

Entwicklung einer Methodik zur großräumigen Modellierung von Grundwasserdruckflächen am Beispiel der Grundwasserleiter des Bundeslandes Hessen

im Rahmen des Forschungsauftrags des Forschungszentrum Jülich GmbH:
Konzeptionelles hydrogeologisches Modell für das Grundwassermonitoring in Hessen

Endbericht

^[1]*Frank Herrmann*, ^[2]*Hans-Jürgen Voigt*, ^[2]*Hartmut Niesche* und
^[1]*Frank Wendland*

^[1]Forschungszentrum Jülich
Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG – 4: Agrosphäre)
52425 Jülich

Tel.: 02461 61-3262 (-3847)
E-mail: f.herrmann@fz-juelich.de; f.wendland@fz-juelich.de

^[2]Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl für Umweltgeologie
Postfach 10 13 44
03013 Cottbus
Tel.: 0355 / 69-3139
E-mail: voigt@tu-cottbus.de

Jülich, XX.XX.2010

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	5
1.1 Problembeschreibung und Zielstellung	5
1.2 Gliederung des Berichtes	6
2. Modellgebiet Hessen – geologischer und hydrogeologischer Überblick.....	8
2.1 Strukturgeologische Gliederung.....	8
2.2 Hydrogeologische Charakterisierung	11
3. Methodik zur flächendeckenden Modellierung der Grundwasserdruckfläche	13
3.1 Grundlagen und Modellprämissen.....	13
3.1.1 Die Geschwindigkeit des Grundwassers	13
3.1.2 Einfluss der gesteinspezifischen hydraulischen Durchlässigkeit auf die Grundwasserbewegung	14
3.1.3 Diskretisierung der Grundwasserdruckfläche.....	16
3.1.4 Gliederung in Locker- und Festgesteinsgrundwasserleiter	17
3.2 Modellierung einer Grundwasserdruckfläche für Grundwasserleiter im Lockergestein	19
3.2.1 Interpolationsverfahren – Ordinary Kriging.....	19
3.2.2 Hierarchische Verdichtung der Stützpunkte im Lockergesteinsbereich.....	22
3.3 Modellierung einer Grundwasserdruckfläche für Grundwasserleiter im Festgestein	25
3.3.1 Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgesteinsbereich.....	28
3.3.2 Modell der Grundwasserfließrichtung im Festgesteinsbereich.....	29
3.3.3 Bestimmung der Entfernungen zum Modell des Entwässerungsniveaus.....	30
3.3.4 Bestimmung mittlerer hydraulischer Gradienten im Festgesteinsbereich.....	31
3.3.5 Flächendeckende Ableitung der Druckhöhen und Interpolation einer glatten Grundwasserdruckfläche	33
3.4 Rechentechnische Umsetzung	36
4. Datengrundlagen und Datenaufbereitung.....	40
4.1 Oberflächengewässer.....	41
4.2 Geomorphographische Datengrundlage – Digitales Höhenmodell der Geländeoberfläche	43
4.3 Hydrogeologische und Geologische Kartenwerke	45
4.3.1 Abgrenzung der Lockergesteinsgrundwasserleiter.....	46
4.3.2 Hydrogeologische Einheiten der Festgesteinsbereiche	48
4.3.3 Technischer Zustand der HÜK 200.....	48

4.4	Existierende Grundwassergleichenpläne.....	51
4.5	Bodenkundliche Daten.....	52
4.6	Messwerte zur Grundwasserdruckfläche	54
4.6.1	Räumliche Verteilung der Messwerte	54
4.6.2	Einordnung in Locker- und Festgesteinsbereich.....	57
4.6.3	Prüfung der Messwerte auf Plausibilität	58
4.6.4	Analyse der Messwerte im Lockergesteinsbereich.....	62
4.6.5	Analyse der Messwerte im Festgesteinsbereich.....	63
5.	Modell der Grundwasserdruckfläche des Bundeslandes Hessen.....	65
5.1	Modell der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich.....	65
5.2	Modell der Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich.....	72
5.2.1	Modellierte mittlere hydraulische Gradienten	72
5.2.2	Räumliche Verteilung der Grundwasserdruckhöhen und Grundwasserflurabstände	86
5.3	Grundwasserdruckfläche für das gesamte Modellgebiet.....	86
5.4	Validierung	92
5.4.1	Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen	92
5.4.2	Vergleich einzelner mittlerer Gradienten mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen.....	97
6.	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	99
6.1	Diskussion der Methodik und Vorschläge zur Präzisierung der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich	100
6.2	Diskussion der Methodik und Vorschläge zur Präzisierung der modellierten Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich	102
6.3	Diskussion der bestehenden Datengrundlagen und Vorschläge zu deren Verbesserung	105
7.	Zusammenfassung	108
	Literaturverzeichnis.....	111
	Abbildungsverzeichnis	114
	Tabellenverzeichnis.....	118
	Abkürzungsverzeichnis	119
	Symbolverzeichnis	120
	Anhang A – Datengrundlagen	122
	Anhang B – Ergebnisse.....	125

1. Einführung

1.1 Problembeschreibung und Zielstellung

Im Rahmen der Umsetzung der EU-WRRL sind in den als "at risk" eingestuften Gebieten Maßnahmenprogramme eingeleitet worden, durch die der Zustand der oberirdischen Gewässer und des Grundwassers verbessert werden soll. Die Wirkung der eingeleiteten Maßnahmen muss nun bewertet werden. Um dies großräumig und flächendeckend für ein gesamtes Flusseinzugsgebiet oder Bundesland bewerkstelligen zu können, hatte das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) das Institut Agropäre (ICG-4) des Forschungszentrums Jülich sowie den Lehrstuhl Umweltgeologie der BTU Cottbus beauftragt, ein konzeptionelles Modell zu entwickeln, auf dessen Basis die zeitliche Bewertung der Maßnahmen durchgeführt werden kann. Das Modell soll beispielsweise:

- eine Grundlage für die Identifizierung von sensiblen Regionen bilden,
- die Wirksamkeit von potentiellen Maßnahmen prognostizieren helfen,
- für einzelne Regionen inhaltliche Begründungen liefern, warum einzelne eingeleitete Maßnahmen zwar geeignet sind die Ziele der EU-WRRL zu erreichen, aber aufgrund der hydrodynamischen Gegebenheiten eine Einhaltung der Zeitvorgaben (bis zum Jahr 2015) nicht möglich ist.

Als Teil der Entwicklung dieses konzeptionellen Modells müssen flächendeckend und hoch aufgelöst Schätzungen der mittleren Verweilzeit des Sickerwassers im durchwurzelten Boden und in der undurchwurzelten ungesättigten Zone sowie der mittleren Verweilzeit des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter durchgeführt werden. Für die Erreichung der genannten Vorgaben sollte an der BTU Cottbus ein großräumiges flächendeckendes Modell der Morphologie und Höhenlage der Grundwasserdruckfläche geschaffen werden. Die dazu entwickelte Methodik und ihre Anwendung für das Bundesland Hessen ist Gegenstand dieses Berichtes.

Im Allgemeinen werden für die konventionelle Erstellung eines Grundwassergleichensplans direkt gemessene Grundwasserstände verwendet, die in einer akzeptablen Dichte und räumlichen Verteilung vorhanden sein müssen. In kleinen Teilen eines großen Modellraumes können Messwerte zum Grundwasserstand in großer Anzahl relativ dicht und gleichmäßig verteilt vorliegen. Dies betrifft z.B. Regionen, in denen die Grundwasserressourcen, die geomechanischen Eigenschaften des Baugrundes oder ganz allgemein die geologische Situation von besonderem Interesse sind und die darum Gegenstand detaillierter Erkundung waren. Bei der Betrachtung größerer Gebietseinheiten treten zwischen einzelnen Messstellen jedoch immer wieder Bereiche auf, für die wenige oder keine Messwerte zur Tiefenlage der Grundwasserdruckfläche existieren. Die Methodik zur Modellierung der flächendeckenden Grundwasserdruckfläche muss daher auch bei einer extrem unregelmäßigen Verteilung von Messwerten zu einem akzeptablen (d.h. relativ wahrscheinlichen) Ergebnis führen. Es gibt jedoch derzeit kein standardmäßiges Verfahren, mit dem ein Grundwassergleichensplan flächendeckend für ein Bundesland oder ein großes Flusseinzugsgebiet bei einer extrem ungleichmäßigen Verteilung der Messwerte erstellt werden kann.

Aufgrund der Größe des Modellgebietes und dem Einsatzzweck des konzeptionellen hydrogeologischen Modells, für das die Grundwasserdruckfläche eine wesentliche geometrische Basis darstellt, muss die zu entwickelnde Methodik eine Reihe von Anforderungen erfüllen:

- Sie muss in der Lage sein, regional vorliegende Modelle von Grundwasserdruckflächen (z.B. in Form von Grundwassergleichenplänen) zu integrieren.
- Sie muss räumlich sehr heterogen verteilte Messwerte des Grundwasserstandes (der Grundwasserdruckhöhe) in die Erstellung des Modells einbeziehen.
- Sie muss in Regionen ohne Messwertstützung zumindest zu hydraulisch sinnvollen Ergebnissen führen.
- Sie muss an die begrenzte Verfügbarkeit von Datengrundlagen und die mit hydrogeologischen Daten verbundene Unsicherheit angepasst sein.
- Sie muss derart formalisiert sein, dass eine systematische und automatische Verarbeitung der Eingangsdaten durch Rechenprogramme möglich ist.
- Sie muss der grundlegenden Idee konzeptioneller Modell folgend dazu in der Lage sein, regional verbesserte Datengrundlagen iterativ einzuarbeiten.
- Sie muss eine Grundwasserdruckfläche in einem Rasterformat produzieren, mit der im Rahmen der Schätzung der Verweilzeiten des Grundwassers mit dem WEKU-Modell (Kunkel & Wendland 1997) plausible Ergebnisse erzielt werden können.

Ziel des Vorhabens war es jedoch *nicht*, eine Methodik zu entwickeln, mit der für alle einzelnen potentiell möglichen lokalen Untersuchungsgebiete fertige Grundwassergleichenpläne abgeleitet werden können, die eventuell Basis für wasserrechtliche Verfahren werden. Das ist allein aufgrund der nicht flächendeckend vorhandenen Messwerte zum Grundwasserstand unmöglich. Die Ableitung einer Grundwasserdruckfläche für standortbezogene hydrogeologische Fragestellungen auf Basis eines numerischen Modells bzw. einer ausreichend großen Anzahl von Messwerten kann und soll über die hier vorgestellte Methodik nicht ersetzt werden.

1.2 Gliederung des Berichtes

Im Rahmen des hier vorliegenden Berichtes liegt der Fokus auf der Beschreibung der entwickelten Methodik zur großräumigen Modellierung von Grundwasserdruckflächen und den Arbeitsschritten ihrer ersten Anwendung für das Bundesland Hessen. Zunächst erfolgt im Kapitel 1 eine kurze Einführung in die Geologie und Hydrogeologie Hessens.

Im Kapitel 3 (Methodik) wird kurz auf grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Grundwasserbewegung eingegangen, aus denen Modellprämissen abgeleitet werden. Außerdem werden alle verwendeten Begriffe und Größen erläutert. Dem folgen Überlegungen zur generellen Gliederung des Modells in einen Locker- und einen Festgesteinsbereich. Darauf aufbauend werden für beide Bereiche die verwendeten und zum Teil neu entwickelten Methoden erläutert. Dies geschieht schon im Hinblick auf die zur Verfügung stehende Datenbasis, weshalb

einzelne Aspekte der Modellergebnisse bereits in diesem Zusammenhang diskutiert werden. Das Kapitel schließt mit einigen Ausführungen zur rechentechnischen Umsetzung des Modells und zu den selbst entwickelten Softwarekomponenten.

Im Kapitel 4 (Datengrundlagen) wird die Datenbasis beschrieben und analysiert. Wesentliche, zur Verfügung stehende Datengrundlagen sind:

- die Hydrogeologische Übersichtskarte HÜK 200 mit Informationen zur hessischen Hydrogeologie,
- ein digitales Modell der Geländehöhe (DHM),
- ein digitales Modell des Gewässernetzes und
- der Datenbestand GWSTANDHESS mit gemessenen Grundwasserdruckhöhen (im Folgenden vereinfacht als Messwerte bezeichnet).

Für einzelne Datenbestände sind umfangreiche Arbeiten zur Aufbereitung oder Ableitung der benötigten Informationen notwendig gewesen. Beispielsweise mussten die Messwerte der lokalen Grundwasserdruckhöhen auf Plausibilität überprüft werden. In diesem Zusammenhang werden auch die Zwischenergebnisse auf dem Weg zur Implementierung als Modell-Input diskutiert.

Aufbauend auf der Methodik und den Datengrundlagen werden im Kapitel 5 die Ergebnisse der Modellerstellung präsentiert und aus einer regionalen Perspektive diskutiert. Im Mittelpunkt steht die Bewertung der modellierten mittleren hydraulischen Gradienten der Grundwasserdruckfläche in den Festgesteinsbereichen Hessens. Das Kapitel schließt mit Überlegungen zur Validierung des Modells und deren exemplarische Umsetzung. Aus der Validierung werden Ansatzpunkte für eine in Teilregionen notwendige Präzisierung auf Basis präzisierter Datengrundlagen abgeleitet.

Im Kapitel 6 werden die Methodik sowie der Einfluss der Datengrundlagen auf die Genauigkeit des Modells diskutiert. Es werden Schlussfolgerungen für die Weiterentwicklung der Methodik ebenso wie für die Verbesserung der Datengrundlagen abgeleitet. Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung im Kapitel 7.

2. Modellgebiet Hessen – geologischer und hydrogeologischer Überblick

2.1 Strukturgeologische Gliederung

Strukturgeologisch befindet sich Hessen im Mitteleuropäischen Schollengebiet. Die wichtigen Strukturräume sind der Oberrheingraben als tertiäre Senkenstruktur im Südwesten, das Rheinische Schiefergebirge als Ausschnitt aus dem ehemaligen variszischen Geosynklinalbereich im Westen, die mesozoischen Schollen mit Gräben und Senken im Norden und Nordosten, die tertiären Vulkangebiete mit dem zentral gelegenen Vogelsberg als größte Struktur sowie Odenwald-Kristallin, Spessart-Kristallin und die mesozoischen Schichtstufen der Süddeutschen Scholle im Südosten. Die nun folgende kurze Erläuterung der in Abbildung 1 gezeigten geologischen Übersichtskarte basiert im wesentlichen auf Beschreibungen von Henningsen und Katzung (2006) sowie Fritsche, Hemfler et al. (2003).

Odenwald- und Spessart-Kristallin gehören zur sehr heterogen aufgebauten Mitteldeutschen Kristallinzone, sind jedoch durch die Main-Niederung voneinander getrennt. Sie bestehen aus einer streifenartigen Abfolge aus vor-variszischen kristallinen Schiefen (altpaläozoische Metamorphite) und jüngeren Granitplutonen (unterkarbonische Magmatite). Im Osten wird das kristalline Grundgebirge von flach einfallendem Buntsandstein überlagert. Im Westen bildet eine große Verwerfung die Grenze zwischen Odenwald und Oberrheinebene. An das Odenwald-Kristallin schließt sich nach Norden das Rotliegende des Sprendlinger Horstes mit eingelagerten Vulkaniten an. Nordwestlich des Spessarts, in der Wetterau, befinden sich im Übergang zum vulkanischen Vogelsberg ebenfalls Rotliegend-Sedimentgesteine.

Der Norden des Rheinischen Schiefergebirges ist hauptsächlich aus metamorph überprägten und gefalteten marinen Sedimenten des Devons und Unterkarbons aufgebaut. Im Osten taucht dieser Teil des Schiefergebirges unter einen schmalen Saum zechsteinzeitlicher Schichten und danach an mehreren Verwerfungen unter die Ablagerungen des Buntsandsteins und Tertiärs der Hessischen Senke. Im mittleren Bereich sind die Geosynklinalsedimente stärker von devonischen Vulkaniten durchsetzt. Im Tertiär erfolgte im Westerwald ebenso wie am östlich angrenzenden Vogelsberg eine Ablagerung basaltischer vulkanischer Gesteine. Der Südteil des Schiefergebirges heißt Taunus. Er besteht hauptsächlich aus unterdevonischen Sedimentgesteinen mit einem Südrand aus devonischen und altpaläozoischen Metamorphiten im Bereich des Steilabfalls gegen die Oberrheinische Tiefebene. Der Deformationsgrad ist im südlichen Teil des Schiefergebirges größer als im Norden. Die Gesteine mit dem höchsten Metamorphosegrad befinden sich ebenfalls im Süden am Rand des Taunus.

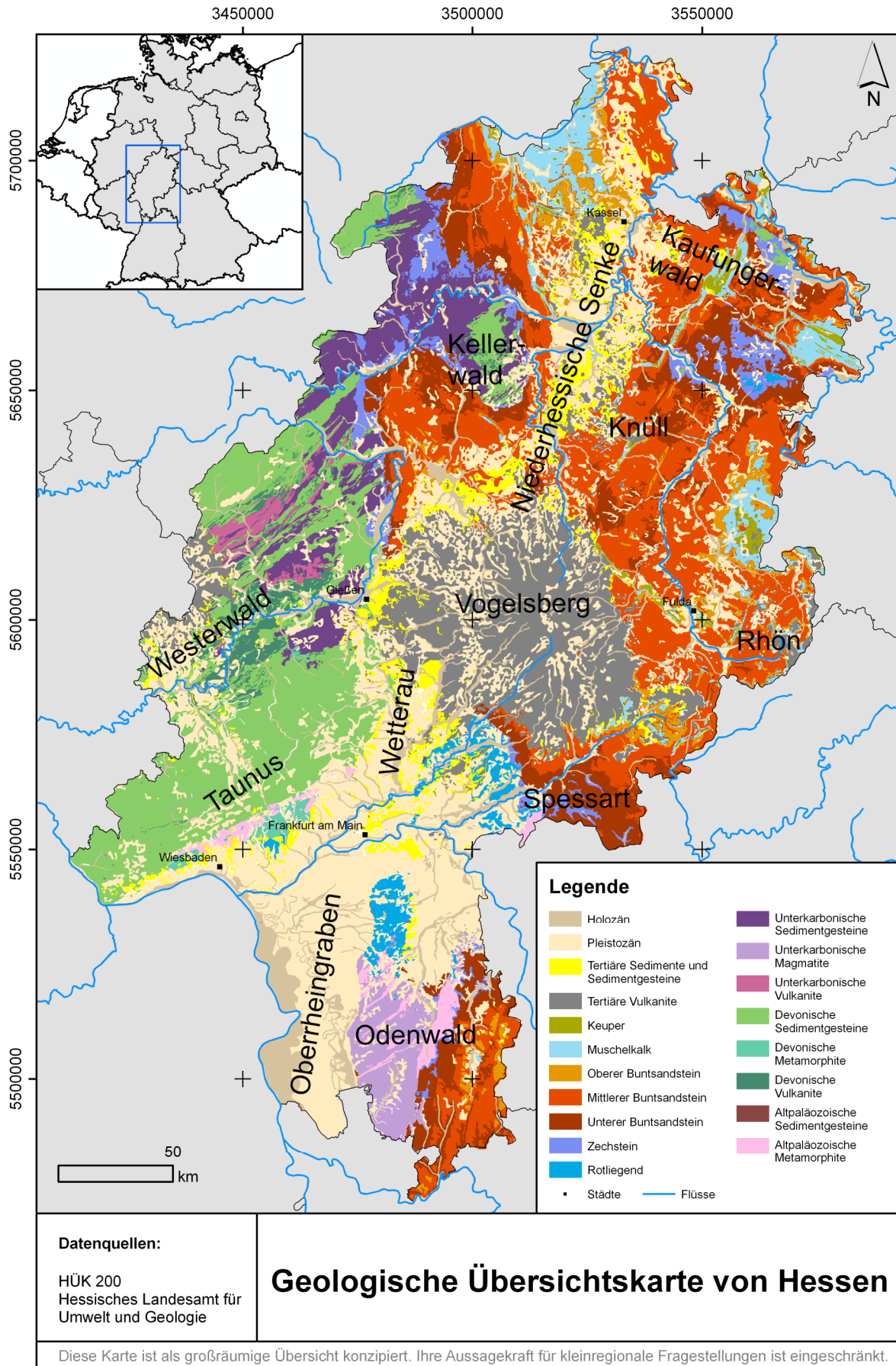


Abbildung 1: Geologische Übersichtskarte des Bundeslands Hessen.

Der Norden und Nordosten Hessens ist Teil des Mitteldeutschen Bruchschollenlandes. Er besteht hauptsächlich aus intensiv bruchtektonisch überprägten Sedimentgesteinen des Mesozoikums. Dominierend sind die mehrere hundert Meter mächtigen zyklisch gegliederten Ablagerungen des Buntsandsteins. Sie liegen in großen Bereichen nahezu horizontal. Die Folgen des Unteren Buntsandsteins sind oft stark tonig ausgeprägt. Im Mittleren Buntsandstein herrschen feste Sandsteine vor, der Obere Buntsandstein (Röt) wird von Tonsteinen dominiert. Im Tertiär entstanden im Zusammenhang mit der Alpenfaltung als nördliche Fortsetzung der Oberrheingraben-Großscholle viele kleinere grabenartige Einbrüche. Diese werden als saxonische Gräben bezeichnet. In ihnen haben sich Schichten des Muschelkalks und des Keupers erhalten. Teilweise sind die Gräben auch mit tertiären Sanden und Tonen gefüllt. In der Hessischen Senke im engeren Sinne, einem Streifen der von Kassel bis Gießen reicht, sind die Buntsandstein-Sedimente auch von mächtigeren, teilweise Braunkohle führenden, tertiären Ablagerungen bedeckt. Die einzelnen Schollen weisen Versatzbeträge von teilweise mehreren hundert Metern auf. Deshalb befinden sich heute im Osten Hessens Zechstein-Abfolgen, wie zum Beispiel der Plattendolomit, in Oberflächennähe und enger Nachbarschaft zu Ablagerungen aus dem Muschelkalk. Über den Sockel aus Buntsandstein erheben sich die während des Tertiär gebildeten Basalt-Gebiete. Es gibt mehrere kleine und mittlere Vorkommen in Rhön, Habichtswald und Knüllgebirge.

Ebenfalls über einen Sockel aus Buntsandstein erhebt sich eines der größten Basalt-Gebiete Mitteleuropas, der zentral in Hessen gelegene Vogelsberg. Der Vogelsberg ist ein an Bruchzonen auftretender Intraplatten-Vulkan und Teil der zentraleuropäischen Vulkanprovinz, deren Aktivität mit der Kollision zwischen afrikanischer und eurasischer Platte in Zusammenhang steht. Es handelt sich um ein großes, schildförmiges, im Zentrum mindestens 500 m mächtiges Vulkangebiet mit einer ausgeprägten Gliederung in Stockwerke aus basaltischen Gesteinen und verschiedenartigen Tuffen. Sie wurden hauptsächlich im Oligozän und Miozän über einen maximalen Zeitraum von 15 Mio. Jahren gefördert (Leßmann, Wiegand et al. 2001). Zwischengeschaltet finden sich auch fossile Bodenbildungen. Die teilweise an Bruchlinien erfolgte Heraushebung des Vogelsberges hat zu konzentrisch angeordneten, treppenartig ausgebildeten Verebnungsflächen im Gebirge geführt.

Zeitgleich mit einer der Hauptphasen der alpidischen Orogenese (vom Oberen Oligozän bis zum Mittleren Miozän) und dem damit in Verbindung stehenden Vulkanismus am Vogelsberg, vollzog sich an einer reaktivierten alten krustalen Schwächezone das Einbrechen des Oberrheingrabens (Leßmann, Wiegand et al. 2001). Noch heute ist der Oberrheingraben eine aktive Bruchzone mit einem mittlerweile auf 3 bis 4 km angewachsenen Gesamt-Verwerfungsbetrag. Am nordwestlichen Ende ist der Graben in Form des Mainzer Beckens randlich ausgebuchtet. Der Untergrund des Oberrheingrabens ist in viele Einzelschollen zerstückelt. In dem in Hessen gelegenen Teil bilden meist Schichten des Rotliegenden die Basis für bis zu 3 km mächtige Ablagerungen aus dem Tertiär und Quartär. Die unterschiedlich mächtigen Deckschichten bestehen meist aus Flussanden und -kiesen, sowie aus Löss und Flugsanden des Quartärs.

2.2 Hydrogeologische Charakterisierung

Bereits in der strukturgeologischen Gliederung sind die in Hessen existierenden hydrogeologischen Großräume erkennbar. Die Großräume lassen sich in 25 hydrogeologische Teilräume untergliedern. Diese wurden von (Fritsche, Hemfler et al. 2003) im Rahmen der Bestandsaufnahme (gemäß der EU-WRRRL) detailliert beschrieben. Dieser Abschnitt gibt zum Überblick über die Großräume in Hessen Informationen, die für die folgende Modellierung einer großräumigen Grundwasserdruckfläche bedeutsam sind. Wenn nicht anders angegeben, stammen diese von (Fritsche, Hemfler et al. 2003).

Im Odenwald- und Spessart-Kristallin überwiegen Kluftgrundwasserleiter mit hauptsächlich geringer bis äußerst geringer Durchlässigkeit. In unterschiedlicher Mächtigkeit sind über dem kristallinen Fels Verwitterungsdecken und Auflockerungszonen ausgebildet, in denen der Hauptteil der Grundwasserbewegung hangabwärts gerichtet stattfindet. Die Festgesteinsgrundwasserleiter des Rotliegenden im Bereich des Sprendlinger Horstes bestehen aus sehr gering durchlässigen Sedimentgesteinen sowie darin eingelagerten Vulkaniten. Fritsche, Hemfler et al. (2003) beschreiben jedoch gute Durchlässigkeiten im Bereich einer sich teilweise wie ein Porengrundwasserleiter verhaltenden Auflockerungszone. Die Klüfte der Rotliegend-Sedimente in der östlichen Wetterau sind häufig durch tonige Füllungen verschlossen, so dass sie meist ebenfalls wenig wasserwegsam sind. Die diskordant auf dem Kristallin des Odenwaldes und des Spessarts auflagernden klastischen Sedimentgesteine des Süddeutschen Buntsandsteins sind mäßig bis hoch durchlässig. Die Grundwasservorkommen, meist aus den Haupterschließungshorizonten im Unteren und Mittleren Buntsandstein, sind von lokaler Bedeutung.

Im intensiv gefalteten Rheinischen Schiefergebirge ist die Grundwasserbewegung ebenfalls auf die oberflächennahe aufgelockerte Zone beschränkt (Matthess 1970). Es handelt sich im Nordteil des Schiefergebirges um überwiegend schlecht durchlässige Kluftgrundwasserleiter. Die lokal vorkommenden Quarzite, Sandsteine oder Metabasalte weisen bessere Durchlässigkeiten auf. Für die devonischen Sedimentgesteine beschreibt Heitfeld (1965) eine bis ca. 30 m mächtige oberflächennahe Auflockerungszone, in der die Grundwasserbewegung stattfinden kann. In Talbereichen ist die Zone meist nicht so tief reichend wie an den Hängen, wobei an steilen Hängen eine stärkere Auflockerung beobachtet wird als an flachen. Nach Heitfeld (1965) hat die Exposition der Hänge keinen Einfluss auf die Auflockerung, eher ist sie abhängig von den tektonischen Verhältnissen. Oberflächennah stellte er teilweise bis in ca. 10 m Tiefe eine Verlehmung und eine damit verbundene geringere hydraulische Durchlässigkeit als in den tiefer liegenden Bereichen der Auflockerungszone fest. Im südlichen Rheinischen Schiefergebirge dominieren geringe bis mittlere Durchlässigkeiten. Hauptgrundwasserleiter ist der Taunusquarzit mit mittlerer Ergiebigkeit und wasserwirtschaftlich überregionaler Bedeutung.

Die hydrogeologischen Einheiten der mesozoischen Schollen im Norden und Nordosten Hessens – hauptsächlich Gesteine der Trias – sind in einer Beckenstruktur gelagert. Die hydraulische Durchlässigkeit einzelner stratigraphischer Einheiten nimmt vom Beckenzentrum zum Beckenrand hin zu (Matthess 1970). Einzelne mäßig durchlässige Einheiten, z.B. die Sandsteine der Solling-Folge, in denen wichtige Grundwasserressourcen existieren, sind

häufig bedeckt mit gering bis äußerst gering leitenden Schichten. Die Einheiten mittlerer Durchlässigkeit weisen insgesamt eine hohe Ergiebigkeit auf. Die Grundwasserfließrichtung weicht teilweise von der Fließrichtung des Oberflächenabflusses ab, weil beispielsweise tektonische Gräben eine Dränwirkung ausüben. Die paläozoischen Aufbrüche (hauptsächlich Zechstein) sind meist verkarstet und deshalb oft stark variabel durchlässig.

Der Vogelsberg ist – bedingt durch seinen Stockwerksbau in unterschiedlich hydraulisch durchlässige Schichten – in mehrere Zonen gegliedert. Unterschieden werden die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke und die Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung. In diesen existieren schwebende, gespannte und ungespannte Grundwasservorkommen, die teilweise auf komplizierte Weise miteinander hydraulisch verbunden sind. Am Ende des hydrologischen Sommerhalbjahres kann es zum Trockenfallen von Quellen und Bächen kommen, weil lokal schwebende Stockwerke nur temporär Grundwasser führen. Die Basalte gelten allgemein als Grundwasser leitend, die kompaktierten Vulkaniklastika und Verwitterungshorizonte als Grundwasser gering bis nicht leitend. In der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung ist die Grundwasserfließrichtung vom Zentrum des Vogelsberges auf die Ränder und dort auf die Vorflut gerichtet. Aufgrund der teilweise sehr ergiebigen Brunnen wird der Vogelsberg als überregionales Wassergewinnungsgebiet genutzt. (Leßmann & Wiegand 1998; Leßmann, Wiegand et al. 2001)

Ausgedehnte Lockergesteinsgrundwasserleiter befinden sich im Süden Hessens im Bereich des Oberrheingrabens und des Rhein-Main-Gebietes, sowie in der nördlich des Vogelsberges in den Buntsandstein eingesenkten Grabenstruktur der Niederhessischen Senke. Im Oberrheingraben existiert ein mehrstöckiger Lockergesteinsgrundwasserleiter von mittlerer Durchlässigkeit. Die fluviatile Schichtenfolge ist durch Tonhorizonte in mehrere Grundwasserleiter unterteilt. Entlang des östlichen Grabenrandes sind die Tonhorizonte weiträumig entwickelt, im Westen ist nur ein Grundwasserleiter ausgebildet. Aufgrund der sonst teilweise lückenhaften Verbreitung der Tonhorizonte existieren zwischen den Stockwerken meist keine oder nur geringe Potenzialunterschiede. Der Grundwasserflurabstand beträgt verbreitet nur 1 bis 3 m, durch weiträumige Grundwasserförderung ist der Grundwasserspiegel jedoch um 1 bis 2 m abgesenkt. Die Fließrichtung des Grundwassers ist von Ost nach West auf den Rhein als Vorflut gerichtet. Es existieren überregional bedeutende sehr ergiebige Grundwasservorkommen. An den Oberrheingraben schließt sich nördlich das Rhein-Main-Gebiet an. Hier existieren Porengrundwasserleiter mit teilweise hohen Durchlässigkeiten in den quartären Main- und Rheinterrassen, aus denen für die örtliche Wasserversorgung gefördert wird.

Die Wetterau zwischen Taunus und Vogelsberg ist ebenfalls ein tertiärer Senkungsbereich. Hier existieren mächtige tertiäre Lockergesteinsgrundwasserleiter geringer bis mittlerer Durchlässigkeit, die örtlich von quartären fluviatilen Lockergesteinen mit ebenfalls geringer bis mittlerer Durchlässigkeit bedeckt sind.

In der Niederhessischen Senke überwiegen meist feinkörnige klastische Sedimente aus dem Tertiär, die über dem Grundwasserhemmer *Oberer Buntsandstein* abgelagert wurden. Die gesamte tertiäre Abfolge ist lokal von quartären Lockergesteinen mit hoher Durchlässigkeit und von tertiären Basalten überlagert. Die die Sedimentabfolge durchschlagenden tertiären Basalte sind als Kluffgrundwasserleiter ausgebildet und können lokal von Bedeutung für die Wasserversorgung sein.

3. Methodik zur flächendeckenden Modellierung der Grundwasserdruckfläche

3.1 Grundlagen und Modellprämissen

Die obere Grenzfläche eines Grundwasserkörpers heißt *Grundwasseroberfläche* (Begriffe nach DIN 4049-3). Sie wird als freie Grundwasseroberfläche bezeichnet, wenn sie sich innerhalb eines Grundwasserleiters befindet und das Grundwasser deshalb in ungespanntem Zustand vorliegt. In diesem Fall ist sie mit der *Grundwasserdruckfläche* identisch. Die Druckfläche verbindet die hydraulischen Druckhöhen über einem Bezugsniveau (meist Normalhöhennull NHN), auf die man durch Messung des Grundwasserspiegels in einer Grundwassermessstelle schließen kann. Grenzt die Grundwasseroberfläche eines Grundwasserkörpers direkt an eine gering durchlässige Grundwasserüberdeckung (Grundwasserhemmer oder Grundwassernichtleiter) und liegt der dort in einer Messstelle erfasste Grundwasserstand oberhalb der Grenzfläche, dann liegt das Grundwasser in gespanntem Zustand vor. Grundwasseroberfläche und Grundwasserdruckfläche sind in diesem Fall nicht identisch.

Allein durch einmalige Messung des Grundwasserstandes in einer Messstelle lässt sich nicht ermitteln, ob das Grundwasser gespannt oder ungespannt vorliegt. Dazu sind weitere Informationen (und deren Analyse) beispielsweise aus Schichtenverzeichnissen, aus hydraulischen Versuchen, aus dem Einzugsgebiet der Messstelle oder aus Zeitreihen des Grundwasserstandes notwendig. Durch die Betrachtung einer Einzelmessung kann folglich nur auf das lokale Höhenniveau der Grundwasserdruckfläche geschlossen werden. Ein Regionalisierungsverfahren, das lediglich diese Messungen berücksichtigt, wird ein flächendeckendes Modell der Grundwasserdruckfläche erzeugen. Welche Teilflächen davon als freie Grundwasseroberfläche vorliegen, bleibt zunächst unbekannt.

3.1.1 Die Geschwindigkeit des Grundwassers

In der Modellvorstellung strömt ein kleines Grundwasserteilchen entlang einer idealisierten Bewegungsspur, der Grundwasserstromlinie, dem Gradient der Druckfläche folgend. Die DARCY-Gleichung für Wasser beschreibt in allgemeiner Form die Grundwasserbewegung:

$$\vec{v}_f = -k_f \cdot \frac{\partial h}{\partial \vec{s}} = -k_f \cdot \text{grad } h \quad (3.1)$$

mit \vec{v}_f Filtergeschwindigkeit (DARCY-Geschwindigkeit)
 k_f Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser (hydraulische Leitfähigkeit für Wasser)
in m/s

∂h Druckhöhenverlust in Richtung der Grundwasserstromlinien

$\partial \vec{s}$ Wegelement in Richtung der Grundwasserstromlinien

$grad h$ hydraulischer Gradient

In Gl. 3.1 ist der hydraulische Gradient $grad h$ die Größe, die an einem diskreten Ort auf einer Grundwasserstromlinie das Gefälle der Grundwasserdruckfläche beschreibt. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f (in m/s) ist ein gesteins- und fluidspezifischer Geschwindigkeitskoeffizient. Die Filtergeschwindigkeit $v_f = |\vec{v}_f|$ (in m/s) ergibt sich aus dem Volumenstrom Q des Grundwassers (in m³/s) durch einen Querschnitt F des Grundwasserleiters (in m²). Da es sich dabei um die Bruttofläche des Strömungsquerschnittes handelt, muss für die Bestimmung der Geschwindigkeit eines Grundwasserteilchens auf der Grundwasserstromlinie, der sogenannten *Abstandsgeschwindigkeit* $v_a = |\vec{v}_a|$ (in m/s), der durchflusswirksame Hohlraumanteil n_f berücksichtigt werden:

$$\vec{v}_a = \frac{-k_f \cdot grad h}{n_f} \quad (3.2)$$

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers auf einem Abschnitt der Grundwasserstromlinie und der hydraulische Gradient auf diesem Abschnitt sind zueinander direkt proportional durch gesteinspezifische Koeffizienten verknüpft. Die Gl. 3.2 bildet die Basis für eine Schätzung der Verweilzeiten des Grundwassers, beispielsweise mit dem WEKU-Modell (Kunkel & Wendland 1997; Wendland, Kunkel et al. 2004), sowie für den advektiven Transport gelöster Inhaltsstoffe.

Die Gültigkeit der DARCY-Gleichung ist auf laminar strömendes Grundwasser beschränkt. Als Kriterium, ob eine Strömung laminar ist, wird die REYNOLDS-Zahl Re verwendet. Bei $Re \geq 10$ muss mit einem Beginn turbulenter Strömung gerechnet werden. Die Gleichung kann jedoch bei $Re < 1$ angewendet werden. Für die meisten Grundwasserbewegungen in der Natur ist das Kriterium erfüllt (Baumgartner & Liebscher 1996). Wenn aufgrund zu enger Hohlräume und hoher Adsorptionskräfte die Grundwasserströmung sehr langsam wird, verliert die Gleichung ebenfalls ihre Gültigkeit. Im Rahmen der hier vorgestellten Methode wird die DARCY-Gleichung nicht explizit für Berechnungen verwendet. Vielmehr wird mit der Grundwasserdruckfläche der Geometrieparameter $grad h$ großräumig abgebildet, der Berechnungen auf Basis der Gleichung ermöglicht.

3.1.2 Einfluss der gesteinspezifischen hydraulischen Durchlässigkeit auf die Grundwasserbewegung

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers wird maßgeblich durch die Ausbildung der hydraulisch zusammenhängenden Hohlräume des durchströmten Gesteins beeinflusst. Im Lockergestein (hauptsächlich klastische Lockersedimente) wird der sogenannte nutzbare Porenraum durchströmt. Die hydraulische Leitfähigkeit wird durch den k_f -Wert geeignet

charakterisiert und kann beispielsweise durch hydraulische Versuche oder Korngrößenanalyse gewonnen werden. Die hydraulische Anisotropie – die Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit von der Raumrichtung – ist innerhalb von Verbreitungsbereichen einer Bodenart meist gering und deshalb in der Praxis eher vernachlässigbar (Louis 1967; Hölting 1996).

Im Festgestein existieren im Gegensatz zum Lockergestein häufig zwei Komponenten der Durchlässigkeit: die Gesteinsdurchlässigkeit in Form von Poren im Gefüge der Gesteine sowie die Trennfugendurchlässigkeit. Beide ergeben die Gebirgsdurchlässigkeit. In Abhängigkeit von ihrer Genese weisen die Festgesteine teilweise völlig vernachlässigbare nutzbare Porositäten auf; so beispielsweise die Schiefergesteine des Rheinischen Schiefergebirges. Andererseits sind in weiten Grenzen wechselnde nutzbare Porositäten (bis zu 15%), zum Beispiel in den Sandsteinen des Mittleren und Unteren Buntsandstein Hessens, bekannt, die sicher einen nicht mehr völlig vernachlässigbaren Anteil an der hydraulischen Durchlässigkeit haben (Hölting & Schraft 1987). In viel stärkerem Maße als die Poren sind jedoch die wasserwegsameren Trennfugen in Form von Kluft-, Bankungs-, Schieferungs-, Abkühlungs- und Lösungshohlräumen als Fließwege wirksam (Matthess 1970).

Einzelne durch das Trennfugensystem abgegrenzte Gesteinskörper können eine wenn auch geringe isotrope Gesteinsdurchlässigkeit aufweisen (z.B. poröse Sandsteine). Auf der hydrogeologischen Mikroskala (1 bis 10 m) ist die Gebirgsdurchlässigkeit infolge der in den Raumrichtungen unterschiedlich verteilten und ausgeprägten Trennfugen, beispielsweise induziert durch eine tektonische Beanspruchung, jedoch meist anisotrop. Diese Anisotropie ist bei Gesteinen mit geringer Trennfugendichte und geringer tektonischer Beanspruchung häufig stärker ausgeprägt als bei intensiv zerbrochenen Gesteinskomplexen. Auf die Grundwasserbewegung wirkt sich eine anisotrope Durchlässigkeit dahingehend aus, dass die resultierende Strömungsgeschwindigkeit und der hydraulische Gradient meist nicht genau parallel gerichtet sind. In isotropen Medien sind beide Größen jedoch parallel gerichtet (Louis 1967). Aufgrund der zwei Komponenten sowie ihrer meist anisotropen räumlichen Verteilung wird die Gebirgsdurchlässigkeit im Festgestein besser in Form der Transmissivität $T = k_f \cdot M$ (mit M = Mächtigkeit einer Schicht in m; T in m^2/s) charakterisiert (Hölting 1996).

Im Festgestein variiert die räumliche Verteilung der Durchlässigkeit und damit die Grundwasserbewegung zusätzlich im Bereich von Falten oder Störungen. In der Zone oberflächennaher Festgesteinsauflockerung ähneln die hydraulischen Verhältnisse denen von Lockergestein. Für die vulkanischen Schichten des Vogelsberges sind beispielsweise zweidimensionale Durchlässigkeiten charakteristisch (Leßmann, Wiegand et al. 2001). Aufgrund fossiler Bodenbildungen und kompakterer Vulkaniklastika ist häufig die horizontale Gebirgsdurchlässigkeit größer als die vertikale, sodass die vertikale Grundwasserbewegung gehemmt wird. Analog dazu müssen die Durchlässigkeiten in Lockergesteinsgrundwasserleitern skalenabhängig betrachtet werden. Innerhalb ganzer Grundwasserleiter können aufgrund lokal unterschiedlicher Bodenarten anisotrope Durchlässigkeitsverhältnisse vorliegen.

Der hydraulische Gradient verhält sich umgekehrt proportional zur hydraulischen Durchlässigkeit. Die Gl. 3.1 kann folgendermaßen interpretiert werden: hohe Gebirgsdurchlässigkeiten führen zu einem geringen hydraulischen Gradienten (Gefälle der Grundwasserdruckfläche), weil die Aufnahmefähigkeit des Gesteins für das einem beliebigen Modellausschnitt zusickernde Wasser hoch ist und das Wasser relativ schnell lateral weiter strömen kann.

Dagegen führen geringe Durchlässigkeiten dementsprechend zu steilen hydraulischen Gradienten. Unterscheiden sich zwei Teilgebiete eines hydrogeologischen Teilraumes deutlich in den beobachteten hydraulischen Gradienten, können sie als unterschiedlich hydraulisch durchlässig angesehen werden. Unterscheiden sich zwei Teilgebiete eines hydrogeologischen Teilraumes deutlich in ihrer bekannten Gesteinsstruktur und sind für diese deutlich unterschiedliche hydraulische Parameter festgestellt worden, dann wird sich dies im unterschiedlichen Gefälle der Grundwasserdruckflächen widerspiegeln. Dieser Zusammenhang ist grundlegend für die Gliederung eines Gebietes in hydrogeologische Einheiten.

Im Sinne der Hydrogeologischen Kartieranleitung (Ad-hoc-AG Hydrogeologie 1997) wird als hydrogeologische Einheit ein Gesteinskörper verstanden, „der aufgrund seiner Petrographie, Textur oder Struktur im Rahmen einer festgelegten Bandbreite einheitliche hydrogeologische Eigenschaften aufweist und durch Schichtgrenzen, Faziesgrenzen, Erosionsränder oder Störungen begrenzt ist“. Die Bandbreite ist dabei abhängig von der Bearbeitungs- oder Modellskala. Innerhalb der Bandbreite wird ein Gesteinskörper bestehend aus Locker- oder Festgestein als hydraulisch homogen betrachtet. Im Rahmen des hier vorliegenden Berichtes werden auf Basis dieses Grundprinzips der räumlichen Untergliederung von Gesteinstypen nach geohydraulischen Gesichtspunkten auch räumlich getrennte Gesteinskörper als eine hydrogeologische Einheit bezeichnet, wenn sie die genannten einheitlichen Eigenschaften aufweisen.

Letztendlich stellt sich die Frage, bis zu welchem Grad die räumliche Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit in einem großräumigen Modell der Grundwasserdruckfläche Berücksichtigung finden kann. Dies ist allein abhängig von der Auflösung der Datengrundlagen, die für eine Gliederung in hydrogeologische Einheiten verwendet werden können. Innerhalb der auf Basis der Datengrundlagen voneinander unterscheidbaren Flächen kann nur eine technisch umsetzbare Annahme gemacht werden: die hydraulische Durchlässigkeit ist isotrop. Damit wird innerhalb der einzelnen hydrogeologischen Einheiten eine relativ homogene Grundwasserdruckfläche angenommen.

3.1.3 Diskretisierung der Grundwasserdruckfläche

Liegt die Grundwasserdruckfläche in Form eines Rastermodells vor, so kann für alle Maschen des Rasters durch eine topologische Analyse die Richtung der Grundwasserstromlinie und der zugehörige hydraulische Gradient bestimmt werden. Dazu werden für jede Masche die Druckhöhendifferenzen zu den jeweiligen Nachbarmaschen berechnet. Die Grundwasserstromlinien einzelner Maschen zeigen in Richtung der größten Druckhöhenverluste und bilden gemeinsam das Modell der Grundwasserfließrichtung (Skizze in Abbildung 2).

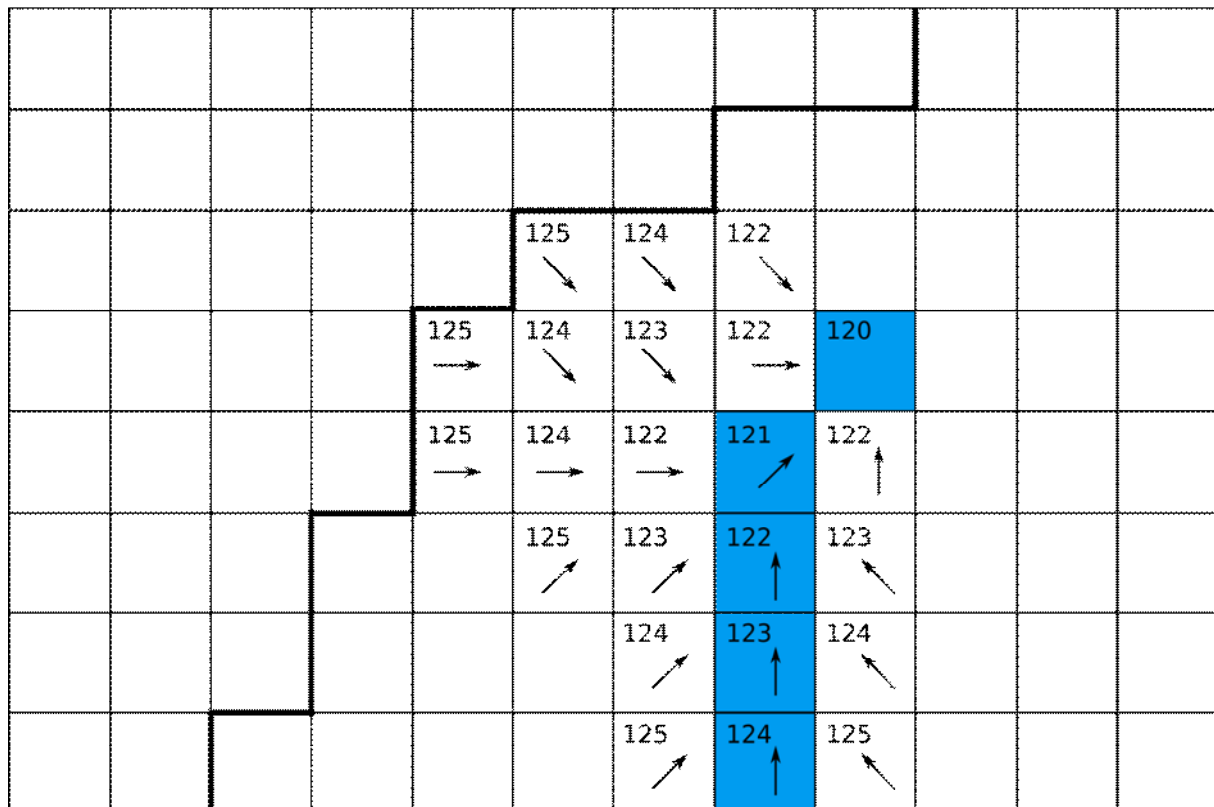


Abbildung 2: Schematisches Beispiel zur Ableitung des Fließrichtungsmodells (angelehnt an Kunkel & Wendland 1997). Dicke Linien kennzeichnen die Einzugsgebietsgrenzen, blau hinterlegt ist die Vorflut. Angaben zur Druckhöhe in m ü. NHN. Die Pfeile zeigen die Grundwasserfließrichtung für die jeweilige Masche an.

3.1.4 Gliederung in Locker- und Festgesteinsgrundwasserleiter

Bei der Erstellung der flächendeckenden Grundwasserdruckfläche wird eine grundlegende Gliederung in Locker- und Festgesteinsgrundwasserleiter vorgenommen. Hierbei wird von der Grundsituation ausgegangen, dass Lockergesteinsgrundwasserleiter meist auf Flachlandbereiche und die Tallagen der Mittelgebirge beschränkt sind, und dass oberflächennah anstehende Festgesteinsgrundwasserleiter sich deshalb geomorphologisch oberhalb der Lockergesteinsgrundwasserleiter befinden. Diese Gliederung nach der Reliefenergie wird außerdem vorgenommen, weil die Dichte der gemessenen Grundwasserstände im Lockergesteinsbereich in der Regel deutlich größer ist als im Festgesteinsbereich (siehe auch Abbildung 21). Deshalb muss in beiden Stufen der Modellerstellung ein an die Datendichte und -verfügbarkeit angepasstes Vorgehen gewählt werden.

In der ersten Stufe wird eine flächendeckende Grundwasserdruckfläche für die Lockergesteinsbereiche interpoliert. In der zweiten Stufe wird für die Festgesteinsbereiche ein Druckfläche modelliert, auf der das Grundwasser aus den Festgesteinsgrundwasserleitern in die Lockergesteinsbereiche oder, in den höheren Lagen der Mittelgebirge, direkt in die Vorflut strömt (Abbildung 3). Der Rand der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich und das als Vorflut wirksame Gewässernetz bilden dabei gemeinsam das *Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgesteinsbereich* (MEF). Jegliche Grundwasserströmung aus dem

Festgestein endet damit bei einem diskreten festen Grundwasserstand im Modell des Entwässerungsniveaus. Als Lockergesteinsgrundwasserleiter werden behandelt:

- ausgedehnte und evtl. in Grundwasserleiter und -stauer gegliederte Lockergesteinsablagerungen im Flachland (z.B. im Oberrheingraben) und den größeren Senken (z.B. Niederhessische Senke) die in den hydrogeologischen Kartenwerken mit der Hohlraumart *Poren* gekennzeichnet sind,
- die aufgrund ihrer Größe, Lage und Genese als Deckschichten gekennzeichneten Talfüllungen aus Sedimenten in Festgesteinsbereichen, in denen an das Grundwasser angeschlossene Oberflächengewässer existieren,
- lokal begrenzt auftretende grundwasserbeeinflusste Böden im Festgestein.

Als Festgesteinsgrundwasserleiter werden die hydrogeologischen Einheiten mit den dominierenden Hohlraumarten *Kluft*, *Kluft/Karst* sowie *Kluft/Poren* behandelt, wenn ihre Deckschichten nicht bereits als Lockergesteinsgrundwasserleiter eingestuft wurden. Das Ergebnis der Gliederung in Locker- und Festgesteinsgrundwasserleiter ist für das Bundesland Hessen im Kapitel Datengrundlagen, Abbildung 16 dargestellt.

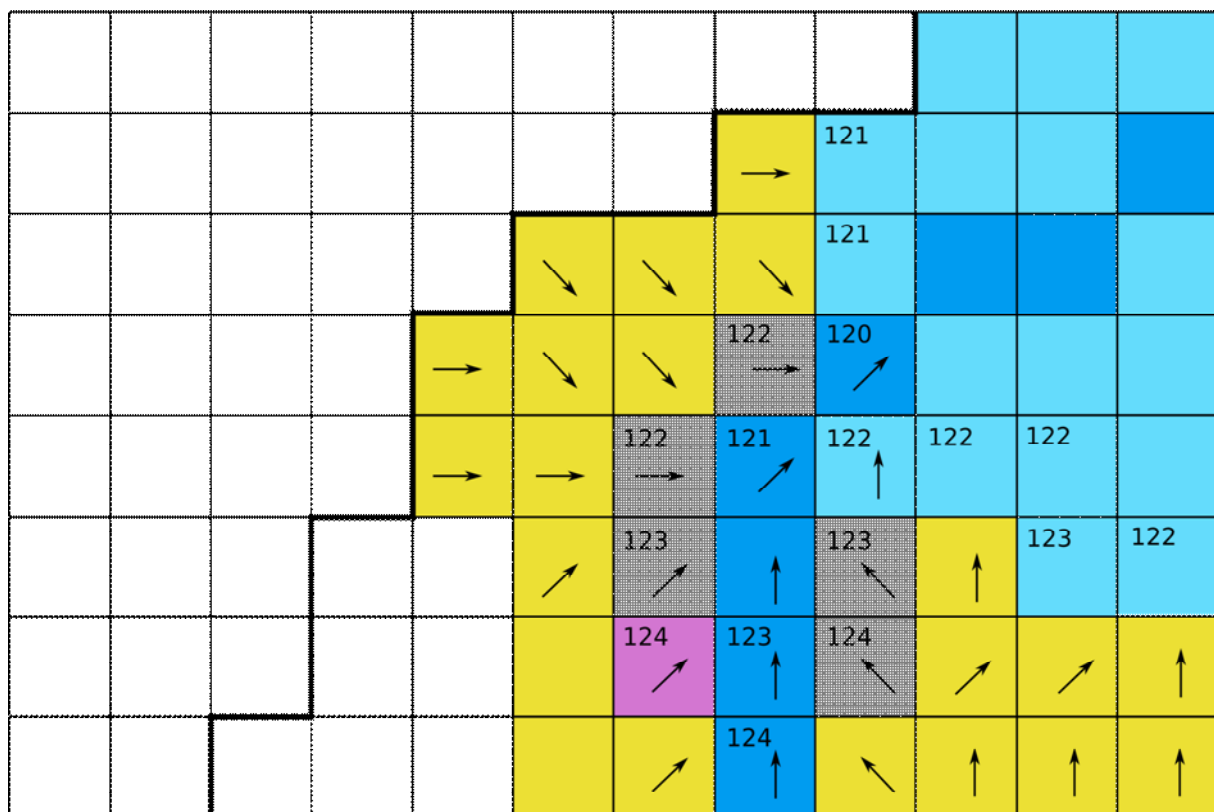


Abbildung 3: Schematisches Beispiel zum Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein (MEF). Dicke Linien kennzeichnen die Einzugsgebietsgrenzen, blau hinterlegt ist die Vorflut, hellblau sind die Lockergesteinsbereiche gekennzeichnet, grau die Talfüllungen, violett der grundwasserbeeinflusste Boden einer Quellmulde und ocker ein Festgesteinsbereich. Die Pfeile zeigen die Fließrichtung für die jeweilige Masche an. In den Maschen des Modells des Entwässerungsniveaus sind die Druckhöhen in m ü. NHN verzeichnet.

