layer 1 des Grundwassermodells dargestellt, welcher im Unterschied zum Layer 2, in Abbildung 3-1-B abgebildet, eine zusätzliche Deckschicht mit einem  $k_f$ -Wert von  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s aufweist. Wie in Abs. 2.2.4 eingangs erwähnt, handelt es sich hierbei um eine Auenlehmschicht mit einer Mächtigkeit von 1 – 3 m. Der Layer 3 und der Layer 4 weisen dieselben  $k_f$ -Werteigenschaften wie der Layer 2 auf. Die einzelnen  $k_f$ -Werte sind im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wie folgt verändert worden.

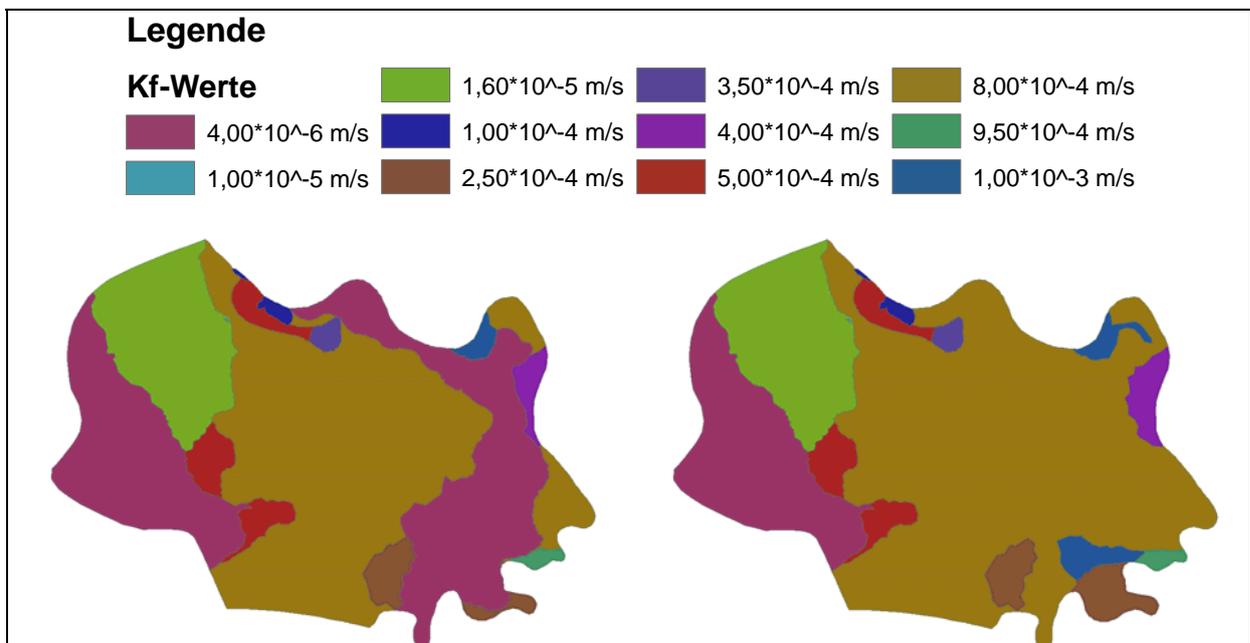


Abbildung 3-1-A:  $k_f$ -Wertverteilung im Layer 1 des Modellgebietes, -B:  $k_f$ -Wertverteilung im Layer 2 des Modellgebietes

Die im Modell angewandten  $k_f$ -Werte bilden hierbei die Basis der Grenzwertbildung, welche nach Dachroth (Dachroth, 2002) folgende Bodenarten zugewiesen werden (siehe Tabelle 3-2). Nach den Größenordnungen der  $k_f$ -Werte der Bodenarten wurden entsprechende Grenzwerte nach Dachroth (Dachroth, 2002) in der nachfolgenden Tabelle festgelegt. Bei den darauffolgenden Simulationsläufen werden die  $k_f$ -Werte einzeln in den festgelegten Grenzen verändert. Als Output der Simulationsläufe sind die Wasserspiegelhöhen der einzelnen Knoten anzusehen, die mit den Wasserspiegelhöhen der einzelnen Knoten der Basisvariante unter Verwendung der Formel 3-1 evaluiert werden.

Aus der nachfolgenden Tabelle 3-2 ist zu entnehmen, dass ein Großteil der getesteten Gebiete als „gering sensitiv“ evaluiert wurden. Lediglich das in Abbildung 3-1 grün eingefärbte Gebiet, das als Brechsand mit einem  $k_f$ -Modellwert von  $1,6 \cdot 10^{-5}$  m/s definiert ist, ist nach einer Verringerung des  $k_f$ -Wertes auf  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s als „sensitiv“ bewertet worden. Auch ist das violett eingefärbte Gebiet mit einem  $k_f$ -Modellwert von  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s, welches nach Dachroth (Dachroth, 2002) als Sand, lehmig, schluffig ausgewiesen ist, nach einer  $k_f$ -Wertabsenkung auf  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s als „wenig sensitiv“ definiert worden.

**Tabelle 3-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der  $k_f$ -Werte**

Bodenart	Bezeichnung	$k_f$ -Werte [m/s]	SI [cm]	Sensitivitäts- kategorie
<b>Sand, grobkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-3}$	-0,03	<b>s-II</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>1 \cdot 10^{-3}</math></b>		
<b>Sand, grobkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-4}$	0,01	<b>s-I</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>9,5 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, grobkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-3}$	-0,01	<b>s-I</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>8 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, grobkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-4}$	0,01	<b>s-I</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>8 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, grobkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-3}$	4,79	<b>s-IV</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>8 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-4}$	0,29	<b>s-III</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>5 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$1 \cdot 10^{-3}$	-2,92	<b>s-IV</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>5 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-5}$	4,00	<b>s-IV</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>4 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$1 \cdot 10^{-3}$	-0,04	<b>s-II</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>4 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-5}$	0,04	<b>s-II</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>3,5 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$1 \cdot 10^{-3}$	-1,31	<b>s-III</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>3,5 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-5}$	1,12	<b>s-III</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>2,5 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, mittelkörnig</b>	Grenzwert	$1 \cdot 10^{-3}$	-0,14	<b>s-II</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>2,5 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, feinkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-5}$	0,02	<b>s-II</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>1 \cdot 10^{-4}</math></b>		
<b>Sand, feinkörnig</b>	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-4}$	-5,65	<b>s-IV</b>
	<b>Modellwert</b>	<b><math>1 \cdot 10^{-4}</math></b>		

	Grenzwert	$2 \cdot 10^{-5}$	2,61	<b>s-IV</b>
	Grenzwert	$2 \cdot 10^{-4}$	-9,38	<b>s-IV</b>
<b>Sand (Brechsand), abgestuft</b>	<b>Modellwert</b>	<b><math>1,6 \cdot 10^{-5}</math></b>		
	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-6}$	22,72	<b>s-V</b>
	Grenzwert	$2 \cdot 10^{-4}$	-0,24	<b>s-II</b>
<b>Sand (Brechsand), abgestuft</b>	<b>Modellwert</b>	<b><math>1 \cdot 10^{-5}</math></b>		
	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-6}$	0,09	<b>s-II</b>
	Grenzwert	$1 \cdot 10^{-5}$	1,12	<b>s-III</b>
<b>Sand, lehmig, schluffig</b>	<b>Modellwert</b>	<b><math>4 \cdot 10^{-6}</math></b>		
	Grenzwert	$5 \cdot 10^{-7}$	13,74	<b>s-V</b>

### 3.2 Betrachtung des effektiven Porenanteils $n_{\text{Peff}}$

Der effektive Porenanteil, auch entwässerbare Porosität genannt, bezeichnet den Porenanteil in einem Gesteinsvolumen, der einen hydraulischen Transport von Fluiden zulässt. Der effektive Porenanteil ist neben dem  $k_f$ -Wert der zweite Parameter, der die Grundwasserströmung im Modell beeinflusst. Nach Hölting und Coldewey (*Hölting & Coldewey, 2009*) sind in Tabelle 3-3 folgende Lockergesteine mit dessen effektiven Porenanteile aufgetragen.

**Tabelle 3-3: Effektiver Porenanteil nach Busch/Luckner (*Hölting & Coldewey, 2009*)**

<b>Lockergestein</b>	<b>effektiver Porenanteil [%]</b>
sandiger Kies	20 – 25
kiesiger Sand	15 – 20
mittlerer Sand	10 – 15
sandiger Schluff	5 – 10

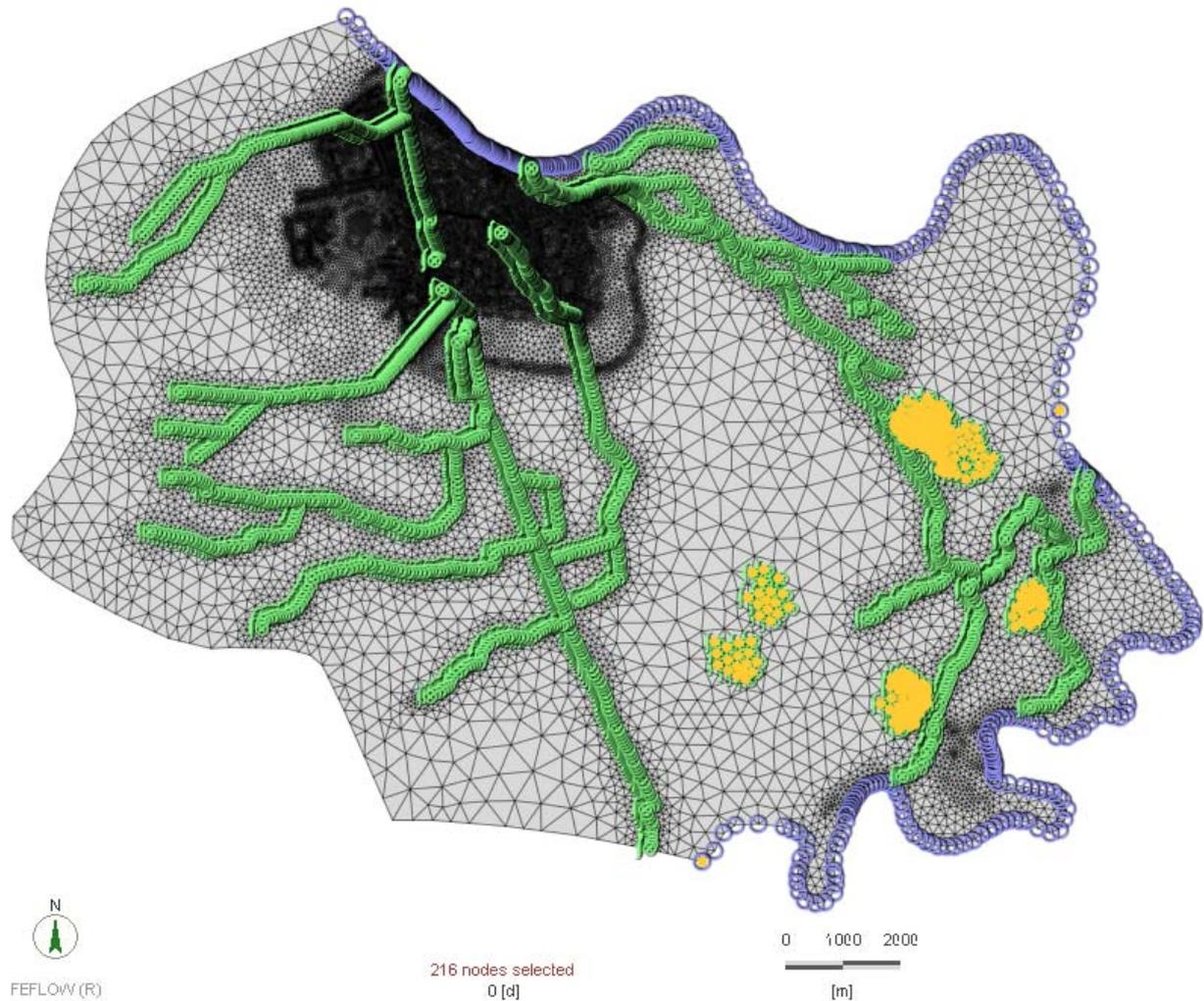
Da sich der effektive Porenanteil von Lockergesteinsarten in 5 % Bereiche unterteilen lässt, sind im Folgenden die Sensitivitätsgrenzen  $\pm 5 \%$  von den Modellwerten festgelegt worden. Nach den erforderlichen Simulationsläufen wird der Output mit der Basisvariante unter Verwendung des Sensitivitätsindex bewertet.

Tabelle 3-4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des  $n_{\text{Peff}}$ 

Lockergestein	Bezeichnung	effektiver Porenanteil [%]	SI [cm]	Sensitivitäts- kategorie
	Grenzwert	30	0,00	s-I
	<b>Modellwert</b>	<b>25</b>		
<b>sandiger Kies</b>	Grenzwert	20	0,01	s-I
<b>sandiger Kies</b>	Grenzwert	25	0,00	s-I
	<b>Modellwert</b>	<b>20</b>		
<b>kiesiger Sand</b>	Grenzwert	15	0,00	s-I
<b>kiesiger Sand</b>	Grenzwert	20	0,00	s-I
	<b>Modellwert</b>	<b>15</b>		
<b>mittlerer Sand</b>	Grenzwert	10	0,00	s-I
<b>mittlerer Sand</b>	Grenzwert	15	-0,11	s-II
	<b>Modellwert</b>	<b>10</b>		
<b>sandiger Schluff</b>	Grenzwert	5	0,00	s-I

### 3.3 Betrachtung der Randbedingungen

Neben den bewerteten Parametern haben auch die Randbedingungen Einfluss auf die Sensitivität von Grundwassermodellen. Das Modellnetz ist in folgender Abbildung 3-2 sowohl mit den selektierten als auch mit den restlichen Randbedingungsknoten der Stand- und Fließgewässer dargestellt. Die selektierten Knoten dienen zur Beeinflussung der einzelnen Randbedingungsabschnitte. So sind über die beiden selektierten Knoten der ersten Randbedingungsart (siehe Abbildung 3-2: gelb markierte der blau eingefärbten Knoten), welche die Pegel Barby und Calbe (Saale) darstellen, alle anderen Randwerte der ersten Art beeinflusst worden. Die gelb markierten Randbedingungsknoten der dritten Art stellen hierbei die im Modellgebiet vorkommenden Seen dar, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse beeinflusst wurden.



**Abbildung 3-2: FEFLOW-Netz mit selektierten Randbedingungen der ersten und dritten Art**

### Randbedingung erster Art

Wie vorhergehend in Abs. 2.4.3 beschrieben, ist die *Dirichlet*-Randbedingung durch die Wasserstände der Elbe und der Saale definiert. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse sind die Wasserstände beider Flüsse auf das Niveau eines HHQ angehoben bzw. eines NNQ gesenkt worden. Daten für diese Ereignisse lagen im Rahmen der Masterarbeit lediglich für den Pegel Barby und den Pegel Calbe (Saale) vor (siehe Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Sensitivitätsprüfung der Randbedingungen ersten Art im Modellbereich

Gewässer	Bezeichnung	Pegel Barby [mNHN]	Pegel Calbe [mNHN]	SI [cm]	Sensitivitäts- kategorie
	NNW	46,53	50,48	-23,23	s-V
<b>Elbe / Saale</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>48,43</b>	<b>52,92</b>		
	HHW	53,72	57,37	66,81	s-V

Simplifiziert wird das Wasserspiegelliniengefälle als konstant angenommen. Das ermöglicht folgende Herangehensweise. Für die beiden Pegel wird jeweils die Differenz des Wasserstandes zwischen Modellwert am Pegel und Extremereignis ermittelt:

$$\Delta h = h_{EX-P} - h_{B-P} \quad (3-2)$$

Mit  $\Delta h$ : Höhendifferenz [m],  $h_{EX-P}$ : Wasserspiegellhöhe des Extremereignisses am Pegel [mNHN],  $h_{B-P}$ : Wasserspiegellhöhe der Basisvariante am Pegel [mNHN]. Die ermittelte Höhendifferenz wird allen Randbedingungsknoten hinzuaddiert, so dass das Wasserspiegelliniengefälle um die Höhendifferenz erhöht oder verringert wird:

$$h_{EX-i} = h_{B-i} + \Delta h \quad (3-3)$$

Mit  $h_{EX-i}$ : Wasserspiegel des Extremereignisses am Modellknoten  $i$  [mNHN],  $h_{B-i}$ : Wasserspiegel der Basisvariante am Modellknoten  $i$  [mNHN],  $\Delta h$ : Höhendifferenz,  $i$ : Index für die Anzahl der Knoten. Nach der Simulation wird mit Hilfe von Formel 3-1 das Modell auf Sensitivität evaluiert.

### Randbedingung zweiter Art

Da in dem gegebenen Grundwassermodell keine *Neumann*-Randbedingungen implementiert sind, konnten diese nicht in die Sensitivitätsanalyse integriert werden.

### Randbedingung dritter Art

Wie in Abs. 2.4.3 beschrieben wird die *Cauchy*-Randbedingungen durch die Stand- und Fließgewässer im Modellgebiet definiert. Für die Analyse der Sensitivität des Modells wurden

die Wasserspiegellagen der größeren Standgewässer, welche in Abs. 2.2.7 definiert sind, variiert. Zum einem wird das Szenario angewandt, dass die Seen als bordvoll betrachtet werden, zum anderen sollen die Seen bis zur Sohle abgesenkt werden.

**Tabelle 3-6: Sensitivitätsprüfung der Randbedingungen dritter Art im Modellbereich**

Gewässer	Bezeichnung	Wasserstand [mNHN]	SI [cm]	Sensitivitäts- kategorie
<b>Kiessee Barby I</b>	Minimal Wert (DGM1)	48,80	-1,02	<b>s-III</b>
	<b>Basisvariante</b>	<b>50,07</b>		
<b>Kiessee Barby II</b>	Maximal Wert (DGM1)	50,50	0,34	<b>s-III</b>
	Minimal Wert (DGM1)	49,35	-0,70	<b>s-III</b>
<b>Kiessee Tornitz</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>51,16</b>		
	Maximal Wert (DGM1)	51,60	0,18	<b>s-II</b>
<b>Großer See</b>	Minimalwert (DGM1)	50,19	-1,04	<b>s-III</b>
	<b>Basisvariante</b>	<b>52,28</b>		
<b>Schachtteiche</b>	Maximalwert (DGM1)	52,60	0,51	<b>s-III</b>
	Minimalwert (DGM1)	50,64	-0,67	<b>s-III</b>
<b>Schachtteiche</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>52,34</b>		
	Maximalwert (DGM1)	53,10	0,24	<b>s-II</b>

### 3.4 Evaluierung der Sensitivitätsanalyse

Wie eingangs erläutert, werden die Sensitivitätskategorien unter Verwendung von Quantilen ermittelt. Nach der Ermittlung der Sensitivitätsindizes erfolgt so eine Abgrenzung der Sensitivitätsbereiche, wie in Tabelle 3-7 vorgenommen. Die Verteilung der einzelnen Indizes in Klassen wurde daraufhin vorgenommen (siehe vorhergehende Tabellen).

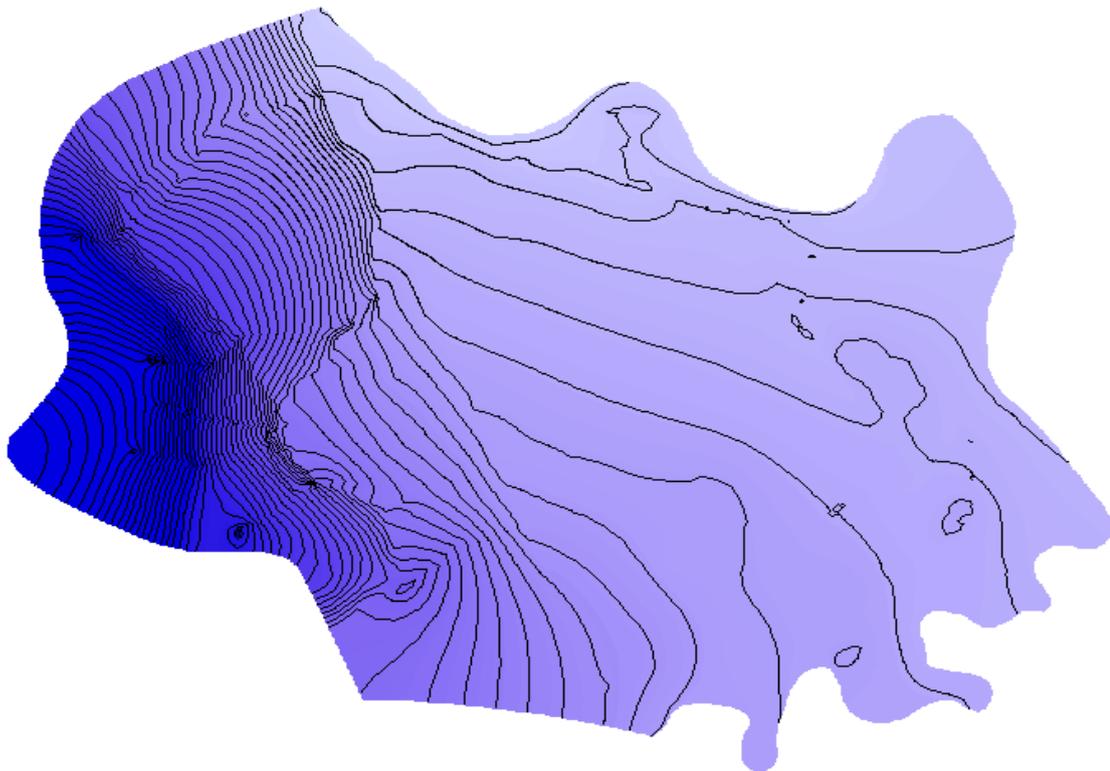
**Tabelle 3-7: errechnete Sensitivitätskategorien**

Kürzel	Bezeichnung	Kategoriegrenze
s-I	gering sensitiv	SI < 0,02
s-II	wenig sensitiv	0,02 <= SI < 0,26
s-III	sensitiv	0,26 <= SI < 1,64
s-IV	sehr sensitiv	1,64 <= SI < 10,25
s-V	stark sensitiv	SI >= 10,25

Es ist festgestellt worden, dass sich eine Veränderung der entwässerbaren Porosität um  $\pm 5\%$  „gering sensitiv“ auf das Modell auswirkt. Die Veränderung der Randbedingungen des Modells wirken „sensitiv“ bis „stark sensitiv“ auf das Modell. Wobei die *Dirichlet*-Randbedingungen „stark sensitiv“ und die *Cauchy*-Randbedingungen sich „sensitiv“ auf das Modell einwirken. Zudem ist festgestellt worden, dass sich eine Veränderung der Durchlässigkeit von „gering sensitiv“ bis „stark sensitiv“ auf das Modell auswirken kann. Dies liegt einerseits an den unterschiedlichen Gebietsgrößen und andererseits wurde festgestellt, dass mit abnehmender Durchlässigkeit der Parameter sensitiver wird.

## 4 Analyse des Basiszustandes

Die Basisvariante, die den Grundwasserstand vom 17.03.2012 im Modellgebiet darstellt, bildet in den weiteren Analysen die Grundlage für die Beurteilung der Effektivität der einzelnen Szenarien, da sie für einen Vergleich zwischen getestetem Szenario und Basisvariante Anwendung findet. Nachdem im Abs. 2.4.4 beschriebenen Verfahren sind die Simulationsergebnisse in das GIS überführt worden. Es entsteht folgende Abbildung, die den Grundwasserspiegel mit zugehörigen Isohypsen darstellt. Zusätzlich ist im Anhang 9.5 unter Kartenwerk Teil 1 die dazugehörige „Karte 03 Grundwassergleichenplan Basisvariante“ hinterlegt. Die höheren Grundwasserlagen sind hierbei dunkler eingefärbt als die tieferen Grundwasserlagen. Des Weiteren sind die Isohypsen so angelegt, dass sie mit einem Vielfachen der Ein-Meter-Äquidistanz vom Nullniveau erreicht werden können. Das Modellgebiet wird von Westen her in nordöstlicher Richtung vom Grundwasser durchströmt.



**Abbildung 4-1: Modellierter Grundwasserspiegel der Basisvariante mit Isohypsen**

Um eine Abschätzung von potenziell betroffenen Gebieten zu erlangen, muss zusätzlich zum Modellgrundwasserstand ein Zielgrundwasserstand definiert werden. Allgemein kann gesagt werden, dass wenn der Zielgrundwasserstand über dem Modellgrundwasserstand liegt, dieser Bereich nicht gefährdet ist. Liegt der Modellgrundwasserstand über dem Zielgrundwasserstand, dann ist das Gebiet potenziell gefährdet. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$GP_i = h_{Z,i} - h_{B,i} \quad (4-1)$$

Mit  $GP_i$ : Gefährdungspotenzial in i-ter Zelle [m],  $h_{B,i}$ : Höhe des Grundwasserspiegels der Basisvariante in i-ter Zelle [mNHN],  $h_{Z,i}$ : Höhe des Zielgrundwasserstandes in i-ter Zelle [mNHN]. Als Ergebnis entsteht so eine Karte für den Modellbereich, die eine Unterteilung von betroffenen und nicht betroffenen Gebieten vornimmt.

