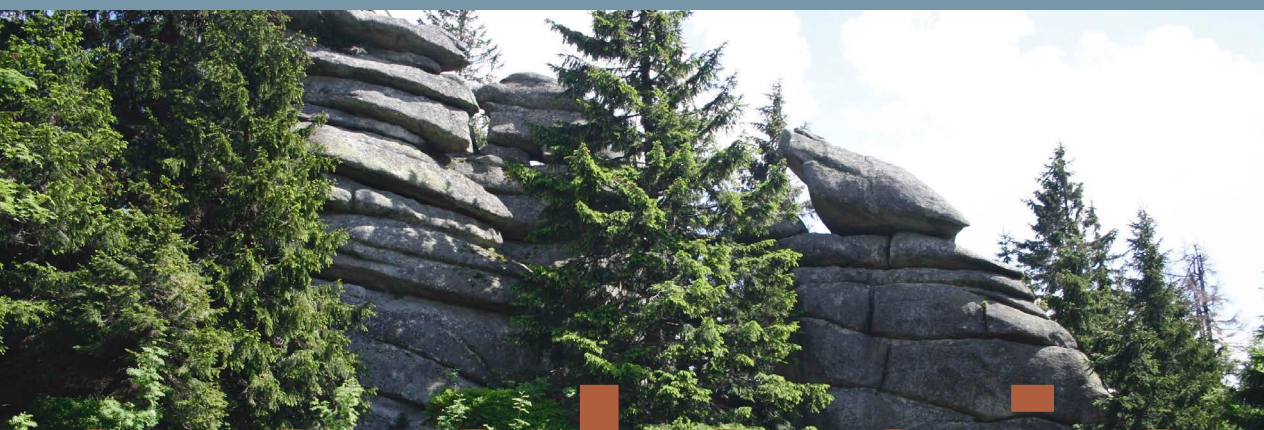


Strukturgeologie und Grundwasserführung im ostbayerischen Grundgebirge



geologie



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Strukturgeologie und Grundwasserführung im ostbayerischen Grundgebirge

Von
Matthias Zeitlhöfler, Bernhard Wagner und Timo Spörlein

64 Seiten, 24 Abbildungen, 2 Tabellen, Augsburg 2015

Geologica Bavarica 112

Impressum

Strukturgeologie und Grundwasserführung im ostbayerischen Grundgebirge

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax.: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung:

LfU, Matthias Zeitlhöfler, Bernhard Wagner und Timo Spörlein

Redaktion:

LfU, Referat 104

Bildnachweis:

LfU

Titelbild:

Granite am Dreisesselberg

Stand:

Januar 2015

Diese Schrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Schrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags, Bundestags, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird die Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Überblick	9
2.1	Geologie und Tektonik	9
2.2	Hydrogeologie	12
3	Datengrundlagen und Methodik	15
3.1	Lineamentanalyse	15
3.2	Strukturgeologie	15
3.3	Grundwasserführung	17
4	Strukturgeologische Kartierung	19
4.1	Strukturdaten geologischer Karten	19
4.2	Detailuntersuchungen	21
	Nördliche Oberpfalz	21
	Bayerischer Wald/Arbergebiet	24
	Südlicher Bayerischer Wald	26
5	Lineamentanalyse	28
5.1	Geostatistische Regionalisierung	28
5.2	Verifizierung der Lineamentdaten	32
6	Gebirgsdurchlässigkeiten	41
7	Geologische Strukturen und Grundwasserführung	50
8	Tiefenabhängigkeit von Gebirgsdurchlässigkeiten	53
9	Schlussfolgerungen	59
10	Danksagung	61
11	Literatur	62

Kurzfassung

Schlüsselwörter: Lineamentanalyse, Kluftgrundwasserleiter, Gebirgsdurchlässigkeit, Trennflächengefüge, Grundgebirge, Ostbayern

Im Zuge der geowissenschaftlichen Landesaufnahme wurden am Bayerischen Landesamt für Umwelt im Rahmen eines vom Bayerischen Umweltministerium und der EU kofinanzierten Projekts für das gesamte ostbayerische Grundgebirge geologische und hydrogeologische Kartengrundlagen bearbeitet. Ein Ziel dieser Kartierungen war die Erstellung einer plausiblen hydrogeologischen Modellvorstellung für die Grundwasserführung dieses allgemein als Grundwassermangelgebiet angesehenen hydrogeologischen Raums.

Die Grundwasserführung in den an sich wasserundurchlässigen Gesteinen (in erster Linie Granite und Gneise) erfolgt vorwiegend entlang von Klüften, Störungen und anderen Trennfugen. Zur Ermittlung der zugrunde liegenden Störungsmuster wurde eine Lineamentanalyse mittels Fernerkundung durchgeführt, die mit den in geologischen Karten ausgewiesenen Störungen sowie umfangreichen Kluftmessungen im Gelände abgeglichen und plausibilisiert wurde.

Quantitative Daten zur Grundwasserführung (k_f -Werte und spezifische Ergiebigkeiten) wurden aus über 280 Pumpversuchen an Brunnen und Grundwassermessstellen sowie aus WD-Packertests an Bohrungen ermittelt.

Die Darstellung der Verteilung der Durchlässigkeiten für die unterschiedenen hydrogeologischen Haupteinheiten erfolgte mit Histogrammen und Box-Whisker-Plots sowie tiefenhorizontiert bis 260 m Teufe. Grundwasserführung und Strukturgeologie wurden durch eine räumliche Analyse der Korrelation der Distanz der Pumptests zu kartierten Lineamenten in Bezug gesetzt.

Im Ergebnis zeigte sich ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten bzw. spezifischen Ergiebigkeiten und der Entfernung zum nächstgelegenen Lineament dahingehend, dass Brunnen oder Bohrungen mit geringen bis sehr geringen Durchlässigkeiten ($< 10^{-5}$ m/s) bzw. Ergiebigkeiten grundsätzlich unabhängig vom Abstand zum nächstgelegenen Lineament auftreten. Wenn jedoch in Brunnen oder Bohrungen höhere Durchlässigkeitsbeiwerte (bis zu 10^{-4} m/s) ermittelt wurden, lagen diese immer im Nahbereich < 500 m der ermittelten Lineamente.

Hinsichtlich der Tiefengliederung der Gebirgsdurchlässigkeiten wirken sich im oberen Bereich bis etwa 50 m unter Gelände die tertiären und quartären Verwitterungsvorgänge aus. Auch ist dieses Tiefenintervall stärker geklüftet, da sich dort die reduzierte Gebirgsauflast durch Entlastungsklüfte bemerkbar macht. Entsprechend werden in diesem Abschnitt höhere Durchlässigkeiten angetroffen.

In tieferen Bereichen verlieren Verwitterungs- und Entlastungseffekte ihre Bedeutung und die Kluft- bzw. Störungsmuster sind ausschließlich als Reaktion auf regionale tektonische Spannungsfelder angelegt. Dort konzentriert sich der Grundwasserfluss mit zunehmender Tiefe tendenziell auf weniger, dafür räumlich länger aushaltende Klüfte. Die Gebirgsdurchlässigkeit wird dabei zunehmend heterogen, sodass das kaum geklüftete Kristallin weitgehend undurchlässig ist, während die wenigen Wasserwegsamkeiten den Großteil des Grundwasserdargebotes transportieren.

Die Chance auf eine nutzbare Wasserführung ist nach dieser Untersuchung deutlich erhöht, wenn Brunnenstandorte in den Nahbereich der ausgewiesenen Lineamente gelegt werden – idealerweise in deren Kreuzungspunkte. Dieser Ansatz kann die klassischen hydrogeologischen Untersuchungsmethoden zwar nicht ersetzen, er liefert aber eine weitere Entscheidungsgrundlage für die Standortwahl von Wasserversorgungen im kristallinen Grundgebirge.

Abstract

Structural geology and groundwater migration in the crystalline basement of Eastern Bavaria

Keywords: lineament analysis, fractured rock aquifers, rock permeability, joint structures, crystalline basement, Eastern Bavaria

As part of the geological survey of the Bavarian state territory the Bavarian environment agency conducted a geologic and hydrogeologic mapping campaign in the area of the Eastern Bavarian crystalline basement in a project financed by the Bavarian ministry of the environment and co-financed by the European Union. One purpose of the survey was to produce a consistent hydrogeological model for the patterns of groundwater migration in this hydrogeological region generally known for its deficiency in groundwater resources.

Groundwater flow in the widely impermeable rocks occurring in this region (predominantly granite and gneiss) mainly takes place along fractures, faults and joints. In order to determine the main fault and fracture structures, a lineament analysis was conducted by means of remote sensing. The results were verified against fault lines in geological maps and extensive field measurements of fracture patterns.

Quantitative data on ground water flow (hydraulic conductivity and specific yield) was obtained from more than 280 well and packer tests.

The distribution parameters of hydraulic conductivities differentiated according to the main hydrogeological units of the study area are illustrated by histograms and box-whisker-plots. In one case study depth dependent hydraulic conductivities could be determined down to 260 m below grade.

Groundwater migration and structural geologic entities were correlated by a spatial analysis of the distance between pumping test sites and lineaments.

It could be demonstrated that wells with low hydraulic conductivities ($< 10^{-5}$ m/s) can be found ubiquitously and without any dependency on the distance to lineaments, while wells with higher hydraulic conductivities (up to 10^{-4} m/s) only occur in the vicinity of lineaments, generally within a radius of approximately 500 m.

With regard to the depth dependence of hydraulic conductivities the upper zone of about 50 m is influenced by tertiary and quaternary weathering. Additionally, a higher density of fissures is present in this depth interval due to a reduced load of overlying rocks and the related vertical expansion of the rock column. Therefore, the higher hydraulic conductivities can be found in this zone.

At greater depths the effects of weathering and unloading attenuate until the structural patterns are solely influenced by the regional tectonic stress fields. Therefore, at greater depths groundwater flow takes place along fewer but larger fractures. This results in an increasingly heterogeneous permeability ranging from more or less impermeable crystalline rocks to conductive discrete structures channelling the bulk of the groundwater flow.

Based on the results of this investigation chances of finding productive wells are increased if drilling locations are placed in close vicinity to lineaments – ideally at intersections thereof. This approach cannot entirely replace the classical hydrogeological methods of groundwater prospecting, but it can be a further aspect when locating drinking water supplies in the crystalline basement.

1 Einleitung

In den Jahren 2001 bis 2007 wurde durch den Geologischen Dienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) im Rahmen des vom Bayerischen Umweltministeriums mit Förderung der EU finanzierten Projekts „Schaffung geologischer und hydrogeologischer Informationsgrundlagen“ die geologische Grundlagenenerhebung sowie hydrogeologische Kartierung des gesamten ostbayerischen Grundgebirges im Maßstab 1 : 50 000 durchgeführt (z. B. DIEPOLDER et al. 2011). In der hier vorgelegten Studie wird auf Grundlage der umfangreichen erhobenen Daten, insbesondere den Untersuchungen zur Strukturgeologie und der Grundwasserführung, erstmals ein umfassender und flächendeckender Überblick zur tektonischen Struktur und der Ansatz einer Quantifizierung der Grundwasserführung in diesem Bereich gegeben. Dies ist vor allem von Interesse für die Wassererschließung in diesem allgemein als Grundwassermangelgebiet angesehenen Raum und für die Überprüfung der bisher gängigen Modellvorstellungen zur Grundwasserführung – insbesondere zur Tiefenhorizontierung der wasserführenden Hohlräume und Durchlässigkeiten. Ein Schwerpunkt wird hierbei auf den Zusammenhang zwischen Strukturgeologie und Grundwasserführung gelegt, um unter anderem Hinweise auf besonders grundwasserhöffige Bereiche sowie zur Grundwasserführung tieferer Gesteinsbereiche zu erhalten. Der Zusammenhang zwischen der morphologischen Ausprägung von Landschaften und den darunterliegenden (bruch-)tektonischen Strukturen ist mittlerweile hinreichend bekannt und hat Einzug in die Standardliteratur sowohl auf dem Gebiet Geomorphologie (z. B. AHNERT, 1999) als auch der Fernerkundung (z. B. GUPTA, 2003; JENSEN, 2000) gehalten. Für hydrogeologische Fragestellungen sind Erkenntnisse über bruchtektonische Strukturen von Interesse, da in Kristallingebieten Grundwasservorkommen in hohem Maße an Klüfte und Störungen im Festgestein gebunden sind. Solche Strukturen bieten in Gesteinen ohne nennenswerte primäre Porosität den einzigen Raum für die Bewegung von Grundwasser.

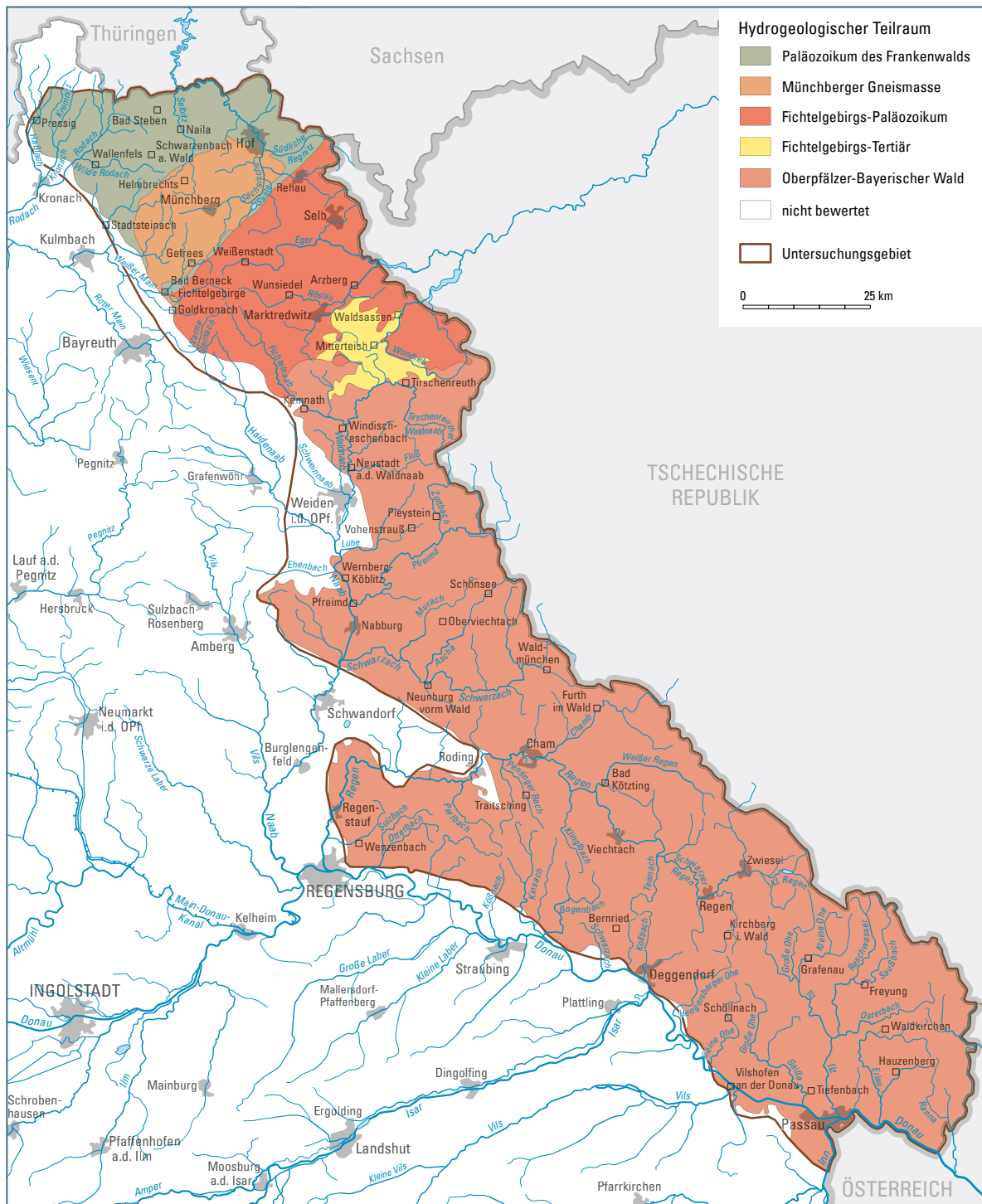
Aus diesem Grund ist es wichtig, Erkenntnisse über die bruchtektonische Struktur eines Gebietes zu erlangen und Wege zu finden, diese Strukturen mit möglichst geringem Aufwand zu identifizieren. Mittlerweile gibt es eine Reihe von Studien zu diesem Thema (z. B. BARTON et al. 1993, STÖBER 1995, FERRILL et al. 1999, LIE & GUDMUNDSSON 2002, MABEE et al. 2002, MABEE & HARDCASTLE 1997, MABEE et al. 1994, WILLIAMS 2000), deren Methoden auch für das hier untersuchte ostbayerische Kristallin anwendbar sind. Auch in Ostbayern wurden in den letzten Jahren erste systematische Untersuchungen des Systems Morphologie-Bruchtektonik-Grundwasserfluss durchgeführt (RAUM 2002; ZEITLHÖFLER & RAUM 2005, GALADÍ-ENRÍQUEZ 2006, ZEITLHÖFLER 2007), die für diese Region ebenfalls einen großen Einfluss der bruchtektonischen Strukturen auf die Grundwassermigration zeigten.

Die hier vorliegende Analyse von Lineamenten auf der Basis eines digitalen Geländemodells (DGM) und deren Abgleich mit bruchtektonischen Gefügedaten und hydraulischen Kennwerten stellt einen weiteren Schritt hin zu einem besseren Verständnis der Kluftgrundwasserleiter im ostbayerischen Grundgebirge dar und hilft dabei, allgemeine Aussagen bezüglich bruchtektonischer Strukturen in für Geländearbeit unzugänglichen oder schlecht aufgeschlossenen Gebieten zu treffen. Dabei darf allerdings nicht außer Acht gelassen werden, dass eine Analyse topographischer Lineamente und deren Ergebnisse für sich allein nicht ausreichen, um das komplexe hydraulische System des Trennflächengefüges in kristallinen Kluftgrundwasserleitern zu charakterisieren.

Sowohl hydrogeologische als auch strukturgeologische Daten müssen mit den Ergebnissen der Lineamentanalyse korreliert werden, um die Existenz und hydrologische Signifikanz der kartierten morphologischen Strukturen zu verifizieren. Dazu erfolgte der Abgleich zwischen Lineament- und Kluftrichtungen anhand von Gefügedaten, die im Rahmen verschiedener Untersuchungen im ostbayerischen Kristallin durchgeführt wurden (GALADÍ-ENRÍQUEZ 2006, ZEITLHÖFLER 2006, ZEITLHÖFLER 2007). Weiterhin wurden Gebirgsdurchlässigkeiten, die im Rahmen der hydrogeologischen Landes-

aufnahme Bayerns (DIEPOLDER et al. 2011) anhand von Pumpversuchen ermittelt wurden, hinsichtlich ihres räumlichen Bezugs zu topographischen Lineamenten als auch hinsichtlich der erschlossenen Lithologie betrachtet und geostatistisch ausgewertet.

In der Zusammenschau ergeben die einzelnen Datensätze ein schlüssiges Bild, das die Zusammenhänge zwischen Landschaftsformen, geologischen Strukturen und hydrogeologischen Fragestellungen aufzeigt.



Geobasisdaten: DLM 1000, © GeoBasis-DE / BKG 2013 (Daten verändert)

Abb. 2-1: Übersicht der hydrogeologischen Teilräume im ostbayerischen Grundgebirge.

2 Überblick

Das kristalline Grundgebirge Ostbayerns verläuft entlang der tschechischen Grenze und erstreckt sich vom Bayerischen Vogtland im äußersten Norden bis zum Passauer Wald an der bayerisch-österreichischen Grenze im Süden. Nach Westen ist das Grundgebirge durch mehrere große NW–SE streichende Störungslinien gegen das Vorland abgegrenzt. Von Oberfranken bis in die Oberpfalz in der Gegend um Hirschau bildet das Bruchschollenland die westliche Begrenzung des Grundgebirges. Richtung Süden wird es vom Frankenjura und der Regensburger Kreide als Grundgebirgsvorland abgelöst. Von Regensburg Richtung Südosten bis nach Vilshofen bildet die Donau-Störung eine deutliche Trennlinie zwischen den quartären Ablagerungen im Donautal bzw. den tertiären Ablagerungen des alpinen Molassebeckens und dem Grundgebirge. Im Osten stößt das Untersuchungsgebiet an das Tschechische Staatsgebiet.

Innerhalb dieser Grenzen wurde das kristalline Grundgebirge auf Grundlage seiner geologischen und tektonischen Charakteristik in mehrere hydrogeologische Teilräume gegliedert (BÜTTNER et al. 2003). Im Süden ist dies der ausgedehnte Komplex des Oberpfälzer-Bayerischen Waldes, der sich vom Passauer Wald im Süden bis an die Grenze zum Fichtelgebirge im Norden erstreckt.