3.2 Modellierung einer Grundwasserdruckfläche für Grundwasserleiter im Lockergestein

In der ersten Stufe der Modellerstellung werden die Grundwasserstände der geomorphologisch tiefer liegenden Grundwasserleiter im Lockergestein flächendeckend interpoliert. Für die Interpolation können verschiedene Verfahren verwendet werden. In der hydrogeologischen Praxis haben sich geostatistische Verfahren wie zum Beispiel *Ordinary Kriging* oder *Universal Kriging* bewährt (Schafmeister 1999). Alternativ können natürlich auch Verfahren auf Basis einer Triangulierung zwischen Stützpunkten – wie klassischerweise bei der Konstruktion von Grundwassergleichen mit Hilfe des hydrologischen Dreiecks – angewendet werden.

Aufgrund der häufig zu geringen Anzahl und der meist unregelmäßigen Verteilung gemessener Grundwasserstände aus Bohrungen oder dauerhaften Grundwassermessstellen (siehe auch Abbildung 5), werden zusätzliche Informationen in die Interpolation einer plausiblen Grundwasserdruckfläche einbezogen. Hierbei handelt es sich um Angaben aus verschiedenen Datenbeständen (beispielsweise einer Bodenkarte), die sich hinsichtlich der Herkunft ihrer Information zum Grundwasserstand unterscheiden.

3.2.1 Interpolationsverfahren – *Ordinary Kriging*

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde *Ordinary Kriging* für die flächendeckende Schätzung der Grundwasserstände in den Grundwasserleitern des Lockergesteins verwendet. Dies hat zwei wesentliche Gründe:

- Die Anforderungen an die Rechentechnik und die notwendige Rechenzeit für die Interpolation liegen in einem vertretbaren Rahmen.
- Die Berücksichtigung eines linearen Trends mit *Universal Kriging* in Richtung des hydraulischen Gradienten, wie von Schafmeister (1999) empfohlen, ist nur in kleinen Modellgebieten mit einer einzigen generellen Abstromrichtung sinnvoll. Mit den derzeit verfügbaren Rechenprogrammen ist eine derartige Anwendung auf eine Vielzahl kleiner Teilflächen nicht automatisiert durchführbar.

Die Technik des *Ordinary Kriging* ist bereits von einer Vielzahl Autoren beschrieben und die Anwendung anhand vieler Fallstudien demonstriert worden. An dieser Stelle soll nur eine kleine Auswahl genannt werden: Akin & Siemes (1988), Deutsch & Journel (1992), Pannatier (1996), Salama et al. (1996), Webster & Oliver (2001), Forkel (2004).

Ordinary Kriging nutzt bei der Interpolation die sogenannte Semivarianz für eine Gewichtung der einzelnen Stützpunkte. Die Semivarianz ist das Maß dafür, wie sehr eine ortsabhängige Variable (hier der Grundwasserstand) in der Fläche mit zunehmendem Abstand streut. Sie wird nach folgender Gleichung berechnet (aus Schafmeister 1999):

$$\gamma(a) = \frac{1}{2N(a)} \cdot \sum_{i=1}^{N(a)} (z(x_i) - z(x_i + a))^2 \quad (3.3)$$

mit	$\gamma(a)$	experimentelle Semivarianz im Abstand a
	$N(a)$	Anzahl der Messwertpaare im Abstand a
	x_i	Ortsvektor des i -ten Messpunkts
	$z(x_i)$	Messwert (hier Grundwasserstand) im Punkt i

Für die Darstellung im Variogramm werden dabei Distanzklassen gebildet. Für alle Wertepaare mit einem Abstand a innerhalb aufeinanderfolgender Klassengrenzen wird die experimentelle Semivarianz berechnet und über die Distanzklasse aufgetragen (Abbildung 4).

Experimentelle Variogramme können für verschiedene Raumrichtungen berechnet werden. Dadurch kann eine anisotrope räumliche Struktur einer Variablen erkannt werden, wenn die Variogramme einen unterschiedlichen Verlauf in den gewählten Raumrichtungen aufweisen. Die Abbildung 4 zeigt vier Richtungsvariogramme sowie ein richtungsunabhängiges Variogramm für die in den hessischen Lockergesteinsbereichen gemessenen Grundwasserstände (eine genaue Beschreibung des Messwertdatenbestandes erfolgt in Abschnitt 4.6). In den Distanzklassen bis 2000 m sind die berechneten Semivarianzen in allen Raumrichtungen ähnlich groß und können mit einer einzigen Potenzfunktion approximiert werden. Bis zur Distanz von 2000 m wird kein Sill erreicht, was für eine relativ kontinuierliche Größe wie den Grundwasserstand typisch ist. (Als Sill wird die Distanz bezeichnet, ab der die Semivarianz nicht mehr zunimmt.)

Ab Distanzen von 3000 m lässt sich die Semivarianz nicht mehr in allen Raumrichtungen sinnvoll mit einem einzigen Potenzmodell beschreiben. Begründet ist dies darin, dass mit größer werdenden Distanzen zunehmend Messwertpaare aus verschiedenen Grundwasserleitern oder auch Grundwasserkörpern statistisch miteinander in Beziehung gesetzt werden, die nicht miteinander hydraulisch in Beziehung stehen. Zusätzlich nimmt der Einfluss des Reliefs zu.

Aus der Variogrammanalyse können nun die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei der großräumigen geostatistischen Strukturanalyse weisen die Grundwasserstände in den Distanzklassen bis 2000 m nur eine schwach ausgeprägte Anisotropie auf (Abbildung 4). Nach Schafmeister (1999) bewirkt die Berücksichtigung einer solchen schwach ausgeprägten Anisotropie keine Verbesserung bei der Interpolation mit *Ordinary Kriging*. Die Interpolation kann demzufolge auf Basis eines an die experimentelle Semivarianz angepassten richtungsunabhängigen Semivarianzmodells erfolgen (Abbildung 24).
- Auch im Hinblick auf die im folgenden Abschnitt 3.2.2 näher erläuterte Verdichtung des Stützpunktekollektivs sollte für die Interpolation ein sinnvoller Suchradius kleiner als 3000 m gewählt werden.

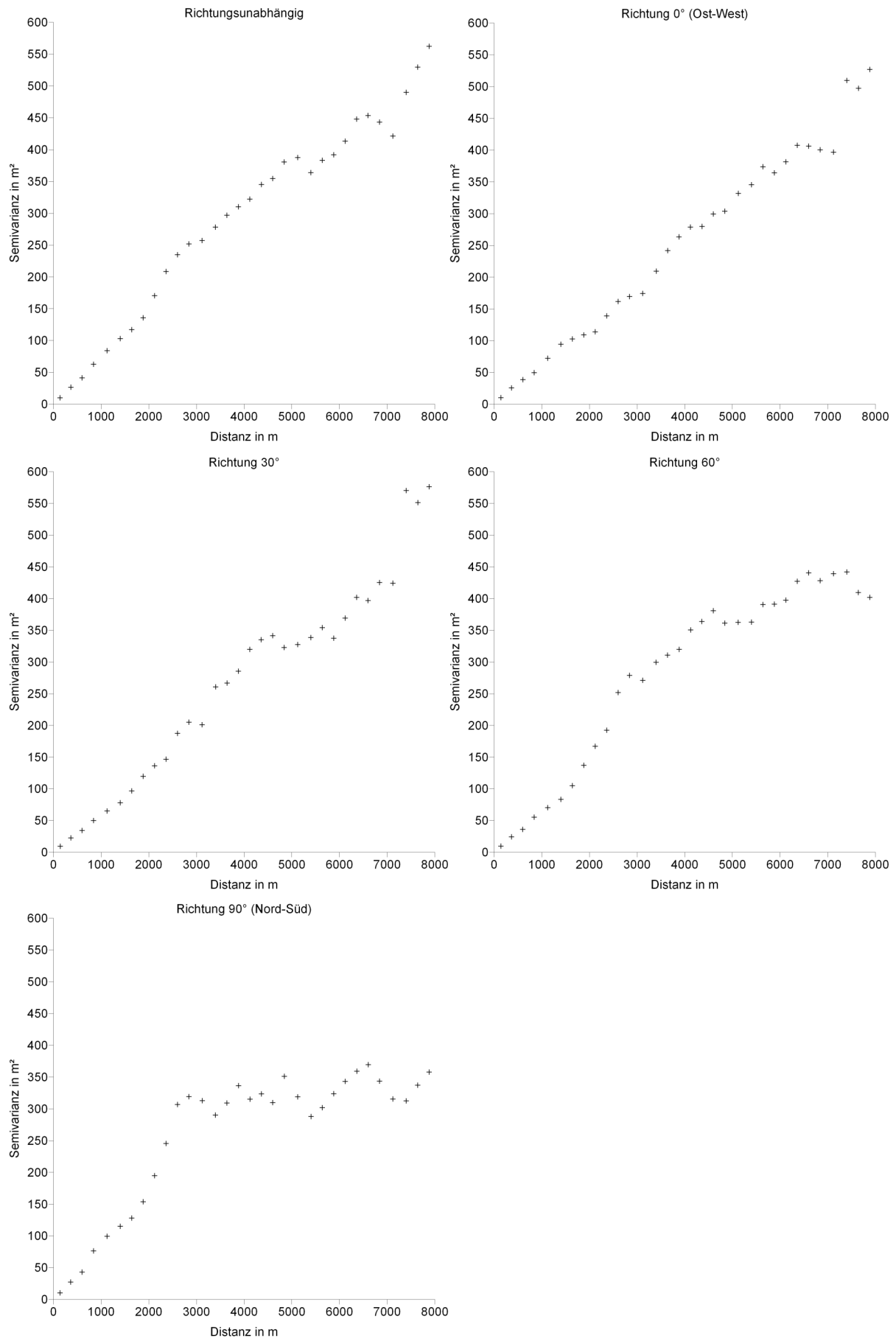


Abbildung 4: Experimentelle Richtungsvariogramme und richtungsunabhängiges Variogramm der Grundwasserstände im Lockergesteinsbereich Hessens.

3.2.2 Hierarchische Verdichtung der Stützpunkte im Lockergesteinsbereich

Die Abbildung 5 (links) zeigt eine typische Verteilung von gemessenen Grundwasserständen in einem Lockergesteinsgebiet – einer als Prototyp verwendeten Beispielregion in der Niederhessischen Senke. Es existieren Regionen mit einer extrem hohen Dichte an Messwerten. Auf einzelnen Flächen ist die Anzahl der Messwerte und ihre Verteilung genau so, wie man sie sich für die präzise Interpolation einer Grundwasserdruckfläche wünschen würde. Demgegenüber finden sich große Gebiete ganz ohne Messwerte (eine genaue Beschreibung der modellweit verfügbaren Messwerte erfolgt in Abschnitt 4.6).

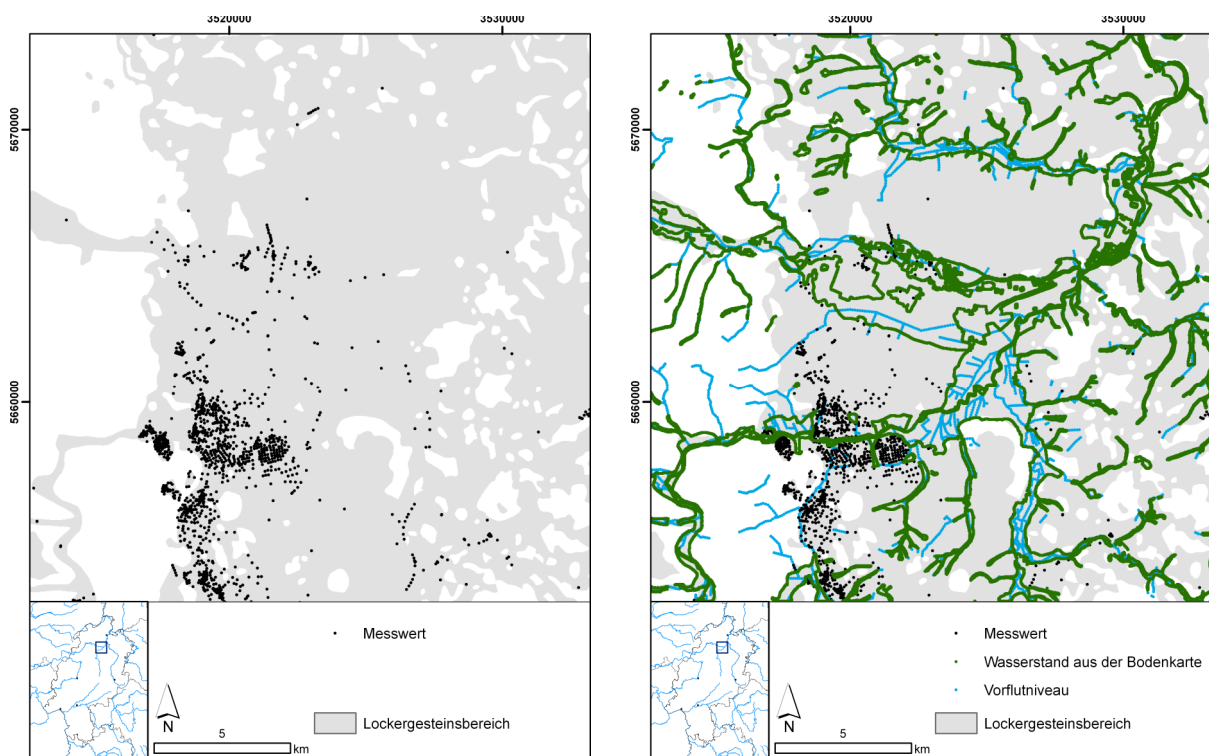


Abbildung 5: Typische Verteilung von gemessenen Grundwasserständen im Lockergestein (links) und Stützpunkten für die Interpolation der Grundwasserdruckfläche nach der Verdichtung des Messwertekollektivs (rechts).

Aufgrund der extrem heterogenen Verteilung der potentiell für die Interpolation verwendbaren Messwerte erfolgt eine Verdichtung (Abbildung 5, rechts) zu einem geeigneten Stützpunktekollektiv unter Verwendung der folgenden Datenbestände:

- Grundwasserstände aus bereits bestehenden Grundwassergleichenplänen,
- Flurabstandinformationen aus Bodenkarten und
- dem Vorflutniveau.

Die Auswahl der Datenquellen für die Grundwasserstände wird im Folgenden näher beschrieben und ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Bevorzugt werden *Grundwasserstände aus bereits existierenden lokalen Grundwassergleichenplänen oder Rasterdatensätzen* in das Modell der Grundwasserdruckfläche integriert. In diese Grundwassergleichenplä-

ne, die häufig zur Beantwortung kleinräumiger Fragestellungen erstellt wurden, sind meist zusätzliche Informationen aus der Interpretation der hydrogeologischen Gegebenheiten eingeflossen. Sie werden deshalb als sehr präzise Abbildungen der lokalen Grundwasserdruckfläche angesehen. Für diese Modellteile werden beispielsweise die Stützpunkte der Isolinien mit den entsprechenden Höhenwerten verwendet. Grundwasserstände bereits existierender Rasterdatensätze werden, bei geringen Abweichungen der Maschenweite, direkt auf das neue Raster übertragen und die Randpunkte dieser Flächen dienen als Stützpunkte für die Interpolation in den übrigen Gebieten. Unterscheiden sich die Maschenweiten deutlich, dann können die Mittelpunkte der Maschen mit ihren Grundwasserständen als eine Art virtuelle Messstelle (im Sinne von Forkel 2004) direkt als Stützpunkte dienen.

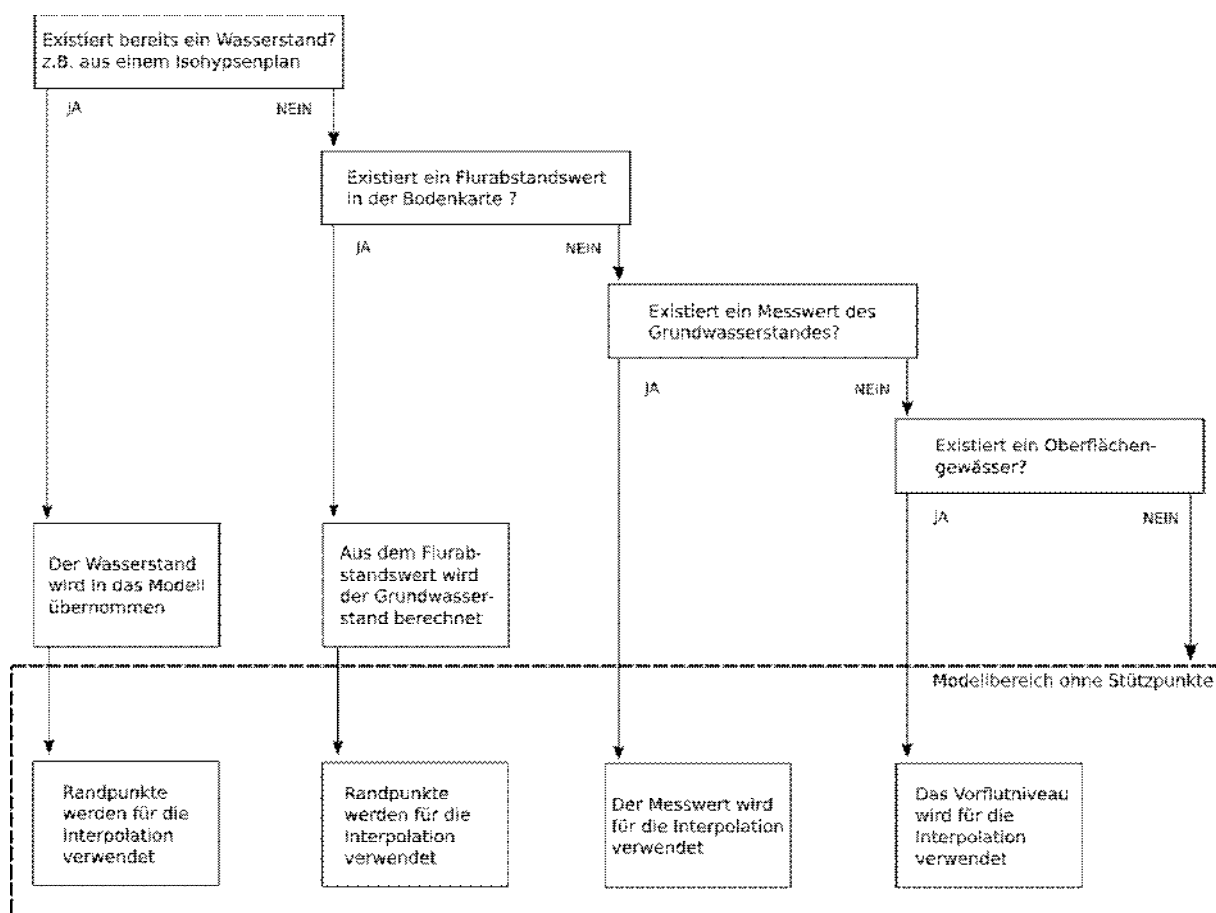


Abbildung 6: Hierarchische Zusammenstellung von Information zum Grundwasserstand für die Interpolation einer flächendeckenden Grundwasserdruckfläche in den Lockergesteinsgrundwasserleitern.

Eine weitere Kategorie Stützpunkte wird aus den *Flurabstandsinformationen der Bodenkarte* gebildet. In Bodenkarten sind typischerweise für die Leitböden der einzelnen Bodeneinheiten (und damit deren Verbreitungsflächen) Angaben zum Tiefenbereich der grundwasserbeeinflussten Horizonte verzeichnet. Für Flächen mit flurnahem Grundwasser (weniger als 2 m unter Gelände) existiert somit eine flächendeckende Information zur ungefähren Lage der Grundwasseroberfläche. (Heinkele, Voigt et al. 2002) sehen diese Böden als Grundwasserentlastungsgebiete an, in denen die Grundwasserzehrung dominiert. Weiterhin sind aufstei-

gende Druckgradienten typisch und die Grundwasserfließrichtung folgt relativ sicher dem Gradient der Geländeoberfläche (gemeint sind hierbei die horizontalen Komponenten beider vektoriellen Größen). Die in der Bodenkarte als grundwasserbeeinflusst ausgewiesenen Flächen können in das großräumige Modell der Grundwasserdruckfläche integriert werden, indem aus dem mittleren Flurabstand der grundwasserbeeinflussten Horizonte und der Geländehöhe die Grundwasserstände geschätzt werden. Die Randpunkte dieser Flächen bilden weitere Stützpunkte für die Interpolation der Grundwasserdruckfläche in den Gebieten mit flurfernem Grundwasser.

In den Lockergesteinsbereichen bildet das *Fließgewässernetz* bei effluenten Verhältnissen die Vorflut für den Grundwasserabfluss. Wenn keine Information für einzelne Gewässerabschnitte bezüglich der hydraulischen Anbindung an das Grundwasser vorliegt, wird die Wirkung als Vorflut unterstellt. Für das Höhenniveau der Vorflut h_v liegen meist keine flächendeckenden Daten vor. In diesem Fall können für h_v nur Annahmen gemacht werden. Sinnvoll erscheint beispielsweise eine Annahme für das Vorflutniveau außerhalb von Flächen mit grundwasserbeeinflussten Böden von 2 m unter der Geländehöhe im Uferbereich.

Mit Hilfe der zusätzlichen Datenbestände wird das Modell der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich aus zwei Komponenten zusammengesetzt. Auf den Flächen, für die eine Grundwasserdruckfläche bereits existiert oder aus Bodenkarte und Modell der Geländehöhe abgeleitet werden kann, muss keine Interpolation erfolgen. Die Werte in diesen Bereichen des Modellrasters werden einfach mit den vorhandenen oder abgeleiteten Druckhöhen belegt. Für die unbelegten Bereiche des Modellrasters erfolgt die Interpolation auf Basis des verdichteten Stützpunktekollektivs, das in einem hierarchischen Verfahren zusammengestellt wird (Schema in Abbildung 6).

Die aus der Bodenkarte abgeleiteten Bereiche der Grundwasserdruckfläche werden gegenüber den Messwerten auf diesen Flächen bevorzugt verwendet. Mit dieser Bevorzugung werden Anomalien in Form von Absenkungsbereichen (Absenkungstrichtern) verhindert. Diese entstehen durch die Interpolation, wenn die Messwerte deutlich unter den aus der Bodenkarte abgeleiteten Werten liegen. Derartig abgesenkte Bereiche wirken sich hydraulisch als abflusslose Senken aus und behindern die Modellierung von Grundwasserfließwegen. Inwieweit im Bundesland Hessen die Messwerte mit den abgeleiteten Flurabständen in diesen Bereichen übereinstimmen wird im Abschnitt 5.4 (Validierung) diskutiert.

Die Abbildung 5 (rechts) zeigt das verdichtete Kollektiv für die Beispielregion. Die Anzahl verfügbarer Stützstellen ist deutlich sichtbar erhöht und sie sind wesentlich gleichmäßiger verteilt, so dass eine realistische großräumige Abschätzung der Grundwasserdruckfläche ermöglicht wird.

Bei der Interpolation der Grundwasserdruckfläche auf Basis des verdichteten Stützpunktekollektivs werden lokal – aufgrund weiterhin bestehender Flächen mit sehr geringer Stützpunktdichte und mit stärker strukturierter Geländeoberfläche – Bereiche erzeugt, in denen sich Grundwasserdruck- und Geländeoberfläche durchdringen, d.h. es können dort negative Flurabstände modelliert werden. Dies ist ein generelles Problem bei der automatisierten Erzeugung von Grundwasserdruckflächen (Salama, Ye et al. 1996) und lässt sich nur verhin-

dern, wenn bei der Interpolation die Geländeoberfläche als Randbedingung berücksichtigt oder die Grundwasserdruckfläche zusätzlich manuell konturiert wird.

Durchdringungen von Grundwasserdruckfläche und Geländeoberfläche sind jedoch für artesische Druckverhältnisse im Grundwasserleiter charakteristisch. Dabei muss sich der Grundwasserleiter unter einem Grundwasserhemmer befinden. Es kann dann im Einzelfall, beispielsweise auf Grundlage der räumlichen Verbreitung gering bis sehr gering durchlässiger Deckschichten sowie von hydrogeologisch stratifizierten Messwerten, entschieden werden, ob die Grundwasseroberfläche im Bereich der Durchdringungen gespannt ist. Für die Bestimmung der Tiefenlage der gespannten Grundwasseroberfläche ist zusätzlich eine Information zur Mächtigkeit der hemmenden Deckschicht notwendig.

Für die Modellierung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone wird ein Modell der Grundwasseroberfläche benötigt. In ungespannten Grundwasserleitern ist die Grundwasseroberfläche identisch mit der Grundwasserdruckfläche. In gespannten Grundwasserleitern ist sie identisch mit den Isohypsen der Liegendfläche des hangenden Grundwasserhemmers. Diese Isohypsen sind jedoch für das Bundesland Hessen nicht verfügbar.

Im letzten Arbeitsschritt müssen die negativen Flurabstände korrigiert werden, um eine Grundwasseroberfläche ohne Durchdringungen zu modellieren. Es werden dazu weitere virtuelle Stützpunkte eingeführt. Diese werden aus den Rändern der negativen Bereiche gebildet, wobei die Höhenlage der Grundwasseroberfläche geschätzt werden muss (mindestens 2 m unter Gelände). Für die eventuell als gespannt identifizierten Bereiche kann die Höhenlage der Liegendfläche des hangenden Grundwasserhemmers verwendet werden, sofern die Informationen verfügbar sind (dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich). In einer iterativen Prozedur werden dem Kollektiv solange virtuelle Stützpunkte zugeordnet und anschließend eine Interpolation durchgeführt, bis eine Grundwasseroberfläche ohne Durchdringungen mit der Geländeoberfläche erzeugt wird.

3.3 Modellierung einer Grundwasserdruckfläche für Grundwasserleiter im Festgestein

Aufbauend auf einer zusammenhängenden flächendeckenden Grundwasserdruckfläche in den Lockergesteinsbereichen (1. Stufe) wird in der 2. Stufe der Modellerstellung die Grundwasserdruckfläche in den Festgesteinsbereichen flächendifferenziert für einzelne hydrogeologische Einheiten modelliert. Aufgrund der extrem geringen mittleren Messwertdichte in den Festgesteinsgrundwasserleitern sowie der zudem ungleichmäßigen räumlichen Verteilung der Messwerte (siehe dazu Tabelle 6 und Abbildung 21 im Abschnitt 4.6), kann eine konventionelle flächendeckende Interpolation auch unter Berücksichtigung zusätzlicher Stützpunkte analog zum Lockergestein nicht sinnvoll durchgeführt werden. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde deshalb eine Methode entwickelt, die auf der Basis mittlerer hydraulischer Gradienten in einzelnen hydrogeologischen Einheiten die Interpolation eines flächendeckenden Modells der Grundwasserdruckfläche ermöglicht.

Mit dieser neu entwickelten Methode wird ebenfalls die Zielstellung verfolgt, Stützpunkte für eine klassische Interpolation der Grundwasserdruckfläche zu erzeugen. Sie stützt sich ebenfalls auf Messwerte, die für die Bestimmung von mittleren hydraulischen Gradienten benötigt werden. Das Wesen der Methode wird nachfolgend erläutert.

Am Ort eines Messwertes im Festgestein ist die Druckhöhe im Grundwasserleiter bekannt. Am Ende der Grundwasserstromlinie vom Messwert zum Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein ist ebenfalls eine Druckhöhe ermittelbar (Abbildung 7). Nach Berechnung der Entfernung des Messwertes vom Modell des Entwässerungsniveaus entlang der Grundwasserstromlinie lässt sich mit Hilfe der Gl. 3.4 ein individueller Gradient der Grundwasserdruckfläche berechnen. Aufgrund der Annahme eines hydraulisch isotropen Grundwasserleiters, müssten sich die individuellen hydraulischen Gradienten in den einzelnen hydrogeologischen Einheiten derart gleichen, dass statistisch gesicherte mittlere Gradienten aus ihnen abgeleitet werden können. Diese können genutzt werden, um ebenfalls auf Basis der folgenden Gleichung flächendeckend für eine Vielzahl weiterer Grundwasserstromlinien Druckhöhen und damit Stützpunkte für eine klassische Interpolation zu erzeugen:

$$h_p = h_{p,MEF} + l \cdot |\text{grad}h| \quad (3.4)$$

mit h_p hydraulische Druckhöhe im Modellelement des Festgesteins in m über NHN

$h_{p,MEF}$ hydraulische Druckhöhe im MEF in m über NHN

l horizontale Komponente der Entfernung zum MEF entlang der Grundwasserstromlinie in m

$|\text{grad}h|$ Betrag des hydraulischen Gradienten

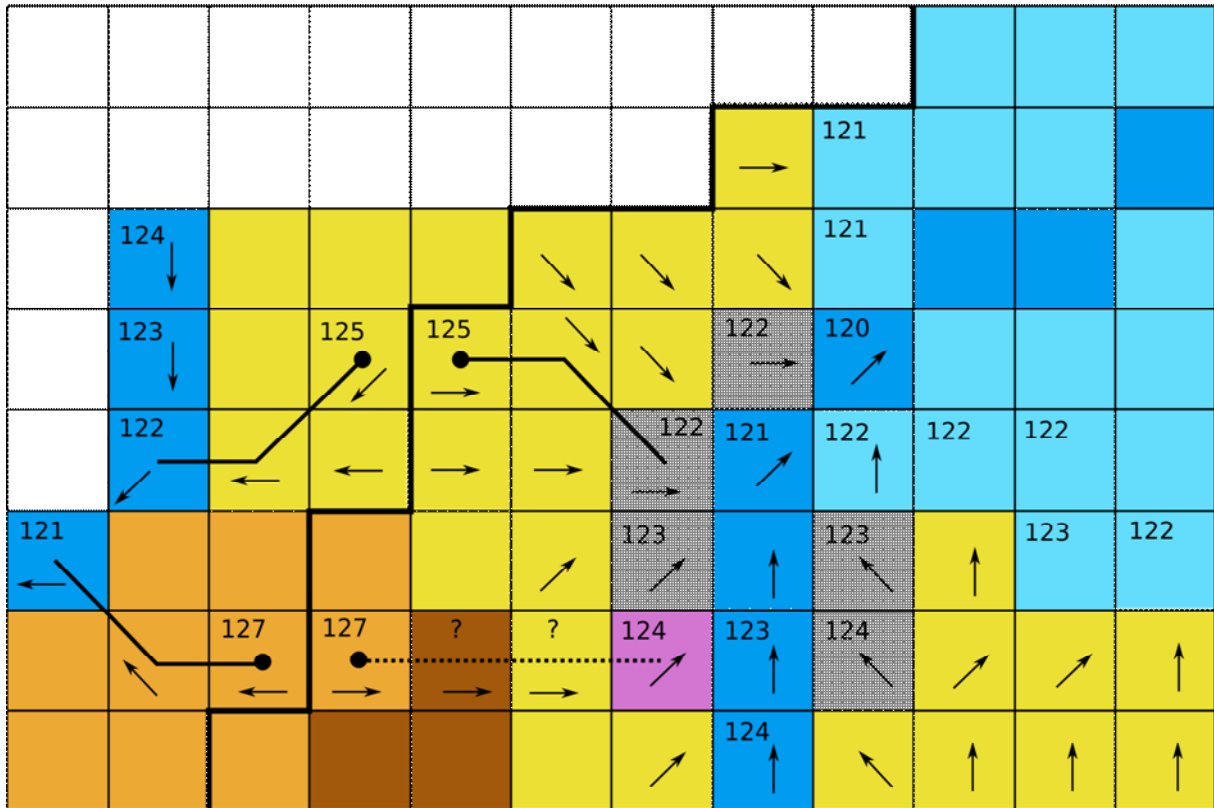


Abbildung 7: Schematisches Beispiel zur Bestimmung individueller hydraulischer Gradienten. Die Darstellung baut auf Abbildung 3 auf. In Brauntönen sind zusätzliche hydrogeologische Einheiten dargestellt. Die Punkte symbolisieren Messwerte. Für die Analyse verwendbare Grundwasserstromlinien sind als durchgezogene Linien dargestellt. Entlang der gestrichelten Linie fehlen Informationen zur Druckhöhe an den Übergängen zwischen den hydrogeologischen Einheiten.

Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methode zur Generierung einer Grundwasserdruckfläche für Festgesteinsbereiche gliedert sich in die folgenden Arbeitsschritte, diese werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert und diskutiert:

1. Erstellung eines Modells des Entwässerungsniveaus aus dem Festgesteinsbereich auf Basis der modellierten Grundwasserdruckfläche in den Lockergesteinsbereichen und der Vorflut.
2. Erstellung eines Modells der Grundwasserfließrichtung für die Ableitung der Grundwasserstromlinien.
3. Bestimmung der Länge der Grundwasserstromlinien von den Messpunkten im Festgestein zum Entwässerungsniveau auf Basis des Modells der Grundwasserfließrichtung.
4. Bestimmung der Höhendifferenzen $\Delta h = h_p - h_{p,MEF}$ zwischen gemessenen Druckhöhen (Messwerten) und den modellierten Druckhöhen am Endpunkt der Grundwasserstromlinien im Modell des Entwässerungsniveaus.
5. Statistische Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien mit Messwerten als Anfangspunkt in einzelnen hydrogeologischen Einheiten mit dem Ziel, einen mittleren Gradienten für die Einheit zu bestimmen.

6. Bestimmung der Länge der Grundwasserstromlinien für alle Maschen des Modellrasters im Festgestein.
7. Schätzung der Druckhöhen für die Maschen des Modellrasters nach GL. 3.4, abhängig von den jeweiligen (in Schritt 5 ermittelten) mittleren Gradienten der von der Grundwasserstromlinie durchquerten hydrogeologischen Einheiten.
8. Interpolation einer großräumigen Grundwasserdruckfläche auf Basis der geschätzten Druckhöhen.

3.3.1 Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgesteinsbereich

Jede Grundwasserstromlinie endet in einer Masche des Modells des Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein. Das Entwässerungsniveau umfasst alle Maschen im Lockergesteinsbereich, die aus einer Masche im Festgesteinsbereich angeströmt werden können. Dies sind beispielsweise die Entlastungsgebiete (im Sinne von Heinkele, Voigt et al. 2002), ebenso wie die Gebiete mit einem tiefliegenden Grundwasserübertritt vom Fest- in den Lockergesteinsbereich, wie er für die Grenze zwischen Odenwald-Kristallin und den känozoischen Ablagerungen des Oberrheingrabens typisch ist. Für diese Maschen wurde bereits in der ersten Stufe der Modellentwicklung eine Druckhöhe ermittelt (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Des Weiteren umfasst das Modell des Entwässerungsniveaus die Maschen im Festgesteinsbereich, in denen sich ein Fließgewässer befindet. Für diese Maschen des Modellrasters wird das Vorflutniveau analog zum Lockergesteinsbereich geschätzt. Hier erscheint ebenfalls ein Niveau von 2 m unter der Höhenangabe im digitalen Modell der Geländehöhe (DHM) im Uferbereich als angemessen. Im Rahmen einer fortschreitenden Präzisierung des Modells kann diese Höhenangabe auf Basis einer verbesserten Datenlage (beispielsweise konkreter Pegelstände) angepasst werden.

Am Anfang eines jeden Fließgewässers befindet sich natürlicherweise eine Quelle. Die Quelle ist damit Teil des Modells des Entwässerungsniveaus. In den für diese Arbeit vorhandenen Datengrundlagen – Gewässernetz und Messwerte des Datenbestandes GWSTANDHESS – existieren jedoch teilweise beträchtliche Diskrepanzen zwischen den Koordinaten der Quellen und dem Beginn der zugehörigen Fließgewässer, sowie zwischen den Höhenangaben im DHM und den gemessenen Austrittswasserspiegeln der Quellen. Im Bereich solcher Diskrepanzen führt die Methode zu unrealistischen Artefakten in der Grundwasserdruckfläche. Des Weiteren werden durch Quellen teilweise schwebende räumlich eng begrenzte Grundwasservorkommen entwässert. Zum Teil fallen solche Quellen trocken, wenn für längere Zeit kein Grundwasser in diesen Bereichen neu gebildet wird. Die Grundwasserdruckfläche der eng begrenzten schwebenden Grundwasservorkommen ist nicht Ziel der Modellierung. Aus den genannten Gründen wurden die Quellen im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen nicht als weitere Maschen in das Modell des Entwässerungsniveaus eingefügt. In Bereichen ohne die erwähnten Diskrepanzen führt dies zu keiner Veränderung der modellierten Druckfläche.

3.3.2 Modell der Grundwasserfließrichtung im Festgesteinsbereich

Für die Bestimmung von Grundwasserstromlinien muss die Grundwasserfließrichtung flächendeckend bekannt sein. Zur Bestimmung der Fließrichtung des Grundwassers (*Fließrichtungsmodell* FRM) wird normalerweise ein Grundwassergleichenplan verwendet, der jedoch erst am Ende aller Arbeitsschritte aus dem Rastermodell der Grundwasserdruckfläche abgeleitet werden kann.

Lokal kann die Richtung der Grundwasserbewegung beispielsweise durch Tracerversuche nachvollzogen werden. Diese Techniken haben jedoch eine begrenzte Aussagekraft und Ergebnisse sind nicht flächendeckend verfügbar. Des Weiteren kann regional auf Basis strukturgeologischer Überlegungen und hydrogeologischen Modellvorstellungen in Kombination mit lokal vorhandenen Messwerten auf die ungefähre Bewegungsrichtung des Grundwassers geschlossen werden. Matthess (1970) hat auf diese Weise beispielsweise die Grundwasserbewegung in den hessischen Buntsandsteingebieten abgeleitet. Flächendeckend sind jedoch auch diese Ergebnisse nicht in einer digitalen Form verfügbar, in der sie im Rahmen eines stark automatisierten Verfahrens verarbeitet werden könnten.

Weil für den größten Teil des Festgesteinsbereiches im Modellgebiet keine aus Messungen, Beobachtungen oder Schlussfolgerungen gewonnene Information zur grundlegenden Geometrie der Druckfläche vorhanden ist, aus der ein Modell der Fließrichtung aufgebaut werden könnte, wird dieses aus dem DHM abgeleitet. Dabei wird angenommen, dass die Grundwasserfließrichtung in einer Masche identisch ist mit der Richtung des steilsten Gefälles auf der Geländeoberfläche. Die dazu durchzuführende topologische Analyse des DHM erfolgt mit einer Routine eines handelsüblichen GIS-System in Anlehnung an die Methoden von Garbrecht & Campell (1997). Die Fließrichtungen werden in Richtung der acht Nachbarn einer Masche abgeleitet: Ost (90°), Südost (135°), Süd (180°), Südwest (225°), West (270°), Nordwest (315°), Nord (360°), Nordost (45°). Die Abbildung 8 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt des Fließrichtungsmodells im Bereich des Odenwald-Kristallins.

Durch die Ableitung des Fließrichtungsmodells aus dem Geländemodell wird flächendeckend die Fließrichtung des Grundwassers mit der Fließrichtung des Oberflächenabflusses gleichgesetzt. Dies impliziert, dass ober- und unterirdische Einzugsgebietsgrenzen identisch sind. In der Realität ist dies jedoch nicht immer der Fall. Die Einzugsgebietsgrenzen können sich in Abhängigkeit vom geologischen Bau unterscheiden. Auf die daraus folgenden Konsequenzen für die modellierte Grundwasserdruckfläche wird im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse (Kapitel 6) näher eingegangen.

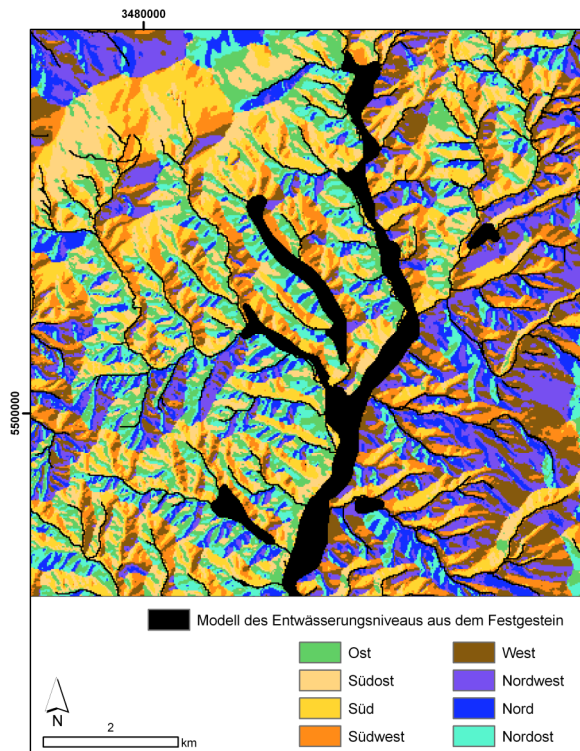


Abbildung 8: Typische Verteilung der Fließrichtung des Grundwassers, abgeleitet durch eine topologische Analyse des digitalen Modells der Geländehöhe. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Fließrichtungsmodells im Bereich des Odenwald-Kristallins.

3.3.3 Bestimmung der Entfernungen zum Modell des Entwässerungsniveaus

Die Berechnung von Entfernungen zwischen einzelnen Maschen im Festgesteinsbereich und dem Modell des Entwässerungsniveaus (Länge der Grundwasserstromlinien) gestaltet sich aufgrund des äquidistanten Modellrasters relativ einfach. Kunkel & Wendland (1999) berechnen mit einem sehr ähnlichen Verfahren die Fließstrecken des Grundwassers. Auch sie gehen davon aus, dass in der betrachteten Skala im Vertikalprofil die Grundwasserstromlinien als parallel zur Grundwasserdruckfläche verlaufend angenähert werden können.

Für die Bestimmung der Entfernung l_{ij} einer beliebigen Masche des Modellrasters (mit den Indizes i und j) zum Modell des Entwässerungsniveaus werden immer der Fließrichtung (Winkel β) folgend die Wegelemente $w_m(\beta)$ zwischen den Mittelpunkten der durchquerten Maschen addiert (Gl. 3.5). Der Index m läuft dabei von der Startmasche $m=1$ bis zur Zielmasche n im Modell des Entwässerungsniveaus. Die Länge der Wegelemente ist abhängig von der Fließrichtung β zur entsprechenden Nachbarmasche, und wird für die quadratischen Maschen mit der Maschenweite R durch Gl. 3.6 berechnet.

$$l_{ij} = \sum_{m=1}^n w_m(\beta) \quad (3.5)$$

$$w_m(\beta) = \begin{cases} R & \text{für } \beta = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ \\ \sqrt{2}R & \text{für } \beta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ \end{cases} \quad (3.6)$$

3.3.4 Bestimmung mittlerer hydraulischer Gradienten im Festgesteinsbereich

In den Festgesteinsgrundwasserleitern Hessens ist die Dichte der Messwerte teilweise extrem gering. Um flächendeckend für die Grundwasserstromlinien, die von jeder einzelnen Masche auf Basis des Modells der Grundwasserfließrichtung bestimmt und deren Längen mit Hilfe der Gl. 3.5 berechnet werden, eine Druckhöhe auf Basis der Gl. 3.4 zu ermitteln, müssen die mittleren hydraulischen Gradienten für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten bekannt sein.

Die Schätzung der für eine hydrogeologische Einheit charakteristischen mittleren Gradienten erfolgt auf Basis der Analyse individueller Grundwasserstromlinien, für die jeweils Messwerte verfügbar sind. Dabei gewonnene individuelle Gradienten werden als Stichproben der real in der Fläche variierenden Gradienten der Grundwasserdruckfläche in einer Einheit aufgefasst. Die Entfernungen der Messwerte vom Entwässerungsniveau und die Druckhöhendifferenzen $\Delta h = h_p - h_{p,MEF}$ aller individuellen Grundwasserstromlinien einer Einheit werden dabei funktional zueinander in Beziehung gesetzt. Dazu wird mit der *Methode der kleinsten Fehlerquadrate* eine Regressionsgerade angepasst. Der Anstieg dieser Geraden entspricht dem mittleren empirisch gewonnenen hydraulischen Gradienten $grad h_{emp}$ einer hydrogeologischen Einheit.

Die Abbildung 9, sie wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert, zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die hydrogeologische Einheit *Tertiäre basaltische Vulkanite - Basalt der Niederhessen Senke*. Diese Diagramme werden im Rahmen der Analyse für alle hydrogeologischen Einheiten automatisiert erstellt. Dargestellt sind für die individuellen Grundwasserstromlinien (Messwerte) auf der Abszisse die Entfernungen vom Entwässerungsniveau und auf der rechten Ordinate die zugehörigen Druckhöhendifferenzen Δh . Die Regressionsgerade wird mit der hydraulisch sinnvollen Randbedingung berechnet, dass sie den Koordinatenursprung schneidet. Als Maß für die Stärke des linearen Zusammenhangs ist der SPEARMAN-Rangkorrelationskoeffizient ρ (Spearman's Rho) angegeben (Berechnungsverfahren in Sachs & Hedderich 2009). Spearman's Rho ist normiert, dass heißt $-1 \leq \rho \leq +1$. Je geringer die Differenz zu 1, umso stärker ist der lineare Zusammenhang, umso realistischer sind die generellen Annahmen, das Modell der Fließrichtung und die Druckhöhen im Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein, auf denen die Analyse individueller Grundwasserstromlinien basiert. Als Maß für die mittlere Abweichung von der Regressionsgeraden ist das Residuum e angegeben. Je größer das Residuum, desto größer ist der Bereich, in der sich die reale Grundwasserdruckfläche wahrscheinlich befinden wird.

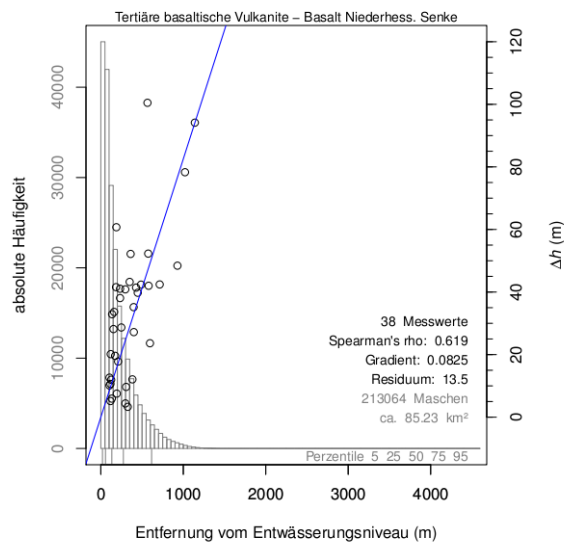


Abbildung 9: Ergebnis der Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien einer Beispielseinheit im Festgesteinsbereich.

In der Abbildung 9 ist zusätzlich ein Histogramm über der Abszisse hinterlegt. Es zeigt für die hydrogeologische Einheit die Verteilung der Entfernungen aller Maschen zum Modell des Entwässerungsniveaus, wobei nur die Grundwasserstromlinien ausgewertet werden, die keine weiteren Festgesteinseinheiten durchqueren. An der linken Ordinate kann abgelesen werden, dass sich ca. 45 000 Maschen (ca. 20 % der Fläche der Einheit, entspricht ca. 18 km²) weniger als 50 m vom Entwässerungsniveau entfernt befinden. Die Verteilung erlaubt eine Bewertung, inwieweit durch die Messwerte die verschiedenen Entfernungsbereiche (geringe, mittlere und große Entfernung zum Entwässerungsniveau) abgedeckt werden. Im Beispiel liegt eine relativ gleichmäßige Verteilung der Messwerte in den Entfernungsbereichen vor. Der Median der Verteilung beträgt ca. 150 m. Das heißt, die Hälfte aller Fließwege der einzelnen Maschen ist länger als 150 m. Der größte Teil der Messwerte liegt im Bereich zwischen dem Median und dem 95. Perzentil. Die Messwerte decken demzufolge sehr gut den Bereich mit den längeren Fließwegen von den Einzelmaschen bis zum Modell des Entwässerungsniveaus ab. Die aus der im Histogramm abgebildeten Verteilung berechnete Fläche ist kleiner als die gesamte Fläche des Vorkommens einer hydrogeologischen Einheit (vgl. dazu Tabelle 11).

Die Berücksichtigung einer individuellen Grundwasserstromlinie und ihrer Druckhöhendifferenz in der Regressionsanalyse ist abhängig von drei Kriterien:

- die Grundwasserstromlinie darf im Festgesteinsbereich keine Grenzen zwischen zwei hydrogeologischen Einheiten queren,
- die Entfernung zum Modell des Entwässerungsniveaus muss mindestens 100 m betragen und
- die Druckhöhendifferenz muss positiv sein.

Quert eine Grundwasserstromlinie im Festgesteinsbereich eine Grenze zwischen zwei hydrogeologischen Einheiten, so muss von einem Übergang zwischen zwei Bereichen unterschiedlicher hydraulischer Durchlässigkeit ausgegangen werden. Für die Berechnung der individuellen Gradienten wird an der Übergangsstelle eine Druckhöhe benötigt, welche jedoch nicht verfügbar ist.

Die hydraulischen Verhältnisse im Übergangsbereich zwischen Locker- und Festgestein sind für die Bestimmung der mittleren Gradienten von eher untergeordnetem Interesse. Für die Ermittlung signifikanter Zusammenhänge ist eine relativ gleichmäßige Verteilung der Messwerte in allen Entfernungsbereichen zum Modell des Entwässerungsniveaus wichtig. Gerade im Abstand von 100 m sind im Vergleich zu den mittleren Entfernungen relativ viele Messwerte vorhanden. Sie bilden jedoch häufig nicht die Verhältnisse im eigentlichen Grundwasserleiter ab. Des Weiteren machen sich die Unsicherheiten aus der begrenzten Genauigkeit des DHM sowie der Grenzziehung zwischen Locker- und Festgestein in diesem Bereich deutlich bemerkbar.

Wird eine signifikante Anzahl individueller Grundwasserstromlinien aufgrund der Nichterfüllung des letzten Kriteriums ausgeschlossen, so ist das ein deutliches Indiz dafür, dass im Bereich dieser einzelnen hydrogeologischen Einheit die Annahmen für die Erstellung des Fließrichtungsmodells nicht realistisch sind oder das Modell des Entwässerungsniveaus lokal sehr unpräzise ist.

3.3.5 Flächendeckende Ableitung der Druckhöhen und Interpolation einer glatten Grundwasserdruckfläche

Nachdem in den Festgesteinsbereichen Hessens für jede Masche des Modelrasters die Grundwasserstromlinien und für alle hydrogeologischen Einheiten auf empirische Weise mittlere hydraulische Gradienten abgeleitet wurden, können mit Gl 3.4 flächendeckend Grundwasserstände berechnet werden. Aufgrund der in den vorhergehenden Abschnitten erläuterten Unsicherheiten in den Datengrundlagen und den generellen Annahmen hinsichtlich der Fließrichtung des Grundwassers wird jedoch häufig keine glatte Grundwasserdruckfläche erzeugt. Die Abbildung 10 zeigt ein prototypisches Beispiel für eine Ableitung der Druckhöhen im nördlichen Teil des Odenwald-Kristallins. Deutlich sichtbar sind die lokal sehr eng aneinander liegenden Isohypsen. Sie sind ein Indiz dafür, dass oberirdische und unterirdische Einzugsgebietsgrenzen nicht exakt gleich sind.

Außerdem können lokal Durchdringungen von modellierter Grundwasserdruckfläche und Geländeoberfläche erzeugt werden. Diese Durchdringungen können zwei verschiedene Ursachen haben:

- In der Realität ist das Grundwasser gespannt und das Druckniveau liegt wirklich oberhalb der Geländeoberfläche. Ein Brunnen in diesem Bereich wäre artesisch.
- Das Grundwasser ist nicht gespannt. Grund für die Durchdringungen sind Unsicherheiten die aus der begrenzten Genauigkeit der Datengrundlagen und den Annahmen zur Grundwasserfließrichtung resultieren.