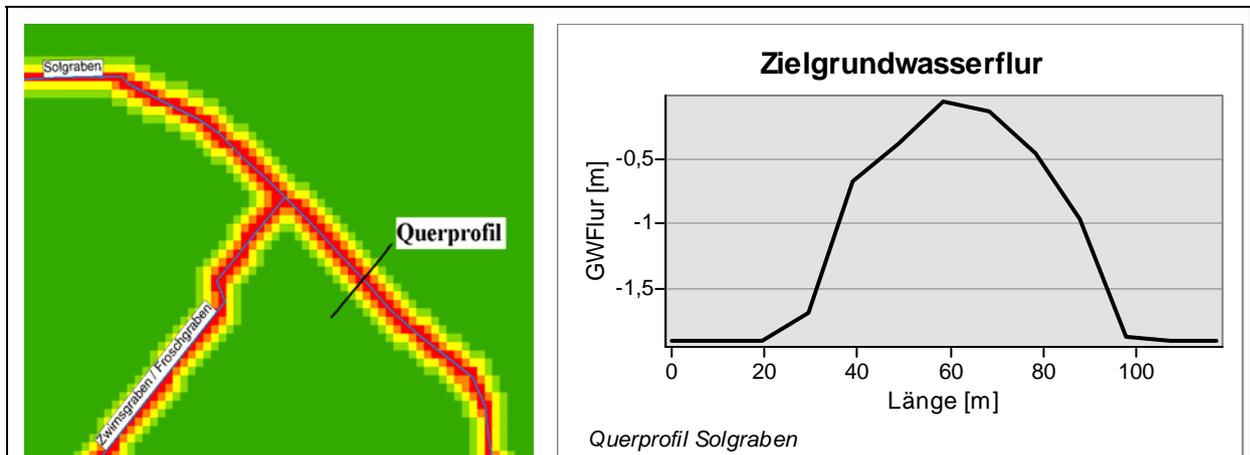
#### 4.1 Modellierung des Zielgrundwasserstandes

Der Zielgrundwasserstand (ZGWS) soll so definiert sein, dass eine Vernässung von Kellern ausgeschlossen werden kann. Aus diesem Grund wird der ZGWS anhand der Tiefe der Kellersohlen definiert. Da keine flächendeckende Datengrundlage der Kellertiefen vorhanden ist und da eine Vermessung der Kellertiefe aller Kellersohlen im Modellgebiet zu aufwendig wäre, wurde ein pauschaler Wert für die Kellertiefe angenommen. Nach Reinstorf und Kramer (*Reinstorf & Kramer, 2013*) beträgt dieser 1,6 m unter GOK<sup>11</sup>. Dieser Wert wurde mit dem Baudezernat der Stadt Schönebeck (Elbe) abgestimmt und als realistisch eingeschätzt (*Reinstorf & Kramer, 2013*). Auch ist nach Reinstorf und Kramer (*Reinstorf & Kramer, 2013*) ein Sicherheitswert von 0,3 m nötig, um eventuell auftretende Kapillarkräfte zu berücksichtigen und um einen Puffer für die Ungenauigkeit der Annahme zu haben. Es bildet sich eine Grundwasserflur von 1,9 m aus. In Bereichen nahe von Fließgewässern im Modellbereich kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Grundwasserflur von 1,9 m eingehalten wird. Es wird davon ausgegangen, dass bei den vorherrschenden Gewässern an der Sohle eine Grundwasserflur von 0 m unter GOK anliegt, sowie dass diese eine Dränweite von 20 – 30 m besitzen. Das heißt, dass nach 20 – 30 m Entfernung vom Gewässer eine Grundwasserflur von 1,9 m erreicht wird. Unter Verwendung des ArcHydro-Tools 9 konnten

---

<sup>11</sup> GOK = Geländeoberkante

diese Eigenschaften der Grundwasserflur hinzugefügt werden. Als Ergebnis wurde ein Grid für den Modellbereich erzeugt, welches mit einer Zellenweite von 10 m x 10 m versehen wurde. Aus der „Karte 04 Flurabstandskarte des Zielgrundwasserstandes“ im Anhang 9.5 Kartenwerk Teil 1 wurde folgendes Beispiel gewählt.



**Abbildung 4-2: Beispiel Zielgrundwasserflur am Solgraben , -A: Lage des Profils, -B: Flurprofil**

Aus Abbildung 4-2-A ist die Lage des Beispielprofils ersichtlich. Außerdem kann die Zielgrundwasserflur entlang des Solgraben bzw. des Zwirnigraben/Froschgraben entnommen werden. Dunkelgrün eingefärbt ist hierbei ein Flurabstand von 1,9 m, die rot eingefärbten Bereiche bilden hierbei eine Grundwasserflur von annähernd 0 m. Aus der Abbildung 4-2-B kann die Zielgrundwasserflur entnommen werden. Von 0 m bis 20 m und von ca. 98 m bis 120 m Weite im Beispielprofil herrscht ein Flurabstand von 1,9 m vor. Bei ca. 58 m findet man einen Flurabstand von annähernd 0 m vor, dass bedeutet das sich dort die Sohle des Gewässer befindet. In den Zwischenbereichen wird eine GW-Flur zwischen 0 und 1,9 m erzeugt.

Nach der Modellierung der Zielgrundwasserflur ist eine Erzeugung des eigentlichen Zielgrundwasserstandes möglich, indem die Zielgrundwasserflur von dem DGM1 des Modellbereiches subtrahiert wird. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$h_{Z,i} = h_{DGM,i} - h_{ZF,i} \quad (4-2)$$

Mit  $h_Z$ : Zielgrundwasserstand in i-ter Zelle [mNHN],  $h_{DGM}$ : Geländehöhe aus DGM1 in i-ter Zelle [mNHN],  $h_{ZF}$ : Zielgrundwasserflur in i-ter Zelle [m]. Für die Bewertung der Szenarien

lassen sich nun übersichtliche Karten und Darstellungen erzeugen, welche den Modellbereich abdecken und die leicht visuell bewertet werden können.

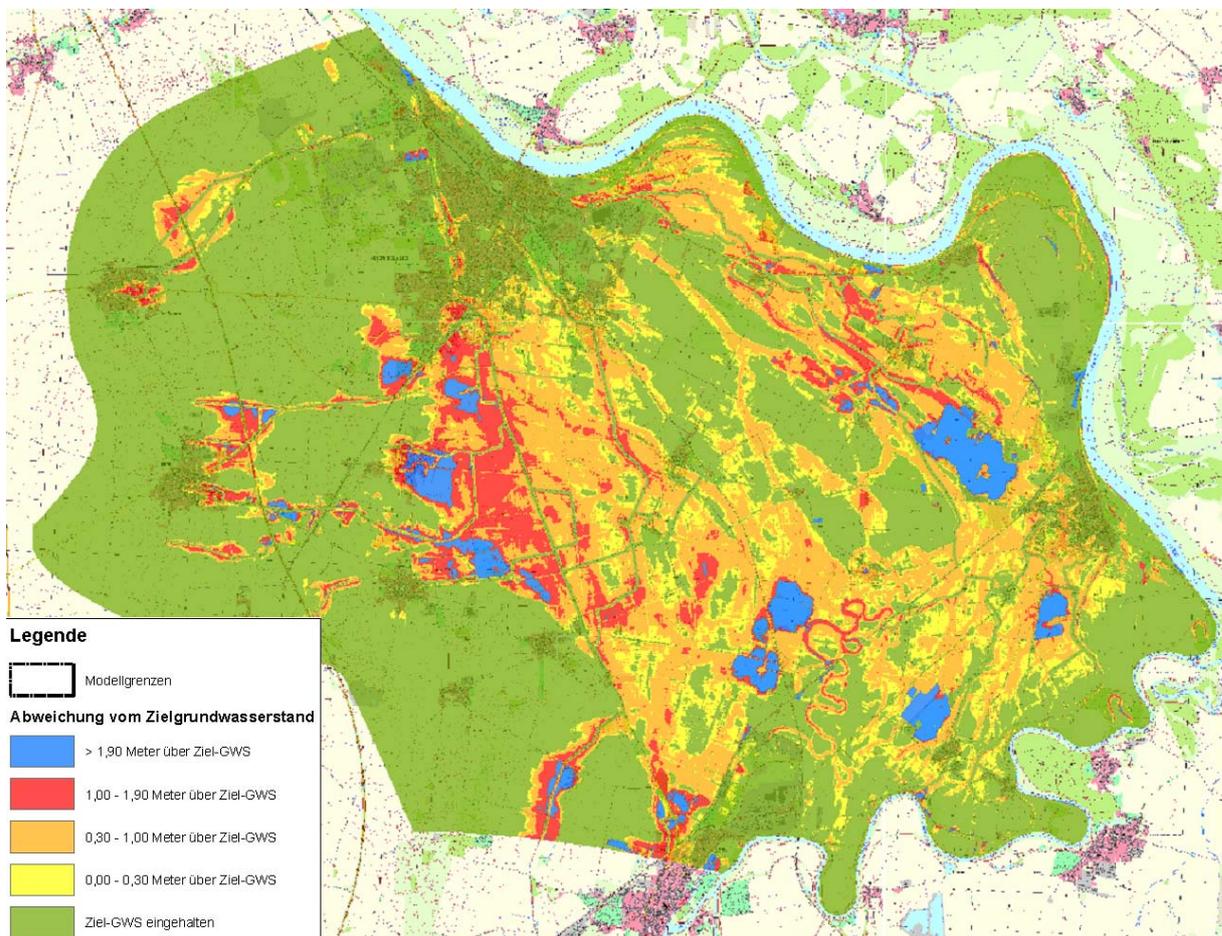
## 4.2 Abweichungen vom Zielgrundwasserstand im Modellgebiet

Die Abbildung 4-3 beschreibt die Abweichung des Basiszenario von dem ZGWS. Das bedeutet, dass Flächen, die unterhalb des ZGWS liegen, grün eingefärbt sind und somit kein Schadenspotenzial aufweisen. Flächen die andersfarbig gekennzeichnet sind, können somit ein Schadenspotenzial aufweisen. Es sei jetzt der Fokus auf urbane Gebiete gelegt, wo verbreitet Gebäude mit Keller erbaut wurden. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Kellersohle verbreitet bei einer Tiefe von 1,60 m unter GOK vorkommt, sind die gelblich eingefärbten Gebiete die Gebiete, in denen sich der Grundwasserspiegel auf dem Niveau der Kellersohle bzw. bis 30 cm unter Kellersohle befindet. Gebiete, in denen eine Kellervernässung auftreten kann und in denen der Grundwasserspiegel sich nicht über dem Niveau der GOK befindet, sind in zwei Kategorien zu unterteilen. Gebiete, die von Kellersohle bis 1,00 m unter GOK reichen sind orange dargestellt. Flächen, in denen sich der Grundwasserspiegel in einem Bereich zwischen 1,00 m unter GOK und dem Niveau der GOK befinden, sind rötlich eingefärbt. An der Oberfläche vernässter Gebiete, also Gebiete, in dem der Grundwasserspiegel über GOK liegt, sind bläulich dargestellt. Im Anhang 9.5 Kartenwerk Teil 1 befindet sich die dazu gehörige „Karte 05 Abweichung Basisvariante zum ZielGWS“.

Bei einer Betrachtung des Modellbereiches ist festzustellen, dass der Grundwasserspiegel der Basisvariante den ZGWS großflächig verletzt. Vor allem die Gebiete im östlichen sowie im zentralen Teil des Modellgebietes sind betroffen. Auch ist anzumerken, dass die Kiesseen bei Barby (Elbe) und Tornitz sowie die Schachteiche und der Große See als Flächen gekennzeichnet sind, in welchen der Grundwasserspiegel über der GOK liegt. Dies ist realistisch, da angenommen wird, dass sich der Grundwasserspiegel auf dem Niveau des Wasserspiegels befindet. Somit wird bei diesen Flächen eine Verletzung des ZGWS hingenommen. In den bläulich eingefärbten Arealen südlich von Schönebeck (Elbe) trifft diese Annahme nicht zu, da dort keine größeren Standgewässer vorzufinden sind. Derzeit überprüft die DHI-WASY ob in diesen Gebieten Vernässungen aufgetreten sind oder ob Ungenauigkeiten im Modell vorhanden sind. Allgemein ist festzustellen, dass der südliche Teil der Stadt Schönebeck (Elbe) insbesondere die Gebiete Sachsenland, Felgeleben und

Streitfeld mit Vernässungsproblemen zu kämpfen haben. Nach Reinstorf und Kramer (*Reinstorf & Kramer, 2013*) werden diese Gebiete als Prioritätsgebiete bezeichnet. Außerdem sind Ortschaften südlich von Schönebeck (Elbe) wie Eggersdorf und Gnadau betroffen.

Weitere Gebiete mit Vernässungserscheinungen befinden sich im östlichen Teil des Modellgebiets. In diesem Areal liegt die Einheitsgemeinde Stadt Barby mit den Ortsteilen Barby (Elbe), Gnadau, Glinde, Wespen, Pömmelte und Tornitz. Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen sowohl einer Kiessee-Erweiterung als auch die Analyse zur Auswirkung unterschiedlicher Seewasserstände auf die Grundwassersituation in diesen Gebieten untersucht. Des Weiteren wird untersucht, ob eine Grundwasserbeeinflussung durch Manipulation der Seen im Bereich von Schönebeck (Elbe) entstehen kann.



**Abbildung 4-3: Abweichung vom Zielgrundwasserstand**

### 4.3 Ermittlung der Prioritätsflächen

Nachdem der Zielgrundwasserstand für den Modellbereich ermittelt worden ist, werden nachfolgend Prioritätsgebiete für die Einheitsgemeinde Stadt Barby definiert. Diese sollen Flächen umfassen, welche für die Ortsteile Barby (Elbe), Gnadau-Döben, Tornitz-Werkleitz, Pömmelte, Wespen und Glinde relevant sind. Auch soll die Festsetzung der Prioritätsflächen unter Berücksichtigung der Flächennutzungsplanung der Einheitsgemeinde erfolgen. Dies ist nicht realisierbar, da die Einheitsgemeinde Stadt Barby nicht über einen flächendeckenden Flächennutzungsplan verfügt. Aus diesem Grund stützen sich die weiteren Untersuchungen auf die Karte der Flächennutzung. Ziel ist es, anhand der Flächennutzungskarte zunächst die Flächen der einzelnen Ortsteile zu definieren, welche Gebäude mit Keller beinhalten könnten. Daraus wird dann im nächsten Schritt die „Karte 29 Grundwassergefährdete urbane Flächen“ erstellt. Unter dieser Prämisse und unter Verwendung der beschriebenen Informationen aus Abs. 2.2.5 rücken die vier folgenden Nutzungskategorien in den Fokus: Wohnbauflächen, Industrie- und Gewerbeflächen, Flächen gemischter Nutzung und Flächen besonderer Nutzung. Alle Flächen, die dieser Nutzung unterliegen und für die einzelnen Ortsteile der Einheitsgemeinde Stadt Barby relevant sind, sind in der Abbildung 4-4-A dargestellt. Eine detaillierte Ansicht ermöglicht hierbei die „Karte 23: Prioritätsflächen“, welche im Anhang 9.6 im Kartenwerk Teil 2 hinterlegt ist.



Abbildung 4-4-A: Prioritätsflächen, –B: Grundwassergefährdete urbane Flächen

Für eine weitere Betrachtung der grundwassergefährdeten urbanen Flächen ist es notwendig, zusätzlich die Abweichungen der Basisvariante vom Zielgrundwasserstand in den Prioritätsflächen einfließen zu lassen. Hierbei werden lediglich die Teilflächen der Prioritätsflächen betrachtet, in denen der Grundwasserspiegel den Zielgrundwasserstand übersteigt (Vergleich zu Abs. 4.2). Die unter diesen Eigenschaften generierten Flächen sind in der Abbildung 4-4-B (rechte Abb.) dargestellt. Für eine detaillierte Betrachtung der grundwassergefährdeten urbanen Flächen ist die „Karte 29 Grundwassergefährdete urbane Flächen“ geeignet.

## 5 Analyse der Standgewässer

Einen weiteren Schwerpunkt der Aufgabenstellung bildet die Analyse der Standgewässer im südöstlichen Teil des Modellgebietes. Hierbei soll zum einem die Auswirkung von Wasserstandsänderungen der einzelnen Seen auf die Grundwassersituation und zum anderen der Einfluss des Szenarios einer Kiessee-Erweiterung auf die Grundwassersituation untersucht werden. Es stellt sich hierbei die Frage, ob und in welchen Maße Veränderungen der Standgewässer im Modellgebiet Einfluss auf die Grundwassersituation speziell für die Einheitsgemeinde Stadt Barby und der Stadt Schönebeck (Elbe) nehmen.

Wie eingangs in Abs. 2.2.7 erwähnt, befinden sich fünf größere Standgewässer im südöstlichen Teil des Modellbereiches. Diese sind mit „Kiessee Barby I“ und „Kiessee Barby II“ sowie „Kiessee Tornitz“, „Großer See“ und „Schachtteiche“ benannt worden. In dem folgenden Abschnitt wird nun analysiert in welchem Umfang Wasserstandsänderungen der benannten Seen Einfluss auf die Grundwassersituation haben.

### 5.1 Einfluss des Wasserstandes auf die Grundwassersituation

Um den Einfluss der Seewasserstände auf die Grundwassersituation untersuchen zu können, ist es notwendig, Wasserstände aus dem vorhandenen Grundwassermodell der Basisvariante zu extrahieren. Dies gelingt unter der Annahme, dass wie in Abs. 2.4.3 erläutert, der Grundwasserspiegel über das hydraulische Potenzial Eingang in die Formel 2-17 findet.

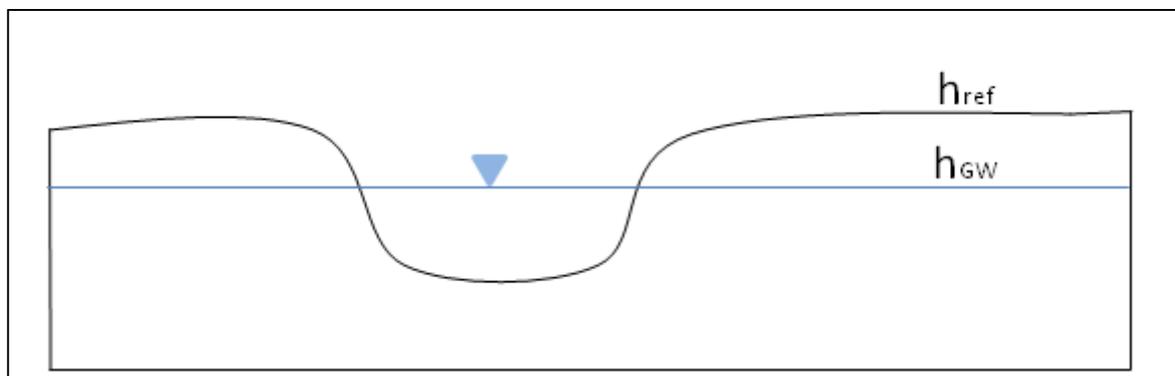


Abbildung 5-1: Beispiel Wasserstände in einem Seen

Anhand der Abbildung 5-1 ist anzunehmen, dass der Grundwasserspiegel den Seewasserspiegel repräsentiert. Dies gilt für kleine Standgewässer in guter Näherung. Somit kann der Seewasserspiegel unter Verwendung der *Cauchy*-Randbedingung festgelegt und manipuliert werden. Nun werden unter Verwendung des DGM1 für jeden See zwei Extremszenarien generiert. Wobei in dem einen Szenario der Wasserstand so erhöht wird, dass ein bordvoller Zustand erreicht wird und in dem zweiten Szenario der Wasserstand so gesenkt wird, dass dieser auf Sohlniveau ist. Es ist anzumerken, dass die DGM-Höhen im Bereich der Seen nicht die Seesohle widerspiegeln, diese liegen höchstwahrscheinlich tiefer. Grund hierfür ist, dass das DGM, welches über das Airborne-Laserscanning-Verfahren aufgenommen wurde, hinsichtlich der Gewässerflächen nicht vollständig korrigiert vorliegt. DGM benötigen eine Bereinigung, da über das Airborne-Laserscanning-Verfahren DOM<sup>12</sup> aufgenommen werden, welche die Geländeoberfläche samt aller befindlichen Objekt (Bebauung, Vegetation, Gewässer usw.) beinhalten. Diese Objekte müssen bereinigt werden, um ein DGM zu modellieren. Da keine anderen Werte für die Modellierung zur Verfügung standen, wurde mit den DGM-Werten simuliert. Nach den Simulationsläufen sind die Ergebnisse über das Postprocessing aus Abs. 2.4.4 sowohl in das Shape-Format als auch in das Karten-Format überführt worden.

### 5.1.1 Analyse des „Kiesees Barby I“

Der „Kiessee Barby I“, auch Seepark genannt, ist einer von zwei Seen in der direkten Umgebung des Ortsteiles Barby (Elbe) der Einheitsgemeinde Stadt Barby. Er ist das flächenmäßig größte Standgewässer im Modellbereich und umfasst eine Fläche von ca. 133 ha. Der „Kiessee Barby I“ ist ein durch Kiesförderung entstandenes, vom Grundwasser gespeistes Gewässer und weist nach LHW (*LHW, 2011*) eine durchschnittliche Tiefe von 6,9 m und eine maximale Tiefe von bis zu 12,7 m aus.

Aus der Tabelle 2-1 ist zu entnehmen, dass im Grundwassermodell eine *Cauchy*-Randbedingung von 50,07 mNHN angesetzt wurde. Des Weiteren befindet sich die Sohle des „Kiesees Barby I“ nach DGM-Daten auf dem Niveau von ca. 48,80 mNHN. Dies wird als unrealistisch eingeschätzt, da an diesem Standgewässer eine mittlere Tiefe von 6,9 m vorherrscht. Da keine weiteren Sohl-Daten für die Arbeit zur Verfügung stehen, wird unter

---

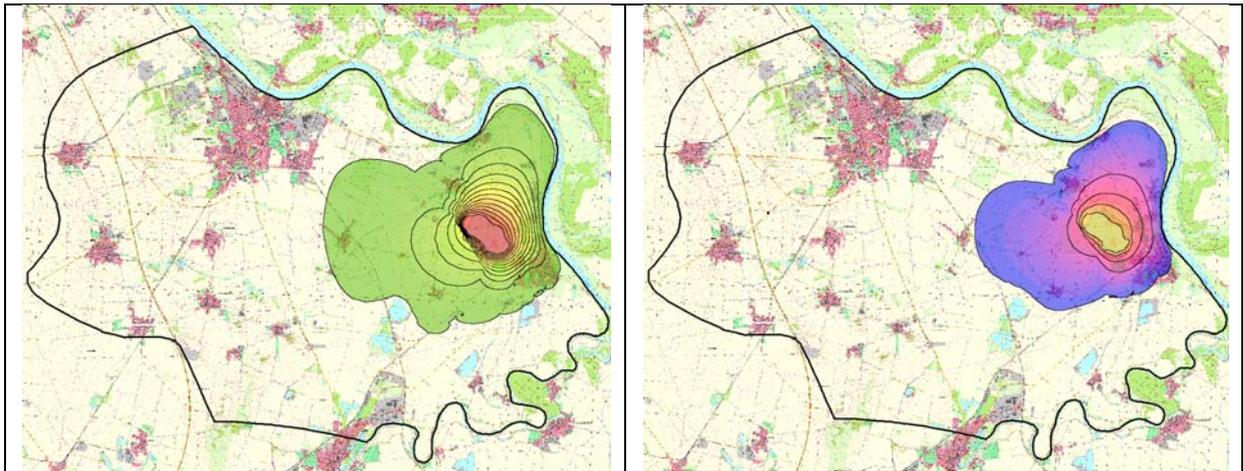
<sup>12</sup> Digitales Oberflächenmodell

Vorbehalt die DGM-Sohle als Gewässersohle verwendet. Bordvoll ist der See bei einem Wasserstandsniveau von 50,50 mNHN.

**Tabelle 5-1: Wasserstände „Kiessee Barby I“**

Gewässer	Bezeichnung	Wasserstand [mNHN]
	extremer Minimal Wert	43,17
	Minimal Wert (DGM1)	48,80
<b>Kiessee Barby I</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>50,07</b>
	Maximal Wert (DGM1)	50,50

Nachdem die Randbedingungen neu festgesetzt und die Szenarien in FEFLOW berechnet wurden, konnten die Ergebnisse in das GIS überführt werden und stehen nun sowohl im Shape-Format als auch im Kartenformat zur Verfügung. In der Abbildung 5-2 sind sowohl das Szenario einer Wasserstands-Absenkung (Abbildung 5-2-A) als auch das Szenario einer Wasserstandserhöhung (Abbildung 5-2-B) dargestellt. Eine detailliertere Darstellung ist im Anhang 9.5 „Karte 06 Wasserstandsszenario I-A“ hinterlegt. Aus dieser ist zu entnehmen, dass eine Grundwasserstandsabsenkung bis zu 1,28 m stattfindet. Die Ausprägung des „Absenktrichter“ reicht im Westen vom Ortsteil Gnadau bis im Osten an die Elbe (Ortsteil Barby (Elbe)) sowie im Norden an die Elbe bei dem Ortsteil Glinde. Im Süden wird der „Absenktrichter“ von weiteren größeren Standgewässern begrenzt. Die auffallende Abgrenzung im Südwesten des „Absenktrichters“ zum „Großen See“ entsteht durch die Festsetzung der Randbedingungen der dritten Art in diesem Gebiet. Auch im Westen und Norden wird der „Absenktrichter“ durch die *Dirichlet*-Randbedingungen der Elbe begrenzt. Durch diese statischen Begrenzungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass zum einen eine Beeinflussung der Wasserstände der Seen „Kiessee Barby II“ sowie des „Großen Sees“ und der „Schachtteiche“ stattfinden kann. Auch kann ein Einfluss auf die Elbe nicht ausgeschlossen werden. Für die Grundwassersituation der Städte Calbe (Saale) sowie Schönebeck (Elbe) kann keine Beeinflussung nachgewiesen werden. Für die Einheitsgemeinde Stadt Barby mit den Ortsteilen Barby (Elbe), Gnadau, Pömmelte, Wespen und Glinde, welche in dem Bereich des „Absenktrichters“ liegen, kann ein Einfluss nachgewiesen werden. Die Ausprägtheit des Einflusses kann aus der „Karte 06 Wasserstandsszenario I-A“ im Anhang 9.5 entnommen werden.