In seinem nördlichen Teil ist das kristalline Grundgebirge aus hydrogeologischer Sicht kleinräumiger gegliedert. Die Teilräume umfassen hier das Fichtelgebirgs-Erzgebirgs-Paläozoikum (für den bayerischen Anteil im Folgenden: Fichtelgebirgs-Paläozoikum), das Paläozoikum des Frankenwaldes sowie in geringen Gebietsanteilen die Antiklinalbereiche des thüringischen Schiefergebirges (im Folgenden zusammengefasst als: Paläozoikum des Frankenwaldes) und die Münchberger Gneismasse.

An der Grenze zwischen Oberpfälzer Wald und Fichtelgebirge ist der Teilraum des Fichtelgebirgs-Tertiärs eingeschaltet, in dem vor allem tertiäre Sedimente und Vulkanite auftreten. Letztere sind für die vorliegende Fragestellung nicht von Bedeutung und werden daher nicht eingehender berücksichtigt.

Die einzelnen hydrogeologischen Teilräume sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

2.1 Geologie und Tektonik

Der **Oberpfälzer-Bayerische Wald** wird vorwiegend aus einer relativ monotonen Abfolge von hochmetamorphen Gneisen und Graniten aufgebaut. Er bildet eine Mittelgebirgsregion mit Höhen zwischen 300 m und über 1400 m ü. NN, die durch die (W)NW–(E)SE verlaufende Donaustörung nach Südwesten hin vom Dungau abgegrenzt wird. Nördlich von Regensburg stößt der Teilraum im Westen an das Schichtstufenland mit Ablagerungen des Frankenjura und der Oberkreide. Das Gebiet bildet als Teil des Moldanubikums den Südwestrand der böhmischen Masse und wird durch den ebenfalls (W)NW–(E)SE streichenden Bayerischen Pfahl in den vorderen Bayerischen Wald (mit Passauer Wald im Südosten und dem östlichen Rand des Regensburger Waldes im Nordwesten) und den hinteren Bayerischen Wald sowie im Norden den Oberpfälzer Wald geteilt.

Im vorderen Bayerischen Wald dominieren hochmetamorphe, zum Teil anatektische Gneise sowie Granitoide, die aus der völligen Aufschmelzung der Metamorphite hervorgegangen sind (Diatexite). Weite Bereiche des hinteren Bayerischen und Oberpfälzer Waldes werden dagegen von monotonen Paragneisabfolgen aufgebaut, in die örtlich „bunte Serien“ von Metakarbonaten und Metavulkaniten eingeschaltet sind. Darüber hinaus treten im gesamten Moldanubikum vereinzelt

auch basische und Graphit führende Metamorphite sowie Kalksilikattfelse auf. Während der variskischen Gebirgsbildung mit zahlreichen (W)NW–(E)SE streichenden tektonischen Strukturen drangen im gesamten Bayerischen und Oberpfälzer Wald granitische bis dioritische Magmen in die metamorphen Serien ein und bildeten ausgedehnte Plutone.

Die Trennlinie zwischen vorderem und hinterem Bayerischen Wald, der Bayerische Pfahl, sowie Abschnitte der Donau-Störung (Aicha-Halser-Nebenpfahl) und der Rundinger Zone werden von Tektoniten (Mylonite und Kataklastite) aufgebaut, in die hydrothermale Quarzgänge eingeschaltet sind.

Die Gesteine des kristallinen Grundgebirges waren während der tektonischen Hebungsvorgänge hauptsächlich in der Kreide und im Tertiär bei feuchtwarmem und subtropischem Klima einer intensiven Verwitterung ausgesetzt. Diese differentiellen Hebungen erfolgten dabei vielfach entlang reaktiver paläozoischer Bruchlinien, wie z. B. dem Bayerischen Pfahl. Auf den gehobenen Bruchschollen und in Bereichen tektonischer Beanspruchung unterlag das Kristallin dabei einer verstärkten Auflockerung und Zersetzung. Mit Ausnahme von Felsfreistellungen in Gipfelregionen und an Steilhängen sind alle kristallinen Gesteinseinheiten daher von einer unterschiedlich ausgeprägten, sandig-lehmigen bis sandig-grusigen Zersatzzone bedeckt, die bis zu 60 m Mächtigkeit erreichen kann. Diese zusammenfassend als Regolith bezeichneten Verwitterungsdecken gehen mit zunehmender Tiefe in das zunächst verwiterte und mit fortschreitender Tiefe dann unverwiterte kristalline Festgestein über. In oberflächennahen Bereichen besteht ein nach oben hin zunehmender Einfluss der chemischen Verwitterung. Hier sind die Kalifeldspäte durch Hydrolyse weitgehend kaolinisiert und bilden die tonig-lehmige Matrix der verwitterungsresistenten Komponenten, wie z. B. Quarz.

Wo die tertiären Zersatzdecken vollständig abgetragen wurden, unterlag das kristalline Festgestein den Kräften der Insolations- und Frostverwitterung. Die dadurch bedingte Kluftaufweitung führte je nach Homogenität des Gesteins zur Bildung von Blockfeldern, Hangschutt und Felsfreistellungen.

Das nördlich an den Oberpfälzer Wald anschließende **Fichtelgebirgs-Paläozoikum** bildet eine Sattelstruktur mit flach nach SW abtauchender Faltenachse, sodass die ältesten Schichtglieder im Kern des Antiklinoriums zu finden sind. Diese Mittelgebirgsregion erreicht ihren höchsten Punkt auf dem Schneeberg mit 1.051 m ü. NN. Auch das südöstlich anschließende Waldsassener Schiefergebirge zählt zu diesem hydrogeologischen Teilraum. Im Rahmen der vorliegenden Lineamentanalyse wurde auch das Mitterteicher Tertiärbecken mit seinen teils mächtigen miozänen Ablagerungen aufgrund seiner geringen Ausdehnung und der räumlichen Nähe zum Fichtelgebirgs-Paläozoikum mit in diesen Teilraum aufgenommen.

Das Gebiet des Fichtelgebirgs-Paläozoikums grenzt im Südosten an den Oberpfälzer-Bayerischen Wald und im Nordwesten an das Paläozoikum des Frankenwaldes bzw. die Münchberger Gneismasse. Im Nordosten reicht es bis in die Tschechische Republik und wird nach Südosten durch die Fränkische Linie gegen das vorgelagerte Bruchschollenland abgegrenzt.

Der vermutlich kambrische Kern der Sattelstruktur ist vorwiegend aus Metaarkosen und Metavulkaniten („Epigneise“) sowie Phylliten und Glimmerschiefern mit bereichsweise eingeschalteten Metakarbonaten, wie beispielsweise die wasserwirtschaftlich bedeutsamen Wunsiedler und Waldershofer Marmorzüge, aufgebaut. Die randlich gelegenen jüngeren Schichtglieder bestehen dagegen vorwiegend aus Phylliten und Glimmerschiefern, vereinzelt auch Tonschiefern.

Vor allem im zentralen Bereich des Fichtelgebirges sind jungvariskische Granite intrudiert, wie sie auch aus dem Moldanubikum im Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald bekannt sind.

Die Sedimente des Mitterteicher Tertiärbeckens sind ein Relikt einer ursprünglich weiter verbreiteten tertiären Sedimentbedeckung, die im Zuge tektonischer Vertikalbewegungen in Verbindung mit der Bildung des Egergrabens durch eine lokale Absenkung erhalten geblieben sind. Die heterogen zusammengesetzten Ablagerungen lagern mit Mächtigkeiten bis über 100 m dem meist tiefgründig verwitterten kristallinen Grundgebirge auf. Während des Tertiärs war im Bereich des Fichtelgebirges zudem ein Basaltvulkanismus aktiv, dessen Magmenförderung im Oligozän einsetzte (GALADÍ-ENRÍQUEZ et al. 2009). Die postvulkanische Kohlensäureförderung liefert noch heute Sauerlinge, die auch als Mineralwasser abgefüllt werden (DIEPOLDER & HEROLD, 2007).

Die bruchtektonischen Hebungs- und Senkungsvorgänge während der Bildung des Egergrabens im Oligozän und Miozän wirken sich auch im westlich angrenzenden Fichtelgebirge noch in Form von NE–SW angelegten Bruchzonen aus. Vor allem auf der GK25 Blatt 6037 Kemnath (MIELKE 1982) wie auch auf der geologischen Karte 1 : 150 000 der Oberpfalz (GALADÍ-ENRÍQUEZ et al. 2009) sind zahlreiche solcher Störungen verzeichnet. Darüber hinaus ist die Region noch von den großen variskischen Störungszonen wie der NW–SE streichenden Fränkischen Linie geprägt.

Auch die Gesteine des Fichtelgebirges waren während des Tertiärs einer intensiven Verwitterung bei einem feuchtwarmen, subtropischen Klima unterworfen, die bisweilen bis zu 100 m mächtige Zersatzdecken erzeugte. DIMROTH et al. (1965) beschreiben die unterschiedliche Verwitterung der Granite sowie der Phyllite und Gneise. Erstere verwittern, vor allem bei einer grobkörnigen Ausprägung, vorwiegend zu sandigem Granitgrus, während die Phyllite eher tonig zersetzt werden. Die Gneise nehmen dabei eine Zwischenstellung zwischen den beiden Extremen ein.

Der hydrogeologische Teilraum der **Münchberger Gneismasse** ist Teil des Bohemikums, einer Untereinheit des Moldanubikums im weiteren Sinne. Sie wird allseitig durch Störungen gegen die benachbarten geologischen Einheiten abgegrenzt. Im Nordwesten und Norden ist dies das Paläozoikum des Frankenwaldes, im Südosten das Fichtelgebirge. Nach Südwesten stößt es an den Randbruch der Fränkischen Linie.

Charakteristisch für diesen Teilraum ist eine Abfolge von Gneisen und Metabasiten, die entlang von Störungen kleinräumig zerlegt sind. Die Münchberger Gneismasse wird als ein allochthoner Deckenstapel angesehen, der tektonisch abgegrenzt auf dem Frankenwald-Paläozoikum aufliegt. Nach STETTNER (1960) verläuft der interne Faltenbau des Deckenstapels entlang von nordöstlich abtauchenden Faltenachsen, die von zahlreichen Längs- und Querstörungen begleitet werden. Eine spätere bruchtektonische Reaktivierung dieser alten Strukturen führte zu einem quasi-orthogonalen regionalen Störungsmuster mit NW–SE und NE–SW streichenden Bruchlinien. Auch die Gesteine der Münchberger Gneismasse unterlagen in ähnlicher Weise der tiefgründigen tertiären Verwitterung, die bereits für die vorangegangenen Teilräume beschrieben wurde.

Das **Paläozoikum des Frankenwaldes** reicht von der Münchberger Gneismasse bzw. dem Fichtelgebirgs-Paläozoikum im Süden bis nach Sachsen und Thüringen im Osten und Norden und wird nach Westen von der Fränkischen Linie begrenzt.

In seinem südlichen und östlichen Bereich ist es vorwiegend aus Tonsteinen, Tonschiefern und Phylliten, teilweise großflächig mit Diabasen durchsetzt, aufgebaut. Der Metamorphosegrad der Gesteine ist entsprechend gering und nimmt nach Nordwesten hin noch weiter ab. Im Hinblick auf die generellen Vorzugsrichtungen setzt sich hier der bereits für die Münchberger Gneismasse beschriebene tektonische Bau fort. Auch dieses Gebiet ist durch Sattel- und Muldenstrukturen mit NE–SW streichenden Faltenachsen und entsprechenden Längs- und Querstörungen gekennzeichnet.

2.2 Hydrogeologie

Die unverwitterten Gesteine des kristallinen Grundgebirges besitzen keine für die Speicherung oder den Transport von Grundwasser nutzbare primäre Porosität und sind mit Durchlässigkeitsbeiwerten (k_f -Werten) von 10^{-10} bis $<10^{-13}$ m/s im ungestörten Zustand praktisch wasserundurchlässig.

Die Gesteine des ostbayerischen Grundgebirges weisen jedoch durch unterschiedliche Verwitterungs- und Umlagerungsvorgänge sowie durch tektonische Beanspruchung, Schieferung, Entlastungsklüfte etc. unterschiedliche sekundäre Porositäten auf, die zu Poren-, Kluft-Poren- und Kluftgrundwasserleiter-Eigenschaften der Gesteine führen (DIEPOLDER et al. 2011). Abhängig von der Tiefenlage werden im Grundgebirge von RAUM (2002) insgesamt sechs, von KRASNY (1996) drei Zonen mit verschiedenen Hohlraumeigenschaften und dadurch bedingter Grundwasserdynamik unterschieden (Abb. 2-2). Entsprechend kann die Durchlässigkeit der Gesteine mehrere Größenordnungen höher liegen und, wie die vorliegende Studie zeigen wird, k_f -Werte bis 10^{-4} m/s erreichen. OLSSON et al. (1989) geben für Granite in Schweden an, dass ein Kluftvolumen von 4 % des gesamten Gesteinsvolumens 94 % ihrer Transmissivität ausmacht.

Somit hängt die Gebirgsdurchlässigkeit kristalliner Kluftgrundwasserleiter in erster Linie von ihrem Verwitterungs- und Zerklüftungsgrad sowie der Ausgestaltung des Trennflächennetzwerks ab. Einflussgrößen auf die Durchlässigkeit des Trennflächennetzwerks sind vor allem Kluftdicke bzw., -abstand, Kluftöffnung, -größe und -richtung, Anbindung an benachbarte Klüfte, Mineralbeläge, Kluftfüllungen und die tektonische Genese (z. B. Zerrklüfte, Lagerklüfte, brekziös zerscherte Störungen etc.).

Die meisten dieser Parameter können nur auf lokaler Ebene durch detaillierte Untersuchungen an Oberflächenaufschlüssen oder durch die Auswertung von Bohrlochdaten erfasst werden. Kluftgrößen sowie -öffnungen sind generell nur schwer quantifizierbar. Die vorliegende Studie konzentriert sich aufgrund ihres überregionalen Betrachtungsmaßstabs und der Korrelation mit topographischen Lineamenten vorwiegend auf die Richtungen von Klüften und Störungen sowie deren Dichte.

Lithologische Aspekte beeinflussen die Gebirgsdurchlässigkeit in erster Linie indirekt. Eine Ausnahme hiervon bilden die Metakarbonate der Wunsiedler und Waldershofer Marmorzüge im Fichtelgebirge, da deren Gesteinseigenschaften die Bildung von Verkarstungserscheinungen zulassen mit einer starken Erhöhung der Durchlässigkeiten. Bei den übrigen Gesteinsarten des kristallinen Grundgebirges wirkt sich die lithologische Ausprägung bisweilen auf die Anlage von Trennflächenmustern aus. ZEITLHÖFLER (2007) zeigte für Gneise, Magmatite und Diatexite des Arbergebietes im Bayerischen Wald Einflüsse der Lithologie auf Kluftdicke und -größe sowie untergeordnet auf die Kluftrichtungen, wobei zwischen Kluftdicke und -größe in der Regel eine reziproke Proportionalität besteht, d. h. bei größeren Kluftdicken fallen die Kluftflächen tendenziell kleiner aus und umgekehrt.

Deutlich geschieferte Metamorphite bilden meist eine Trennflächenschar parallel zur Schieferung aus. Sie besteht aus vorwiegend engständigen und relativ kurzen Klüften mit sehr unregelmäßigen Oberflächen. Dagegen sind Klüfte, die die metamorphe Schieferung schneiden, wie auch Trennflächen in Magmatiten und Diatexiten allgemein in größeren Abständen mit regelmäßigeren Oberflächen und größeren Flächen ausgebildet.

Dabei treten lokale Besonderheiten auf. Im Zuge der regionalen Hebung des Grundgebirgsstocks kam es im Laufe der Zeit zu einer Druckentlastung. Die daraus entstandenen Spannungen wurden je nach Lithologie in verschiedener Weise abgebaut, was auch Einfluss auf die Anlage der Trenn-

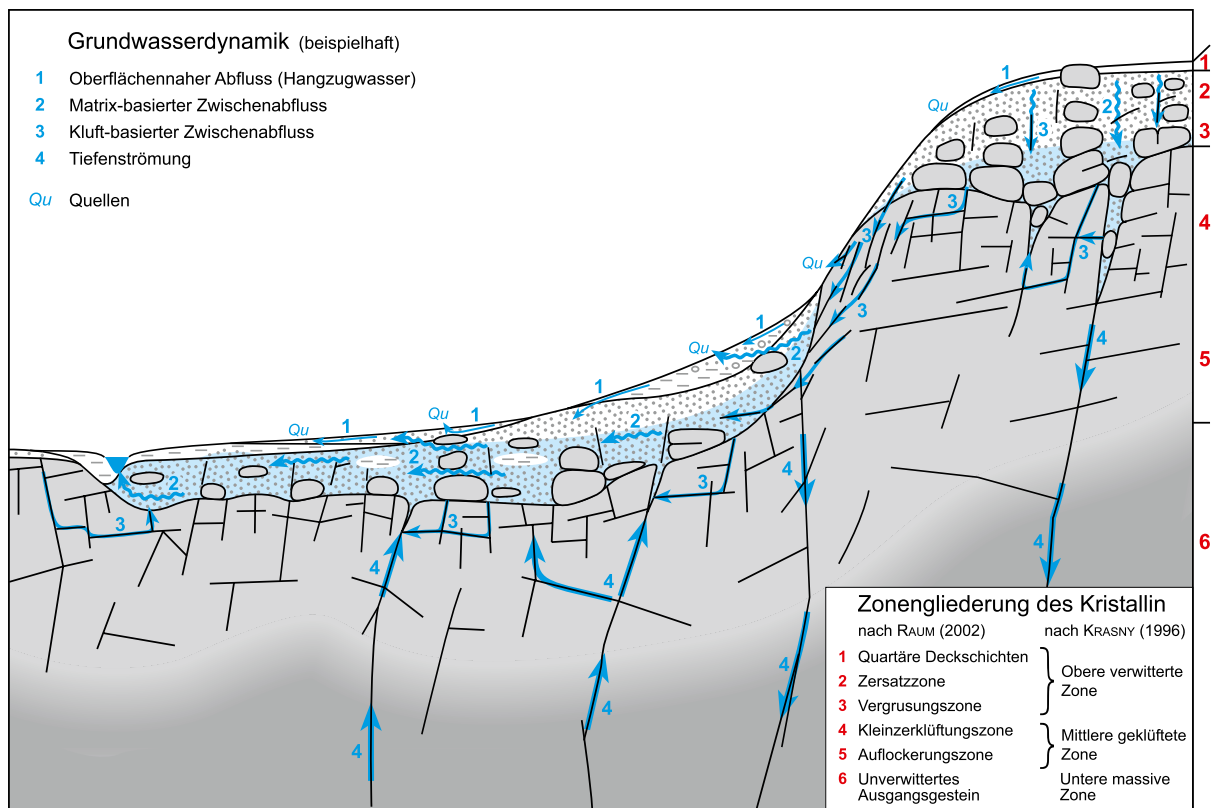


Abb. 2-2: Schemaprofil zur Grundwasserbewegung im Kristallin (aus DIEPOLDER et al. 2011)

flächensysteme und damit die Ausbildung von Wasserwegsamkeiten hatte. Magmatische und teilweise auch diatektische Gesteine reagierten auf die Druckentlastung mit der Bildung von Lagerklüften parallel zur Geländeoberfläche. Diese sind lateral in der Regel über mehrere Zehnermeter verfolgbar und weisen verhältnismäßig große Öffnungsweiten auf, sodass sie sehr durchlässige Wegsamkeiten für Grundwasser im oberflächennahen Festgestein bilden. Da die Druckentlastungseffekte mit größerer Tiefe abnehmen, treten auch die Lagerklüfte mit zunehmendem Abstand von der Geländeoberfläche in den Hintergrund. Reliefbildnerisch treten sie aufgrund ihrer subhorizontalen Raumlage nicht in Erscheinung, sodass sie von der Lineamentanalyse nicht erfasst werden.

In den metamorphen Gesteinen des Arbergebietes fallen die metamorphe Schieferung und die parallel dazu ausgebildeten Klüfte in der Regel flach bis mittelsteil in nordöstliche Richtungen ein. Die hebungsbedingte Druckentlastung konnte vorwiegend über diese Trennflächenschar abgebaut werden, sodass Lagerklüfte und die damit verbundenen Wegsamkeiten in den Metamorphiten kaum vorkommen. Da die schieferungsparallele Kluftschar vor allem relativ kleine und dafür engständige Einzelklüfte mit geringen Öffnungsweiten aufweist, ist deren Durchlässigkeit im Vergleich zu den Lagerklüften verhältnismäßig gering.