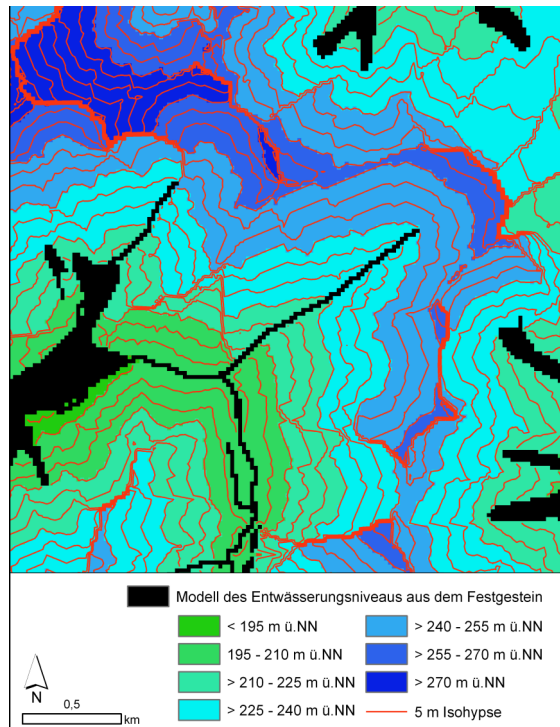


Abbildung 10: Beispiel für die Schätzung von Grundwasserdruckhöhen auf Basis des Modells der Grundwasserfließrichtung und der mittleren hydraulischen Gradienten. Das Beispiel stammt aus dem nördlichen Teil des Odenwald-Kristallins.

Bei der Berechnung eines Modells des Grundwasserflurabstandes aus der im Schritt 7 ermittelten Druckfläche und dem DHM, werden im Bereich der Durchdringungen negative Flurabstände resultieren. Es lässt sich jedoch nur durch eine Vielzahl von Einzelfalluntersuchungen (die nicht Thema dieser Arbeit sind) klären, ob es sich lokal um eine gespannte Grundwasseroberfläche handelt oder ob die Unsicherheiten für die Durchdringungen verantwortlich sind. Der folgende Arbeitsschritt zum Glätten der Druckfläche und zur Verhinderung von Durchdringungen durch Setzen weiterer Randbedingungen dient auch dem Maskieren der Unsicherheiten. Wenn die Möglichkeit besteht, die Datengrundlagen zu verbessern, sollte dies jedoch einer Maskierung der Unsicherheiten vorgezogen werden.

An dieser Stelle muss entschieden werden, ob eine nur leicht geglättete oder eine sehr glatte Grundwasserdruckfläche erzeugt werden soll (beispielsweise für die Darstellung in Grundwassergleichenplänen, Abbildung 11). Für beide Varianten muss auf Basis der Ergebnisse des Arbeitsschrittes 7 nochmals interpoliert werden. Dazu wird ein neues Raster mit einer 10-fach größeren Maschenweite erzeugt. Die Druckhöhen dieses Rastermodells werden durch Mittelwertbildung aus allen im Arbeitsschritt 7 berechneten und räumlich zu der vergrößerten Masche gehörenden Druckhöhen ermittelt.

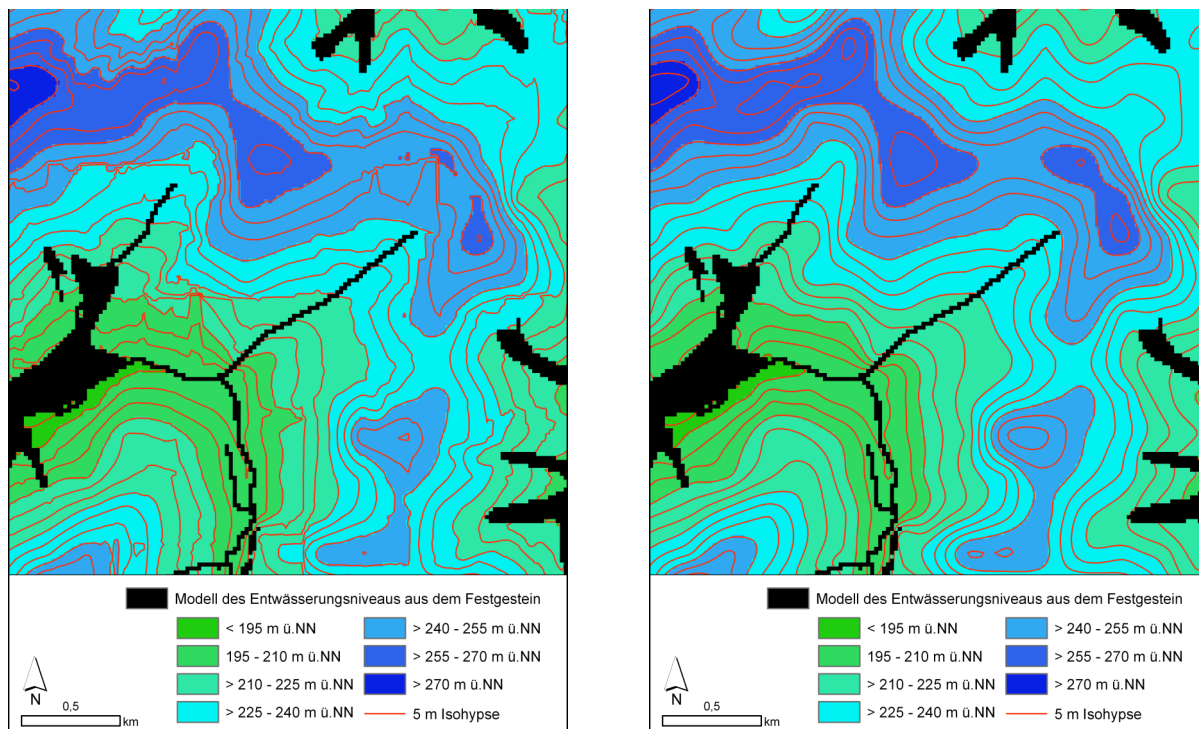


Abbildung 11: Beispiel für eine mit Ordinary Kriging leicht geglättete Grundwasserdruckfläche (links) und ihr Aussehen nach der Interpolation mit Minimum Curvature (rechts). Das Beispiel stammt aus dem nördlichen Teil des Odenwald-Kristallins.

Die Mittelpunkte der vergrößerten Maschen und die Mittelpunkte der Maschen des Modelles des Entwässerungsniveaus dienen mit ihren Druckhöhen als Stützpunkte für die Interpolation. Im Bereich der Durchdringungen muss der Flurabstand größer als 2 m sein. Es wird davon ausgegangen, dass sonst ein Flurabstand aus der Bodenkarte ableitbar wäre. Deshalb werden die Grundwasserstände an den Stützpunkten in den betroffenen Gebieten auf 3 m unter Gelände gesetzt.

Für eine sehr glatte Druckfläche erfolgt die Interpolation auf das hoch aufgelöste Ursprungsraster mit dem *Minimum Curvature* Verfahren nach Briggs (1974) und Schmith & Wessel (1990). *Minimum Curvature* erzeugt die glattest mögliche Fläche, wobei mit einem Genauigkeitsparameter eingestellt wird, wie exakt die Daten berücksichtigt werden. Gegebenenfalls muss die Interpolation mehrfach mit neu angepassten Stützpunkten erfolgen, weil durch die Glättung erneut Durchdringungen erzeugt werden können. Das Ergebnis ist für eine Beispielregion in Abbildung 11 (rechts) zu sehen.

Bei der Interpolation mit *Ordinary Kriging* (lineares Semivarianz-Modell und Suchradius kleiner als 500 m) entsteht eine nur leicht geglättete Druckfläche ähnliche der Abbildung 11 (links). Sie entspricht noch eher den auf Basis der Datengrundlagen bei einer konsequenten Umsetzung der Methode realisierbaren Modellergebnissen. Im Rahmen der Erstanwendung der Methodik auf das Bundesland Hessen wurde die Druckfläche mit *Ordinary Kriging* geglättet. Die Ergebnisse werden im Abschnitt 5.2.2 präsentiert.

3.4 Rechentechnische Umsetzung

In den Abschnitten zur Beschreibung der Methode für die großräumige flächendeckende Modellierung der Grundwasserdruckfläche in den oberen Grundwasserleitern Hessens sind die wesentlichen Arbeitsschritte bereits ausführlich erläutert worden. Für die Umsetzung der beschriebenen Verfahrensweise ist eine Kollektion verschiedener Software notwendig, die teilweise als Standardsoftware im geowissenschaftlichen Bereich eine weite Verbreitung gefunden hat. Einige wesentliche Arbeitsschritte sind jedoch mit dieser Standardsoftware nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit mehrere eigene Rechenprogramme für die Bearbeitung essenzieller Modellierungsschritte konzipiert und programmiert. Die Abbildung 12 gibt als vereinfachtes Ablaufschema einen Überblick über die für einzelne Arbeitsschritte verwendete Software sowie zu den jeweils eingehenden Datengrundlagen und Zwischenergebnissen. In Tabelle 1 und Tabelle 2 ist zum Überblick die verwendete Software aufgelistet.

Tabelle 1: Für die Erstellung des Modells verwendete kommerzielle Software.

Software	Verwendung
Relationale Datenbank	Speicherung und Aufbereitung von Datengrundlagen und Modellergebnissen
<i>ArcInfo</i>	Aufbereitung und Visualisierung von Datengrundlagen und Modellergebnissen
<i>Spatial Analyst Toolbox</i>	Rasterberechnungen
<i>Surfer 8</i>	Räumliche Strukturanalyse und Interpolationen im Locker- und Festgesteinsbereich
<i>GOCAD</i>	Datenaufbereitung

Die Geodaten liegen als Punktwerte (z.B. die Messwerte zum Grundwasserstand), als Flächeninformation in Form von Polygonen (z.B. die Bodenkarte und die Hydrogeologische Karte) oder als Datenraster (z.B. das digitale Modell der Geländehöhe) vor. Die Aufbereitung und Visualisierung der umfangreichen Datengrundlagen und Zwischenergebnisse der Modellierung erfolgte mit der handelsüblichen GIS-Software *ArcInfo*. Die Daten wurden in einer relationalen Datenbank, sowie in sogenannten Shape- und Grid-Files gespeichert. *ArcInfo* verfügt über zusätzliche Werkzeuge in Form der *Spatial Analyst Toolbox*, die eine umfassende rasterbasierende räumliche Modellierung und Analyse ermöglicht. Mit Hilfe mehrerer Rechenroutinen der *Spatial Analyst Toolbox* wurde beispielsweise das Modell der Grundwasserfließrichtung erstellt. Der Datenaustausch mit den anderen verwendeten Programmen erfolgte über einfache Text- oder Rasterdateien im ASCII-Format.

Für die räumliche Strukturanalyse (Variogramm-Analyse) und die Interpolation der Grundwasserdruckhöhen wurde die 3D-Modellierungssoftware *Surfer 8* verwendet. Es handelt sich dabei um eine Sammlung von Rechenroutinen, integriert in eine grafische Benutzerumgebung, speziell für die Modellierung von Oberflächen und die Regionalisierung diverser Daten im geowissenschaftlichen Bereich. Mit *Surfer 8* können Rastermodelle mit bis zu 12000 mal 12000 Maschen erzeugt werden.

Im Rahmen der Datenaufbereitung wurden zwei Routinen des für die Erzeugung 3-dimensionaler Modelle in der Geologie weit verbreiteten Softwarepakets *GOCAD* (Geological Object Computer Aided Design, Mallet 1992) verwendet. *GOCAD* erlaubt mit den Routinen *Filter Small Segments* und *Densify Segments* eine Homogenisierung der Abstände zwischen den Stützpunkten von Polylinien, zum Beispiel im Fall des Gewässernetzes.

Die für die Methode wesentlichen Arbeitsschritte zur Modellierung der Grundwasserstromlinien auf Basis des Fließrichtungsmodells, zur Berechnung der Druckhöhendifferenzen zwischen Messwerten und dem Modell des Entwässerungsniveaus sowie zur Schätzung der Grundwasserdruckfläche unter Verwendung mittlerer hydraulischer Gradienten können in der Form nicht mit den in Standardsoftware bereitstehenden Routinen realisiert werden. Aus diesem Grund wurden die spezialisierten Rechenroutinen *gweg* und *grogoff* konzipiert und programmiert (Tabelle 2). Sie sind in der Programmiersprache *Java* geschrieben und können somit plattformunabhängig verwendet werden.

Die Ausführung der beiden spezialisierten Routinen wird von einem Frontend mittels einer XML-basierten Sprache gesteuert. Das Frontend interpretiert die in der XML-basierten Sprache vorgegebenen Anweisungen zur Abarbeitung einzelner Routinen, sowie zu den dafür zu verwendenden Input-Dateien, Variablen und Output-Dateien, und verteilt sie auf die Routinen. Damit wird eine automatisierte und durch eine XML-Datei steuerbare Abarbeitung einzelner Modellierungsschritte ermöglicht.

Die Automatisierung und Gliederung in einzelne spezialisierte Routinen ist aufgrund des Datenvolumens notwendig. Ein grid-file mit Informationen zur Grundwasserfließrichtung im ganzen Modellgebiet benötigt beispielsweise ca. 600 Megabyte Hauptspeicher. Einer Modellierung mit handelsüblicher PC-Technik sind deshalb Grenzen gesetzt. Das realisierte Konzept erlaubt nun neben der sequenziellen Abarbeitung der Modellierungsschritte eine Zerlegung des Modellgebietes in vorgegebene Teilgebiete, die Steuerung der Berechnung in den Teilgebieten, die Speicherung von Zwischenergebnissen auf der Festplatte und das automatisierte Zusammensetzen der Ergebnisse in den Teilgebieten.

Mit dem Frontend lässt sich ebenfalls die Ausführung weiterer Routinen steuern, die im Rahmen der Entwicklungsarbeiten zur Vereinfachung der Umsetzung einzelner Arbeitsschritte programmiert wurden. Genannt sei an dieser Stelle die Routine *hmerge* zur hierarchischen Zusammenstellung der Stützpunkte. Des Weiteren wurde die Routine *huffstat* programmiert, sie ermittelt die Maschen im Bereich einer hydrogeologischen Einheit mit auswertbaren Grundwasserstromlinien. Die Ergebnisse der Routine *huffstat* werden für die Darstellung der Verteilung auswertbarer Fließwege im Histogramm der Abbildung 9 benötigt.

Die Bestimmung der mittleren hydraulischen Gradienten in den hydrogeologischen Einheiten des Festgesteinsbereiches und die Abbildung der Analyseergebnisse (vgl. Abbildung 9) wurden mit dem selbst entwickelten Programm *mgradient* realisiert. Dieses ist in *R* geschrieben, einer Sprache und Umgebung für statistische Berechnungen und Generierung von Grafiken (Venables & Smith 2009). *R* ermöglicht die Entwicklung eigener Programme zur statistischen Analyse und Darstellung sehr umfangreicher Daten und stellt dafür grundlegende Funktionen zur explorativen Datenanalyse, zur statistischen Modellbildung, etc. bereit.

Tabelle 2: Für die Erstellung des Modells verwendete selbst entwickelte Software.

Routine	Programmiersprache	Verwendung
<i>hmerge</i>	<i>Java</i>	Hierarchische Zusammenstellung von Stützpunkten
<i>gweg</i>	<i>Java</i>	Berechnung individueller Grundwasserstromlinien und Höhendifferenzen zwischen Messwerten und Entwässerungsniveau
<i>grogoff</i>	<i>Java</i>	Berechnung individueller Grundwasserstromlinien und Druckhöhen für alle Maschen des Modellrasters
<i>huf1stat</i>	<i>Java</i>	Ermittlung aller auswertbaren Grundwasserstromlinien
<i>mgradient</i>	<i>R</i>	Bestimmung mittlerer hydraulischer Gradienten

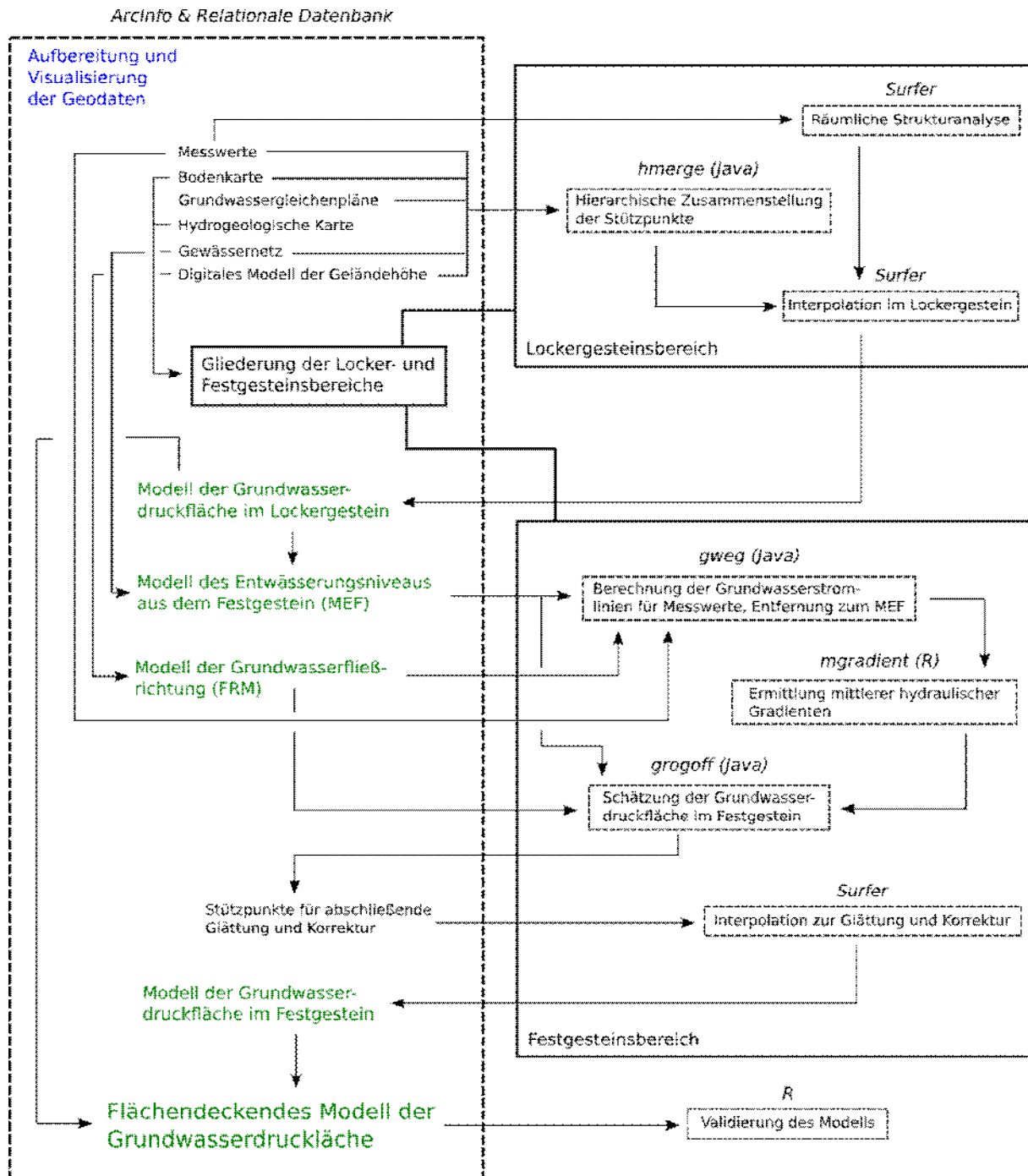


Abbildung 12: Vereinfachtes Schema der Arbeitsschritte zur Modellierung einer großräumigen flächendeckenden Grundwasserdruckfläche. Die für Arbeitsschritte, Datenhaltung und Datenaufbereitung verwendete Software ist über den gestrichelten Rahmen angegeben. Die Pfeile kennzeichnen die in die jeweiligen Arbeitsschritte eingehenden Datengrundlagen und Zwischenergebnisse. Die durchgängigen dicken Linien umrahmen jeweils die Arbeitsschritte im Locker- und Festgesteinsbereich.

4. Datengrundlagen und Datenaufbereitung

Die für die Modellerstellung verwendeten Datengrundlagen liegen in unterschiedlichen Raster- und Vektorformaten vor. Für die Schätzung der flächendeckenden Grundwasserdruckfläche muss aus den Datengrundlagen die für die einzelnen Modellierungsschritte benötigte Information abgeleitet und in kongruente Rastermodelle mit identischer Orientierung und Lage des Ursprungs überführt werden. Diese Datenraster sind auf den dritten Meridianstreifen des Gauß-Krüger-Koordinatensystems (Bessel-Ellipsoid) georeferenziert. Der Koordinatenursprung und die räumliche Auflösung von 20 mal 20 m großen äquidistanten Maschen wurden vom digitalen Geländemodell übernommen (siehe Abschnitt 4.2). In Tabelle 3 sind die für die Modellierung verwendeten Datengrundlagen aufgelistet.

Tabelle 3: Für die Erstellung des Modells der Grundwasserdruckfläche verwendete Datengrundlagen.

Datengrundlage	Quelle
Digitales Geländemodell	DHMC 20 (HLUG)
Stratigraphische und petrographische Daten	Geologische Übersichtskarte GÜK 300, Maßstab 1:300000 (HLUG)
Hohlraumart, Hydrogeologische Gesteinseinheiten, Deckschichten, Durchlässigkeitsklassen	Hydrogeologische Übersichtskarte HÜK~200, Maßstab 1:200000 (HLUG)
Bestehende Grundwassergleichenpläne	HLUG-Daten
Grundnässestufen	Hessische Bodenkarte BFD 50, 1:50000 (HLUG)
Messwerte zum Grundwasserstand	Datenbank der Grundwasserstände in Hessen <i>GWSTANDHESS</i> (HLUG)
Gewässernetz	ATKIS DLM 25, HLUG-Daten
Stehende Oberflächengewässer	CORINE Land Cover (Umweltbundesamt)
Grundwasserkörper und Einzugsgebiete	HLUG-Daten

In den folgenden Abschnitten werden die Datengrundlagen beschrieben, die für die Erstellung eines digitalen flächendeckenden Modells der Grundwasserdruckfläche zur Verfügung standen. Darüber hinaus werden die einzelnen Aufbereitungsschritte erläutert, die für die Verwendung als Modellinput notwendig waren.

4.1 Oberflächengewässer

Das Vorflutniveau der Oberflächengewässer wird in beiden Stufen der Modellerstellung benötigt. Im Lockergesteinsbereich wird das Vorflutniveau für die Verdichtung des Messwertekollektivs eingesetzt, um bei der Interpolation eine hydraulisch plausible Anbindung der Grundwasserdruckfläche an die Vorflut zu realisieren. Im Festgesteinsbereich ist das Vorflutniveau ein Teil des Modells des Entwässerungsniveaus. Die Abbildung 13 zeigt das Gewässernetz und die wichtigen stehenden Oberflächengewässer in Hessen.

Datenbasis für die Fließgewässer ist das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS). Im ATKIS ist das hessische Gewässernetz landesweit digital in Form von Polylinien mit zugehörigen Attributen erfasst. Der ATKIS-Datensatz mit flächendeckenden Informationen zu den Fließgewässern wurde vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie für diese Arbeit bereitgestellt. Die stehenden Oberflächengewässer stammen aus dem CORINE-Landnutzungs-Datensatz des Umweltbundesamtes.

Das Gewässernetz nimmt als Vorflut das Grundwasser auf (effluente Abflussverhältnisse) oder gibt Oberflächenwasser in die Grundwasserleiter ab (influente Abflussverhältnisse). Lokal kann jedoch die Situation bestehen, dass ein Gewässer mit dem Grundwasser nicht hydraulisch verbunden ist. Beispielsweise ist für die Übergangsbereiche zwischen den verschiedenen hydrogeologischen Zonen des Vogelsberges ein teilweise kleinräumiger Wechsel von influenten und effluenten Verhältnissen typisch (Fritsche, Hemfler et al. 2003). Auch die stehenden Oberflächengewässer sind meist hydraulisch an das Grundwasser angebunden. Detaillierte Kenntnisse zu den Interaktionen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasserleitern existieren nur sehr selten und sind deshalb im ATKIS-Datensatz auch nicht enthalten. Im Rahmen dieser Arbeit werden pauschal effluente Verhältnisse unterstellt. Im Lockergesteinsbereich können jedoch an einzelnen Gewässerabschnitten influente Verhältnisse resultieren, wenn entsprechende Messwerte in Vorflutnähe geringere Druckhöhen als das Vorflutniveau aufweisen.

Im Rahmen der Aufbereitung des Gewässernetzes als zusätzliche Informationsquelle für die Interpolation im Lockergestein, muss die Dichte der Stützstellen in den Vektordaten vereinheitlicht werden. Die Stützpunkte der Polylinien werden dazu stellenweise ausgedünnt, stellenweise jedoch verdichtet, sodass letztendlich ein mittlerer Punktabstand von ca. 100 m resultiert. Damit wird sowohl eine relativ gleichmäßige Verteilung der Gewässerstützpunkte erreicht, als auch eine lokal starke Verdichtung, verursacht durch die teilweise sehr detaillierte Abbildung kleiner Gewässerläufe, vermieden. Für die beschriebene Homogenisierung der Stützpunktabstände wurde eine GOCAD-Rechenroutine (vgl. Abschnitt 3.4) verwendet.

Im Festgesteinsbereich wurde die Lageinformation aus den Vektordaten der ATKIS-Oberflächengewässer, die einen Teil des Modells des Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein bilden, direkt in das Modellraster mit dem berechneten Vorflutniveau als Wert überführt (Geländehöhe minus 2 m; vgl. Abschnitt 3.3.1).

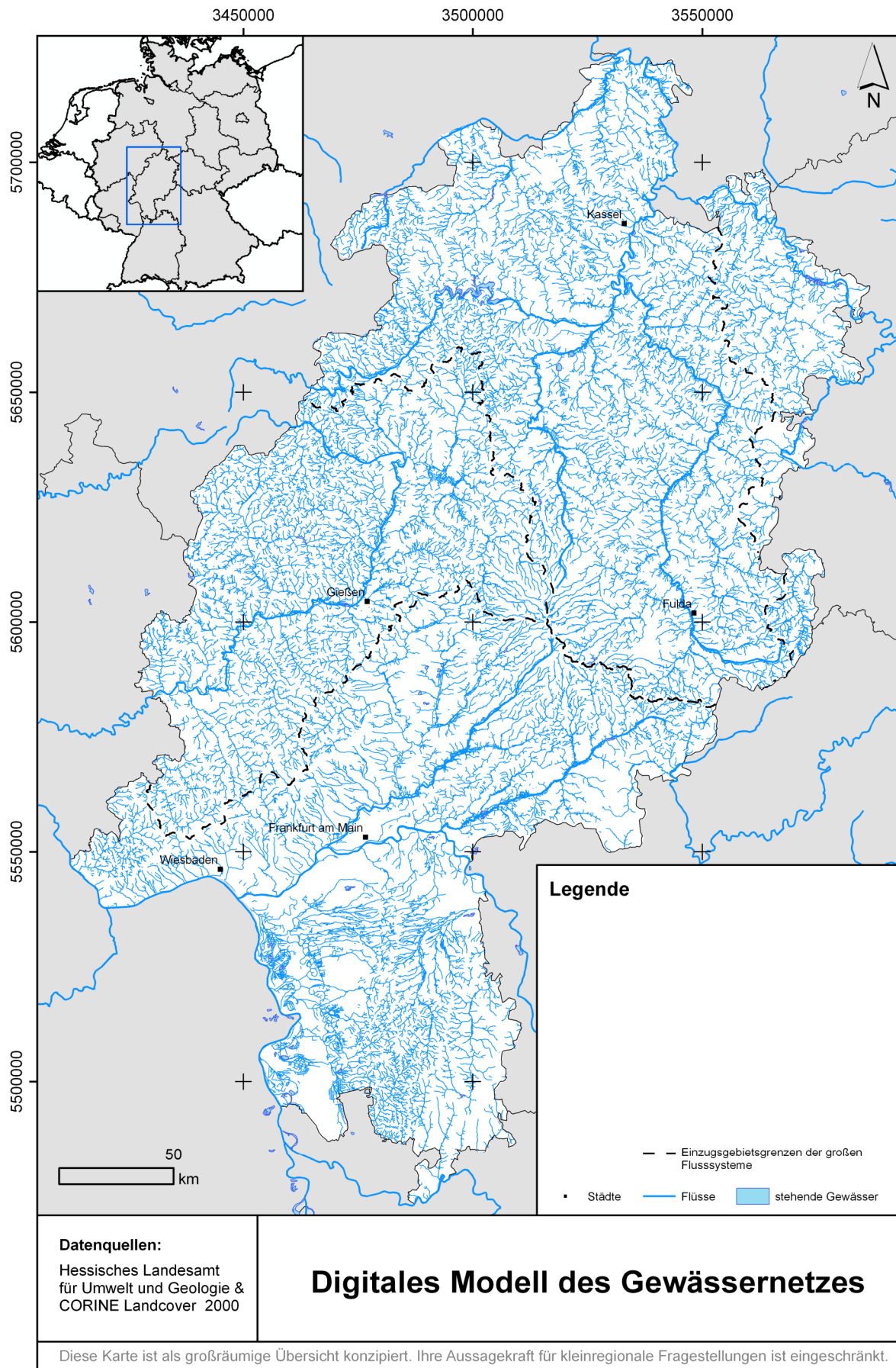


Abbildung 13: Gewässernetz und stehende Oberflächengewässer.

4.2 Geomorphographische Datengrundlage – Digitales Höhenmodell der Geländeoberfläche

Ein Modell des Reliefs der Erdoberfläche ist für mehrere Arbeitsschritte im Rahmen der Modellierung einer flächendeckenden Grundwasserdruckfläche essentiell. Auf Basis der Geländehöhe werden beispielsweise die Flurabstände und das Vorflutniveau abgeleitet. Für das gesamte Bundesland Hessen stand ein *digitales Rastermodell der Geländehöhe* (DHM) mit äquidistanten 20-Meter-Maschen zur Verfügung (Quelle: HLUG). Abbildung 14 zeigt die Geländehöhen im Modellgebiet.

Digitale Höhenmodelle werden für sehr große Modellräume aus einzelnen Höheninformationen zusammengesetzt, die aus verschiedenen Datenquellen entnommen werden (beispielsweise aus amtlichen Höhenmessnetzen, luftgestützten LIDAR-Messung, etc). Die Genauigkeit ist abhängig von der Aufnahmemethode, der Rasterweite und der Geländerauheit. Bei großräumigen digitalen Höhenmodellen mit Rasterweiten zwischen 20 und 50 m liegt die Genauigkeit im Mittel bei ± 5 m (de Lange 2006).

Die eingeschränkte Höhengenaugigkeit ist immer ein möglicher Grund für lokale Unstimmigkeiten in der modellierten Grundwasserdruckfläche und den berechneten Grundwasserflurabständen. In Kapitel 6 wird darauf vertiefend eingegangen. An dieser Stelle sei auf die Konsequenzen für die Akkumulationswege des Abflusses hingewiesen.

Das DHM und das Oberflächengewässernetz sind in einigen Bereichen des Modellgebietes morphologisch nicht exakt aneinander angepasst. Die ebenfalls durch eine GIS-gestützte topologische Analyse des DHM abgeleiteten Akkumulationswege des Abflusses weichen teilweise von den Fließwegen des Gewässernetzes ab. Die Abstände zwischen den Wegen liegen dabei hauptsächlich im Bereich zwischen 20 und 200 m. Abbildung 15 zeigt eine typische Situation in einer hügeligen Festgesteinsregion mit mittlerer Reliefenergie und relativ ebenen Talauen. Fließgewässer existieren häufig erst, wenn die Einzugsgebiete einzelner Modellelemente größer als 1 km² sind. Deutlich sichtbar treten Akkumulationswege auf, die durchaus mehrere Kilometer entlang eines Gewässers verlaufen, ohne in dieses zu münden. Aus diesem Grund wurde bei der Erstellung des Fließrichtungsmodells durch stufenweise Absenkung des Höhenmodells im Abstand bis zu 200 m um das Modell des Entwässerungsniveaus eine Fließrichtung in Richtung des Entwässerungsniveaus erzwungen, die den realen Verhältnissen besser gerecht wird.

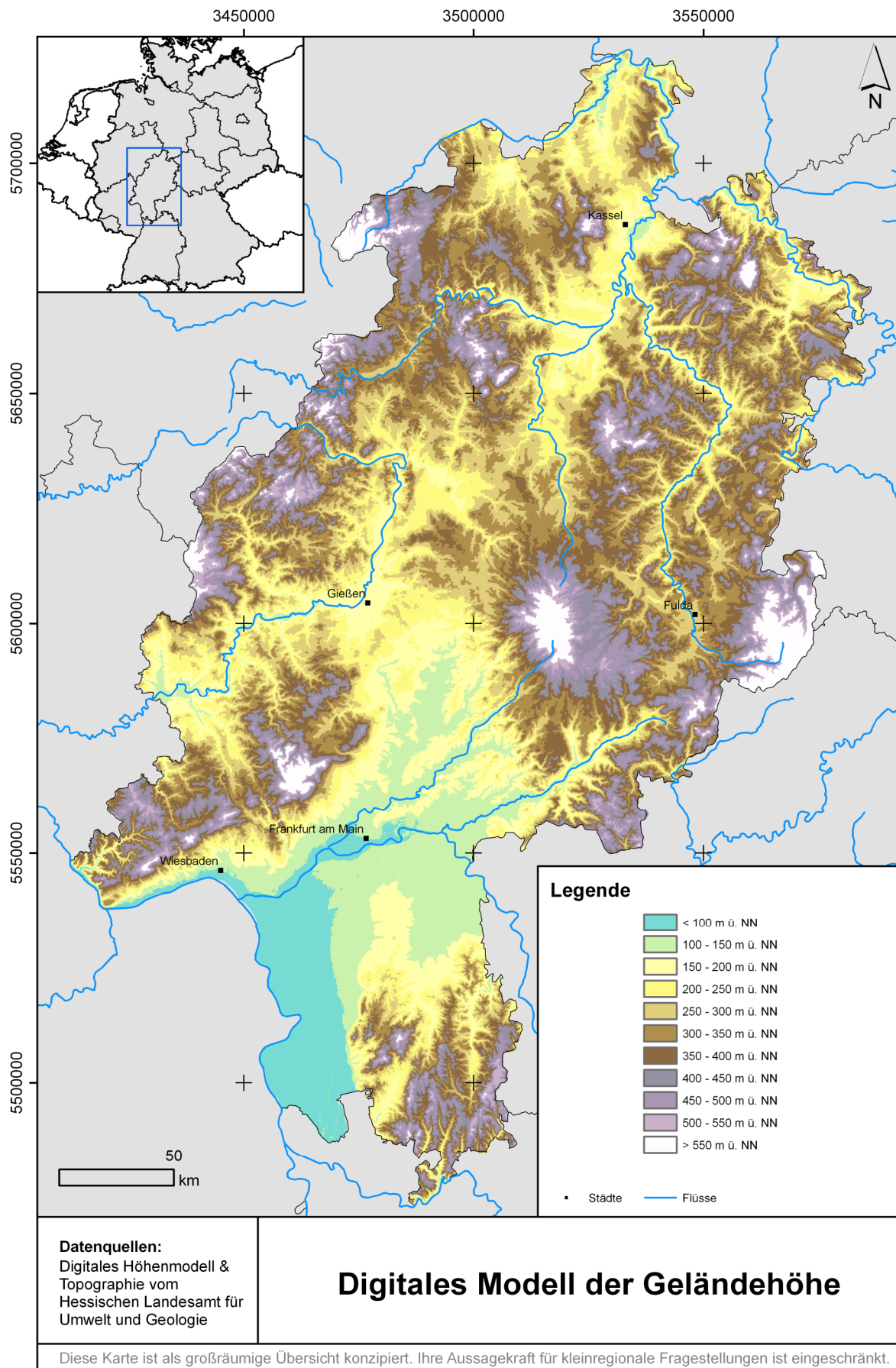


Abbildung 14: Digitales Modell der Geländehöhe.

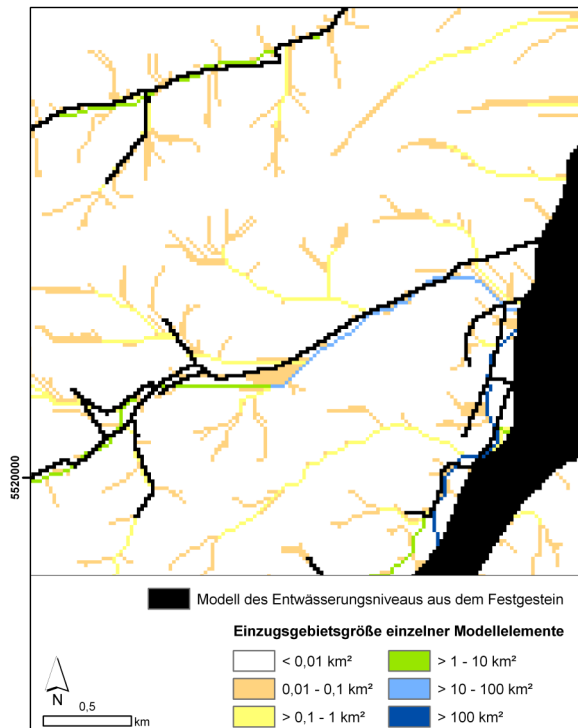


Abbildung 15: Beispiel für die Akkumulationswege des Abflusses, abgeleitet aus dem DHM. Dargestellt sind die Einzugsgebietsgrößen der einzelnen Modellelemente.

4.3 Hydrogeologische und Geologische Kartenwerke

Die für die Modellierung der Grundwasserdruckfläche essentielle Information zur Hydrogeologie stammt aus der Hydrogeologischen Übersichtskarte im Maßstab 1:200000 (HÜK 200). Herausgeber der HÜK 200 ist die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland. Im Rahmen dieser Arbeit lag die HÜK 200 in einer für Hessen erweiterten digitalen Fassung vor. Sie bildet die hydrogeologischen Einheiten sowie die für die Modellerstellung relevante Information zu Stratigraphie, Petrografie, Hohlraumart, Charakter der Grundwasserleiter, hydraulische Durchlässigkeit, Genese und Deckschicht der Grundwasserleiter ab. Die Geometrie der HÜK 200 basiert auf den stratigrafischen Einheiten der bundesweit vorhandenen Geologischen Übersichtskarte im Maßstab 1:200000. Die hydrogeologische Information bezieht sich auf den oberen, großräumig zusammenhängenden und wirtschaftlich bedeutsamen Grundwasserleiter und bedeckt eine Fläche von ca. 21200 km². (Dörhöfer, Hannappel et al. 2001; Hannappel, Fritsche et al. 2003)

Information der HÜK 200 wird in beiden Stufen der Modellerstellung benötigt. Als erstes werden anhand der HÜK 200 Lockergesteins- und Festgesteinsbereiche voneinander abgegrenzt. Für die darauffolgende Gliederung des Festgesteinsbereiches in Gebiete mit gleichen mittleren hydraulischen Gradienten (vgl. Abschnitt 3.3.4) wird lokal eine zusätzliche Information aus der Geologischen Übersichtskarte im Maßstab 1:300000 (GÜK 300) verwendet.

4.3.1 Abgrenzung der Lockergesteinsgrundwasserleiter

Als Porengrundwasserleiter sind in der HÜK200 für Hessen 36 hydrogeologische Einheiten verzeichnet. Sie bedecken eine Fläche von insgesamt ca. 4300 km², dies sind ca. 20% der Landesfläche. Es handelt sich dabei um Sedimente aus dem Tertiär (ca. 1650 km²) und dem Quartär (ca. 2650 km²).

Die tertiären Sedimente wurden unter limnisch-fluviatilen oder brackisch-marinen Bedingungen gebildet. Die untergeordnet vorkommenden tonigen und schluffigen Ablagerungen weisen geringe bis äußerst geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf und sind deshalb in der HÜK 200 in die Gruppe der Grundwassergeringleiter eingeordnet worden. In diesen Bereichen kann eventuell eine gespannte Grundwasseroberfläche vorliegen. Ein Vergleich mit Messwerten aus dem Datenbestand GWSTANDHESS hat gezeigt, dass das wahrscheinlich lokal der Fall ist. Die ältesten Sedimente stammen aus dem Eozän, sie wurden vor mindestens 35 Mio. Jahren abgelagert. Solche älteren Sedimente befinden sich teilweise im Vergleich zu den jüngeren Sedimenten in Hochlagen, deutlich oberhalb der gegenwärtigen lokalen Erosionsbasis.

Bei den Sedimenten aus dem Quartär handelt es sich hauptsächlich um fluviatile und äolische Bildungen in Form von Terrassenkiesen und -sand, holozänen Auesedimenten sowie Flugsanden. Sie sind in der HÜK 200 meist als Grundwasserleiter mit mittleren bis mäßigen Durchlässigkeiten charakterisiert worden, untergeordnet sind auch Grundwassergeringleiter ausgewiesen.

Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, sind vor allem im Oberrheingraben, in der Wetterau und im Bereich der Niederhessischen Senke großräumig Lockergesteinsgrundwasserleiter vorhanden. Hierzu kommen die Talfüllungen in den Mittelgebirgen und ihren Vorländern. Zahlreiche Festgesteinseinheiten sind in den Tälern mit jungen fluviatilen oder limnisch-fluviatilen Locker-Sedimenten bedeckt, in denen eine Grundwasserbewegung stattfindet. Diese Ablagerungen sind in der HÜK 200 erst ab einer Mächtigkeit von mehr als 20 m als eigenständige Grundwasserleiter ausgewiesen (mündliche Mitteilung von J.-G. Fritsche, HLUG). Sie sind jedoch als Deckschichten mit Attributen zur Genese und Petrographie gekennzeichnet. Mit Hilfe dieser Information konnten weitere Flächen (insgesamt ca. 700 km²) ermittelt werden, die entsprechend der Methodenbeschreibung als Lockergesteinsgrundwasserleiter behandelt werden müssen.

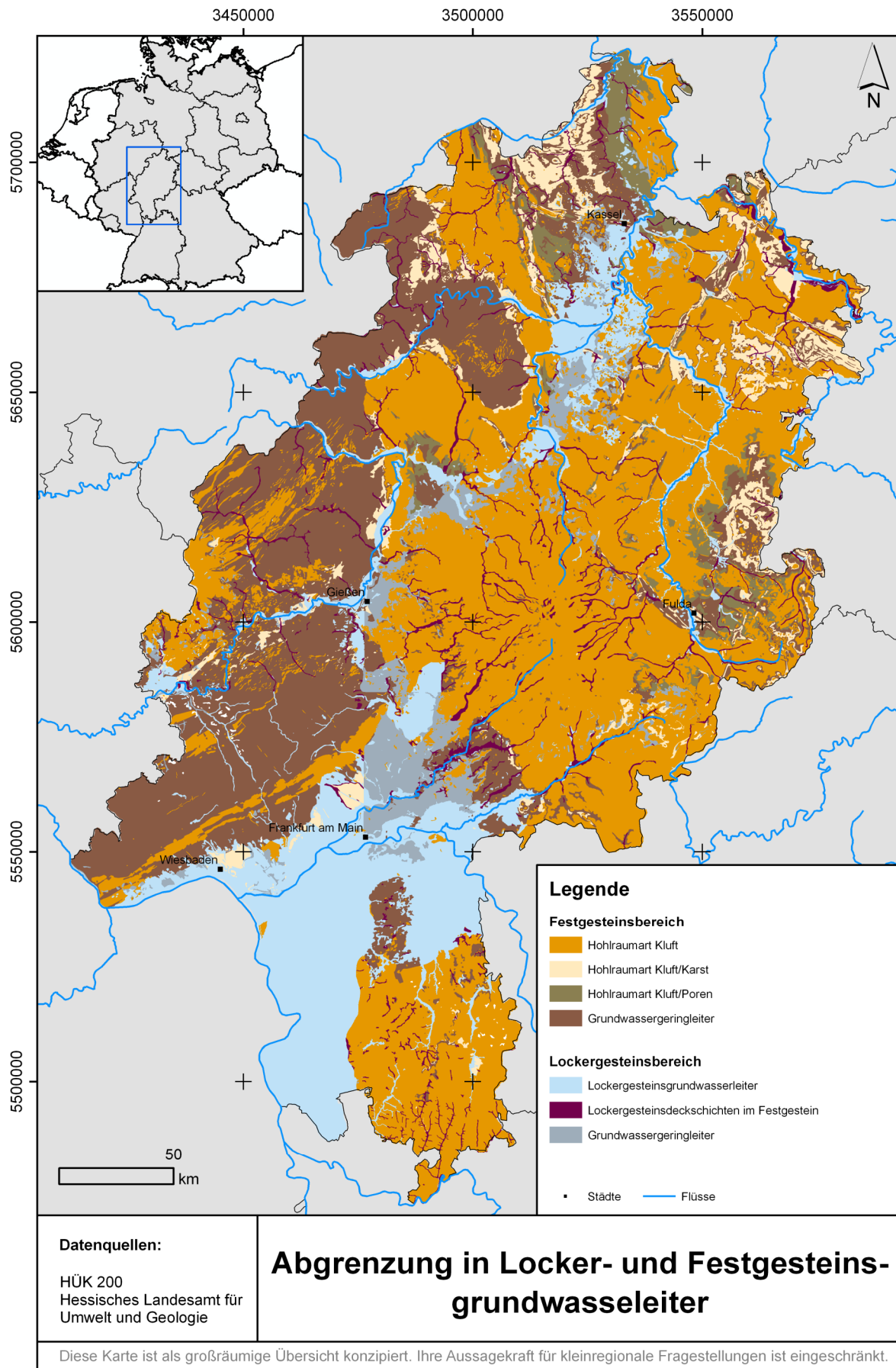


Abbildung 16: Abgrenzung in Locker- und Festgesteinsgrundwasserleiter.

4.3.2 Hydrogeologische Einheiten der Festgesteinsbereiche

In der HÜK 200 sind 65 hydrogeologische Einheiten unter den Hohlraumarten „Kluft“, „Kluft/Karst“ und „Kluft/Poren“ verzeichnet (vgl. Abbildung 16). Die empirischen Analysen der individuellen Grundwasserstromlinien und die daraus resultierenden hydraulischen Gradienten nach der in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen Vorgehensweise, führten bei einigen Einheiten zu einer weiteren Aufgliederung. Hauptkriterien waren hierbei, die regionale Lage der Einheiten sowie die Gütemaßzahlen Spearman's Rho und Residuum. Dementsprechend wurden die Einheiten weiter untergliedert, wenn:

- die Teilflächen einer Einheit räumliche Cluster bilden und für die Bereiche jeweils genügend Messwerte vorhanden waren (z.B. die Einheiten des Mittleren Buntsandstein) und/oder
- die Berechnung mittlerer hydraulischer Gradienten für Teilgebiete einer Einheit mit genügend Messwerten zu einer Verbesserung der Gütemaßzahlen führten und/oder
- auf Basis der GÜK 300 eine weitere Untergliederung einer Einheit in weitere Stufen möglich war (z.B. Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine).

Die HÜK 200 wurde für den Zweck der weiteren Untergliederung der hydrogeologischen Einheiten mit der GÜK 300 geometrisch verschnitten. Dadurch konnte beispielsweise im Taunus für die Einheit Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine eine geologisch begründbare Untergliederung in die Formationen Hunsrückschiefer (Tonschiefer u. Bänderschiefer) und Unterems-Stufe (Tonschiefer, Sandstein, rhyolithische Metavulkaniklastite) erfolgen.

Die Verbreitungsgebiete der Einheiten sind in Abbildung 17 dargestellt. Sie sind teilweise weniger als 1 km² aber auch mehrere Hundert km² groß. Auf die beschriebene Weise wurden insgesamt 76 Festgesteinseinheiten ausgewiesen, für die jeweils eine Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien durchgeführt wurde. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit geeigneter Messwerte konnte nicht für alle Einheiten ein mittlerer hydraulischer Gradient bestimmt werden (vgl. Tabelle 11).

4.3.3 Technischer Zustand der HÜK 200

Die HÜK 200 (in ihrem Bearbeitungsstand im Jahr 2008) ist durch teilweise mangelhaft aneinander angepasste Teilblätter gekennzeichnet. Einzelne Grundwasserleiter sind an den Blattgrenzen durch verschiedene Bearbeiter unterschiedlich dargestellt und beschrieben worden. Dies führt lokal dazu, dass beispielsweise ein Karstgrundwasserleiter am Blattrand zu einem Porengrundwasserleiter wird. Derartige Diskrepanzen konnten aufgrund ihrer Häufigkeit und fehlenden Zusatzinformationen nicht behoben werden. Des Weiteren existieren in der digitalen Form der Karte (ESRI-Shapefile) unzählige kleine Lücken zwischen den Einzelflächen sowie Überschneidungen. Zahlreiche Lücken mussten manuell geschlossen werden, damit bei der Überführung in ein Rastermodell keine Maschen ohne Information entstehen.

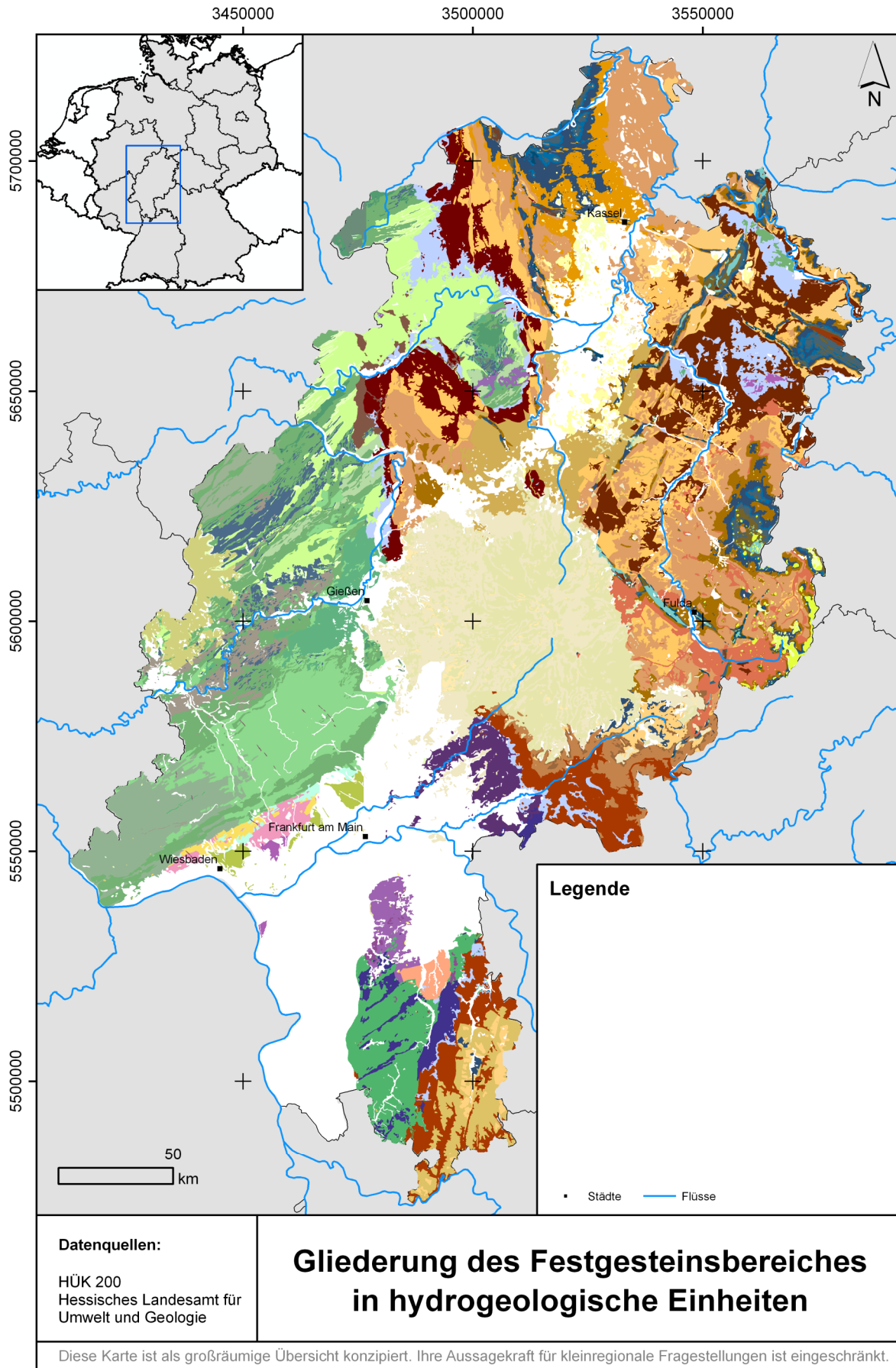


Abbildung 17: Gliederung der Festgesteinsbereiche in hydrogeologische Einheiten. Legende in Abbildung 18.