**Abbildung 5-2-A: Senkung Wasserspiegel Kiesesee Barby I, -B: Erhöhung Wasserspiegel Kiesesee Barby I**

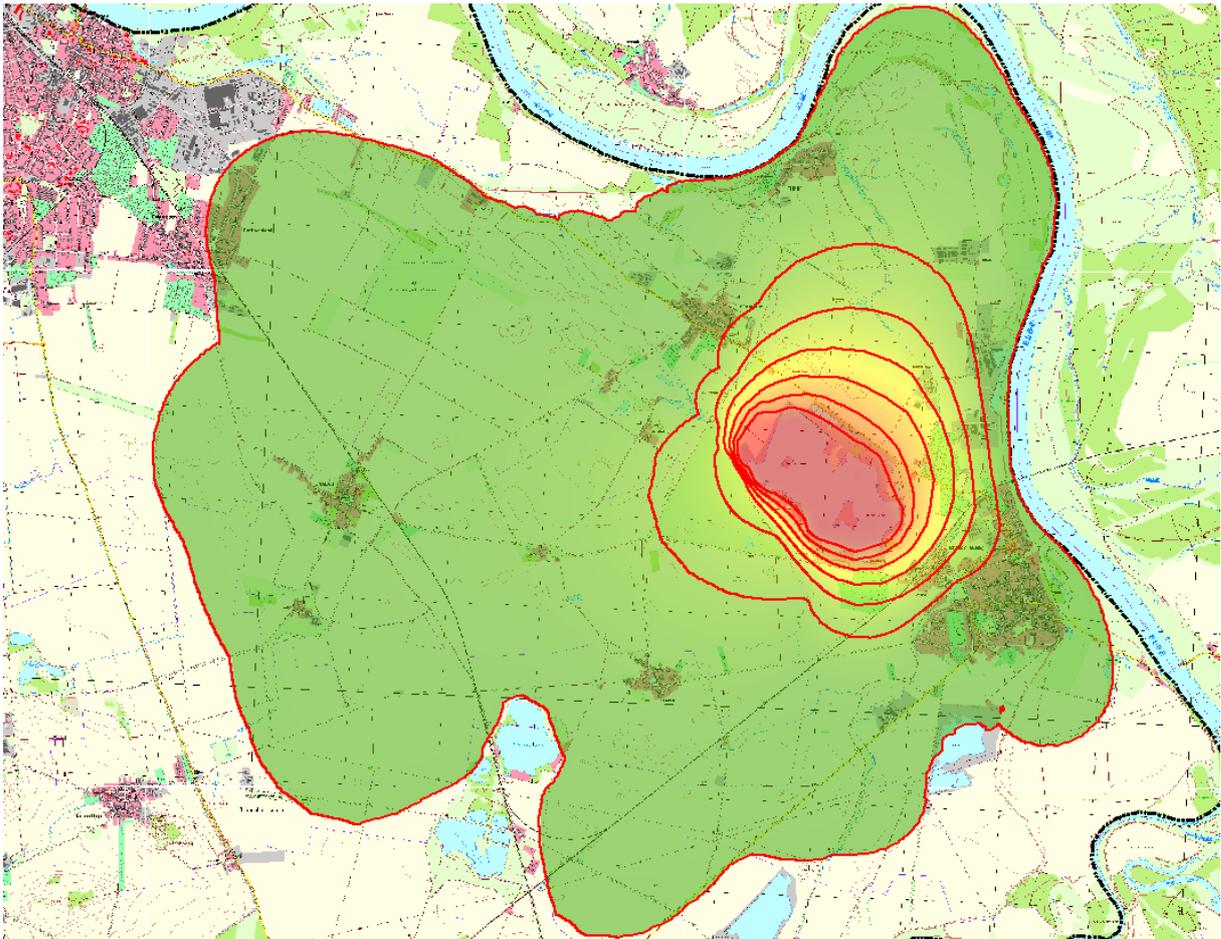
Ein ähnliches Bild lässt sich aus der Abbildung 5-2-B ableiten. In diesem Szenario wurde der Seewasserstand erhöht, somit entsteht auch eine Erhöhung des Grundwasserspiegels, im Laufe der Arbeit „Grundwasserberg“ genannt. Hierbei kann aus dem Anhang 9.5 aus der „Karte 07 Wasserstandsszenario I-B“ eine Erhöhung des Grundwasserspiegels von bis zu 0,44 m entnommen werden. Da nur im Vergleich zur Wasserstands-Absenkung von 1,27 m (50,07 mNHN – 50,50 mNHN), eine Wasserstandserhöhung von rund 0,43 m (50,50 mNHN - 50,07 mNHN) stattfinden kann, ist der Einfluss weniger ausgeprägt (siehe Abbildung 5-2). Auffällig ist, dass die Maximalwerte der Grundwasserabsenkung (1,28 m) bzw. der Grundwassererhöhung (0,44 m) mit der Wasserstands-Absenkung von 1,27 m bzw. der Wasserstandserhöhung von 0,43 m korrespondieren. Dieser Fakt sagt aus, der Seewasserstand um diese Werte abgesenkt/angehoben wird und das der Einfluss der Wasserstandsveränderung mit zunehmender Entfernung zum See abnimmt. Durch die geringere Veränderung des Wasserspiegels, ist auch ein geringerer Einfluss auf dem Grundwasserspiegel zu vermerken.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, wird angenommen, dass eine durchschnittliche Wassertiefe von 6,9 m im „Kiesesee Barby I“ vorhanden ist. Aus diesem Grund wird ein zusätzliches Szenario generiert, welches die Veränderung der Grundwassersituation bei einer Wasserstandsabsenkung von 6,9 m beschreibt. Hierzu wurde die *Cauchy*-Bedingung im Bereich des „Kiesees Barby I“ auf ein Niveau von 43,17 mNHN abgesenkt (siehe Tabelle 5-1). Die Ergebnisse der Simulation sind nach den Verfahren aus Abs. 2.4.4 in das GIS integriert worden. Aus der Absenkung der *Cauchy*-Randbedingung folgt eine

Grundwasserstandsabsenkung, welche in Abbildung 5-3 dargestellt ist. Hierbei werden sind die Isohypsen rot eingefärbt, da diese nicht wie in den anderen Szenarien alle 0,1 Meter gesetzt worden, sondern alle Meter eine Isohypse gesetzt wurde.

Aus der Abbildung 5-3 ist zu entnehmen, dass der „Absenktrichter“ durch die umliegenden Randbedingungen begrenzt wird. So werden die nordöstlichen sowie die östlichen Grenzen von den *Dirichlet*-Randbedingungen der Elbe beeinflusst. An dem südlichen Grenzen des „Absenktrichters“ wird dieser wiederum von den *Cauchy*-Randbedingungen des „Kiessees Barby II“, des „Kiessees Tornitz“ und von dem Großen See beeinflusst. Zudem ist aus der „Karte 28 Wasserstandsszenario I-C“ aus Anhang 9.6 eine maximale Grundwasserabsenkung von 6,98 m zu entnehmen. Somit weicht die maximale Grundwasserabsenkung nur marginal von der Wasserstandsabsenkung von 6,90 m ab.

Auch wird aus der Karte 28 ersichtlich, dass dieses Szenario im Ortsteil Barby (Elbe) Grundwasserabsenkungen von ca. 0,1 m – 3 m hervorruft. Auch in dem Ortsteil Pömmelte kommt es zu Absenkungen des Grundwasserspiegels von bis zu einem Meter. Des Weiteren liegen in Wespen und Glinde Grundwasserabsenkungen von bis zu 0,3 m vor. In dem Ortsteil Gnadau wird der Grundwasserspiegel lediglich um 0,1 m gesenkt. Für die Stadtteile Felgeleben und Sachsenland der Stadt Schönebeck (Elbe) wird durch das Wasserstandsszenario I-C, welches eine extreme Absenkung des Wasserstandes beinhaltet, die dortige Grundwassersituation nur marginal beeinflusst.



**Abbildung 5-3: extreme Senkung des Wasserspiegels des Kiessee Barby I**

### **5.1.2 Analyse des „Kiessee Barby II“**

Der zweite See in der direkten Umgebung des Ortsteils Barby (Elbe) ist der „Kiessee Barby II“, auch Kieswerk Süd genannt. Er liegt südlich von Barby (Elbe) und umfasst eine Fläche von ca. 28 ha. Die Flächenermittlung findet bei allen Standgewässern im Modellbereich auf Grundlage der ATKIS-Daten statt. Wie der „Kiessee Barby I“ ist auch der „Kiessee Barby II“ ein von Grundwasser gespeistes Gewässer, welches durch den in der Region verbreiteten Kiesabbau entstanden ist. Er weist eine Maximaltiefe von bis zu 10 m auf. Somit kann gesagt werden, dass die DGM-Höhen von der Sohle des Sees nicht mit der Seetiefe übereinstimmt.

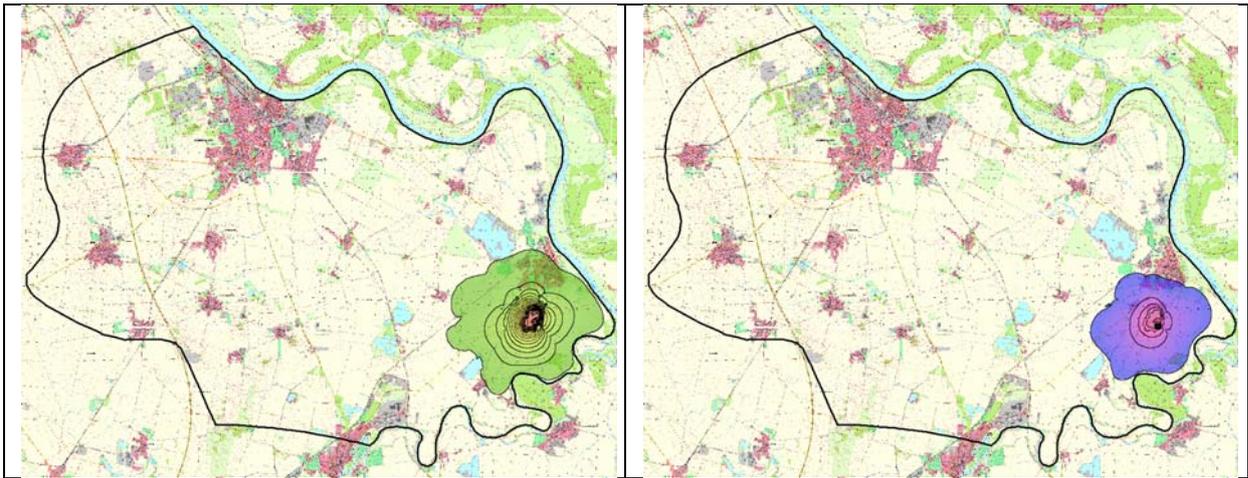
Der Wasserstand der Basisvariante ist wieder über die *Cauchy*-Randbedingung aus der Tabelle 5-2 zu entnehmen. Sie ist ausgewiesen mit 51,16 mNHN. Die Gewässersohle liegt laut DGM-Höhen auf einem Niveau von ca. 49,35 mNHN, welche als nicht realistisch eingestuft wird. Bordvoll ist der „Kiessee Barby II“ bei einem Niveau von ca. 51,60 mNHN.

Somit wurde der Wasserstand zum einen um 0,44 m angehoben und zum anderen um 1,81 m abgesenkt.

**Tabelle 5-2: Wasserstände „Kiessee Barby II“**

Gewässer	Bezeichnung	Wasserstand [mNHN]
	Minimal Wert (DGM1)	49,35
<b>Kiessee Barby II</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>51,16</b>
	Maximal Wert (DGM1)	51,60

Nach der Festlegung der einzelnen Wasserstände und der Simulation mit FEFLOW sind die Ergebnisse, entsprechend Abs. 2.4.4, bearbeitet und im Shape- bzw. Kartenformat überführt worden. Beide Szenarien sind in der Abbildung 5-4 dargestellt. Wobei das Szenario der Wasserstandsabsenkung unter Abbildung 5-4-A und das Szenario der Wasserstandserhöhung unter Abbildung 5-4-B abgebildet sind. Das erste Szenario weist eine maximale Grundwasserstandsabsenkung von 1,90 m auf, nachzulesen im Anhang 9.5 in „Karte 08 Wasserstandsszenario II-A“. Trotz der großen Wasserstands-Absenkung von 1,81 m weist das Standgewässer einen vergleichbar geringen „Absenktrichter“ auf. Dies liegt vor allem an der Anhäufung von Randbedingungen in diesem Gebiet. An der östlichen Grenze des „Absenktrichters“ liegen *Dirichlet*-Randbedingungen für die Elbe und die Saale vor. An den südlichen Grenzen des „Absenktrichters“ wird dieser durch die *Cauchy*-Randbedingung des „Kiessees Tornitz“ begrenzt. Außerdem wird der „Absenktrichter“ im Norden von den Randbedingungen des „Kiessees Barby I“ abgegrenzt. Durch diese ausgeprägte Begrenzung kann angenommen werden, dass das Szenario sowohl Einfluss auf den „Kiessee Barby I“ und den „Kiessee Tornitz“, als auch auf die Elbe und Saale nimmt. Einflüsse können zum Beispiel die Senkung der Wasserstände der benannten Gewässer sein oder aber, dass die benannten Gewässer durch den Grundwasserleiter in den „Kiessee Barby II“ einspeisen. Der „Absenktrichter“ reicht von Barby (Elbe) im Norden bis nach Werkleitz im Süden und von dem Ortsteil Wespen im Osten bis an die Elbe-Saale-Mündung im Westen. Das vorliegende Szenario hat keinen Einfluss für die Grundwassersituation der Städte Calbe (Saale) und Schönebeck (Elbe), ein Einfluss auf die Grundwassersituation des Ortsteils Barby (Elbe) konnte nachgewiesen werden. Inwieweit sich in diesem Gebiet der Grundwasserstand senkt, ist aus der im Anhang 9.5 hinterlegten „Karte 08 Wasserstandsszenario II-A“ zu entnehmen.



**Abbildung 5-4-A: Senkung Wasserspiegel Kiesesee Barby II, -B: Erhöhung Wasserspiegel Kiesesee Barby II**

Wie im Wasserstandsszenario I lassen sich auch im Wasserstandsszenario II zwischen dem „Absenktrichter“ und dem „Grundwasserberg“ hinsichtlich ihrer Ausbreitungsform Ähnlichkeiten erkennen. Im Wasserstandsszenario II-B ist hierbei die Beeinflussung der Grundwassersituation weniger ausgeprägt als im Wasserstandsszenario II-A. Aus dem Anhang 9.5 in der „Karte 09 Wasserstandsszenario II-B“ ist zu entnehmen, dass der Grundwasserspiegel um 1,10 m angehoben wird. Die Randbedingungen wurden um 0,44 m erhöht. Es lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung des Wasserstandes um 0,44 m einen stärkeren Grundwasseranstieg von 1,10 m nach sich zieht. Es entsteht im südöstlichen Bereich des „Kiessees Barby II“ ein zusätzlicher „Grundwasserberg“, der sich von der Wasserstandserhöhung von 0,44 m absetzt (siehe Karte 09). Grund hierfür ist, dass bei dem Knoten mit der ID = 42667, im Bereich des „Kiessees Barby II“ der Basisvariante eine *Cauchy*-Randbedingung von 50,05 mNHN vorgegeben ist. Somit beträgt die dortige Differenz der Randbedingungen zwischen Basisvariante und Wasserstandsszenario II-B 1,55 m, welche den Grundwasseranstieg von 1,10 m erklärt.

Übereinstimmende Werte werden hingegen bei der Wasserstandsabsenkung erreicht. In diesem Szenario wird der Wasserstand um 1,81 m gesenkt und zieht so eine Grundwassersenkung von 1,90 m nach sich.

### 5.1.3 Analyse des „Kiesees Tornitz“

Ein weiteres Gewässer, das durch den Kiesabbau in dieser Region entstanden ist, ist der Kiesee Tornitz. Seine Lage befindet sich nordöstlich von Stadt Calbe (Saale) und südwestlich vom Ortsteil Barby (Elbe). Des Weiteren befindet er sich in der direkten Umgebung des Ortsteils Tornitz. Der „Kiesee Tornitz“ weist eine Fläche von ca. 48 ha auf.

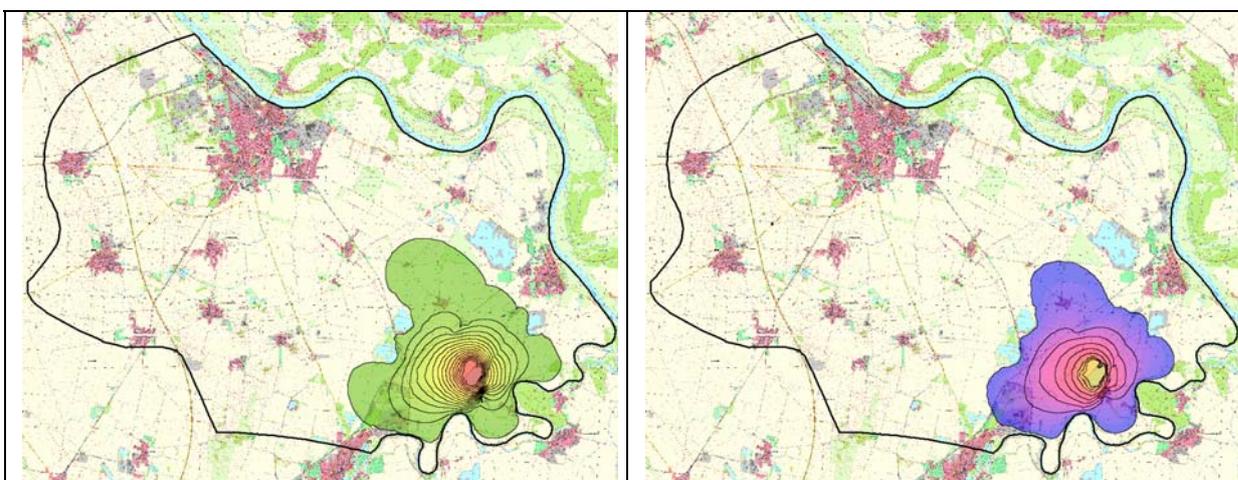
Wie in den zwei vorhergehenden Szenarien ist auch bei der Wasserstandsszenarien-Modellierung des „Kiesees Tornitz“ der erste Schritt, den Modellwasserstand aus dem Grundwassermodell zu extrahieren. In Tabelle 5-3 ist dieser unter Wasserstand Basisvariante aufgelistet. Unter dem Ansatz der Bordfüllung wurde außerdem ein Maximalwasserstand von 52,60 mNHN ermittelt. Weiterhin wurde der Minimalwasserstand auf ein Niveau von 50,19 mNHN festgesetzt, da sich auf diesem Niveau laut DGM-Höhen auch die Sohle des Kiesees befindet. Wie bei den vorhergehenden Gewässern wird auch hier angenommen, dass die eigentliche Sohle des Kiesees auf einem tieferen Niveau liegt.

**Tabelle 5-3: Wasserstände „Kiesee Tornitz“**

Gewässer	Bezeichnung	Wasserstand [mNHN]
	Minimalwert (DGM1)	50,19
<b>Kiesee Tornitz</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>51,76</b>
	Maximalwert (DGM1)	52,60

Nachdem die Randbedingungen für die beiden Wasserstandsszenarien festgelegt wurden, können die Simulationsläufe in FEFLOW eingeleitet werden. Die Überführung in das GIS erfolgt anhand der bereits in den vorhergehenden Abschnitten angewandten Verfahren. Die so ermittelten Ergebnisse können dann als Shape- und im Kartenformat exportiert werden. In der Abbildung 5-5 sind Auszüge aus der im Anhang 9.5 hinterlegten „Karte 10 Wasserstandsszenario III-A“ und der „Karte 11 Wasserstandsszenario III-B“ dargestellt. Wie in den vorhergehenden Szenarien wird die Ausprägung des „Absenktrichters“ bzw. des „Grundwasserbergs“ durch die festgelegten Randbedingungen beeinflusst. So wird sowohl der „Absenktrichter“ des Wasserstandsszenarios III-A als auch der „Grundwasserberg“ des Wasserstandsszenarios III-B von den *Dirichlet*-Randbedingungen im südlichen Teil abgegrenzt. Die *Cauchy*-Randbedingung grenzt zusätzlich in Form der „Schachtteiche“ und

dem „Großen See“ den nordwestlichen Teil sowie der „Kiessee Barby II“ ab. Aus der „Karte 10 Wasserstandsszenario III-A“ ist zu entnehmen, dass eine maximale Grundwasserabsenkung von 1,60 m erreicht wird. Für dieses Szenario kann kein Nachweis erbracht werden, dass eine Beeinflussung auf die Grundwassersituationen des Ortsteils Barby (Elbe) sowie der Stadt Schönebeck (Elbe) vorliegen. Die Grundwassersituation der nordöstlichen Gebiete der Stadt Calbe (Saale) wird hingegen durch das Szenario beeinflusst. Die Ausprägung der Beeinflussung kann aus der „Karte 10 Wasserstandsszenario III-A“ entnommen werden. Auch kommt es zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels in den Ortsteilen Wespen und Tornitz.



**Abbildung 5-5-A: Senkung Wasserspiegel Kiesesee Tornitz, -B: Erhöhung Wasserspiegel Kiesesee Tornitz**

Die Ausbreitungseigenschaften des Wasserstandsszenario III-A spiegeln sich in umgekehrter Ausprägung im Wasserstandsszenario III-B wieder. Der errechnete „Grundwasserberg“ erreicht wie auch in den vorherigen Szenarien nicht die Ausprägung des „Absenktrichters“. Aus der „Karte 11 Wasserstandsszenario III-B“ ist zu entnehmen, dass ein maximaler Grundwasseranstieg von bis zu 0,88 m erreicht wird. Dies entspricht in etwa der Erhöhung des Wasserstandes, von 0,84 m. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei einer Wasserstandsabsenkung von 1,57 m, bei der eine maximale Grundwassersenkung von 1,60 m erreicht wird. Da beide Szenarien ähnliche Ausprägungseigenschaften aufweisen, werden die gleichen Städte und der Ortsteile von diesen Situationen beeinflusst. Eine Ausnahme bildet lediglich die Ortschaft Zeitz, da der nördliche Teil des „Grundwasserberges“ nicht so stark ausgeprägt ist, wie der dazugehörige „Absenktrichter“. Sowohl in dem Szenario III-A als auch in dem Szenario III-B kann mit einer Beeinflussung der Gewässer Saale, „Schachtteiche“, „Großer See“ und/oder „Kiesesee Tornitz“ gerechnet werden. Diese Beeinflussungen können je nach

Szenario Wasserstandsänderungen aber auch zusätzliches Infiltrieren oder Exfiltrieren in oder aus dem Aquifer, in oder aus den benannten Gewässern, beinhalten.

#### 5.1.4 Analyse des „Großen Sees“

Als Wasserstandsszenario IV ist die Analyse des „Großen Sees“ definiert. Dieses Gewässer befindet sich nördlich von Stadt Calbe (Saale) und westlich des Ortsteils Wespen. Der „Große See“ weist eine Fläche von ca. 35 ha auf. In seiner direkten Umgebung befinden sich südlich die „Schachtteiche“.

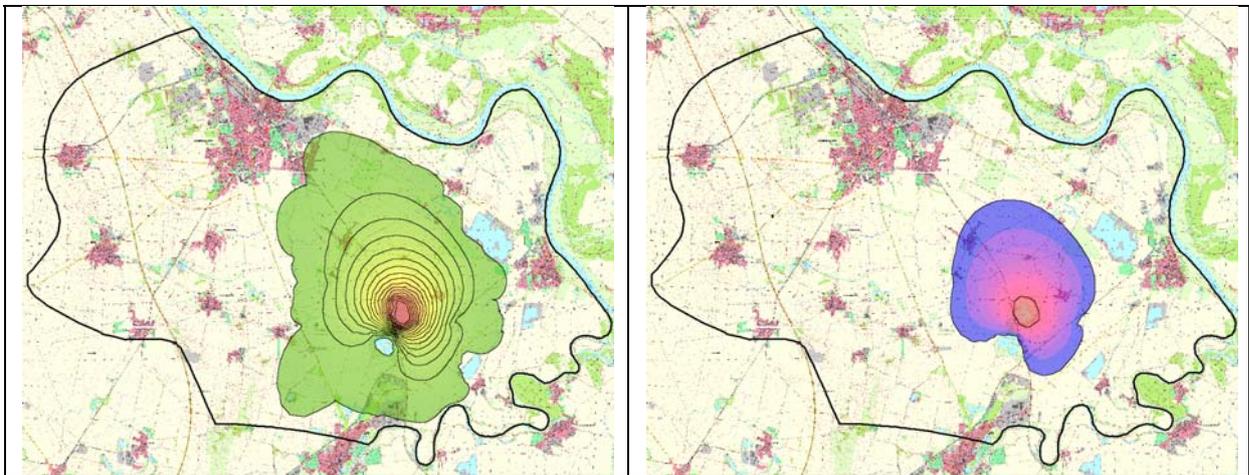
Aus dem vorhandenen Grundwassermodell wurde, wie auch in den bereits beschriebenen Szenarien, als einleitender Schritt der Wasserstand für das Gewässer über die *Cauchy*-Randbedingung eingelesen. Unter Verwendung des vorhandenen DGM wurden ein minimaler und ein maximaler Wasserstand generiert. Die Wasserstände sind in Tabelle 5-4 aufgelistet.

**Tabelle 5-4: Wasserstände „Großer See“**

Gewässer	Bezeichnung	Wasserstand [mNHN]
	Minimalwert (DGM1)	50,64
<b>Großer See</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>52,28</b>
	Maximalwert (DGM1)	52,40

Im Anschluss der Festlegung der Randbedingungen sind die beiden Szenarien simuliert, in das GIS überführt und in Shapes sowie Karten exportiert worden. Für beide Szenarien ist folgende Darstellung generiert worden. Im A-Teil der Abbildung 5-6 ist das „Wasserstandsszenario IV-A“ dargestellt. Eine genauere Abbildung des Szenarios befindet sich in der „Karte 12 Wasserstandsszenario IV-A“, die im Anhang 9.5 hinterlegt ist. Aus dieser Karte ist auch die maximale Absenkung des Grundwasserspiegels zu entnehmen. Sie beträgt 1,66 m. Wie die bereits beschriebenen Szenarien wird auch das vorliegende von Randbedingungen beeinflusst. So wird zum einen die östliche Ausdehnung des „Absenktrichters“ von den *Cauchy*-Randbedingungen des „Kiessees Barby I“ und des „Kiessees Tornitz“ und zum anderen im Süden von den *Dirichlet*-Randbedingungen der Saale beeinflusst. Des Weiteren wird der „Absenktrichter“ in direkter südlicher Umgebung des „Großen Sees“ von den dortigen „Schachtteichen“ so beeinflusst, dass es im Bereich der „Schachtteiche“ zu keiner Absenkung kommt, da dieses Gebiet durch die *Cauchy*-

Randbedingung repräsentiert wird. Die nördliche Ausdehnung des „Absenktrichters“ wird hingegen von Randbedingungen nur marginal beeinflusst, so dass dieser bis Schönebeck (Elbe), Stadtteil Sachsenland vordringen kann. Somit kann gesagt werden, dass dieses Szenario einen geringen Einfluss auf die Grundwassersituation in Schönebeck (Elbe) ausübt. Auch wird in diesem Szenario ein Einfluss auf die Grundwassersituation der Stadt Calbe (Saale) deutlich. Im Gegensatz dazu besteht für den Ortsteil Barby (Elbe) keine Grundwasserbeeinflussung. Auch kommt es zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels in den Ortsteilen Gnadau und Wespen sowie in den kleineren Ortschaften Döben und Zeitz. Wie ausgeprägt diese Beeinflussung ist, kann der „Karte 12 Wasserstandsszenario IV-A“ entnommen werden.



**Abbildung 5-6-A: Senkung Wasserspiegel Großer See, -B: Erhöhung Wasserspiegel Großer See**

Eine weitaus geringere Ausprägung wurde im Szenario B ermittelt. Zusätzlich wird dieser „Grundwasserberg“ von den „Schachtteichen“ begrenzt. Aus der zugehörigen „Karte 13 Wasserstandsszenario IV-B“ kann eine maximale Erhöhung des Grundwasserspiegels von 0,12 m entnommen werden. Dieser Wert ist äquivalent mit der Wasserstandserhöhung von 0,12 m. Die geringe Wasserstandserhöhung ist auch ausschlaggebend für die geringen Ausmaße des „Grundwasserberges“. Für eine Wasserstandsabsenkung von 1,64 m wurde für die maximale Absenkung des Grundwasserspiegels ein konformer Wert von 1,66 m ermittelt. Es ist festzuhalten, dass durch die geringe Entfernung der „Schachtteiche“ zu dem „Großen See“ eine starke Beeinflussung der Wasserstände der beiden Gewässer untereinander existiert.

### 5.1.5 Analyse der „Schachtteiche“

Die letzten Standgewässer, welche im Rahmen der Master-Thesis hinsichtlich einer Wasserstandsänderung analysiert werden, sind die „Schachtteiche“. Sie weisen eine ähnliche Lage wie der „Große See“ auf, befinden sich jedoch südlicher von diesem. Die „Schachtteiche“ besitzen eine Wasserspiegelfläche von rund 30 ha.