Somit können anhand einer groben lithologischen Untergliederung einige generelle Aussagen zur Ausgestaltung des Trennflächennetzwerks getroffen werden. Im Nahbereich größerer Störungszone treten lithologische Gesichtspunkte jedoch in den Hintergrund, da die Anlage regionaler bruchtektonischer Linien nur wenig Bezug zur durchtrennten Gesteinsart zeigt, sondern vielmehr das Ergebnis überregionaler Spannungsfelder ist. Im Nahbereich dieser Linien richtet sich das Trennflächenmuster in der Regel an der Hauptstörung aus, d. h. die lokal dominante Kluftschar – und damit meist die Hauptwasserwegsamkeit – ist parallel zu dieser Vorzugsrichtung ausgebildet. Auch die

Kluftdichten nehmen allgemein im näheren Umfeld größerer bruchtektonischer Störungen zu, was zu einer erhöhten Durchlässigkeit führt. Da ausgedehnte Bruchlinien meist auch reliefbildnerisch in Form von topographischen Lineamenten in Erscheinung treten, erlauben Informationen zu Lage und Richtung dieser Lineamente auch Rückschlüsse auf das jeweilige Trennflächennetzwerk und damit die Wasserwegsamkeiten im kristallinen Kluftgrundwasserleiter.

Weitere, in der vorliegenden Studie nicht behandelte Grundwasserleiter im ostbayerischen Grundgebirge sind quartäre Talfüllungen, mächtigere quartäre Deckschichten wie z. B. Hangschutt oder Fließerden sowie tiefgründig verwitterte Zersatzdecken. Die quartären Deckschichten und Talfüllungen sind als Porengrundwasserleiter mit meist geringen Mächtigkeiten und lateralen Erstreckungen ausgeprägt und haben damit allenfalls lokale wasserwirtschaftliche Bedeutung.

Die kristalline Zersatzzone stellt dagegen einen sehr heterogenen Grundwasserleiter bzw. -ingleiter dar. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Verwitterungstiefe schwankt auch die Mächtigkeit der Zersatzzone stark. Granite und andere grobkörnige Magmatite verwittern eher zu sandig-grusigem Zersatz, während glimmerhaltige Metamorphite vorwiegend tonig-lehmig verwittern. Da die Verwitterung autochthon erfolgt, bleibt das Trennflächengefüge oftmals reliktsch erhalten, sodass auch im Zersatz eine sekundäre Porosität aufgrund der Klüfte existiert und damit ein Kluft-Porengrundwasserleiter vorliegt. Je nach Ausprägung der Matrix (sandig oder tonig-lehmig) dominiert die Matrix- oder die Kluftporosität den Grundwasserfluss. RAUM (2002) zeigte, dass auch in der Zersatzzone Vorzugsrichtungen für den Grundwasserfluss existieren, die vom hydraulischen Gradienten abweichen und sich an reliktschen Kluftsystemen orientieren.

3 Datengrundlagen und Methodik

3.1 Lineamentanalyse

Die Kartierung topografischer Lineamente erfolgte auf der Grundlage eines Digitalen Geländemodells (DGM) aus Daten der NASA Shuttle RADAR Topography Mission (SRTM) mit einer horizontalen Auflösung von 90 m und einer nominalen vertikalen Auflösung von 1 m für das gesamte ostbayerische Grundgebirge (Abb. 3-1). Die in mehreren Durchgängen in verschiedenen Maßstäben kartierten Lineamente wurden zunächst nach Länge gefiltert. Dabei wurden solche mit Längen unter 1500 m als nicht relevant verworfen. Im Anschluss wurden die verbleibenden Strukturen anhand von digitalen topografischen Karten auf ihre Schlüssigkeit hin überprüft, um anthropogene Einflüsse auszuschließen.

Daraufhin wurden im so entstandenen Datensatz für die einzelnen Lineamente die Streichrichtungen berechnet und anschließend nach Vorzugsrichtungen gefiltert, wodurch die im Untersuchungsgebiet dominanten Lineamentscharen identifiziert werden konnten. So wurden im Originaldatensatz vier Hauptrichtungen ((W)NW–(E)SE, N–S, NE–SE und ENE–WSW) isoliert. Um diese Maxima wurden Filtersegmente gewählt und die darin liegenden Lineamente zur Weiterverarbeitung verwendet. Aus diesen Datensätzen wurden schließlich Lineamentdichtekarten sowie Rosendiagramme der jeweiligen Streichrichtungen angefertigt.

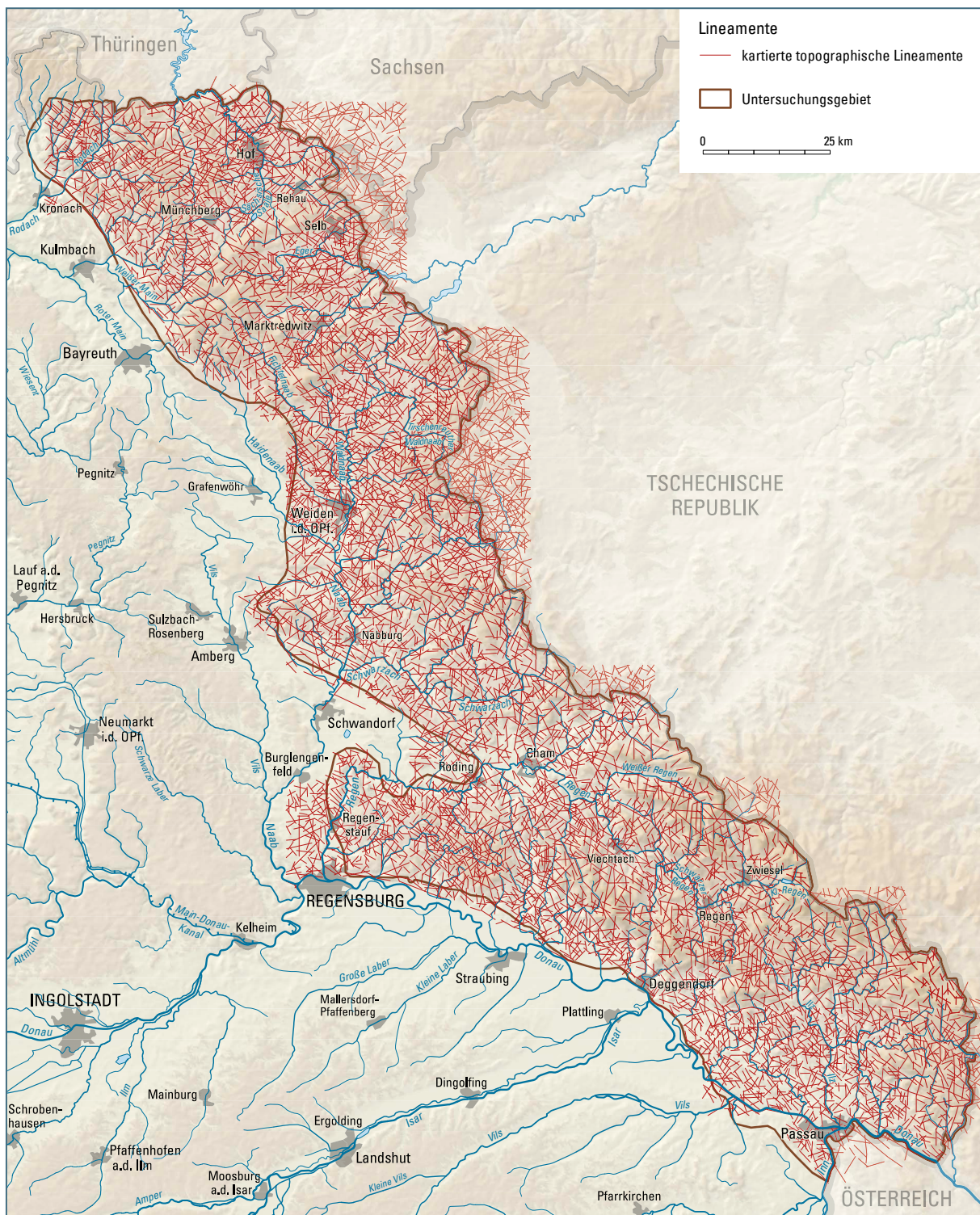
Für die Lineamentdichtekarten wurde die kumulative Länge der kartierten Lineamente in einem vorgegebenen Suchradius (hierfür wurden 4.500 m gewählt) berechnet und in einem 90 m-Raster als Länge pro Fläche (in diesem Fall km pro km²) dargestellt. Dies wurde sowohl für den Gesamtdatensatz (Abb. 5-2) als auch für die individuellen Vorzugsrichtungen durchgeführt. Die daraus resultierenden Raster wurden miteinander verrechnet, so dass als Endprodukt eine Karte erstellt werden konnte, auf der die räumliche Verteilung der prozentualen Anteile einer Lineamentrichtung am Gesamtdatensatz dargestellt ist (Abb. 5-3).

Die in Abbildung 4-3 dargestellten Rosendiagramme zeigen in 10°-Segmenten die Streichrichtungen der Einzellineamente gewichtet nach ihrer Länge. Die Auswertung erfolgte sowohl für den Gesamtdatensatz als auch gegliedert nach den einzelnen hydrogeologischen Teilräumen. Zudem wurden für die Detailuntersuchungen aus dem Gesamtdatensatz Regionen ausgeschnitten, für die Kluftrichtungen vorliegen. Diese wurden dann ebenfalls zusammen mit den Kluftrichtungen in Rosendiagrammen dargestellt.

3.2 Strukturgeologie

Zur Überprüfung der mit Fernerkundungsmethoden gewonnenen Daten wurde im Frühjahr 2006 stichprobenartig die Orientierung des Trennflächengefüges in ausgewählten Aufschlüssen im Untersuchungsgebiet vermessen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden ca. 300 Klüfte in fünf Aufschlüssen, verteilt über den mittleren und nördlichen Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald, aufgenommen und die Ergebnisse in Rosen- und Polpunkt diagrammen dargestellt. Die Ergebnisse wurden anschließend raumbezogen mit den Lineamentdaten abgeglichen.

Zudem liegen für das Arbergebiet im zentralen Bayerischen Wald Strukturdaten in Form von über 5.000 Einzelmessungen (ZEITLHÖFLER 2007), sowie Kluftrichtungen aus Granitkörpern im südlichen



Geobasisdaten: DLM 1000, © GeoBasis-DE / BKG 2013 (Daten verändert)
Relief LfU, basierend auf SRTM-Daten des USGS

Abb. 3-1: Digitales Geländemodell des Untersuchungsgebietes mit Übersicht der kartierten topographischen Lineamente

Bayerischen Wald (GALADÍ-ENRÍQUEZ 2006) vor, die in gleicher Weise wie die Gefügedaten aus den Geländeaufnahmen ausgewertet wurden.

Hinsichtlich der Aussagekraft von Trennflächenmessungen muss angemerkt werden, dass aufgrund der Winkelbeziehungen einzelner Kluftscharen zur jeweiligen Wand eines Felsaufschlusses diese im Gesamtdatensatz teilweise unter- oder überrepräsentiert sind. So werden in der Regel stumpfwinklig zur Aufschlusswand streichende Trennflächen häufiger gemessen, als solche, die subparallel dazu verlaufen. Gerade bei Felsfreistellungen entlang von Taleinschnitten sind aber die wandparallelen Klüfte – wie in den folgenden Kapiteln dargelegt – oft die reliefbildnerisch wirksamen und somit dominanten, obwohl sie aufgrund der Winkelbeziehungen weniger stark im Datensatz vertreten sind. Diesem Problem kann entweder mit verschiedenen standardisierten Messverfahren (z. B. SPENCER & KOZAK 1974, WITTHÜSER & HIMMELSBACH 1998, WALSH & CLARK 2000, WILLIAMS 2000, MAULDON et al. 2001) oder durch das Einmessen möglichst senkrecht zueinander stehender Aufschlusswände (optimalerweise noch mit einem flächigen Aufschluss der Felsoberkante) begegnet werden. Allerdings bieten die örtlichen Verhältnisse, vor allem im Fall von natürlichen Felsfreistellungen, diese Möglichkeiten in der Regel nicht. ZEITLHÖFLER (2007) konnte an einigen Steinbrüchen und Straßeneinschnitten im zentralen Bayerischen Wald einen modifizierten „Scanline“-Ansatz nach WALSH & CLARK (2000) zum Einsatz bringen.

Auf regionaler Ebene wurden im Rahmen der geologischen Landesaufnahme Bayerns auf zahlreichen Geologischen Karten im Maßstab 1 : 25 000 (GK25) Störungslinien kartiert. Sofern diese als georeferenzierte Vektordaten vorlagen, wurden sie mit Hilfe von GIS-Software hinsichtlich ihrer Längen und Streichrichtungen ausgewertet, in Rosendiagrammen dargestellt und mit den Lineamentdaten abgeglichen.

3.3 Grundwasserführung

Zur Ermittlung der hydraulischen Kennwerte der hydrogeologischen Einheiten erfolgte die Auswertung von quasistationären Pumpversuchen an insgesamt 282 Objekten (hauptsächlich Brunnen der öffentlichen Trinkwasserversorgung, Privatbrunnen und untergeordnet Grundwassermessstellen) aus dem Untersuchungsgebiet. Es handelt sich überwiegend um (Leistungs-) Pumpversuche, die vor der Inbetriebnahme der Brunnen oder unmittelbar nach Fertigstellung der Brunnen durchgeführt wurden. Die Auswertungen erfolgten überschlägig unter Berücksichtigung gespannter oder ungespannter Grundwasserverhältnisse nach DUPUIT/THIEM (z. B. in LANGGUTH & VOIGT 2004). Die Ergebnisse stellen die horizontalen Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) der untersuchten hydrogeologischen Einheiten dar. Es muss bedacht werden, dass es sich bei den Pumpversuchen um Einbohrlochversuche handelt, die eine geringere Genauigkeit aufweisen, als die Auswertung von Pumpversuchen mit Beobachtungsmessstellen im Umfeld. Solche detaillierten Pumpversuche stehen jedoch nur in Ausnahmefällen zur Verfügung. Die anhand der vorliegenden Pumpversuche ermittelten k_f -Werte geben somit in Bezug auf die Einzelbrunnen nur eine Größenordnung der Durchlässigkeit wieder. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich dieser Fehler der Einzelmessungen in der statistischen Gesamtbetrachtung größerer Datensätze teilweise ausmittelt, sodass die rangkorrelative Statistik eine hinreichend gute Abbildung der Verteilungsfunktionen der Durchlässigkeiten erlaubt. Zusätzliche Aussagekraft vermitteln hier die komplementär vorgenommenen Ergiebigkeitsanalysen.

Bei mehrstufigen Leistungspumpversuchen wurde für jede Laststufe ein k_f -Wert berechnet und aus diesen Einzelwerten ein Mittelwert für das betrachtete Objekt ermittelt. Die Brunnen im Kluftgrundwasserleiter des Grundgebirges durchteufen einzelne wasserwegsame Zonen im an sich undurch-

lässigen Festgestein, die zwar mit zunehmender Tiefe weniger werden, aber nicht an eine klar definierte Aquiferbasis stoßen. Da hier kein eindeutig abgrenzbarer grundwassererfüllter Bereich vorliegt, kann eine Grundwassermächtigkeit nicht bestimmt werden. Für diese Fälle wurde das zwischen Ruhewasserspiegel und Ausbautiefe durchteufte Tiefenintervall der Grundwassermächtigkeit gleichgesetzt.

Um keine Mischwerte über mehrere hydrogeologische Einheiten zu erhalten, wurden Brunnen, die über mehrere Einheiten verfiltert sind, nur in begründeten Ausnahmefällen berücksichtigt.

Zur Herstellung eines Zusammenhangs mit der Geologie und Tektonik des Grundgebirges wurden die ermittelten hydraulischen Kennwerte in einem geographischen Informationssystem (GIS) räumlich mit geologischen Großeinheiten sowie den kartierten topographischen Lineamenten korreliert.

Die Häufigkeitsverteilungen der k_f -Wertebereiche sind bezogen auf die jeweiligen hydrogeologischen Einheiten in Histogrammen und Boxplots dargestellt und zusätzlich tabellarisch erfasst (Abb. 6-2, Abb. 6-3, Abb. 6-4 und Tab. 6-2). Die räumliche Korrelation zwischen hydraulischen Kennwerten und Lineamentstrukturen sowie die Korrelation zwischen Bohrtiefe und Durchlässigkeit sind als Scatterplots visualisiert (Abb. 8-1 und Abb. 8-2).

4 Strukturgeologische Kartierung

Für die Analyse von Bruchstrukturen liegen sowohl digitale Daten aus geologischen Karten als auch Detailaufnahmen mit Einzelklufthmessungen aus kleineren Teilregionen vor. Im Folgenden wird zunächst eine regionale Übersicht über Bruchstrukturen des gesamten Untersuchungsgebietes gegeben. Anschließend werden die Ergebnisse von Detailstudien aus dem südlichen Bayerischen Wald, dem Arbergergebiet im zentralen Bayerischen Wald und aus der nördlichen Oberpfalz vorgestellt. Diese Daten dienen insbesondere der Verifizierung der Lineamentkartierung im Hinblick auf die lokal bestehenden Kluffstrukturen, aus denen sich wiederum die Grundwasserführung ableiten lässt.

4.1 Strukturdaten geologischer Karten

Bruchtektonische Strukturen wurden für das Untersuchungsgebiet auf regionaler Ebene anhand kartierter Störungen auf den jeweiligen Blättern der Geologischen Karte 1 : 25 000 (GK25) analysiert. Dabei ist anzumerken, dass eine homogenisierte digitale geologische Karte zum Zeitpunkt der vorliegenden Veröffentlichung noch nicht flächendeckend verfügbar war und bei den z. T. zeitlich weit auseinander liegenden Kartierungen von den jeweiligen Blattbearbeitern die bruchtektonischen Elemente in unterschiedlichem Maße berücksichtigt wurden. So existieren Kartenblätter, auf denen nur wenige sichere Störungen kartiert wurden, neben Blättern, auf denen bereits vermutete Bruchstrukturen eingetragen wurden. In der Planungsregion 12 Donau-Wald wurden weiterhin Störungslinien aus der Hydrogeologischen Karte 1 : 100 000 in die Analyse integriert.

Bei der Kartierung von Störungen im Rahmen der geologischen Landesaufnahme wurden meist keine genetischen Unterschiede berücksichtigt. So wurden rein bruchhafte Störungen in gleicher Weise wie semi-duktil deformierte Mylonitzonen kartiert. Letztere sind allerdings nur bei einer bruchhaften Reaktivierung unter niedrigeren Temperatur- und Druckbedingungen für die vorliegende Fragestellung relevant und treten topographisch in Erscheinung. Da davon auszugehen ist, dass die Kartierung von Störungen mangels Oberflächenaufschlüssen vielfach bereits ebenfalls nach morphologischen Gesichtspunkten erfolgt ist, kann aber für die überwiegende Mehrzahl der kartierten Strukturen eine bruchtektonische Genese oder zumindest Reaktivierung angenommen werden.

Trotz dieser Einschränkungen können anhand der auf den Blättern der GK25 kartierten Bruchlinien regionale Hauptrichtungen identifiziert und mit den Lineamentrichtungen abgeglichen werden. In Abbildung 4-1 sind die Richtungsverteilungen von Störungen gegliedert nach hydrogeologischen Teilräumen in Form von Rosendiagrammen dargestellt.

Der Gesamtdatensatz zeigt eine deutliche WNW–ESE bis NW–SE verlaufende Vorzugsrichtung. Diese repräsentiert das Streichen der großen variskischen Störungslinien wie die Fränkische Linie, die Donaustörung oder den Bayerischen Pfahl sowie ihrer zahlreichen Begleitstörungen. Fast das gesamte Untersuchungsgebiet wird von Störungen dieser Richtung gegen das Vorland im Westen abgegrenzt, sodass auch in allen Einzeldarstellungen der jeweiligen hydrogeologischen Teilräume ein dominantes (W)NW–(E)SE-Streichen vorherrscht.

Im Bereich des Oberpfälzer und Bayerischen Waldes liegt neben der dominanten (W)NW–(E)SE-Richtung ein zweites Hauptstörungssystem mit nördlichen Streichrichtungen vor. Eine regionale Bruchstruktur dieses Systems stellt die von Regensburg nach Norden verlaufende Keilbergstörung dar, die bis etwa auf Höhe von Teublitz das Grundgebirge gegen das Vorland abgrenzt. Auch östlich und südöstlich von Regensburg fällt diese Richtung verstärkt auf. Beispiele hierfür sind die kar-

tierte Störung im Graflinger Tal nördlich von Deggendorf bis Teisnach oder die Linie Erlau – Thyrnau – Holzfreyung östlich von Passau.