Legende

 Miozänes Kätktertiär	 Böckelschiefer-Folge (z8), silikatisch
 Tertiäre alkalibasaltische Tuffe des Westerwaldes	 Permisch-Triassische Konglomerate
 Tertiäre basaltische Vulkanite - Alkalibasaltische Gesteine Vogelsberg und Wetterau	 Zechstein (ungegliedert)
 Tertiäre basaltische Vulkanite - Basalt Niederhess. Senke	 Zechstein in karbonatischer Fazies
 Tertiäre basaltische Vulkanite - Basalt und Varietäten Vogelsberg und Wetterau	 Oberrotliegend Konglomerate, Sand- und Schluffsteine
 Tertiäre basaltische Vulkanite (Mitteldeutsches Bruchschollenland)	 Rotliegend Sand-, Schluff-, und Tonsteine, Mergel- und Kalksteine - Sprendlinger Horst
 Tertiäre basaltische Vulkanite (Odenwald, Sprendlinger Horst)	 Rotliegend Sand-, Schluff-, und Tonsteine, Mergel- und Kalksteine - südöstliche Wetterau
 Tertiäre basaltische Vulkanite (Rhön)	 Saure, intermediäre und basische Vulkanite, Rotliegend (Sprendlinger Horst)
 Tertiäre Basalttuffe (Niederhess. Senke, Rhön)	 Oberkarbonische Arkosen, Schluff- und Sandsteine
 Tertiäre Basalttuffe (Vogelsberg und Wetterau)	 Paläozoische Schiefer, Kalksteine, Sandsteine und Diabase
 Tertiäre bis quartäre Alkalibasalte und Phonolithe des Westerwaldes	 Unterkarbonische Ton- und Kieselschiefer, Kalksteine, Alaunschiefer
 Weißpläner (Oberes Turon)	 Unterkarbonische Ton- und Kieselschiefer; Kulm-Grauwacke
 Lias	 Unterkarbonische Tonsteine; Kulm-Tonschiefer
 Gipskeuper und Schiffsandstein (ungegliedert)	 Granite des Kristallinen Vorspessarts und Odenwaldes (ungegliedert)
 Keuper (ungegliedert)	 Metamorphe Einheiten des Kristallinen Vorspessarts und Odenwaldes (ungegliedert)
 Lettenkeuper	 Intermediäre bis basische Vulkanite
 Mittlerer Keuper (ungegliedert)	 Devonische Tonschiefer, Mergel- und Sandsteine
 Rhätkeuper-Schichten	 Givet- bis Adorf-Massenkalk
 Steinmergelkeuper	 Mitteldevonische Quarzite und quarzische Sandsteine
 Mittlerer Muschelkalk	 Mitteldevonische Ton- und Schluffsteine
 Muschelkalk (ungegliedert)	 Mitteldevonische Tonschiefer und Sandsteine
 Oberer Muschelkalk	 Oberdevon (sandig-tonig)
 Oberer Muschelkalk Kuppenrhön und Ceratitenschichten (mo2), Trochitenkalk (mo1)	 Oberdevonische Kalk- und Tonsteine
 Wellenkalk, Terebratelbank (Unterer Muschelkalk)	 Oberdevon-unterkarbonische Schiefer und Sandsteine
 Oberer Buntsandstein - Fulda/Diemel	 Unterdevonische Quarzite
 Oberer Buntsandstein - Mittel- und Osthessen	 Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine - Nordwesterwald und Süderbergland
 Oberer Buntsandstein in sandig-toniger Fazies (Süddeutscher Buntsandstein)	 Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine - Westtaunus - Hunsrückschiefer
 Detfurth- und Hardegsen-Folge	 Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine - Osttaunus und Westerwald - Unterems-Stufe
 Mittlerer Buntsandstein	 Oberproterozoisch- devonische Metapelite und -vulkanite
 Mittlerer Buntsandstein (Solling-Folge)	 Paläozoischer Gangquarz
 Mittlerer Buntsandstein außer Solling-Folge (Süddeutscher Buntsandstein)	 Basische (- intermediäre) devonisch-karbonische Metavulkanite des Lahn-Dill-Gebietes
 Mittlerer Buntsandstein in sandig-toniger Fazies	 Graptolithenschiefer
 Volpriehausen- bis Hardegsen-Folge - Nordosthessen	 Ordovizischer Sandstein
 Volpriehausen- bis Hardegsen-Folge - Rhön und Landrücken	 Oberproterozoisch-altpaläozoische Metakarbonate (ungegliedert)
 Volpriehausen- bis Hardegsen-Folge - Schwalm-Einzugsgebiet	 Ordovizische Metapelite und -vulkanite
 Volpriehausen-Folge	 Silurische Metavulkanite
 Unterer Buntsandstein - Ostthessisches Bergland	
 Unterer Buntsandstein - Westthessisches Berg- und Senkenland	
 Unterer Buntsandstein (Süddeutscher Buntsandstein)	
 Unterer Buntsandstein (Süddeutscher Buntsandstein) - Reinheimer Hügelland	

Abbildung 18: Legende zur Abbildung 17.

4.4 Existierende Grundwassergleichenpläne

Für die Rhein-Main-Ebene existiert eine digitale vom HLOG erstellte Flurabstandskarte, die für eine Fläche von ca. 1640 km² integrierbare Information zum Grundwasserstand liefert (Abbildung 19). Die Karte liegt in Form eines äquidistanten Rasters mit einer Maschengröße von 25 m vor. Die Druckhöhen wurden als Differenzen zwischen dem DHM und den in der digitalen Flurabstandskarte ausgewiesenen Werten berechnet und in das Modell, dem hierarchischen Ansatz (vgl. Abbildung 6) entsprechend, integriert.

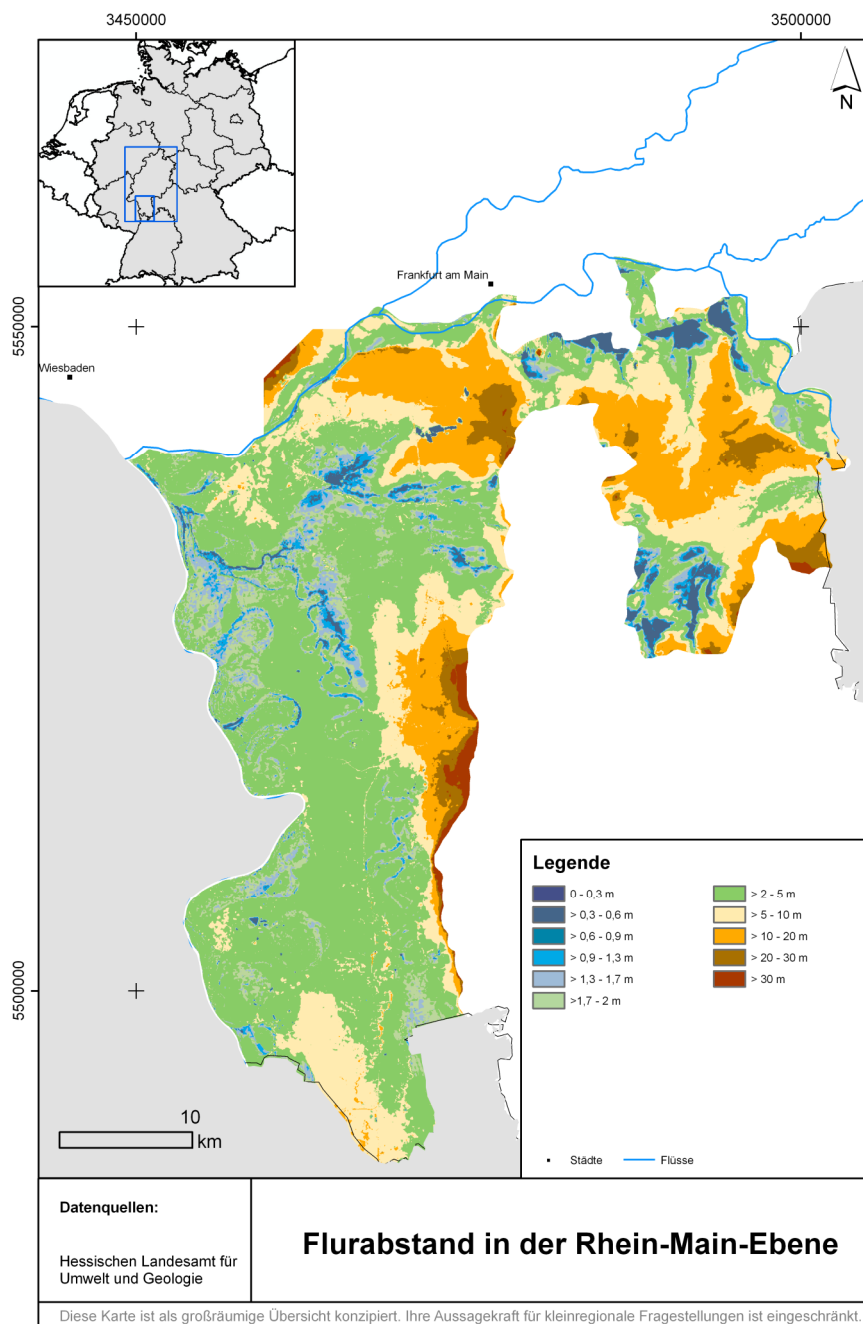


Abbildung 19: Flurabstand in der Rhein-Main-Ebene.

4.5 Bodenkundliche Daten

In der digitalen Bodenkarte des Bundeslandes Hessen im Maßstab 1:50000 (Hessische Bodenfunktionskarte BFD 50) sind die erfassten Böden u. a. hinsichtlich des Einflusses des Grundwassers auf einen Standort eingestuft. Die Intensität des Grundwassereinflusses wird durch die in Tabelle 4 aufgeführten sogenannten Grundnässestufen angegeben. Die Tiefenlage des Grundnässehorizontes entspricht dabei der Tiefenlage des mittleren scheinbaren Grundwassertiefstandes (HLUG o.J.). Die Mächtigkeit des gesättigten Kapillarraumes ist dabei eingeschlossen. Die Angaben sind landesweit vorhanden, ausgenommen sind jedoch die städtischen Zentren und ländlichen Siedlungsflächen. Für diese Arbeit stand nur die Karte der Grundnässestufen zur Verfügung.

Tabelle 4: Grundnässestufen der Bodenkarte mit Flurabständen (Quelle: HLUG, ergänzt).

Grundnässestufe	Kurzzeichen	Tiefenlage des Grundnässehorizontes in dm	verwendeter mittlerer Flurabstand in dm
nicht grundnass	G0	unterhalb 20	-
sehr schwach grundnass	G1	>17 und ≤ 20	19
schwach grundnass	G2	>13 und ≤ 17	15,5
grundnass	G3	> 9 und ≤ 13	11,5
stark grundnass	G4	> 6 und ≤ 9	8
sehr stark grundnass	G5	> 3 und ≤ 6	5
äußerst grundnass	G6	≤ 3	2

Die Grundnässestufen G5 und G6 sind charakteristisch für semiterrestrische Bodentypen, wie zum Beispiel die Klassen der Gleye und der Auenböden. Wie aus Abbildung 20 hervorgeht, finden sich grundnasse Böden hauptsächlich im Bereich der Niederungen und Auen entlang der großen Flussläufe sowie vorflutnah in den Talfüllungen der Mittelgebirge. Untergeordnet treten grundwasserbeeinflusste Böden auch in Muldenstrukturen im Mittelgebirge auf. Im Oberwald des Vogelsberges haben sich beispielsweise in den Quellmulden der Hanglagen Quell- und Hanggleye entwickelt (Leßmann, Wiegand et al. 2001).

Für die landesweite flächendeckende Modellierung der Grundwasserdruckfläche werden die Grundwasserdruckhöhen im Bereich der grundwasserbeeinflussten Böden entsprechend dem Schema in Abbildung 6 verwendet. Dazu wurden Mittelwerte für den Flurabstand aus den Angaben der Bodenkarte abgeleitet (Tabelle 4, 4. Spalte). Zur Berechnung der Druckhöhen im Verbreitungsgebiet der entsprechenden Böden wurden diese mittleren Flurabstände von den Höhenangaben im DHM abgezogen.

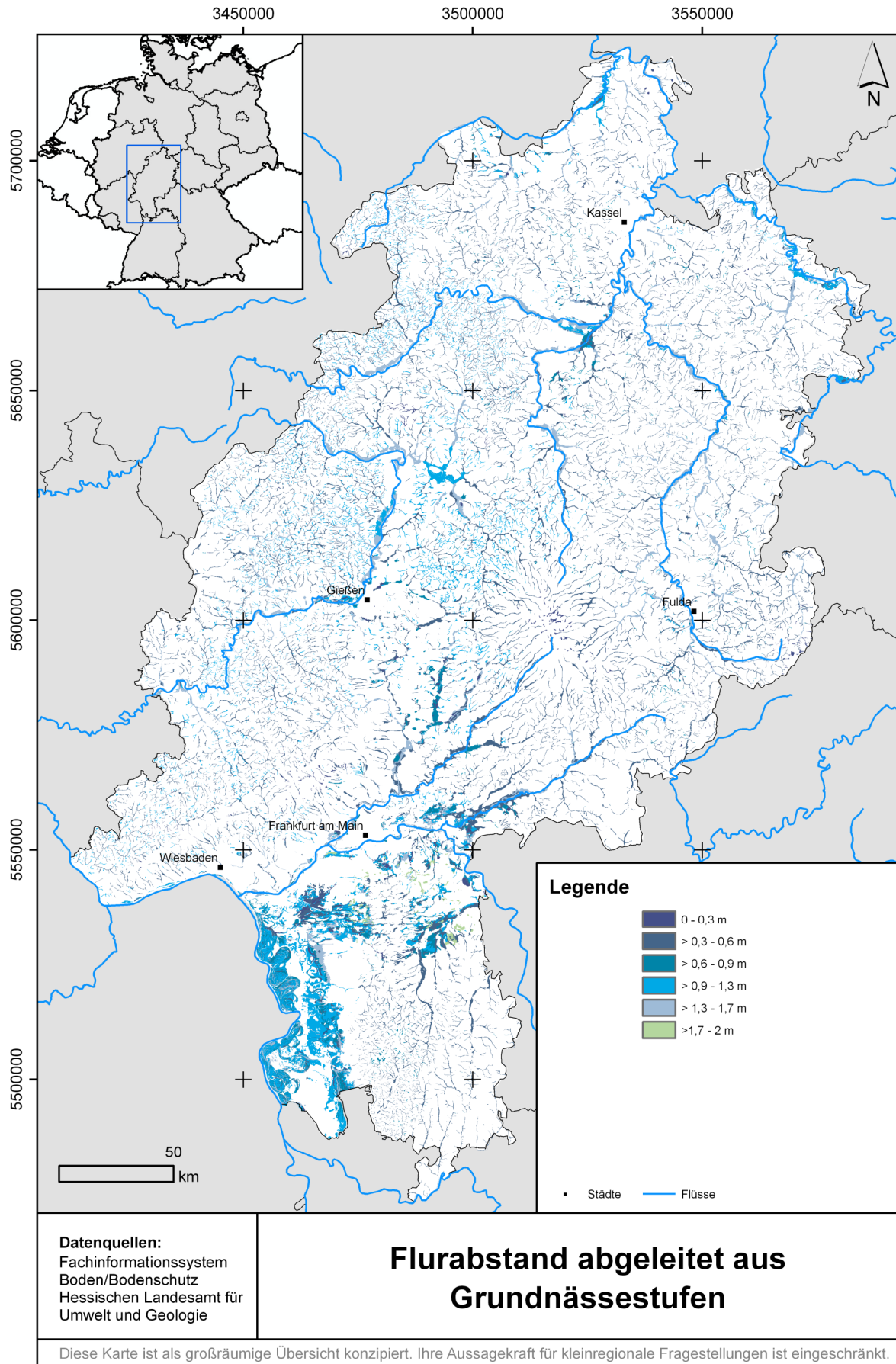


Abbildung 20: Flurabstand abgeleitet aus Grundnässestufen. Dargestellt sind alle in der BFD 50 abgebildeten Verbreitungsgebiete der grundwasserbeeinflussten Böden.

4.6 Messwerte zur Grundwasserdruckfläche

Wichtigste Grundlage für die Erstellung eines flächendeckenden Modells der Grundwasserdruckfläche sind die in Brunnen, Bohrungen, Grundwassermessstellen, Quellen, etc. gemessenen Grundwasserstände. Bereits im Abschnitt 3.1 wurde angemerkt, dass aus einzelnen Wasserstandmessungen nicht zwingend auf die Höhenlage der Grundwasseroberfläche geschlossen werden kann, sondern nur auf die Höhenlage der Grundwasserdruckfläche. Diese „Messwerte zur Grundwasserdruckfläche“ werden im Folgenden kurz als Messwerte bezeichnet.

Die Messwerte wurden vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie in der Datenbank GWSTANDHESS abgelegt. Sie stammen aus verschiedenen Datenquellen. Im Datenbestand befinden sich derzeit ca. 33000 einzelne Messwerte (keine Zeitreihen) mit ihren Koordinaten, Angaben zur Geländehöhe, zum Grundwasserflurabstand, zur Herkunft des Messwertes (aus Bohrung, Brunnen, Quelle, etc.; siehe Tabelle 5) sowie großteils zur Endteufe der Bohrung und zur Systemzugehörigkeit (Quartär, Tertiär, etc.) der angetroffenen Formationen.

Tabelle 5: Herkunft der Messwerte.

Herkunft der Messwerte	ursprüngliche Anzahl
Bohrungen	30368
Brunnen	1212
Quellen	1562

Aus den einzelnen Datensätzen lässt sich nicht ableiten, aus welcher Formation die in Form des Wasserstandes gemessene Druckhöhe stammt, und ob im Grundwasserleiter gespannte oder ungespannte Verhältnisse herrschen. Datums- und Zeitangabe zu den Einzelmessungen sind ebenfalls nicht in der Datenbank verzeichnet. Das bedeutet, dass die vorhandenen Messwerte bei jahreszeitlich stark schwankenden Grundwasserständen die mittleren Verhältnisse gegebenenfalls nur unzureichend abbilden.

Nicht alle Messwerte sind geeignet, für die Modellierung der Grundwasserdruckfläche als Stützpunkt zu dienen. In den folgenden Abschnitten werden die Gründe dafür diskutiert. Des Weiteren wird das Messwertekollektiv schrittweise mit dem Ziel ausgedünnt, fehlerbehaftete und unplausible Messwerte zu eliminieren.

4.6.1 Räumliche Verteilung der Messwerte

Die ursprünglich in der Datenbank abgelegten Messwerte sind sehr unterschiedlich über das gesamte Bundesland Hessen verteilt. Abbildung 21 zeigt dazu die Messwertdichte. In Tabelle 6 sind die zugehörigen Flächenrelationen angegeben. Die Messwertdichte wurde

bestimmt, indem für jede einzelne Masche des Modellrasters die Messwerte in einem Umkreis mit einem Quadratkilometer Fläche gezählt wurden.

In den urbanen Gebieten mit vorwiegend Lockergesteinsgrundwasserleitern, wie zum Beispiel im Rhein-Main-Tiefland, ist die Messwertdichte teilweise sehr hoch. Sie liegt in dieser Region weit verbreitet bei mehr als zehn Messwerten pro km². Für diese hohe Dichte gibt es verschiedene Gründe. Viele Messwerte stammen in den urbanen Räumen beispielsweise aus der Baugrunderkundung. In ländlichen Festgesteinsregionen Hessens ist die Messwertdichte dagegen generell geringer als im Lockergestein, schwankt jedoch sehr stark.

In vielen Teilen Hessens stehen lokal nur 1 bis 2 Messwerte/km² für die Modellierung der Grundwasserdruckfläche zur Verfügung. Mit ca. 14300 km² und 67,5 % der Landesfläche bilden die Bereiche ohne Messwerte den weitaus größten Teil des Modellgebietes.

Tabelle 6: Messwertdichte und Flächenanteile.

Messwertdichte in Messwerte/km²	Fläche in km²	Anteil an der Gesamtfläche in %
keine Messwerte	14 300	67,5
1 - 2	3200	15,1
3 - 5	2000	9,4
6 - 10	900	4,2
11 und mehr	800	3,4

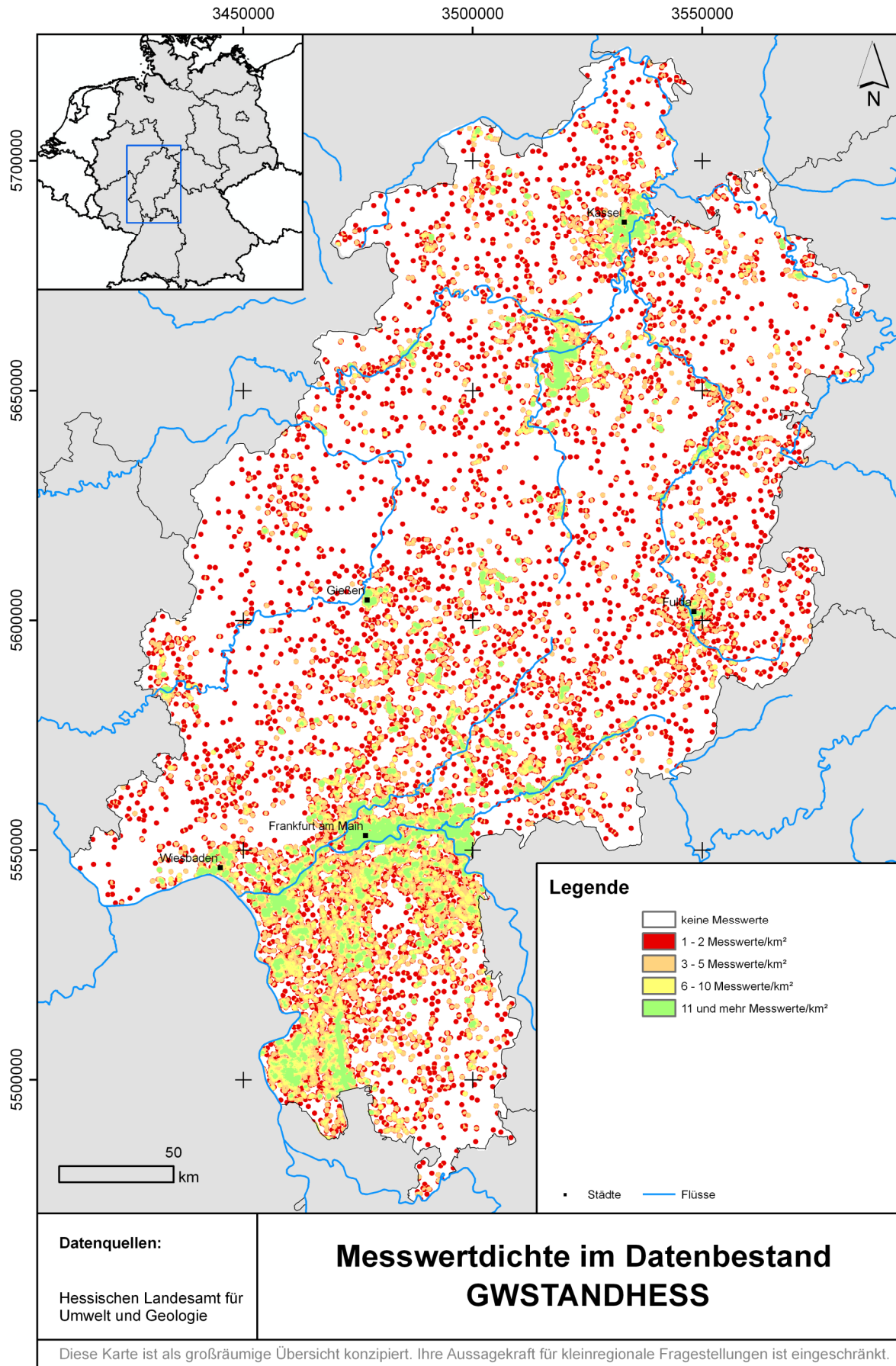


Abbildung 21: Messwertdichte im Datenbestand GWSTANDHES.

4.6.2 Einordnung in Locker- und Festgesteinsbereich

Im ersten Schritt der Selektion geeigneter Messwerte aus dem Datenbestand wird die Zugehörigkeit eines Messwertes zum Locker- bzw. Festgesteinsbereich – im Sinne des Abschnitt 3.1.4 – geprüft. Dazu wird einerseits die Lage der Messwerte innerhalb einer der beiden Bereiche betrachtet, andererseits wird anhand der Formationsangabe entschieden, ob der Messwert wirklich aus dem Lockergestein bzw. Festgestein stammt. Dies ist vor allem in den Festgesteinsregionen mit Lockergesteinsdeckschichten von Bedeutung. Es wird dabei angenommen, dass die Messwerte die Druckverhältnisse der tiefsten angetroffenen Formation repräsentieren.

Wenn beispielsweise ein Messwert innerhalb des Festgesteinsbereiches liegt, er jedoch aus einer Bohrung mit einer Endteufe von nur 6 m stammt und die Schicht vollkommen dem Quartär zuzuordnen ist, wird er für die weitere Verwendung ausgeschlossen. In einem solchen Fall ist in der HÜK 200 keine Deckschicht verzeichnet gewesen, die eine Behandlung der Fläche als Lockergesteinsgrundwasserleiter rechtfertigen würde. Ebenso existieren im Lockergesteinsbereich Bohrungen mit Endteufen in einer tiefer liegenden Festgesteinsformation. Diese Messwerte wurden ebenfalls von der weiteren Verwendung ausgeschlossen.

Die Tabelle 7 gibt einen Überblick, wie viele Messwerte dem Locker- und Festgesteinsbereich sicher zugeordnet werden konnten. Letztendlich verbleiben nach diesem Selektions-schritt 26705 Messwerte als mögliche Stützstellen für die Modellerstellung. In Anhang A (Abbildung A 1 und Abbildung A 2) sind die in beide Bereiche eingeordneten Messstellen entsprechend der Durchlässigkeitsverhältnisse farblich codiert abgebildet.

Tabelle 7: Einordnung der Messwerte aufgrund der Lage und der Formationsangaben.

	Anzahl der Messwerte		
	Einordnung aufgrund der Lage	Einordnung aufgrund der Lage und der Formationsangabe	unberücksichtigt
Lockergestein	23463	19598	3865
Festgestein	8927	7107	1820
außerhalb der HÜK 200	752		752
Summe:	33142	26705	6437

4.6.3 Prüfung der Messwerte auf Plausibilität

Die Messwerte des Datenbestandes GWSTANDHESS wurden am HLUG hinsichtlich ihrer Plausibilität bewertet. Aufgrund der großen Anzahl war jedoch eine Plausibilitätsprüfung einzelner Messwerte nicht möglich. Es wurden daher bereits am HLUG statistische Verfahren für das Erkennen fehlerhafter beziehungsweise unplausibler Datensätze angewendet (schriftliche Mitteilung von D. Bastian, HLUG). Als ungeeignet gelten beispielsweise Messwerte, die eine deutliche Druckhöhendifferenz zu den umgebenden Messwerten aufweisen. Gründe dafür können Eingabefehler sein. Aber auch Messwerte, die im Absenkungsbereich eines Brunnens gewonnen wurden, gelten als ungeeignet. Die Ergebnisse, die mit verschiedenen Verfahren durchgeführten Plausibilitätskontrollen, waren nicht in allen Fällen zufriedenstellend. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde aus diesem Grund ein zusätzliches Verfahren konzipiert, um weitere ungeeignet oder fehlerhaft erscheinende Messwerte zu erkennen und zu eliminieren.

Ein eventuell ungeeigneter oder fehlerbehafteter Eintrag im Datenbestand GWSTANDHESS zeigt sich am ehesten, wenn der Messwert mit seinem nächsten Nachbar (der mit dem geringsten horizontalen Abstand) verglichen wird. Beide Messwerte ergeben ein Messwertpaar; jeder Messwert kann Teil mehrerer Messwertpaare sein. Ein Vergleich ist nur sinnvoll, wenn sich der nächste Nachbar auch im näheren Umfeld befindet. Hier erscheint ein Abstand von maximal 100 m angebracht. Der Grundgedanke der Plausibilitätskontrolle ist, dass alle möglichen natürlichen Vertikalwinkel der Grundwasserdruckfläche (isotrope Durchlässigkeitsverhältnisse vorausgesetzt) in einem begrenzten Bereich streuen müssen. Befinden sich die zwei zu vergleichenden Messwerte auf einer Grundwasserstromlinie, dann ist der Vertikalwinkel zwischen ihnen maximal (entspricht der Neigung der Grundwasserdruckfläche in Richtung der Grundwasserströmung). Befinden sich die zwei zu vergleichenden Messwerte auf einer Grundwasserisohypse ist der Vertikalwinkel zwischen ihnen gleich Null (vgl. Abbildung 22).

Der Vertikalwinkel α (in $^\circ$) zwischen den Grundwasserständen zweier Nachbarn lässt sich nach Gl. 4.1 berechnen.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{|h_1 - h_2|}{a_h}\right) \quad (4.1)$$

mit α Vertikalwinkel zwischen den Grundwasserständen in $^\circ$

$|h_1 - h_2|$ Differenz zwischen den Grundwasserständen in m

a_h horizontaler Abstand zwischen den Messwerten in m

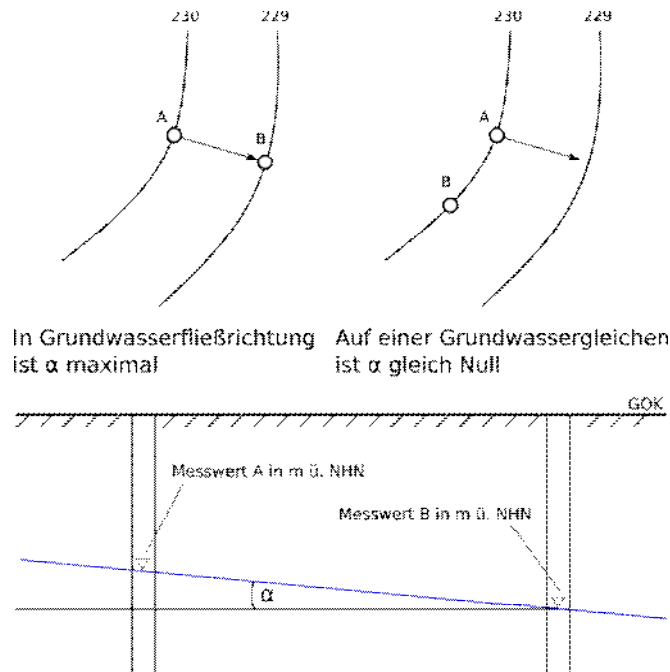


Abbildung 22: Vertikalwinkel α zwischen den Messwerten A und B.

Auf allen Flächen, die in die gleiche Durchlässigkeitsklasse eingeordnet sind, sollten nun die Vertikalwinkel aller Messwertpaare um einen mittleren Winkel innerhalb eines charakteristischen Intervalls streuen, dem Bereich der sogenannten unauffälligen Streuung (siehe dazu Abbildung 23). Entsprechend den Erfahrungen aus der explorativen Datenanalyse (nach Tukey 1977) wird der Bereich der unauffälligen Streuung auf das 1,5-fache des Quartilabstandes begrenzt. Alle Messwertpaare außerhalb des Bereiches – die mit größerem Vertikalwinkel – werden als Ausreißer angesehen.

Die Tabelle 8 und die Tabelle 9 listen getrennt nach Locker- und Festgestein für alle Durchlässigkeitsklassen zusätzlich die zur Eliminierung der unplausiblen Messwertpaare ermittelten Schwellenwerte α auf. In Abbildung 23 sind die Bereiche der unauffälligen Streuung sowie die Ausreißer für die einzelnen Durchlässigkeitsklassen dargestellt. Eine generelle Tendenz lässt sich erkennen: mit zunehmender Durchlässigkeit der Formationen, werden die Vertikalwinkel im Mittel (ausgedrückt durch den Median) kleiner, die Neigung der Grundwasserdruckfläche geringer. Dieses Ergebnis muss aufgrund der Zusammenhänge der Darcy-Gleichung auch erwartet werden. Deutlich wird außerdem, dass in den übergreifenden Durchlässigkeitsklassen die Quartilabstände relativ groß sind. Demzufolge sind auch die Bereiche der unauffälligen Streuung größer.

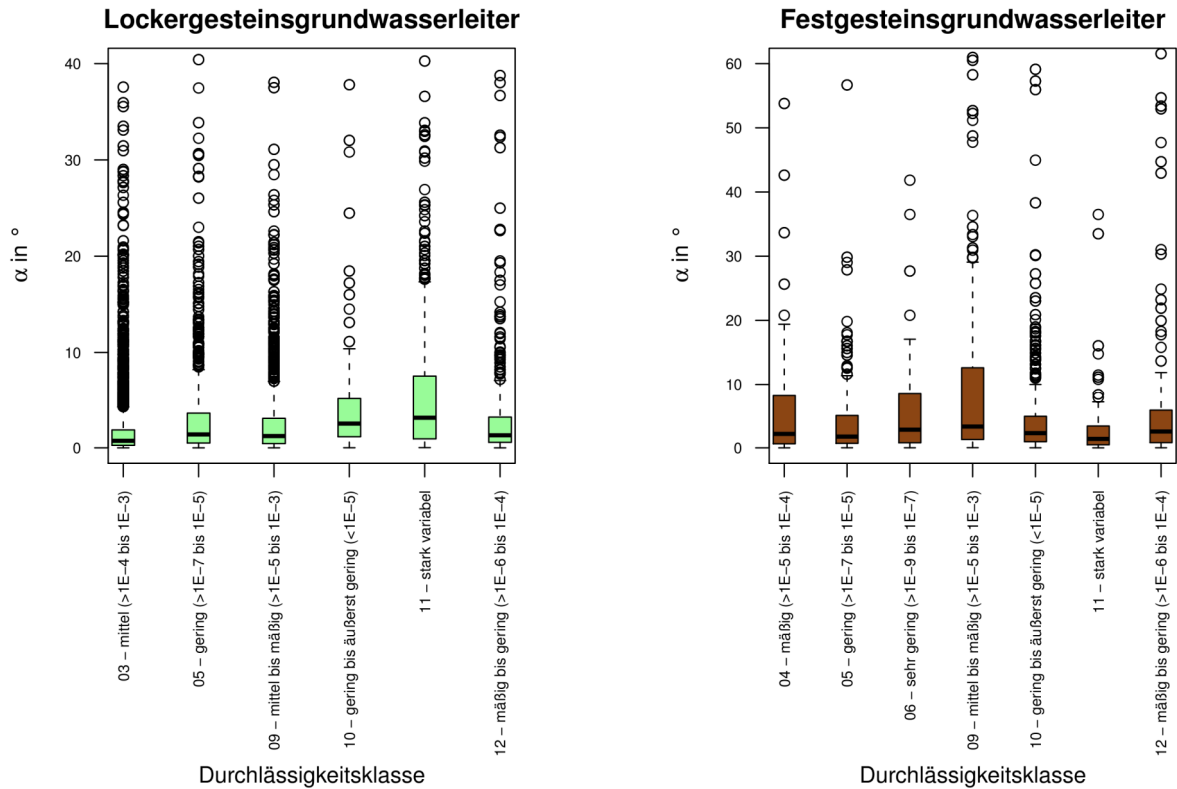


Abbildung 23: Bereich der unauffälligen Streuung und daraus resultierende Ausreisser (Kreise) für Messwertpaare mit horizontalen Abständen von weniger als 100 m. Winkel über 40° bzw. 61° sind nicht abgebildet.

Tabelle 8: Schwellenwerte zur Eliminierung unplausibler Messwertpaare (horizontale Abstände kleiner 100 m) im Lockergesteinsbereich.

Durchlässigkeitsklasse	α	Anzahl der Messwertpaare	
		gesamt	unplausibel
03 - mittel (>1E-4 bis 1E-3)	4,24	7154	734
05 - gering (>1E-7 bis 1E-5)	8,21	1737	180
09 - mittel bis mäßig (>1E-5 bis 1E-3)	6,99	1985	207
10 - gering bis äußerst gering (<1E-5)	10,38	138	19
11 - stark variabel	17,33	858	73
12 - mäßig bis gering	7,08	490	73

Tabelle 9 Schwellenwerte zur Eliminierung unplausibler Messwertpaare (horizontale Abstände kleiner 100 m) im Festgesteinsbereich.

Durchlässigkeitsklasse	α	Anzahl der Messwertpaare	
		gesamt	unplausibel
04 - mäßig (>1E-5 bis 1E-4)	19,39	150	11
05 - gering (>1E-7 bis 1E-5)	11,37	362	32
06 - sehr gering (>1E-9 bis 1E-7)	17,06	130	6
09 - mittel bis mäßig (>1E-5 bis 1E-3)	29,07	490	29
10 - gering bis äußerst gering (<1E-5)	10,01	768	74
11 - stark variabel	7,16	149	17
12 - mäßig bis gering	11,85	291	32

Die in der HÜK 200 den Einzelflächen zugewiesenen Angaben zur hydraulischen Durchlässigkeit sind als Orientierungswerte bezogen auf die mittleren Verhältnisse in den hydrogeologischen Einheiten zu werten. Lokal können sich die Verhältnisse natürlich deutlich unterscheiden (beispielsweise im stärker zerrütteten Bereich einer Störungszone). Aufgrund fehlender Information zu lokalen Durchlässigkeitsverhältnissen, es sind für die Messpunkte im Datenbestand keine k_f -Werte aus Pumpversuchen oder ähnlichen hydraulischen Tests vorhanden, ist die richtige Zuordnung einzelner Messwertpaare in eine Durchlässigkeitsklasse nicht mit letzter Sicherheit gegeben. Damit ist eine derartige Streuung der Vertikalwinkel zumindest ansatzweise erklärt und es kann davon ausgegangen werden, dass mit dem verwendeten einfachen Verfahren mindestens die extrem unrealistischen Messwerte eliminiert werden können.

Inwieweit der Bereich der unauffälligen Streuung der Vertikalwinkel mit der Streuung um die mittlere Neigung der Grundwasserdruckfläche übereinstimmt, kann zumindest für den in Abschnitt 4.4 erläuterten Grundwassergleichenplan der Rhein-Main-Ebene gezeigt werden. In dieser Region herrschen mittlere Durchlässigkeitsverhältnisse vor (Klasse 03). Ein Großteil der Messwerte stammt aus dieser Region (siehe auch Anhang A, Abbildung A 1). Der Median der Vertikalwinkel liegt bei $0,73^\circ$ der Median der Neigung in Strömungsrichtung in der Rhein-Main-Ebene bei $0,42^\circ$. Beide liegen im gleichen, für mittlere hydraulische Durchlässigkeiten scheinbar charakteristischen Bereich. Die Quartilabstände von $1,6^\circ$ und $0,53^\circ$ befinden sich ebenfalls in ähnlicher Größenordnung. Der geringere Quartilabstand in der Rhein-Main-Ebene kann dadurch begründet werden, dass nicht nur Messwertpaare verglichen wurden, sondern ca. 4 Mio. Neigungswerte in Richtung der Grundwasserströmung zwischen

den Maschen des Datenrasters. Das Datenraster ist Ergebnis einer am HLUG durchgeführten Interpolation bei der Anomalien in den Messwerten glättet wurden.

Im Festgesteinsbereich ist besonders der hohe Quartilabstand in der Durchlässigkeitsklasse 09 (mittel bis mäßig) und der daraus resultierende sehr große Schwellenwert α auffällig. Die Messwerte in dieser Klasse befinden sich hauptsächlich im Bereich tertiärer Vulkanite im Vogelsberg (siehe auch Anhang A, Abbildung A 2). Der Vogelsberg ist bekannt für seine komplizierte Stockwerksgliederung aus verschiedenen durchlässigen basaltischen Gesteinen und kompaktierten Tuffen, sowie schwebenden Grundwasserstockwerken und Zonen der durchgehenden Grundwassersättigung (Leßmann, Wiegand et al. 2001). Die starke Streuung scheint Ausdruck dieses komplizierten Aufbaues und der damit verbundenen Hydrodynamik zu sein.

Letztendlich ist ohne eine weitere Einzelfallbetrachtung nicht sicher entscheidbar, ob die niedrigere oder die höhere gemessene Druckhöhe in einem Messwertpaar fehlerbehaftet und damit ungeeignet ist. Deshalb wurden jeweils beide Messwerte eines Paares von der weiteren Verwendung ausgeschlossen. Im Lockergestein betrifft dies 1221 und im Festgestein 267 Messwerte. Insgesamt wurden damit weitere 1488 Messwerte (ca. 6 %) eliminiert, die anfangs im Datenbestand als plausibel eingeordnet waren.

4.6.4 Analyse der Messwerte im Lockergesteinsbereich

Für den gesamten Lockergesteinsbereich des Modellgebiets standen nach der erfolgreichen Zuordnung der Messwerte in den Bereich und der Plausibilitätsprüfung 18377 gemessene Druckhöhen zur Verfügung. Davon befinden sich lediglich 8251 außerhalb von Regionen, für die bereits Grundwassergleichenpläne existieren und außerhalb der Regionen, in denen die Höhenlage der Grundwasserdruckfläche aus der Bodenkarte abgeleitet werden kann (vgl. Abbildung 20). Folglich werden nur diese 8251 Stützpunkte für die räumliche Strukturanalyse und die Interpolation der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich herangezogen.

In Abschnitt 3.2.1 wurde bereits das Interpolationsverfahren für den Lockergesteinsbereich vorgestellt. Für die Interpolation wird ein lineares Semivarianz-Modell mit einem Anstieg von 0,08 verwendet. Das Variogramm ist in Abbildung 24 dargestellt.

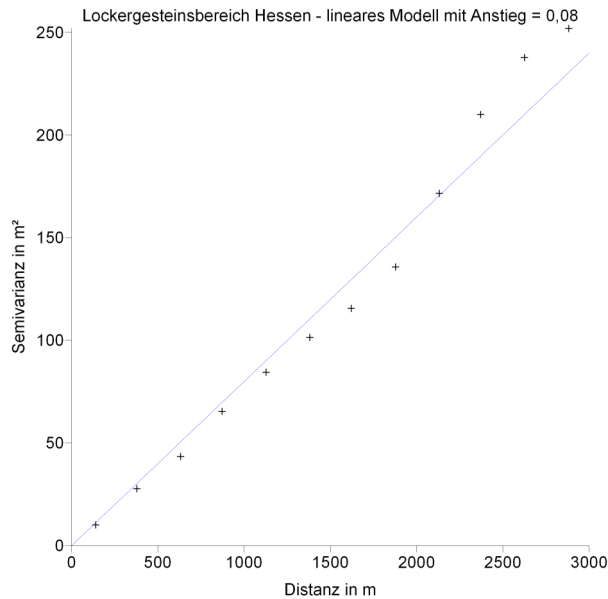


Abbildung 24: Experimentelles Variogramm und angepasstes lineares Semivarianz-Modell für die Interpolation im Lockergesteinsbereich.

4.6.5 Analyse der Messwerte im Festgesteinsbereich

In den Festgesteinsbereichen ist die Messwertdichte meistens so gering, dass eine konventionelle Interpolation zu keinen realistischen Ergebnissen führt. Aus diesem Grund wird im Festgesteinsbereich die Modellierung der Grundwasserdruckfläche auf Basis der Messwerte nach der im Abschnitt 3.3 erläuterten Methode durchgeführt.

Nach den ersten Aufbereitungsschritten stehen 6840 Messwerte im Festgesteinsbereich zur Verfügung. Darunter sind 1302 Quellen, die im Festgesteinsbereich methodisch gesehen einen Teil des Entwässerungsniveaus bilden und deshalb nicht weiter berücksichtigt werden müssen.

Ähnlich wie im Lockergesteinsbereich existieren auch im Festgestein Aggregationen von Messwerten (Abbildung 25). Dabei handelt es sich meist um intensiv wasserwirtschaftlich genutzte Standorte (Förderbrunnen) oder um Bergbaustandorte (Förderbrunnen und Erkundungsbohrungen). In Lockergesteinsgrundwasserleitern wird in Bereichen hoher Messwertdichte eine sehr genaue Abbildung der Grundwasserdruckfläche erreicht. Im Festgestein hingegen führen die Messwerte in solchen Aggregationen bei der Schätzung mittlerer hydraulischer Gradienten zu einer starken Übergewichtung einzelner kleiner Teilräume einer hydrogeologischen Einheit. Bei der Analyse individueller Grundwasserstromlinien ist das Ziel, Messwerte aus verschiedenen Bereichen des Verbreitungsgebietes einer Einheit für die Bestimmung der mittleren hydraulischen Gradienten heranzuziehen, die möglichst alle Entfernungsbereiche zum Entwässerungsniveau repräsentieren. Dies leitet sich aus der Grundidee der Methodik ab. Außerdem bilden die Messwerte in den Aggregationen häufig nicht die

natürlichen hydraulischen Verhältnisse ab. Die Ermittlung repräsentativer Messwerte als Ersatzwerte für die Flächen mit starken Aggregationen war aufgrund fehlender Detailinformationen nicht möglich. Aus diesen Gründen wurden die Messwerte im Bereich der Aggregationen bei der Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien nicht berücksichtigt.

Des Weiteren wurden einzelne Messwerte aus verschiedenen Gründen aus dem Kollektiv entfernt. Beispielsweise befinden sich in Nordhessen gegenwärtig Messwerte auf der im DHM abgebildeten Autobahn, die aus der Erkundung des Baugrundes vor dem Autobahnbau stammen. Durch die Autobahn wird nun jedoch ein mehrere Hundert Meter langer Fließweg quer zum Geländegradienten vorgegeben, der nicht den natürlichen Verhältnisse entspricht. Derartige Fließwege verfälschen die Analyse individueller Grundwasserstromlinien inakzeptabel.

Nach der weiteren Selektion aufgrund der genannten Faktoren standen für die Analyse der individuellen Grundwasserfließwege (vgl. Abschnitt 3.3.4) letztendlich 4450 Messwerte zur Verfügung.

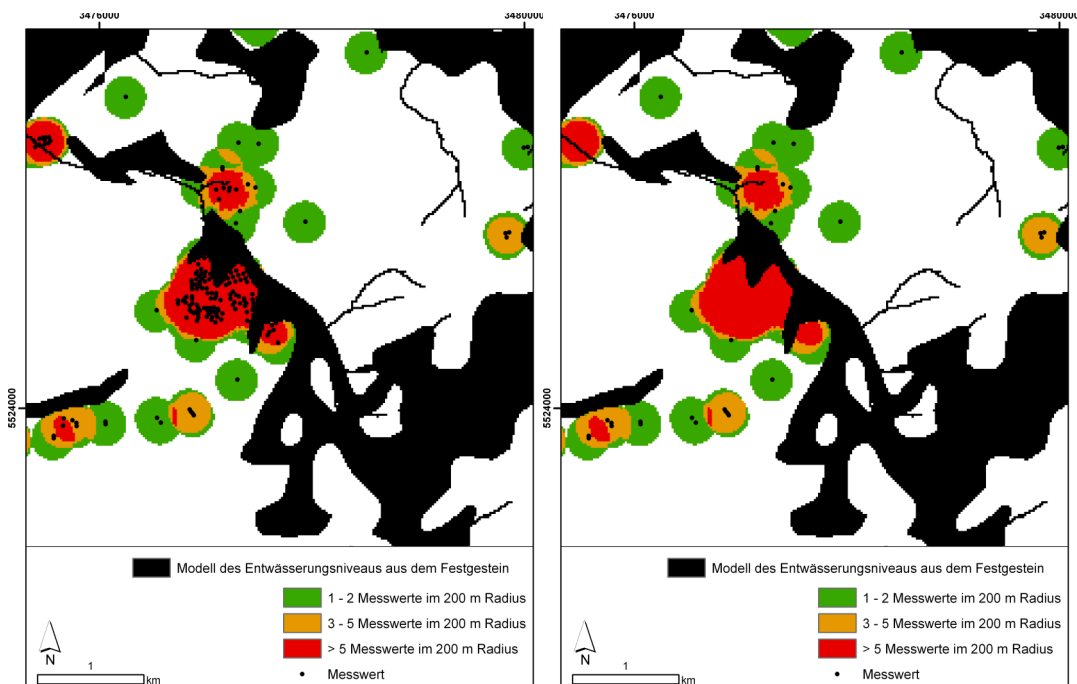


Abbildung 25: Beispiel für die Messwertdichte im Festgestein vor und nach erfolgter Auflösung der Messwert-Aggregationen. Das Beispiel zeigt eine Situation am Nordrand des Odenwaldes.

5. Modell der Grundwasserdruckfläche des Bundeslandes Hessen

Das Modell der Grundwasserdruckfläche setzt sich aus den Teilmodellen für den Locker- und Festgesteinsbereich zusammen. Die Ergebnisse aus beiden Arbeitsschritten werden in den Abschnitten 5.1 und 5.2 getrennt dargestellt. Anschließend werden im Abschnitt 5.3 die zusammengesetzten Modellteile in Form einer Karte der Grundwasserdruckfläche des Bundeslandes Hessen und des Grundwasserflurabstands im Bundesland Hessen präsentiert, so wie sie als flächendeckende Datengrundlage für die Modellierung von mittleren Verweilzeiten des Wassers in der ungesättigten und gesättigten Zone dienen. Abschließend werden im Abschnitt 5.4 die Ergebnisse eines ersten Validierungsschrittes gezeigt und diskutiert.

5.1 Modell der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich

Entsprechend der Gliederung des Modells in Locker- und Festgesteinsbereiche finden sich in Lockergesteinsgrundwasserleitern modellierte Druckhöhen von den Tieflagen im Oberrheingraben bis in die Höhenlagen der Mittelgebirge. Abbildung 26 zeigt das Modell der Grundwasserdruckfläche im Lockergestein und Abbildung 27 zeigt die daraus für alle 36 hydrogeologischen Einheiten des Lockergesteinsbereiches abgeleiteten Grundwasserflurabstände (jeweils in Form einer Übersichtskarte).

Das Modell im Lockergesteinsbereich kann im Rahmen dieser Arbeit nicht in allen Details diskutiert werden, weil damit unweigerlich auch eine Diskussion von lokalen Einzelbeispielen einhergeht, was nicht Ziel dieser Arbeit war und auch nicht der Zielstellung des Modells entspricht. Hauptsächlichere Verwendungszweck des Modells ist es, eine Datenbasis für die großräumige Modellierung von Verweilzeiten des Sickerwassers und des (oberflächennahen) Grundwassers im ersten Grundwasserleiter zu liefern. Daher wird hier kurz auf 4 Typen der Verteilung der Flurabstände in den hydrogeologischen Einheiten des Lockergesteinsbereiches eingegangen, die eine erste Abschätzung der zu erwartenden Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone erlauben.

Die 4 Typen hydrogeologischer Einheiten im Lockergesteinsbereich unterscheiden sich in der empirischen Häufigkeitsverteilung aller für einzelne Maschen modellierten Flurabstände. In Tabelle 10 sind die statistischen Kennwerte für die 6 Beispielinheiten *Holozäne Auensedimente* (Typ 1), *Pleistozäne Terrassenkiese und -sande* (Typ 2), *Pleistozäne Terrassenkiese und -sande (Rhein-Main-Ebene)* (Typ 2), *Flugsande/Dünen* (Typ 3), *Miozäne Tone/Schluffe/Sande/Mergel* (Typ 4) sowie für *Tertiäre Sande/Kiese/Schluffe (Westhessische Senke)* (Typ 4) angegeben. Die Verbreitungsflächen der Einheiten sind in einer Karte im Anhang A, Abbildung A 3 dargestellt.

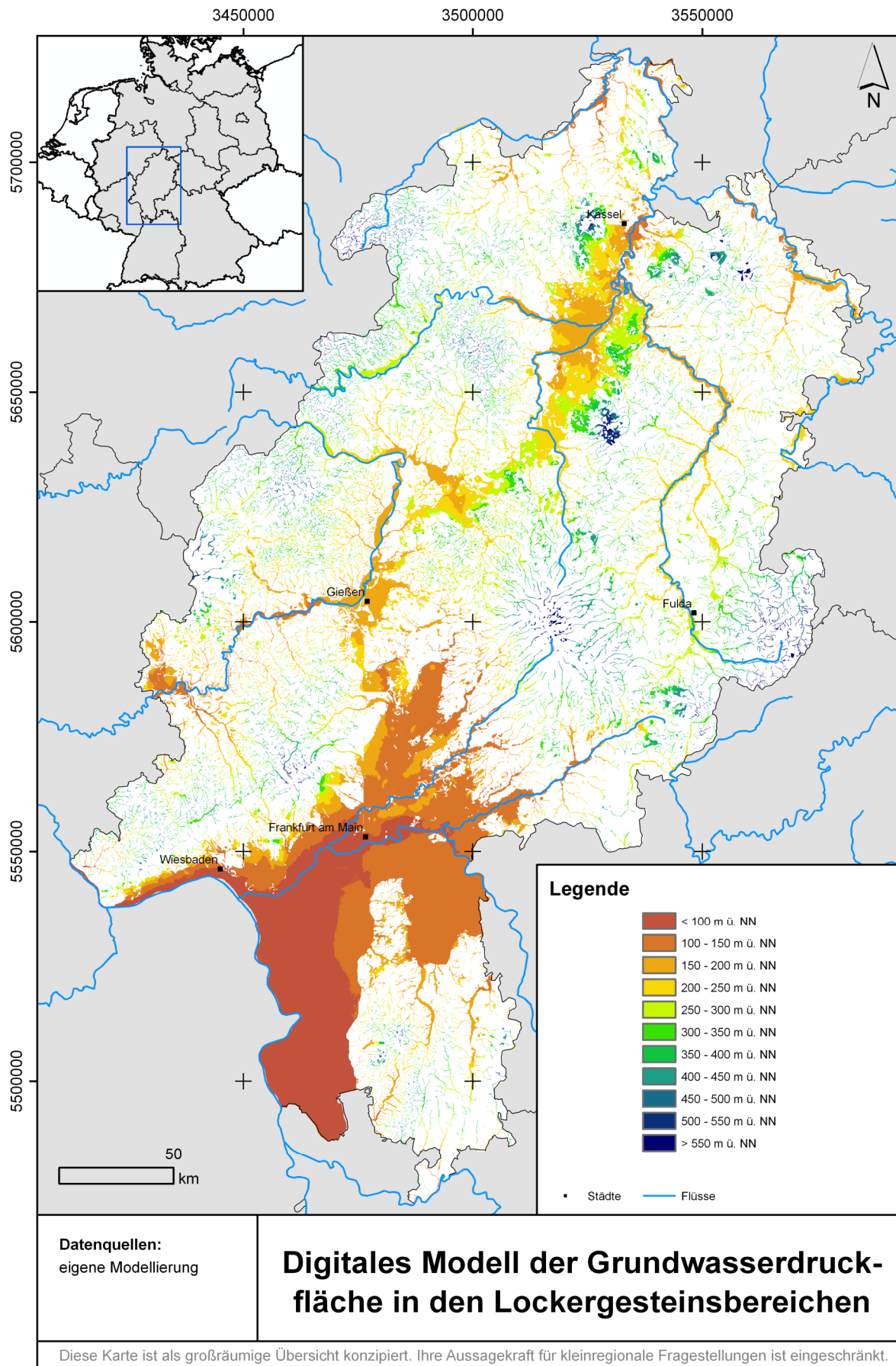


Abbildung 26: Digitales Modell der Grundwasserdruckfläche in den Lockergesteinsbereichen.