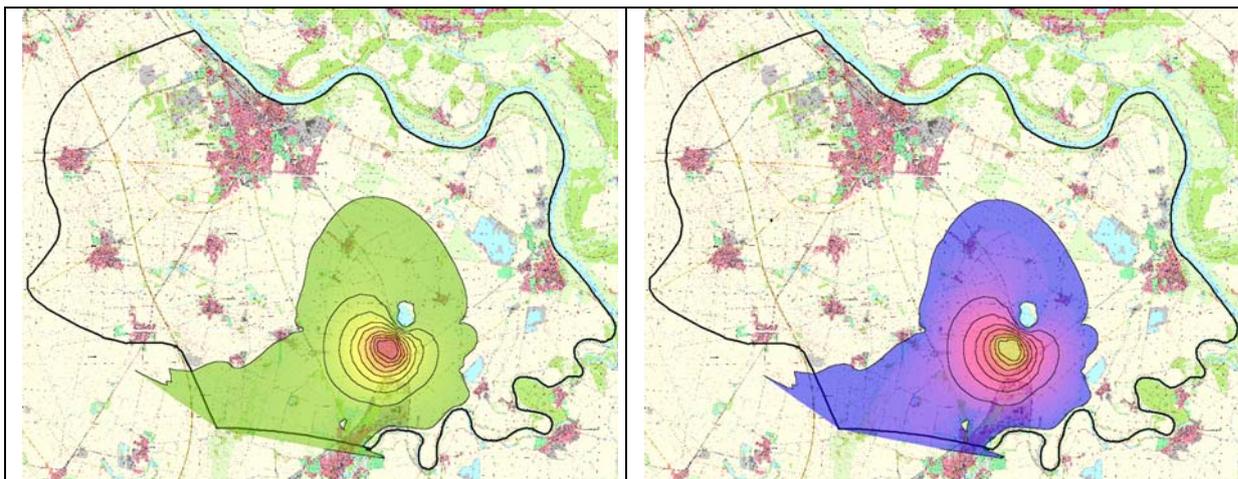
Auch liegt der Modellwasserstand der „Schachtteiche“ auf einem ähnlichen Niveau wie der des „Großen Sees“. Weiterhin wurde ein ähnliches Niveau der Sohltiefe von ca. 51,50 mNHN, welcher auch den minimalen Wasserstand darstellt, ermittelt. Bordvoll ist das Gewässer bei einem Niveau von 53,10 mNHN. Aufgelistet sind die Wasserstände in der Tabelle 5-5.

**Tabelle 5-5: Wasserstände „Schachtteiche“**

Gewässer	Bezeichnung	Wasserstand [mNHN]
	Minimalwert (DGM1)	51,50
<b>Schachtteiche</b>	<b>Basisvariante</b>	<b>52,34</b>
	Maximalwert (DGM1)	53,10

Nach der Neuverteilung der Randbedingungen im Modell wurden die Szenarien simuliert, in das GIS integriert und sowohl in das Shape- als auch in ein Kartenformat überführt. Beide so erstellten Szenarien sind in der Abbildung 5-7 dargestellt. Es wurden beide Szenarien für eine genauere Betrachtung unter Verwendung des Kartenformates im Anhang 9.5 hinterlegt („Karte 14 Wasserstandsszenario V-A“ und „Karte 15 Wasserstandsszenario V-B“). Aus der Karte 14 kann eine maximale Grundwasserabsenkung von bis zu 0,84 m entnommen werden. Wie in allen zuvor betrachteten Szenarien wird auch in diesem Szenario der „Absenktrichter“/„Grundwasserberg“ von den umliegenden Randbedingungen beeinflusst. In diesem Fall wird der südöstliche Teil des „Absenktrichters“ von den Randwerten, die die Saale repräsentieren, beeinflusst. Auch werden die östlichen Grenzen des „Absenktrichters“ durch den „Kiessee Tornitz“ bestimmt. Zusätzlich beeinflussen die Randbedingungen des „Großen Sees“, die sich in direkter Umgebung der „Schachtteiche“ liegen, die Ausdehnung des „Absenktrichters“. Im Ausdehnungsbereich des Szenarios befindet sich die Stadt Calbe (Saale). Die Grundwassersituation des Ortsteils Barby (Elbe) und der Stadt Schönebeck

(Elbe) werden hingegen nicht beeinträchtigt. Auch die Grundwassersituation der Ortsteile Zens, Wespen und Gnadau sowie der kleineren Ortschaften Zeitz und Döben sind in dem Szenario betroffen. Inwieweit der Grundwasserspiegel in den Städten und Ortschaften beeinflusst wird, verdeutlicht die „Karte 14 Wasserstandsszenario V-A“.

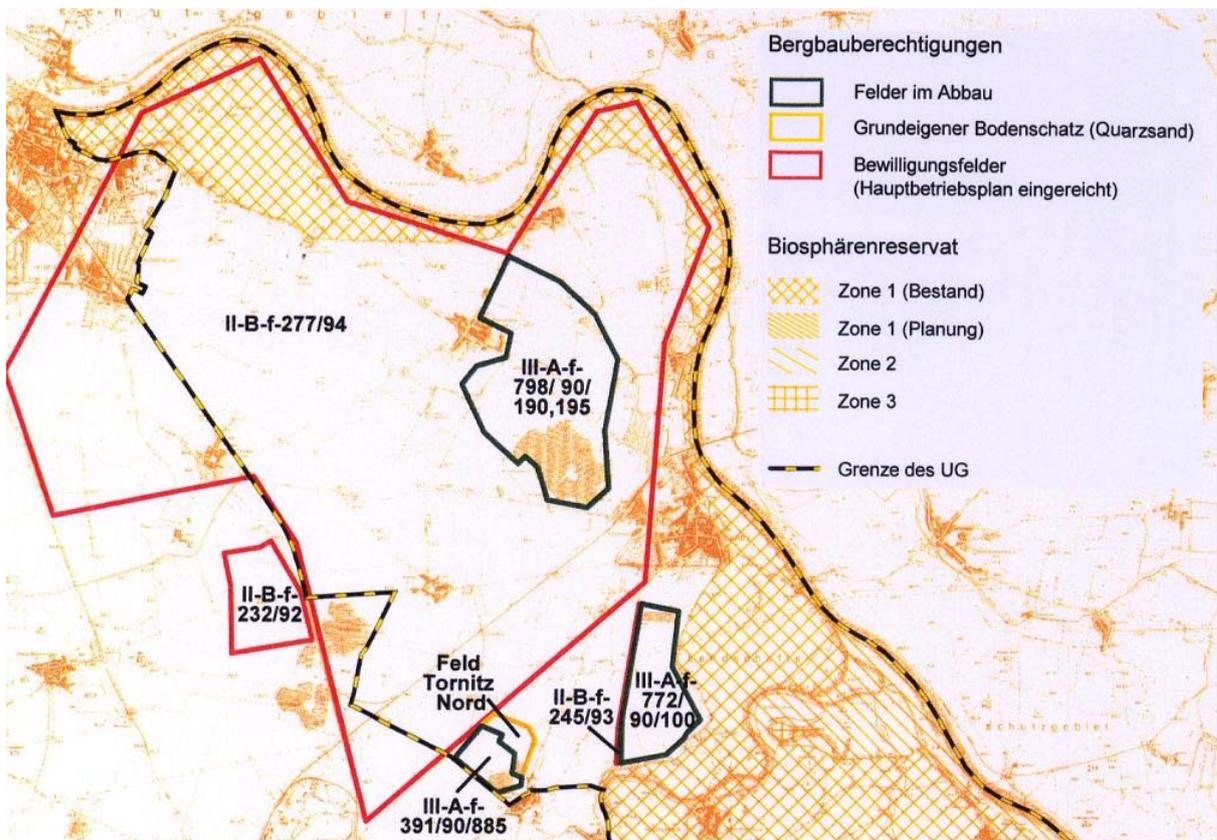


**Abbildung 5-7-A: Senkung Wasserspiegel Schachtteiche, -B: Erhöhung Wasserspiegel Schachtteiche**

Vergleicht man die beiden Szenarien in der Abbildung 5-7-A und -B so ist festzustellen, dass beide Szenarien im ähnlichen Ausmaß den Grundwasserspiegel im Modellgebiet beeinflussen. Das „Wasserstandsszenario V-B“, welches zusätzlich in der „Karte 15 Wasserstandsszenario V-B“ dargestellt ist, weist einen maximalen Grundwasseranstieg von bis zu 0,76 m auf. Dieser Wert ist äquivalent mit der Wasserstandserhöhung von 0,76 m in diesem Szenario. Auch die Grundwasserabsenkung von 0,84 m erreicht das Niveau der Wasserstandsabsenkung des Gewässers von 0,84 m. Zudem weisen die beiden Wasserstandsänderungen nur eine geringe Differenz von 0,08 m auf, was die ähnlichen Ausmaße des „Absenktrichters“ im Vergleich zum „Grundwasserberg“ erklärt. Auch ist festzustellen, dass wie in Abs. 5.1.4 beschrieben, eine gegenseitige Beeinflussung der Gewässer „Schachtteiche“ und „Großer See“ existiert. Der von der Wasserstandsänderung beeinflusste Bereich beinhaltet zudem die gleichen Städte und Ortschaften, welche im vorhergehenden Abschnitt benannt wurden.

## 5.2 Einfluss der Kiessee-Erweiterung auf die Grundwassersituation

Nach Planungsgemeinschaft PL3 (*Planungsgemeinschaft PL3, 2003*) haben im östlichen Bereich des Modellgebietes in den Jahren 1990 bis 1996 mehrere Firmen Bergbauberechtigungen erworben, die ihnen das Recht geben, einen Kiesabbau auf den Berechtigungsfeldern durchzuführen. Aus der Abbildung 5-8 können die Berechtigungsfelder entnommen werden, welche im Modellbereich liegen.



**Abbildung 5-8: Bergbauberechtigungen im Modellbereich nach Planungsgemeinschaft PL3 (*Planungsgemeinschaft PL3, 2003*)**

In diesem Abschnitt soll die Auswirkung zweier Kiessee-Erweiterungsszenarien auf die Grundwassersituation im Modellbereich untersucht werden. Nach der vorliegenden Abbildung können diese wie folgt unterteilt werden. Das Szenario I nimmt an, dass aus allen Feldern, die die Kategorien „Felder im Abbau“ sowie „Grundeigener Bodenschatz (Quarzsand)“ aufweisen, grundwassergefüllte Tagebaurestlöcher entstehen. Das Szenario II nimmt an, dass aus allen Berechtigungsfeldern ein großer grundwassergespeicherter Kiessee

entsteht. In der Tabelle 5-6 ist beschrieben, welche Berechtigungsfelder zu welchen Seen bzw. Szenarien zugeordnet sind. Die entstandenen Flächen wurden in das GIS über das Verfahren der Georeferenzierung integriert. Um die Flächen in das Grundwassermodell integrieren zu können, wurden die erstellten Features mit FEFLOW verlinkt.

**Tabelle 5-6: Feldzuweisung der Kieseeszenarien**

Szenario	Kiessee	Fläche [ha]	Berechtigungsfelder
<b>I</b>	Barby I	483	III-A-f-798/90/190,195
	Barby II	183	III-A-f-772/90/100 II-B-f-245/93
	Tornitz	85	III-A-f-391/90/885 Feld Tornitz Nord
<b>Summe</b>		<b>751</b>	
<b>II</b>	„Großer Kiesee“	4629	III-A-f-798/90/190,195 III-A-f-772/90/100 II-B-f-245/93 III-A-f-391/90/885 Feld Tornitz Nord II-B-f-277/94 II-B-f-232/92
<b>Summe</b>		<b>4629</b>	

### 5.2.1 Erweiterungsszenario I

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, umfasst das Szenario I eine Kiesee-Erweiterung auf die Berechtigungsfelder mit den Kategorien „Felder im Abbau“ und „Grundeigener Bodenschatz (Quarzsand)“. Daraus folgt, dass die Gewässer „Kiesee Barby I“ und „Kiesee Barby II“ sowie der „Kiesee Tornitz“ erweitert werden. Die Wasserspiegelfläche des „Kiesee Barby I“ würde demnach von 133 ha auf 483 ha, die des „Kiesees Barby II“ von 28 ha auf 183 ha, sowie die Fläche des „Kiesees Tornitz“ von 48 ha auf 85 ha erweitert. Insgesamt würde die gegebene Wasserfläche von 209 ha auf 751 ha vergrößert werden. Das würde einer Erweiterung um ca. 250 % entsprechen.

Da im gegebenen Grundwassermodell mit vereinfachten Wassertiefen gerechnet wurde, wird diese Annahme für die Kiesee-Erweiterungsszenarien übernommen. Das bedeutet, wenn eine Herabsetzung der *Cauchy*-Randbedingung für das Gewässer notwendig ist, wird angenommen, dass sich die Sohle des Kiesees einem Meter unter dem Wasserspiegel befindet. Eine Absenkung der *Cauchy*-Randbedingung ist notwendig, wenn diese einen Wasserstand repräsentieren, der das Standgewässer mehr als bordvoll füllt und somit zu

Überschwemmungen führt. Des Weiteren wird die Eigenschaft „In-/Outflow on top bottom“ in den Bereichen der Kiessee Erweiterung auf  $-18 \cdot 10^{-4} \text{ m/d}$  festgesetzt. Sie beschreibt die potenzielle Verdunstung und entspricht 657 mm/a. Auch wurden die „In-/Outtransfer rate“, welche den Zu- bzw. Abfluss ins Grundwasser beschreibt (siehe Formel 2-18), auf die zu erweiterten Areale ausgeweitet.

Als einleitender Schritt der Simulation sind die Eigenschaften der festgelegten Gebiete neu zu bewerten. Die Erweiterung des „Kiessees Barby I“ stellt hierbei den größten flächenmäßigen Einfluss dar und wurde somit als erstes betrachtet. Für eine Erweiterung des „Kiessees Barby I“ in nördliche Richtung (siehe Abbildung 5-8) ist es notwendig, den Wasserstand neu zu bewerten, da sich das Gelände in nördlicher Richtung zur Elbe hin absenkt. Eine Wasserstands-Absenkung von 1,57 m auf ein Niveau von 48,50 mNHN ist erstellt worden um Überschwemmungen um das Gewässer herum zu vermeiden. Aus der Absenkung des Wasserstandes ergab sich auch eine Absenkung des DTM<sup>13</sup> in dem Bereich auf ein Niveau von 47,50 mNHN. Auch wurde sowohl die Transferrate als auch das Infiltrieren auf die zu erweiternden Gebiete definiert. Die Werte sind in Tabelle 5-7 aufgelistet.

**Tabelle 5-7: Kiessee-Erweiterungsszenario I**

<b>Kiessee</b>	<b>Einheit</b>	<b>Barby I</b>	<b>Barby II</b>	<b>Tornitz</b>
<b>Wasserstand</b>	mNHN	48,5000	51,1600	50,7557
<b>Sohle</b>	mNHN	47,5000	49,3000	u.v.
<b>In- / outflow on top /bottom</b>	$10^{-4} \text{ m/d}$	-18	u.v.	u.v.
<b>In- / Out-transfer rate</b>	$10^{-4} / \text{d}$	15000	5000	15000

Der „Kiessee Barby II“ ist das zweite von drei Gewässern, das einer Erweiterung unterliegt. Aus der Tabelle 5-7 können die Eigenschaften des Gewässers im Grundwassermodell entnommen werden. Hierbei unterliegt das Standgewässer vor allem einer Erweiterung in südlicher Richtung und nimmt die Berechtigungsflächen III-A-f-772/90/100 und II-B-f-245/93 ein. Die gegebenen Geländebeziehungen ließen es zu, dass ein Sohlniveau von 49,30 mNHN zugelassen wurde und der Modellwasserstand beibehalten werden konnte. Es ist weiterhin eine Transferrate von  $5000 \cdot 10^{-4} / \text{d}$  angenommen worden, die Infiltration an der Oberfläche wurde vom Modell übernommen, da sowohl in dem Gebiet des vorhandenen Gewässers als auch in dem Gebieten der Erweiterung ähnliche Werte angenommen wurden.

DTM (Digital Terrain Model) = Höhenmodell aus FE-Modell zur Grundwassermodellierung / DHI Wasy<sup>13</sup>

Das dritte Gewässer, welches von einer möglichen Kieseerweiterung betroffen sein kann, ist der „Kieseer Tornitz“. Da die Berechtigungsfelder III-A-f-391/90/885 und Feld Tornitz Nord mit der im Modell angenommenen Seefläche annähernd übereinstimmen, wurden an diesem Gewässer keine Eigenschaftsänderungen vorgenommen.

Nach der Anpassung der Modelleigenschaften wurde der Simulationslauf für das „Kieseerweiterungsszenario I“ durchgeführt, woraufhin die Ergebnisse unter Verwendung der in Abs. 2.4.4 beschriebenen Verfahren ins GIS überführt wurden. Letztendlich wurden die so generierten Daten in ein Kartenformat und ins Shape-Format integriert.

In der Abbildung 5-9 sind einerseits die Bereiche der erweiterten Gewässer und andererseits die daraus resultierenden Veränderungen auf die Grundwassersituation für den Modellbereich aufgetragen. Des Weiteren ist für die detailliertere Betrachtung der Auswirkungen die „Karte 16 Kieseerweiterungsszenario I“ im Anhang 9.5 hinterlegt.

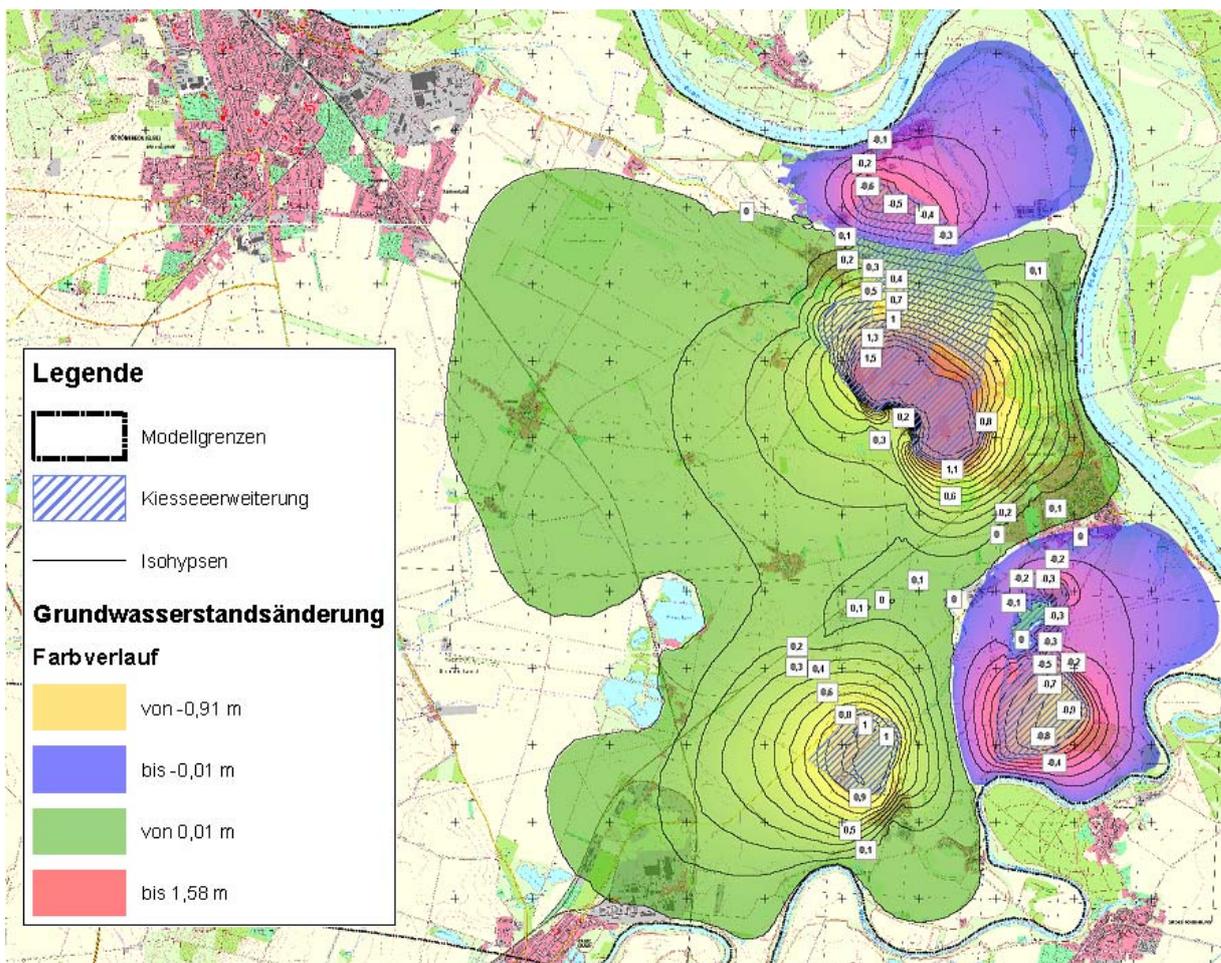


Abbildung 5-9: Kieseerweiterungsszenario I

Aus der Karte 16 ist zu entnehmen, dass eine maximale Absenkung von 1,58 m und ein maximaler Anstieg des Grundwasserspiegels von 0,91 m berechnet wurden. Das bedeutet, dass dieses Szenario sowohl „Absenktrichter“ als auch „Grundwasserberge“ beinhaltet. Aus Abbildung 5-9 oder der dazugehörigen Karte ist entnehmen, dass ein großer „Absenktrichter“ entstanden ist, welcher hauptsächlich durch die Erweiterung des Gewässers „Kiessee Barby I“ entsteht. Der „Absenktrichter“ erstreckt sich von dem Ortsteil Barby (Elbe) zum einen in südwestlicher Richtung bis zur Stadt Calbe (Saale) und zum anderen in nordwestlicher Richtung bis zum Ortsteil Gnadau. Folglich senkt dieses Szenario den Grundwasserspiegel in großen Teilen der Einheitsgemeinde Stadt Barby und in dem nordöstlichen Teilen von Stadt Calbe (Saale). Zudem werden auch die Ortsteile Tornitz, Wespen, Gnadau, und Pömmelte sowie die kleineren Ortschaften Werkleitz, Döben und Zeitz durch eine Absenkung des Grundwasserspiegels beeinflusst. Der Grundwasserspiegel der Stadt Schönebeck (Elbe) wird hingegen von diesem Szenario weder von einer Grundwasserabsenkung noch von einer –erhöhung beeinflusst. Eine weitere Auswirkung sind zwei „Grundwasserberge“, die in dem Modellgebiet entstehen würden. Einerseits entsteht in der Umgebung des „Kiessees Barby II“ durch dessen Erweiterung ein „Grundwasserberg“. Grund hierfür ist die Erweiterung der Randbedingungen, die im Vergleich auf ein höheres Niveau als die zuvor ermittelten Grundwasserhöhen der Basisvariante gesetzt wurden. Andererseits würde ein zweiter „Grundwasserberg“ um den Ortsteil Glinde entstehen. Grund hierfür ist die notwendige Ausspiegelung des „Kiessees Barby I“. Somit schneidet der Wasserstand der erweiterten Fläche den Grundwasserspiegel der Basisvariante in den Grenzgebieten zwischen „Absenktrichter“ und „Grundwasserberg“. Betroffen von einem Grundwasseranstieg sind laut dem vorliegenden Szenario die Ortsteile Barby (Elbe) und Glinde. Des Weiteren ist festzustellen, dass, wie im Abs. 5.1 beschrieben, Randbedingungen die ermittelten Grundwasseränderungen begrenzen können. So haben zum einen die *Dirichlet*-Randbedingungen, die die Fließgewässer Elbe und Saale repräsentieren, Einfluss auf das vorliegende Szenario. Zum anderen begrenzen die *Cauchy*-Randbedingungen der Standgewässer „Schachtteiche“ und „Großer See“ die Ausbreitung des „Absenktrichters“.

### 5.2.2 Erweiterungsszenario II

Nach Planungsgemeinschaft PL3 (*Planungsgemeinschaft PL3, 2003*) könnte im Raum des Berechtigungsfeldes II-B-f-277/94 durch Kiesabbau ein großer Baggersee entstehen.

Zusammen mit den Berechtigungsfeldern des „Kiessee-Erweiterungsszenario I“ ergibt sich das „Kiessee-Erweiterungsszenario II“. Durch den Zusammenschluss dieser Areale würde ein Gewässer entstehen, welches sich von Schönebeck (Elbe) aus über Pömmelte bis nach Barby (Elbe) erstreckt. Der so entstehende Kiessee hätte eine Oberfläche von 4629 ha und wäre somit mehr als doppelt so groß wie der Geiseltalsee mit einer Fläche von 1853 ha, der das größte Standgewässer des Landes Sachsen-Anhalt ist. Auch würden durch die Kiessee-Erweiterung verschiedene Ortsteile, wie Pömmelte und Wespen zu Inseln werden. Zudem sind auch größere landwirtschaftlich genutzte Flächen betroffen (Vergleich in „Karte 02 Flächennutzung“). Weiterhin befinden sich im nördlichen Teil des Berechtigungsfeldes II-B-f-277/94 Biosphärenreservate, die bei einer Umsetzung des Szenarios weichen müssten. Ebenfalls kann es im Hochwasserfall zu einem Rückstau von Elbe und/oder Saale kommen und somit zu einem Anstieg des Wasserspiegels des Kiessees. Aus den genannten Gründen wird die Umsetzung des Szenarios II als eher unwahrscheinlich eingestuft, verdeutlicht aber, wie sich eine extreme Kiessee-Erweiterung auf die Grundwassersituation im Modellbereich auswirken kann.

Bei einer so extremen Kiessee-Erweiterung ist es notwendig, dass eine Ausspiegelung des Wasserstandniveaus an die Geländeeigenschaften angepasst wird. Das bedeutet, dass eine Wasserspiegelsenkung auf ein Niveau von 48 mNHN umgesetzt werden muss. Wenn von dem Wasserstandniveau des „Kiessees Barby I“ ausgegangen wird, bedeutet dies, dass eine Wasserstandsabsenkung von 2,07 m (50,07 mNHN – 48,00 mNHN) realisiert werden muss. Aus der Ausspiegelung des Gewässers ergibt sich nun ein Sohlniveau von 47,00 mNHN, welches für die Simulation angesetzt wird. Zusätzlich wird die Transferrate von  $15000 \cdot 10^{-4}/d$  und die Eigenschaft „In-/outflow on top bottom“ mit  $18 \cdot 10^{-4} m/d$  beschrieben. Die genannten Werte sind in der Tabelle 5-8 aufgelistet. Wie auch in den vorhergehenden Szenarien finden auch in diesem Szenario die in Abs. 2.4.4 beschriebenen Verfahren Anwendung.