Untergeordnet treten im Teilraum Oberpfälzer und Bayerischer Wald auch noch $\pm$ NE–SW gerichtete Störungen auf, deren Anteil an der Gesamtpopulation jedoch sehr gering ist. Dennoch können einzelne Strukturen dieses Systems Längen von mehreren Kilometern erreichen, so zum Beispiel die Linie Deggendorf – Kirchberg im Wald oder die Linie Hengersberg – Zenting.

Im Fichtelgebirgs-Paläozoikum tritt diese NE–SW-Richtung trotz des auch dort dominanten variskischen Streichens der Fränkischen Linie verstärkt in Erscheinung. Diese Richtung spiegelt zum einen die Hauptstreichrichtung der lithologischen Einheiten und zum anderen die räumliche Nähe dieses Teilraums zum ebenfalls $\pm$ NE–SW verlaufenden Egergraben wieder, der sich nach Süd-

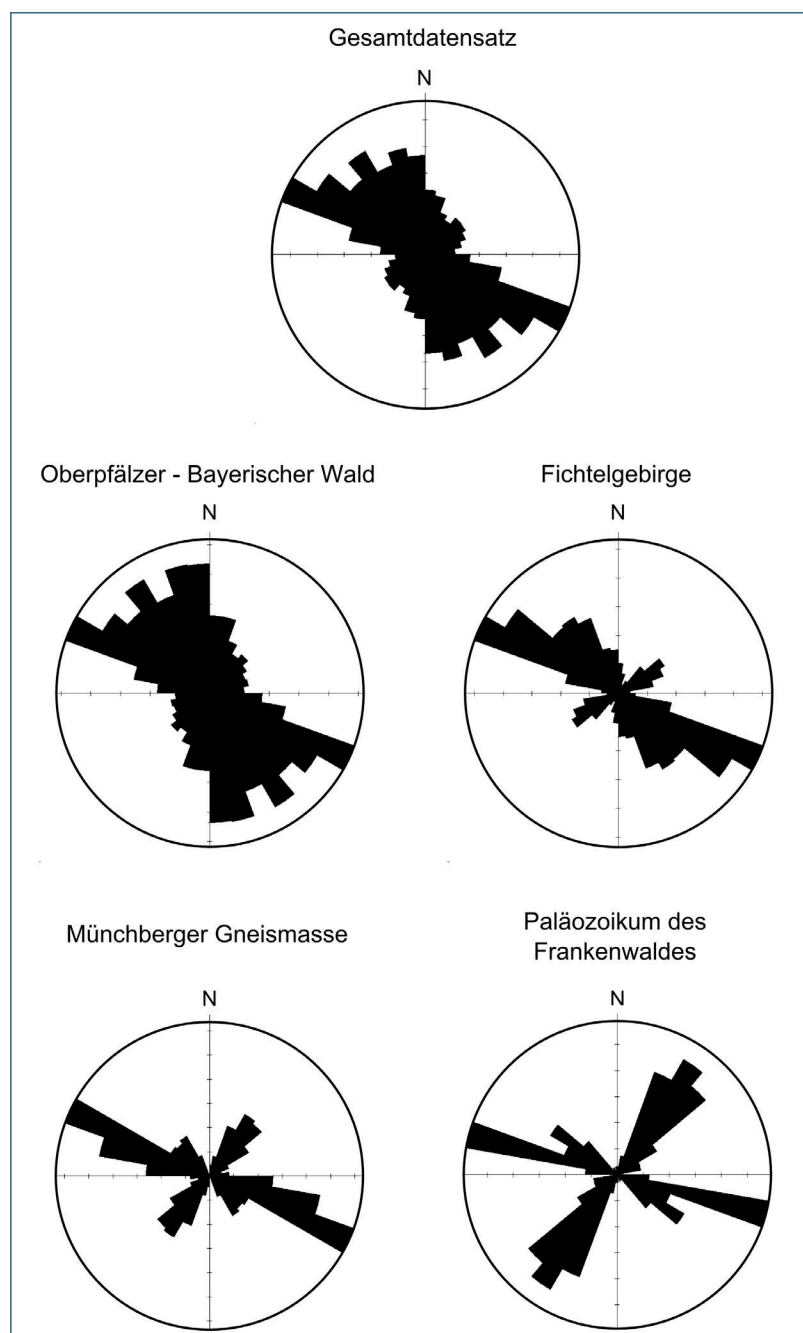


Abb. 4-1: Rosendiagramme kartierter Störungen (digital verfügbare GK25 und HK100) im Untersuchungsgebiet. Darstellung in 10°-Segmenten. Die Segmentlängen sind proportional zur kumulativen Störungslänge pro Segment relativ zum Gesamtdatensatz.

westen in das Fichtelgebirge hinein fortsetzt. Die Streichrichtung der Wunsiedler und Waldershofer Marmorzüge wie auch der metamorphen Schieferung zeigt, dass das tektonische Gefüge in dieser Richtung bereits in variskischer Zeit zum ersten Mal angelegt wurde.

Für die Münchberger Gneismasse sowie für die Synklinal- und Antiklinalbereiche des Frankenwaldes, des Fichtelgebirges und Thüringens liegen bis dato kaum digitale Daten zu kartierten Störungen vor, sodass nur kleinere Teilbereiche auf einzelnen Kartenblättern im Randbereich des Fichtelgebirgs-Paläozoikums diesen Einheiten zugeordnet werden konnten. Entsprechend wenig repräsentativ sind die in Abbildung 4-1 dargestellten Rosendiagramme für diese Einheiten.

Dennoch sind auch dort vorwiegend WNW–ESE und NW–SE verlaufende Vorzugsrichtungen erkennbar. Im Frankenwald tritt auch die NE–SW-Richtung verstärkt auf.

4.2 Detailuntersuchungen

Im Rahmen von kleinräumigen strukturgeologischen und tektonischen Studien wurden detaillierte Gefügedaten erhoben, die in der Folge vorgestellt werden. Die jeweiligen Untersuchungsgebiete sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Für die Lineamentanalyse (ZEITLHÖFLER 2006), die der vorliegenden Veröffentlichung zugrunde liegt, wurden in der nördlichen Oberpfalz stichprobenartig an fünf Einzelstellen insgesamt ca. 300 Trennflächen eingemessen.

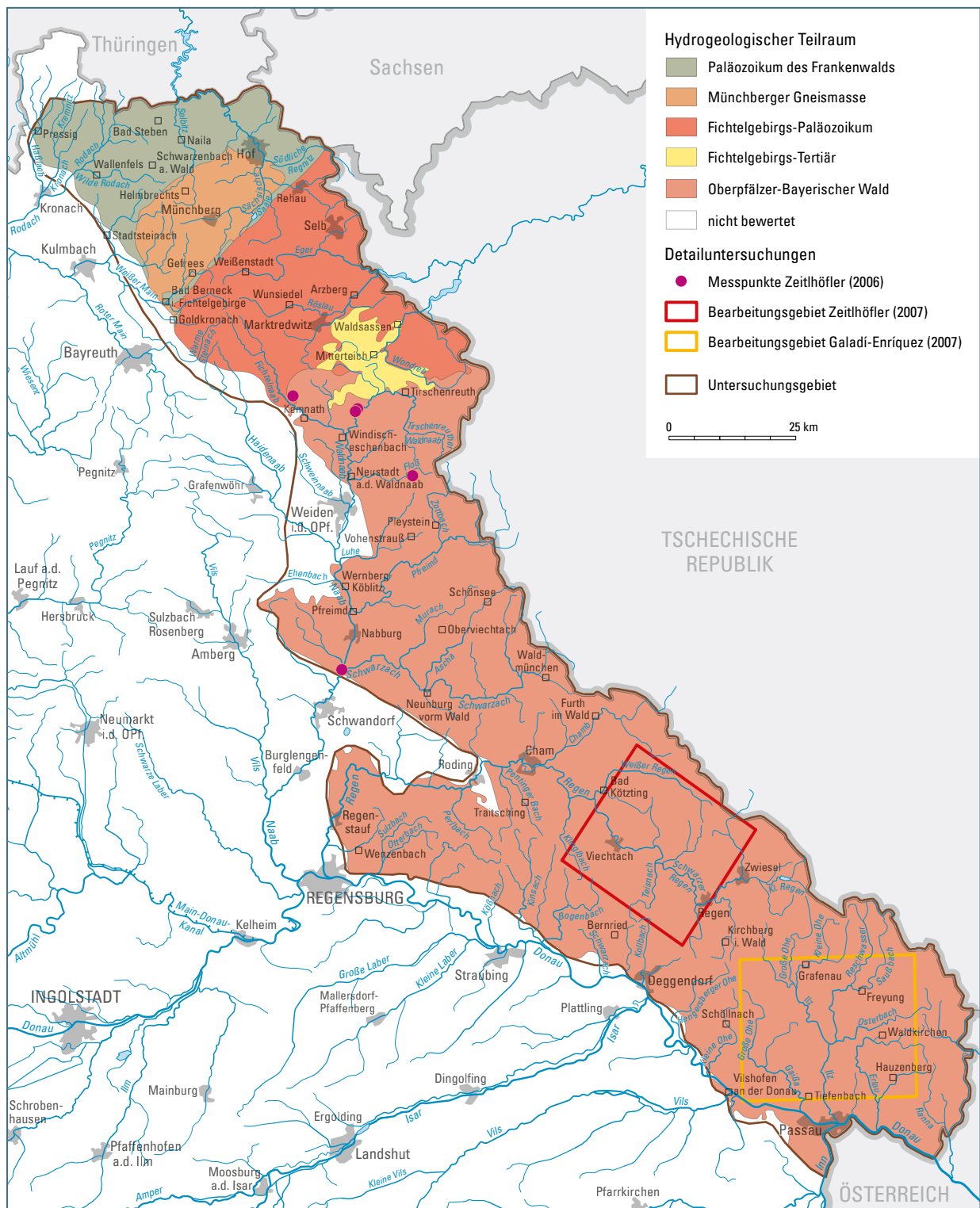
Wesentlich größere Datensätze liegen dagegen für das Arbergebiet im zentralen Bayerischen Wald mit über 5.000 (ZEITLHÖFLER 2007) und den Passauer Wald mit über 3.000 Trennflächenmessungen (GALADÍ-ENRÍQUEZ 2006) vor.

Nördliche Oberpfalz

Im Rahmen der Arbeiten für die Lineamentanalyse (ZEITLHÖFLER 2006) wurden stichprobenartig an einem Geländeeinschnitt an der Autobahn A93 bei Schwarzenfeld, am Burgberg von Flossenbürg östlich von Weiden, im Waldnaabtal zwischen Windischeschenbach und Falkenberg sowie oberhalb des Fichtelnaabtales nordöstlich von Erbendorf ca. 300 Trennflächen eingemessen, um lokale Zusammenhänge zwischen Trennflächen- und Lineamentrichtungen zu identifizieren. Abbildung 4-3 zeigt die Streichrichtungen steil einfallender Trennflächen.

Der Aufschluss an der [Autobahn A93](#) bei Schwarzenfeld ist aus metablastischen Gneisen („Perlgneise“) aufgebaut und wird von einer (N)NE–(S)SW streichenden Kluftschar dominiert. In diesem Bereich schneidet die Naab mit einem NNE–SSW verlaufenden Tal in das Grundgebirge ein, um dann knapp 1 km südlich in die Kreide der Bodenwöhrer Senke einzutreten. Dieser Taleinschnitt verläuft in etwa parallel zur Hauptkluftschar. Untergeordnet treten auch WNW–ESE gerichtete Trennflächen auf, die mit dem Verlauf der Grundgebirgsrandstörung übereinstimmen. Die ebenfalls nur untergeordnet auftretende NE–SW-Richtung findet sich in der Anlage des Schwarzachtales östlich des Messpunktes wieder.

Im [Waldnaabtal](#) zwischen Windischeschenbach und Falkenberg wurde an zwei Messpunkten im Falkenberger Granit das Trennflächengefüge erfasst. Dieser Abschnitt der Waldnaab ist durch scharfe, meist in etwa rechtwinklige Richtungsänderungen des Talverlaufs gekennzeichnet, was auf eine Anlage entlang von Bruchstrukturen hindeutet. Im nördlichen der beiden Aufschlüsse dominiert eine $\pm$ W–E verlaufende Kluftschar das Trennflächengefüge. Untergeordnet treten NNE–SSW



Geobasisdaten: DLM 1000, © GeoBasis-DE / BKG 2013 (Daten verändert)

Abb. 4-2: Bearbeitungsgebiete der Detailuntersuchungen

und NNW–SSE streichende Populationen auf. Beim Vergleich dieser Richtungen mit dem Talverlauf der Waldnaab zeigt sich eine starke Übereinstimmung zwischen Topographie und dominantem Kluftsystem, da dort das Flusstal ebenfalls in einer west-östlichen Richtung verläuft. Die Orientie-

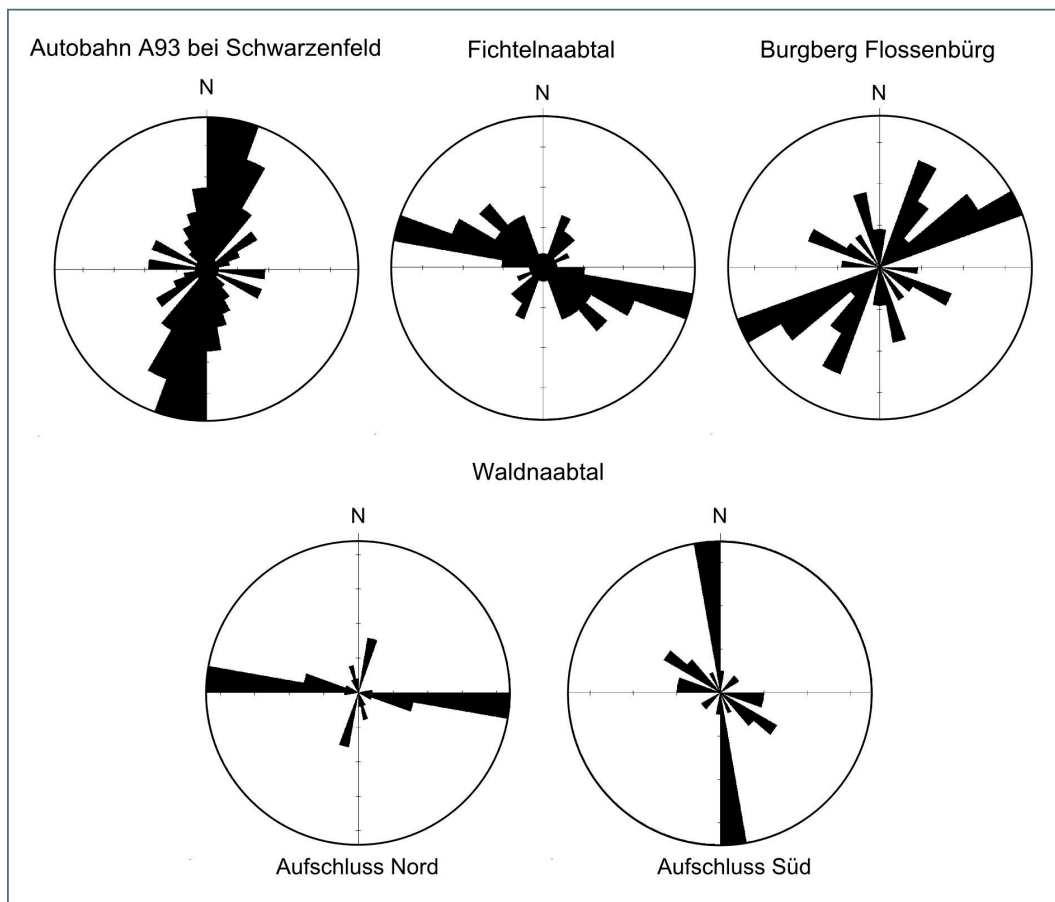


Abb. 4-3: Rosendiagramme der Streichrichtungen von steilstehenden Trennflächen an ausgewählten Messpunkten in der nördlichen Oberpfalz. Darstellung in 10°-Segmenten. Die Segmentlängen sind proportional zur relativen Häufigkeit pro Segment in Bezug auf den Gesamtdatensatz.

zung der untergeordneten Trennflächenscharen ist ebenfalls im Talverlauf der näheren Umgebung des Messpunktes zu finden.

Weiter südlich schwenkt die Waldnaab in einen (N)NW–(S)SE-Verlauf, was sich auch in der Ausrichtung der dominanten Trennflächenschare am südlichen Ende dieses Talabschnitts widerspiegelt. Dieser befindet sich am nördlichen Ende dieses Talabschnitts und weist in der Mehrzahl Klüfte mit $\pm$ N–S-Streichen auf. Untergeordnet finden sich weitere Klufrichtungen, die sich in der Oberflächenmorphologie widerspiegeln. So existieren kleinere Populationen mit dem variskischen (W)NW–(E)SE-Streichen wie auch NE–SW streichende Strukturen, die im nördlich anschließenden Fichtelgebirge vorherrschen.

Der Steinwald-Granitaufschluss **Fichtelnaabtal** befindet sich auf einer Anhöhe östlich der Fichtelnaab nordwestlich von Erbdorf in unmittelbarer Nähe zur Fichtelnaabstörung. Diese verläuft in diesem Bereich mit einer NW–SE-Richtung ähnlich zu der im Aufschluss gemessenen dominanten Klufrichtung. Weniger auffällig treten in NE–SW-Richtung streichende Trennflächenscharen auf, die charakteristisch für das nur etwa 2 km nördlich anschließende Fichtelgebirge sind. Das Gelände im direkten Umfeld des Aufschlusses weist nur ein geringes Relief auf, sodass eine Korrelation zwischen lokaler Topographie und dem Trennflächengefüge nicht möglich ist.

Am **Burgberg von Flossenbürg** sind neben den charakteristischen Lagerklüften des Flossenbürgers Granits die NE–SW bis ENE–WSW streichenden Trennflächen vorherrschend. Dabei fällt eine bimodale Verteilung mit einer Spitze im 20–40° und einer im 50–70°-Segment auf, die aber vermutlich in der relativ geringen Anzahl von Messungen und einer damit einhergehenden stärkeren relativen Streuung begründet ist. Etwa 3 km östlich des Messpunktes sind auf der GK25, Blatt 6240 Flossenbürg, zwei kleinere Störungen mit einem $\pm$ NE–SW gerichteten Streichen kartiert. Kleinere Täler und Bachläufe sind in der Umgebung ebenfalls in dieser Richtung angelegt. Untergeordnet treten NNW–SSE und WNW–ESE streichende Kluftpopulationen auf. Ähnliche Richtungen weisen auch auf der GK25 Blatt 6239, Neustadt a. d. Waldnaab, kartierte Störungen auf, die sich etwa 2 bis 4 km östlich des Messpunktes befinden.

Zusammenfassend ergab die Untersuchung in der nördlichen Oberpfalz, dass an allen Messpunkten ein quasi-orthogonales Netzwerk aus steilstehenden Klüften existiert, von denen in der Regel eine Population im Gesamtdatensatz stark überwiegt. Diese verläuft zudem meist subparallel zu kartierten Störungen in der näheren Umgebung oder zu lokalen topographischen Strukturen. Jedoch können auch sekundäre Kluftsysteme vielfach lokalen geologischen oder morphologischen Linearen zugeordnet werden. Da die Trennflächendichte einen wichtigen Einflussparameter für die Wasserwegsamkeit des Festgesteins darstellt, führt diese Ungleichverteilung der Klufterhäufigkeiten potentiell zu lokalen hydraulischen Anisotropien, wie sie z. B. von RAUM (2002) im Rahmen von Markierungsversuchen im Bayerischen Wald nachgewiesen wurden. Lagerklüfte, die in allen untersuchten Granitaufschlüssen auftreten, stellen aufgrund ihrer meist weitläufigen lateralen Erstreckung und aufgrund der durch Druckentlastung relativ großen Öffnungsweiten ebenfalls wichtige Wasserwegsamkeiten vor allem im oberflächennahen Bereich dar. Diese verlaufen allerdings in der Regel subparallel zur Geländeoberfläche und treten reliefbildnerisch nicht in Erscheinung. Somit können sie auch anhand fernerkundlicher Methoden nicht lokalisiert werden. Lediglich Informationen zur Lithologie lassen auf eine Präsenz von Lagerklüften in einem Gebiet schließen.

Bayerischer Wald/Arbergebiet

Im zentralen Bayerischen Wald stehen im Gebiet zwischen Viechtach und Regen bzw. dem Großen Arber und Bischofsmais variskische Gneise und Diatexite sowie Granitplutone an. Strukturgeologisch ist das Gebiet von der Pfahlstörung und der Rundinger Zone sowie der N–S verlaufenden Bruchlinie, die sich vom Graflinger Tal aus in Richtung Norden erstreckt, gekennzeichnet.