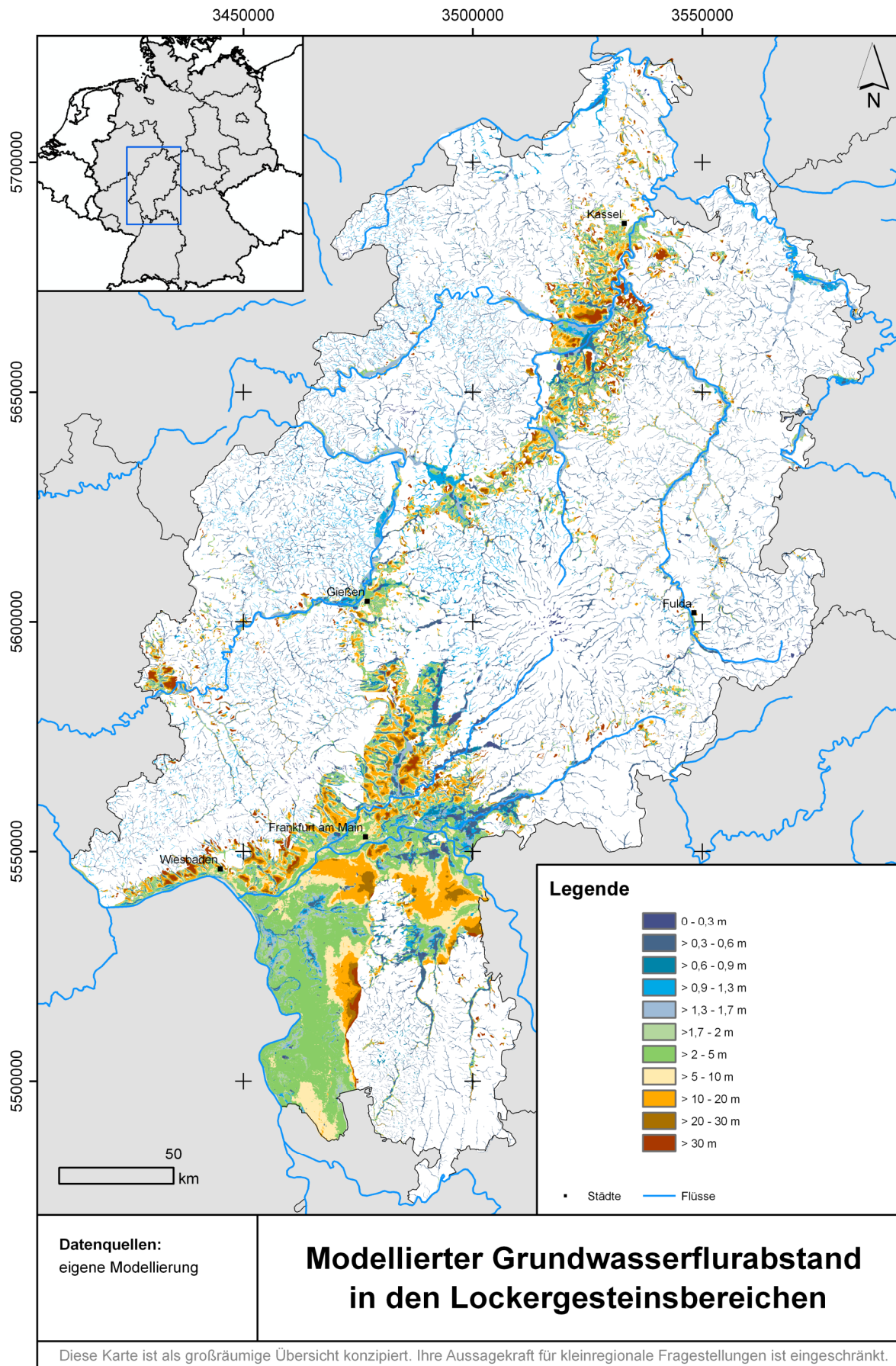


Abbildung 27: Modellierter Grundwasserflurabstand in den Lockergesteinsbereichen.

Die empirische Häufigkeitsverteilung der Flurabstände ist in fast allen Einheiten rechtsschief (Abbildung 28 bis Abbildung 31). Eine Ausnahme bilden nur flächenmäßig sehr kleine Einheiten ohne Anbindung an die Vorflut, die jedoch vernachlässigt werden können. Der hohe Anteil geringer Flurabstände in fast allen Einheiten ist darin begründet, dass in Vorflutnähe Entlastungsgebiete vorhanden sind. Interessant und für die räumliche Analyse der mittleren Verweilzeiten bedeutsam ist jedoch der Flächenanteil mit mittleren und hohen Flurabständen. Darin unterscheiden sich die im Folgenden erläuterten Typen deutlich. Hohe Flurabstände bedeuten bei gleicher Bodenart eine längere Verweilzeit als geringe Flurabstände. Auf Verbreitungsflächen bindiger Bodenarten ist bei gleichem Flurabstand die Verweilzeit höher als im Bereich rolliger Bodenarten. Dies ist in der unterschiedlichen Feldkapazität der Bodenarten begründet sowie in einer möglichen stauenden Wirkung, die bindige Schichten auf die Vertikalbewegung des Sickerwassers ausüben können.

Tabelle 10: Statistische Kennzahlen der Verteilung der Grundwasserflurabstände in ausgewählten hydrogeologischen Einheiten in Hessens Lockergesteinsbereichen. ($Q_{0,5}$ = Median, $Q_{0,25}$ = 0,25-Quantil, $Q_{0,75}$ = 0,75-Quantil, \bar{z} = arithmetischer Mittelwert, alle in m).

Hydrogeologische Einheit	Fläche in km ²	$Q_{0,5}$	$Q_{0,25}$	$Q_{0,75}$	\bar{z}
Typ 1					
Holozäne Auensedimente	40	1,6	1,2	1,9	2,0
Typ 2					
Pleistozäne Terrassenkiese und -sande	334	1,6	1,6	6,3	6,0
Pleistozäne Terrassenkiese und -sande (Rhein-Main-Ebene)	1596	3,9	2,5	7,0	6,1
Typ 3					
Flugsande, Dünen	158	5,5	2,0	11,5	7,5
Typ 4					
Miozäne Tone, Schluffe, Sande, Mergel	608	6,3	2,2	13,9	9,6
Tertiäre Sande, Kiese und Schluffe (Westhessische Senke)	324	6,5	2,3	14,8	10,8

Für die Auensedimente (Typ 1, Abbildung 28) sind generell relativ kurze Fließwege des Grundwassers und geringe Flurabstände typisch. Im Verbreitungsgebiet der Einheit *Holozäne Auensedimente* wurden mittlere Flurabstände von ca. 2 m modelliert. Der Median liegt bei ca. 1,6 m und in ca. 75% der Maschen des Modellrasters wurden für die *Holozäne Auensedimente* Flurabstände kleiner als ca. 1,9 m berechnet. Bei mittleren bis mäßigen Durchlässigkeiten in dieser Einheit sind aufgrund der geringen Flurabstände auch geringe mittlere Verweilzeiten des Sickerwassers zu erwarten.

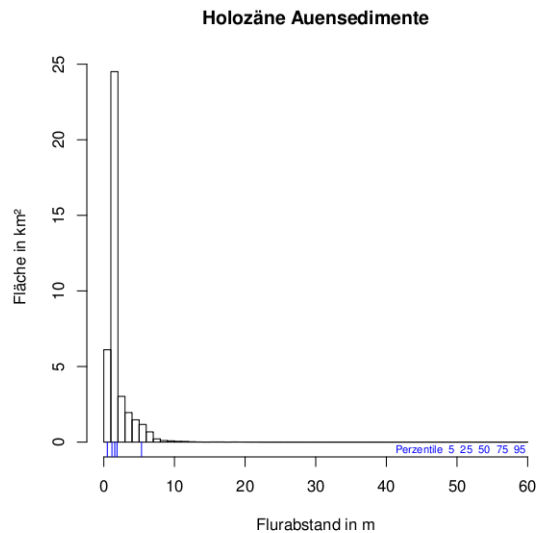


Abbildung 28: Verteilung der Grundwasserflurabstände für *Holozäne Auensedimente*.

Auf den Verbreitungsflächen pleistozäner Terrassenkiese und Sande (Typ 2, Abbildung 29) sind die mittleren Flurabstände deutlich größer als im Bereich der vorflutnah liegenden Auensedimente. Der Median befindet sich bei ca. 5 m, insgesamt wurden für etwa 75% der Maschen Flurabstände größer als 2 m modelliert. Der Quartilsabstand, als Maß für die Breite der Verteilung, ist mit ca. 5 m ebenfalls deutlich größer als im Bereich der Auen. Bei mittlerer Durchlässigkeit in der Rhein-Main-Ebene und mittel bis mäßiger Durchlässigkeit im Bereich der Niederhessischen Senke sind aufgrund der größeren Flurabstände für die ungesättigte Zone höhere Verweilzeiten als in den Auensedimenten zu erwarten.

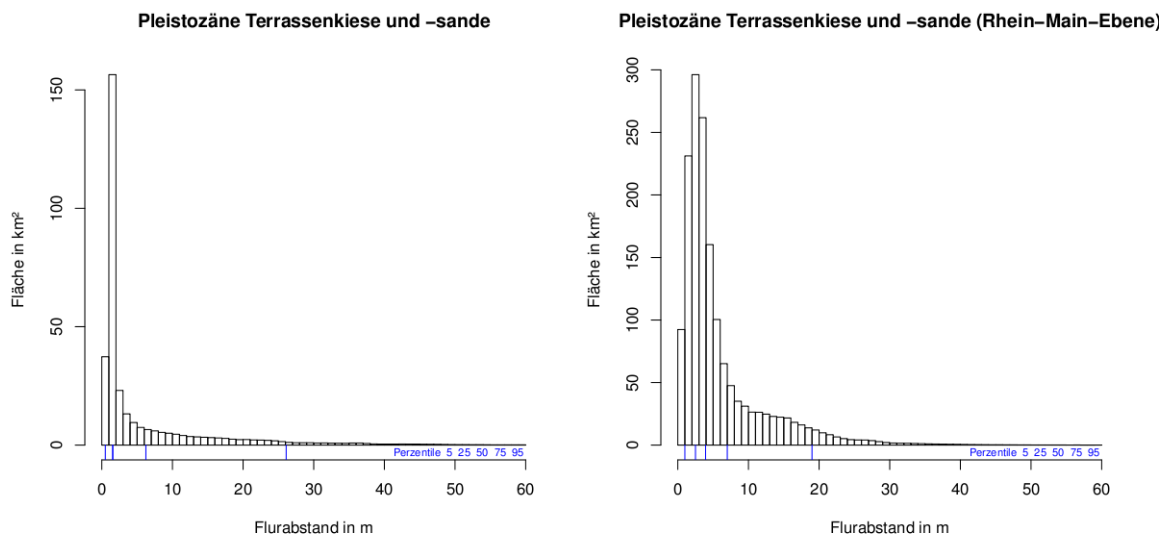


Abbildung 29: Verteilung der Grundwasserflurabstände für *Pleistozäne Terrassenkiese und -sande* und *Pleistozäne Terrassenkiese und -sande (Rhein-Main-Ebene)*. Die Flurabstands-Achse ist auf 60 m limitiert dargestellt.

Die Verbreitung von Flugsanden und Dünen (Typ 3, Abbildung 30) ist in Hessen auf weniger als 200 km² beschränkt. Die entsprechenden hydrogeologischen Einheiten weisen ebenfalls mittlere bis mäßige Durchlässigkeiten auf. Der mittlere Grundwasserflurabstand beträgt ca. 7,5 m. Die Verteilung der Flurabstände ist breiter als im Bereich der Terrassenkiese und -sande. Ein Quartilsabstand von ca. 10 m ist charakteristisch. Ein relativ großer Teil der Einheit ist wahrscheinlich eher als Transit- oder Neubildungsgebiet des Grundwassers einzustufen. Aufgrund der verbreitet höheren Grundwasserflurabstände ist eine gegenüber den Terrassenkiese und -sandem längere mittlere Verweilzeit zu erwarten.

Flugsande, Dünen

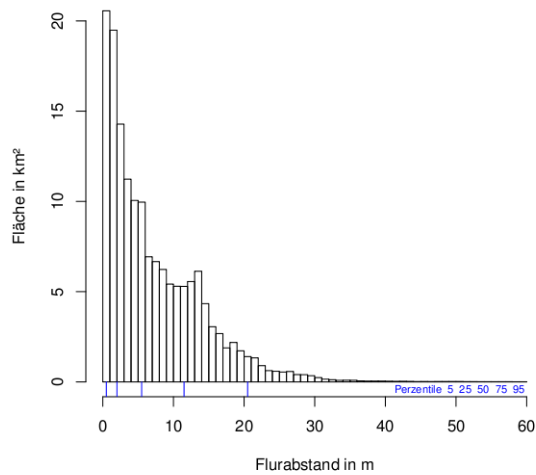
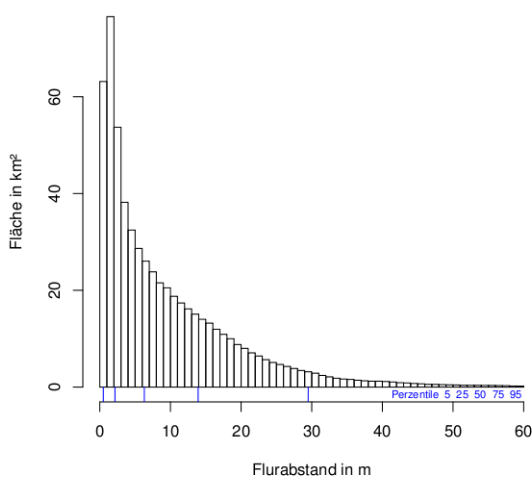


Abbildung 30: Verteilung der Grundwasserflurabstände für *Flugsande/Dünen*.

Im Verbreitungsgebiet der tertiären Ablagerungen (Typ 4, Abbildung 31) sind häufig auch bindige Schichten vorhanden. Die Einheit *Miozäne Tone/Schluffe/Sande/Mergel* ist beispielsweise in der HÜK 200 als gering durchlässig verzeichnet. Eher mittel bis mäßig durchlässig sind jedoch die tertiären Sande, Kiese und Schluffe der Niederhessischen Senke. Für beide sind mittlere Flurabstände von ca. 10 m modelliert worden. Die Verteilung der Flurabstände in diesen beiden Einheiten ist nochmals deutlich breiter als die der anderen Typen. Der Median liegt bei über 6 m, der Quartilsabstand beträgt mehr als 10 m. Aufgrund der im Mittel verhältnismäßig großen Flurabstände und der eher bindigen Bodenarten sind die mittleren Verweilzeiten des Sickerwassers im Bereich dieses Typs wahrscheinlich am höchsten.

Miozäne Tone, Schluffe, Sande, Mergel



Tertiäre Sande, Kiese und Schluffe (Westhessische Senke)

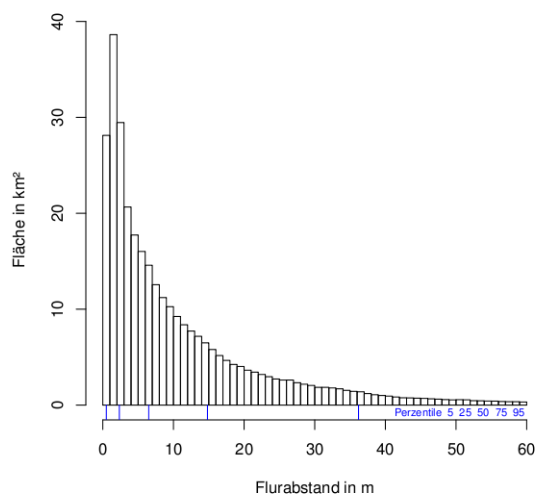


Abbildung 31: Verteilung der Grundwasserflurabstände für *Miozäne Tone/Schluffe/Sande/Mergel* und *Tertiäre Sande/Kiese/Schluffe (Westhessische Senke)*. Die Flurabstands-Achse ist auf 60 m limitiert dargestellt.

5.2 Modell der Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich

Die Vorgehensweise zur Modellierung einer flächendeckenden Grundwasserdruckfläche in den hessischen Festgesteinsbereichen wurde bereits in Abschnitt 3.3 beschrieben. Auf Basis des Modells des Entwässerungsniveaus, des Modells der Grundwasserfließrichtung und empirisch abgeleiteter mittlerer hydraulischer Gradienten für einzelne hydrogeologische Einheiten wurden Grundwasserdruckhöhen für alle Maschen im Bereich des Festgesteins nach Gl. 3.4 geschätzt. Die Gliederung in hydrogeologische Einheiten basiert auf den digitalen Karten HÜK 200 und GÜK 300 und ist in Abbildung 17 dargestellt.

5.2.1 Modellierte mittlere hydraulische Gradienten

Für die 76 in Hessen verbreiteten Einheiten wurden die individuellen Grundwasserstromlinien von den verfügbaren – und für die Analyse geeigneten – Messwerten bis zum Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgesteinsbereich ausgewertet. Für 48 Einheiten konnten mittlere hydraulische Gradienten auf die in der Methodenbeschreibung (Abschnitt 3.3) erläuterte empirische Weise bestimmt werden. Die Ergebnisse sind für alle Einheiten in Tabelle 11 (am Ende des Abschnittes) aufgelistet. Im Anhang B sind für alle Einheiten die Analyseergebnisse abgebildet.

Die Anzahl der in die Schätzung der Gradienten eingegangenen Messwerte variiert stark. Für die hinsichtlich ihrer Verbreitungsfläche großen Einheiten sind meist genügend viele Messwerte verfügbar. Für 16 Einheiten konnte die Regressionsanalyse jedoch nur auf Basis von 5 oder weniger Messwerten durchgeführt werden. Der abgebildete Zusammenhang ist für diese Einheiten folglich nur sehr bedingt vertrauenswürdig, auch weil keine sinnvollen Angaben zur statistischen Signifikanz gemacht werden können. Auf eine Abbildung wurde jedoch nicht verzichtet, um die teilweise dünne Datenlage sowie die daraus resultierenden Ergebnisse und Unsicherheiten zu dokumentieren.

Auf den Verbreitungsflächen von insgesamt 28 Einheiten waren keine geeigneten Messwerte vorhanden. Es handelt sich dabei entweder um Flächen kleiner als 10 km², um hydrogeologische Einheiten von geringer wasserwirtschaftlicher Bedeutung (z.B. im Rheinischen Schiefergebirge) oder um Einheiten die als Grundwassergeringleiter bekannt sind. Dies ist beispielsweise im nordhessischen Buntsandsteingebiet vereinzelt der Fall. Dort wird im Raum Kassel die Einheit *Oberer Buntsandstein - Fulda/Diemel* allgemein als Grundwassergeringleiter angesehen, der die eigentlich wasserwirtschaftlich wichtigen Einheiten des Mittleren Buntsandsteins überdeckt. Für diesen Bereich des Oberen Buntsandsteins wurde deshalb mit einem für den Mittleren Buntsandstein ermittelten Gradient ein realistischeres Resultat erzielt. An dieser Stelle ist regional-hydrogeologisches Erfahrungswissen eingegangen.

Für die übrigen 27 Einheiten ohne Analyseergebnis wurden mittlere hydraulische Gradienten auf Basis der Zuordnung in eine der Durchlässigkeitsklassen geschätzt (in der HÜK 200 sind diese verzeichnet). Dazu wurde der Mittelwert aller empirisch gewonnenen Gradienten der Einheiten berechnet, die entsprechend der HÜK 200 ähnliche Durchlässigkeiten aufweisen. Diese geschätzten Gradienten wurden den Einheiten ohne Analyseergebnis entsprechend ihrer Durchlässigkeit zugewiesen.

Aus den Einzelanalysen der 48 Einheiten, für die mittlere Gradienten abgeleitet werden konnten, können Schlussfolgerungen zu den generellen Durchlässigkeitsverhältnissen der Einheiten gemacht werden. Außerdem sind Aussagen möglich, welche Datengrundlagen und Modellprämissen in Einzelfällen zu weniger realistischen Gradienten geführt haben. Dazu folgen mehrere Beispiele.

In Abbildung 32 sind die Analyseergebnisse für zwei Einheiten, bestehend aus tertiären Vulkaniten, dargestellt. Für die Einheit *Tertiäre basaltische Vulkanite - Basalt Niederhess. Senke* wurde ein relativ steiler mittlerer Gradient von ca. 0,08 berechnet, die Einheit gilt daher als eher gering durchlässig. Der ermittelte Zusammenhang zwischen Höhendifferenzen und Entfernung zum Entwässerungsniveau kann als relativ gut eingeschätzt werden. Darauf deutet der hohe Korrelationskoeffizient und die relativ gleichmäßige Verteilung entlang der Regressionsgeraden ohne den Hinweis auf zwei zu unterscheidende Kollektive hin. Das Residuum ist relativ groß. Dies ist durch die aufgrund der zunehmenden Unsicherheiten größere Streuung der Werte im Bereich der mittleren und großen Entfernungen vom Entwässerungsniveau begründbar. Für diese Einheit scheinen alle Modellannahmen relativ realistisch zu sein.

Demgegenüber sind im Bereich der Verbreitung der Einheit *Tertiäre basaltische Vulkanite - Basalt und Varietäten Vogelsberg und Wetterau* entweder die Annahmen zur Grundwasserfließrichtung oder die Datengrundlagen weniger realistisch. Auf Basis der Informationen aus den hydrogeologischen Kartenwerken konnte keine weitere Untergliederung der Einheit vorgenommen werden. Das Analyseergebnis zeigt jedoch die Möglichkeit an, dass die Verhältnisse aus zwei verschiedenen hydrogeologischen Einheiten abgebildet sind. In einer Einheit würde demnach eine relativ gute Durchlässigkeit bei geringem Gradienten vorherrschen, in der anderen eine weniger gute Durchlässigkeit bei steilerem Gradient. Eine weitere Möglichkeit ist ein in Teilen unrealistisches Modell der Grundwasserfließrichtung, das dazu führt, dass im Modell teilweise andere Vorfluter im radialen Flussnetz des Vogelsberges angeströmt werden, als in der Realität. Aufgrund der bereits erläuterten komplizierten Stockwerksgliederung des Vogelsberges (Leßmann, Wiegand et al. 2001) erscheinen beide Möglichkeiten plausibel.

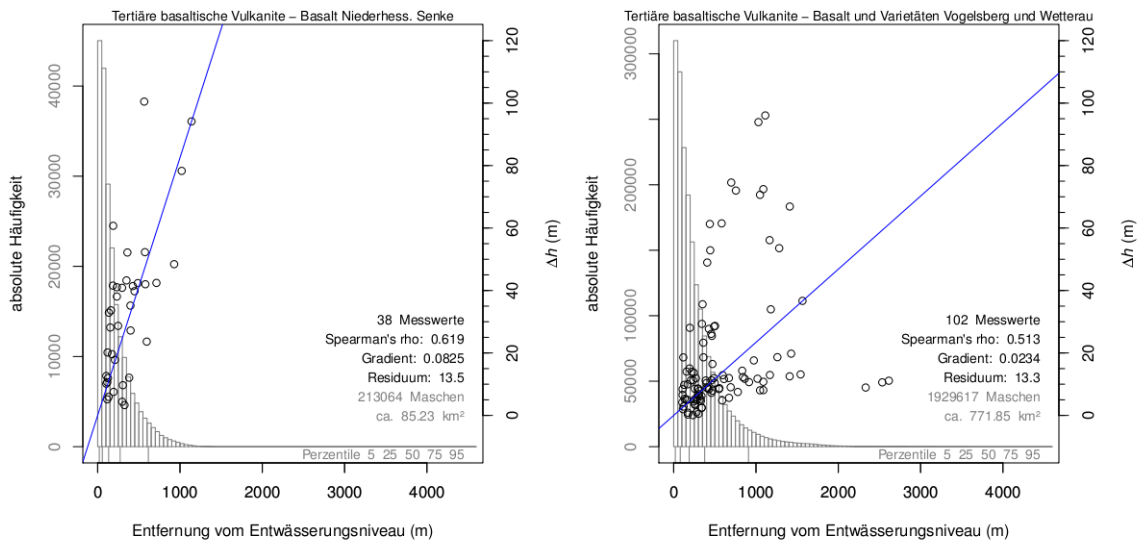


Abbildung 32: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte tertiäre Vulkanite.

Eine Gliederung in zwei hydrogeologische Einheiten anhand der Geologie war bei den *Unterdevonischen Tonschiefern und Sandsteinen* möglich. Die Analyseergebnisse sind in Abbildung 33 dargestellt. Für das Gebiet des westlichen Taunus konnte ein eigener mittlerer Gradient ermittelt werden. Im Osttaunus und Westerwald sind laut den Angaben in der HÜK 200 ebenfalls die *Unterdevonischen Tonschiefer und Sandsteine* verbreitet. In diesem Teil sind wahrscheinlich Ergebnisse aus zwei verschiedenen durchlässigen Bereichen in die Analyse eingeflossen, wobei der Bereich mit geringerer Durchlässigkeit eher den Verhältnissen im Westtaunus ähnlich zu sein scheint. Auf Basis der Kartenwerke konnte jedoch keine weitere Gliederung der Einheit vorgenommen werden.

Für eine Vielzahl hydrogeologischer Einheiten konnten ohne weitere Aufgliederung plausible Gradienten ermittelt werden, die im guten Einklang mit der in der HÜK 200 vorgenommene Zuweisung von Durchlässigkeitsklassen stehen. Beispielsweise ist für die aus teilweise verkarsteten Grundwasserleitern bestehende Einheit *Zechstein (ungegliedert)* ein geringer (flacher) Gradient berechnet worden (Abbildung 34). Für die als sehr gering durchlässig eingestufte Einheit *Unterkarbonische Tonsteine; Kulm-Tonschiefer* konnte ebenfalls ein plausibler relativ großer (steiler) Gradient geschätzt werden. In dieser Einheit findet eventuell eine Grundwasserbewegung nur in der oberen verwitterten und zerrütteten Zone statt. Anzeichen dafür, dass in diesem Bereich unrealistische Modellannahmen und Datengrundlagen bestehen, sind nicht erkennbar.

Als weitere Beispiele sind in Abbildung 35 die Analyseergebnisse für die in Nordhessen sowie im östlichen Odenwald weit verbreiteten Einheiten des Buntsandsteins dargestellt. Bis auf die *Solling-Folge* sind die Gradienten und die Anpassung der Regressionsgeraden zufriedenstellend. Es sind keine deutlichen Hinweise für unrealistische Datengrundlagen erkennbar.

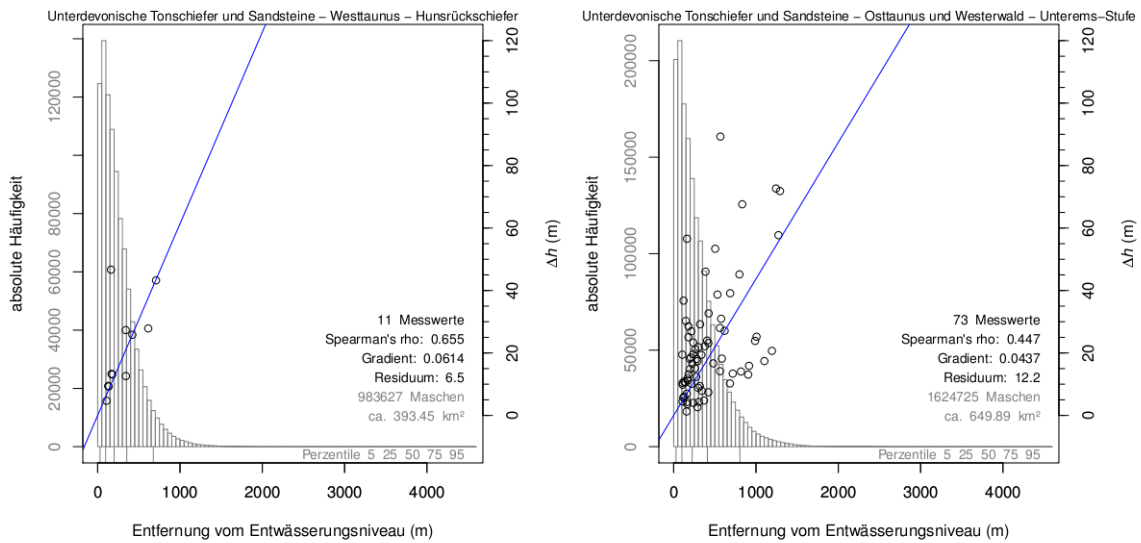


Abbildung 33: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für die hydrogeologische Einheit Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine im Taunus.

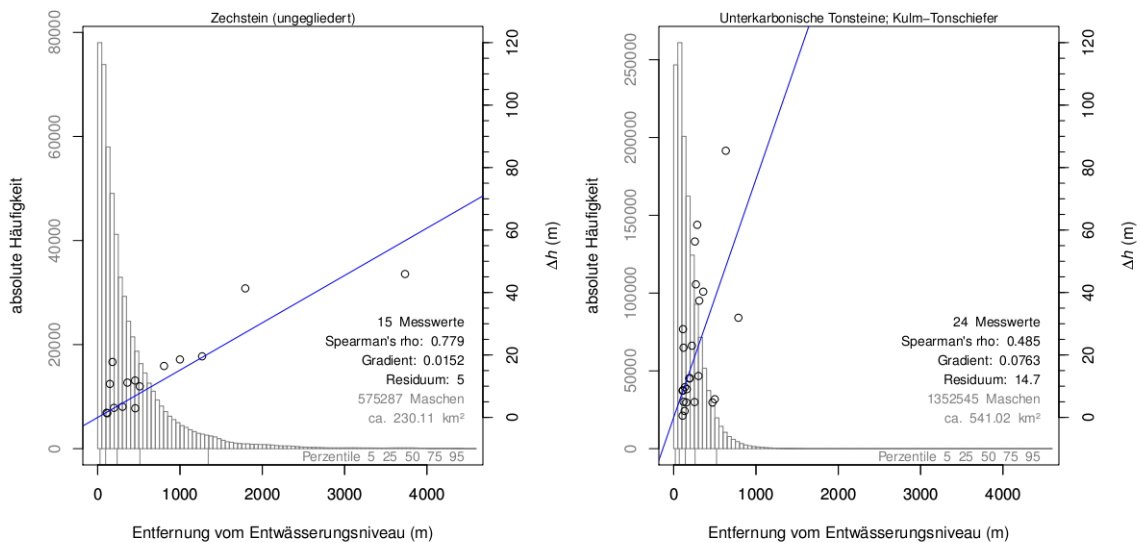


Abbildung 34: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte paläozoische Einheiten.

Für das Verbreitungsgebiet der *Solling-Folge* resultiert jedoch eine Punktwolke, die keine signifikante Anpassung einer Regressionsgeraden erlaubt (Abbildung 35 rechts oben). Für Einheiten mit derartigen Analyseergebnissen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass in diesem Bereich das Modell der Grundwasserfließrichtung wenig realistisch ist. Die *Solling-Folge* wird verbreitet als mäßig durchlässiger (nach HÜK 200), wasserwirtschaftlich jedoch bedeutsamer Grundwasserleiter angesehen. Der Teil der Punktwolke unterhalb der Regressionsgeraden zeigt einen geringen Gradienten an, der mit der mäßigen Durchlässigkeit im Einklang stehen würde. Der Teil weit oberhalb der Geraden spricht für einen unplat-

sibel steilen Gradienten bei geringer Durchlässigkeit. Nur deutlich größere Entfernungen zum Entwässerungsniveau würden für diese Messwerte zu plausiblen Ergebnissen führen.

Das Analyseergebnis stützt damit die unter den Regionalhydrogeologen in Hessen weit verbreitete Erkenntnis (mündliche Mitteilung von J.-G. Fritsche, HLUg), dass im Verbreitungsgebiet mehrerer Buntsandstein-Folgen die Fließrichtung des Grundwassers nicht auf die kleinsten Fließgewässer, sondern eher auf die Hauptvorfluter der Region gerichtet ist. Nur allein aus dem digitalen Modell der Geländehöhe kann in diesem Fall keine flächendeckend realistische Fließrichtung abgeleitet werden.

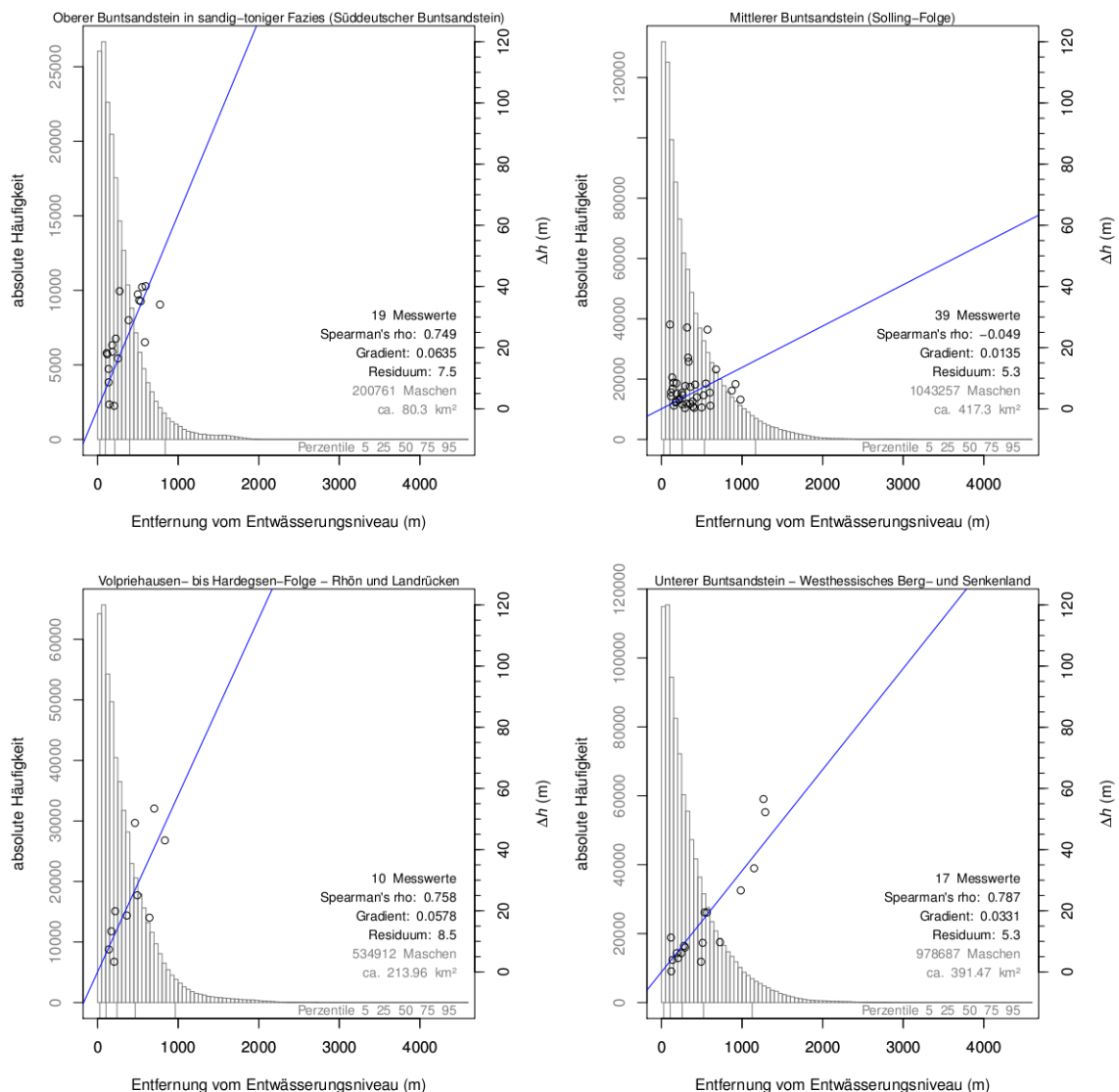


Abbildung 35: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte Einheiten des Buntsandsteins.

In Abbildung 36 sind die für die großräumige Schätzung der Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich des Bundeslandes Hessen verwendeten mittleren hydraulischen Gradienten dargestellt. In den Teilen des Rheinischen Schiefergebirges dominieren hydrogeologische Einheiten mit geringen bis sehr geringen Durchlässigkeiten. Dies steht im guten Ein-

klung mit den relativ steilen Gradienten im Bereich zwischen 0,05 und 0,1 (entspricht einer Neigung der Grundwasserdruckfläche zwischen 1:20 und 1:10). Lokal vorkommende Kalksteine, wie zum Beispiel die Einheit *Givet- bis Adorf-Massenkalk* weisen jedoch auch mittlere Durchlässigkeiten auf.

Im Süden Hessens ist die Zweiteilung des Odenwaldes in den westlichen kristallinen Bereich mit geringer bis äußerst geringer Durchlässigkeit und steilen Gradienten sowie in den östlichen triasischen Bereich mit eher mäßiger bis geringen Durchlässigkeit gut erkennbar.

Im Gebiet des zentral in Hessen gelegenen Vogelsberg dominieren mittlere bis mäßige Durchlässigkeiten und damit vergleichsweise geringe hydraulische Gradienten im Bereich zwischen 0,02 bis 0,04. Deutlich werden auch Bereiche mit steileren Gradienten größer als 0,4. Dies ist begründet im Bau aus einer Wechselfolge grundwasserleitender und grundwassergeringleitender Schichten (vgl. Leßmann, Wiegand et al. 2001). Grundwassergeringleitend sind zum Beispiel die feinkörnigen Vulkaniklastite. Gute Wasserwegsamkeiten sind beispielsweise in den Topbrekzien der Lavaströme vorhanden.

In den hessischen Buntsandsteingebieten im Norden und Nordosten dominieren mäßig bis geringe Durchlässigkeiten und damit Gradienten im Bereich zwischen 0,02 und 0,06. Einzelne Einheiten weisen flache Gradienten auf. Dabei handelt es sich um Einheiten mittlerer Durchlässigkeit, wie zum Beispiel die *Soling-Folge* im Mittleren Buntsandstein oder teilweise verkarstete Einheiten wie zum Beispiel *Zechstein (ungegliedert)*.

In Abbildung 37 ist die räumliche Verteilung der Residuen aus der Regressionsanalyse dargestellt. Große Residuen bedeuten dabei eine größere Unsicherheit über die wirkliche Höhenlage der Grundwasserdruckfläche. Für die Bereiche mit relativ steilen Gradienten wirkt sich jedoch eine geringe Fehleinschätzung der Entfernung zum Entwässerungsniveau stärker auf das Residuum aus, als in Bereichen mit geringen Gradienten. Die Residuen bieten ebenfalls Ansatzpunkte, in welchen Regionen Potential für eine Präzisierung der Datengrundlagen (Messwerte, Hydrogeologische Karte) sowie die Modellannahmen (Modell der Grundwasserfließrichtung) besteht.

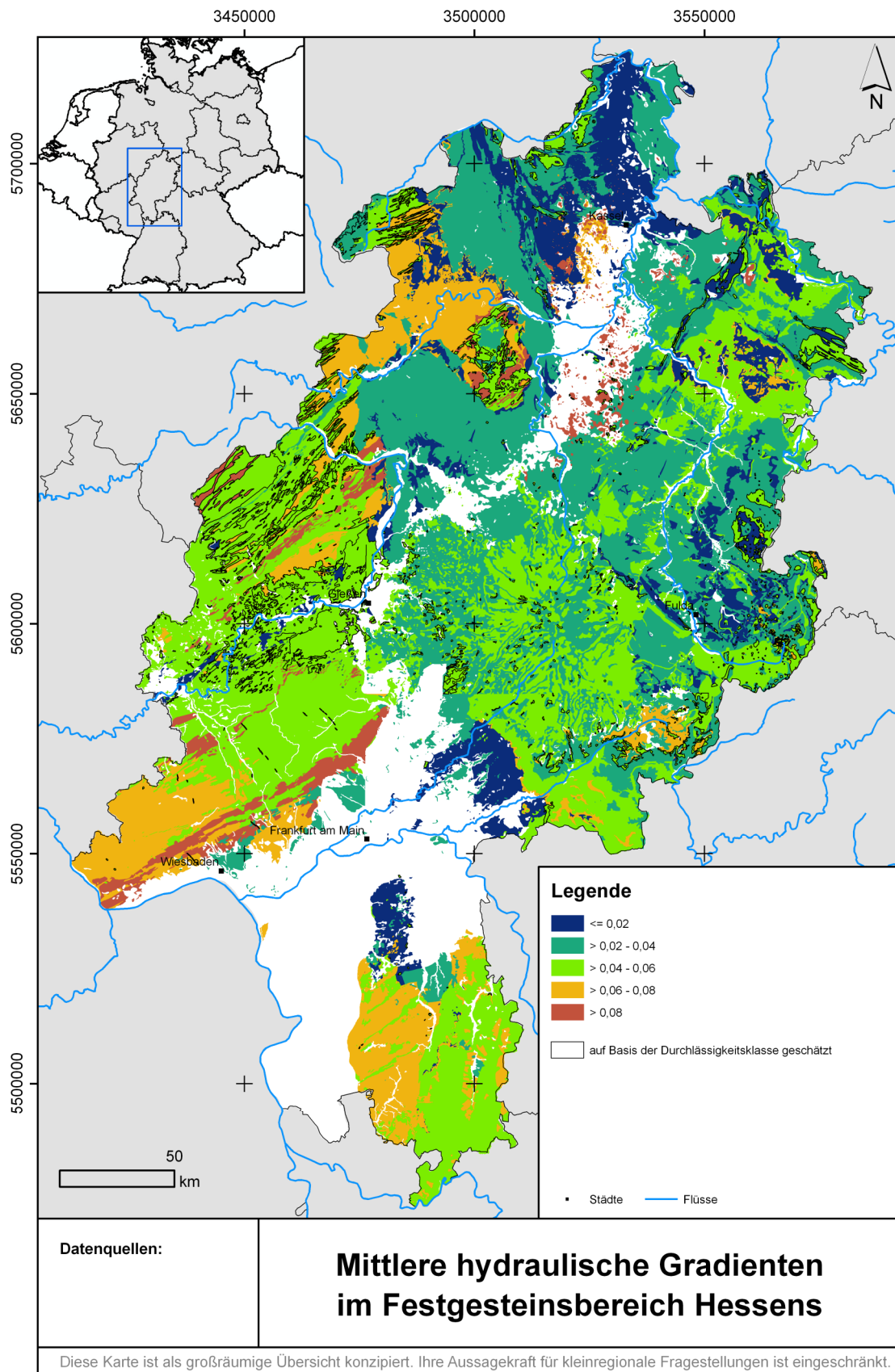


Abbildung 36: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten in den hessischen Festgesteinsgrundwasserleitern.

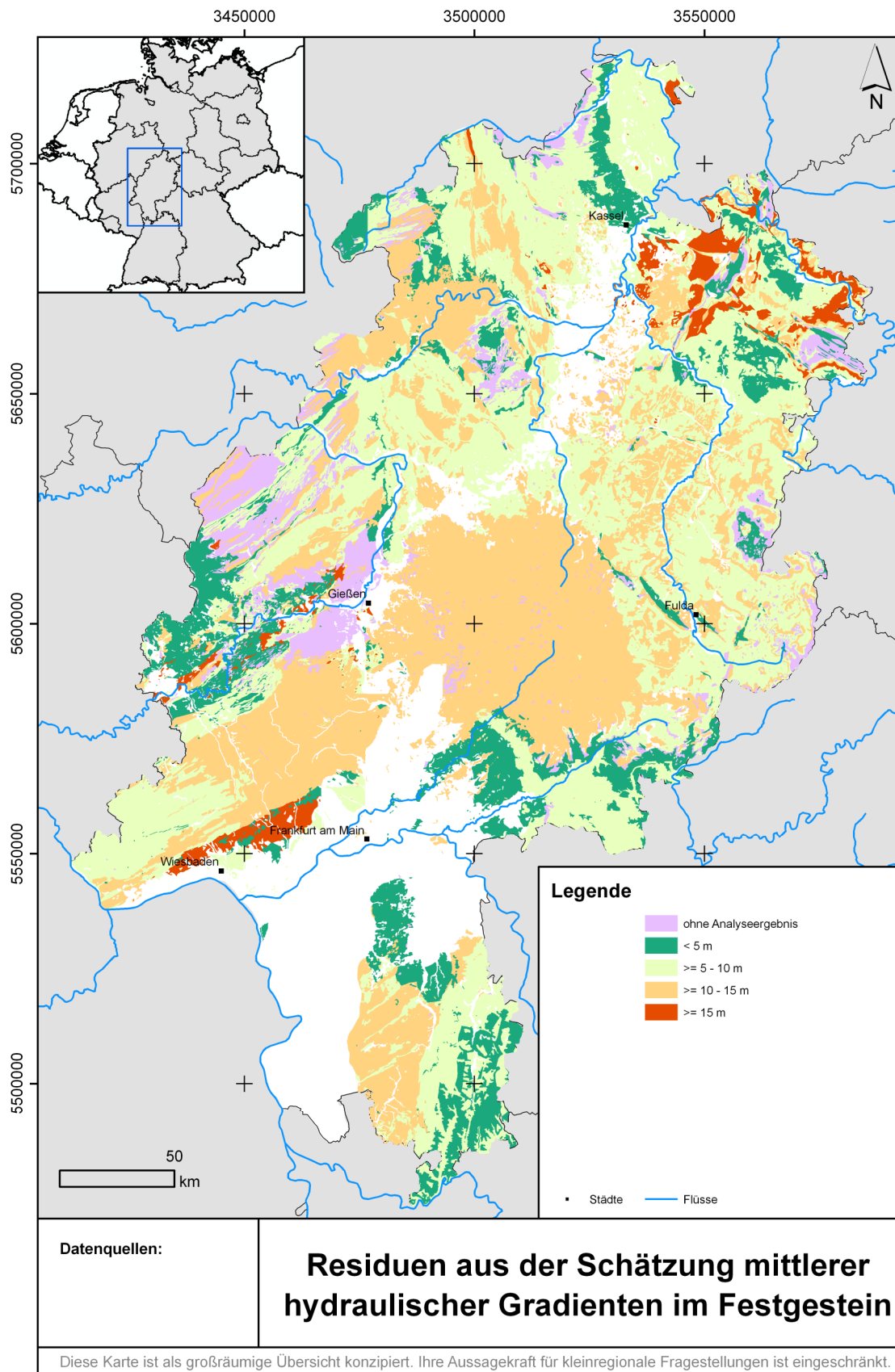


Abbildung 37: Residuen aus der Schätzung mittlerer hydraulischer Gradienten in den hessischen Festgesteinsgrundwasserleitern.

Tabelle 11: Ergebnisse der Analyse individueller Grundwasserstromlinien und die resultierenden mittleren hydraulischen Gradienten für den Bereich der 76 aus der HÜK 200 abgeleiteten hydrogeologischen Festgesteinseinheiten Hessens. $grad h_{emp}$ - empirisch ermittelte mittlere hydraulische Gradienten, $grad h_{ges}$ - auf Basis der Durchlässigkeitsklasse geschätzte Gradienten, $Q_{0,5}$ - Median der modellierten Flurabstände in m und \bar{z} - arithmetischer Mittelwert der modellierten Flurabstände in m im Verbreitungsgebiet der jeweiligen Einheit.

Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit	Fläche in km ²	$grad h_{emp}$	$grad h_{ges}$	Messpunkte pro km ²	$Q_{0,5}$	\bar{z}
Tertiäre Sedimentgesteine						
Miozänes Kalktertiär	66,91	0,033		1,405	3	6
Tertiäre Vulkanite						
Tertiäre alkalibasaltische Tuffe des Westerwaldes	8,6		0,049	0	17	21
Tertiäre basaltische Vulkanite - Alkalibasaltische Gesteine Vogelsberg und Wetterau	1003,92	0,047		0,056	13	20
Tertiäre basaltische Vulkanite - Basalt Niederhess. Senke	126,6	0,083		0,3	23	33
Tertiäre basaltische Vulkanite - Basalt und Varietäten Vogelsberg und Wetterau	931,94	0,023		0,109	8	14
Tertiäre basaltische Vulkanite (Mitteldeutsches Bruchschollenland)	1,22		0,054	0	18	34
Tertiäre basaltische Vulkanite (Odenwald, Sprendlinger Horst)	1,08		0,054	0	4	10
Tertiäre basaltische Vulkanite (Rhön)	55,15		0,044	0	51	59
Tertiäre Basalttuffe (Niederhess. Senke, Rhön)	49,97	0,068		0,12	21	31
Tertiäre Basalttuffe (Vogelsberg und Wetterau)	60,64		0,049	0	6	15
Tertiäre bis quartäre Alkalibasalte und Phonolithe des Westerwaldes	199,26	0,05		0,035	9	16
Fortsetzung ...						

Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit	Fläche in km ²	grad h_{emp}	grad h_{ges}	Messpunkte pro km ²	$Q_{0,5}$	\bar{z}
Kreide						
Weißpläner (Oberes Turon)	0,03		0,047	0	55	55
Jura						
Lias	3,8	0,05		0,526	8	13
Keuper						
Gipskeuper und Schilfsandstein (ungegliedert)	5,72	0,019		0,35	9	12
Keuper (ungegliedert)	11,25		0,024	0	4	8
Lettenkeuper	59,77	0,012		0,084	12	20
Mittlerer Keuper (ungegliedert)	37,83	0,009		0,079	9	16
Rhätkeuper-Schichten	4,81		0,036	0	5	10
Steinmergelkeuper	1,13		0,044	0	3	9
Muschelkalk						
Mittlerer Muschelkalk	78,57		0,054	0	20	32
Muschelkalk (ungegliedert)	27,4	0,017		0,109	17	26
Oberer Muschelkalk	0,09		0,036	0	66	68
Oberer Muschelkalk Kuppenrhön und Ceratitenschichten (mo2), Trochitenkalk (mo1)	123,83		0,054	0	22	32
Wellenkalk, Terebratelbank (Unterer Muschelkalk)	406,61	0,027		0,022	29	38
Oberer Buntsandstein						
Oberer Buntsandstein - Fulda/Diemel	276,07		0,014	0,221	9	13
Fortsetzung ...						

Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit	Fläche in km ²	grad h_{emp}	grad h_{ges}	Messpunkte pro km ²	$Q_{0,5}$	\bar{z}
Oberer Buntsandstein - Mittel- und Osthessen	331,87	0,038		0,16	8	18
Oberer Buntsandstein in sandig-toniger Fazies (Süddeutscher Buntsandstein)	131,16	0,063		0,145	13	25
Mittlerer Buntsandstein						
Detfurth- und Hardeggen-Folge	911,62	0,026		0,019	30	36
Mittlerer Buntsandstein	40,88		0,047	0	24	41
Mittlerer Buntsandstein (Solling-Folge)	617,76	0,014		0,063	22	31
Mittlerer Buntsandstein außer Solling-Folge (Süddeutscher Buntsandstein)	252,26	0,057		0,008	46	54
Mittlerer Buntsandstein in sandig-toniger Fazies	182,27	0,037		0,027	39	44
Volpriehausen- bis Hardeggen-Folge - Nordosthessen	293,75	0,039		0,075	37	43
Volpriehausen- bis Hardeggen-Folge - Rhön und Landrücken	259,06	0,058		0,039	15	23
Volpriehausen- bis Hardeggen-Folge - Schwalm-Einzugsgebiet	368,01	0,02		0,049	15	21
Volpriehausen-Folge	817,56	0,033		0,043	23	29
Unterer Buntsandstein						
Unterer Buntsandstein - Osthessisches Bergland	672,51	0,056		0,025	15	22
Unterer Buntsandstein - Westhessisches Berg- und Senkenland	466,4	0,033		0,036	14	18
Unterer Buntsandstein (Süddeutscher Buntsandstein)	556,96	0,055		0,043	34	41
Unterer Buntsandstein (Süddeutscher Buntsandstein) - Reinheimer Hügelland	44,21	0,024		0,045	7	11
Fortsetzung ...						

Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit	Fläche in km ²	grad h_{emp}	grad h_{ges}	Messpunkte pro km ²	$Q_{0,5}$	\bar{z}
Zechstein						
Bröckelschiefer-Folge (z8), silikatisch	136,09	0,061		0,073	11	17
Permisch-Triassische Konglomerate	60,51	0,04		0,116	6	8
Zechstein (ungegliedert)	326,47	0,015		0,046	17	24
Zechstein in karbonatischer Fazies	1,79		0,044	0	13	17
Rotliegend						
Oberrotliegend Konglomerate, Sand- und Schluffsteine	20,76	0,066		0,096	12	16
Rotliegend Sand-, Schluff-, und Tonsteine, Mergel- und Kalksteine - Sprendlinger Horst	93,3	0,018		0,236	3	6
Rotliegend Sand-, Schluff-, und Tonsteine, Mergel- und Kalksteine - südöstliche Wetterau	160,88	0,018		0,124	11	15
Saure, intermediäre und basische Vulkanite, Rotliegend (Sprendlinger Horst)	14,11	0,038		0,283	4	8
Unterkarbonische Sedimentgesteine						
Oberkarbonische Arkosen, Schluff- und Sandsteine	0,01		0,049	0	27	27
Paläozoische Schiefer, Kalksteine, Sandsteine und Diabase	23,46		0,054	0	8	16
Unterkarbonische Ton- und Kieselschiefer, Kalksteine, Alaunschiefer	74,34		0,044	0	26	33
Unterkarbonische Ton- und Kieselschiefer; Kulm-Grauwacke	107,77	0,098		0,037	13	21
Fortsetzung ...						

Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit	Fläche in km ²	grad h_{emp}	grad h_{ges}	Messpunkte pro km ²	$Q_{0,5}$	\bar{z}
Unterkarbonische Tonsteine; Kulm-Tonschiefer	592,2	0,076		0,041	11	18
Unterkarbonische Magmatite						
Granite des Kristallinen Vorspessarts und Odenwaldes (ungegliedert)	379,61	0,069		0,071	14	22
Metamorphe Einheiten des Kristallinen Vorspessarts und Odenwaldes (ungegliedert)	142,57	0,049		0,056	18	25
Unterkarbonische Vulkanite						
Intermediäre bis basische Vulkanite	231,76		0,047	0	24	29
Devonische Sedimentgesteine						
Devonische Tonschiefer, Mergel- und Sandsteine	656,12	0,052		0,035	14	20
Givet- bis Adorf-Massenkalk	48,66	0,018		0,062	14	19
Mitteldevonische Quarzite und quarzitisches Sandsteine	1,18		0,044	0	74	68
Mitteldevonische Ton- und Schluffsteine	44,15	0,024		0,091	28	42
Mitteldevonische Tonschiefer und Sandsteine	59,97	0,027		0,05	29	39
Oberdevon (sandig-tonig)	0,46		0,044	0	10	15
Oberdevonische Kalk- und Tonsteine	2,59		0,049	0	6	9
Oberdevon-unterkarbonische Schiefer und Sandsteine	201,75		0,049	0	9	13
Unterdevonische Quarzite	275,29	0,099		0,04	15	27
Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine – Nordwesterwald und Süderbergland	105,66		0,049	0	20	27
Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine – Westtaunus - Hunsrückschiefer	426,04	0,061		0,026	21	30
Fortsetzung ...						

Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit	Fläche in km ²	grad h_{emp}	grad h_{ges}	Messpunkte pro km ²	$Q_{0,5}$	\bar{z}
Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine – Osttaunus und Westerwald - Unterems-Stufe	715,72	0,044		0,102	15	22
Devonische Metamorphite						
Oberproterozoisch- devonische Metapelite und -vulkanite	73,58	0,07		0,027	15	22
Paläozoischer Gangquarz	2,32		0,047	0	20	24
Devonische Vulkanite						
Basische (– intermediäre) devonisch-karbonische Metavulkanite des Lahn-Dill-Gebietes	199,68	0,051		0,01	14	20
Altpaläozoische Sedimentgesteine						
Graptolithenschiefer	0,76		0,054	0	5	6
Ordovizischer Sandstein	0,05		0,049	0	10	11
Altpaläozoische Metamorphite						
Oberproterozoisch- altpaläozoische Metakarbonate (ungegliedert)	0,44		0,049	0	11	17
Ordovizische Metapelite und -vulkanite	26,94	0,021		0,297	14	27
Silurische Metavulkanite	38,31	0,162		0,052	5	9

5.2.2 Räumliche Verteilung der Grundwasserdruckhöhen und Grundwasserflurabstände

In Abbildung 38 und Abbildung 39 sind die Grundwasserdruckfläche im Festgestein sowie die daraus abgeleiteten Grundwasserflurabstände dargestellt. Im Rahmen der flächendeckenden Schätzung der Grundwasserdruckhöhen wurden aufgrund der bestehenden Unsicherheiten in den Datengrundlagen und Modellannahmen negative Flurabstände auf einem Flächenanteil von ca. 5% des Festgesteinsbereiches erzeugt. Diese wurden im Rahmen der leichten Glättung der Druckfläche mit *Ordinary Kriging* korrigiert (vgl. Abschnitt 3.3.5).

Große mittlere Flurabstände über 30 m sind für Gebiete mit relativ großen Entfernungen zum Entwässerungsniveau charakteristisch. Diese Situation ist in den meisten Hochlagen der Mittelgebirgsbereiche Hessens gegeben. In den Vorländern der Mittelgebirge und den Übergängen zu den Lockergesteinsgebieten sind die Flurabstände geringer. Hier sind Werte zwischen 5 und 20 m charakteristisch.

Die mittleren Grundwasserflurabstände (Gebietsmittel) einer hydrogeologischen Einheit sind einerseits abhängig von ihrer Durchlässigkeit, andererseits aber auch vom Relief, der Höhenlage der Grundwasserleiter (beispielsweise in den Hochlagen der Mittelgebirge oder in deren Vorländern) und von den mittleren Entfernungen zum Entwässerungsniveau. Zwei Teilverbreitungsgebiete einer Einheit können deshalb unterschiedliche mittlere Flurabstände aufweisen. In Tabelle 11 sind die Mediane und die arithmetischen Mittelwerte der Verteilung der Flurabstände in allen modellierten Einheiten angegeben. Eine Gliederung in Typen, wie sie im Lockergesteinsbereich noch ansatzweise möglich ist, erscheint für den Festgesteinsbereich jedoch nicht sinnvoll zu sein.

5.3 Grundwasserdruckfläche für das gesamte Modellgebiet

Im letzten Arbeitsschritt wurden die mit zwei verschiedenen Methoden abgeleiteten, hinsichtlich negativer Flurabstände korrigierten und geglätteten Druckhöhen der Locker- und Festgesteinsbereiche zur großflächigen Grundwasserdruckfläche zusammengesetzt. Die beiden Teilbereiche sind über das Modell des Entwässerungsniveaus hydraulisch verbunden. Die Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen das Modell und die daraus abgeleiteten Grundwasserflurabstände, so wie sie im Rahmen der Verweilzeitanalyse als Datenbasis Verwendung fanden (siehe dazu Kunkel & Wendland 2010).

In Abbildung 42 sind für drei Beispielgebiete mit Verbreitungsflächen von Locker- und Festgestein die resultierenden Flurabstände und die 20-m-Isohypsen dargestellt. Die beiden Gleichenpläne im Gebiet des Taunus und Spessarts stellen typische Ergebnisse für die hessischen Mittelgebirge und ihre Vorländer dar. Die Grundwasserbewegung ist in der Regel auf die Vorflut gerichtet. Sichtbar werden zudem Anomalien im Modell der Grundwasserdruckfläche. Es existieren beispielsweise lokal Scharungen von Isolinien mit teilweise sehr geringem Abstand zueinander. Diese Scharungen sind deutliche Hinweise auf die Notwendigkeit einer lokalen Präzisierung der Datengrundlagen.

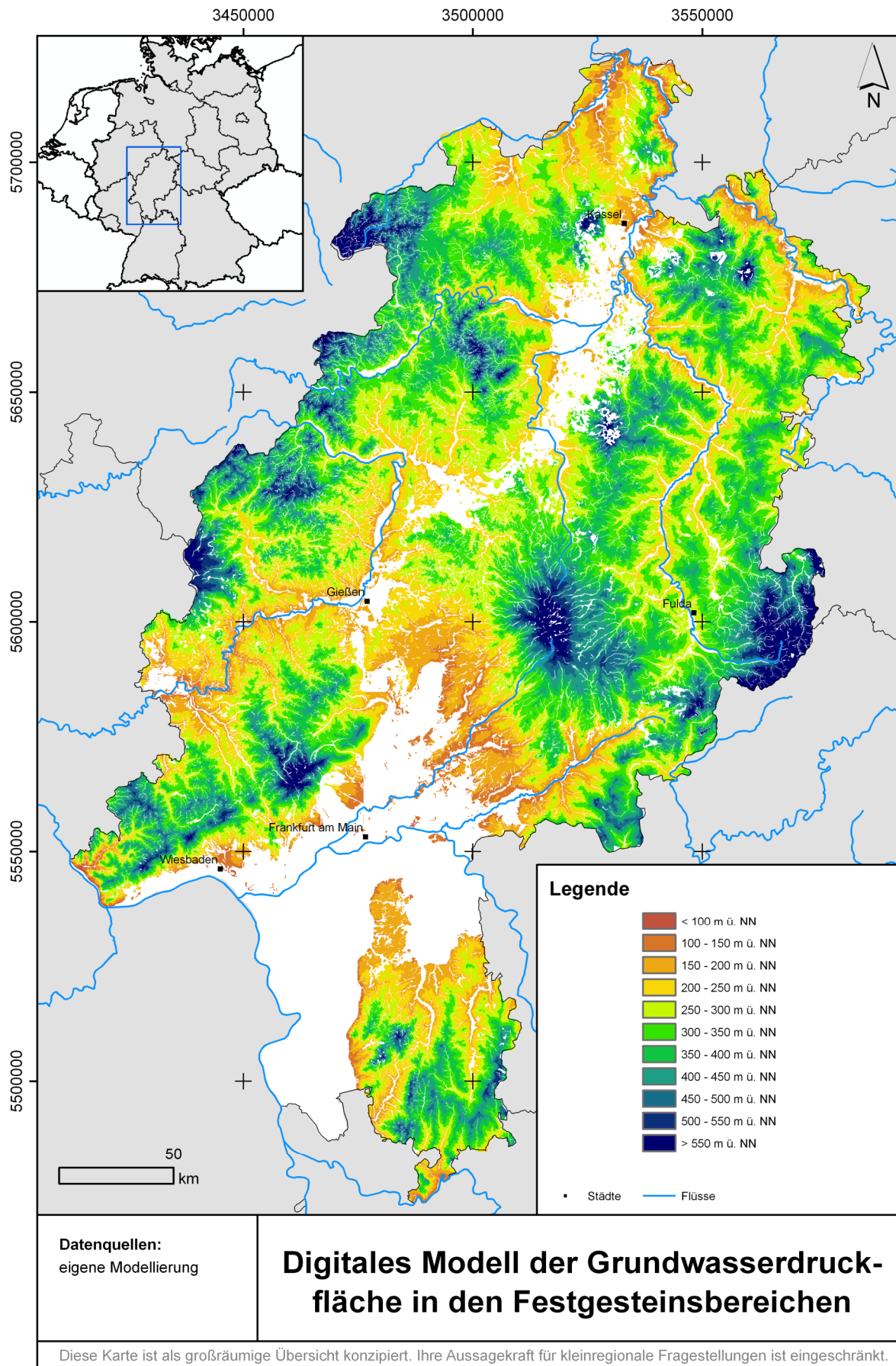


Abbildung 38: Digitales Modell der Grundwasserdruckfläche in den Festgesteinsbereichen.

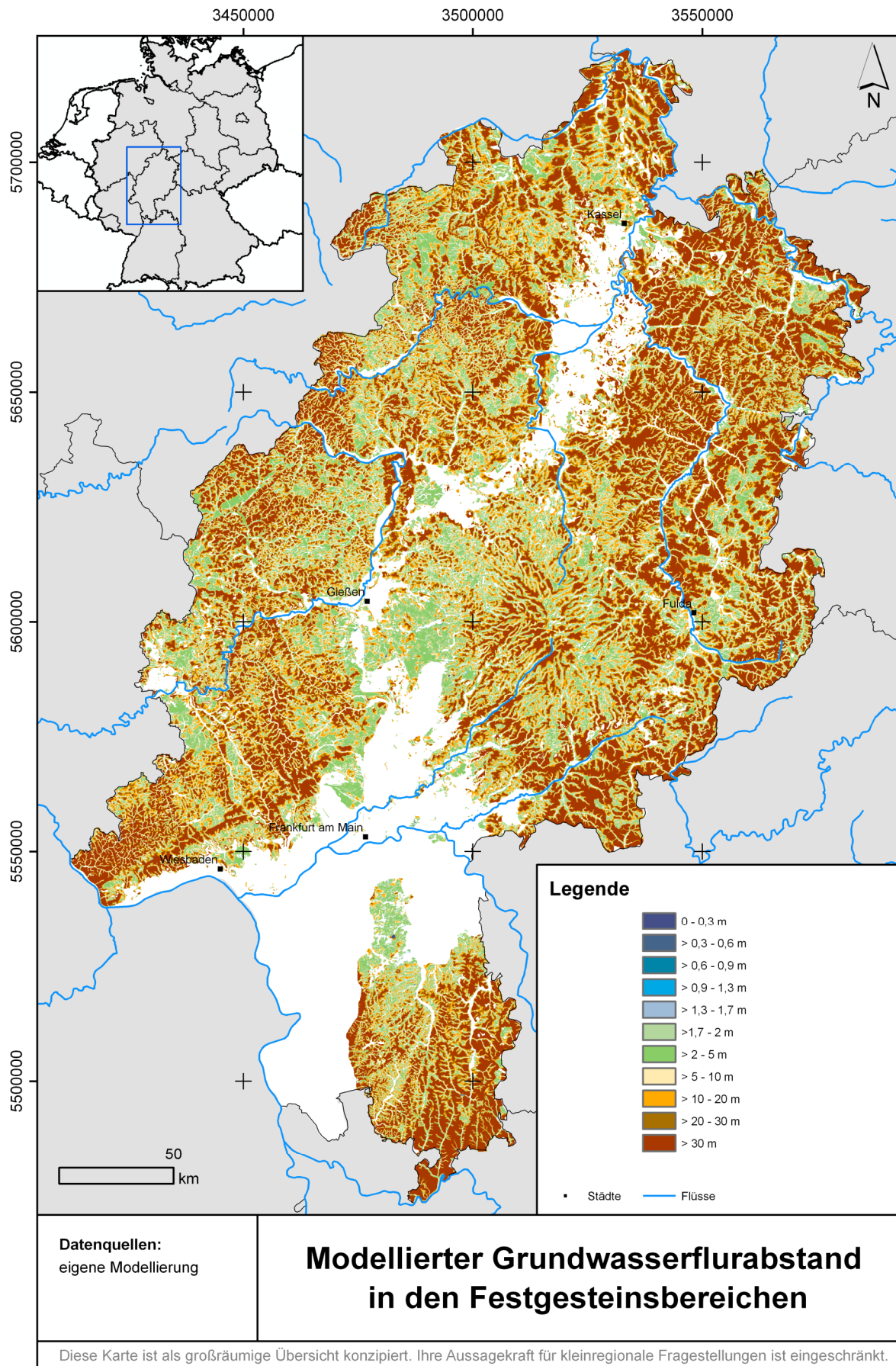


Abbildung 39: Modellierter Grundwasserflurabstand in den Festgesteinsbereichen.

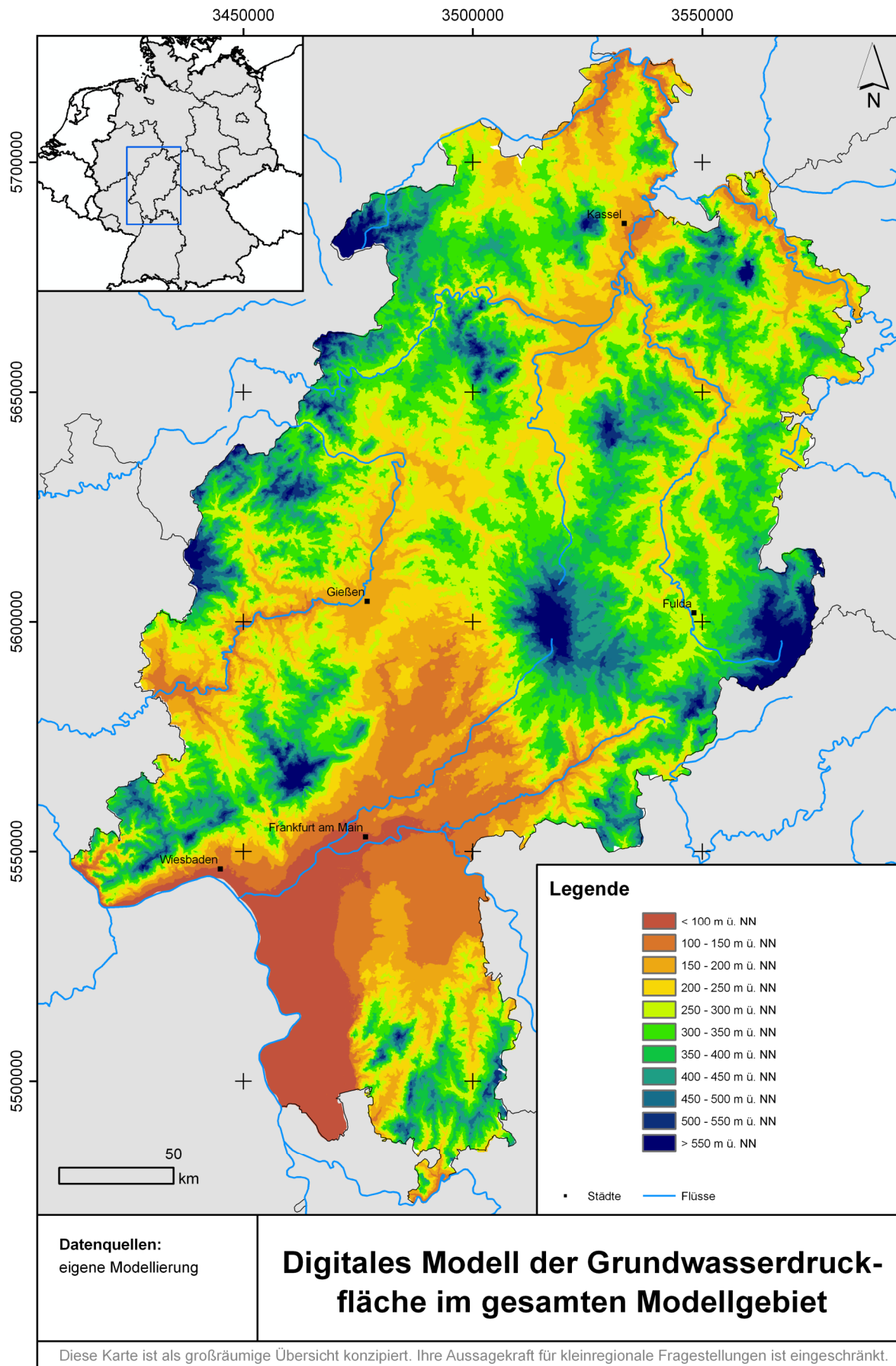


Abbildung 40: Digitales Modell der Grundwasserdruckfläche im gesamten Modellgebiet.

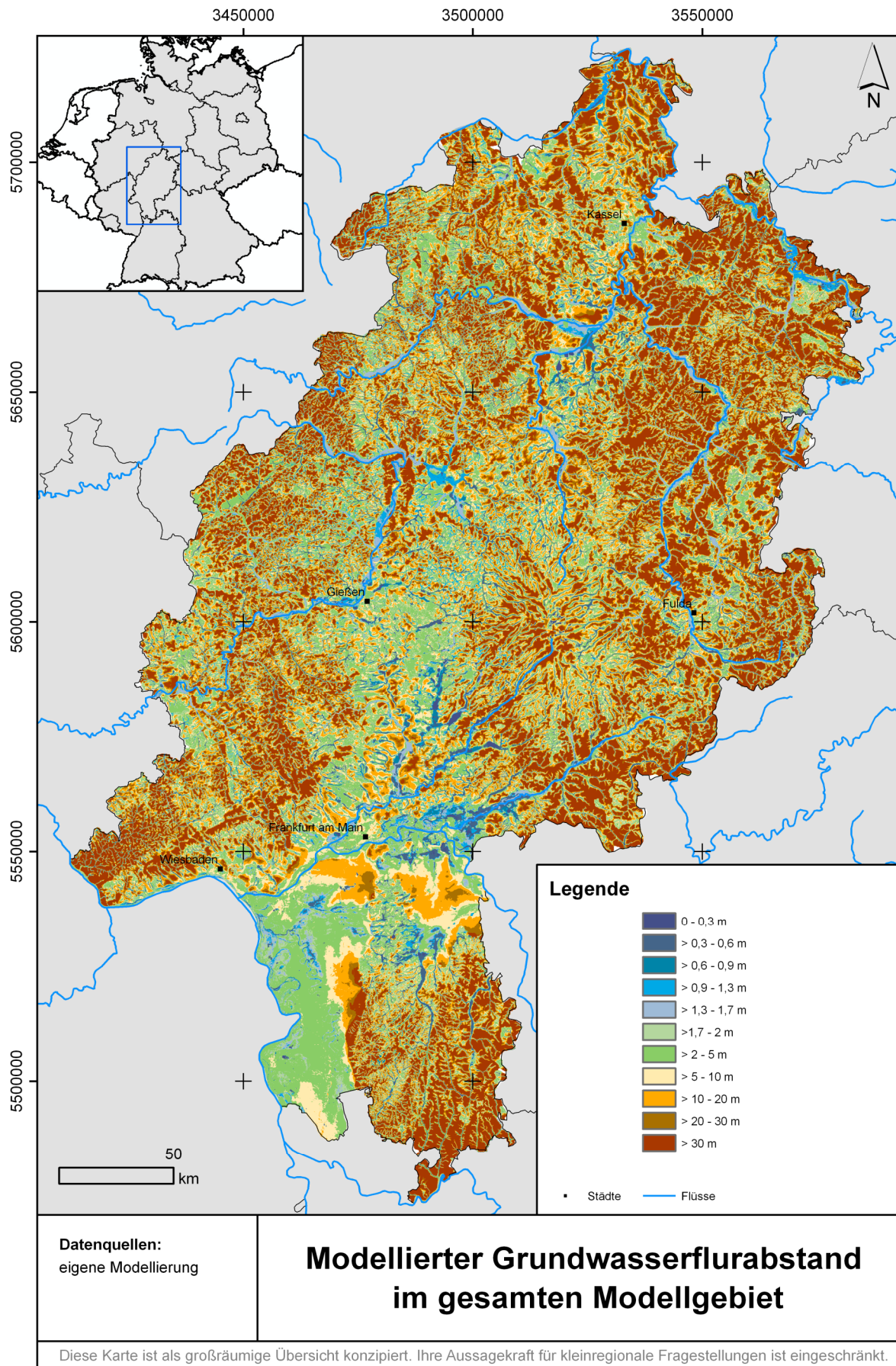


Abbildung 41: Modellierter Grundwasserflurabstand im gesamten Modellgebiet.

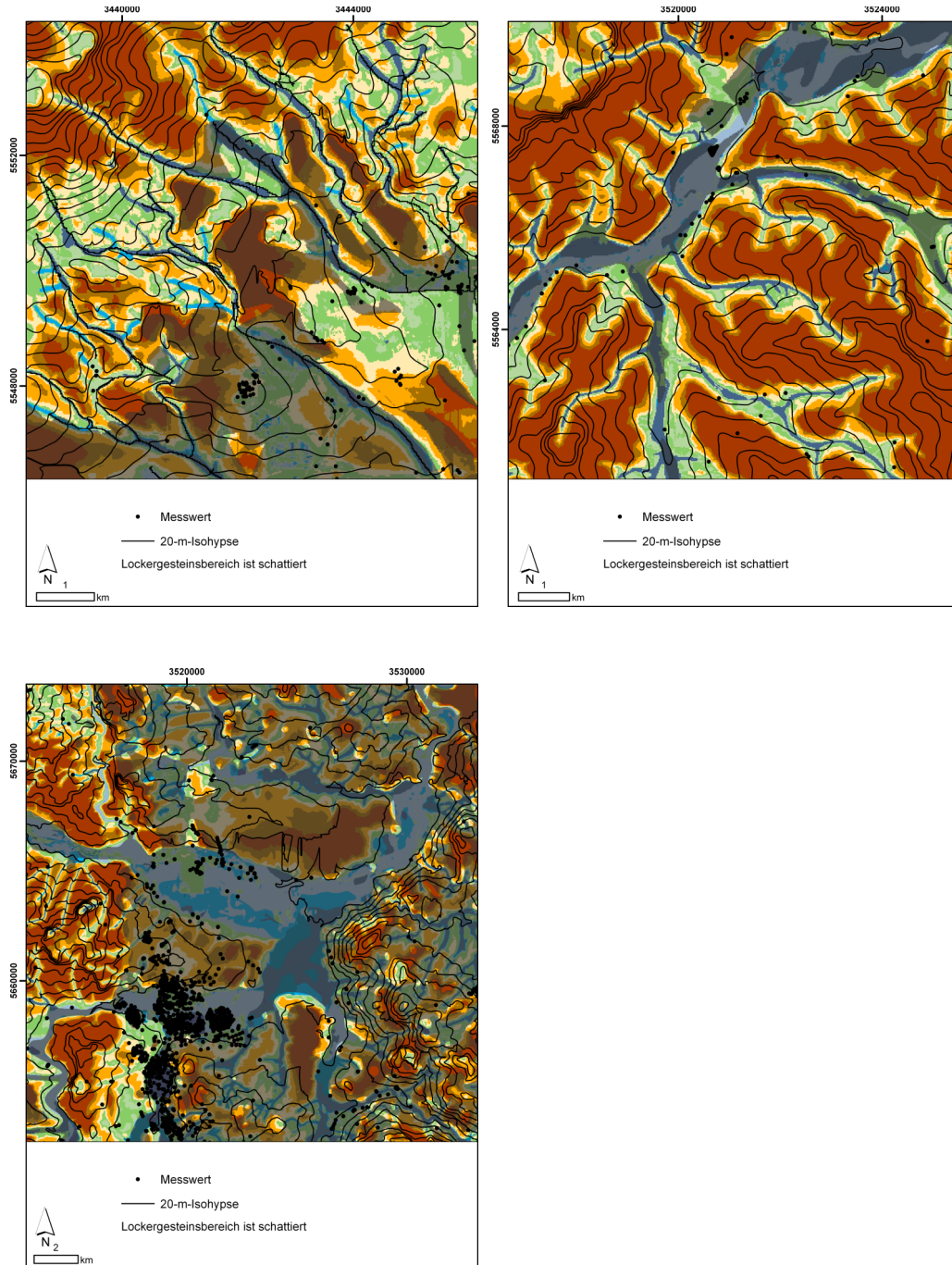


Abbildung 42: Beispiele für Flurabstände des aus Locker- und Festgesteinsbereichen zusammengesetzten Modells der Grundwasserdruckfläche. Links oben ist ein Ausschnitt des Südrandes des Taunus abgebildet (Unterdevonische Quarzite, Tonschiefer, Sandstein; Silurische Metavulkanite), rechts oben der Nordrand des Spessart (hauptsächlich süddeutscher Unterer Buntsandstein). Rechts unten ist das Ergebnis der Modellierung für die in Abbildung 5 gezeigte Beispielregion in der Niederhessischen Senke zu sehen. Die Beispiele zeigen zusätzlich die aus dem Modell abgeleiteten 20-m-Isohypsen.

In der Beispielregion Niederhessische Senke ist relativ im Zentrum ein Artefakt aus der Interpolation im Lockergesteinsbereich in Form einer leichten Verzerrung der Isohypsen zu sehen (Abbildung 42 unten links). In diesem Bereich (Terrassenkiese- und Sande des Quartärs) fehlen Messwerte für die Modellierung einer präziseren Grundwasserdruckfläche. Im Bereich der Terrasse ca. 5 km südwestlich davon sind genügend Messwerte vorhanden. Bei der Interpolation werden in diesem Bereich keine Artefakte erzeugt.

5.4 Validierung

Unter der Validierung eines Modells versteht man die Prüfung, ob das Modell die Realität genügend genau abbildet und damit für den Einsatzzweck, für den es entwickelt wurde, geeignet ist. Im Rahmen der Validierung der großräumigen flächendeckenden Grundwasserdruckfläche können mehrere Aspekte des Modells überprüft werden:

- Inwieweit stimmen gemessene Grundwasserdruckhöhen mit modellierten überein?
- Inwieweit stimmen im Festgesteinsbereich die ermittelten mittleren Gradienten mit denen aus anderen Untersuchungen überein, wobei im Rahmen der anderen Untersuchungen konventionelle ebenfalls auf Messwerten beruhende Methoden angewandt werden sollten?
- Inwieweit konnten auf Basis des Modells der Grundwasserdruckfläche plausible mittlere Verweilzeiten des Sickerwassers und des Grundwassers berechnet werden? (Auf diese Frage wird kurz im Kapitel 6 eingegangen.)

5.4.1 Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen

Die Validierung anhand gemessener Grundwasserdruckhöhen konnte nur auf Basis des Datenbestandes GWSTANDHESS erfolgen (vgl. Abschnitt 4.6). Untersucht wurde hierbei die Differenz zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen an den Orten, für die plausible Messwerte vorlagen. In Form mehrerer Histogramme sind diese Differenzen für einzelne Messwertkategorien in Abbildung 43 bis Abbildung 46 dargestellt. Bei den Kategorien handelt es sich um Messwerte:

- im Bereich bereits bestehender Grundwassergleichenpläne,
- im Bereich mit aus der Bodenkarte abgeleiteten Grundwasserdruckhöhen,
- im Bereich der interpolierten Grundwasserdruckfläche im Lockergestein,
- von Quellaustrittshöhen im Festgesteinsbereich und
- im Bereich der geschätzten Grundwasserdruckfläche im Festgestein.

Negative Differenzen bedeuten, dass die gemessenen Druckhöhen größer sind als die modellierten. Die reale Druckfläche befindet sich im Bereich des Messwertes höher als die modellierte. Positive Differenzen bedeuten, dass die gemessenen Druckhöhen kleiner sind als die modellierten, sich die reale Druckfläche demzufolge tiefer als die modellierte Druckfläche befindet.

Das integrierte Modell in der Rhein-Main-Ebene wurde als Beispiel für eine direkt aus den Ergebnissen des HLUG übernommene Druckfläche anhand von ca. 6000 Messwerten validiert (Abbildung 43). Ca. 75% der gemessenen Druckhöhen sind größer als die modellierten. Der Median liegt bei ca. -1 m. Ca. 70% aller modellierten Druckhöhen liegen in einem Intervall von ± 2 m um die zugehörigen Messwerte. Das ist ein sehr gutes Ergebnis. Die Messwertdichte in diesem Gebiet ist sehr hoch (Abbildung 21) und die Messwerte sind relativ homogen verteilt. Aus der Verteilung in Abbildung 43 kann deshalb geschlossen werden, dass die modellierte Druckfläche im Mittel tiefer liegt als die reale Druckfläche, die durch die Messwerte repräsentiert wird. Fritsche, Hemfler et al. (2003) haben eine weiträumige Absenkung der natürlichen Grundwasserspiegel in der Region aufgrund der intensiven Grundwassernutzung von 1 bis 2 m beschrieben. Die Messwerte wurden über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten gewonnen. Denkbar ist, dass viele ältere Messwerte noch eine höhere Wasserspiegellage repräsentieren und im Rahmen der Erstellung des Grundwassergleichplanes am HLUG nur relativ aktuelle Werte verwendet wurden. Weiterhin kann im östlichen Randbereich des Oberrheingrabens die Grundwasseroberfläche teilweise gespannt sein (Fritsche, Hemfler et al. 2003). Die gemessenen Druckhöhen zeigen dann eine weniger tief liegende Grundwasseroberfläche an.

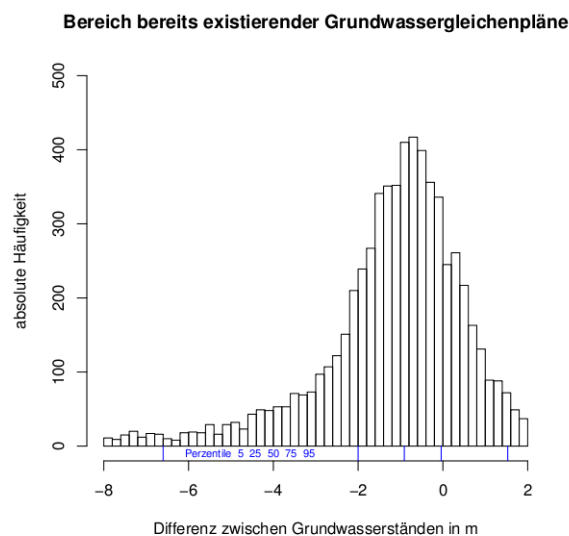


Abbildung 43: Histogramm zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen im Bereich bereits existierender Grundwassergleichpläne. Die Extremwerte am Rand der Verteilung sind nicht dargestellt.

Die Verweilzeit des Sickerwassers ist linear abhängig von der Feldkapazität der Böden im Teilgebiet, vom Flurabstand sowie von der Sickerwasserrate. Es kann demzufolge für die Rhein-Main-Ebene bei einer homogene Grundwasserüberdeckung erwartet werden, dass im Mittel größere Verweilzeiten des Sickerwassers ermittelt werden, die wiederum im Mittel den Verweilzeiten in ca. einem Meter Boden entsprechen.

Ca. 4000 Messwerte befinden sich auf Flächen mit Druckhöhen, die aus der Bodenkarte abgeleitet wurden. An mehr als 75% der Standorte ist die Differenz zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen kleiner als ± 2 m (Abbildung 44). Das ist ebenfalls ein gutes Ergebnis. Im Mittel liegt die modellierte Grundwasserdruckfläche in diesen Bereichen etwas höher als die gemessene. Der Median der Differenzen liegt bei 0,5 m. Dafür können mehrere Ursachen verantwortlich sein. Böden mit geringen Grundwasserflurabständen sind teilweise dauerhaft gedrängt, d.h. in diesen Bereichen werden gegenwärtig größere Flurabstände gemessen, als im Rahmen der Bodenkartierung. Außerdem bestehen Unsicherheiten bei der Abgrenzung grundwasserbeeinflusster Böden in der Bodenkarte und in der Höhengenaugigkeit des DHM.

Die Messwertdichte in den Gebieten mit Druckhöhen auf Basis der Bodenkarte ist ebenfalls relativ hoch (vgl. Abbildung 21) und die Messwerte sind relativ homogen verteilt. Demzufolge werden die berechneten Verweilzeiten des Sickerwassers wahrscheinlich mindestens mit einem mittleren Fehler behaftet sein, der etwa der Verweilzeit in einem halben Meter Grundwasserüberdeckung entspricht.

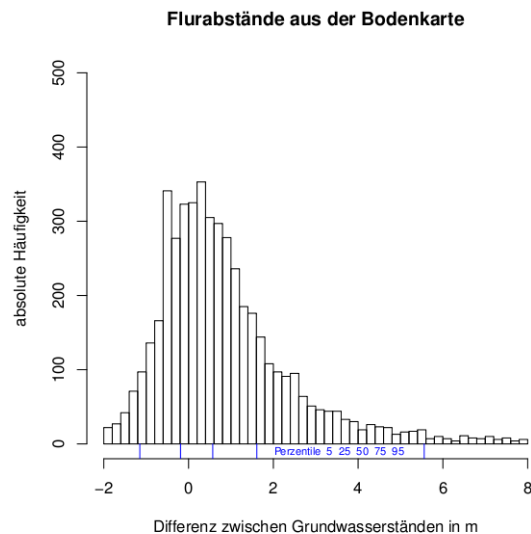


Abbildung 44: Histogramm zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen in Bereichen, in denen die Grundwasserstände aus den Angaben in der Bodenkarte abgeleitet wurden. Die Extremwerte am Rand der Verteilung sind nicht dargestellt.

In den Lockergesteinsbereichen mit interpolierten Druckhöhen auf Basis der ca. 8000 Messwerte unterscheiden sich die modellierten von den gemessenen Werten verfahrensbedingt nur relativ wenig (Abbildung 45). Ca. 90% der Differenzen finden sich im Intervall ± 2 m. Die Messwerte werden im großräumigen Modell der Grundwasserdruckfläche sehr genau reproduziert. Größere Unterschiede ergeben sich nur, wenn in der unmittelbaren Nähe der Mess-

werte Stützpunkte auf Basis des Gewässernetzes oder der grundwasserbeeinflussten Böden mit deutlich abweichenden Druckhöhen für die Interpolation genutzt wurden. Im Gegensatz zur Validierung der Druckhöhen im Bereich des bestehenden Gleichplanes für die Rhein-Main-Ebene, sind die interpolierten Druckhöhen in den Lockergesteinsgrundwasserleitern nur auf einem sehr geringen Flächenanteil mit Messwerten vergleichbar. Deshalb sollte die gute Übereinstimmung in Abbildung 45 nicht darüber hinwegtäuschen, dass großflächig die Schätzung der Druckhöhen auf den im Rahmen der Verdichtung der Messwerte gewonnenen Stützpunkten und den damit verbundenen Annahmen beruht.

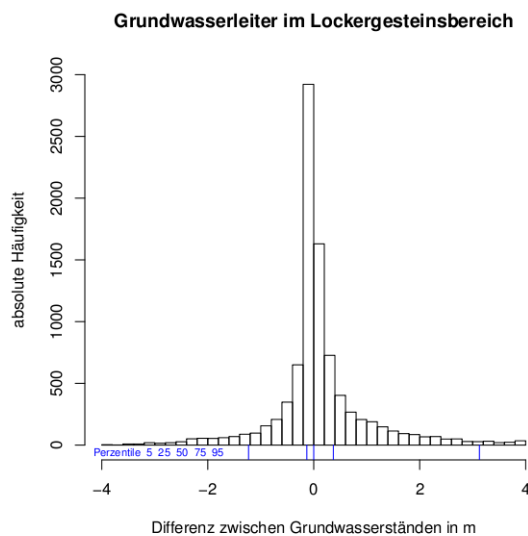


Abbildung 45: Histogramm zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen in Lockergesteinsbereichen, in denen die Grundwasserstände interpoliert wurden. Die Extremwerte am Rand der Verteilung sind nicht dargestellt.

Ein im Verfahren zur Modellierung der Grundwasserdruckfläche im Festgestein unberücksichtigtes Merkmal ist der Kontaktbereich zwischen Grundwasserdruckfläche und Geländeoberfläche in Form von Grundwasserquellen. Die Höhenlage der Grundwasseraustritte von ca. 1000 Quellen im Festgestein wurden mit den entsprechenden modellierten Druckhöhen verglichen. Die in Abbildung 46 (links) dargestellte Verteilung ist stark linksschief. Als sehr gut wird gewertet, dass ca. 60% der modellierten Druckhöhen im Bereich der Quellen um weniger als 10 m von den gemessenen Druckhöhen abweichen. Diese Werte können bereits als ein Hinweis interpretiert werden, in welcher Größenordnung sich ein mittlerer Fehler der Höhenlage der modellierten Grundwasserdruckfläche und damit des Grundwasserflurabstands und der mittleren Verweilzeit des Sickerwassers bewegen wird. Er wird wahrscheinlich ± 10 m betragen.

In die Validierung sind wahrscheinlich viele Quellen eingegangen, die schwebendes Grundwasser oder temporären Zwischenabfluss entlasten. Ein deutlicher Hinweis darauf sind die teilweise erheblichen negativen Differenzen. Im Modell der großräumigen Grundwasserdruckfläche wird jedoch das schwebende Grundwasser und der Zwischenabfluss prinzipiell nicht abgebildet. Aus dem Datenbestand GWSTANDHESS ist nicht ersichtlich, an welchen Grundwasserleiter die Quellen angebunden sind und ob sie nur temporär schütten. Aus diesen Gründen konnten die für die Validierung ungeeigneten Quellen nicht eliminiert werden. Die Verteilung in Abbildung 46 (links) bildet auch die Diskrepanzen zwischen den Datengrundlagen GWSTANDHESS und Gewässernetz ab, die bereits in Abschnitt 3.3.1 diskutiert wurden. Das Ergebnis der Validierung stützt damit die Vorschläge, die für eine Präzisierung der Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich auf Basis präzisierter Datengrundlagen im Abschnitt 6.3 gemacht werden.

Die Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen sind im Festgesteinsbereich (ca. 4500 Messwerte) größer als im Lockergesteinsbereich. Sie sind jedoch sehr gleichmäßig um den Median verteilt, der fast genau im Nullpunkt liegt (Abbildung 46, rechts). Das Histogramm gibt die gesamte Streubreite der Residuen aus der Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien wieder (in allen Festgesteinseinheiten). Ca. 50% der Differenzen liegen im Bereich mit einer relativ geringen Abweichung von ± 5 m. Innerhalb von ± 20 m befinden sich 90% der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen. Die aus der Ermittlung der mittleren Gradienten resultierende mittlere Abweichung zwischen realer und modellierter Grundwasserdruckfläche liegt bei ca. ± 10 m, was ebenfalls als gute Anpassung gewertet wird. In Anbetracht der Zielstellung, eine großräumige Modellierung der Grundwasserdruckfläche vorzunehmen, der notwendigen Schematisierung sowie den bereits erwähnten Unsicherheiten (Modellprämissen und Datengrundlagen) erscheint die erreichte Genauigkeit als akzeptabel.

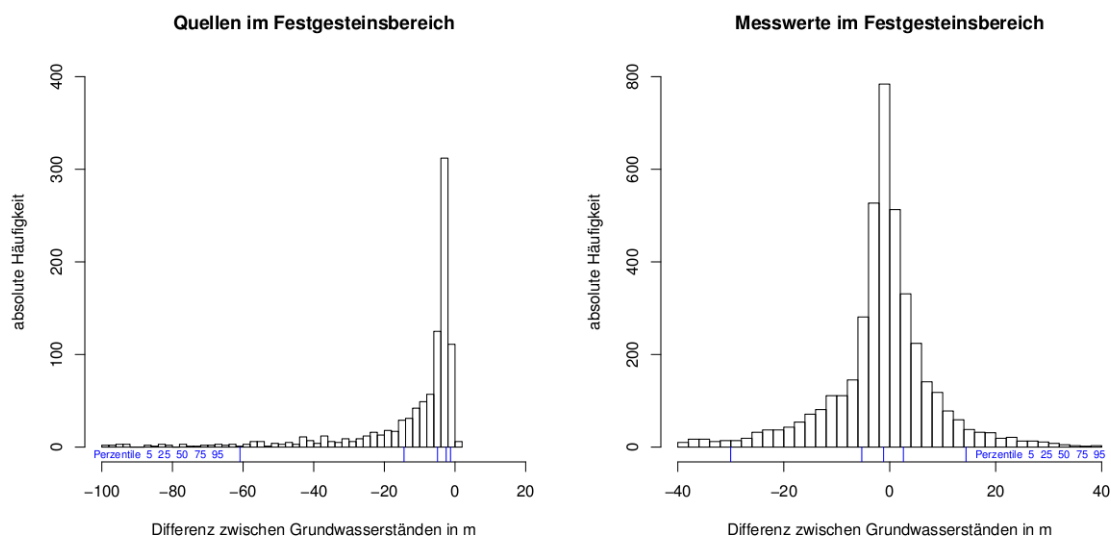


Abbildung 46: Histogramme zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen im Festgesteinsbereich. Die Extremwerte am Rand der Verteilungen sind nicht dargestellt.

5.4.2 Vergleich einzelner mittlerer Gradienten mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen

Eine weitere Möglichkeit der Validierung im Bereich einzelner hydrogeologischer Einheiten besteht im Vergleich der für die großräumige Modellierung abgeleiteten Gradienten mit den Ergebnissen einer konventionellen Untersuchung zur hydraulischen Durchlässigkeit. Derartige Untersuchungen sind jedoch nicht flächendeckend vorhanden. Für die Folgen des Mittleren und Unteren Buntsandstein haben beispielsweise Schraft & Rambow (1984) im Rahmen der Erkundungsarbeiten für die Neubaustrecke der Deutschen Bundesbahn von Hannover nach Würzburg solche Untersuchungen auf Basis von Pump- und Wasserdruckversuchen durchgeführt.

Schraft & Rambow (1984) beschreiben die Grundwasserleiter des Mittleren und Unteren Buntsandstein im Bereich der Neubaustrecke als meist einheitlich geklüftet ohne Unterteilung in größere Grundwasserstockwerke. Allerdings besteht die Volpriehausener Wechselfolge (Mittlerer Buntsandstein) aus einer Vielzahl grundwasserleitender und grundwasserhemmender Abschnitte. Die hemmenden Abschnitte behindern trotz größerer Klüfte und seitlicher Verzahnung die Grundwasserbewegung in vertikaler Richtung.

Für die Folgen des Unteren Buntsandstein finden Schraft & Rambow (1984) bei der statistischen Auswertung von 73 hydraulischen Versuchen ein Maximum in der Häufigkeitsverteilung der hydraulischen Durchlässigkeit im k_f -Bereich um 10^{-6} m/s. Sie leiten aus Wasserspiegelmessungen im Umfeld der hydraulisch untersuchten Standorte für den Bereich um 10^{-6} m/s eine Neigung der Grundwasseroberfläche zwischen 1:15 bis 1:25 ab. Dies entspricht einem Gradient im Bereich zwischen 0,067 und 0,04. Für die hydrogeologische Einheit *Unterer Buntsandstein - Ostthessisches Bergland* wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Gradient von ca. 0,056 ermittelt (Abbildung 47). Dieser passt sehr gut in den Intervall, den Schraft & Rambow (1984) angegeben haben. Für die 133 hydraulischen Versuche im Mittleren Buntsandstein ermitteln sie ein Maximum im Bereich zwischen 10^{-6} und 10^{-5} m/s, sowie eine Neigung der Grundwasseroberfläche von ungefähr 1:30. Diese Neigung entspricht einem Gradienten von ca. 0,033. Für die hydrogeologische Einheit *Volpriehausen- bis Hardeggen-Folge - Nordosthessen* wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Gradient von ca. 0,039 ermittelt, der ebenfalls sehr gut mit dem Gradient von Schraft & Rambow (1984) übereinstimmt.

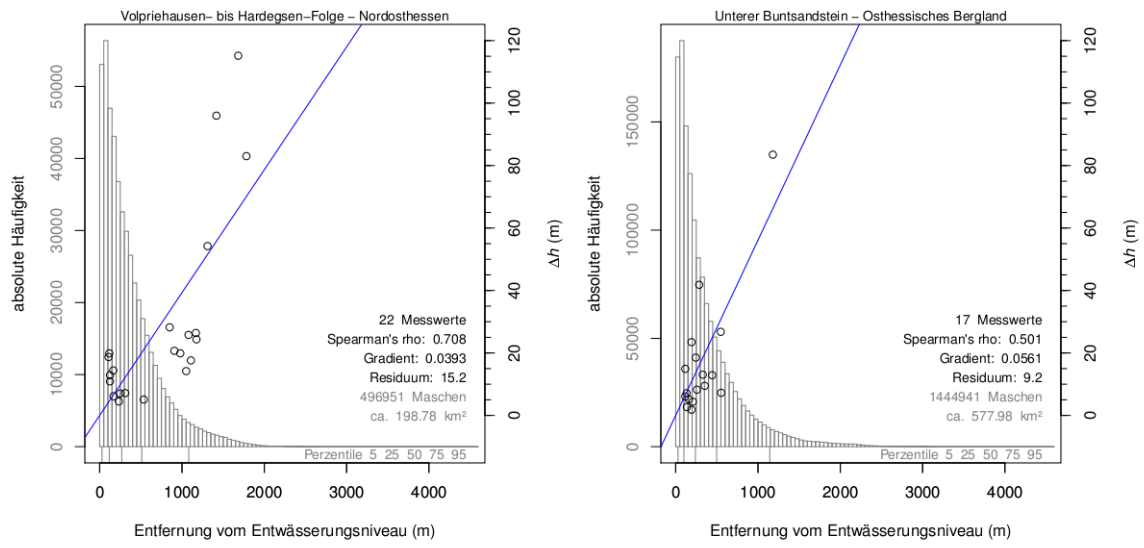


Abbildung 47: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte Einheiten des Buntsandsteins in Nordosthessen.

6. Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Rahmen standortbezogener Untersuchungen wird die Tiefenlage der Grundwasserdruckfläche normalerweise durch ein relativ regelmäßiges das Untersuchungsgebiet abdeckendes Netz an Messstellen ermittelt und häufig manuell in Grundwassergleichenplänen abgebildet. Die dafür zur Verfügung stehenden Techniken sind erprobt, hinlänglich bekannt und verfügbar. Bei der Betrachtung größerer Gebietseinheiten treten zwischen einzelnen Messstellen jedoch immer wieder Bereiche auf, für die wenige oder keine Messwerte zur Tiefenlage der Grundwasserdruckfläche existieren. Beispielsweise findet sich im hessischen Festgesteinsbereich im Mittel lediglich ein Messwert auf ca. drei Quadratkilometern Fläche.

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Instrumentarium kann die Grundwasserdruckfläche größerer Gebietseinheiten abgebildet werden. Dabei kann einerseits die gute Datelage in einzelnen Teilräumen berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist es mit der Methodik möglich, selbst in Regionen mit beträchtlichen Informationslücken eine hydraulisch weitgehend plausible Grundwasserdruckfläche zu modellieren.

Die Entwicklung der Methodik erfolgte am Beispiel des gesamten Bundeslandes Hessen und im Hinblick auf die im Bundesland Hessen verfügbaren Datengrundlagen. Aufgrund der bereits angesprochenen Lücken und Unsicherheiten in den landesweit verfügbaren Datengrundlagen waren bei der Entwicklung und exemplarischen Umsetzung einfache methodische Grundannahmen und eine relativ stark generalisierte Berücksichtigung der hydrodynamischen Gegebenheiten zwingend notwendig. Das Ergebnis der Methodenentwicklung, das heißt ein Modell der Grundwasserdruckfläche für das gesamte Bundesland Hessen, wurde dabei auf einer Reihe von Arbeitstreffen mit Hydrogeologen des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie grundsätzlich bestätigt.

In einer ersten Anwendung wurde das im Rahmen dieser Arbeit generierte Modell der Grundwasserdruckfläche bereits für den Aufbau eines konzeptionellen Modells für die hydrogeologische Landesplanung im Bundesland Hessen eingesetzt (Kunkel & Wendland 2010). Dort wurde das Modell der Grundwasserdruckfläche für eine flächendifferenzierte Verweilzeitanalyse verwendet und hat maßgeblich dazu beigetragen, realistische Aufenthaltszeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone und des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter abzuleiten. Damit ist ein weiteres über die reine Methodenentwicklung hinausgehendes Ziel des Projektes, nämlich die Anwendbarkeit in der hydrogeologischen Praxis, bereits jetzt erreicht worden.

Für einzelne Standorte, Kleinstinzugsgebiete und Teilbereiche von Grundwasserkörpern besteht dennoch ein Potential für Verbesserungen in der Abbildung der Druckfläche. Nachfolgend werden Einzelaspekte des generierten Modells sowie der Methodik detaillierter diskutiert. Dies geschieht einerseits im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Datengrundlagen. Andererseits werden Vorschläge gemacht, wie das Modell im Rahmen der Weiterentwicklung der Methodik und auf Basis verbesserter oder neu erstellter Datengrundlagen präzisiert werden kann.

6.1 Diskussion der Methodik und Vorschläge zur Präzisierung der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich

Auf Basis der HÜK 200 erfolgte zunächst eine Gliederung Hessens in Locker- und Festgesteinsbereiche. Im Lockergesteinsbereich existierte bereits ein Grundwassergleichenplan für Teile des Oberrheingrabens. Dieser Gleichenplan wurde in das landesweite Modell der Grundwasserdruckfläche integriert. Um zukünftig weitere, speziell für lokale Fragestellungen erstellte Grundwassergleichenpläne in das landesweite Modell zu integrieren, wurde die Möglichkeit geschaffen, diese im Rahmen der hierarchischen Zusammenstellung von Informationen zum Grundwasserstand zu berücksichtigen.

In Lockergesteinsbereichen, in denen weder Grundwassergleichenpläne noch Flurabstände aus der Bodenkarte zur Verfügung standen, wurde mit *Ordinary Kriging* flächendeckend eine Grundwasserdruckfläche interpoliert. Die Interpolation auf das Modellraster basierte auf den verfügbaren Messwerten zur Grundwasserdruckhöhe, welche um weitere Stützpunkte verdichtet wurden. Hierzu wurde das Vorfluterniveau verwendet. Zusätzlich wurden Druckhöhen aus der hessischen Bodenkarte abgeleitet.

Inkonsistenzen in den Datengrundlagen zur Erstellung der zusätzlichen Stützpunkte haben sich im Lockergesteinsbereich lokal in Form von Anomalien im resultierenden Grundwassergleichenplan bemerkbar gemacht. Hierbei handelt es sich zum Beispiel um vereinzelt vorkommende kleine trichterförmige Absenkungsbereiche oder um stark geneigte Abschnitte in der Grundwasserdruckfläche. Für diese Anomalien ist hauptsächlich die Höhengenaugigkeit des digitalen Modells der Geländehöhe von ± 5 m (vgl. de Lange 2006) verantwortlich. Untergeordnet ist aber auch eine ungenaue Abgrenzung der grundwasserbeeinflussten Böden in der hessischen Bodenkarte die Ursache. In beiden Fällen könnten detailliertere digitale Bodenkarten bzw. topografische Karten dazu beitragen, die Qualität der abgeleiteten Stützpunkte zur Generierung eines Modells der Grundwasserdruckfläche zu verbessern.

Die Verdichtung des Stützpunktekollektivs hat außerdem nicht in allen Teilgebieten des Lockergesteinsbereichs zu einer für die Interpolation günstigen Verteilung geführt. Auf vereinzelt Teilflächen werden trotz der zusätzlich berücksichtigten Stützpunkte im Modell der Grundwasserdruckfläche wenig realistische Artefakte erzeugt. Diese können nur durch weitere Messwerte oder Schätzungen aufgrund von Regionalkenntnissen der Gebietshydrogeologen im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung behoben werden.