**Tabelle 5-8: Kiessee-Erweiterungsszenario II**

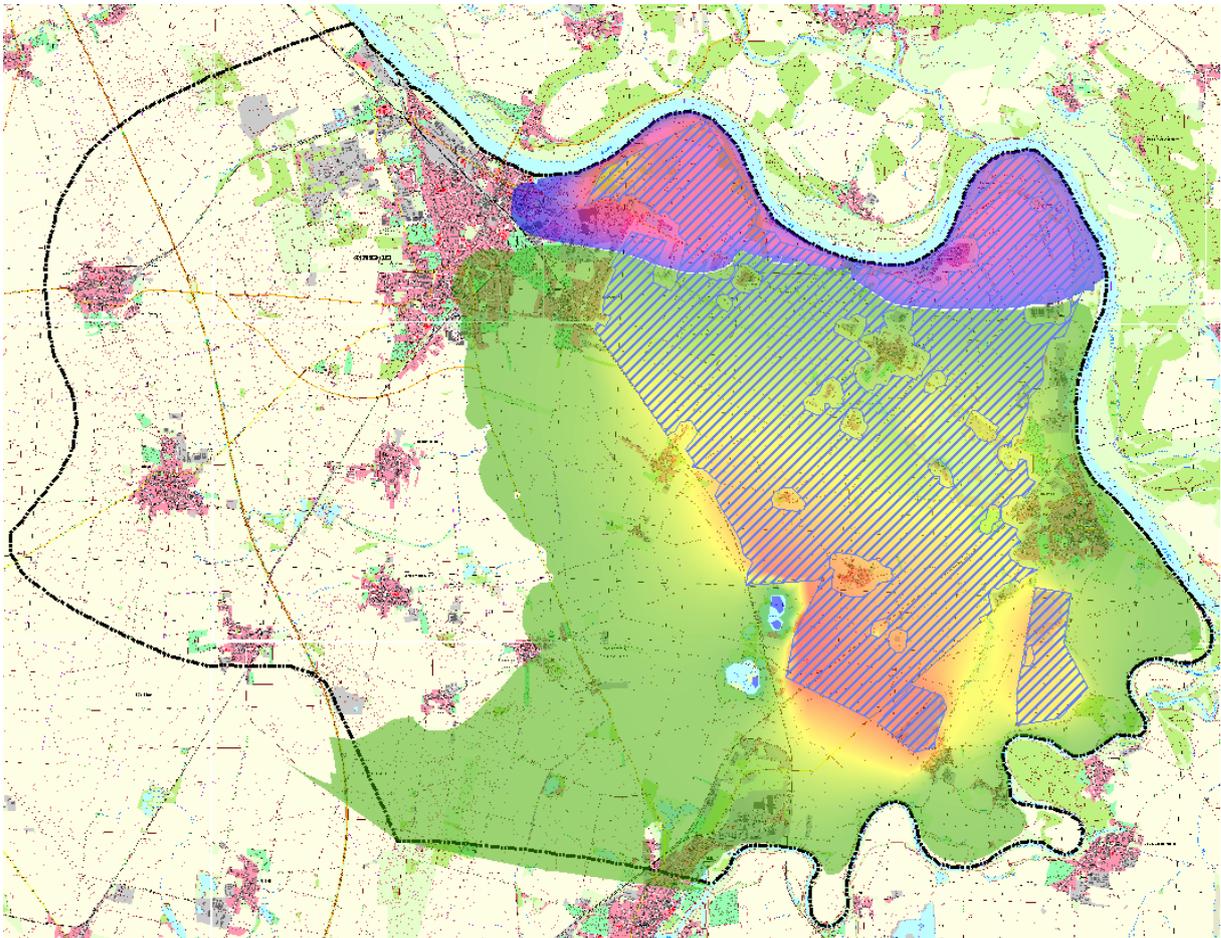
<b>Kiessee</b>	<b>Einheit</b>	<b>Kiessee-Erweiterung</b>
<b>Wasserstand</b>	mNHN	48,0000
<b>Sohle</b>	mNHN	47,0000
<b>In- / outflow on top bottom</b>	$10^{-4} m/d$	-18
<b>In- / Out-transfer rate</b>	$10^{-4} / d$	15000

Die daraus entwickelten Ergebnisse sind in der Abbildung 5-10 sowie zur detaillierteren Ansicht in der „Karte 17 Kiessee-Erweiterungsszenario II“ im Anhang 9.5 hinterlegt. Aus der folgenden Abbildung ist zu entnehmen, dass ein großer „Absenktrichter“ und ein kleiner „Grundwasserberg“ in der nördlichen Region der Kiessee-Erweiterung entstehen würden. Des Weiteren sind auch die Erweiterungsgebiete in der folgenden Abbildung abgegrenzt. Auch ist wieder festzustellen, dass die Grundwasseränderungen an dem Rand des Modellbereiches von den *Dirichlet*-Randbedingungen der Elbe und der Saale abgegrenzt werden. Zudem haben die *Cauchy*-Randbedingungen einen Einfluss auf den „Großen See“ und auf die „Schachtteiche“, da in deren Gebieten keine Änderung des Grundwasserspiegels ermittelt wurde. Es wird nicht ausgeschlossen, dass ein Einfluss auf die benannten Gewässer entstehen kann. Aus der „Karte 17 Kiessee-Erweiterungsszenario II“ ist eine maximale Grundwasserabsenkung 4,07 m und eine maximale Grundwassererhöhung von 2,14 m zu entnehmen.

Nach Planungsgemeinschaft PL3 (*Planungsgemeinschaft PL3, 2003*) wird der natürliche Höhenunterschied der Grundwasserstände von 3 m zwischen Schönebeck Ost und Barby (Elbe) durch das entstehende Gewässer ausgespiegelt. Dies würde in Folgeleben zu einem Grundwasseranstieg von 1,5 m und im Raum Barby zu einer Grundwasserabsenkung von 1,5 m führen. Weiterhin bedeutet dies auch eine Senkung des Wasserspiegels in dem „Kiessee Barby I“ und in dem „Kiessee Barby II“. Wie bereits erwähnt wird in dieser Arbeit eine Absenkung von 2,07 m im Bereich des „Kiessees Barby II“ vorgenommen. Somit wird eine stärkere Absenkung angenommen, als durch Planungsgemeinschaft PL3 (*Planungsgemeinschaft PL3, 2003*) vorgenommen wurde. Dieser Unterschied kommt zustande, da nach Planungsgemeinschaft PL3 lediglich die Grundwasseroberfläche ausgespiegelt wurde. Für diese Arbeit ist zusätzlich zur Ausspiegelung eine Anpassung an die Geländehöhen des Seewasserstandes vorgenommen worden. Hierbei wurde für den Seewasserstand die Eigenschaft des bordvollen Zustandes definiert. Somit wurde das Niveau des Seewasserstandes an die Geländehöhe an den Randbereichen des Sees angepasst. Aus der „Karte 17 Kiessee-Erweiterungsszenario II“ ist zu entnehmen, dass die entstehenden Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel in dem Bereich Barby (Elbe) zu einer Absenkung von 0,1 – 1,3 m führt. In dem Bereich Schönebeck (Elbe) – Folgeleben kommt es demnach zu einer Grundwasserabsenkung von 0,1 – 1,0 m. Der in (*Planungsgemeinschaft PL3, 2003*) erwähnte „Grundwasserberg“ beginnt laut des „Kiessee-Erweiterungsszenarios II“ nördlicher, in dem Bereich Schönebeck (Elbe) – Gewerbegebiet Barbyer Straße. Er erreicht dort eine Ausprägung von 0,1 – 1,2 m. Durch die extreme Ausdehnung des Szenarios wird die

Grundwassersituation in der Einheitsgemeinde Stadt Barby sowie in den Städten Calbe (Saale) und Teile von Schönebeck (Elbe) beeinflusst. Auch in den dazwischen liegenden Ortschaften wird der Grundwasserspiegel beeinflusst.

Es ist festzustellen, dass durch so ein extremes Wasserstandsszenario wie hier vorliegend der Grundwasserstand großflächig abgesenkt würde. Nur in den nördlichen Gebieten des Modellgebiets, welches von dem Gewässer Elbe abgegrenzt wird, kann es zu einem Grundwasseranstieg kommen.



**Abbildung 5-10: Kiessee-Erweiterungsszenario II**

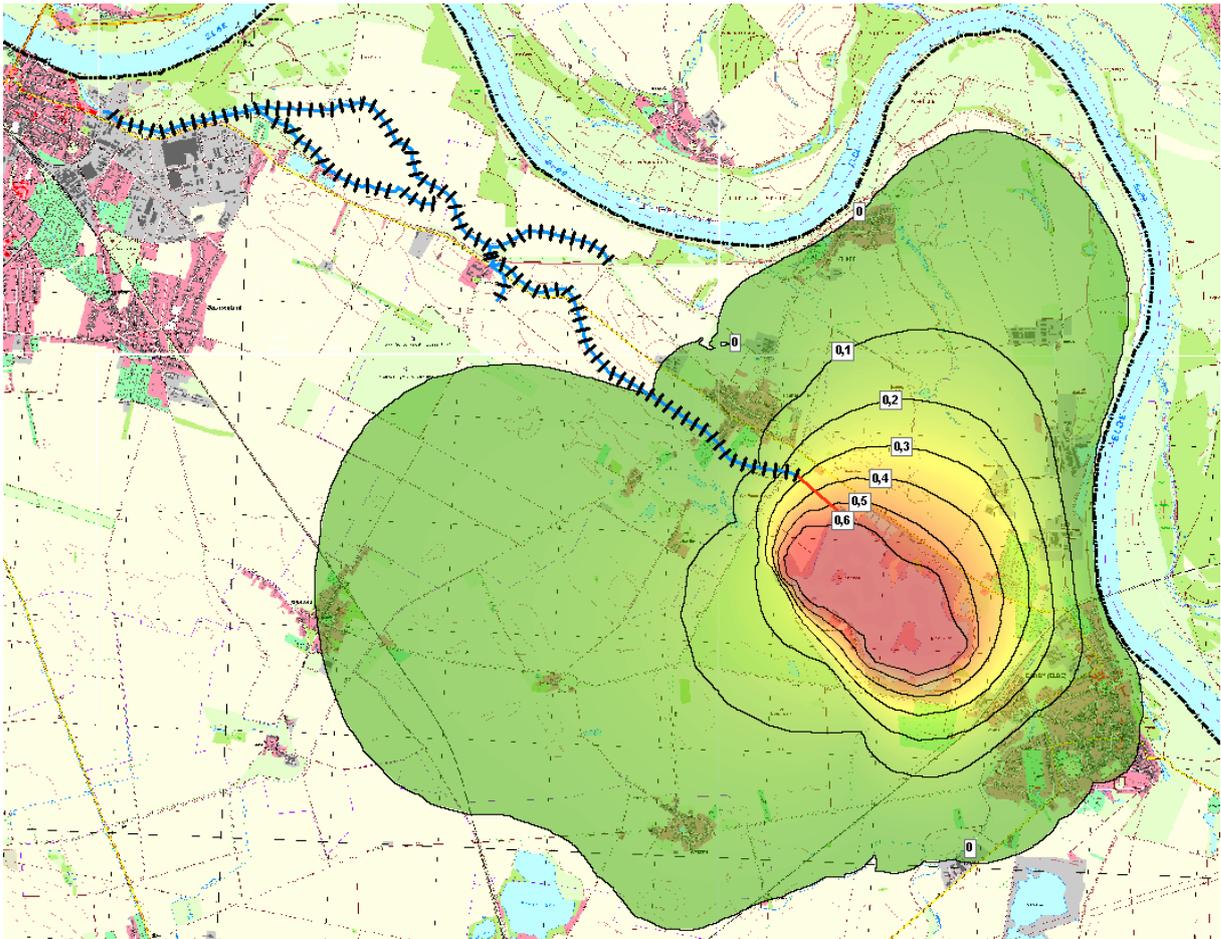
## 6 Entwässerungskonzept

Im letzten Kapitel ist die Entwässerung der Kieseen Barby I, Barby II und Tornitz zu untersuchen. Hierbei soll der Ansatz der Wasserstandsabsenkung in Folge einer Entwässerung über einen Graben im freien Gefälle zum Tragen kommen. Das bedeutet, dass sowohl das Grundwassermodell, welches die Auswirkung der Seewasserstandsabsenkung simuliert, als auch das hydrodynamische Modell, welches die Leistungsfähigkeit des Grabennetzes simuliert, zum Tragen kommt.

### 6.1 Entwässerungsszenario I - Kiese See Barby I

Das Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung der Möglichkeit einer Entwässerung der Kieseen im freien Gefälle. Dazu wird ermittelt, wie hoch die Sollhöhe (Minimalhöhe) im Kiese See liegt, bis zu der im freien Gefälle entwässert werden kann.

Die Entwässerung des „Kiesees Barby I“ wird an dieser Stelle über ein Graben, der das Gewässer mit dem Aschberggraben verbindet, untersucht. Von dort aus ist vorgesehen, dass eine Entwässerung über den Sauerangergraben - Schönebecker Röthe in die Elbe stattfinden soll. Somit ist die hydraulische Leistungsfähigkeit des Grabennetzes entlang der Entwässerungsstrecke zuerst zu untersuchen. Vorweg ist festzustellen, dass von dem Punkt der Einmündung des Entwässerungsgrabens in den Sauerangergraben bis hin zur Mündung der Schönebecker Röthe in die Elbe, drei weitere Nebengräben entlang der Fließstrecke vorhanden sind. Die drei Gräben werden als Nebengraben der Schönebecker Röthe, Nebengraben des Sauerangergrabens und Schönebecker Röthe – Upstream benannt. Aus der Abbildung 6-1 ist die Lage des Grabennetzes zu entnehmen. Eine detailliertere Abbildung befindet sich im Anhang 9.6 unter „Karte 18 Entwässerungsszenario I – Kiese See Barby I“. Die Erhebung der geometrischen Daten des Grabennetzes erfolgt nach den in Abs. 2.5.2 beschriebenen Verfahren.



**Abbildung 6-1: Entwässerungsszenario I - Kiessee Barby I**

Ausgehend vom Querprofil des Sauerangergrabens/Upstream mit einer Stationierung von 8+300 wird der Entwässerungsgraben mit einem geraden Verlauf in Richtung „Kiessee Barby I“ angenommen. Dieser Graben würde eine Länge von ca. 540 m besitzen (siehe „Karte 18 Entwässerungsszenario I – Kiessee Barby I“). Das Sohlgefälle des Entwässerungsgrabens sollte dem ermittelten Gefälle der Fließstrecke in etwa angepasst werden. Das Sohlgefälle lässt sich wie folgt ermitteln:

$$I = \frac{h_2 - h_1}{L_G} \quad (6-1)$$

Mit I: durchschnittliches Sohlgefälle [-],  $h_1$ : Höhe am Anfangspunkt des Graben [mNHN],  $h_2$ : Höhe am Endpunkt des Graben [mNHN] und  $L_G$ : Grabenlänge [m]. Aus der Tabelle 6-1 ist zu entnehmen, dass ein durchschnittliches Sohlgefälle von 0,3 ‰ ermittelt wurde. Dieser Wert

wird auf den zu planenden Entwässerungsgraben übertragen. Unter Verwendung der Höhe des Endpunktes und der aus dem GIS entnommenen Länge des Entwässerungsgraben sowie des durchschnittlichen Sohlgefälles ist mit folgender Gleichung der Seewasserstand des Soll-Zustandes zu ermitteln:

$$H_{SOLL} = h_2 + I * L_E \quad (6-2)$$

Mit  $H_{SOLL}$ : Seewasserstand des Soll-Zustandes [mNHN],  $I$ : durchschnittliches Sohlgefälle [-],  $h_2$ : Höhe am Endpunkt des Graben [mNHN] und  $L_E$ : Länge des Entwässerungsgraben [m]. Dies entspricht einer Wasserstandsabsenkung von 0,64 m. Aus der Abbildung 6-1 bzw. der „Karte 18 Entwässerungsszenario I – Kiessee Barby I“ lassen sich die Auswirkung auf die Grundwassersituation entnehmen.

**Tabelle 6-1: Entwässerungsszenario I – Kiessee Barby I**

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert
Durchfluss IST-Zustand	$Q_{IST}$	$m^3/s$	0,001
Durchfluss SOLL-Zustand	$Q_{SOLL}$	$m^3/s$	0,021
<b>Entwässerungsabfluss</b>	$\Delta Q$	$m^3/s$	0,020
Höhe des Anfangspunktes	$h_1$	mNHN	46,80
Höhe des Endpunktes	$h_2$	mNHN	49,27
Grabenlänge	$L_G$	m	8104
<b>durchschnittliches Sohlgefälle</b>	$I$	‰	0,30
Länge von Entwässerungsgraben	$L_E$	m	543,98
Seewasserstand Ist-Zustand	$H_{IST}$	mNHN	50,07
Seewasserstand Soll-Zustand	$H_{SOLL}$	mNHN	49,43
<b>Absenkung</b>	$\Delta H$	m	0,64

Für eine hydrodynamische Simulation sind weiterhin Durchflusswerte erforderlich, die mittels einer Stichtagsmessung vom 24.08.2013 bzw. 25.08.2013 ermittelt wurden und im Anhang 9.1 hinterlegt sind. Das Verfahren zur Ermittlung dieser Werte ist in Abs. 2.5.3 beschrieben. Die ermittelten Durchflüsse und die für das hydrodynamische Modell verwendeten Randbedingungen sind in folgender Tabelle aufgelistet. Die Durchfluss-Randwerte sind hierbei an die gemessenen Randwerte angelegt. In Gräben, in denen kein Durchfluss erfasst wurde, ist für das hydrodynamische Modell ein Durchfluss-Randwert von  $0,001 m^3/s$  angenommen worden. Beispiele hierfür sind unter anderen der Nebengraben des Sauerangergrabens oder die Schönebecker Röthe – Upstream. Auch sollen alle Oberläufe wenn möglich den gemessenen Werten entsprechen, wie zum Beispiel beim Sauerangergraben – Upstream

oder bei dessen Nebengraben. Die Unterläufe werden aus den Oberläufen ermittelt und entsprechen nicht den Messwerten. Zum Beispiel ermittelt sich die Schönebecker Röthe - Downstream aus dessen Zuläufen Schönebecker Röthe – Downstream2 und Nebengraben der Schönebecker Röthe. Somit entspricht der Durchfluss-Randwert der Schönebecker Röthe – Downstream von  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,003 \text{ m}^3/\text{s} + 0,004 \text{ m}^3/\text{s}$ ) nicht dem eigentlichen Messwert von  $0,003 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Abweichung der beiden Werte zueinander sollte aber möglichst gering sein, um eine realitätsnahe Modellierung zu gewährleisten. Die Gefällerrandwerte wurden entsprechend an das mittlere Gefälle aus Tabelle 6-1 angelegt.

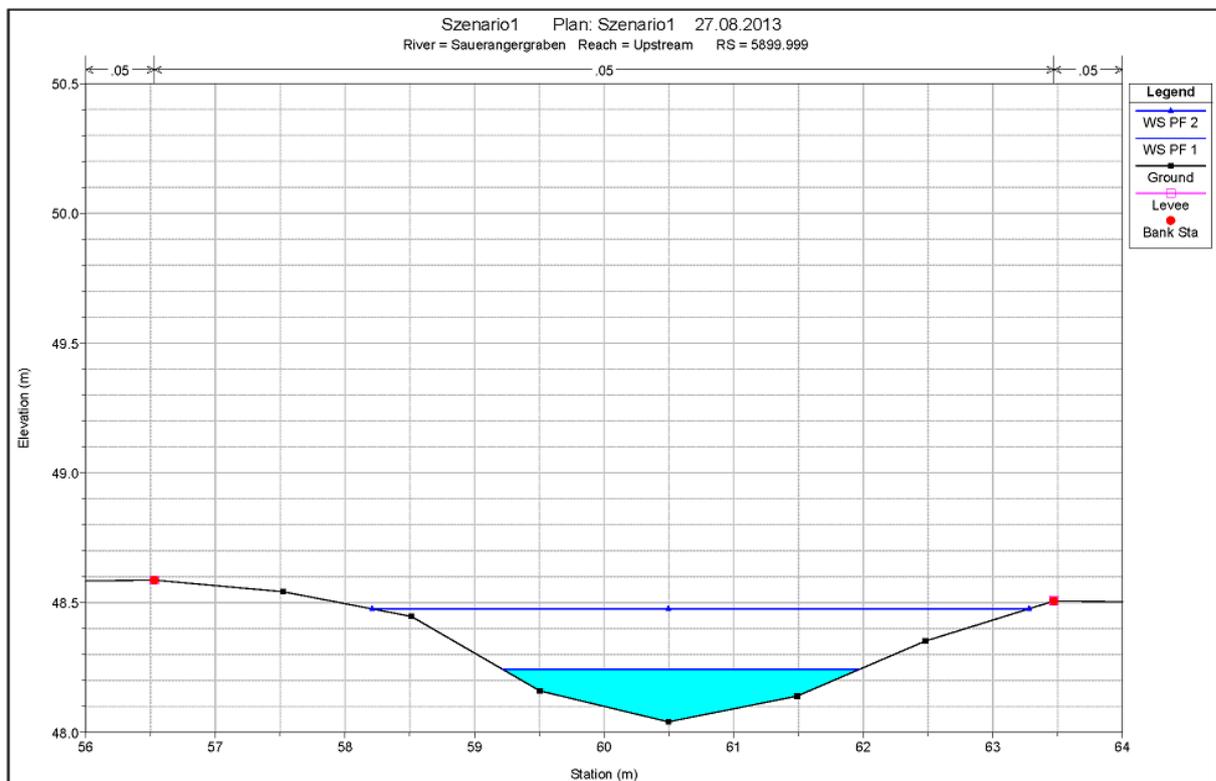
**Tabelle 6-2: Randwerte des hydrodynamischen Modell für das Entwässerungsszenario I**

<b>Graben-Benennung</b>	<b>Bereich</b>	<b>Gemessener Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Randwert Durchfluss IST [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Randwert Durchfluss SOLL [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Randwert Gefälle [-]</b>
SBK-Röthe	Downstream	0,003	0,007	0,027	0,0003
SBK-Röthe	Downstream2	0,003	0,003	0,023	0,0003
SBK-Röthe	Upstream	0,000	0,001	0,001	0,0003
Sauerangergr.	Downstream	n.g	0,002	0,022	0,0003
Sauerangergr.	Upstream	0,001	0,001	0,021	0,0003
NG des Sauerangergr.	Downstream	0,000	0,001	0,001	0,0003
NG der SBK-Röthe	Downstream	0,004	0,004	0,004	0,0003

Die fehlenden Randwert-Durchflüsse für den SOLL-Zustand des Entwässerungsszenario I wurden über die Methode „Versuch und Irrtum (Trial and Error)“ generiert. Das bedeutet, dass so lange Simulationsläufe erfolgen, bis ein kritisches Profil den bordvollen Zustand erreicht. Aus der Tabelle 6-2 ist zu entnehmen, dass ein Durchfluss SOLL-Zustand von  $0,021 \text{ m}^3/\text{s}$  am Entwässerungspunkt in dem Sauerangergraben – Upstream ermittelt wurde. Das heißt, dass an dem Punkt, wo der Entwässerungsgraben in den Sauerangergraben einmündet, ein Durchfluss bis zu  $0,0021 \text{ m}^3/\text{s}$  anliegen kann, bevor es an einem kritischen Profil zu einem bordvollen Zustand kommen kann (Siehe Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3). Aus dem „Längsschnitt des Entwässerungsszenario I“, welcher im Anhang 9.2.1 unter „Längsschnitte Entwässerungsszenario I“ hinterlegt ist, wird durch einen Vergleich des Wasserstandes „WS PF2“<sup>14</sup> mit der „left Overbank (LOB)“ sowie der „right Overbank (ROB)“ ersichtlich. Die

<sup>14</sup> WS PF 2 = Wasserstand des Sollzustandes im Profil

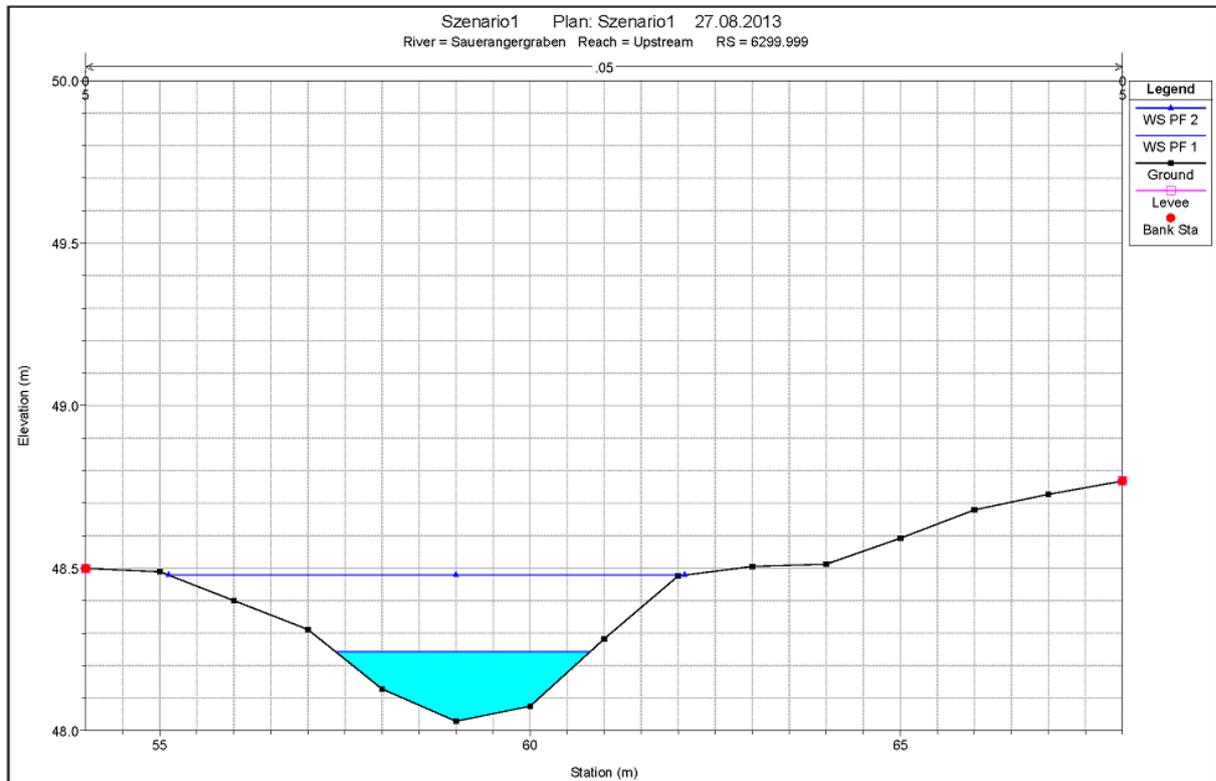
„left Overbank (LOB)“ sowie die „right Overbank (ROB)“ stellen in HEC-RAS die Grenzen zwischen rechtem bzw. linkem Flussvorland und Flusslauf dar. In dieser Arbeit wurden sie so definiert, dass sie beschreiben, ab wann der Graben den bordvollen Zustand überschreitet. Kritische Profile liegen hierbei an der Stationierung 5700 m und 6100 m sowie bei 1450 m vor. Dies entspricht den Profilen 5+900 und 6+300 sowie 1+500, die im Anhang 9.3 unter „kritische Profile“ hinterlegt sind. Das Profil 1+500 wird hierbei nicht als kritisches Profil gewertet, da an dieser Stationierung das Gewässer nicht in der vollen Breite aufgenommen wurde und somit aus der Betrachtung entfernt wurde. Die beiden anderen Profile werden als kritisch angesehen, da das Grabenprofil ersichtlich ist. Sie sind nachfolgend in Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 dargestellt.