In dieser Region wurden von ZEITLHÖFLER (2007) über 5000 Trennflächen in insgesamt 49 Felsaufschlüssen eingemessen und bezüglich der hydraulischen Einflussparameter charakterisiert. Für die vorliegende Studie sind in erster Linie die Klufterichtungen von Interesse, die in Abbildung 4-4 als Rosendiagramme dargestellt sind. Dabei wurden nur steilstehende Klüfte berücksichtigt, da sölhlige oder schwach geneigte Trennflächen keinen Einfluss auf die Ausbildung von topographischen Lineamenten haben.

Im Gesamtdatensatz wie auch bei den Metamorphiten und Diatexiten dominiert die (W)NW–(E)SE-Richtung, die parallel zu den großen paläozoischen Bruchlinien des Pfahls und der Rundinger Zone sowie zum generellen Streichen der metamorphen Schieferung der Gneise und teilweise auch der Diatexite verläuft. Diese Vorzugsrichtung wurde also durch die Raumlage der Schieferungsflächen bereits während der Metamorphose unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen angelegt und später bei der sprödetektonischen Überprägung des Grundgebirges reaktiviert. Dass es sich bei Klüften dieser Richtung allerdings nicht nur um bruchtektonisch geöffnete Schieferungs-

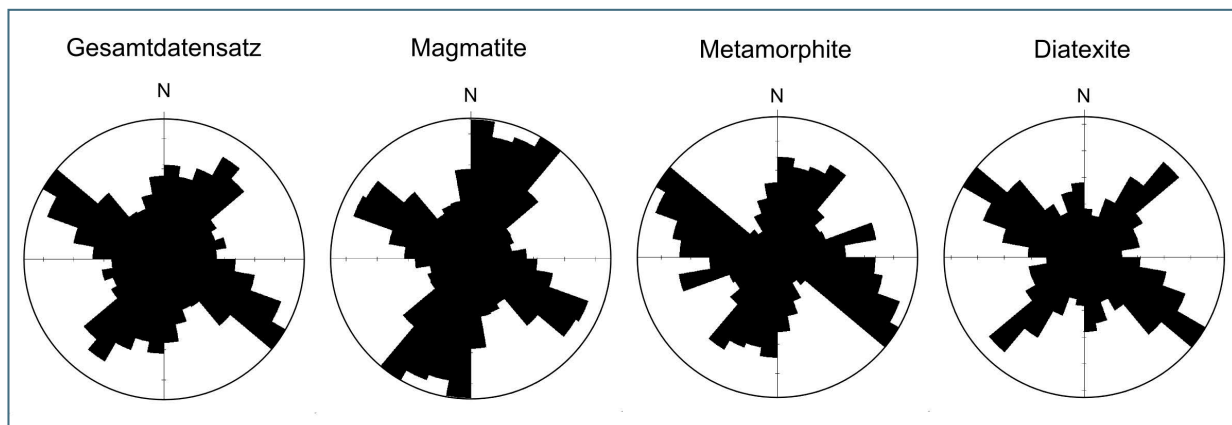


Abb. 4-4: Rosendiagramme der Streichrichtungen von steilstehenden Trennflächen im Arbergebiet aufgegliedert nach den lithologischen Einheiten Magmatite, Metamorphite und Diatexite. Darstellung in 10°-Segmenten. Die Segmentlängen sind proportional zur relativen Häufigkeit pro Segment in Bezug auf den Gesamtdatensatz.

flächen, sondern auch um neu angelegte Störungen und Klüfte handelt, zeigt die Tatsache, dass sie auch in den ungeschieferten Magmatiten vertreten sind.

Die N–S- bis NE–SW-Richtung ist in den Magmatiten dominant. Einschränkend ist hier allerdings anzumerken, dass diese Einheiten vor allem in der nördlichen Fortführung des Graflinger Tals und damit im Bereich einer regionalen Bruchzone in großen Steinbrüchen aufgeschlossen sind, sodass das Vorherrschen dieser Richtung nicht in erster Linie in der Lithologie sondern in der räumlichen Nähe zu dieser N–S verlaufenden Störung begründet liegt. In den Metamorphiten stellt diese Kluft-richtung die am zweithäufigsten vorkommende dar und zeigt damit, dass sie nicht auf die Magmatite beschränkt ist, sondern im gesamten Untersuchungsgebiet auftritt. Das deutliche NE–SW-Maximum im Gesamtdatensatz ist auf die entsprechende Richtung in den Magmatiten zurückzuführen. Diese geht aus Untersuchungen an einem einzelnen Steinbruch bei Ruhmannsfelden hervor, in dem verhältnismäßig viele Messungen erfolgten. Dementsprechend ist diese Richtung sowohl im Gesamtdatensatz als auch in den Magmatiten überrepräsentiert. Bei den Diatexiten spielen N–S streichende Trennflächen eine untergeordnete Rolle. Zudem tendiert in dieser Lithologie die Richtungsverteilung eher nach NNW anstatt nach NNE.

Die NE–SW-Richtung ist am stärksten bei den diatektischen Gesteinen zwischen dem Pfahl und der Rundinger Zone vertreten. Sie schließt direkt östlich an die Verteilung der N–S bis NNE–SSW streichende Kluftpopulation an, sodass möglicherweise ein im Verbreitungsgebiet der Diatexite etwas nach Osten gedrehtes Spannungsfeld eine lokale Abweichung der Kluftrichtungen nach NE–SW erzeugt hat.

In den Metamorphiten tritt zudem ein schwaches Maximum in der ENE–WSW-Richtung auf. Dieses fehlt weitgehend bei den anderen Lithologien und legt den Schluss nahe, dass es sich hierbei um ein Phänomen handelt, das im Untersuchungsgebiet in erster Linie nordöstlich der Rundinger Zone vorkommt.

Im Hinblick auf Wasserwegsamkeiten wurden die einzelnen Trennflächenscharen bei ZEITLHÖFLER (2007) weniger nach der Richtung, sondern vielmehr nach ihrer Genese und Funktion im Gesamtkluftnetzwerk klassifiziert und charakterisiert. So zeichnen sich Klüfte, die in Metamorphiten parallel zum Gneisgefüge angelegt sind, meist durch vergleichsweise kleine Abstände sowie geringe Größen und Kluftöffnungen aus, während Trennflächen, die quer zur Schieferung verlaufen, oft-

mals in größeren Abständen, dafür aber mit größeren Kluftflächen und tendenziell auch größeren Öffnungsweiten vorkommen. In Magmatiten und Diatexiten sind die Trennflächen ähnlich wie die Querklüfte in den Metamorphiten angelegt, wobei in sämtlichen Lithologien eine reziproke Proportionalität zwischen Kluftabstand und -größe besteht. Da Kluftdichte, -größe und -öffnungsweite zusammen mit weiteren Parametern ein komplexes System hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit bilden, sind Rückschlüsse auf Vorzugsrichtungen von Wasserwegsamkeiten im vorliegenden Betrachtungsmaßstab nur sehr schwer und allenfalls verallgemeinernd zu ziehen.

Wie auch bei GALADÍ-ENRÍQUEZ (2006) beschrieben, treten im gesamten Untersuchungsgebiet eine Vielzahl von subhorizontalen bis flach einfallenden Trennflächen auf, die in Gebieten, die eine flach einfallende Schieferung aufweisen, vielfach parallel zu dieser verlaufen. In Magmatiten treten sie meist als Lagerklüfte auf, die durch die Entspannung aufgrund des erosiven Abtrags der Gebirgsauflast entstanden sind.

Südlicher Bayerischer Wald

Im Passauer Wald nördlich der Stadt Passau liegen eingebettet in metamorphe Rahmengesteine die beiden großen Magmatiteinheiten des Fürstensteiner und Hauzenberger Plutons. In diesem Gebiet wurde von GALADÍ-ENRÍQUEZ (2006) für die jeweiligen geologischen Einheiten das Trennflächengefüge erfasst, um eventuelle charakteristische Vorzugsrichtungen in den einzelnen Plutonen bzw. im Gneisrahmen zu identifizieren. Die Streichrichtungen der vermessenen Trennflächen sind in Abbildung 4-5 als Rosendiagramme dargestellt.

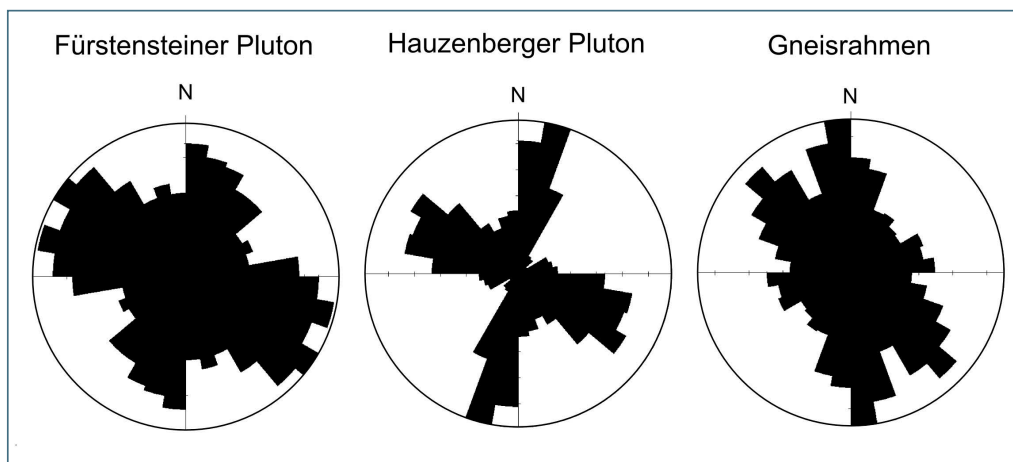


Abb. 4-5: Rosendiagramme der Streichrichtungen von steilstehenden Trennflächen in den Fürstensteiner und Hauzenberger Granitplutonen sowie im umgebenden Gneisrahmen. Darstellung in 10°-Segmenten. Die Segmentlängen sind proportional zur relativen Häufigkeit pro Segment in Bezug auf den Gesamtdatensatz.

In allen drei untersuchten Einheiten sind ähnliche Vorzugsrichtungen, allerdings mit unterschiedlichen Gewichtungen zu finden. Dabei zeigt sich, dass nördliche Streichrichtungen im Hauzenberger Pluton sowie im Gneisrahmen dominieren, während im Fürstensteiner Pluton vor allem WNW–ESE bis NW–SE gerichtete Trennflächen mit einer generell stärkeren Streuung auftreten. Bei den Klufrichtungen des Gneisrahmens fällt auf, dass die variskisch streichende Kluftschar im Vergleich zu denen in den Plutonen deutlicher in einer NW–SE-Richtung verläuft. Zudem tritt dort ein weiteres kleines Maximum mit einer ENE–WSE- bis E–W-Richtung auf. Eine eindeutige Korrelation zwi-

schen Lithologie und Orientierung des Trennflächengefüges kann aber aufgrund einerseits ähnlichen, andererseits sehr streuenden Verteilungen in den einzelnen Rosendiagrammen dennoch nicht hergestellt werden.

Im Hinblick auf die Signifikanz einzelner Trennflächensysteme als Wegsamkeiten für den Grundwasserfluss finden sich bei GALADÍ-ENRÍQUEZ (2006) nur wenige Hinweise. Charakteristische Einflussgrößen für die Wasserwegsamkeit sind in erster Linie Kluftöffnung, -dichte, und -größe sowie der Grad der Vernetzung zu Trennflächen anderer Populationen, die allerdings im Gelände nur schwer zu dokumentieren sind. Es werden aber für die (W)NW–(E)SE streichenden Klüfte etwas geringere durchschnittliche Abstände von ca. 70 cm und damit eine höhere Dichte angegeben als für die in nördliche Richtungen streichenden mit einem mittleren Abstand von ca. 120 cm. Zudem wurde beobachtet, dass NNW–SSE streichende Klüfte tendenziell häufiger an WNW–ESE streichenden enden, sodass für letztere in ihrer Gesamtheit eine etwas höhere Durchlässigkeit zu erwarten ist.

Zudem erwähnt auch GALADÍ-ENRÍQUEZ (2006) die von ZEITLHÖFLER (2007) beschriebene Signifikanz subhorizontaler Lagerklüfte für den oberflächennahen Grundwasserfluss. Diese Trennflächen folgen in der Regel der Geländetopographie und entstanden als lang aushaltende Extensionsklüfte mit entsprechend großen Kluftöffnungen infolge des erosiven Abtrags von auflagerndem Gebirge. Da die Gebirgsauflast mit zunehmender Tiefe unter Gelände größer wird, treten die Lagerklüfte mit zunehmenden Abstand von der Geländeoberfläche immer weniger in Erscheinung. In den Felsaufschlüssen im Passauer Wald wurden des Öfteren deutliche Wasseraustritte aus Lagerklüften beobachtet.

5 Lineamentanalyse

Für die Auswertung der Lineamentanalyse wurden insgesamt 6.929 kartierte Lineamente mit Längen zwischen 1,5 und 35,8 km und einer mittleren Länge von ca. 3,1 km verwendet. Da der ursprüngliche Umgriff der Kartierung auf dem Raster der Topographischen Karte 1:50 000 basierte und somit Teile des Tschechischen Staatsgebietes im Osten und des Bruchschollenlandes im Westen mit abgedeckt waren, wurde für die weitere Verarbeitung der Lineamentdatensatz auf den Umgriff des kristallinen Grundgebirges zugeschnitten. Für dieses Gebiet lagen schlussendlich insgesamt 5.971 Lineamente mit Längen zwischen 20 m (am Gebietsrand aufgrund des Zuschnitts) und 35,8 km bei einem Mittelwert von 2,9 km vor.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Auswertung und geostatistischen Regionalisierung vorgestellt und anschließend für Teilbereiche, für die Gefügedaten vorliegen, mit dem vor Ort ermittelten Trennflächeninventar im Hinblick auf Vorzugsrichtungen abgeglichen.

5.1 Geostatistische Regionalisierung

Zur Darstellung regionaler Vorzugsrichtungen wurden die Lineamentrichtungen in 10°-Segmenten gewichtet nach den kumulativen Längen pro Segment in Rosendiagrammen dargestellt (Abb. 5-1). Dies erfolgte sowohl für den Gesamtdatensatz als auch für die im Grundgebirge verorteten hydrogeologischen Teilräume.

Der Gesamtdatensatz spiegelt sämtliche im Untersuchungsgebiet vorkommenden Lineamentvorzugsrichtungen wider. Dabei dominiert das (W)NW–(E)SE verlaufende variskische Streichen, das ubiquitär im gesamten Grundgebirgsraum auftritt. Lineamente dieser Richtung vertreten die großen Bruchlinien am Grundgebirgsrand, wie beispielsweise die Fränkische Linie oder die Donaustörung wie auch die intrakristallinen Großstörungen wie den Bayerischen Pfahl mit seinen Parallelbrüchen. In nahezu gleicher Stärke sind die N–S- und die NE–SW-Richtung vertreten, wobei bei letzterer eine größere Streuung zu beobachten ist. Eine sehr untergeordnete Konzentration stellt zudem die ENE–WSW bis E–W-Richtung dar, die auch in den einzelnen Teilräumen keine herausragende Stellung einnimmt.

Wird der Gesamtdatensatz gegliedert nach hydrogeologischen Teilräumen ausgewertet, so verändert sich die relative Dominanz der einzelnen Vorzugsrichtungen zueinander.

Im Teilraum **Oberpfälzer-Bayerischer Wald** bleibt das variskische (W)NW–(E)SE-Streichen die vorherrschende Vorzugsrichtung. Diese repräsentiert in diesem Gebiet vor allem die Fränkische Linie, den Bayerischen Pfahl, die Randstörungen der Bodenwöhrer Bucht und die Donaustörung, aber auch zwischen diesen Großstrukturen taucht diese Richtung in einer Vielzahl kleinerer Lineamente auf, die der Morphologie dieses Teilbereichs ihren charakteristischen regionalen (W)NW–(E)SE-Verlauf verleihen.

Etwas weniger stark ist die N–S Richtung vertreten, die aber dennoch eine sehr prominente und in Bezug auf ihre Streuung eng begrenzte Lineamentpopulation darstellt. Vor allem im Bayerischen Wald zwischen der Bodenwöhrer Bucht und dem Passauer Wald fallen zahlreiche N–S streichende Lineamente auf. Diese erreichen zwar nicht die Einzellängen der variskisch streichenden, zeichnen sich aber dafür umso mehr durch ihre relativ hohe Dichte aus. Auffällige Beispiele für größere Lineamente dieser Richtung sind das Graflinger Tal mit seiner Fortsetzung bis nördlich von Teisnach oder die Täler von Ilz und Erlau bei Passau.

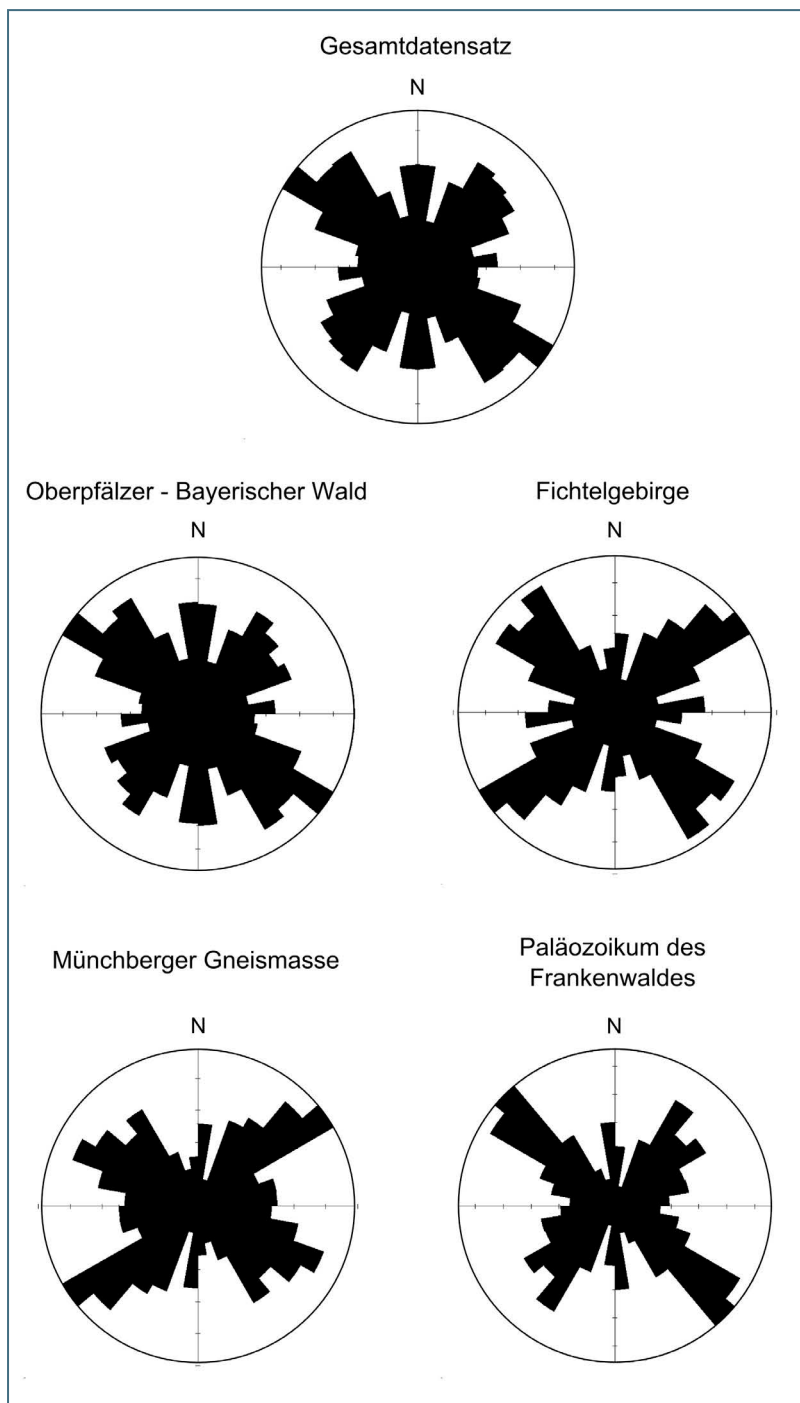


Abb. 5-1: Rosendiagramme kartierter topographischer Lineamente im Untersuchungsgebiet. Darstellung in 10°-Segmenten.

Die Segmentlängen sind proportional zur kumulativen Lineamentlänge pro Segment relativ zum Gesamtdatensatz.

NE–SW streichende Lineamente sind in diesem Teilraum ebenfalls flächendeckend verteilt, jedoch mit sehr viel kürzeren Einzellängen als bei den beiden vorgenannten Populationen. Tendenziell ist in diesem Teilraum eine Abnahme der Lineamentdichte dieser Richtung von Nordwest nach Südost zu beobachten.