Lokal hat die Interpolation mit dem verdichteten Stützpunktekollektiv beispielsweise zu Durchdringungen zwischen modellierter Grundwasserdruckfläche und dem digitalen Modell der Geländehöhe geführt. Dafür wurden zwei potentielle Ursachen identifiziert. Einerseits können die bereits oben erwähnten Unsicherheiten und die noch bestehenden Lücken in den Datengrundlagen für die Durchdringungen verantwortlich sein. Andererseits treten derartige Durchdringungen auf, wenn die Grundwasseroberfläche gespannt ist. In diesem Fall sind Grundwasserdruck- und Grundwasseroberfläche nicht identisch. Im Fall eines gespannten Grundwasserleiters befindet sich die Grundwasseroberfläche mit dem eigentlichen Grundwasserleiter unter einer grundwasserhemmenden Deckschicht.

Im Bereich der in der HÜK 200 ausgegliederten Geringleiter des Lockergesteinsbereichs, die fast ein Viertel der Lockergesteinsflächen (ca. 960 km²) ausmachen, ist die Grundwasseroberfläche in der Tat wahrscheinlich teilweise gespannt. Für diese Geringleiter finden sich im Datenbestand GWSTANDHESS ca. 2500 Messwerte. Der gemessene Wasserstand unter Flur ist dort für ca. 2000 Messwerte mit kleiner als 10 m angegeben. Die Geringleiter müssten in der HÜK 200 als bindige Deckschicht verzeichnet sein, wenn sie weniger als 20 m mächtig sind. Dies ist nicht der Fall. Folglich liegt entweder die Grundwasserdruckfläche oberhalb der Liegendfläche des Geringleiters (gespannte Grundwasseroberfläche) oder die Angaben zur Durchlässigkeit und Verbreitung der Geringleiter sind unpräzise oder es existieren lokal auch besser durchlässige Abschnitte in den als gering durchlässig ausgewiesenen Flächen. Einige Messwerte zeigen zudem artesische Druckverhältnisse an. Die Wasserstände unter Flur an diesen Messstellen sind als 0 angegeben. Anhand der Angaben zu den Messstellen (im Datenbestand GWSTANDHESS) im Bereich der als Geringleiter gekennzeichneten Flächen lässt sich aber nicht eindeutig klären, ob an der jeweiligen Messstelle ungespannte oder gespannte Grundwasserverhältnisse vorliegen. Aus diesem Grund sind die betroffenen Gebiete gesondert als Grundwassergeringleiter markiert, wurden jedoch im Rahmen der Modellerstellung wie alle anderen Lockergesteinsgrundwasserleiter behandelt.

Im Rahmen der Erstellung der Grundwasseroberfläche im Lockergesteinsbereich wurden auf den Flächen mit Durchdringungen der Druck- und Geländeoberfläche grundsätzlich zusätzliche Stützpunkte mit Flurabständen größer als 2 m iterativ im nächsten Interpolationszyklus verwendet, bis eine Oberfläche ohne Durchdringungen erzeugt werden konnte.

Um die modellierte Grundwasseroberfläche in diesen Bereichen präzisieren zu können, wäre es notwendig, Kartengrundlagen zu erstellen, die die Verbreitung der gespannten Grundwasserleiter abbilden und die Höhenlage der Liegendfläche des hangenden Grundwasserhemmers darstellen. Aus der Bodenkarte können beispielsweise potentiell gespannte Bereiche abgeleitet werden. Dazu müsste geprüft werden, welche Gebiete mit bindigen Bodenformen häufig Durchdringungen aufweisen. Bei Vorliegen solcher Karten wäre es möglich, in den gespannten Bereichen eine Grundwasserdruckfläche und eine Grundwasseroberfläche zu modellieren. Für die Grundwasseroberfläche muss dann die hierarchische Zusammensetzung der Stützpunkte um eine Kategorie mit Höhenwerten der Liegendfläche des hangenden Grundwasserhemmers erweitert werden (vgl. Abbildung 6). Vor allem für die Modellierung von Verweilzeiten des Sickerwassers in der ungesättigten Zone wäre es von Vorteil, anstatt einer Grundwasserdruckfläche eine Grundwasseroberfläche zu verwenden.

Die Validierung des Modells der Grundwasserdruckfläche hat für den Lockergesteinsbereich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen ergeben (vgl. Abbildung 45). Diese sollte jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass großflächig die Schätzung der Druckhöhen auf den im Rahmen der Verdichtung der Messwerte gewonnenen Stützpunkten und den damit verbundenen Annahmen beruht. Diese Stützpunkte können außerdem bis zu 2 km von den jeweiligen Maschen des Modellrasters entfernt liegen. Zwischen Stützpunkten und Maschen können sich auch unterirdische Wasserscheiden befinden. Eine wirklich flächendeckende Validierung in den Lockergesteinsbereichen mit interpolierten Druckhöhen erscheint aus den genannten Gründen derzeit mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich zu sein. Ebenso wenig ist die Schätzung eines mittleren Feh-

lers möglich, der mindestens bei der Berechnung der Verweilzeiten des Sickerwassers zu erwarten ist.

6.2 Diskussion der Methodik und Vorschläge zur Präzisierung der modellierten Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich

Die Genauigkeit des Modells der Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich hängt sowohl stark von der Qualität der Datengrundlagen wie auch von den aufgrund der Datenverfügbarkeit gemachten methodischen Grundannahmen ab. In den Festgesteinsgrundwasserleitern beeinflusst hauptsächlich eine realitätstreue Abbildung des Entwässerungsniveaus und der Grundwasserfließrichtung das resultierende Modell der Grundwasserdruckfläche. Nur wenn das Modell des Entwässerungsniveaus und das Modell der Grundwasserfließrichtung eine relativ genaue Abbildung der Realität darstellen, können auch realistische mittlere hydraulische Gradienten der Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich abgeleitet werden. Für einen Großteil des Modellgebietes konnten im Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit der einzelnen hydrogeologischen Einheiten plausible Gradienten bestimmt werden. Dies hat maßgeblich zur Abbildung einer für die großräumige Verweilzeitenanalyse in Hessen geeigneten Grundwasserdruckfläche geführt. Die folgenden Vorschläge zur Präzisierung der modellierten Druckfläche im Festgesteinsbereich betreffen meist kleine Gebiete, jedoch sind hiervon alle Gebietseinheiten gleichermaßen betroffen.

Die im Rahmen des Projektes entwickelte Methodik zur flächendeckenden Schätzung von Grundwasserdruckhöhen setzt die Kenntnis der Grundwasserfließrichtung als Information zwingend voraus. Diese Information wurde für die hessischen Festgesteinsbereiche flächendeckend aus dem DHM abgeleitet. Die Grundannahme ist dabei, dass sich die Morphologie von Geländeoberfläche und Grundwasserdruckfläche sehr stark ähneln. Damit wird impliziert, dass die Grundwasserbewegung im obersten Grundwasserleiter in der Regel in Richtung der nächsten Vorfluter erfolgt und dass die oberirdischen und unterirdischen Einzugsgebiete identisch sind. Die Grundwasserbewegung findet dann, gerade in den sehr gering durchlässigen hydrogeologischen Einheiten, hauptsächlich im oberen aufgelockerten Bereich des Grundwasserleiters statt. Das Resultat der Modellierung im Rahmen dieser Arbeit ist eine der Geländeroberfläche ähnliche Grundwasserdruckfläche.

Die Annahme, dass die Gestalt der Grundwasserdruckfläche der Geländeoberfläche sehr ähnlich ist, wird in der hydrogeologischen Modellbildung häufig gemacht, ist aber nicht umfassend getestet und hat sich in einigen Fällen als Fehler herausgestellt (Haitjema & Mitchell-Bruker 2005). Desbarats, Logan et al. (2002) zeigen beispielsweise, dass das Konzept der Korrelation zwischen der Grundwasseroberfläche und der Topographie lokal durchaus sinnvoll, jedoch nicht universell gültig ist. Haitjema & Mitchell-Bruker (2005) haben aus diesem Grund umfangreiche Analysen und Modellrechnungen durchgeführt, um nachzuweisen, unter welchen Bedingungen die Grundwasserdruckfläche relativ genau der Geländemorphologie folgt. Sie unterscheiden dabei *topographiekontrollierte* und *grundwasserneubildungskontrollierte* Druckflächen. Ihren Analysen zufolge ist der topographiekontrollierte Typ sehr wahrscheinlich in gering durchlässigen Grundwasserleitern, in denen eine im Verhältnis zur geringen Durchlässigkeit relativ hohe Grundwasserneubildung stattfindet.

In weiten Teilen des hydraulisch gering durchlässigen Rheinischen Schiefergebirges beträgt die mittlere Grundwasserneubildung zwischen 50 und 100 mm/a (Tetzlaff, Schreiner et al. 2009). Sie beträgt weniger als 15% des Gesamtabflusses, ist von ihrer Gesamtmenge her aber immer noch verhältnismäßig hoch. Dies spricht für eine topographiekontrollierte Druckfläche. In den wasserwirtschaftlich bedeutenden relativ durchlässigen Festgesteinsgebieten Hessens (beispielsweise in der Vogelsberg-Region) ist die Grundwasserneubildung sowohl in ihrer Gesamtmenge, wie auch von ihrem Anteil am Gesamtabfluss her relativ hoch (mehr als 100 mm/a). Die Grundwasserdruckflächen in solchen relativ durchlässigen Grundwasserleitern sind eher durch die Grundwasserneubildung kontrolliert, D.h. die Ähnlichkeit mit der Geländeoberfläche ist nicht in dem Maße gegeben, wie in den gering durchlässigen Gebieten (Haitjema & Mitchell-Bruker 2005).

In den meisten Festgesteinsregionen Hessens scheint eine hauptsächlich topographiekontrollierte Druckfläche zu existieren. Die hydraulische Durchlässigkeit ist meist nur mäßig, gering oder äußerst gering, die Grundwasserneubildung ist jedoch verhältnismäßig hoch. Die Fließrichtung ist demzufolge in den eher gering durchlässigen Einheiten auf Basis des DHM realistisch abgebildet. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Schraft & Rambow (1984) für einzelne Folgen des Mittleren Buntsandsteins hat in diesem Zusammenhang gezeigt, dass mit der im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Methodik für topographiekontrollierte Grundwasserdruckflächen realistische Gradienten abgeleitet werden können.

Sichtbar wird die realitätsnahe Abbildung der Grundwasserfließrichtung an den statistischen Kennzahlen der Analyse zur Ermittlung der mittleren hydraulischen Gradienten in den einzelnen hydrogeologischen Einheiten und im Bild der aus dem Modell der Grundwasserdruckhöhen abgeleiteten Grundwassergleichen. Nur wenn in der Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien im Bereich einer hydrogeologischen Einheit die Annahme zur Grundwasserfließrichtung realistisch ist, resultiert ein Regressionsgerade – und damit ein mittlerer hydraulischer Gradient – mit hohem Korrelationskoeffizienten, geringem Residuum und einer geringen Anzahl Messwerte, die nicht aufgrund negativer Höhendifferenzen Δh von der Analyse ausgeschlossen wurden. Für viele Einheiten ist dies der Fall (vgl. 5.2.1). Die Grundannahme, dass die Grundwasserfließrichtung aus dem Geländemodell abgeleitet werden kann, hat für diese Einheiten zu einem Modell einer topographiekontrollierten Grundwasserdruckfläche geführt, das realistisch erscheint.

Oberirdische und unterirdische Einzugsgebietsgrenzen stimmen in der Realität jedoch nicht immer exakt überein. Im großräumigen Modell der Grundwasserdruckfläche macht sich dies in einer Scharung der Grundwassergleichen bemerkbar. Die Scharungen sind nur teilweise mit dem geologischen Bau erklärbar. Sie entstehen hauptsächlich, wenn die Fließwege auf beiden Seiten einer oberirdischen Wasserscheide nicht gleich lang sind und an der Wasserscheide deshalb nach Gl. 3.4 unterschiedlich Druckhöhen berechnet werden. Auf diesen Teilflächen kann das Modell der Druckfläche nur durch ein verändertes Fließrichtungsmodell präzisiert werden.

Im Verbreitungsgebiet mehrerer relativ durchlässiger Buntsandsteinfolgen in Nord- und Nordosthessen ist die Fließrichtung des Grundwassers nicht auf die kleinsten Fließgewäs-

ser, sondern eher auf die Hauptvorfluter der Region gerichtet (mündliche Mitteilung von J.-G. Fritsche, HLUG). Im Bereich verkarsteter Grundwasserleiter ist dies lokal wahrscheinlich ebenso der Fall. In den genannten Grundwasserleitern existiert wahrscheinlich eine eher Neubildungskontrollierte Grundwasserdruckfläche, an die nicht alle Fließgewässer hydraulisch angebunden sind. In diesen Fällen wäre es ratsam, ein Fließrichtungsmodell neu abzuleiten. Es reicht nicht aus, diese Vorfluter aus dem Modell des Entwässerungsniveaus zu entfernen, weil auf Basis des DHM (d.h. der Geländemorphologie) sehr lange Grundwasserstromlinien entlang der Vorflut resultieren, die wiederum zu einer deutlichen Fehlschätzung der Druckhöhen führen. Ein präziser angepasstes Fließrichtungsmodell kann demzufolge in diesem Fall nicht nur aus dem DHM abgeleitet werden.

Einen Hinweis, für welche hydrogeologischen Einheiten eine derartige Präzisierung des Fließrichtungsmodells im Rahmen der Weiterentwicklung des konzeptionellen Modells notwendig ist, gibt die Anzahl der Messwerte, für die negative Höhendifferenzen Δh berechnet wurden. Ist diese relativ hoch, sollte eine Prüfung und detaillierte Untersuchung der lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten stattfinden, an deren Ende ein neues Fließrichtungsmodell steht. Für die Verbreitungsgebiete der Einheit *Solling-Folge* im Mittleren Buntsandstein ist eine derartige Untersuchung beispielsweise empfehlenswert.

Ebenso sind im Verbreitungsgebiet vulkanischer Einheiten des Vogelsberges relativ viele Messwerte aufgrund des Kriteriums unberücksichtigt geblieben. Hier ist die Einheit *Tertiäre basaltische Vulkanite – Basalt und Varietäten Vogelsberg und Wetterau* zu nennen. Im Analyseergebnis dieser Einheit scheinen die Verhältnisse in zwei verschiedenen hydrogeologischen Einheiten abgebildet zu sein (vgl. Abbildung 32). Nur aufgrund verbesserter Datengrundlagen – Fließrichtungsmodell, lokale Untergliederung der HÜK 200 in weitere hydrogeologische Einheiten und hydrostratigraphisch genaue Zuordnung der Messwerte – kann für diese Einheit die Grundwasserdruckfläche präzisiert werden.

Eine Weiterentwicklung der Methode zur Ableitung der Grundwasserfließrichtung, in die auch das A-priori Wissen der Regionalhydrogeologen einfließen kann, würde zu einer lokalen Präzisierung des großräumigen Modells der Grundwasserdruckfläche beitragen. An dieser Stelle besteht ein Bedarf, das A-priori Wissen der Regionalhydrogeologen flächendeckend in rechen-technisch verarbeitbare Information zu transformieren, um weiterhin eine automatisierte Modellierung der Druckfläche zu gewährleisten. Hier sehen die Autoren einen der Hauptansatzpunkte für eine konsequente Weiterentwicklung der Methodik zur Erstellung der Grundwasserdruckfläche im Festgesteinsbereich.

In der Realität tritt häufig der Fall auf, dass Grundwasser aus dem Festgestein erst in den Lockergesteinsbereich (z.B. quartäre Talfüllungen) übertritt, bevor es die Vorflut erreicht. Das Konzept der Modellierung eines Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein ermöglicht die Analyse individueller Grundwasserstromlinien zwischen den Messwerten im Festgesteinsbereich und dem Lockergesteinsbereich bzw. der Vorflut. Das Modell des Entwässerungsniveaus bietet ebenso Ansatzpunkte, lokal die modellierte Grundwasserdruckfläche zu präzisieren. Es existieren beispielsweise hydrogeologische Lockergesteinseinheiten aus tertiärem Sand, Kies und Schluff, die in der HÜK 200 in Hochlagen oberhalb des heutigen Fließge-

wässersystems verzeichnet sind, aber auch als mächtige Deckschicht über einem Festgesteinsgrundwasserleiter aufgefasst werden können. Inwieweit diese relativ kleinen Flächen als Entwässerungsniveau im Sinne der beschriebenen Methodik wirksam sind, kann in Einzelfällen bezweifelt werden. Eine Entscheidung, solche Flächen aus dem Modell des Entwässerungsniveaus zu entfernen, ist auf Basis einer Einzelfallbetrachtung jedoch möglich.

6.3 Diskussion der bestehenden Datengrundlagen und Vorschläge zu deren Verbesserung

Neben den methodischen Aspekten, die lokal zu Anomalien in der modellierten Grundwasserdruckfläche führen, liegt das Hauptpotential für eine weitere Präzisierung des Modells in einer Verbesserung der Datengrundlagen und damit in einer Verringerung der Unsicherheiten. Hier sind zu nennen:

- Das digitale Modell der Geländehöhe ist auf ± 5 m (vgl. de Lange 2006) genau. Dies ist eine Hauptursache für lokale Durchdringungen zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserdruckfläche. Die Verwendung eines DHM mit verbesserter Genauigkeit (und Auflösung) würde zukünftig helfen, Durchdringungen zu vermeiden und die Unsicherheiten in der übrigen Datenbasis genauer zu identifizieren.
- Der Messwertdatenbestand GWSTANDHESS des HLOG muss in bisher durch Messwerte wenig abgesicherten Regionen gezielt ergänzt werden. Dabei sollte der gesamte Datenbestand um ein Attribut erweitert werden, das eine genaue Zuordnung der gemessenen Druckhöhe zu der hydrogeologischen Einheit erlaubt, aus der sie stammt (hydrogeologische Stratifizierung). Idealerweise würde in diesem Bearbeitungsschritt die zugehörige hydrogeologische Einheit geprüft und zugewiesen. Bis zum derzeitigen Bearbeitungsstand des Modells konnte in Einzelfällen beispielsweise nicht entschieden werden, ob eine gemessene Druckhöhe aus dem Oberen Buntsandstein stammt oder aus dem darunter befindlichen Mittleren Buntsandstein. Ebenso würde es durch die hydrogeologische Stratifizierung des Messwertdatenbestandes möglich, eine Bewertung durchzuführen, ob eine Grundwasserbewegung in den Deckschichten der Festgesteinsbereiche stattfindet.
- Weiterhin sollten aus dem Messwertdatenbestand GWSTANDHESS einzelne repräsentative Messwerte für die Bereiche mit Messwertaggregationen in Festgesteinsgrundwasserleitern bestimmt werden.
- Jahreszeitliche Schwankungen der Grundwasserspiegel können eine Ursache für die starke Streuung in der Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien im Verbreitungsbereich einzelner hydrogeologischer Festgesteinseinheiten sein. Im Datenbestand GWSTANDHESS sind keine Zeitangaben zu den Messungen verzeichnet. Im Hinblick auf die jahreszeitlich teilweise starken Schwankungen der Grundwasserstände im Festgestein wären Zeitangaben sehr hilfreich, um die Analyse der mittleren hydraulischen Gradienten detaillierter zu bewerten und gegebenenfalls zu verbessern.

- Die digitale Hydrogeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:200000 ist in einigen Bereichen in einem schlechten technischen Zustand. Es existieren Lücken an den Rändern der einzelnen Blattschnitte, aus denen die digitale Karte zusammengesetzt ist. Zudem sind Geometrie und Attribute der abgebildeten Flächen an den Blatträndern nicht konsequent aneinander angepasst worden. Diese technischen Mängel führen im Arbeitsablauf der Modellerstellung und der weiteren Präzisierung des Modells zu hydraulisch un stetigen oder inkonsistenten Abschnitten in der Grundwasserdruckfläche.
- In der Bodenkarte sind in den Mittelgebirgslagen evtl. auch Hochmoore als grundwasserbeeinflusste Böden berücksichtigt. Diese Gebiete sollten dann zukünftig identifiziert und aus dem Modell des Entwässerungsniveaus entfernt werden.
- Das Fließgewässernetz sollte hinsichtlich der Lage einzelner Elemente zueinander im Bezug auf hydraulische Verbindungen und Plausibilität überarbeitet werden. So existieren beispielsweise im Gewässernetz Lücken zwischen den Polylinien, die einzelne Flussabschnitte repräsentieren. Zudem sind Hangquellen (aus dem Datenbestand GWSTANDHESS) teilweise nicht durch einen Bach an das Gewässernetz angeschlossen. Weiterhin existieren für viele Anfangspunkte eines Fließgewässers keine Quellen im Datenbestand GWSTANDHESS.
- Die verfügbaren Austrittswasserspiegel an den Quellen dienen im Rahmen der Validierung der Grundwasserdruckfläche als unabhängige Vergleichsgrößen. Auf diese Weise lassen sich die Diskrepanzen in den für die Modellierung vorhandenen Datengrundlagen aufzeigen und Aussagen zur Güte der modellierten Druckfläche im Bereich der Quellen machen. Es existieren jedoch Quellen, die wahrscheinlich schwebendes Grundwasser oder temporäres Wasser des Zwischenabflusses entlasten. Sie sollten identifiziert und im Datenbestand GWSTANDHESS gekennzeichnet werden.
- Die aus dem digitalen Modell der Geländehöhe abgeleiteten Fließ- und Akkumulationswege des Abflusses sind lokal nicht mit dem Gewässernetz identisch (vgl. Abbildung 15). Dies ist eine weitere Ursache für die lokal mit Unsicherheiten behaftete Ableitung des Vorflutniveaus aus dem DHM. Im Rahmen einer lokalen Angleichung der Fließwege des Modells der Geländehöhe und des Gewässernetzes sollten auch konkrete Pegelstände in den Oberflächengewässern berücksichtigt werden.
- Für ein in Einzelregionen besser angepasstes Modell der Grundwasserfließrichtung müssen die Oberflächengewässer bestimmt werden, die keine hydraulische Verbindung zum modellierten Grundwasserleiter aufweisen. Dies kann durchaus auch auf Basis von A-priori-Wissen der entsprechenden Gebietshydrogeologen geschehen. Der ATKIS-Datensatz, der die Fließgewässer repräsentiert, sollte dahingehend ergänzt werden.
- Für einzelne Festgesteinseinheiten (beispielsweise für Einheiten des Mittleren Buntsandsteins in Nordosthessen) sollten auf Basis des A-priori-Wissens der Regionalhydrogeologen rechen-technisch verarbeitbare Abbildungen der Grundwasserfließrichtung geschaffen werden.

- Für die Validierung der modellierten Grundwasserdruckfläche sind ebenfalls Datengrundlagen erforderlich. Die von Schraft & Rambow (1984) durchgeführten Untersuchungen auf Basis hydraulischer Tests an lokal hydraulisch zueinander in Beziehung stehenden Bohrungen sowie die Gegenüberstellung der daraus resultierenden hydraulischen Durchlässigkeiten und Gradienten erscheint gut geeignet für eine Überprüfung des mittleren hydraulischen Gradienten einer einzelnen hydrogeologischen Einheit. Für das gesamte Bundesland Hessen sollten flächendeckend ähnliche Untersuchungen dahingehend ausgewertet und die Ergebnisse zusammengestellt werden.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie geförderten Projektes wurde am Forschungszentrum Jülich und an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus ein konzeptionelles hydrogeologisches Modell für das Bundesland Hessen entwickelt. Dieses konzeptionelle Modell dient der zeitlichen Bewertung von Maßnahmenprogrammen, die bereits im Zuge der Umsetzung der EU-WRRL für die als "at risk" eingestuften Gebiete von den Landesbehörden aufgestellt wurden. Eine wesentliche Komponente des konzeptionellen Modells ist eine flächendeckende großräumige Grundwasserdruckfläche.

Vor diesem Hintergrund wurde eine Methodik zur großräumigen flächendeckenden Modellierung von Grundwasserdruckflächen entwickelt. Die besondere Herausforderung bestand darin, ein computergestütztes, in hohem Maße automatisiertes Verfahren zu konzipieren und umzusetzen, das selbst beim Vorliegen von lückenhaften und räumlich sehr heterogen verteilten Messwerten von Grundwasserdruckhöhen dazu in der Lage ist, eine konsistente Grundwasserdruckfläche zu generieren. Die Erstanwendung der Methodik erfolgte exemplarisch für das gesamte Bundesland Hessen, d.h. eine Fläche von ca. 21200 km².

Im ersten Schritt der Modellierung wurde eine Gliederung der hessischen Grundwasserleiter in Locker- und Festgesteinsbereiche anhand der Informationen aus der Hydrogeologischen Übersichtskarte im Maßstab 1:200000 vorgenommen. Für beide Bereiche wurde mit zwei unterschiedlichen an die jeweilige Datenlage angepassten Verfahren eine zusammenhängende in weiten Teilen plausible Grundwasserdruckfläche modelliert.

In das Modell der Grundwasserdruckfläche im Lockergesteinsbereich (ca. 20% der Landesfläche) konnte ein bereits existierender Grundwassergleichplan für den hessischen Teil des Oberrheingrabens integriert werden. In den Lockergesteinsbereichen, für die keine Druckhöhen aus einem bestehenden Grundwassergleichplan flächendeckend verfügbar waren, wurde die Grundwasserdruckfläche mit dem Verfahren Ordinary Kriging interpoliert. Das dabei zur Verfügung stehende Messwertekollektiv (ca. 8200 geeignete Messwerte) wurde durch das Vorflutniveau der an das Grundwasser angeschlossenen Fließgewässer (AT-KIS-Gewässernetz) sowie durch Flurabstandswerte aus der hessischen Bodenfunktionskarte (BFD 50) verdichtet.

Für die Festgesteinsbereiche des Bundeslandes Hessen (ca. 80% der Landesfläche) existieren im Vergleich zum Lockergestein weniger Messwerte zur Höhenlage der Grundwasserdruckfläche, die zudem räumlich sehr ungleichmäßig verteilt sind. Aus diesem Grund wurde eine speziell auf die Datenlage in Festgesteinsbereichen angepasste Methode zur flächendeckenden Modellierung der Grundwasserdruckfläche entwickelt. Sie basiert auf der Ermittlung von mittleren hydraulischen Gradienten der Grundwasserdruckfläche in einzelnen hydrogeologischen Einheiten. Die Methode geht von folgenden grundlegenden Überlegungen und Annahmen aus:

- Die Richtung der Grundwasserströmung folgt der Geländemorphologie. Basierend auf dieser Annahme wurde aus dem digitalen Modell der Geländehöhe ein Modell der Grundwasserfließrichtung abgeleitet.

- Jede Grundwasserstromlinie im Festgestein endet entweder in der Vorflut oder an einem diskreten Grundwasserstand im Lockergesteinsbereich. Dieser Verknüpfungsbereich der Druckfläche zwischen den Festgesteinsgrundwasserleitern und der Vorflut wird ebenso wie der Übergang von Fest- und Lockergesteinsgrundwasserleitern als Modell des Entwässerungsniveaus bezeichnet.
- Auf Basis der Messwerte, dem Modell des Entwässerungsniveaus und dem Modell der Grundwasserfließrichtung können für einzelne hydrogeologische Einheiten mittlere hydraulische Gradienten der Grundwasserdruckfläche bestimmt werden. Diese werden verwendet, um entlang aller Grundwasserstromlinien im Festgestein die Grundwasserdruckhöhen zu berechnen.

Für die ca. 4500 im Festgesteinsbereich zur Verfügung stehenden Messwerte (dies entspricht im Mittel einem Messwert auf drei Quadratkilometern) wurden die individuellen Grundwasserstromlinien bis zum Erreichen des Entwässerungsniveaus analysiert. Aus den Analyseergebnissen konnten für 48 in Hessen großflächige verbreitete hydrogeologische Einheiten mittlere hydraulische Gradienten ermittelt werden. Für 28 meist kleinflächige Einheiten wurden mittlere Gradienten auf Basis der Einstufung in die Durchlässigkeitsklassen der HÜK 200 geschätzt, weil keine oder ungenügend viele Messwerte zur Verfügung standen. Die für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten charakteristischen mittleren hydraulischen Gradienten wurden verwendet, um flächendeckend im Festgesteinsbereich Grundwasserdruckhöhen entlang der Grundwasserstromlinien zu berechnen. Nach einem letzten Arbeitsschritt, der der Glättung sowie der lokal notwendigen Korrektur von Durchdringungen zwischen Grundwasserdruck- und Geländeoberfläche diente, resultierte eine weitgehend plausible flächendeckende Grundwasserdruckfläche.

Mit der entwickelten Methodik wurde für das Bundesland Hessen ein in weiten Teilen hydraulisch plausibles flächendeckendes Modell der Grundwasserdruckfläche generiert und im Rahmen verfügbarer Messwerte validiert. Auf dieser Basis ist die Ableitung einer landesweiten Karte des Grundwasserflurabstandes ebenso durchgeführt worden, wie die flächendeckende Berechnung von Grundwasserisohypsen. Das großräumige flächendeckende Modell der Grundwasserdruckfläche wurde in einer ersten Anwendung von Kunkel & Wendland (2010) als Datenbasis für die Modellierung der Verweilzeiten des unterirdischen Wassers im Bundesland Hessen erfolgreich verwendet. Damit wurde die Anwendbarkeit der Methodik in der hydrogeologischen Praxis bereits demonstriert.

Dieses durchweg positive Gesamtergebnis sollte jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass das landesweite Modell der Grundwasserdruckfläche für das Bundesland Hessen nur eingeschränkt für einen Einsatz in Kleinstzugsgebieten oder lokal begrenzten Grundwasserkörpern geeignet ist. Dies war jedoch auch nicht das Ziel der Modellentwicklung. Für solche kleinräumigen Fragestellungen wird empfohlen, Grundwassergleichenkarten mit Hilfe der traditionell angewendeten Methoden manuell zu erstellen, d.h. basierend auf gemessenen Grundwasserständen und unter Verwendung des regionalen Expertenwissens.

Ein vielversprechender Weg für die weitere lokale Präzisierung der modellierten Grundwasserdruckfläche besteht darin, die derzeit für die großräumige Modellierung verfügbaren Da-

tengrundlagen gezielt zu verbessern. Auf diese Weise können einerseits in den betreffenden Regionen bestehende Unsicherheiten und Lücken geschlossen werden. Andererseits kann dies aber auch zu einer an die neue Datenlage angepassten Weiterentwicklung der zu Grunde liegenden Methodik führen. Beispielsweise sollte die Methode zur Ableitung der Grundwasserfließrichtung dahingehend erweitert werden, dass eine Berücksichtigung der nicht an das Grundwasser angeschlossenen Fließgewässer möglich wird. Im Lockergesteinsbereich besteht die Notwendigkeit, lokal eine gespannte Grundwasseroberfläche realistischer abzubilden.

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Hydrogeologie (1997). "Hydrogeologische Kartieranleitung." Geologisches Jahrbuch Reihe G(2): 3-157.
- Akin, H. and H. Siemes (1988). Praktische Geostatistik - Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Baumgartner, A. and H.-J. Liebscher (1996). Allgemeine Hydrogeologie - Quantitative Hydrologie, Gebrüder Bornträger Berlin Stuttgart.
- Briggs, I. C. (1974). "Machine Contouring Using Minimum Curvature." Geophysics 39(1): 39-48.
- de Lange, N. (2006). Geoinformatik in Theorie und Praxis, Springer Berlin Heidelberg.
- Desbarats, A., C. Logan, et al. (2002). "On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model." Journal of Hydrology 255(1-4): 25-38.
- Deutsch, C. V. and A. G. Journel (1992). GSLIB: Geostatistical software library and user's guide, Oxford University Press, New York, Oxford.
- Dörhöfer, G., S. Hannappel, et al. (2001). "Die Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland (HÜK 200)." Zeitschrift für angewandte Geologie 47(2): 153-159.
- Forkel, C. (2004). Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis: Grundlagen, Anwendungen, Qualitätsaspekte, Acad.-Verl. Sankt Augustin.
- Fritsche, H.-G., M. Hemfler, et al. (2003). "Beschreibung der hydrogeologischen Teilräume von Hessen gemäss EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL)." Geol. Jb. Hessen (130): 5-19.
- Garbrecht, J. and J. Campell (1997). TOPAZ: an automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage segmentation and subcatchment parameterization. El Reno, Oklahoma.
- Haitjema, H. M. and S. Mitchell-Bruker (2005). "Are water tables a subdued replica of the topography?" Ground Water 43(6): 781-786.
- Hannappel, S., J.-G. Fritsche, et al. (2003). "Die Erstellung der Hydrogeologischen Übersichtskarte (HÜK 200) in Hessen."

- Heinkele, T., H.-J. Voigt, et al. (2002). Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern, Umweltbundesamt.
- Heitfeld, K.-H. (1965). "Hydro- und baugelogeische Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Untergrundes an Talsperren des Sauerlandes." Geol. Mitt. 5(1-2): 1-210.
- Henningsen, D. and G. Katzung (2006). Einführung in die Geologie Deutschlands, Elsevier GmbH, München, Spektrum Akademischer Verlag.
- HLUG (o.J.). "Erfassungsstandard Boden - Hessen. Fachinformationssystem Boden/Bodenschutz."
- Hölting, B. (1996). Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Hölting, B. and A. Schraft (1987). Handbuch - Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, Vulkan-Verlag Essen.
- Kunkel, R. and F. Wendland (1997). "WEKU - a GIS-Supported stochastic model of groundwater residence times in upper aquifers for the supraregional groundwater management." Environmental Geology 30(1-2): 1-9.
- Kunkel, R. and F. Wendland (1999). Das Weg-/Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeeinzugsgebiet.
- Kunkel, R. and F. Wendland (2010). Aufbau eines konzeptionellen hydrogeologischen Modells für die zeitliche Bewertung von Maßnahmenprogrammen in Hessen unter Einbeziehung der Monitoring - Messnetze der EG - Wasserrahmenrichtlinie, FZ Jülich GmbH.
- Leßmann, B. and K. Wiegand (1998). "Der vulkanische Vogelsberg als Beispiel für ein mehrschichtiges Grundwasserstockwerkssystem." Geol. Jb. Hessen(126): 81-92.
- Leßmann, B., K. Wiegand, et al. (2001). Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Louis, C. (1967). Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels.
- Mallet, J. (1992). "Discrete smooth interpolation in geometric modelling." Computer-Aided Design 24(4): 178.

- Matthess, G. (1970). Beziehungen zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung im Festgestein. 58.
- Pannatier, Y. (1996). VARIOWIN - Software for spatial data analysis in 2D, New York [u.a.], Springer.
- Sachs, L. and J. Hedderich (2009). Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R, Springer Berlin Heidelberg.
- Salama, R., L. Ye, et al. (1996). "Comparative study of methods of preparing hydraulic-head surfaces and the introduction of automated hydrogeological-GIS techniques." Journal of Hydrology 185(1-4): 115-136.
- Schafmeister, M.-T. (1999). Geostatistik für die hydrogeologische Praxis, Springer, Berlin Heidelberg.
- Schraft, A. and D. Rambow (1984). "Vergleichende Untersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit im Buntsandstein Ost Hessens." Geologisches Jahrbuch Hessen(112): 235-261.
- Smith, W. H. F. and P. Wessel (1990). "Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension." Geophysics 55(3): 293-305.
- Tetzlaff, B., H. Schreiner, et al. (2009). Modellgestützte Analyse signifikanter Phosphorbelastungen in hessischen Oberflächengewässern aus diffusen und punktuellen Quellen. Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag.
- Tukey, J. W. (1977). Exploratory Data Analysis. Reading, Mass., Addison-Wesley.
- Venables, W. N. and D. M. Smith (2009). An Introduction to R. <http://cran.r-project.org/doc/manuals/R-intro.pdf>.
- Webster, R. and M. A. Oliver (2001). Geostatistics for Environmental Scientists, JOHN WILEY & SONS, LTD Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.
- Wendland, F., R. Kunkel, et al. (2004). "Assessment of groundwater residence times in the pore aquifers of the River Elbe Basin." Environmental Geology 46(1): 1-9.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geologische Übersichtskarte des Bundeslands Hessen.	9
Abbildung 2: Schematisches Beispiel zur Ableitung des Fließrichtungsmodells (Kunkel & Wendland 1997). Dicke Linien kennzeichnen die Einzugsgebietsgrenzen, blau hinterlegt ist die Vorflut. Angaben zur Druckhöhe in m ü. NHN. Die Pfeile zeigen die Grundwasserfließrichtung für die jeweilige Masche an.	17
Abbildung 3: Schematisches Beispiel zum Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein (MEF). Dicke Linien kennzeichnen die Einzugsgebietsgrenzen, blau hinterlegt ist die Vorflut, hellblau sind die Lockergesteinsbereiche gekennzeichnet, grau die Talfüllungen, violett der grundwasserbeeinflusste Boden einer Quellmulde und ocker ein Festgesteinsbereich. Die Pfeile zeigen die Fließrichtung für die jeweilige Masche an. In den Maschen des Modells des Entwässerungsniveaus sind die Druckhöhen in m ü. NHN verzeichnet.	18
Abbildung 4: Experimentelle Richtungsvariogramme und richtungsunabhängiges Variogramm der Grundwasserstände im Lockergesteinsbereich Hessens.	21
Abbildung 5: Typische Verteilung von gemessenen Grundwasserständen im Lockergestein (links) und Stützpunkten für die Interpolation der Grundwasserdruckfläche nach der Verdichtung des Messwertekollektivs (rechts).	22
Abbildung 6: Hierarchische Zusammenstellung von Information zum Grundwasserstand für die Interpolation einer flächendeckenden Grundwasserdruckfläche in den Lockergesteinsgrundwasserleitern.	23
Abbildung 7: Schematisches Beispiel zur Bestimmung individueller hydraulischer Gradienten. Die Darstellung baut auf Abbildung 3 auf. In Brauntönen sind zusätzliche hydrogeologische Einheiten dargestellt. Die Punkte symbolisieren Messwerte. Für die Analyse verwendbare Grundwasserstromlinien sind als durchgezogene Linien dargestellt. Entlang der gestrichelten Linie fehlen Informationen zur Druckhöhe an den Übergängen zwischen den hydrogeologischen Einheiten.	27
Abbildung 8: Typische Verteilung der Fließrichtung des Grundwassers, abgeleitet durch eine topologische Analyse des digitalen Modells der Geländehöhe. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Fließrichtungsmodells im Bereich des Odenwald-Kristallins.	30
Abbildung 9: Ergebnis der Analyse der individuellen Grundwasserstromlinien einer Beispieleinheit im Festgesteinsbereich.	32
Abbildung 10: Beispiel für die Schätzung von Grundwasserdruckhöhen auf Basis des Modells der Grundwasserfließrichtung und der mittleren hydraulischen Gradienten. Das Beispiel stammt aus dem nördlichen Teil des Odenwald-Kristallins.	34
Abbildung 11: Beispiel für eine mit Ordinary Kriging leicht geglättete Grundwasserdruckfläche (links) und ihr Aussehen nach der Interpolation mit Minimum	

Curvature (rechts). Das Beispiel stammt aus dem nördlichen Teil des Odenwald-Kristallins.	35
Abbildung 12: Vereinfachtes Schema der Arbeitsschritte zur Modellierung einer großräumigen flächendeckenden Grundwasserdruckfläche. Die für Arbeitsschritte, Datenhaltung und Datenaufbereitung verwendete Software ist über den gestrichelten Rahmen angegeben. Die Pfeile kennzeichnen die in die jeweiligen Arbeitsschritte eingehenden Datengrundlagen und Zwischenergebnisse. Die durchgängigen dicken Linien umrahmen jeweils die Arbeitsschritte im Locker- und Festgesteinsbereich.	39
Abbildung 13: Gewässernetz und stehende Oberflächengewässer.....	42
Abbildung 14: Digitales Modell der Geländehöhe.	44
Abbildung 15: Beispiel für die Akkumulationswege des Abflusses, abgeleitet aus dem DHM. Dargestellt sind die Einzugsgebietsgrößen der einzelnen Modellelemente.	45
Abbildung 16: Abgrenzung in Locker- und Festgesteinsgrundwasserleiter.....	47
Abbildung 17: Gliederung der Festgesteinsbereiche in hydrogeologische Einheiten. Legende in Abbildung 18.	49
Abbildung 18: Legende zur Abbildung 17.....	50
Abbildung 19: Flurabstand in der Rhein-Main-Ebene.....	51
Abbildung 20: Flurabstand abgeleitet aus Grundnässestufen.	53
Abbildung 21: Messwertdichte im Datenbestand GWSTANDHESS.....	56
Abbildung 22: Bereich der unauffälligen Streuung und daraus resultierende Ausreisser (Kreise) für Messwertpaare mit horizontalen Abständen von weniger als 100 m. Winkel über 40° bzw. 61° sind nicht abgebildet.	60
Abbildung 23: Experimentelles Variogramm und angepasstes lineares Semivarianz-Modell für die Interpolation im Lockergesteinsbereich.	63
Abbildung 24: Beispiel für die Messwertdichte im Festgestein vor und nach erfolgter Auflösung der Messwert-Aggregationen. Das Beispiel zeigt eine Situation am Nordrand des Odenwaldes.	64
Abbildung 25: Digitales Modell der Grundwasserdruckfläche in den Lockergesteinsbereichen.	66
Abbildung 26: Modellierter Grundwasserflurabstand in den Lockergesteinsbereichen.....	67
Abbildung 27: Verteilung der Grundwasserflurabstände für <i>Holozäne Auensedimente</i>	69
Abbildung 28: Verteilung der Grundwasserflurabstände für <i>Pleistozäne Terrassenkiese und -sande</i> und <i>Pleistozäne Terrassenkiese und -sande (Rhein-Main-Ebene)</i> . Die Flurabstands-Achse ist auf 60 m limitiert dargestellt.....	70
Abbildung 29: Verteilung der Grundwasserflurabstände für <i>Flugsande/Dünen</i>	71

Abbildung 30: Verteilung der Grundwasserflurabstände für Miozäne Tone/Schluffe/Sande/Mergel und Tertiäre Sande/Kiese/Schluffe (Westhessische Senke). Die Flurabstands-Achse ist auf 60 m limitiert dargestellt.	71
Abbildung 31: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte tertiäre Vulkanite.....	74
Abbildung 32: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für die hydrogeologische Einheit Unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine im Taunus.	75
Abbildung 33: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte paläozoische Einheiten.....	75
Abbildung 34: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte Einheiten des Buntsandsteins.	76
Abbildung 35: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten in den hessischen Festgesteinsgrundwasserleitern.....	78
Abbildung 36: Residuen aus der Schätzung mittlerer hydraulischer Gradienten in den hessischen Festgesteinsgrundwasserleitern.	79
Abbildung 37: Digitales Modell der Grundwasserdruckfläche in den Festgesteinsbereichen.	87
Abbildung 38: Modellierter Grundwasserflurabstand in den Festgesteinsbereichen.....	88
Abbildung 39: Digitales Modell der Grundwasserdruckfläche im gesamten Modellgebiet.	89
Abbildung 40: Modellierter Grundwasserflurabstand im gesamten Modellgebiet.	90
Abbildung 41: Beispiele für Flurabstände des aus Locker- und Festgesteinsbereichen zusammengesetzte Modells der Grundwasserdruckfläche. Links oben ist ein Ausschnitt des Südrandes des Taunus abgebildet (Unterdevonische Quarzite, Tonschiefer, Sandstein; Silurische Metavulkanite), rechts oben der Nordrand des Spessart (hauptsächlich süddeutscher Unterer Buntsandstein). Rechts unten ist das Ergebnis der Modellierung für die in Abbildung 5 gezeigt Beispielregion in der Niederhessischen Senke zu sehen. Die Beispiele zeigen zusätzlich die aus dem Modell abgeleiteten 20-m-Isohypsen.	91
Abbildung 42: Histogramm zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen im Bereich bereits existierender Grundwassergleichenpläne. Die Extremwerte am Rand der Verteilungen sind nicht dargestellt.	93
Abbildung 43: Histogramm zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen in Bereichen, in denen die Grundwasserstände aus den Angaben in der Bodenkarte abgeleitet wurde. Die Extremwerte am Rand der Verteilungen sind nicht dargestellt.	94
Abbildung 44: Histogramm zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen in Lockergesteinsbereichen, in denen die Grundwasserstände interpoliert wurden. Die Extremwerte am Rand der Verteilungen sind nicht dargestellt.	95

Abbildung 45: Histogramme zum Vergleich der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Druckhöhen im Festgesteinsbereich. Die Extremwerte am Rand der Verteilungen sind nicht dargestellt.	96
Abbildung 46: Modellierte mittlere hydraulische Gradienten für ausgewählte Einheiten des Buntsandsteins in Nordosthessen.....	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für die Erstellung des Modells verwendete kommerzielle Software.	36
Tabelle 2: Für die Erstellung des Modells verwendete selbst entwickelte Software.....	38
Tabelle 3: Für die Erstellung des Modells der Grundwasserdruckfläche verwendete Datengrundlagen.	40
Tabelle 4: Grundnässestufen der Bodenkarte mit Flurabständen (Quelle: HLUG, verändert).	52
Tabelle 5: Herkunft der Messwerte.	54
Tabelle 6: Messwertdichte und Flächenanteile.	55
Tabelle 7: Einordnung der Messwerte aufgrund der Lage und der Formationsangaben.	57
Tabelle 8: Schwellenwerte zur Eliminierung unplausibler Messwertpaare (horizontale Abstände kleiner 100 m) im Lockergesteinsbereich.....	60
Tabelle 9: Schwellenwerte zur Eliminierung unplausibler Messwertpaare (horizontale Abstände kleiner 100 m) im Festgesteinsbereich.....	61
Tabelle 10: Statistische Kennzahlen der Verteilung der Grundwasserflurabstände in ausgewählten hydrogeologischen Einheiten in Hessens Lockergesteinsbereichen. ($Q_{0,5}$ = Median, $Q_{0,25}$ = 0,25-Quantil, $Q_{0,75}$ = 0,75-Quantil, \bar{z} = arithmetischer Mittelwert, alle in m).	68
Tabelle 11: Ergebnisse der Analyse individueller Grundwasserstromlinien und die resultierenden mittleren hydraulischen Gradienten für den Bereich der 76 aus der HÜK 200 abgeleiteten hydrogeologischen Festgesteinseinheiten Hessens. $grad h_{emp}$ - empirisch ermittelte mittlere hydraulische Gradienten, $grad h_{ges}$ - auf Basis der Durchlässigkeitsklasse geschätzte Gradienten, $Q_{0,5}$ - Median der modellierten Flurabstände in m und \bar{z} - arithmetischer Mittelwert der modellierten Flurabstände in m im Verbreitungsgebiet der jeweiligen Einheit.	80

Abkürzungsverzeichnis

ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
CORINE	Coordinated Information on the European Environment
DHM	Digitales Modell der Geländehöhe
DLM	Digitales Landschaftsmodell
EU-WRRL	Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates der Europäischen Union
FRM	Fließrichtungsmodell
GIS	Geoinformationssystem
GÜK 300	Geologische Übersichtskarte im Maßstab 1:300000
GWSTANDHESS	Datenbestand mit Messwerten zur Grundwasserdruckhöhe in Hessen
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
HÜK 200	Hydrogeologische Übersichtskarte im Maßstab 1:200000
LIDAR	Light detection and ranging
MEF	Modell des Entwässerungsniveaus aus dem Festgestein
o.J.	ohne Jahresangabe

Symbolverzeichnis

β	Winkel der Fließrichtung bezogen auf Nord in °
$\gamma(a)$	experimentelle Semivarianz im Abstand a
ρ	SPEARMAN-Rangkorrelationskoeffizient (Spearman's Rho)
a	Abstand in m
e	Residuum
F	Querschnitt des Grundwasserleiters in m ²
h	hydraulische Druckhöhe in m über NHN
$grad h$	hydraulischer Gradient
$grad h_{emp}$	empirisch gewonnener hydraulischer Gradient
$grad h_{ges}$	geschätzter hydraulischer Gradienten
Δh	Druckhöhendifferenz in m
h_p	hydraulische Druckhöhe im Modellelement des Festgesteins in m über NHN
$h_{p,MEF}$	hydraulische Druckhöhe im MEF in m über NHN
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser (hydraulische Leitfähigkeit für Wasser) in m/s
l	horizontale Komponente der Entfernung zum MEF entlang der Grundwasserstromlinie in m
l_{ij}	Entfernung einer beliebigen Masche des Modellrasters zum MEF in m
M	Mächtigkeit einer Schicht in m
$N(a)$	Anzahl der Messwertpaare im Abstand a
n_f	durchflusswirksamer Hohlraumanteil
Q	Volumenstrom des Grundwassers in m ³ /s
$Q_{0,25}$	0,25-Quantil
$Q_{0,5}$	Median (0,5-Quantil)

$Q_{0,75}$	0,75-Quantil
R	Maschenweite in m
Re	REYNOLDS-Zahl
\bar{s}	Wegelement in Richtung der Grundwasserstromlinien
T	Transmissivität m ² /s
\bar{v}_a	Abstandsgeschwindigkeit in m/s
\bar{v}_f	& Filtergeschwindigkeit (DARCY-Geschwindigkeit) in m/s
$w_m(\beta)$	Wegelemente zwischen den Mittelpunkten durchquerter Maschen in m
x_i	Ortsvektor des i -ten Messpunkts
$z(x_i)$	Messwert im Punkt i
\bar{z}	arithmetischer Mittelwert der Messwerte

Anhang A – Datengrundlagen

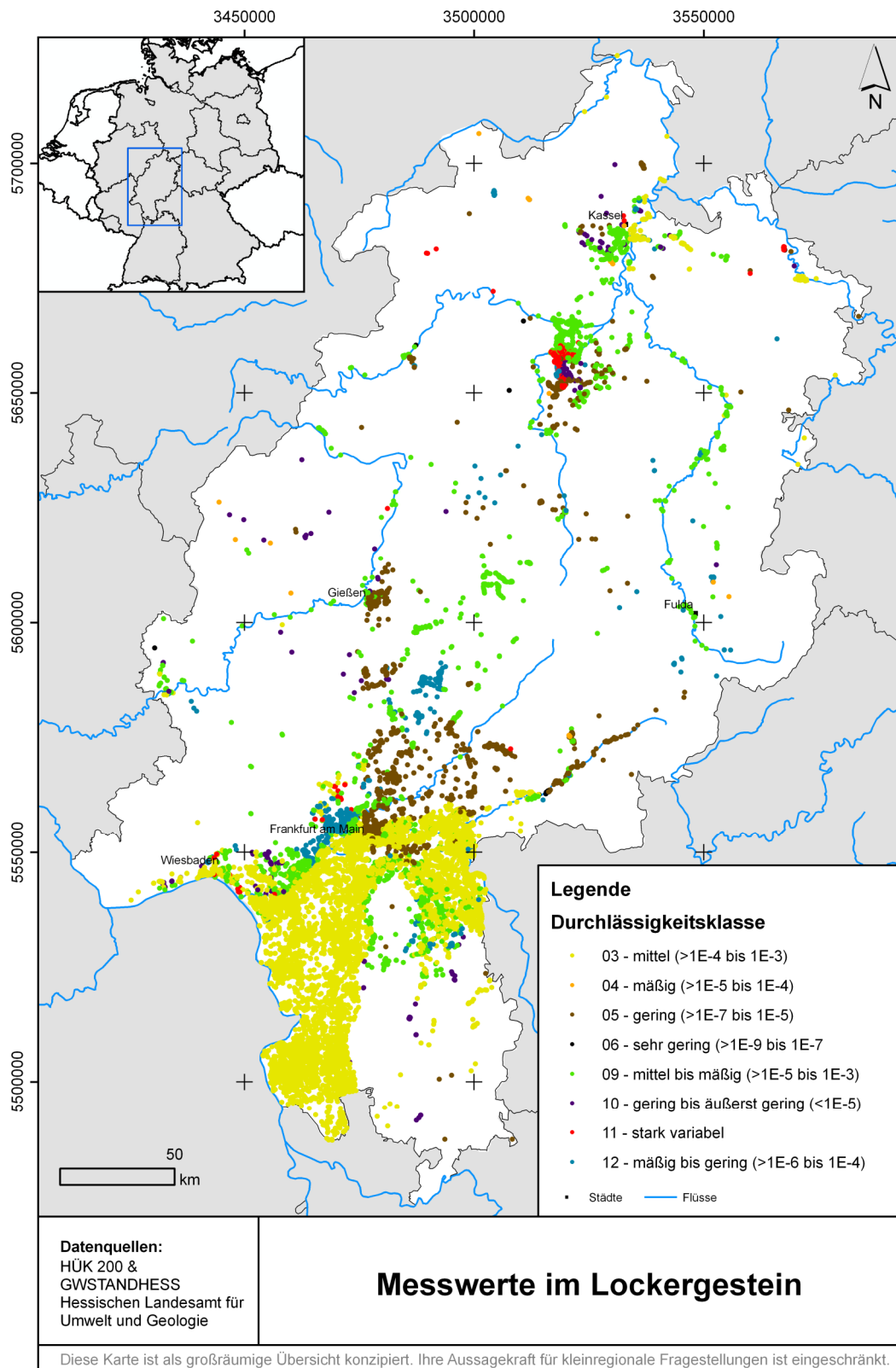


Abbildung A 1: Messwerte des Datenbestandes GWSTANDHESS im Lockergestein.