**Abbildung 6-2: Kritisches Profil 5+900 des Entwässerungsszenario I**

Aus der Abbildung 6-2 sind hierbei zwei Wasserstände zu entnehmen. Zum einen der Wasserstand WS PF 1, welcher am IST-Zustand anliegt und zum anderen der Wasserstand WS PF 2, welcher am SOLL-Zustand anliegt. Des Weiteren beschreiben die beiden rot eingefärbten Punkte die Grenzen, wann rechts- und linksseitig der bordvolle Zustand erreicht wird. Hierbei wird immer der Punkt mit dem niedrigeren Niveau betrachtet. Im Fall der Abbildung 6-2 ist dies der rechtsseitige Punkt mit einem Niveau von ca. 48,5 mNHN. Auch

ist zu aus der Abbildung 6-2 zu entnehmen, dass der Wasserstand WS PF 2 annähernd das Niveau von 48,5 mNHN erreicht. Somit kann nachgewiesen werden, dass an diesem Profil der bordvolle Zustand anliegt.



**Abbildung 6-3: Kritisches Profil 6+300 des Entwässerungsszenario I**

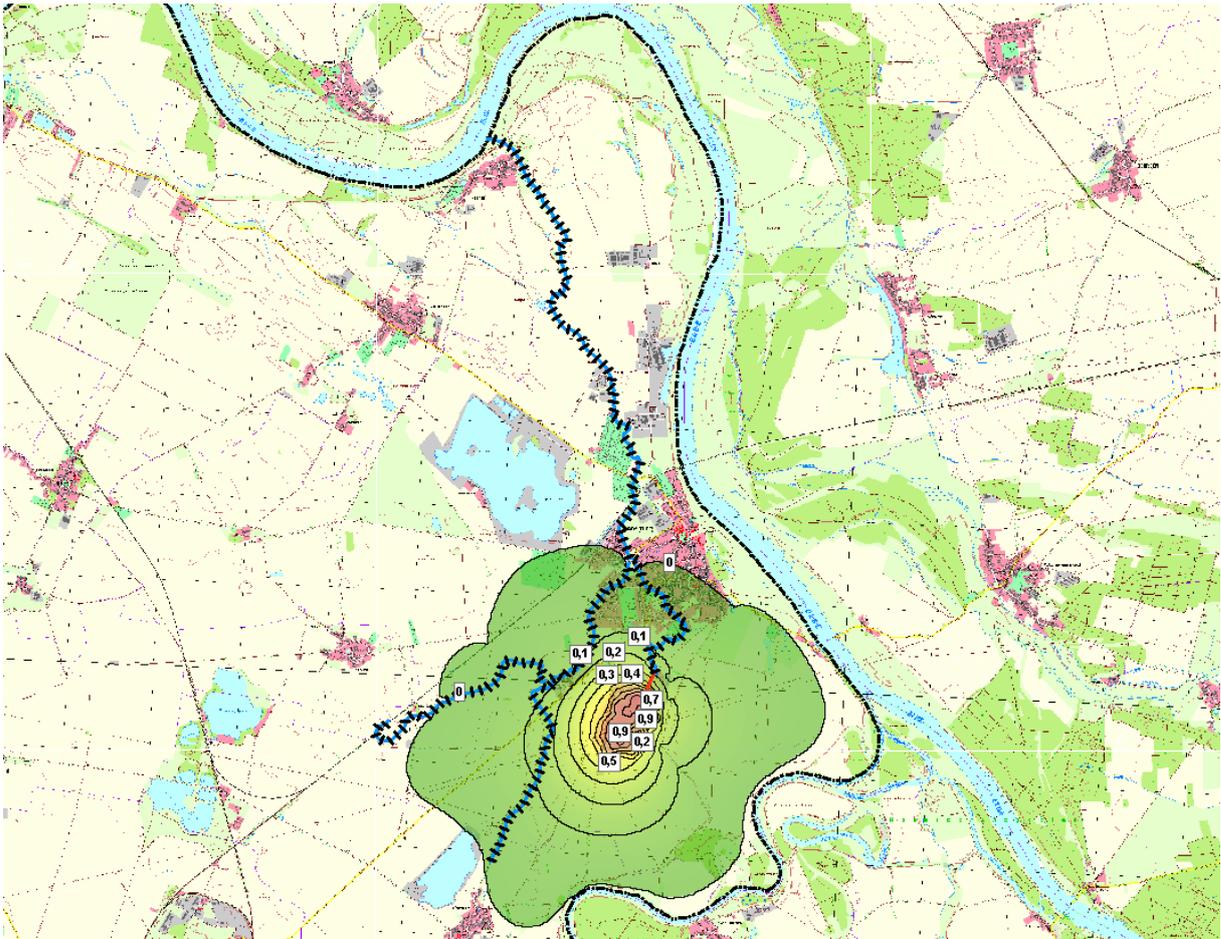
Es kann festgestellt werden, dass eine Entwässerung des „Kiessees Barby I“ von  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  im freien Gefälle möglich ist. Auch kann nach Tabelle 6-1 gesagt werden, dass eine Absenkung des Seewasserstandes ohne Vertiefung der Grabensohle von 0,64 m möglich ist.

Wie in den vorhergehenden Abschnitten wurde der Wasserstand des „Kiessees Barby I“ über die *Cauchy*-Randbedingung manipuliert. Aus der Tabelle 6-1 ist zu entnehmen, dass der Wasserstand des Gewässers auf ein Niveau von 49,43 mNHN entwässert ist. Nachdem die Grundwassermodellierung erfolgt ist, wurde das Ergebnis über das Verfahren aus Abs. 2.4.4 in das GIS integriert. Aus der „Karte 18 Entwässerungsszenario I – Kiessee Barby I“ ist zu entnehmen, dass es zu einer maximalen Grundwasserstands-Absenkung von 0,64 m kommt. Dies entspricht der vorgesehenen Absenkung aus Tabelle 6-1. Der „Absenktrichter“ erstreckt sich im Osten von der Elbe nach Westen bis zum Ortsteil Gnadau sowie von dem Ortsteil

Glinde bis zum „Kiessee Barby II“ und dem „Großen See“. Wie in den anderen Szenarien beschrieben wird auch der Absenktrichter des „Entwässerungsszenario I“ von umliegenden Randwerten beeinflusst und begrenzt. So beeinflussen die *Dirichlet*-Randbedingungen der Elbe sowie die *Cauchy*-Randbedingungen des „Kiessees Barby II“ und des „Großen Sees“ den „Absenktrichter“. Dieses Entwässerungsszenario nimmt Einfluss auf die Grundwassersituation der Ortsteile Barby (Elbe), Gnadau und Pömmelte sowie Glinde und Wespen.

## 6.2 Entwässerungsszenario II - Kiessee Barby II

Die Entwässerung des „Kiessees Barby II“ soll, wie im vorherigen Abschnitt, im Freigefälle über einen Entwässerungsgraben ermöglicht werden. Hierbei wird das Gewässer in nördliche Richtung in den „Landgraben Ost“, welcher von hier aus über den „Landgraben“ in die Elbe einmündet, entwässert. Aus der Abbildung 6-4 ist zu entnehmen, dass zusätzlich zu dem „Landgraben Ost“ auch der „Landgraben West“ in den „Landgraben“ einmündet. Weiterhin entwässert der „Iritzer Graben“ in den „Landgraben West“. Die geometrischen Daten dieses Gewässernetzes wurden mit den Verfahren gemäß Abs. 2.5.2 erfasst. Die Lage des Grabennetzes ist aus der Abbildung 6-4 sowie aus der „Karte 19 Entwässerungsszenario II – Kiessee Barby II“ zu entnehmen.



**Abbildung 6-4: Entwässerungsszenario II - Kiesesee Barby II**

Nachdem die geometrischen Daten in das Modell eingepflegt wurden, können für den Entwässerungsgraben Lageinformationen erhoben werden. Aus der Abbildung 6-4 und der „Karte 19 Entwässerungsszenario II – Kiesesee Barby II“ ist zu entnehmen, dass der Entwässerungsgraben aus dem „Kiesesee Barby II“ in nördliche Richtung in den „Landgraben Ost“ einmündet. Zusätzlich ist im GIS eine Grabenlänge von 236,89 m ermittelt worden (siehe Tabelle 6-3).

Da die Länge des Entwässerungsgrabens bekannt ist, kann nun das dazugehörige Sohlgefälle ermittelt werden. Zuvor jedoch ist das durchschnittliche Sohlgefälle des vorhandenen Entwässerungsstranges des Gewässernetzes zu ermitteln. Über die Formel 6-1 ist ein durchschnittliches Gefälle von 0,3 ‰ berechnet worden. Somit soll der Entwässerungsgraben auch ein Gefälle von 0,3 ‰ aufweisen.

Mit den so erhobenen Informationen kann nun die Wasserstandsabsenkung des Kiesees unter Verwendung der Formel 6-2 ermittelt werden. Der Wasserstand kann auf ein Niveau von 50,24 mNHN abgesenkt werden. Dies entspricht einer Absenkung von 0,92 m (siehe Tabelle 6-3).

**Tabelle 6-3: Entwässerungsszenario II - Kiesee Barby II**

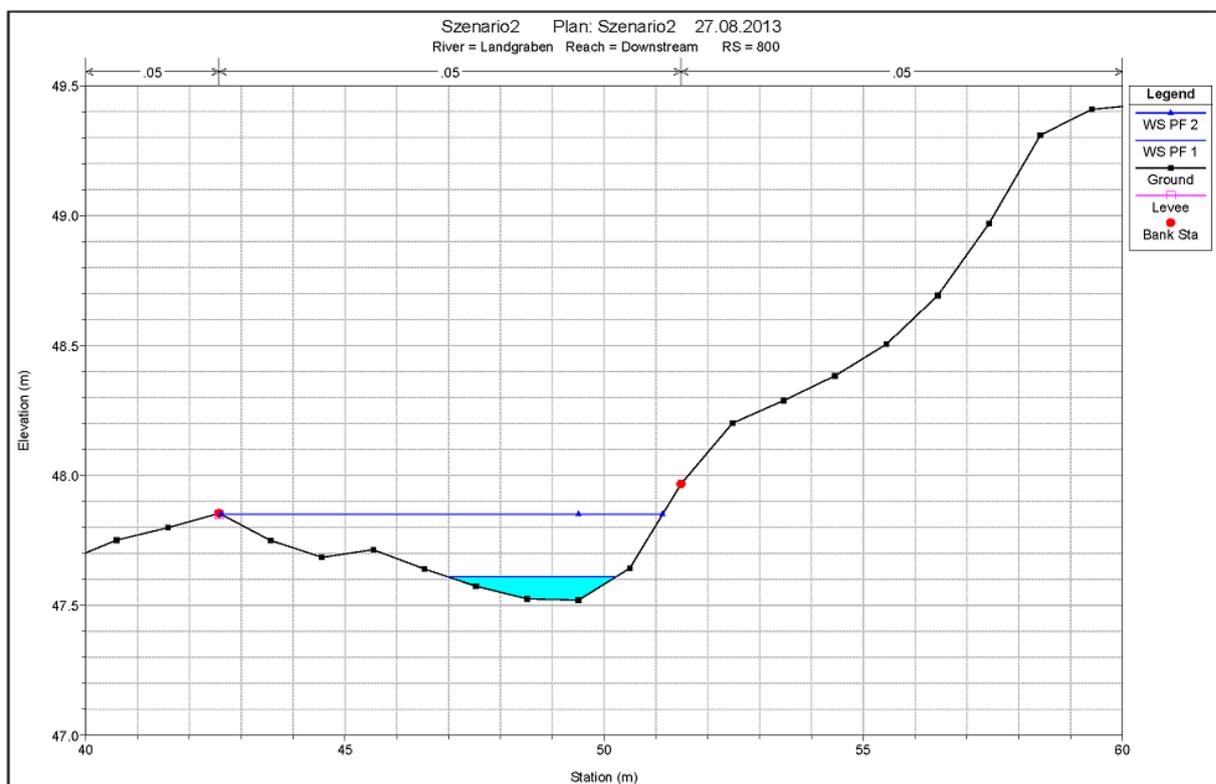
Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert
Grabenabfluss IST-Zustand	$Q_{IST}$	$m^3/s$	0,001
Grabenabfluss SOLL-Zustand	$Q_{SOLL}$	$m^3/s$	0,156
<b>Entwässerungsabfluss</b>	$\Delta Q$	$m^3/s$	0,155
Höhe des Anfangspunktes	$h_1$	mNHN	47,29
Höhe des Endpunktes	$h_2$	mNHN	50,18
Grabenlänge	$L_G$	m	8200
<b>durchschnittliches Gefälle</b>	$I$	‰	0,35
Länge von Entwässerungsgraben	$L_E$	m	236,89
Seewasserstand Ist-Zustand	$H_{IST}$	mNHN	51,16
Seewasserstand Soll-Zustand	$H_{SOLL}$	mNHN	50,24
<b>Absenkung</b>	$\Delta H$	m	0,92

Auch sind nun über die hydrodynamische Modellierung Durchflusswerte des Entwässerungsgrabens zu ermitteln. Die Durchflusswerte des IST-Zustandes im Gewässernetz wurden hierbei über eine Stichtagsmessung vom 24.08.2013 bzw. 25.08.2013 in erster Instanz ermittelt. In zweiter Instanz wurden diese nach dem in Abs. 6.1 beschriebenen Verfahren manipuliert (siehe Tabelle 6-4). Die Gefällerrandwerte wurden einheitlich auf das Gefälle von 0,3 ‰ gesetzt.

**Tabelle 6-4: Randwerte des hydrodynamischen Modell für das Entwässerungsszenario II**

Graben-Benennung	Bereich	Gemessener Durchfluss [ $m^3/s$ ]	Randwert	Randwert	Randwert Gefälle [-]
			Durchfluss IST [ $m^3/s$ ]	Durchfluss SOLL [ $m^3/s$ ]	
Landgraben	Downstream	0,007	0,007	0,162	0,0003
Landgraben Ost	Downstream	0,000	0,001	0,156	0,0003
Landgraben West	Downstream	0,001	0,0047	0,0047	0,0003
Landgraben West	Upstream	0,004	0,004	0,004	0,0003
Iritzer Gr.	Upstream	0,0007	0,0007	0,0007	0,0003

Die Durchfluss-Randwerte des SOLL-Zustandes sind in Folge über das Verfahren des „Versuchs und Irrtums“ generiert worden. Wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, bedeutet dies, dass solange verschiedene Durchfluss-Randwerte getestet werden, bis an einem „kritischen Profil“ der bordvolle Zustand generiert wurde. Aus dem im Anhang 9.2.2 hinterlegten Längsschnitt des Entwässerungsszenarios II ist bei einem Vergleich zwischen den Wasserständen „WS-PF2“ mit der „Left Overbank (LOB)“ sowie der „Right Overbank (ROB)“ zu entnehmen, dass sich das kritische Profil auf einer Grabenlänge von 700 m befindet. Dies entspricht der Stationierung von 0+800 am Landgraben – Downstream. Die Diskrepanz entsteht dadurch, dass die Grabenlänge entgegen der Fließrichtung vom ersten Profil 0+100 ermittelt wird. Somit werden die ersten 100 m zwischen Grabenmündung und erstem Profil vernachlässigt. Aus Tabelle 6-3 ist zu entnehmen, dass ein Entwässerungsabfluss von  $0,155 \text{ m}^3/\text{s}$ , welcher aus der Differenz zwischen Durchflusswert des SOLL-Zustandes und Durchflusswert des IST-Zustandes gebildet wird, angesetzt wird. Das kritische Profil ist nachfolgend in der Abbildung 6-5: Kritisches Profil 0+800 des Entwässerungsszenario II sowie im Anhang 9.3 unter „kritische Profile Entwässerungsszenario II“ dargestellt. Aus Abbildung 6-5 ist zu entnehmen, dass der Wasserstand WS PF 2 den bordvollen Zustand erreicht.

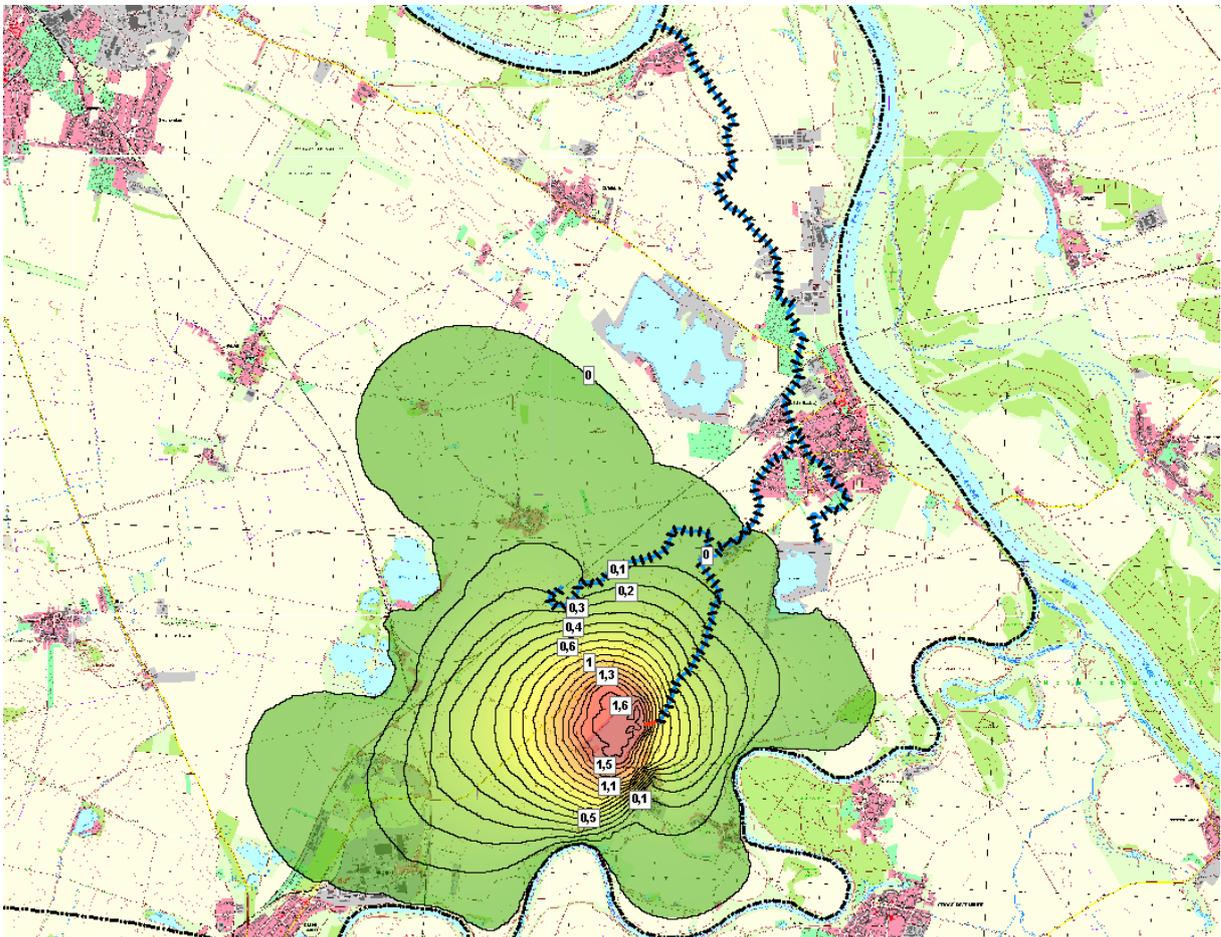


**Abbildung 6-5: Kritisches Profil 0+800 des Entwässerungsszenario II**

Aus Abbildung 6-4 sowie der „Karte 19 Entwässerungsszenario II – Kiessee Barby II“ ist der Einfluss auf den Grundwasserspiegel in der Umgebung um den „Kiessee Barby II“ zu entnehmen. Wie bereits in anderen Kapiteln angewandt, findet die Manipulation des Seewasserstandes über eine Veränderung der *Cauchy*-Randbedingung statt. Wie aus Tabelle 6-3 zu sehen ist, soll der Wasserstand auf ein Niveau von 50,24 mNHN abgesenkt werden. Dies hat wiederum einen „Absenktrichter“ zur Folge, der im Süden von der Saale und im Osten von der Elbe begrenzt wird. Auch wird der „Absenktrichter“ im Westen von dem „Kiessee Tornitz“ sowie im Norden von dem „Kiessee Barby I“ begrenzt. Somit wird auch in diesem Szenario eine Beeinflussung von anderen Randbedingungen in der Umgebung nicht ausgeschlossen. Aus der „Karte 19 Entwässerungsszenario II- Kiessee Barby II“ ist weiterhin eine maximale Grundwasserabsenkung von 0,97 m zu entnehmen. Dies entspricht in etwa der in Tabelle 6-3 vorgesehenen Absenkung von 0,92 m. Einen Einfluss auf die Grundwassersituation ist hierbei lediglich im Ortsteil Barby (Elbe) festzustellen.

### 6.3 Entwässerungsszenario III - Kiessee Tornitz

Die Entwässerung des „Kiessees Tornitz“ soll, wie die vorhergehenden Entwässerungsszenarien, auch mittels eines Entwässerungsgrabens, welcher im freien Gefälle den See entwässern soll, erfolgen. Hierbei wird der Kiessee in westlicher Richtung in den „Landgraben West“ entwässert. Da der Landgraben West bereits im vorhergehenden Abs. 6.2 aufgenommen wurde, kann das Gewässernetz mit allen geometrischen Daten übernommen werden (Vergleich der Abbildung 6-4 mit Abbildung 6-6).



**Abbildung 6-6: Entwässerungsszenario III - Kiessee Tornitz**

Nachdem die geometrischen Daten definiert wurden, ist jetzt die Lage des Entwässerungsgrabens zu ermitteln. Aus Abbildung 6-6 bzw. „Karte 20 Entwässerungsszenario III – Kiessee Tornitz“ ist die Lage des Entwässerungsgrabens zu

entnehmen. Zudem ist aus der Tabelle 6-5 eine Grabenlänge von 204,51 m abzulesen, welche unter Verwendung des GIS ermittelt wurde.

Mit der bekannten Länge des Entwässerungsgrabens und einem über die Formel 6-1 ermittelten Sohlgefälle von 0,3 ‰ kann jetzt der Seewasserstand des SOLL-Zustandes über die Formel 6-2 ermittelt werden. Aus der Tabelle 6-5 ist zu entnehmen, dass dieser ein Niveau von 50,15 mNHN aufweist. Auch kann nun aus der Differenz zwischen dem Seewasserstand des IST-Zustandes und dem Seewasserstand des SOLL-Zustandes eine Absenkung von 1,61 m ermittelt werden.

**Tabelle 6-5: Entwässerungsszenario III - Kiessee Tornitz**

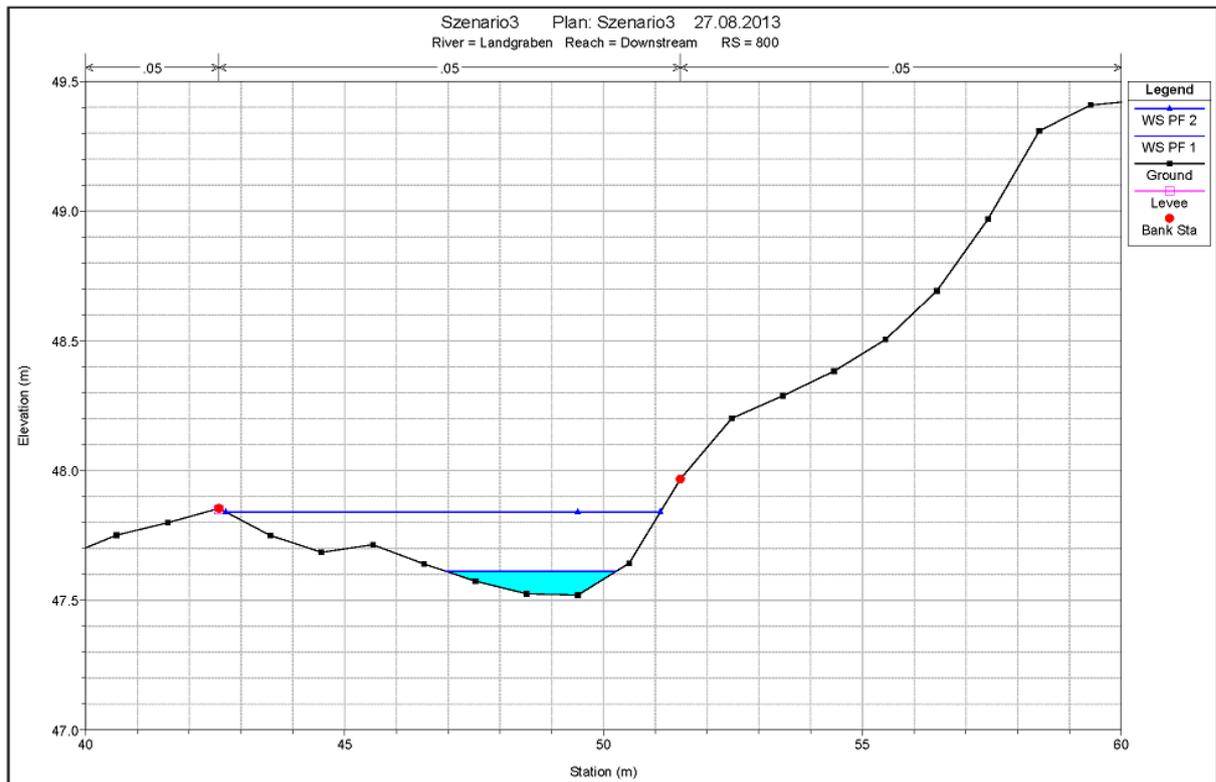
Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert
Grabenabfluss IST-Zustand	$Q_{IST}$	m <sup>3</sup> /s	0,004
Grabenabfluss SOLL-Zustand <sup>2)</sup>	$Q_{SOLL}$	m <sup>3</sup> /s	0,134
<b>Entwässerungsabfluss</b>	$\Delta Q$	m <sup>3</sup> /s	0,130
Höhe des Anfangspunktes	$h_1$	mNHN	47,29
Höhe des Endpunktes	$h_2$	mNHN	51,09
Grabenlänge	$L_G$	m	10500
<b>durchschnittliches Gefälle</b>	$I$	‰	0,45
Länge von Entwässerungsgraben	$L$	m	204,51
Seewasserstand Ist-Zustand	$H_{IST}$	mNHN	51,76
Seewasserstand Soll-Zustand	$H_{SOLL}$	mNHN	50,15
<b>Absenkung</b>	$\Delta H$	m	1,61

Über das hydrodynamische Modell werden nun Durchfluss- bzw. Wasserstandsdaten für das vorhandene Gewässernetz erhoben. Um die Auslastung des Gewässernetzes simulieren zu können, werden Durchflusswerte für den IST-Zustand, die mit Hilfe einer Stichtagsmessung vom 24.08.2013 bzw. 25.08.2013 ermittelt wurden, angenommen. Die gemessenen Durchflusswerte werden, wie in Abs. 6.1 beschrieben manipuliert (siehe Tabelle 6-6). Wie in den vorhergehenden Abschnitten sind die Randwerte der Sohlgefälle auf 0,3‰ für das gesamte Gewässernetz gleich gesetzt worden.