Vor allem in der Nachbarschaft zum Fichtelgebirgs-Paläozoikum nimmt die NE–SW-Richtung stark zu. Ein auffälliger Vertreter davon im südlich gelegenen Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald ist der Taleinschnitt der Ruselbergstrecke bei Deggendorf, dessen Lineament sich weiter nach Osten mit Unterbrechungen bis an die Tschechische Grenze verfolgen lässt. Ähnliche Strukturen verlau-

fen auch zwischen Hengersberg und Grafenau bzw. Freyung und darüber hinaus. Abschnittsweise sind diese Lineamente auch als Störungen in der Geologischen Karte 1 : 150 000 (TEIPEL et al. 2008) verzeichnet.

ENE–WSW bis E–W verlaufende Lineamente treten im Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald nur sehr untergeordnet auf. Lokal treten sie des Öfteren zusammen mit Lineamenten der NE–SW-Population auf, sodass hier ein tektonischer Zusammenhang vermutet werden kann.

Im nördlich an den Oberpfälzer-Bayerischen Wald anschließenden Teilraum des **Fichtelgebirgs-Paläozoikums** löst die NE–SW-Richtung die (W)NW–(E)SE Richtung als dominante Lineamentenschar ab. Darin zeigt sich die relative Nähe zum Egergraben im Osten, der mit seinen Randstörungen ebenfalls ein $\pm$ NE–SW-Streichen aufweist. Auch ältere Strukturelemente des Fichtelgebirges, wie beispielsweise die eingeschalteten Marmorzüge oder die Achse des Fichtelgebirgsantiklinoriums selbst sind in dieser Richtung angelegt. Eine bruchtektonische Reaktivierung dieser alten Strukturen ist ein weiterer Grund für das Vorherrschen der NE–SW-Lineamente, die auch von verschiedenen Bearbeitern geologischer Karten in dieser Region (z. B. MIELKE 1982) erwähnt wird.

Im Übrigen ist die Verteilung der Vorzugsrichtungen mit der im Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald vergleichbar. Das variskische (W)NW–(E)SE Streichen ist wie im gesamten Untersuchungsraum auch im Fichtelgebirgs-Paläozoikum zu finden und orientiert sich an den regionalen Großstörungen wie der Fränkischen Linie im Fall des Fichtelgebirges.

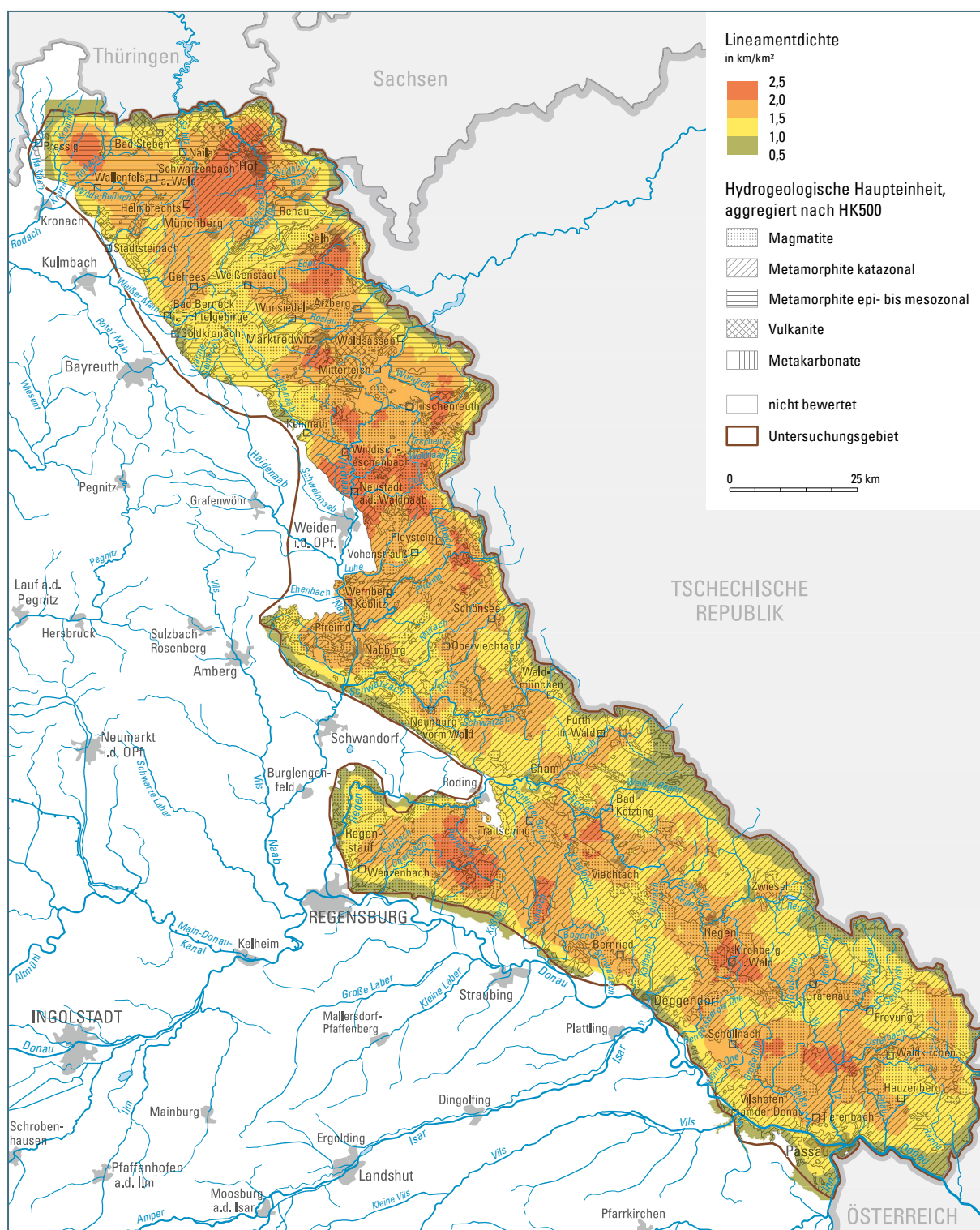
Zwischen Bischofsgrün und Fichtelberg sowie zwischen Marktleuthen und Hohenberg an der Eger verlaufen die auffälligsten Lineamente dieser Richtung mit Längen über 15 km. Auch in den digital verfügbaren geologischen Karten wurde das (W)NW–(E)SE Streichen als vorherrschende Störungsrichtung in diesem Bereich kartiert. Vor allem im Grundgebirgsanteil der GK25 Blatt 6036 Weidenberg ist diese Richtung aufgrund der Nähe zur Fränkischen Linie nahezu ausschließlich vertreten.

Untergeordnet treten mit in etwa gleicher Häufigkeit N–S und E–W streichende, meist nur kurz aushaltende Lineamente auf. Lediglich die in nördlichen Richtungen verlaufenden Täler zwischen Weidenberg und Warmensteinach sowie zwischen Schwarzenbach a. d. Saale und Marktleuthen sind über einige Kilometer zu verfolgen.

In Bezug auf die Rangfolge der Vorzugsrichtungen ist der Teilraum der **Münchberger Gneismasse** mit dem Fichtelgebirgs-Paläozoikum vergleichbar. Auch hier überwiegt die NE–SW-Richtung, worin sich vermutlich einerseits noch die Egergraben-Tektonik zeigt, andererseits aber auch der paläozoische Faltenbau mit seinen dazugehörigen Längsbrüchen und deren im Rahmen der tertiären Hebungstektonik erfolgten Reaktivierung zum Ausdruck kommt.

Die Anlage von (W)NW–(E)SE streichenden Lineamenten ist, wie bei den südlichen Teilräumen mit der regionalen variskischen Tektonik, mit der Fränkischen Linie als westliche Begrenzung der Gneismasse, verbunden. Andererseits sind auch die im Rahmen des Faltenbaus entstandenen und später reaktivierten Querstörungen (vgl. Kapitel 3) reliefbildnerisch wirksam.

Abbildung 5-2 zeigt die Dichteverteilung der im Untersuchungsgebiet kartierten Lineamente im Vergleich zu den jeweiligen hydrogeologischen Haupteinheiten. Im Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald orientieren sich höhere Lineamentdichten vor allem an den großtektonischen Hauptstrukturen wie beispielsweise der Pfahlstörung. Untergeordnet besteht eine schwache räumliche Korrelation zwischen erhöhten Lineamentdichten und Granitgebieten wie z. B. dem Falkenberger Granit in



Geobasisdaten: DLM 1000, © GeoBasis-DE / BKG 2013 (Daten verändert)

Abb. 5-2: Lineamentdichten in km/km² im Untersuchungsgebiet mit Darstellung aggregierter Haupteinheiten der Hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500 000

der nördlichen Oberpfalz, dem Regensburger Wald oder den großen Granitplutonen nördlich von Passau. Für den Fall des Regensburger Waldes ist anzumerken, dass auch das Rahmengestein der Magmatite hochmetamorph überprägt ist und teilweise in seiner Beschaffenheit magmatischen Gesteinen sehr nahe kommt. Entlang der Pfahlstörung existieren ebenfalls einige größere Granitkörper, wobei in diesem Fall die höheren Lineamentdichten nicht eindeutig der Lithologie oder dem tektonischen Element der Pfahlstörung zugeschrieben werden können.

Im Bereich des Fichtelgebirges sind erhöhte Lineamentdichten einerseits auf das Verbreitungsgebiet der Fichtelgebirgsgranite und andererseits auf die tertiäre Extensionstektonik des (E)NE–(W)SW verlaufenden Egergrabens zurückzuführen, dessen westliche Ausläufer auch auf bayerischer Seite noch reliefbildnerisch wirksam sind.

Abbildung 5-3 verdeutlicht, welche Lineamentrichtung in einer Region im Vergleich zu den anderen vorherrscht. Hierbei wurden die im Gesamtgebiet am häufigsten auftretenden Richtungen als Grundlage für die Aufgliederung verwendet. Dabei wird deutlich, dass die (W)NW–(E)SE-Richtung vor allem im Umfeld der großen variskischen Störungslinien wie dem Pfahl, der Donautörung oder der Fränkischen Linie dominiert.

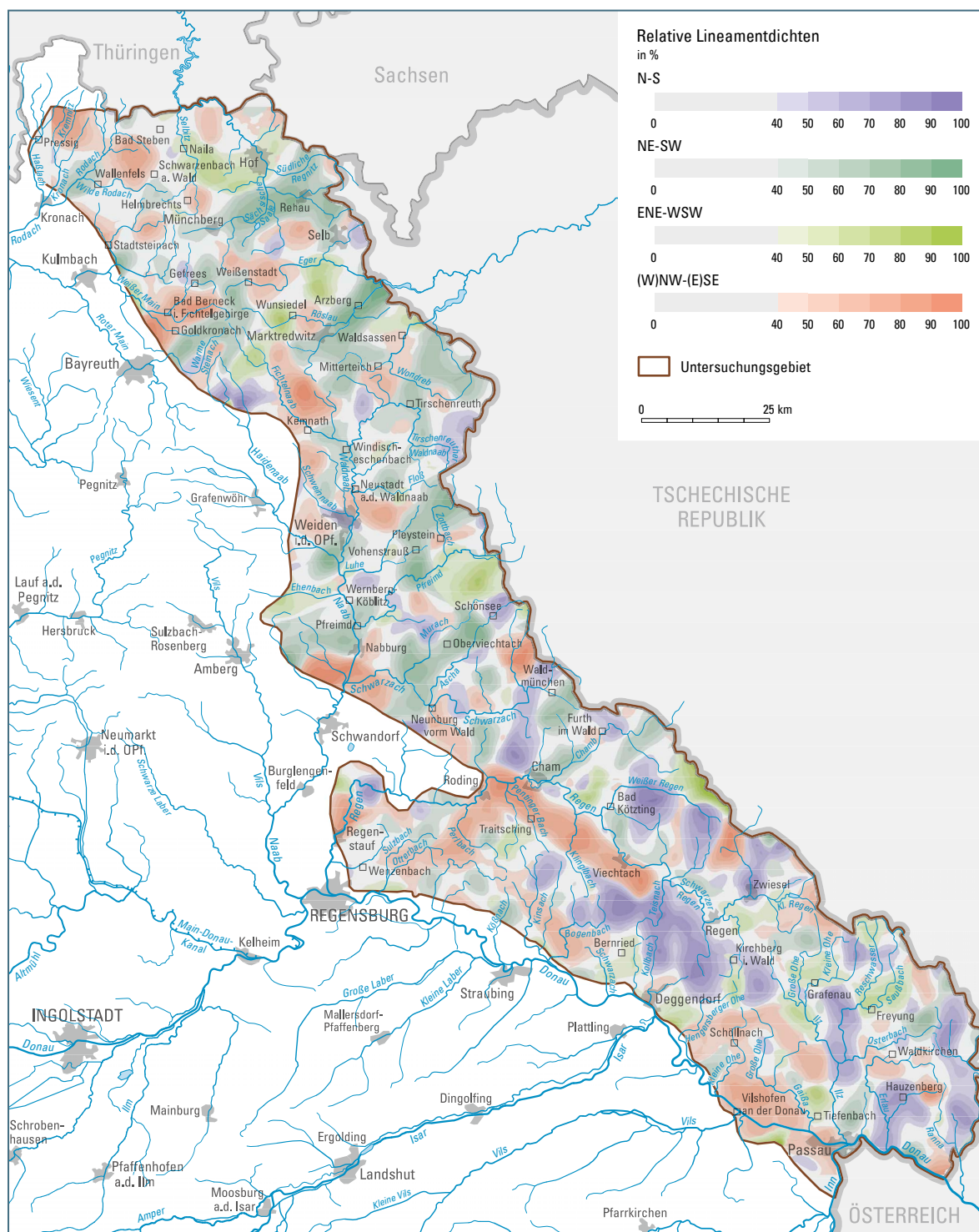
Bei der Betrachtung des Gesamtgebietes ist eine nördlich gerichtete Tendenz von niedrigeren zu höheren Lineamentdichten zu beobachten, was vermutlich in erster Linie auf die großtektonischen Rahmenbedingungen zurückzuführen ist. So wird der Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald vorwiegend von der (W)NW–(E)SE gerichteten variskischen Bruchtektonik (mit untergeordneten N–S Störungen) dominiert, während weiter nördlich, vor allem im Umfeld des Fichtelgebirges, noch die (N)NW–(S)SE gerichtete tertiäre Extensionstektonik des Egergrabens verstärkt hinzukommt. Auch im Bereich der Münchberger Gneismasse und im Frankenwald herrscht die NE–SW-Richtung des regionalen Faltenbaus zusätzlich zum variskischen Streichen der Fränkischen Linie und ihrer Begleitstörungen sowie den Querbrüchen zum Faltenbau vor. Das Zusammenspiel dieser beiden Vorzugsrichtungen sorgt damit für einen tendenziell höheren Zerlegungsgrad des nördlichen Untersuchungsgebietes.

N–S verlaufende Lineamente konzentrieren sich auf das südliche Untersuchungsgebiet, während NE–SW streichende Strukturen in der nördlichen Oberpfalz und Oberfranken, also in der Umgebung des Fichtelgebirges und des Egergrabens, vorherrschen. Die ENE–WSW-Richtung tritt flächenmäßig nur untergeordnet, dafür aber über das gesamte Untersuchungsgebiet, auf.

5.2 Verifizierung der Lineamentdaten

Um einen Zusammenhang zwischen den fernerkundlich erfassten topographischen Lineamenten und dem lokalen Trennflächengefüge herzustellen, wurden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Detailstudien mit denen der Lineamentanalyse verglichen. Hierzu wurde durch den Zuschnitt des Lineamentdatensatzes auf die untersuchten Gebiete ein möglichst enger räumlicher Bezug zu den Geländedaten hergestellt (Abb. 5-3).

Methodisch bedingt können allein die Richtungen von Lineamenten und Kluftsystemen miteinander abgeglichen werden. Hierbei ist anzumerken, dass die im Folgenden dargestellten Rosendiagramme der Lineamentrichtungen immer auf deren Länge normalisiert sind, während die Gefügemessungen auf die Häufigkeit von Einzeltrennflächen bezogen sind. Dies bedeutet, dass die jeweiligen Größen der einzelnen 10°-Segmente in einigen Fällen zwischen Lineament- und Trennflächendaten methodisch bedingt nicht übereinstimmen. Vor allem bei der Geländeaufnahme können, wie in



Geobasisdaten: DLM 1000, © GeoBasis-DE / BKG 2013 (Daten verändert)

Abb. 5-3: Räumliche Verteilung der relativen Lineamentdichten im gesamten Untersuchungsraum.

den Ausführungen zur Methodik bereits beschrieben, aufgrund der Exposition von Felsaufschlüssen einzelne Trennflächenscharen unter- oder überrepräsentiert sein, sodass bei der Verifizierung der Lineamentdaten die Rangfolge der einzelnen Richtungsmaxima bei den Lineamentlängen nicht immer mit der Häufigkeitsverteilung bei den Trennflächenrichtungen übereinstimmt.

Durch die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen Lineament- und Kluftrichtungen kann somit indirekt auf das Vorhandensein stärker zerlegter, und damit potentiell wasserwegsamere Bereiche im Umfeld dieser Lineamente geschlossen werden.

Nördliche Oberpfalz

Für den Vergleich des Trennflächengefüges mit der Oberflächenmorphologie wurden die Streichrichtungen steil einfallender Klüfte in Rosendiagrammen dargestellt und mit den Lineamentrichtungen aus einem 5 km-Radius um den Felsaufschluss verglichen (Abb. 5-4). Auch wenn die dargestellten Ergebnisse nicht 1 : 1 übereinstimmen, lassen sich bei näherer Betrachtung deutliche Zusammenhänge herstellen.

Der Felsaufschluss an der Autobahn A93 bei Schwarzenfeld verläuft in etwa NNE–SSW, sodass aufgrund der Winkelbeziehungen zwischen Kluftscharen und Aufschlusswand das NNE–SSW streichende Trennflächensystem eigentlich unterrepräsentiert sein müsste. Da das Gegenteil der Fall ist, kann von einer starken Dominanz dieser Richtung an diesem Messpunkt ausgegangen werden. Auch im betrachteten 5 km-Radius um den Aufschluss verlaufen die kartierten Lineamente vorwiegend NNE–SSW, sodass hier ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Morphologie und Tektonik besteht.

Untergeordnet tritt im Gefügedatensatz die bei den Lineamenten stark vertretene (W)NW–(E)SE-Richtung auf. Hier zeigt sich die unmittelbare Nähe zum Rand der Bodenwöhrer Senke, die allerdings lokal von der dominanten NNE–SSW-Trennflächenschar stark überprägt wird. Zudem fällt sowohl bei den Lineament- als auch bei den Trennflächenrichtungen eine NE–SW verlaufende Richtung auf, die vor allem in der nördlichen Oberpfalz und im Fichtelgebirge stark vertreten ist.

An den Untersuchungsorten im Waldnaabtal zwischen Windischeschenbach und Falkenberg zeigt der Vergleich zwischen Gefüge- und Lineamentrichtungen auf den ersten Blick nur wenige Gemeinsamkeiten, vor allem wenn man die Häufigkeit der Trennflächen und die kumulativen Lineamentlängen pro 10°-Segment betrachtet. Dennoch sind in beiden Datensätzen die N–S-, die NNE–SSW-, die (W)NE–(E)SE- und die E–W-Richtung vorhanden, wenn auch in stark unterschiedlicher Dominanz.

Dies deutet darauf hin, dass an den beiden Messpunkten lokal sehr begrenzte Besonderheiten existieren, die nicht auf den 5 km-Betrachtungsradius der Lineamentdaten übertragen werden können. Diese wurden bereits bei der Betrachtung der Detailuntersuchungen in Kapitel 4 beschrieben. So verläuft das Waldnaabtal im Bereich des nördlichen Messpunktes parallel zur stark dominierenden Kluftschar in west-östlicher Richtung, während es am südlichen Messpunkt in einen südlich gerichteten Verlauf einschwenkt, der ebenfalls in etwa mit der lokalen Hauptkluftrichtung übereinstimmt.