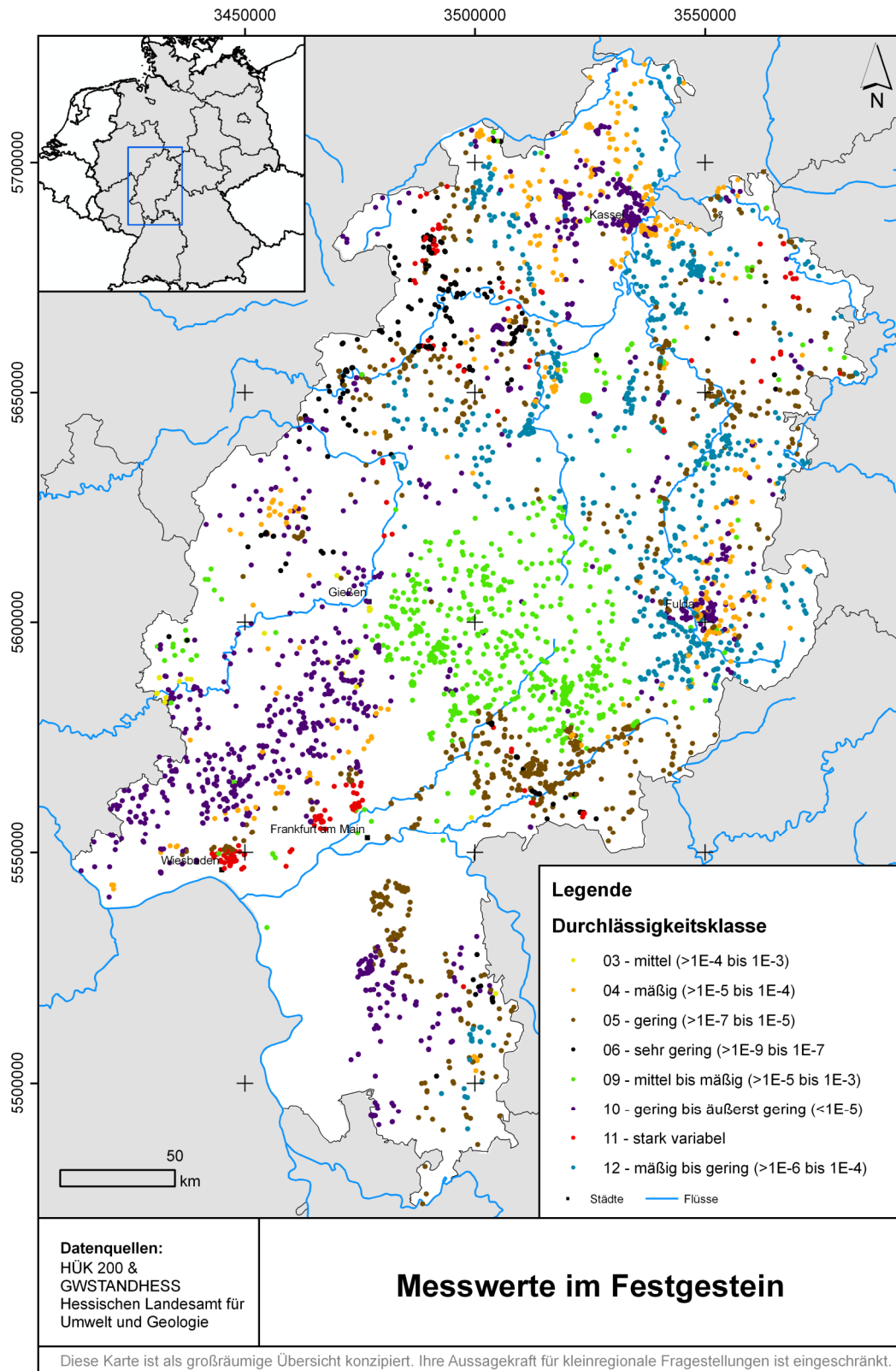


Abbildung A 2: Messwerte des Datenbestandes GWSTANDHESS im Festgestein.

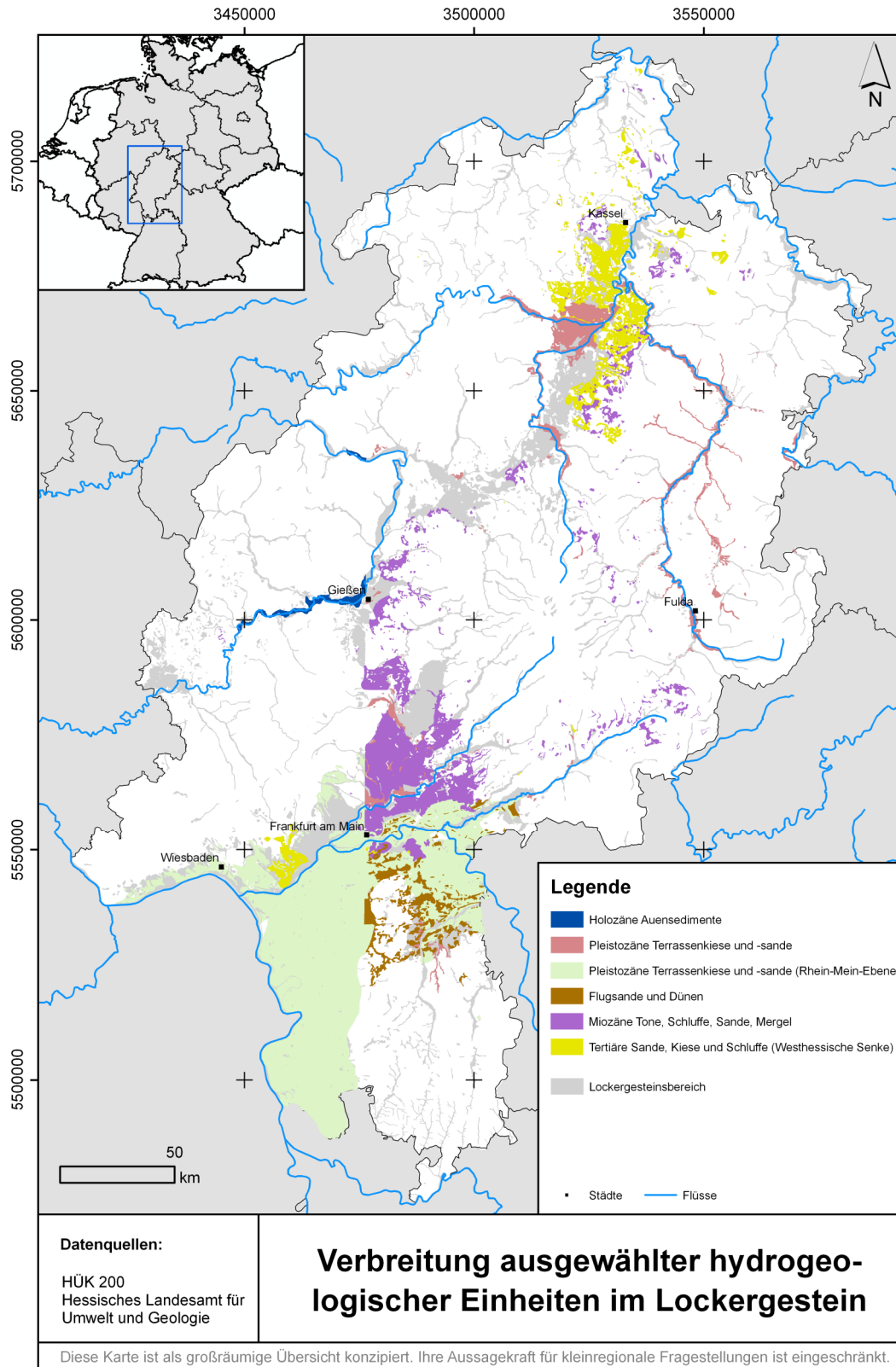
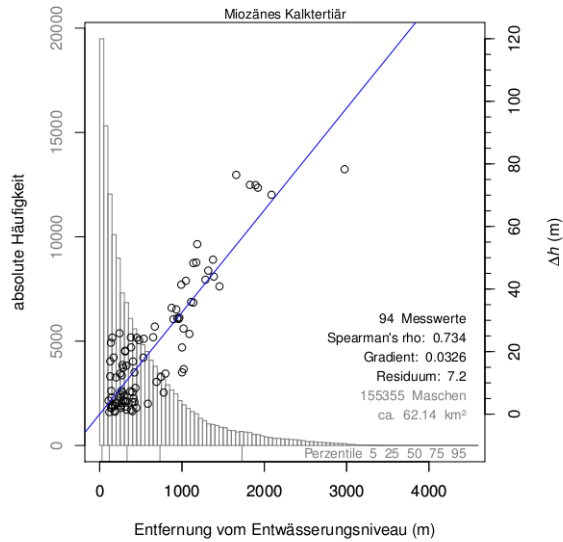


Abbildung A 3: Verbreitung ausgewählter hydrogeologischer Einheiten im Lockergesteinsbereich Hessens.

Anhang B – Ergebnisse

Tertiäre Sedimentgesteine



Tertiäre Vulkanite

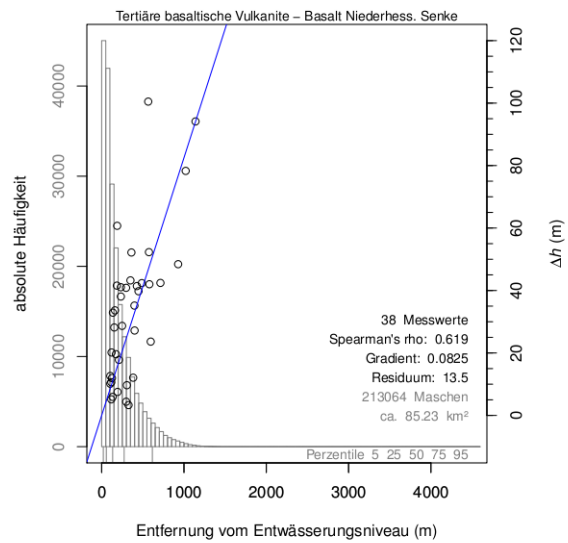
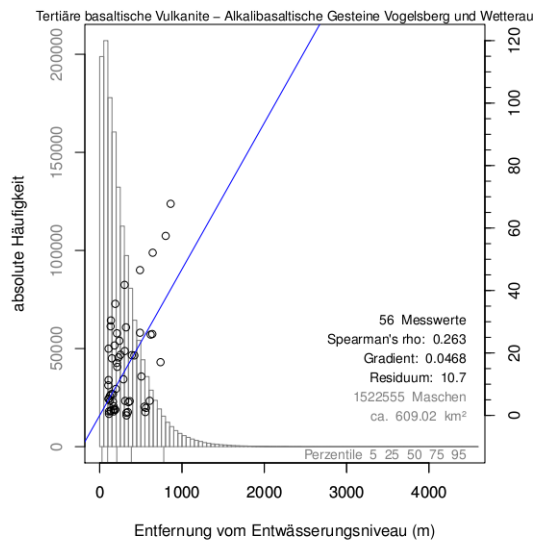
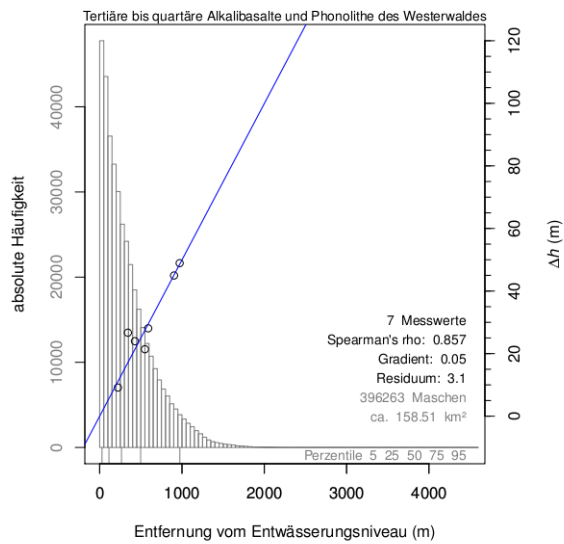
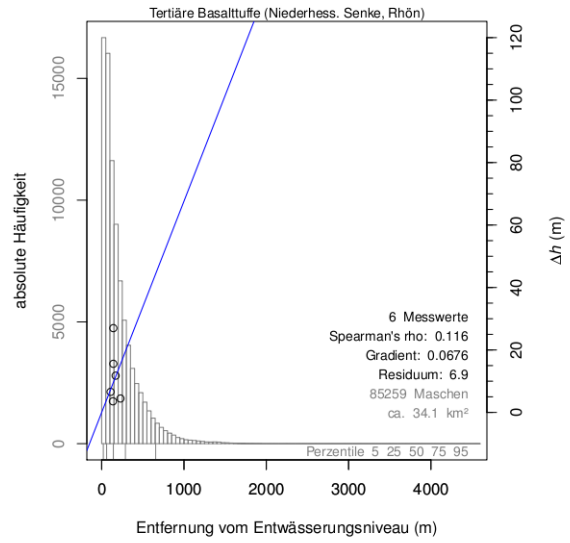
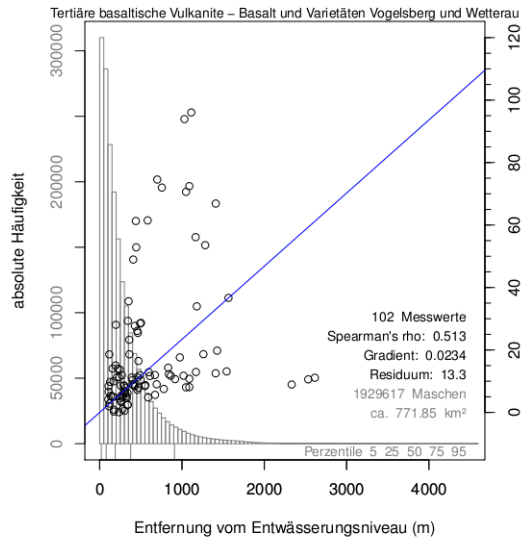
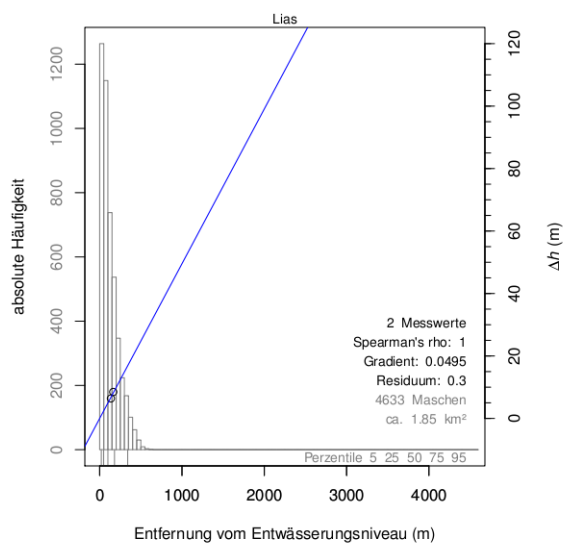


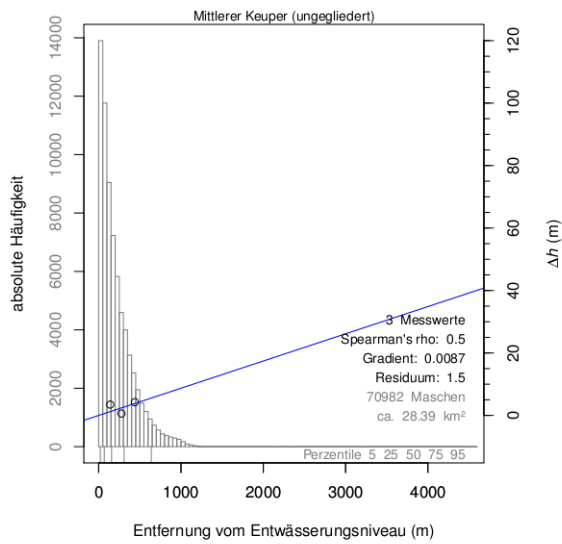
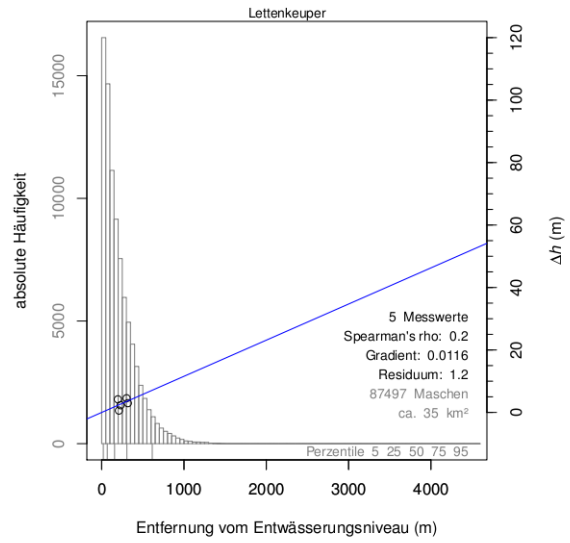
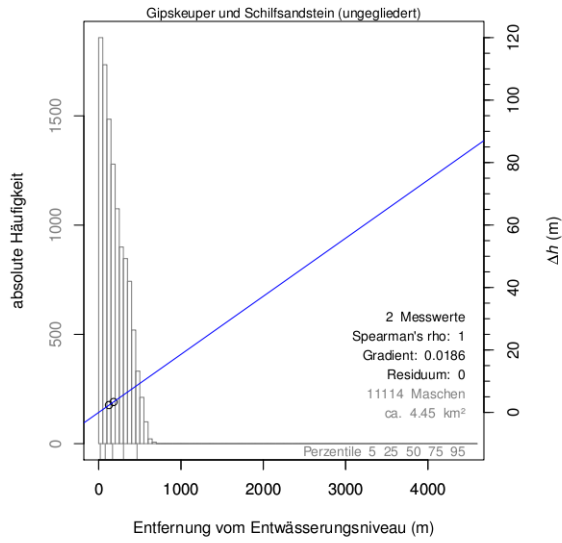
Abbildung B 1: Modellierter mittlere hydraulische Gradienten für hydrogeologische Einheiten im Festgestein. (Fortsetzung auf den Folgeseiten.)



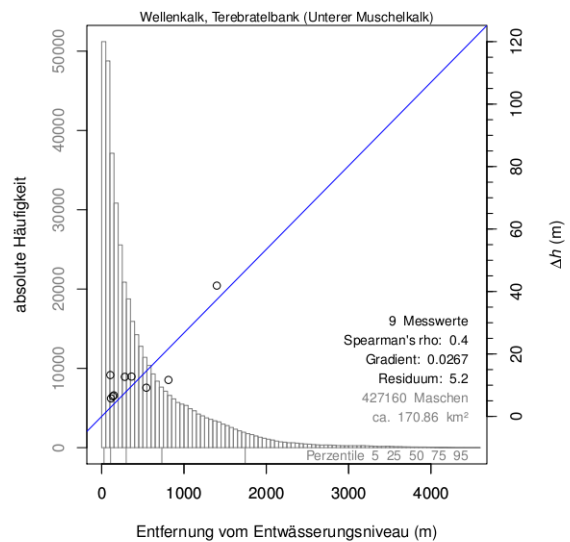
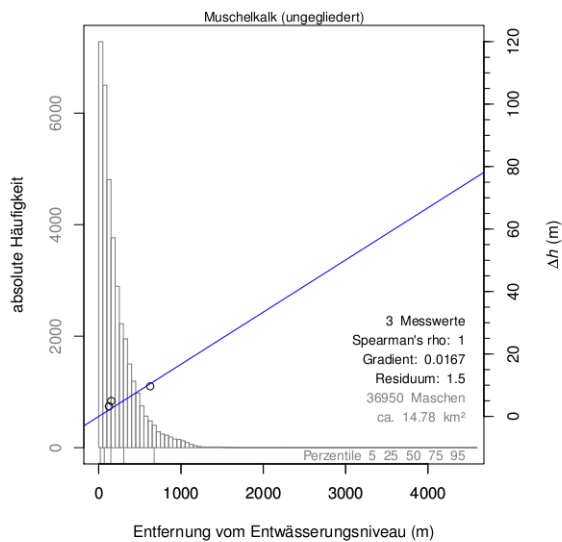
Jura



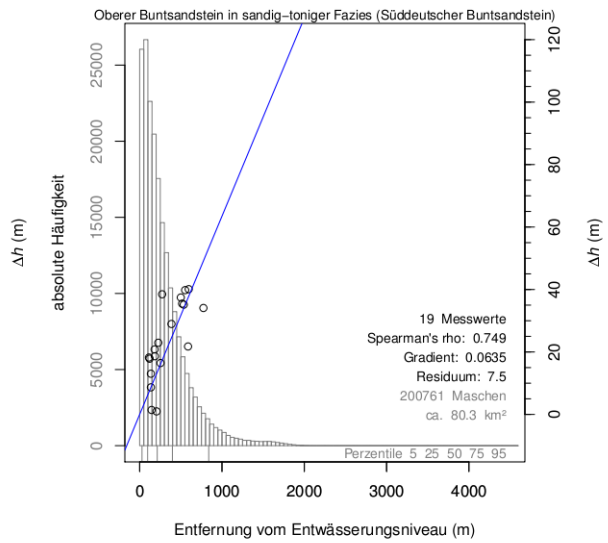
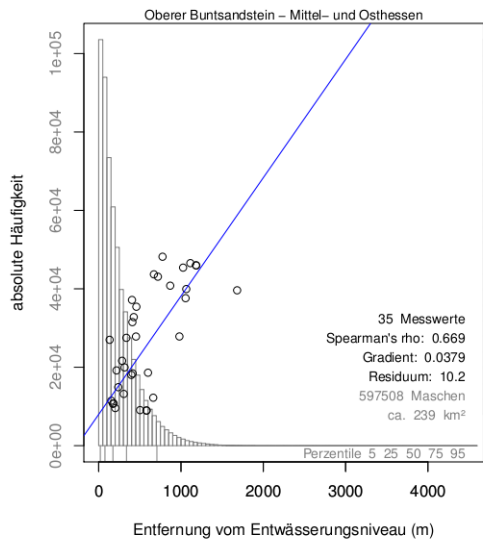
Keuper



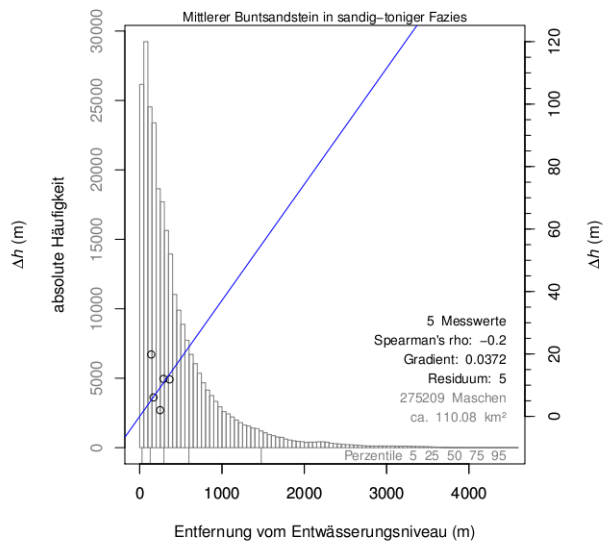
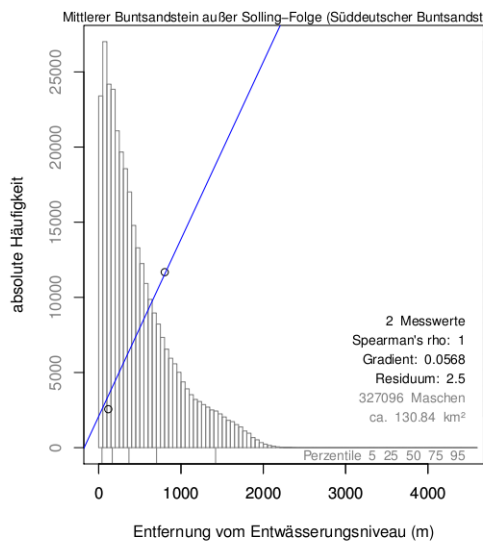
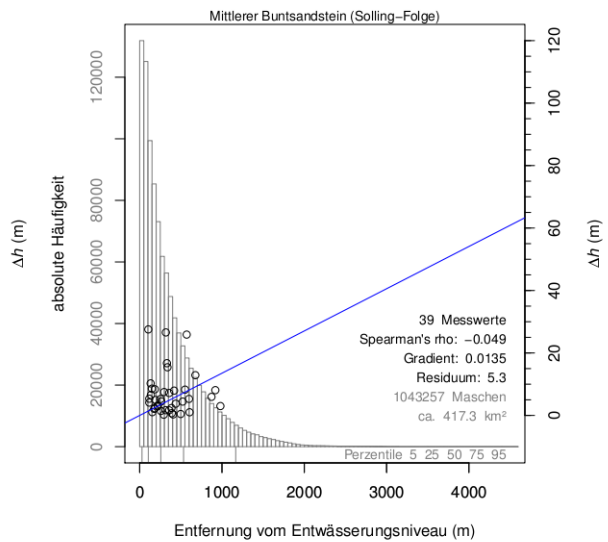
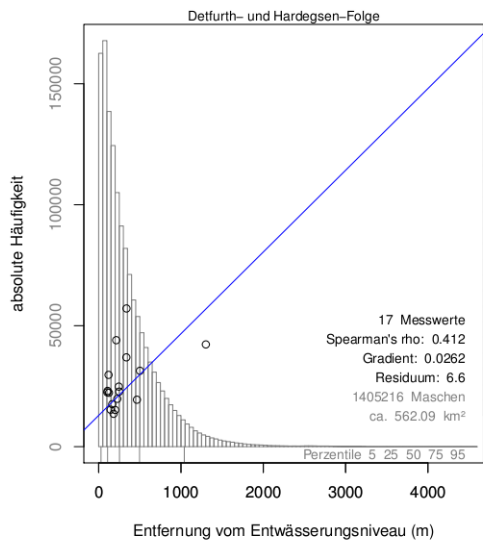
Muschelkalk

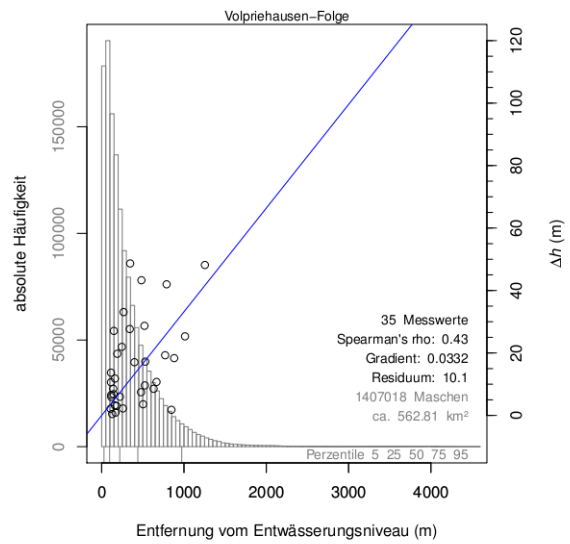
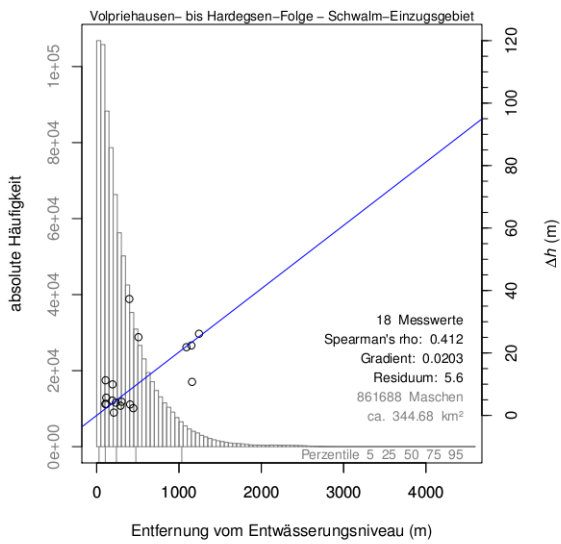
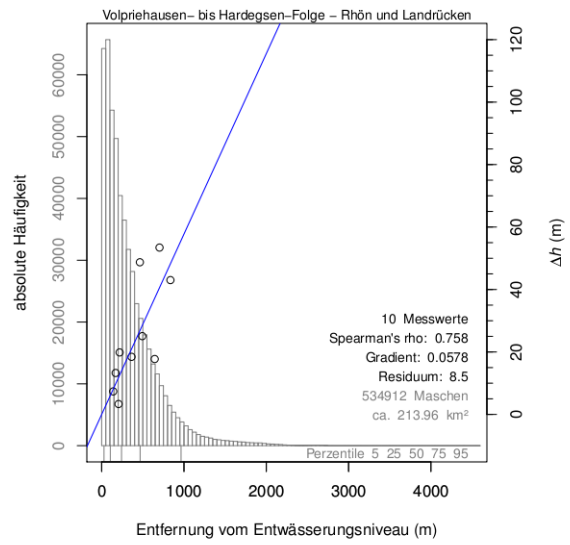
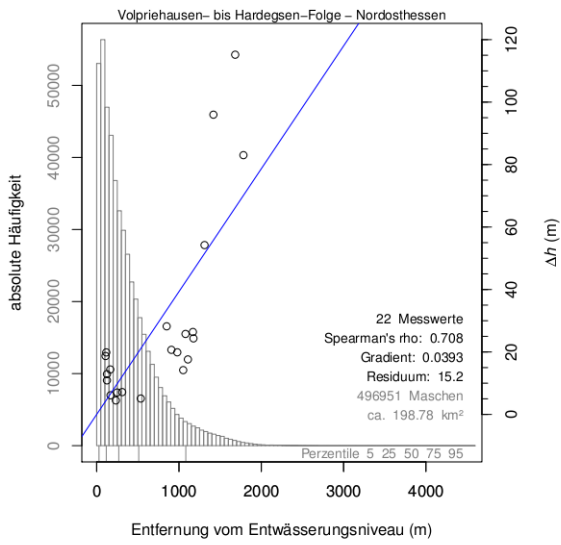


Oberer Buntsandstein

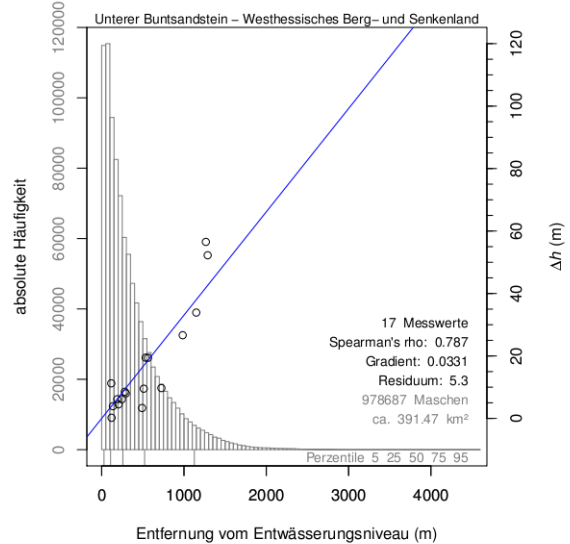
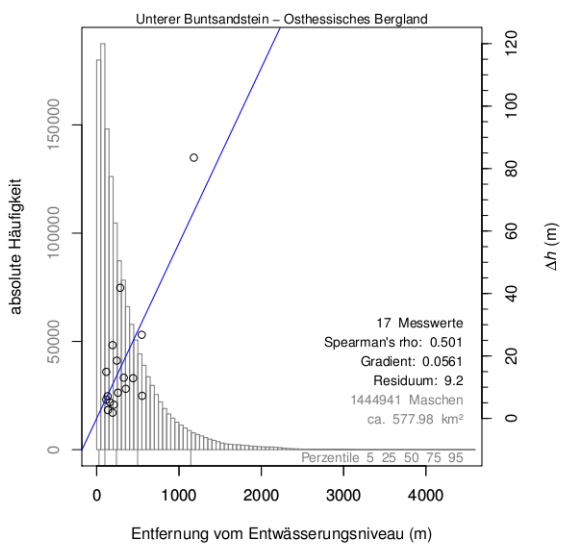


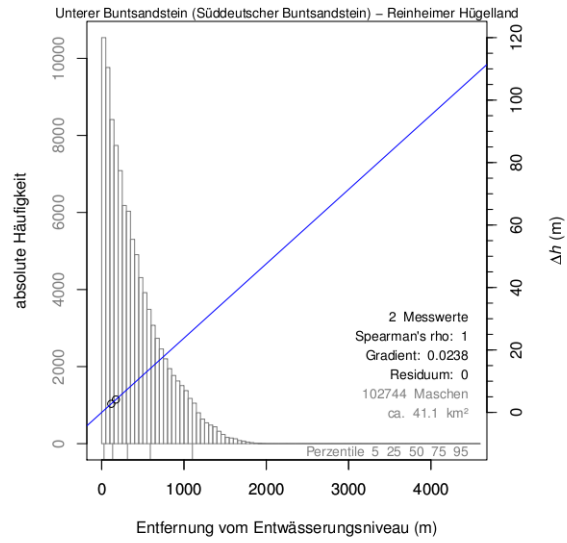
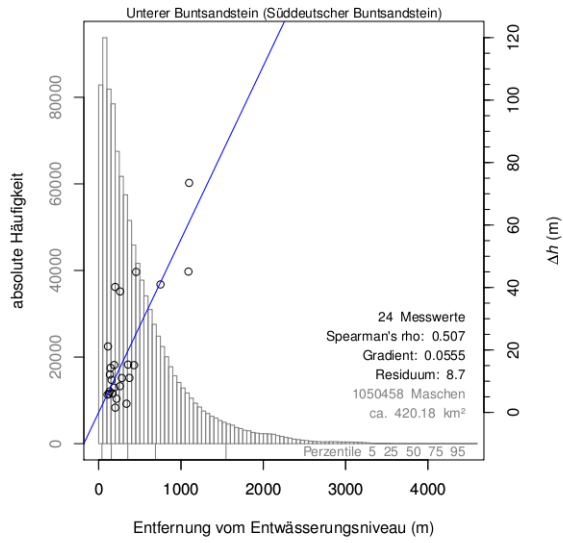
Mittlerer Buntsandstein



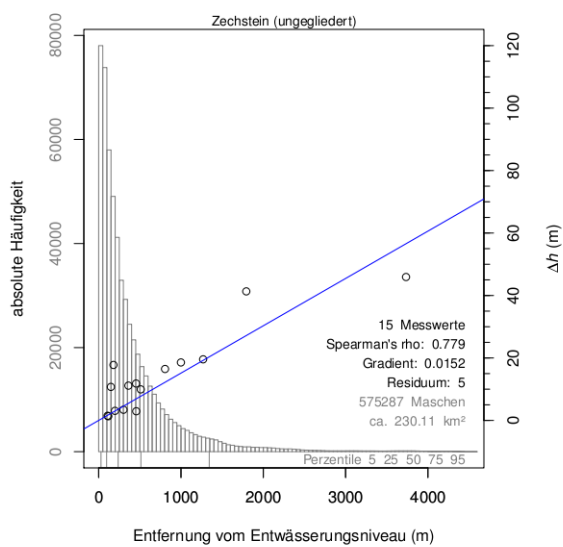
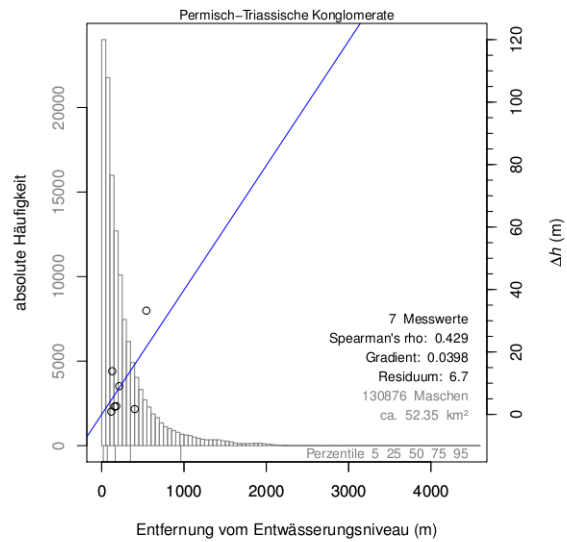
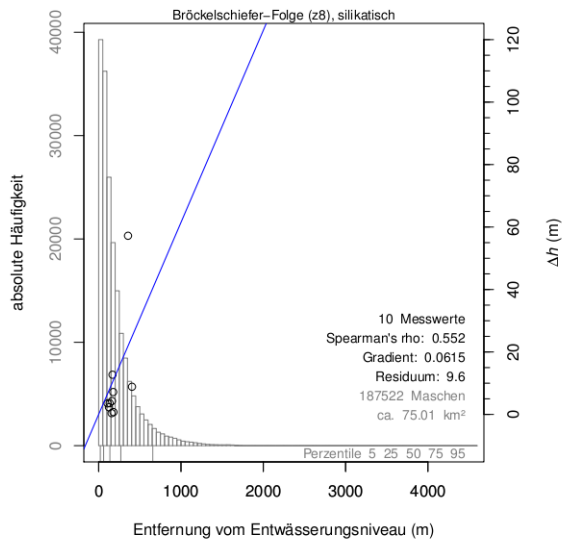


Unterer Buntsandstein

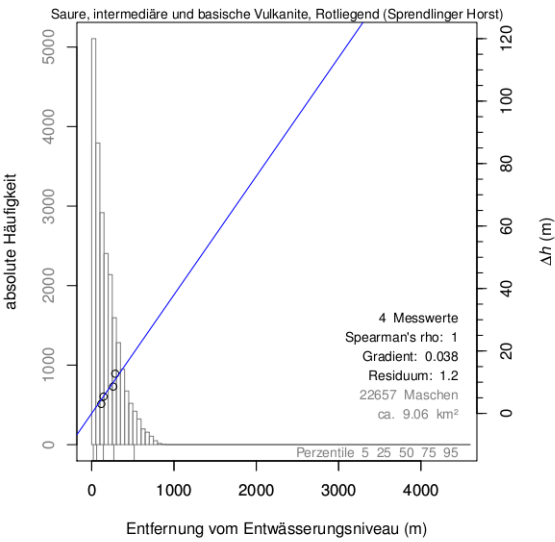
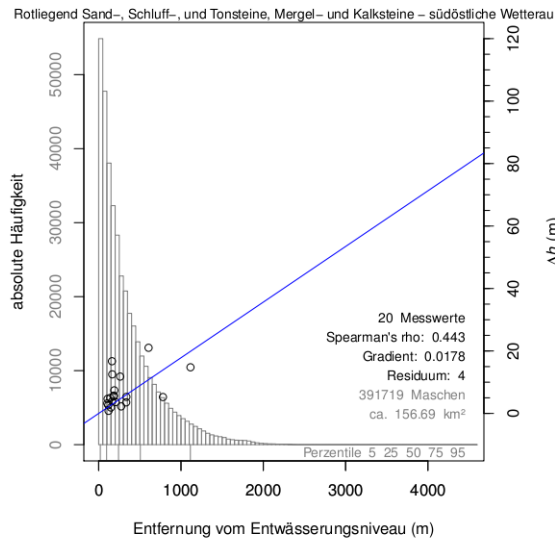
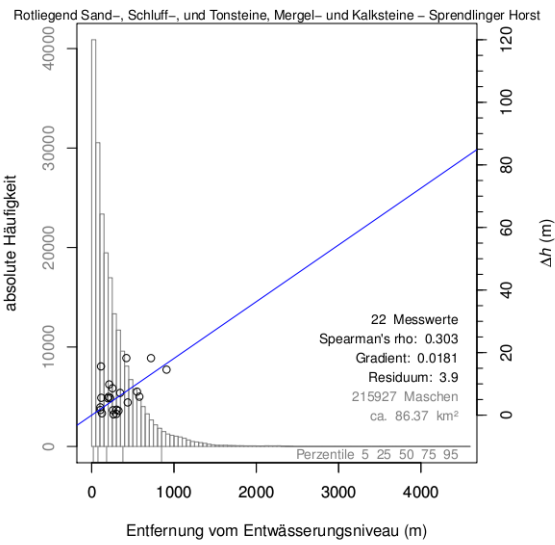
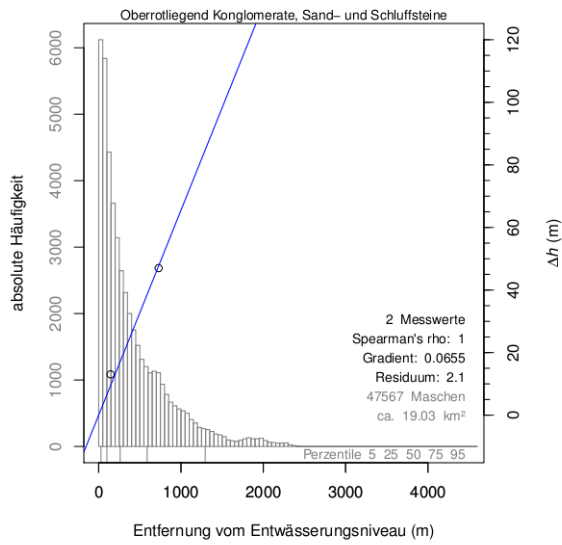




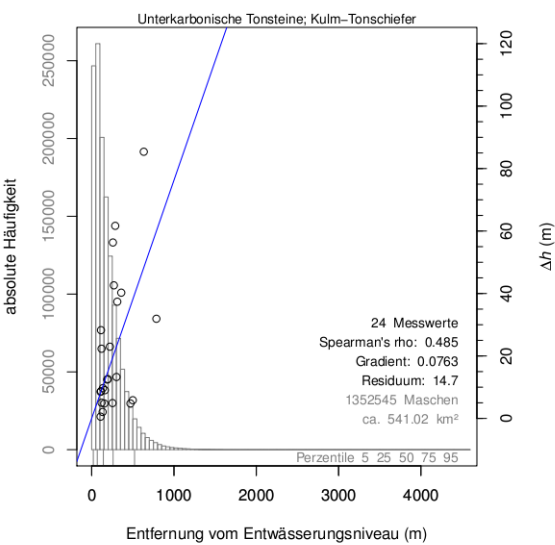
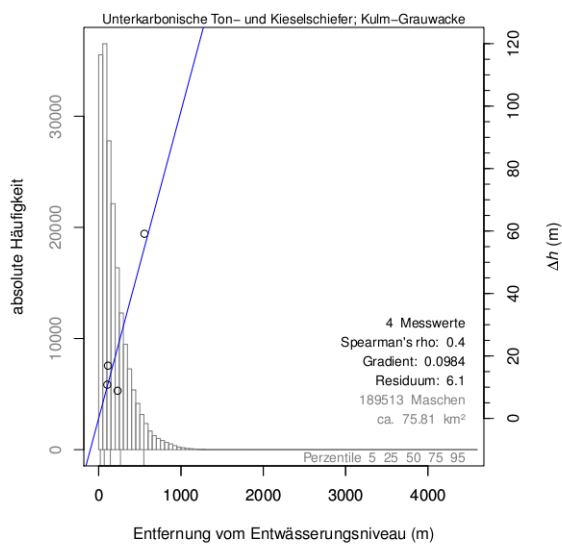
Zechstein



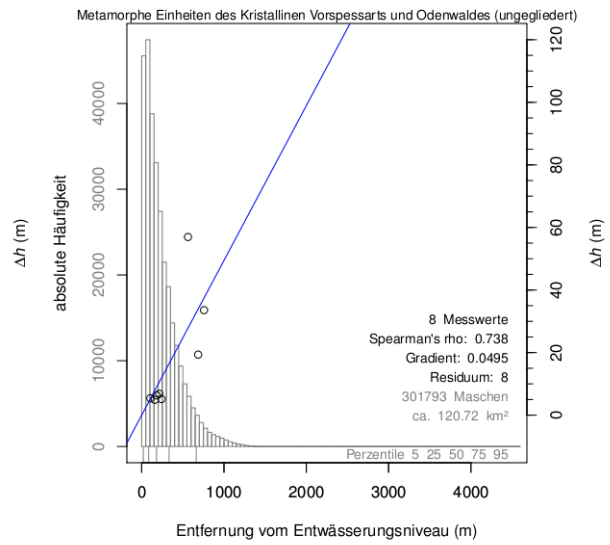
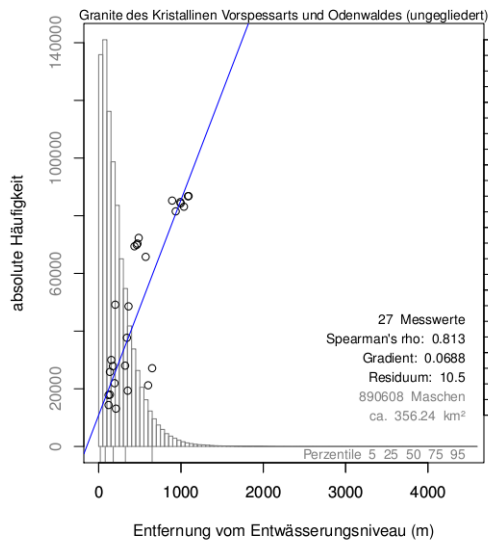
Rotliegend



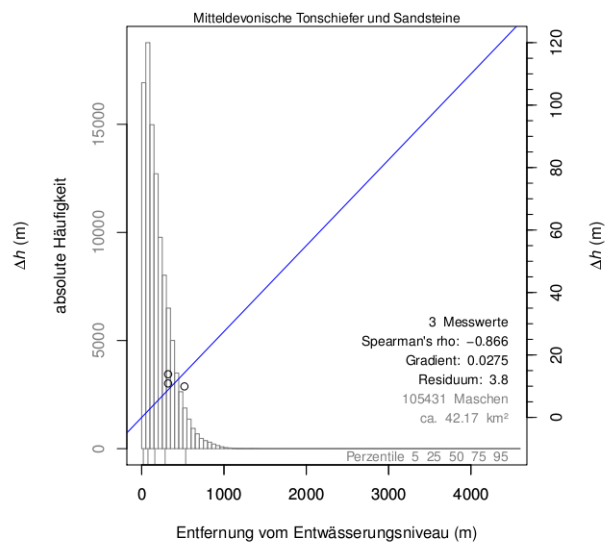
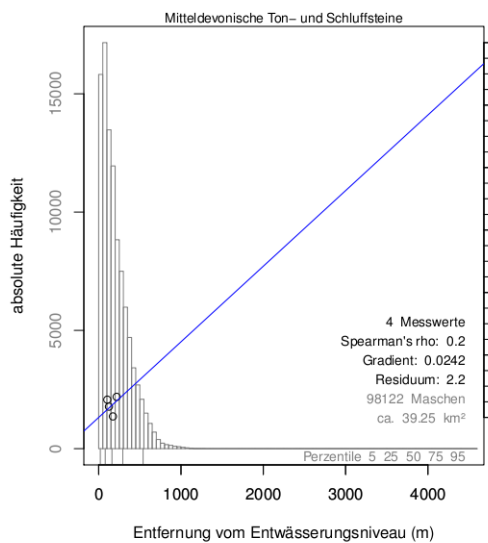
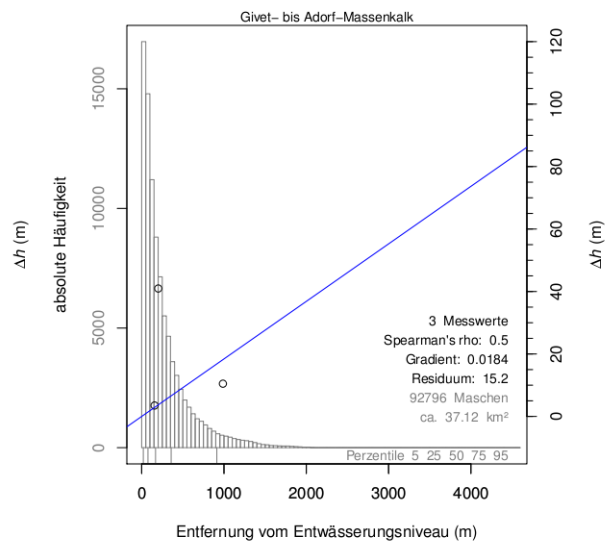
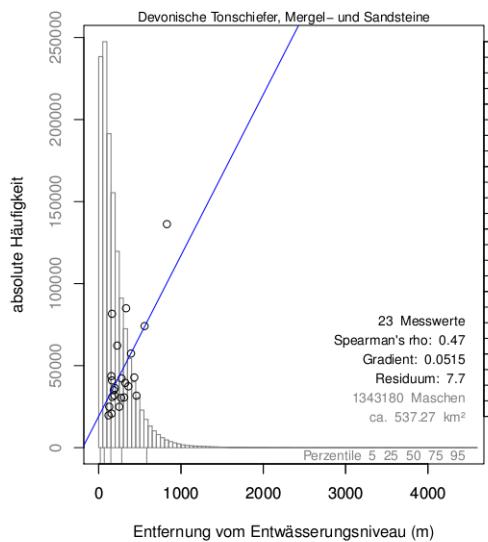
Unterkarbonische Sedimentgesteine

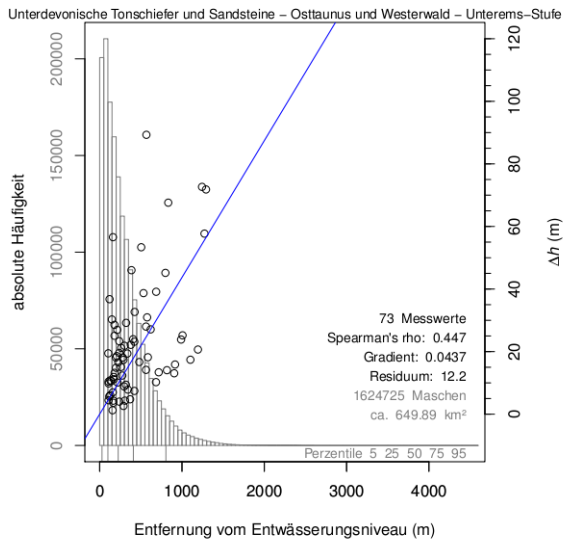
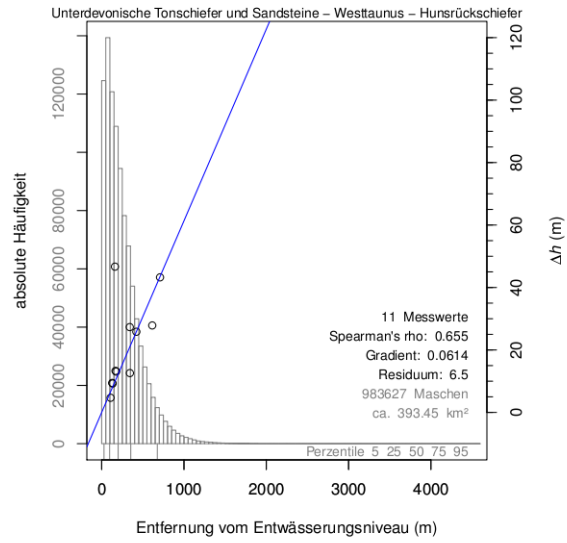
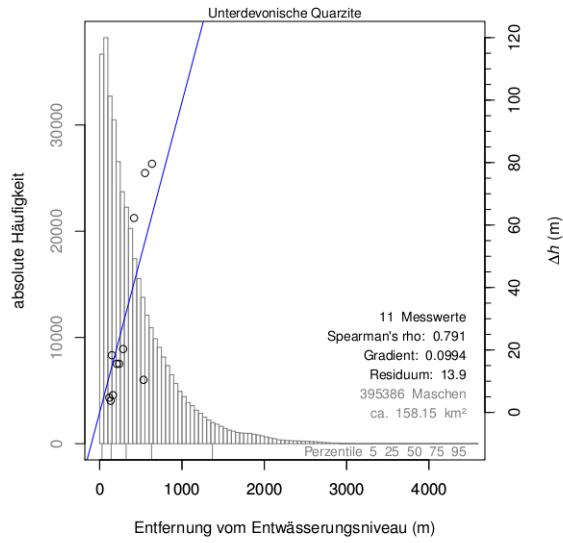


Unterkarbonische Magmatite

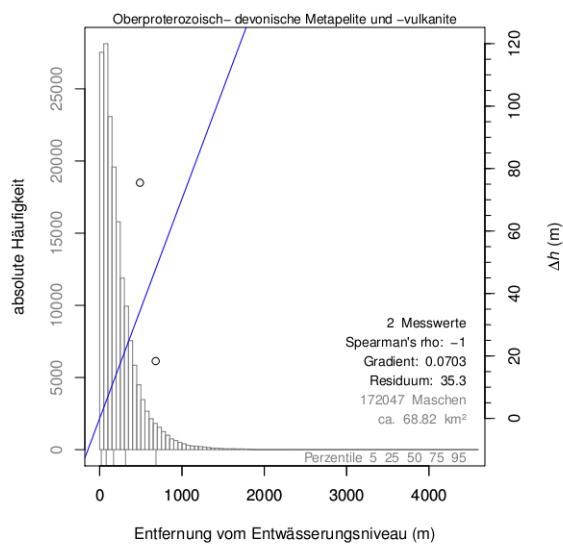


Devonische Sedimentgesteine

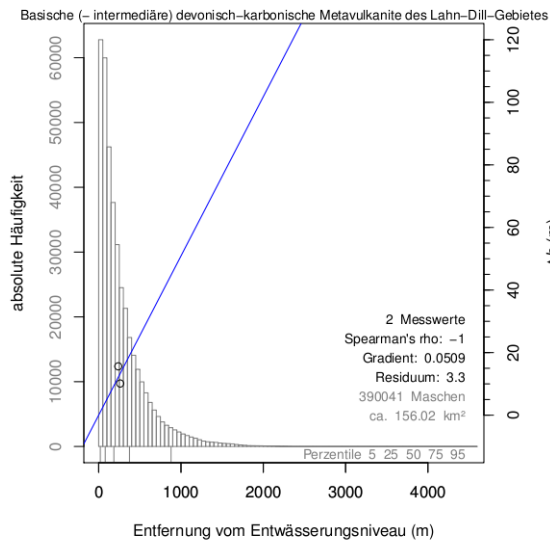




Devonische Methamorphite



Devonische Vulkanite



Altpaläozoische Metamorphite