**Tabelle 6-6: Randwerte des hydrodynamischen Modell für das Entwässerungsszenario III**

Graben- Benennung	Bereich	Gemessener Durchfluss [m <sup>3</sup> /s]	Randwert	Randwert	Randwert Gefälle [-]
			Durchfluss IST [m <sup>3</sup> /s]	Durchfluss SOLL [m <sup>3</sup> /s]	
Landgraben	Downstream	0,007	0,007	0,137	0,0003
Landgraben Ost	Downstream	0,000	0,001	0,001	0,0003
Landgraben West	Downstream	0,001	0,0047	0,1347	0,0003
Landgraben West	Upstream	0,004	0,004	0,134	0,0003
Iritzer Gr.	Upstream	0,0007	0,0007	0,0007	0,0003

Über das Verfahren des „Versuchs und Irrtums“ wurden nun die Randwert-Durchflüsse des SOLL-Zustandes generiert. Auch in diesem Szenario wurde das Profil mit der Stationierung 0+800 am Landgraben – Downstream als kritisch definiert. Hierbei wurde im Längsschnitt „Entwässerungsszenario III“ (siehe Anhang 9.2.3) die „Right Overbank (ROB)“ und die „Left Overbank (LOB)“ mit den Wasserständen WS PF 2 verglichen. Der Entwässerungsabfluss lässt sich aus der Differenz zwischen dem Durchflusswert des SOLL-Zustandes und dem Durchflusswert des IST-Zustandes ermitteln. Der Entwässerungsabfluss beträgt 0,13 m<sup>3</sup>/s (siehe Tabelle 6-5). In der Abbildung 6-7 ist das kritische Profil für dieses Szenario dargestellt. Es ist der Wasserstand des IST-Zustandes (WS PF1) sowie der Wasserstand des SOLL-Zustandes (WS PF2), welcher den bordvollen Zustand beschreibt, aufgetragen. Auch wurde die „Left Overbank (LOB)“ sowie die „Right Overbank (ROB)“ gekennzeichnet. Das kritische Profil ist zudem im Anhang 9.3 unter „kritische Profile“ hinterlegt worden.



**Abbildung 6-7: Kritisches Profil 0+800 des Entwässerungsszenario III**

Nach der hydrodynamischen Modellierung folgt die Grundwassermodellierung für das Entwässerungsszenario III. Wie bereits verdeutlicht werden hierzu die Wasserstände des Kieselbaches über die *Cauchy*-Randbedingung verändert. Hinsichtlich dieser Sache wurden die *Cauchy*-Randbedingungen im Gebiet des „Kieselbaches Tornitz“ um 1,61 m abgesenkt. Somit ist der Seewasserstand auf ein Niveau von 50,15 mNHN gesenkt worden (siehe Tabelle 6-5). Nach der Veränderung der Randwerte sowie der Durchführung der Simulation wurden die Ergebnisse über die bereits erläuterten Verfahren aus Abs. 2.4.4 in das GIS integriert. Aus der Abbildung 6-6 bzw. der „Karte 20 Entwässerungsszenario – Kieselsee Tornitz“ kann nun die veränderte Grundwassersituation entnommen werden. Hierbei ist ersichtlich, dass der „Absenktrichter“ im Süden von der Saale begrenzt wird. Des Weiteren wird der „Absenktrichter“ im Nordosten vom „Kieselsee Barby II“ und im Nordwesten sowohl von dem „Großen See“ als auch von den „Schachtteichen“ begrenzt. Die Begrenzungen spiegeln hierbei den Einfluss der umliegenden *Dirichlet*- und *Cauchy*-Randbedingungen wieder. Aus der „Karte 20 Entwässerungsszenario III – Kieselsee Tornitz“ kann zudem eine maximale Grundwasserabsenkung von 1,64 m entnommen werden. Dies entspricht der vorgesehenen Wasserstands-Absenkung von 1,61 m und weicht nur marginal von der maximalen

Grundwasserabsenkung ab. Dieses Entwässerungsszenario III beeinflusst die Grundwassersituation in den Ortteilen Tornitz und Wespen sowie der kleineren Ortschaften Werkleitz und Zeit. Auch wird die Grundwassersituation in Teilen der Stadt Calbe (Saale) beeinflusst.

#### **6.4 Entwässerungsszenario IV – Kombination „Kiessee Barby I“ und „Kiessee Barby II“**

Das „Entwässerungsszenario IV“ stellt eine Kombination aus dem „Entwässerungsszenario I“ und aus dem „Entwässerungsszenario II“ dar. Hierbei wird sowohl der „Kiessee Barby I“ auf das ermittelte Niveau des „Entwässerungsszenario I“ als auch der „Kiessee Barby II“ auf das ermittelte Niveau im „Entwässerungsszenario II“ abgesenkt. Da beide Gewässer über unterschiedliche Gewässernetze entwässert werden, sind auch die Durchflussdaten der Entwässerungsgräben mit den Durchflüssen der Entwässerungsszenarien I und II äquivalent. Dieses Szenario wurde erstellt, um speziell Einfluss auf die Grundwassersituation des Ortsteiles Barby (Elbe) nehmen zu können. Aus der Abbildung 6-8 ist zu entnehmen, dass dieses Szenario eine Grundwasserabsenkung im gesamten bebauten Bereich des Ortsteiles ermöglicht.

Wie in den vorhergehenden Szenarien ist auch für dieses Szenario die „Karte 21 Entwässerungsszenario IV“ erstellt und im Anhang 9.6 hinterlegt worden. Aus dieser ist zu entnehmen, dass für dieses Szenario eine maximale Grundwasserabsenkung von 0,97 m. Die maximale Grundwasserabsenkung ist am „Kiessee Barby II“ vorzufinden und entspricht in etwa der vorgenommenen Absenkung der Randbedingung von 0,92 m. Zudem ist die maximale Grundwasserabsenkung im „Entwässerungsszenarios IV“ äquivalent mit der maximalen Grundwasserabsenkung im „Entwässerungsszenario II“. Aus der Abbildung 6-8 bzw. der Karte 21 ist zudem zu entnehmen, dass, wie schon erläutert die gesamte Grundwassersituation im Ortsteil Barby (Elbe) beeinflusst wird. Weiterhin wird auch die Grundwassersituation der Ortsteile Glinde, Pömmelte, Wespen und Gnadau beeinflusst. Wie auch in den vorhergehenden Szenarien beschrieben wird auch das „Entwässerungsszenario IV“ von umliegenden Randbedingungen begrenzt. So werden die nordöstlichen sowie die östlichen Grenzen des „Absenktrichters“ von den *Dirichlet*-Randbedingungen der Elbe

beeinflusst. Auch wird die südliche Grenze von den *Dirichlet*-Randbedingungen der Saale begrenzt. Des Weiteren findet im südwestlichen Gebiet eine Abgrenzung durch die *Cauchy*-Randbedingung des „Kiessees Tornitz“ statt. Zudem wird die westliche Grenze des „Absenktrichters“ durch die *Cauchy*-Randbedingungen des „Großen Sees“ beeinflusst.

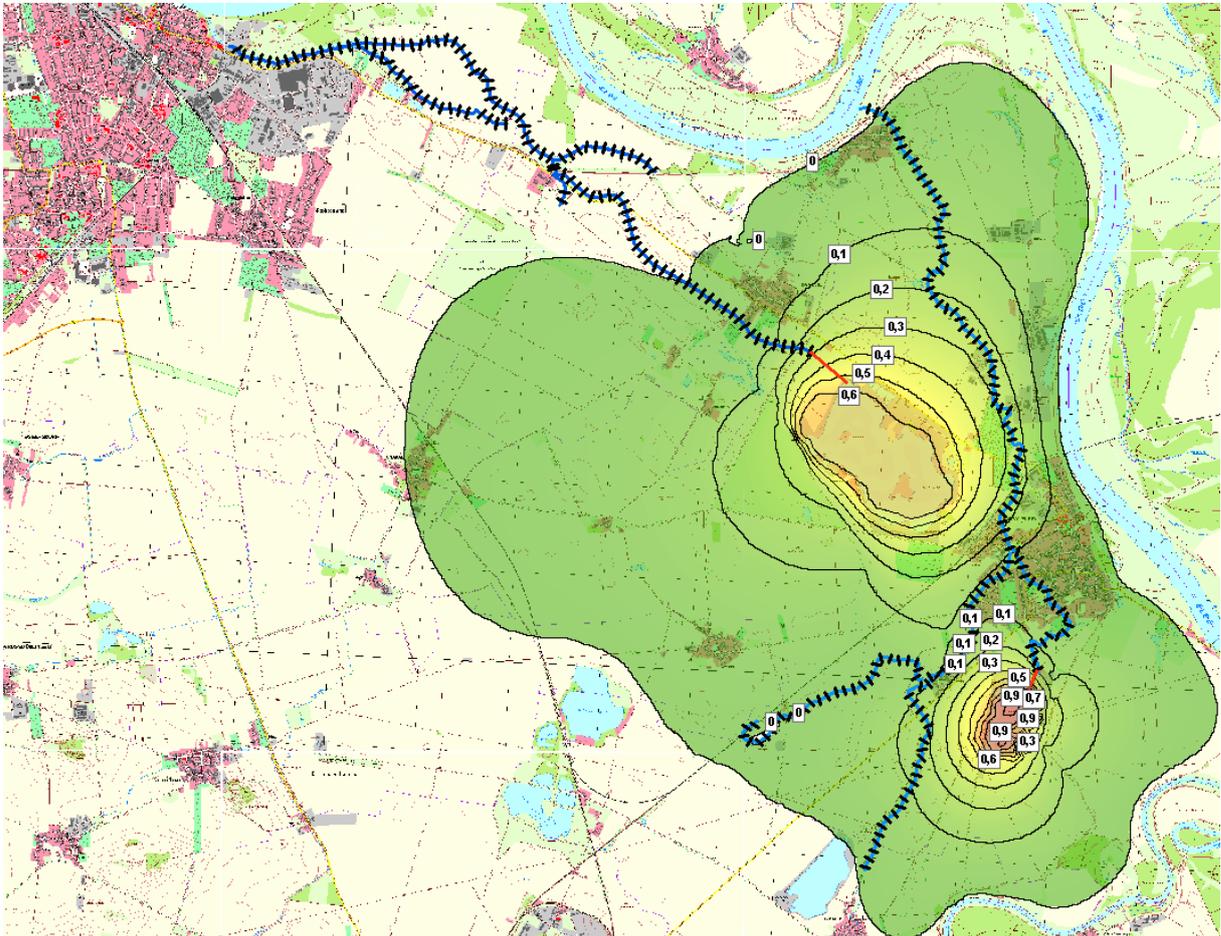
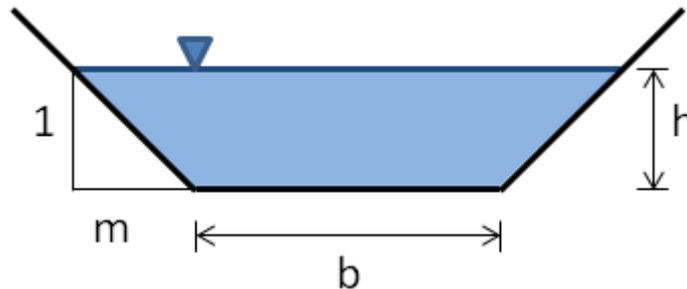


Abbildung 6-8: Entwässerungsszenario IV – Kombination „Kiessee Barby I“ und „Kiessee Barby II“

## 6.5 Geometrische Informationen der Entwässerungsgräben

In den vorhergehenden Abschnitten sind bereits diverse Informationen über die möglichen Entwässerungsgräben definiert worden, so sind bereits Durchflüsse ermittelt worden. Auch die Grabenlänge sowie das Sohlgefälle sind bekannt. Des Weiteren wurde die Rauheit definiert. Jedoch sind noch keine Informationen über die Geometrie der Querprofile erhoben worden. Als einleitender Schritt ist die Profilform zu bestimmen. Ein häufig vorkommendes

Profil bei offenen Gräben ist das Trapezprofil, welches für die Entwässerungsgräben gewählt wurde.



**Abbildung 6-9: Querprofil der Entwässerungsgräben**

Aus Abbildung 6-9 ist die Geometrie der Querprofile zu entnehmen. Hierbei soll die Sohlbreite 0,5 m betragen. Die Böschungsneigung ist mit 1/3 zu definieren. Nun kann nach der Fließformel von *Manning-Strickler* der Wasserstand im Graben ermittelt werden:

$$Q = k_{ST} * I^{1/2} * R^{2/3} * A \quad (6-3)$$

Mit Q: Durchfluss [m<sup>3</sup>/s],  $k_{St}$ : *Strickler*-Rauheitsbeiwert [m<sup>1/3</sup>/s], I: Sohlgefälle [-], R: hydraulische Radius [m] und A: Strömungsquerschnitt [m<sup>2</sup>]. Mit der nachfolgenden Formel ist der hydraulische Radius zu berechnen:

$$R = \frac{A}{U} = \frac{(b + m * h)h}{b + 2 * h * \sqrt{1 + m^2}} \quad (6-4)$$

Mit R: hydraulische Radius [m], A: Strömungsquerschnitt [m<sup>2</sup>], U: benetzter Umfang [m], b: Sohlbreite [m], m: Böschungsneigung [m] und h: Wassertiefe [m]. In der Tabelle 6-7 wurden alle ermittelten Informationen der einzelnen Entwässerungsgräben aufgelistet. Es wurde hierbei für den Graben des Entwässerungsszenario I ein Wasserstand von 0,21 m, für den Graben des Entwässerungsszenarios II ein Wasserstand von 0,51 m und für den Graben des Entwässerungsszenarios III ein Wasserstand von 0,48 m ermittelt.

**Tabelle 6-7: Kennwerte der Entwässerungsgräben**

	<b>FZ</b>	<b>E</b>	<b>Szenario I</b>	<b>Szenario II</b>	<b>Szenario III</b>
<b>Durchfluss</b>	Q	m <sup>3</sup> /s	0,020	0,155	0,130
<b>Länge</b>	L	m	543,98	236,89	204,51
<b>Gefälle</b>	I	‰	0,3	0,3	0,3
<b>Rauheitsbeiwert nach Strickler</b>	k <sub>St</sub>		20	20	20
<b>Sohlbreite</b>	b	m	0,5	0,5	0,5
<b>Böschungneigung</b>	m	m	3	3	3
<b>Wassertiefe</b>	h	m	0,21	0,51	0,48

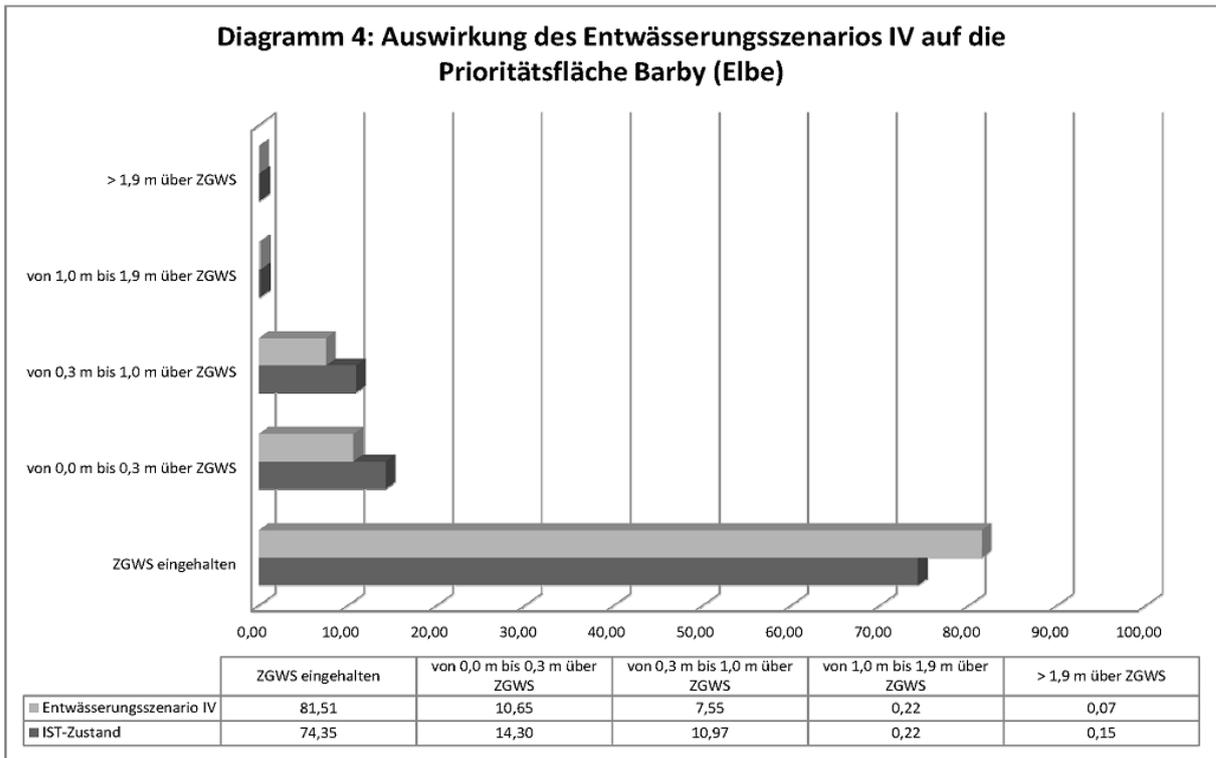
## 6.6 Evaluierung der Prioritätsflächen

Um detailliertere Aussagen über die Wirksamkeit der Entwässerungsszenarien auf die Grundwassersituation in den einzelnen Ortsteilen der Einheitsgemeinde Stadt Barby treffen zu können, ist es notwendig die Prioritätsflächen zu evaluieren. Die Generierung der Prioritätsflächen ist in Abs. 4.3 beschrieben. Hierbei wird die Abweichung zum Zielgrundwasserstand der einzelnen Entwässerungsszenarien sowie der Basisvariante in den einzelnen Prioritätsflächen der Ortsteile bewertet. Die Abweichung zum Zielgrundwasserstand ist hierbei in Abs. 4.2 beschrieben. Um eine Homogenität der Evaluierung zu den folgenden erstellten Karten zu gewährleisten, wurden die gleichen Kategorien zur Beschreibung der Abweichung zum Zielgrundwasserstand verwendet. In den Karten 24 – 27, die im Anhang 9.6 im Kartenwerk Teil 2 hinterlegt sind, ist die jeweilige Abweichung zum Zielgrundwasserstand der einzelnen Entwässerungsszenarien dargestellt. Auch sind die jeweiligen Prioritätsflächen in den Karten gekennzeichnet.

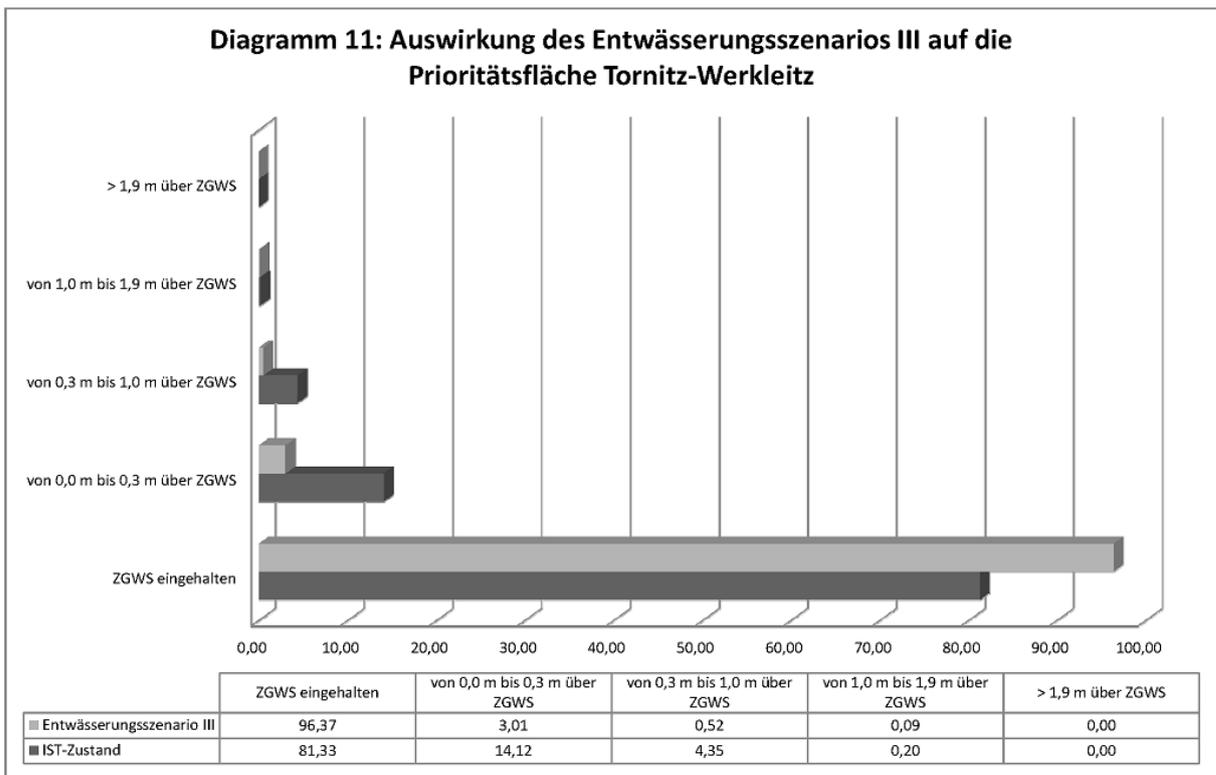
Innerhalb jeder Prioritätsfläche wurden nun die Abweichungen zum Zielgrundwasserstand jedes Entwässerungsszenarios untersucht. So sind aus dieser Untersuchung 24 Diagramme entstanden. Aus der Abbildung 6-10 ist ersichtlich, dass das Diagramm die sechs bereits erläuterten Kategorien beinhaltet. In den Diagrammen werden die prozentualen Verteilungen der einzelnen Kategorien auf die Gesamtfläche der jeweiligen Prioritätsfläche dargestellt. Zudem werden jeweils das fokussierte Szenario und die Basisvariante (IST-Zustand) gegenübergestellt. In der Abbildung 6-10 sowie in der Abbildung 6-11 sind zwei dieser

Diagramme dargestellt, welche für weitere Untersuchungen bedeutsam sind. Zum einen wird in der Abbildung 6-10 die Auswirkungen des Entwässerungsszenario IV, welches den stärksten Einfluss der untersuchten Entwässerungsszenarien auf die Grundwassersituation in Barby (Elbe) nimmt, dargestellt. Zum anderen ist in der Abbildung 6-11 der Einfluss des Entwässerungsszenario III auf die Grundwassersituation des Ortsteils Tornitz dargestellt, da dieses Szenario in dem Prioritätsgebiet Tornitz-Werkleitz einen zielgrundwasserstandsverträglichen Zustand erzeugt.

Für den Ortsteil Barby (Elbe) der Einheitsgemeinde Stadt Barby ist festzustellen, dass in ca. 75 % der Prioritätsflächen der Zielgrundwasserstand eingehalten wird (siehe Anhang 9.4 „Diagramme zur Evaluierung der Prioritätsflächen“ Diagramm 1). Auch ist festzustellen, dass eine Zielgrundwasserstandverletzung von bis zu 1 m vorliegt. Größere Abweichungen werden flächenmäßig als vernachlässigbar interpretiert. Aus dem Diagramm 3 ist zu entnehmen, dass das Entwässerungsszenario III nur marginalen Einfluss auf die dortige Grundwassersituation nimmt. Das Entwässerungsszenario I und II wirken positiv auf die dortige Grundwassersituation ein (siehe Diagramm 1 und 2). Aus diesem Grund wurde das Entwässerungsszenario IV entwickelt um den positiven Effekt zu verstärken. Aus dem Vergleich des Diagramms 1 und des Diagramms 2 mit dem Diagramm 4 ist zu ersehen, dass die Verstärkung des Effektes eingetreten ist. So wird der Zielgrundwasserstand unter Ansatz des Entwässerungsszenarios I zu 79,88 % der Prioritätsfläche eingehalten. 76,16 % der Prioritätsfläche werden unter Verwendung des Entwässerungsszenarios II mit der Kategorie „Zielgrundwasserstand eingehalten“ definiert. Mit dem Entwässerungsszenario IV, welches eine Kombination aus dem Entwässerungsszenario I und dem Entwässerungsszenario II ist, wird eine Einhaltung des Zielgrundwasserstandes in 81,51 % der Prioritätsfläche erreicht.



**Abbildung 6-10: Auswirkung des Entwässerungsszenario IV auf die Prioritätsfläche Barby (Elbe), [Diagramm]**



**Abbildung 6-11: Auswirkung des Entwässerungsszenario III auf die Prioritätsfläche Tornitz-Werkleitz [Diagramm]**

Es ist für die Prioritätsfläche des Ortsteils Glinde eine Einhaltung des Zielgrundwasserstandes von 97,01 % festzustellen (siehe Diagramm 5). Dieser hohe Wert zeigt, dass keine akuten Vernässungsprobleme für die dortigen Keller nach dem Grundwassermodell vorhanden sind. Auch ist festzustellen, dass alle Entwässerungsszenarien nur marginalen Einfluss auf die dortige Grundwassersituation nehmen (siehe Diagramm 5, Diagramm 6, Diagramm 7 und Diagramm 8).

Für die Prioritätsfläche Tornitz-Werkleitz ist festzustellen, dass zu 81,33 % der Fläche der Grundwasserstand eingehalten ist (siehe Diagramm 9). Auch ist aus den Diagrammen 9, 10 und 12 ersichtlich, dass die Entwässerungsszenarien I und II und somit auch das Entwässerungsszenario IV nur einen geringen Einfluss auf die dortige Grundwassersituation nehmen. Wie zu erwarten ist, wirkt sich das Entwässerungsszenario III, durch seine Nähe zu dem Ortsteil, positiv auf die dortige Grundwassersituation aus (siehe Diagramm 11). Hierbei wird ein Wert für die Einhaltung des Zielgrundwasserstandes von 96,37 % erreicht. Dies bedeutet, dass dieses Entwässerungsszenario eine akute Entspannung der Grundwassersituation in dem Gebiet ermöglicht.