Der Messpunkt oberhalb des Fichtelnaabtals ist von seiner Nähe sowohl zur Fichtelnaabstörung als auch zum Kontakt mit dem Fichtelgebirgs-Paläozoikum gekennzeichnet, wobei das direkte Umfeld des Aufschlusses nur eine geringe Lineamentdichte mit einer relativ starken Streuung bezüglich

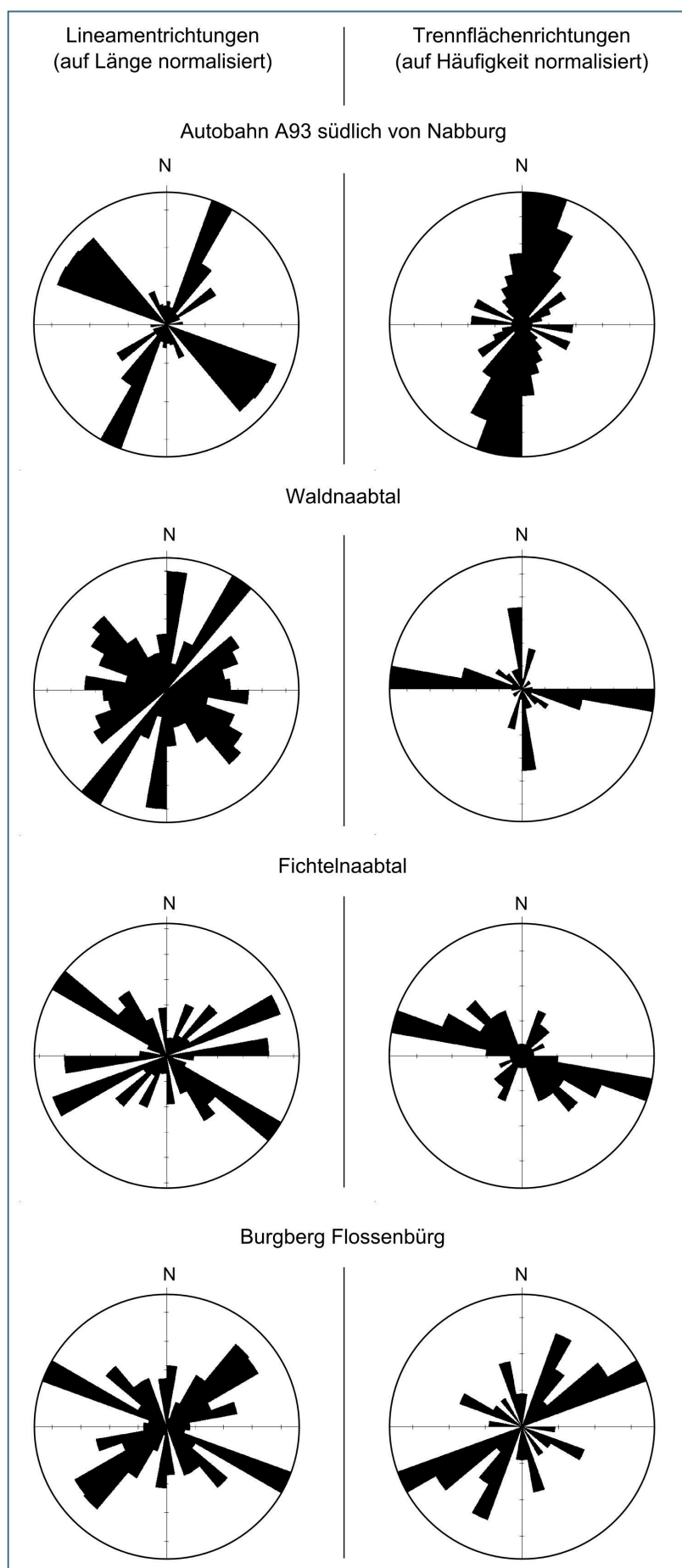


Abb. 5-4: Rosendiagramme der Streichrichtungen von steilstehenden Trennflächen an ausgewählten Messpunkten in der nördlichen Oberpfalz sowie von kartierten Lineamenten in einem 5 km-Radius um die einzelnen Messpunkte.

Darstellung in 10°-Segmenten. Die Segmentlängen der Trennflächen sind proportional zur relativen Häufigkeit pro Segment in Bezug auf den Gesamtdatensatz. Die Segmentlängen der Lineamente sind proportional zur kumulativen Lineamentlänge pro Segment relativ zum Gesamtdatensatz.

der Richtungen aufweist. So dominiert die (W)NW–(E)SE-Richtung sowohl die Lineament- als auch die Trennflächenverteilung, wobei die jeweiligen Maxima um ca. 20° voneinander abweichen. Die relativen Häufigkeiten der NE–SW- und ENE–WSW-Richtung unterscheiden sich stark beim Vergleich der beiden Datensätze, wobei aufgrund der starken Streuung der Lineamentrichtungen eine eindeutige Zuordnung zu Trennflächenscharen nicht möglich ist.

Am Messpunkt Burgberg Flossenbürg unterscheiden sich die Richtungsmaxima von Lineamenten und Trennflächen ebenfalls deutlich. So dominiert die (W)NW–(E)SE-Richtung das Rosendiagramm des Lineamentdatensatzes, während die größte Anzahl an gemessenen Kluftflächen ein ENE–WSW-Streichen zeigt, das auch bei den Lineamenten deutlich vorhanden ist. Dennoch taucht die in den Lineamenten dominante Richtung auch als untergeordnetes Maximum bei der Verteilung der Trennflächen auf. Die in den Gefügedaten auffällige NNE–SSW-Population existiert im Lineamentdatensatz nicht, während in nördliche Richtungen streichende Strukturen mit gewissen Abweichungen in beiden Datensätzen vorhanden sind.

Zusammenfassend ist für den Abgleich von Trennflächen- und Lineamentdaten im Untersuchungsgebiet der nördlichen Oberpfalz festzustellen, dass die hier nur punktuell durchgeführten Gefügaufnahmen mit verhältnismäßig wenigen Einzelmessungen teilweise nur undeutliche Übereinstimmungen mit den Lineamentrichtungen der Umgebung aufweisen. Wie die Betrachtung der Detailstudien aus dem Arbergebiet und dem südlichen Bayerischen Wald zeigen wird, liefert erst eine größere Menge an Trennflächenmessungen, verteilt über ein Gebiet, eine bessere Korrelation zwischen Kluft- und Lineamentrichtungen.

Arbergebiet

Für das Arbergebiet sind die Streichrichtungen von Lineamenten und steilstehenden Trennflächen sowohl für den Gesamtdatensatz als auch gegliedert nach den geologischen Einheiten Metamorphite, Magmatite und Diatexite dargestellt (Abb. 5-5).

Der Vergleich des Gesamtdatensätze zeigt eine gute Übereinstimmung der Richtungsmaxima, wobei allerdings die Kluftrichtungen stärker streuen. Beide Verteilungen werden von der (W)NW–(E)SE-Richtung dominiert, da in diesem Untersuchungsgebiet sowohl das vorherrschende metamorphe Gefüge als auch tektonische Großstrukturen wie die Pfahlstörung oder die Runder Zone in dieser Richtung verlaufen.

Weitere Korrelationen ergeben sich für die N–S-, die NE–SW- und die ENE–WSW-Richtung. Die Überrepräsentation der NE–SW-Richtung im Gesamtdatensatz wie auch in den Magmatiten wurde bereits in der Beschreibung der Detailuntersuchungen in Kapitel 4 erläutert. Somit ist davon auszugehen, dass für das gesamte Untersuchungsgebiet die Rangfolge der dominanten Richtungen (W)NW–(E)SE, N–S, NE–SW und ENE–WSW bis E–W sowohl für den Lineament- als auch den Trennflächendatensatz gilt.

Mit der bereits erwähnten Einschränkung bezüglich der NE–SW streichenden Trennflächen ergibt sich für die Magmatite zwischen den Lineamentrichtungen und den Gefügemessungen eine gute Übereinstimmung. So sind in beiden Verteilungen die Hauptmaxima vertreten, wobei die Kluftrichtungen etwas stärker streuen.

Ähnlich verhält es sich bei den Metamorphiten, wobei hier die N–S-Richtung im Lineamentdatensatz im Vergleich zur (W)NW–(E)SE-Richtung vorherrscht. Vor allem im Arbergebiet nördlich von

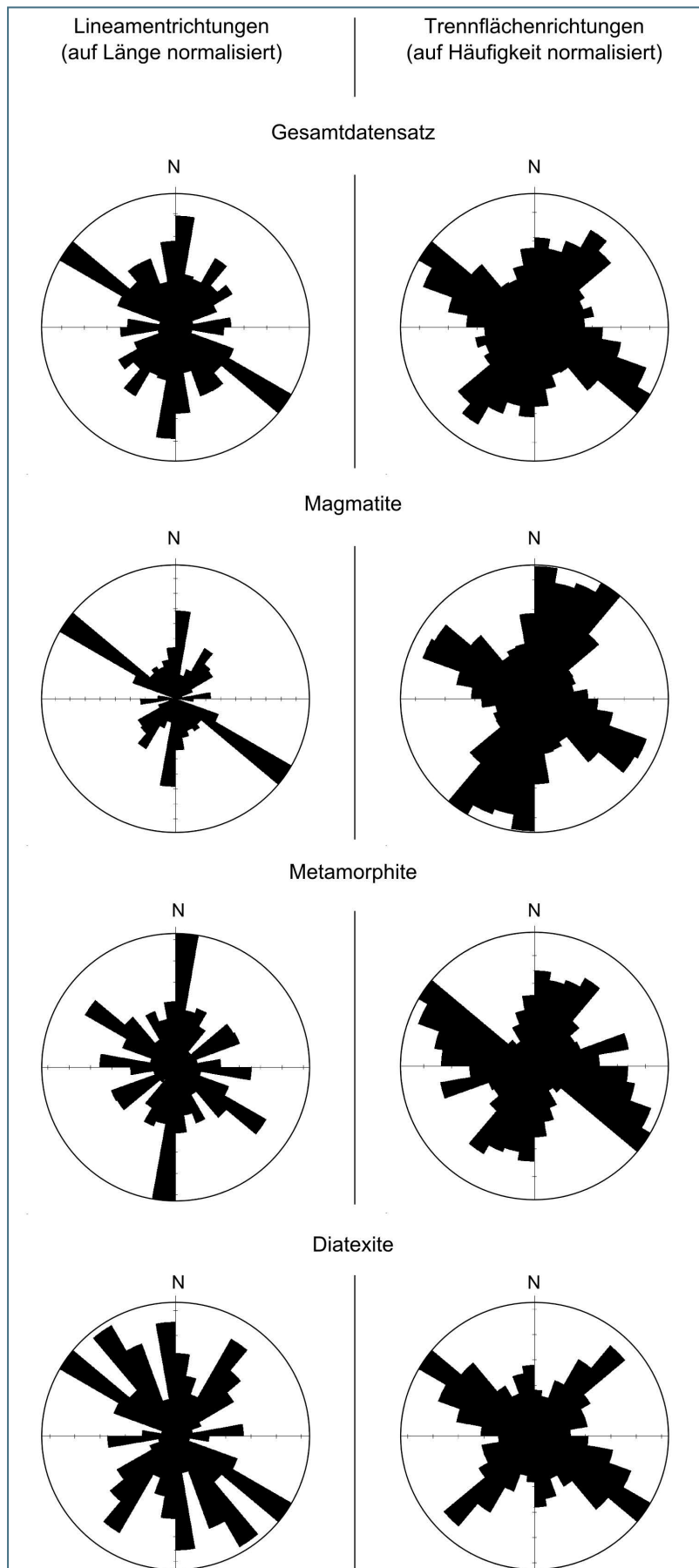


Abb. 5-5: Rosendiagramme der Streichrichtungen von steilstehenden Trennflächen an ausgewählten Messpunkten im Arbergebiet sowie von kartierten Lineamenten innerhalb der jeweiligen geologischen Einheiten.

Darstellung in 10°-Segmenten. Die Segmentlängen der Trennflächen sind proportional zur relativen Häufigkeit pro Segment in Bezug auf den Gesamtdatensatz. Die Segmentlängen der Lineamente sind proportional zur kumulativen Lineamentlänge pro Segment relativ zum Gesamtdatensatz.

Bodenmais verlaufen zahlreiche kleine Täler nach Norden, woraus sich das Vorherrschen dieser Richtung im Geländere Relief ergibt.

Die relativ zu den Lineamentrichtungen größere Häufigkeit der (W)NW–(E)SE streichenden Trennflächen erklärt sich durch die deutliche (N)NE einfallende Schieferung dieser Lithologie. Entlang dieser Flächen bildeten sich zahlreiche kleinere Klüfte, die im Rosendiagramm bezogen auf ihre Anzahl verstärkt in Erscheinung treten. Die verhältnismäßig große Streuung der Streichrichtungen der schieferungsparallelen Trennflächen von E–W bis NW–SE ergibt sich aus dem regional leicht variierenden Verlauf der Schieferungsbahnen. Ein weiteres deutliches Maximum im Gefügedatensatz streicht ENE–WSW. Die Lineamente treten in diesem Richtungssegment allerdings weit weniger deutlich in Erscheinung.

Bei den Diatexiten ist im Lineamentdatensatz eine verhältnismäßig starke Streuung mit zahlreichen mehr oder weniger gleichwertigen Richtungsmaxima zu beobachten. Die Richtungsverteilung bei den Gefügemessungen zeigt dagegen drei klare Vorzugsrichtungen.

Bei den Lineamentrichtungen zeichnen sich die relativ langen N–S verlaufenden Taleinschnitte ab, die im gesamten Untersuchungsgebiet, aber vor allem im Verbreitungsgebiet der Diatexite vorhanden sind. Beispiele hierfür sind die bereits erwähnte nördliche Verlängerung des Graflinger Tals, aber auch lokale Talverläufe, wie beispielsweise die der Aitnach, des Riedbachs und des Täublmühlbachs bei Viechtach oder einige Talabschnitte des Schwarzen Regens. Die pfahlparallele (W)NW–(E)SE-Richtung ist ebenfalls sowohl bei den Lineamenten als auch den Trennflächen prominent vertreten, wobei auch hier die Lineamentrichtungen verhältnismäßig stark streuen und eine zweigipflige Verteilung zeigen.

Ein weiteres deutliches Maximum im Lineamentdatensatz der Diatexite ist die E(NE)–W(SW)-Richtung. Reliefbildnerisch tritt diese vor allem bei der Anlage einzelner Talabschnitte des Schwarzen Regens sowie einiger kleinerer Täler zwischen dem Regen- und dem Zellertal in Erscheinung. Im Trennflächendatensatz stellt diese Richtung ein untergeordnetes Maximum dar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Untersuchungsgebiet E–W streichende Lineamente lokal begrenzte Erscheinungen sind, in deren Umgebung kaum Felsfreistellungen existieren, an denen Gefügemessungen vorgenommen werden können.

Zusammenfassend sind im Arbergebiet deutliche Übereinstimmungen zwischen dem Trennflächengefüge und den Lineamentrichtungen erkennbar, wenngleich auch die relativen Häufigkeiten nur vereinzelt mit den kumulativen Lineamentlängen pro Richtungssegment korrelieren.

Südlicher Bayerischer Wald

Im Untersuchungsgebiet des südlichen Bayerischen Waldes wurden von GALADÍ-ENRÍQUEZ (2006) Kluftrichtungen nach ihrem Vorkommen in den Fürstensteiner bzw. Hauzenberger Granitplutonen und im umgebenden Gneisrahmen gegliedert. Entsprechend wurde der Lineamentdatensatz auf die Verbreitungsgebiete der einzelnen geologischen Einheiten zugeschnitten und im Hinblick auf Vorzugsrichtungen ausgewertet (Abb. 5-6).

Im Fürstensteiner Pluton streuen die Trennflächen verhältnismäßig stark zwischen E–W und NW–SE sowie zwischen N–S und NE–SW. Dem stehen relativ eng begrenzte Lineamentpopulationen mit NW–SE- und ENE–WSW-Streichen gegenüber. In grober Näherung lassen sich hier gewisse

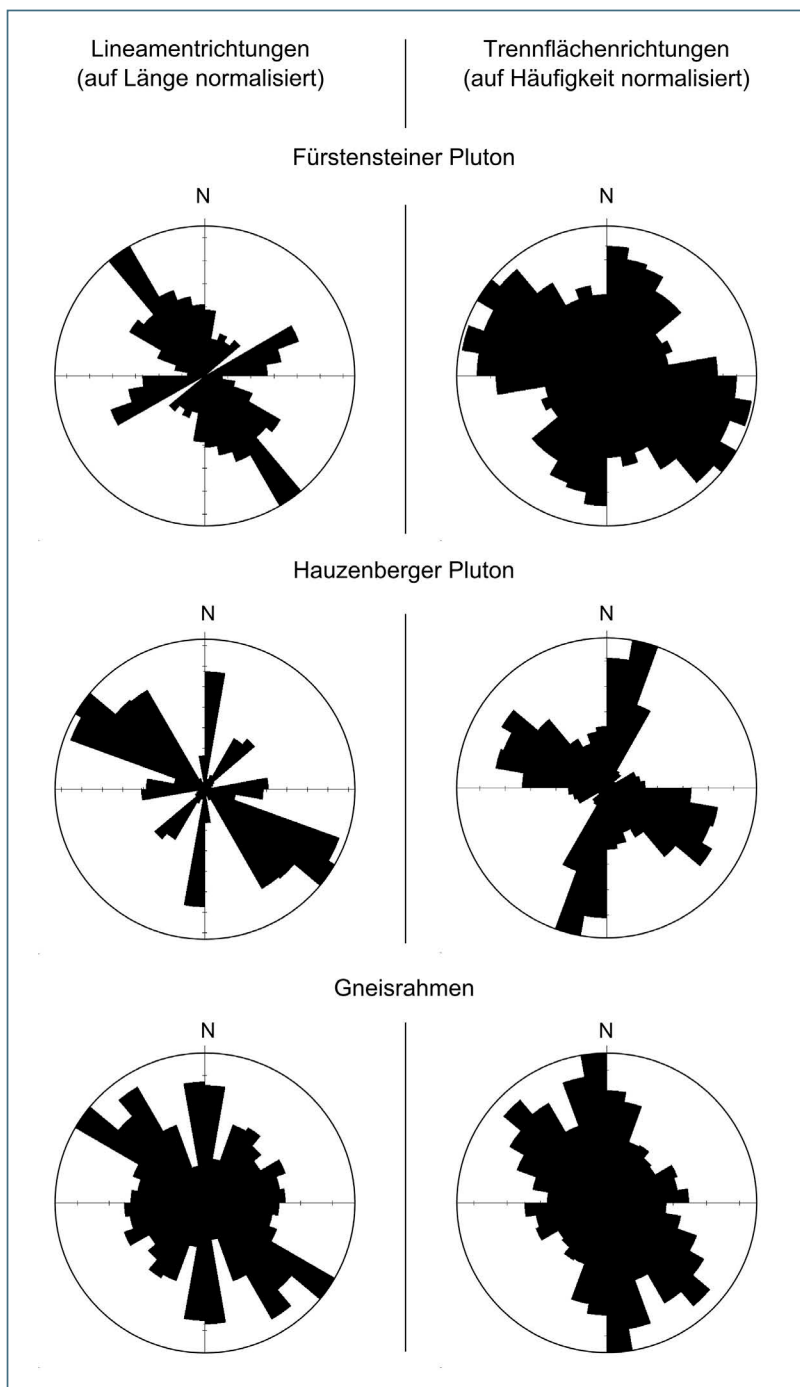


Abb. 5-6: Rosendiagramme der Streichrichtungen von steilstehenden Trennflächen in den Fürstensteiner und Hauzenberger Granitplutonen sowie im umgebenden Gneisrahmen und von kartierten Lineamenten innerhalb der jeweiligen geologischen Einheiten.

Darstellung in 10°-Segmenten. Die Segmentlängen der Trennflächen sind proportional zur relativen Häufigkeit pro Segment in Bezug auf den Gesamtdatensatz. Die Segmentlängen der Lineamente sind proportional zur kumulativen Lineamentlänge pro Segment relativ zum Gesamtdatensatz.

Übereinstimmungen erkennen, aufgrund der sehr unscharfen Abgrenzung der Trennflächenrichtungen ist allerdings eine eindeutige Zuordnung einzelner Kluft- und Lineamentscharen nicht möglich.

Wesentlich offensichtlicher sind die Zusammenhänge zwischen Lineament- und Kluftstreichen im Hauzenberger Pluton. In beiden Datensätzen verlaufen die dominanten Richtungen in etwa N–S und (W)NW–(E)SE und somit parallel zu den Hauptrichtungen im gesamten Bayerischen Wald. Die im Lineamentdatensatz deutlich hervortretenden NE–SW und $\pm$ E–W streichenden Strukturen lassen sich im Rosendiagramm der Kluftrichtungen hingegen nur vermuten.

Der die Plutone umgebende Gneisrahmen zeigt deutliche Übereinstimmungen zwischen Lineamenten und Trennflächen, obwohl sich vor allem die Kluftrichtungen deutlich von denen in den Metamorphiten des Arbergebietes unterscheiden. So verläuft das normalerweise eher WNW–ESE angelegte variskische Streichen stärker in NW–SE- bis NNW–SSE-Richtung und grenzt nahezu unmittelbar an die $\pm$ N–S streichende Trennflächenschar an. Im Wesentlichen decken sich diese beiden Hauptmaxima mit den dominanten Lineamentrichtungen im Gebiet. Untergeordnete Populationen treten nur sehr undeutlich in Erscheinung. So ist ein schwaches ENE–WSW verlaufendes Maximum erkennbar, das im Lineamentdatensatz eine ebenso schwache Entsprechung findet.