Für die Prioritätsfläche Gnadau-Döben ist aus dem Diagramm 13 zu entnehmen, dass bei 63,11 % der Prioritätsfläche der Zielgrundwasserstand eingehalten wird. Dies ist der bisher niedrigste ermittelte Wert und weist darauf hin, dass der Ortsteil Gnadau besonders stark von Kellervernässungen betroffen ist. Keine der vier Entwässerungsszenarien nimmt entspannend Einfluss auf die dortige Grundwassersituation, da dieser Ortsteil in größerer Entfernung zu den Kieseeseen liegt und so die Grundwassersituation durch Absenkungsmaßnahmen in den Seen nur noch marginal beeinflusst wird (siehe Diagramme 13 – 16). Für den Ortsteil Gnadau sollten andere Entwässerungskonzepte, wie z.B. eine Entwässerung über Tiefendrainagen oder Entwässerungsbrunnen entwickelt werden.

Mit einem Wert von 52,44 % in der Kategorie „Zielgrundwasserstand eingehalten“ ist bei gut der Hälfte der Prioritätsfläche Pömmelte der Zielgrundwasserstand nicht eingehalten (siehe Diagramm 17). Auch ist festzustellen, dass die Entwässerungsszenarien II und III nur eine geringe Auswirkung auf die Grundwassersituation ausüben (siehe Diagramm 18 und 19). Lediglich das Entwässerungsszenario I wirkt sich positiv auf die dortige Grundwassersituation aus. Das Entwässerungsszenario IV wirkt sich hierbei in gleichen Maßen auf die Grundwassersituation aus, da diese wie bereits erläutert eine Kombination aus

den Entwässerungsszenarien I und II darstellt. Somit kann festgestellt werden, dass der in Diagramm 20 dargestellte Einfluss zu 100 % aus der Entwässerung des „Kiessees Barby I“ entsteht und somit das Entwässerungsszenario IV allein nicht ausreichend ist. Für eine komplette Einhaltung des Zielgrundwasserstandes in den dortigen Gebieten müssen somit noch zusätzlich andere Maßnahmen zur Beeinflussung der Grundwassersituation erarbeitet werden. Auch hier könnten Tiefendrainagen oder Entwässerungsbrunnen eine Alternative bilden.

Für den Ortsteil Wespen der Einheitsgemeinde Stadt Barby ist festzustellen, dass 36,85 % der dortigen Prioritätsfläche den Zielgrundwasserstand einhält (siehe Diagramm 21). Somit kann gesagt werden, dass rund 65 % der Prioritätsfläche grundwassergefährdet ist. Es ist anzumerken, dass somit der Ortsteil Wespen das höchste Grundwasser-Gefährdungspotenzial aufweist. Nach dem Diagramm 22 nimmt das Entwässerungsszenario II nur marginal Einfluss auf die Grundwassersituation des Ortsteils Wespen. Des Weiteren ist aus dem Diagramm 21 zu entnehmen, dass das Entwässerungsszenario I einen leichten positiven Einfluss auf die dortige Grundwassersituation hat. Dieser Einfluss spiegelt sich im Diagramm 24 wieder, da wie bereits erläutert, das Entwässerungsszenario IV eine Kombination aus dem Entwässerungsszenario I und II darstellt und das Entwässerungsszenario II nur einen marginalen Einfluss ausübt. Somit ist das Entwässerungsszenario IV allein nicht ausreichend. Auch das Entwässerungsszenario III übt einen leichten positiven Einfluss auf die dortige Grundwassersituation aus, aber weder mit dem Entwässerungsszenario I noch mit dem Entwässerungsszenario III kann eine vollends entspannende Grundwassersituation erzeugt werden. Wie in den Ortsteilen Gnadau und Pömmelte ist auch hier die Möglichkeit von anderen oder zusätzlichen Maßnahmen zur Grundwasserabsenkung zu überdenken. So können beispielsweise Tiefendrainagen oder Pumpbrunnen zum Einsatz kommen. Auch eine stärkere Absenkung der „Kiesseen Barby I und Tornitz“ über Pumpen ist denkbar. Zusätzlich sollte auch über eine mögliche Absenkung des Wasserspiegels des „Großen Sees“ und der „Schachtteiche“ nachgedacht werden.

## 7 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Master-Thesis sollte untersucht werden, ob Entwässerungsmaßnahmen der Standgewässer im südöstlichen Bereich des Elbe-Saale-Winkels sinnvoll sind. Zudem sollte quantifiziert werden, inwiefern sich die Entwässerungsmaßnahmen auf die Grundwassersituation in den umliegenden Gebieten auswirken.

Aus diesem Grund wurde einleitend ein Modell erstellt, welches diese Anforderungen umsetzen kann. Der zentrale Kern dieses Modells bildet hierbei ein GIS, das zum einen für Pre- und Postprocessing-Aufgaben und zum anderen für den Export von wissenschaftlichen Karten genutzt wird. Zudem wurde über lose Kopplungen zu einem Grundwassermodell (Software FEFLOW), als auch zu einem hydrodynamischen Modell (Software HEC-RAS) eine Vernetzung mit dem GIS durchgeführt. Die Vernetzung des hydrodynamischen Modells erfolgte über die GIS-Applikation HEC-GeoRAS. Die Vernetzung des Grundwassermodells mit dem GIS erfolgte unter Verwendung einer Exportschnittstelle der Software FEFLOW, welche die Modellergebnisse in Shapes umwandelt, so dass sich diese im folgenden Schritt in das GIS integrieren lassen (nachzulesen in den Abs. 2.3 und Abs. 2.4 sowie Abs. 2.5).

Nachdem das Modell sowohl definiert als auch generiert wurde, ist das bestehende Grundwassermodell auf seine Sensitivität untersucht worden. Die Sensitivitätsanalyse ist ein Verfahren zur Abschätzung des Risikos durch Variation einzelner oder mehrerer ungewisser Eingangsgrößen. Sie dient dazu, Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen von Modellrechnungen und den Zielwerten zu identifizieren. Hierbei wurden die strömungsbestimmenden hydrogeologischen Parameter, Durchlässigkeit und entwässerbare Porosität, sowie die Randbedingungen des Grundwassermodells auf Sensitivität untersucht. Auch wurden ein Sensitivitätsindex sowie Sensitivitätskategorien auf der Basis von Quantilen entwickelt. Es ist festgestellt worden, dass sich eine Veränderung der entwässerbaren Porosität um  $\pm 5\%$  „gering sensitiv“ auf das Modell auswirkt. Die Veränderung der Randbedingungen des Modells wirken „sensitiv“ bis „stark sensitiv“ auf das Modell. Wobei die *Dirichlet*-Randbedingungen „stark sensitiv“ und die *Cauchy*-Randbedingungen „sensitiv“ auf das Modell auswirken. Zudem ist festgestellt worden, dass sich eine Veränderung der Durchlässigkeit von „gering sensitiv“ bis „stark sensitiv“ auf das Modell auswirken kann.

Dies liegt einerseits an den unterschiedlichen Gebietsgrößen und andererseits wurde festgestellt, dass mit abnehmender Durchlässigkeit der Parameter sensitiver wird (beschrieben in Kapitel 3).

Nachdem das Grundwassermodell auf Sensitivität untersucht wurde, konnte nun der Basiszustand analysiert werden. Hierbei war die Zielstellung, dass eine Übersichtskarte über die Verteilung der maximalen Grundwasserstände für den Elbe-Saale-Winkel erarbeitet wurde. Auch wurde die Grundwassersituation zum einen unter Verwendung eines Grundwassergleichenplans und zum anderen unter Verwendung von erstellten verträglichen Zielwerten der Grundwasserstände dargestellt. Die Ermittlung des Zielgrundwasserstandes fand unter Verwendung des DGM und erarbeiteten Zielbedingungen statt. So wurde in erster Instanz die Zielgrundwasserflur definiert und im Anschluss der Zielgrundwasserstand. Dieser wurde nun mit der Basisvariante vom März 2012 verglichen. So konnte eine detaillierte Darstellung der vorhandenen Grundwassersituation im Modellbereich geschaffen werden. Als Folgeschritt wurden nun Prioritätsflächen an Hand der Flächennutzung für die einzelnen Ortsteile der Einheitsgemeinde Stadt Barby, die den südöstlichen Teil des Elbe-Saale-Winkels umfasst, abgeleitet. Zudem wurden „grundwassergefährdete urbane Flächen“, welche die Teile der Prioritätsflächen darstellen in denen der Zielgrundwasserstand verletzt wird, definiert (nachzulesen in Kapitel 4).

Weiterhin wurde die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Seewasserstände auf die Grundwassersituation vorgenommen. Hierbei wurde untersucht, in welchem Maße Veränderungen der Standgewässer im Modellgebiet Einfluss auf die Grundwassersituation speziell für die Einheitsgemeinde Stadt Barby und der Stadt Schönebeck (Elbe) nehmen. Für die vorhandenen Standgewässer im Modellgebiet wurden hierbei Extremszenarien entwickelt. Diese Extremszenarien basieren auf der Annahme, dass an den einzelnen Seen bordvoller Zustand oder eine Wasserstandsabsenkung bis zur Sohle vorliegen. Hierbei wurden die Sohlinformationen aus dem vorhandenen DGM entnommen. Es wurde festgestellt, dass die DGM-Sohlinformationen des „Kiessees Barby I“ stark von der durchschnittlichen Wassertiefe abweichen. Da die Tiefeninformationen plausibler sind als die Sohlinformationen aus dem DGM, ist anzunehmen, dass Ungenauigkeiten bzgl. der Höheninformationen in Bereichen von Standgewässer wahrscheinlich sind. Da keine anderen Sohlinformationen zur Verfügung standen, wurden diese jedoch für die Szenarien angesetzt. Zudem wurde eine extreme Absenkung am „Kiessee Barby I“ vorgenommen, welche die

durchschnittliche Wassertiefe umfasst. Hierbei ist anzumerken, dass dieses Szenario nur einen marginalen Einfluss auf die Grundwassersituation der Stadt Schönebeck (Elbe) nimmt. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Randbedingungen des Grundwassermodells untereinander beeinflussen. So kann Exfiltration oder Infiltration aus den jeweils umliegenden Gewässern nicht ausgeschlossen werden. Auch ist nachgewiesen worden, dass die Absenkungen bzw. die Erhöhung der Seewasserstände Einfluss auf die Grundwassersituation der Einheitsgemeinde Stadt Barby nehmen (nachzulesen in Abs. 5.1). Des Weiteren wurde der Einfluss einer Kiesseeerweiterung auf die Grundwassersituation der Einheitsgemeinde Stadt Barby sowie der Stadt Schönebeck (Elbe) untersucht. Hierbei ist festzustellen, dass eine Kiesseeerweiterung in weiten Teilen der Einheitsgemeinde Stadt Barby und der Stadt Schönebeck (Elbe) eine Grundwasserstandsabsenkung zur Folge hat. Dieses Phänomen entsteht durch eine Anpassung des Wasserspiegels am Gelände und der Ausspiegelung sowie der flächenmäßig zunehmenden Verdunstung an der Seeoberfläche (nachzulesen in Abs. 5.2). Unter Verwendung der Tabelle 7-1 wurde eine Ergebnisübersicht über alle in Kapitel 5 erstellten Szenarien erstellt. Hierbei kann aus der nachfolgenden Tabelle 7-1 entnommen werden, ob die Grundwassersituation in einem Ortsteil positiv, negativ oder nicht beeinflusst wird. Das Zeichen „+“ bedeutet somit, dass die Grundwassersituation positiv beeinflusst wird, also der Grundwasserstand sinkt. Das Zeichen „-“ bedeutet, dass die Grundwassersituation negativ beeinflusst wird, also der Grundwasserstand steigt. Das Symbol „0“ heißt, dass die Grundwassersituation nicht beeinflusst wird, also bleibt der Grundwasserstand gleich. Das Zeichen „+/-“ bedeutet, dass sowohl eine positive als auch eine negative Beeinflussung der Grundwassersituation vorliegt.

**Tabelle 7-1: Ergebnisübersicht der Wasserstands- und Kiesseeerweiterungsszenarien**

	Ortsteile							
	Barby	Gnadau	Tornitz	Glinde	Wespen	Pömmelte	SBK	Calbe
<b>Wasserstandszenario</b>								
I-A	+	+	0	+	+	+	0	0
I-B	-	0	0	-	-	-	0	0
I-C	+	+	0	+	+	+	+	-
II-A	+	0	0	0	0	0	0	0
II-B	-	0	0	0	0	0	0	0
III-A	0	0	+	0	+	0	0	+
III-B	0	0	-	0	-	0	0	-
IV-A	0	+	0	0	+	0	+	+
IV-B	0	-	0	0	-	0	0	0
V-A	0	+	0	0	+	0	0	+

V-B	0	-	0	0	-	0	0	-
<b>Kiesseerweiterungsszenario</b>								
I	+	+	+	-	+	+	0	+
II	+	+	+	-	+	+	+/-	+

Die Ableitung eines Entwässerungskonzeptes für den südöstlichen Teil des Elbe-Saale-Winkel ist ebenfalls ein wichtiger Punkt in der Aufgabenstellung und wird im Kapitel 6 behandelt. Hierbei wurde die Möglichkeit in Betracht gezogen, die Seewasserstände über das vorhandene Grabennetz im freien Gefälle abzuleiten. Um eine Wasserstandsabsenkung der Seen zu erzeugen, fand vorweg eine hydrodynamische Prüfung des Grabennetzes statt. So wurden die Entwässerungspfade der bestehenden Grabennetze mit Nebengräben definiert. Daraufhin wurden auf Grundlage des DGM geometrische Daten erhoben. So wurden alle 100 m entlang der Fließstrecke Querprofile ermittelt. Auch die hydraulische Leistung sowohl im IST-Zustand als auch im SOLL-Zustand wurde ermittelt (siehe Abs. 6.1 - 6.4). Es ist darauf hinzuweisen, dass die Grundlage der geometrischen Daten, das DGM, Ungenauigkeiten von  $\pm 0,15$  m aufweisen können. Es könnten mit einer Vermessung der Grabenprofile höhere Genauigkeiten bezüglich der Höhe generiert werden. Auch ist anzumerken, dass die Durchflussrandwerte anhand einer Stichtagsmessung erstellt wurden. Mit einem Monitoring zur Erfassung der Durchflüsse in den Gräben können auch hier bessere Genauigkeiten erzielt werden. Nach der Simulation des hydrodynamischen Modells wurden die Lagen der Entwässerungsgräben und die dazugehörigen geometrischen Eigenschaften ermittelt (siehe Abs. 6.5). Auch sind aus den Gefälleannahmen der Entwässerungsgräben Seewasserstände der SOLL-Zustände entwickelt worden (siehe Abs. 6.1 - 6.4). Mit den ermittelten Seewasserständen konnten mittels des Grundwassermodells „Absenktrichter“ der einzelnen Entwässerungsszenarien simuliert werden. Aus der Tabelle 7-2 kann die Beeinflussung der Grundwassersituation in den einzelnen Ortsteilen durch die Entwässerungsszenarien entnommen werden.

**Tabelle 7-2: Bewertung der Entwässerungsszenarien auf Basis der Prioritätsflächen**

<b>Ortsteile</b>	<b>Entwässerungs- szenario I</b>	<b>Entwässerungs- szenario II</b>	<b>Entwässerungs- szenario III</b>	<b>Entwässerungs- szenario IV</b>
<b>Barby (Elbe)</b>	+/-	+/-	0	+
<b>Gnadau</b>	0	0	0	0
<b>Tornitz</b>	0	0	+	0
<b>Glinde</b>	0	0	0	0
<b>Wespen</b>	+/-	0	+/-	0
<b>Pömmelte</b>	+/-	0	0	0

Hierbei bedeutet das Zeichen „+“, das Szenario übt einen starken positiven Einfluss auf die Grundwassersituation aus. Das Zeichen „+/-“ bedeutet, das Szenario übt einen Einfluss auf die Grundwassersituation aus, kann aber keine zufriedenstellende Situation erschaffen. Das Zeichen „0“ bedeutet, dass das Szenario nur einen marginalen oder keinen Einfluss auf die Grundwassersituation ausübt. Grundlage dieser These ist hierbei der Abs. 6.6.

## 7.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

In der Masterarbeit wird deutlich, dass die angespannte Grundwassersituation im südöstlichen Teil des Elbe-Saale-Winkels mit einer Entwässerung der Kiesseen über ein freies Gefälle nicht in Gänze gelöst werden kann. Es ist nachgewiesen worden, dass die Grundwassersituation mancher Ortsteile der Einheitsgemeinde Stadt Barby, wie zum Beispiel Gnadau oder Glinde, nur marginal durch die ermittelten Szenarien beeinflusst wird.

Im Fall des Ortsteils Barby (Elbe) ist nachgewiesen worden, dass in 74,35 % der Prioritätsflächen der Zielgrundwasserstand eingehalten ist. Daraus folgt, dass 25,65 % der Prioritätsflächen „grundwassergefährdete urbane Flächen“ sind. Also können auf ca.  $\frac{1}{4}$  der Fläche des Ortsteils Barby (Elbe) Kellervernässungen auftreten. Des Weiteren ist nachgewiesen worden, dass die Entwässerungsszenarien I und II sowie das Entwässerungsszenario III keinen gewünschten Einfluss auf die dortige Grundwassersituation ausüben. Das Entwässerungsszenario IV hingegen entspannt die Grundwassersituation in den dortigen Prioritätsflächen merklich. Hierbei wird ein Wert in der Kategorie „Grundwasserstand eingehalten“ von 81,51 % erreicht. Somit kann es auf 18,49 % der Prioritätsflächen weiterhin zu Kellervernässungen kommen. Daraus folgt, dass weitere Maßnahmen zur Bekämpfung der hohen Grundwasserstände zu empfehlen sind. Als

Maßnahmen kämen zum Beispiel Tiefendrainagen und Entwässerungsbrunnen sowie Abfanggräben in Frage. Auch wäre eine Entwässerung der Seen unter Verwendung von Pumpen, um eine stärkere Absenkung zu erreichen, denkbar.

Für den Ortsteil Glinde ist nachgewiesen worden, dass 97,01 % der dortigen Prioritätsfläche der Zielgrundwasserstand eingehalten wird. Daraus folgt, dass lediglich 2,99 % der Prioritätsfläche „grundwassergefährdete urbane Flächen“ sind. Auch ist festgestellt worden, dass alle vier Entwässerungsszenarien einen marginalen oder keinen Einfluss auf die Grundwassersituation ausüben. Da die betroffene Fläche so gering ausfällt, macht es Sinn Einzelmaßnahmen, wie die „schwarze Wanne“ oder „weiße Wanne“ zu empfehlen.

In 81,33 % aller Prioritätsflächen der Region Tornitz-Werkleitz wird der Zielgrundwasserstand eingehalten. Somit sind 18,77 % aller Prioritätsflächen „grundwassergefährdete urbane Flächen“. Unter Verwendung des Entwässerungsszenarios III können die „grundwassergefährdeten urbanen Flächen“ auf 3,63 % reduziert werden. Dieses Ergebnis ist für die Region Tornitz-Werkleitz zufriedenstellend. Wenn in Einzelfällen weiterhin Kellervernässungen auftreten sollten, ist wie im Ortsteil Glinde die „schwarze“ bzw. „weiße Wanne“ zu empfehlen.

Für die Region Gnadau-Döben ist festzustellen, dass in 63,11 % der Prioritätsflächen der Zielgrundwasserstand eingehalten ist. Das bedeutet, dass 36,89 % der Prioritätsflächen „grundwassergefährdete urbane Flächen“ sind. Auch wurde festgestellt, dass keines der Entwässerungsszenarien die erwünschte Entspannung der Situation erzeugen kann. Somit sollten andere Maßnahmen wie Tiefendrainagen, Entwässerungsbrunnen oder Abfanggräben in Erwägung gezogen werden.

Im Fall des Ortsteils Pömmelte ist nachgewiesen worden, dass 52,44 % der Prioritätsflächen der Zielgrundwasserstand eingehalten wird. Das heißt, dass 47,66 % der Prioritätsflächen grundwassergefährdete urbane Flächen sind. Somit kann gesagt werden, dass fast die Hälfte der Prioritätsflächen grundwassergefährdet ist. Lediglich das Entwässerungsszenario I kann hierbei für eine leichte Entspannung sorgen. Hierbei können die „grundwassergefährdeten urbanen Flächen“ auf einen Wert von 42,13 % abgesenkt werden. Dieser Wert ist jedoch nicht zufriedenstellend. Somit sollten weitere Maßnahmen wie Tiefendrainagen und Entwässerungsbrunnen ins Auge gefasst werden.

Der Ortsteil Wespen zeigt hierbei ein ähnliches Bild wie Pömmelte. Auch hier ist mit einem Anteil von 36,85 % der Prioritätsflächen, der Flächenanteil in dem der Zielgrundwasserstand eingehalten ist, relativ gering. Somit sind 63,15 % der Prioritätsflächen des Ortsteils Wespen „grundwassergefährdete urbane Flächen“. Abhilfe schafft hierbei lediglich das Entwässerungsszenario III, welches die grundwassergefährdeten urbanen Flächen auf einen Wert von 57,91 % reduziert. Dieser Wert ist nicht zufriedenstellend, weshalb andere Maßnahmen wie Tiefendrainagen und Entwässerungsbrunnen sinnvoll sind. Auch ist es denkbar eine Entspannung der Grundwassersituation zu erzeugen, indem der Seewasserstand des „Großen Sees“ sowie der „Schachtteiche“ abgesenkt wird. Zudem ist es möglich, dass auch der Wasserstand des Teiches in Ortsmitte Wespens abgesenkt werden könnte.

Über weitere Recherchen und Messkampagnen könnten höhere Genauigkeiten im Modell erzielt werden. So könnte über ein Sonar die Sohle der Kiesseen eingemessen werden. Auch könnten in dem hydrodynamischen Modell höhere Genauigkeiten erzielt werden, wenn Vermessungsdaten des Grabennetzes zur Verfügung stehen. So ist es möglich das DGM durch Vermessungsdaten zu ersetzen. Wenn ein Monitoring zur Ermittlung von Grabendurchflüssen die ermittelte Stichtagsmessung ersetzen würde, könnten zudem höhere Genauigkeiten im hydrodynamischen Modell erzielt werden. Auch wurden die Prioritätsflächen anhand der Flächennutzung definiert. Unter Verwendung eines Flächennutzungsplans der Einheitsgemeinde Stadt Barby könnte die Flächennutzungsplanung mit in die Erstellung der Prioritätsflächen einfließen. Ein Flächennutzungsplan steht zurzeit nicht flächendeckend zur Verfügung. Auch könnte eine engere Verknüpfung zwischen Grundwassermodell und dem hydrodynamischen Modell geschaffen werden. Dies würde die mögliche Exfiltration bzw. Infiltration der Gräben in bzw. aus dem Grundwasser berücksichtigen.

## 8 Quellenverzeichnis

- U.S. Army Corps of Engineers. (2010). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*. Davis: U.S. Army Corps of Engineers.
- Bear, J. & Verruijt, A. (1987). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Haifa, Delft: D. Reidel Publishing Company.
- BMU. (2000). *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorschutz (BMU).
- BUND-Hessen. (2011). *Anlage 1 zur BUND Pressekonferenz am 18.07.2011, Kleine Historie der Grundwasserabsenkung im Hessischen Ried*. Abgerufen am 10. Juli 2013 von [www.bund-hessen.de](http://www.bund-hessen.de)
- Busch, K. & Luckner, L. (1974). *Geohydraulik*. Stuttgart: Enke Verlag.
- Dachroth, W. (2002). *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*. Heidelberg: Springer Verlag.
- DHI WASY, BAH. (September 2012). *Analyse und Bewertung von Steuerungsmöglichkeiten der Wasserstände im Großraum Schönebeck*. Berlin: Hochschule Magdeburg - Stendal.
- DHI-WASY. (2013). *Fluid-Transfer BC*. Abgerufen am 05. August 2013 von FEFLOW Online Help: <http://www.feflow.info>
- Diersch, H.-J. G. (2009). *FEFLOW Reference Manual*. Berlin: DHI-WASY GmbH.
- DWD. (2013). *Klimadaten*. Abgerufen am 30. April 2013 von Deutscher Wetterdienst: <http://www.dwd.de>
- Dyck, S. & Peschke, G. (1995). *Grundlagen der Hydrologie*. Berlin: Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Fürst, J. (2004). *GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Wien: Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Hölting, B. & Coldewey, W. (2009). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Mainz, Münster: Spektrum Akademischer Verlag.
- Jirka, G. & Lang, C. (2009). *Einführung in die Gerinnehydraulik*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Kinzelbach, W. & Rausch, R. (1995). *Grundwassermodellierung*. Heidelberg und Stuttgart: Gebrüder Borntraeger Berlin / Stuttgart.

- LHW. (2003). *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet, Teil I, Von der Grenze zur CR bis zur Havelmündung, 2003*. Magdeburg: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt (LHW).
- LHW. (2011). *Bericht zur Beschaffenheit der Fließgewässer und Seen in Sachsen-Anhalt 2005 - 2008*. Magdeburg: Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW).
- Mohrlök, U. (2009). *Bilanzmodelle in der Grundwasserhydraulik*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- OEWA. (2011). *Aufbau eines Grundwassermanagements für die Stadt Schönebeck*. Leipzig: OEWA Wasser und Abwasser GmbH.
- Planungsgemeinschaft PL3. (2003). *Agrarstrukturelle Entwicklungsplanung "Elbe/ Saale" - Handlungsfeld Kiesabbau - Alte Rechte bedrohen den Erhalt und die Entwicklung des ländl. Raum*. Halle (Saale): Amt für Landwirtschaft und Flurneuordnung Mitte.
- Reinstorf, F. & Kramer, S. (2013). *Abschlussbericht: Pilotprojekt zum Grundwassermanagement der Stadt Schönebeck (Elbe) - Wirkungen gezielter Steuerungsmaßnahmen auf den Gebietshaushalt* -. Magdeburg: Hochschule Magdeburg - Stendal.
- WSV. (2013). *Gewässerkundliches Informationssystem*. Abgerufen am 04. Juli 2013 von Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: <http://www.Pegelonline.wsv.de>

## 9 Anhang

- 9. Anhang
- 9.1. Stichtagsmessung zur Durchflussermittlung
- 9.2. Längsschnitte der Entwässerungsszenarien
  - 9.2.1. Längsschnitte des Entwässerungsszenarios I
  - 9.2.2. Längsschnitte des Entwässerungsszenarios II
  - 9.2.3. Längsschnitte des Entwässerungsszenarios III
- 9.3. Kritische Profile der Entwässerungsszenarien
- 9.4. Diagramme zur Evaluierung der Prioritätsflächen
- 9.5. Kartenwerk Teil 1
- 9.6. Kartenwerk Teil 2