Mit Ausnahme des Fürstensteiner Plutons mit seinen stark streuenden Kluftrichtungen sind somit auch im südlichen Bayerischen Wald deutliche Zusammenhänge zwischen Lineament- und Kluftrichtungen festzustellen.

6 Gebirgsdurchlässigkeiten

Für das Untersuchungsgebiet lagen im Bayerischen Bodeninformationssystem (BIS-BY) zur Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte die Daten von insgesamt 282 quasistationären Pumpversuchen an Brunnen und Grundwassermessstellen vor. Diese wurden überwiegend vor der Inbetriebnahme der Brunnen oder unmittelbar nach Fertigstellung der Brunnen durchgeführt. Die Auswertungen erfolgten nach Dupuit/Thiem (z. B. in LANGGUTH & VOIGT 2004). Die Ergebnisse geben somit auf Grund der vorliegenden Rohdaten sowie der verwendeten Methode eine überschlagsmäßige Einschätzung der horizontalen Durchlässigkeitsbeiwerte der untersuchten hydrogeologischen Einheiten.

Insgesamt 267 Pumpversuche konnten eindeutig geologischen Haupteinheiten zugeordnet werden. Abbildung 6-1 zeigt die Lage der ausgewerteten Pumpversuche.

Tab. 6-1: Für die Durchlässigkeitsuntersuchungen differenzierte geologische Haupteinheiten und zugehörige hydrogeologische Einheiten der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Bayern 1 : 500 000 (Erläuterung der Kürzel: fw: Frankenwald, mg: Münchberger Gneismasse, fg: Fichtelgebirge, bw: Oberpfälzer-Bayerischer Wald).

Hydrogeologische Haupteinheit	Lithologie	Hydrogeologische Einheit HK500	Kürzel HK500
Magmatite des Fichtelgebirges	Granit, Redwitzit	Granit	fg2
		Magmatite, intermediär bis basisch	fg5
Magmatite des Oberpfälzer-Bayerischen Waldes	Granit, Granodiorit, Diorit, Tonalit, Gabbro, Norit, Metagabbro	Magmatite, sauer bis intermediär	bw3
		Magmatite, basisch	bw6
Metakarbonate	Kalk- und Dolomitmarmor, Kalksilikat	Wunsiedler Marmorzug	fg6
Metamorphite, katazonal	Gneis, Amphibolith, Serpentin, Eklogit, Metamagmatit, Diatexit	Metabasite	mg1
		Metamorphite, sauer bis intermediär	mg2, fg4
		Metamorphite, sauer	bw4
		Metamorphite, basisch	bw5
Metamorphite, epi-, mesozonal	Phyllit, Glimmerschiefer, Quarzit, Anchimetamorphit, Tonstein, Tonschiefer	Paläozoische Metapelite	fw2
		Paläozoische Metapsammite	fw3
		Metamorphite, sauer bis intermediär	mg2
		Phyllit	mg3
		Paläozoische Metasedimente	fg3, bw2
Vulkanite	Basalt, Diabas, Nephelinit, Rhyolith, untergeordnet Keratophyr	Vulkanite	fw1, bw1
		Tertiäre Vulkanite	fg1

Diese Einheiten untergliedern sich in Magmatite (Granite, Diorite, etc.), epi- bis mesozonale Metamorphite (Phyllit, Glimmerschiefer, etc.), katazonale Metamorphite (Gneise, Amphibolite, Diatexite etc.), Vulkanite (Basalt) und Metakarbonate (Kalksilikatfelse und Marmore). Die Einheit der Magmatite, wurde noch weiter in die Untergruppen Magmatite des Fichtelgebirges und Magmatite des Oberpfälzer-Bayerischen Waldes unterteilt. Tabelle 6-1 gibt einen Überblick der differenzierten Einheiten mit ihren Eigenschaften und die Zuordnung zu den entsprechenden Einheiten der Hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500 000.

Die im Rahmen der Pumpversuchsauswertungen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte umfassen eine Spanne von $6,6 \cdot 10^{-8}$ bis $5,1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Die statistische Verteilung auf einzelne k_f -Werte-Klassen ist in Abbildung 6-2 in Histogrammen dargestellt.

Für das gesamte Grundgebirge wurde somit der Median des k_f -Werts zu $5,9 \cdot 10^{-6}$ m/s ermittelt; 80 % der Messwerte liegen in einem Bereich von $8,8 \cdot 10^{-7}$ bis $3,8 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Diesbezüglich muss deutlich darauf hingewiesen werden, dass Brunnenbohrungen zu Wasserversorgungszwecken sowieso schon oft in Talbereichen abgeteuft werden, in denen das Gebirge durch bruchtektonische Linien stärker aufgelockert ist. Auch werden die immer wieder auftretenden wenig ergiebigen oder trockenen Bohrungen meist nicht zu Brunnen ausgebaut und erscheinen damit statistisch nicht im Datensatz und in den Abbildungen. Somit tendiert die Häufigkeitsverteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte wie stets im Festgesteinsbereich eher zu einer Überrepräsentation höherer Durchlässigkeiten.

Abbildung 6-2 stellt die Häufigkeitsverteilungen der k_f -Werte für den Gesamtdatensatz sowie die einzelnen betrachteten hydrogeologischen Einheiten dar. In Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 erfolgt eine Übersichtsdarstellung als Boxplot-Diagramme. Tabelle 6-2 liefert numerische statistische Angaben zu den ausgewerteten Pumpversuchen. Zusätzlich ist die spezifische Ergiebigkeit der einzelnen Teileinheiten angegeben, die strenggenommen nur für gespannte Grundwasserverhältnisse gilt. Bei freiem Grundwasser kann sie in Abhängigkeit von Grundwasserstand, Fördermenge und Absenkung unterschiedliche Werte aufweisen und wird daher als „Leistungs-Absenkungs-Quotient“ bezeichnet. Trotz dieser Einschränkungen liefert der Quotient eine brauchbare Grundlage für Vergleiche (HÖLTING & COLDEWEY 2005).

Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Metakarbonate liegen mit einem Medianwert von $3,2 \cdot 10^{-5}$ m/s und einer Schwankungsbreite von $1,3 \cdot 10^{-6}$ und $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s im Vergleich zu den übrigen Einheiten am höchsten. Die für diese Einheit ausgewerteten Bohrungen wurden durchwegs in die Wunsiedler und Waldershöfer Marmorzüge abgeteuft. Diese Marmorlagen sind über Strecken von mehreren Kilometern in die Metamorphite des Fichtelgebirgs-Paläozoikums eingeschaltet und weisen aufgrund ihrer verhältnismäßig guten Wasserlöslichkeit Verkarstungserscheinungen auf. Somit sind hier vereinzelt Durchlässigkeitsbeiwerte zu finden, die mit denen im Malmkarst des Fränkischen Jura vergleichbar sind.

Die Einheiten der Magmatite, der katazonalen Metamorphite und der Vulkanite des Frankenwaldes weisen mit Medianwerten von $8 \cdot 10^{-6}$, $7,6 \cdot 10^{-6}$ und $6,8 \cdot 10^{-6}$ m/s eine Variabilität im Bereich der statistischen bzw. methodischen Unschärfe auf. Die in Tabelle 6-2 dargestellte Schwankungsbreite der Durchlässigkeitsbeiwerte ist für diese drei Einheiten vergleichbar. Lediglich in den Extrembereichen unterhalb des 10 %-Quantils und oberhalb des 90 %-Quantils sind Unterschiede von bis zu einer halben Größenordnung erkennbar. Gliedert man den Gesamtdatensatz der Magmatite weiter in die regionalen Untereinheiten der Magmatite des Fichtelgebirges und des Oberpfälzer-Baye-

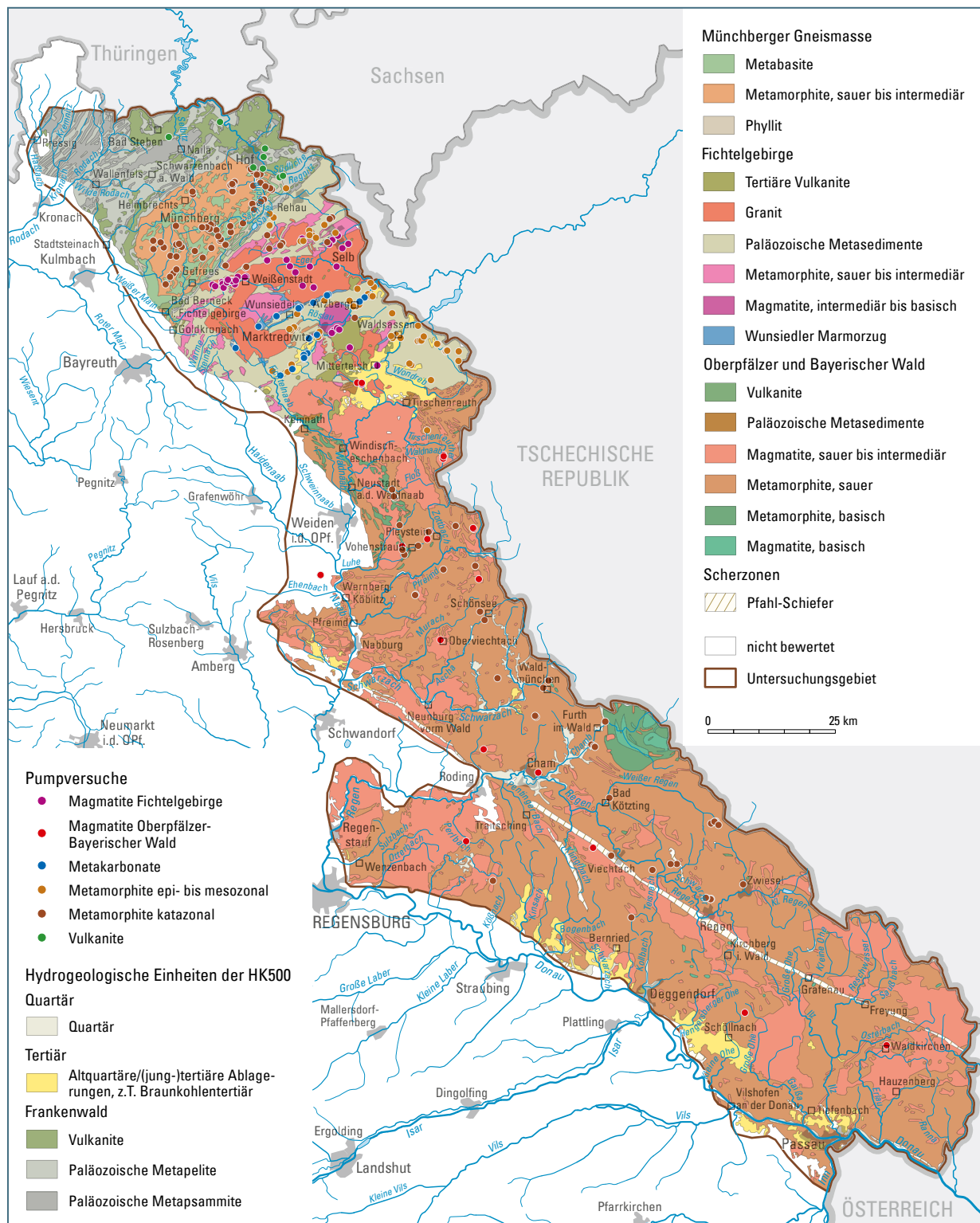


Abb. 6-1: Lage der ausgewerteten Pumpversuche differenziert nach hydrogeologischen Einheiten (n = 267).

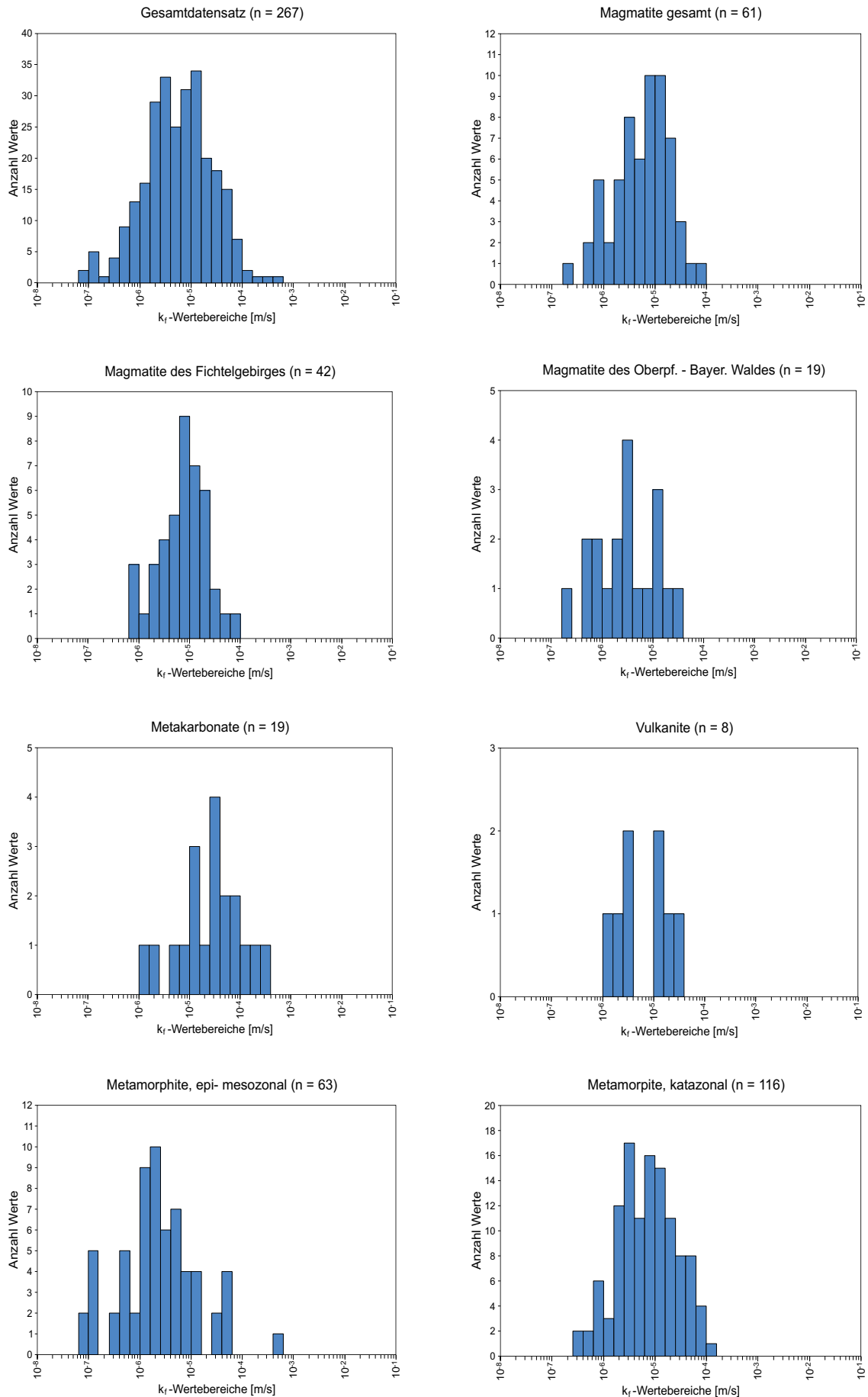


Abb. 6-2: Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f-Werte) wichtiger hydrogeologischer Einheiten im Untersuchungsgebiet.

Tab. 6-2: Statistische Kennwerte der Auswertung von Durchlässigkeitsbeiwerten

	Magmatite gesamt		Magmatite Fichtelgebirge		Magmatite Oberpfälzer- Bayerischer Wald		Metamorphite katazonal	
	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]
Minimum	$2,2 \cdot 10^{-7}$	0,01	$8,5 \cdot 10^{-7}$	0,01	$2,2 \cdot 10^{-7}$	0,02	$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,01
10%-Quantil	$8,8 \cdot 10^{-7}$	0,04	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,07	$5,9 \cdot 10^{-7}$	0,04	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0,03
25%-Quantil	$2,6 \cdot 10^{-6}$	0,10	$4,1 \cdot 10^{-6}$	0,11	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0,07	$2,7 \cdot 10^{-6}$	0,08
Median	$8,0 \cdot 10^{-6}$	0,19	$8,9 \cdot 10^{-6}$	0,26	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,14	$7,6 \cdot 10^{-6}$	0,22
75%-Quantil	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,51	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,54	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,23	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,40
90%-Quantil	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,84	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,84	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,60	$4,3 \cdot 10^{-5}$	0,93
Maximum	$8,7 \cdot 10^{-5}$	1,15	$8,7 \cdot 10^{-5}$	1,15	$3,4 \cdot 10^{-5}$	0,96	$1,2 \cdot 10^{-4}$	2,07

	Metamorphite epi- bis mesozonal		Metakarbonate		Vulkanite		Gesamtdatensatz	
	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]	k_f - Wert [m/s]	Leistungs- Absenkungs- Quotient [l/(s·m)]
Minimum	$6,6 \cdot 10^{-8}$	0,01	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,11	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0,02	$6,6 \cdot 10^{-8}$	0,01
10%-Quantil	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,03	$4,6 \cdot 10^{-6}$	0,33	$1,9 \cdot 10^{-6}$	0,02	$8,8 \cdot 10^{-7}$	0,03
25%-Quantil	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,07	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,90	$2,5 \cdot 10^{-6}$	0,04	$2,6 \cdot 10^{-6}$	0,10
Median	$2,1 \cdot 10^{-6}$	0,14	$3,2 \cdot 10^{-5}$	1,40	$6,8 \cdot 10^{-6}$	0,15	$5,9 \cdot 10^{-6}$	0,19
75%-Quantil	$6,2 \cdot 10^{-6}$	0,34	$5,7 \cdot 10^{-5}$	2,71	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,57	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,51
90%-Quantil	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,54	$1,6 \cdot 10^{-4}$	7,95	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,82	$3,8 \cdot 10^{-5}$	1,10
Maximum	$5,1 \cdot 10^{-4}$	4,17	$3,5 \cdot 10^{-4}$	53,73	$2,9 \cdot 10^{-5}$	0,92	$5,1 \cdot 10^{-4}$	53,73

rischen Waldes, so zeigen letztere eine schwache Tendenz zu geringeren Durchlässigkeiten. Der Unterschied der Medianwerte liegt hier in etwa bei einer halben Größenordnung.

Die Einheit der epi- bis mesozonalen Metamorphite weist etwas niedrigere Durchlässigkeiten als die hochmetamorphen Gesteine auf. Hier liegt der Median-Wert mit $2,1 \cdot 10^{-6}$ m/s etwa eine halbe Größenordnung unterhalb der Werte, die für die Magmatite des Fichtelgebirges, die katazonalen Metamorphite und die Vulkanite ermittelt wurden. Die Spannweite zwischen dem 10 %- und 90 %-Quantil ist dagegen relativ groß und erreicht am oberen Ende der Verteilung Werte, die mit den anderen Einheiten vergleichbar sind. Diese große Schwankungsbreite ist vermutlich mit der heterogenen Lithologie sowie den verschiedenen Metamorphosegraden, die diese Einheit umfasst, zu begründen. So reicht das Inventar der Gesteinsarten von schwach metamorph überprägten Tonschiefern und Phylliten über Quarzite bis hin zu Glimmerschiefern. Dabei können vor allem bei niedrigen Metamorphosegraden quellfähige Tonminerale die Gebirgsdurchlässigkeit reduzieren.

Diese Ergebnisse zu den Durchlässigkeiten weisen Ähnlichkeiten zu den in KRASNY (2002) angegebenen Werten für das östlich angrenzende tschechische Moldanubikum auf. KRASNY (2002) errechnete aus den spezifischen Ergiebigkeiten bzw. Leistungs-Absenkungs-Quotienten von Pumpversuchen einen so genannten Transmissivitätsindex Y' ($Y' = \log 10^6 \cdot q$, wobei q die spezifische Ergiebigkeit bzw. den Leistungs-Absenkungs-Quotienten darstellt) und unterteilte die daraus entstandene Wertespanne in fünf Transmissivitätsklassen von V (sehr niedrig) bis I (sehr hoch). Die Spannweiten der Ergebnisse der Pumpversuchsauswertungen im vorliegenden Bericht (vgl. Abb. 6-5) und in KRASNY (2002) stimmen weitgehend überein, wobei die Mittelwerte von Durchlässigkeiten in karbonatfreien kristallinen Gesteinen um mehr als eine halbe Größenordnung differieren (diese Studie: $Y' = 5,2$ = Transmissivitätsklasse III, KRASNY (2002): $Y' = \text{ca. } 4,5$ = Transmissivitätsklasse IV).

Ähnlich verhält es sich bei den Spannweiten der Durchlässigkeiten von Metakarbonaten (diese Studie: $Y' = 6,2$ = Transmissivitätsklasse II, KRASNY (2002): $Y' = \text{ca. } 5,2$ = Transmissivitätsklasse III), wobei hier die Mittelwerte um eine Größenordnung auseinander liegen.

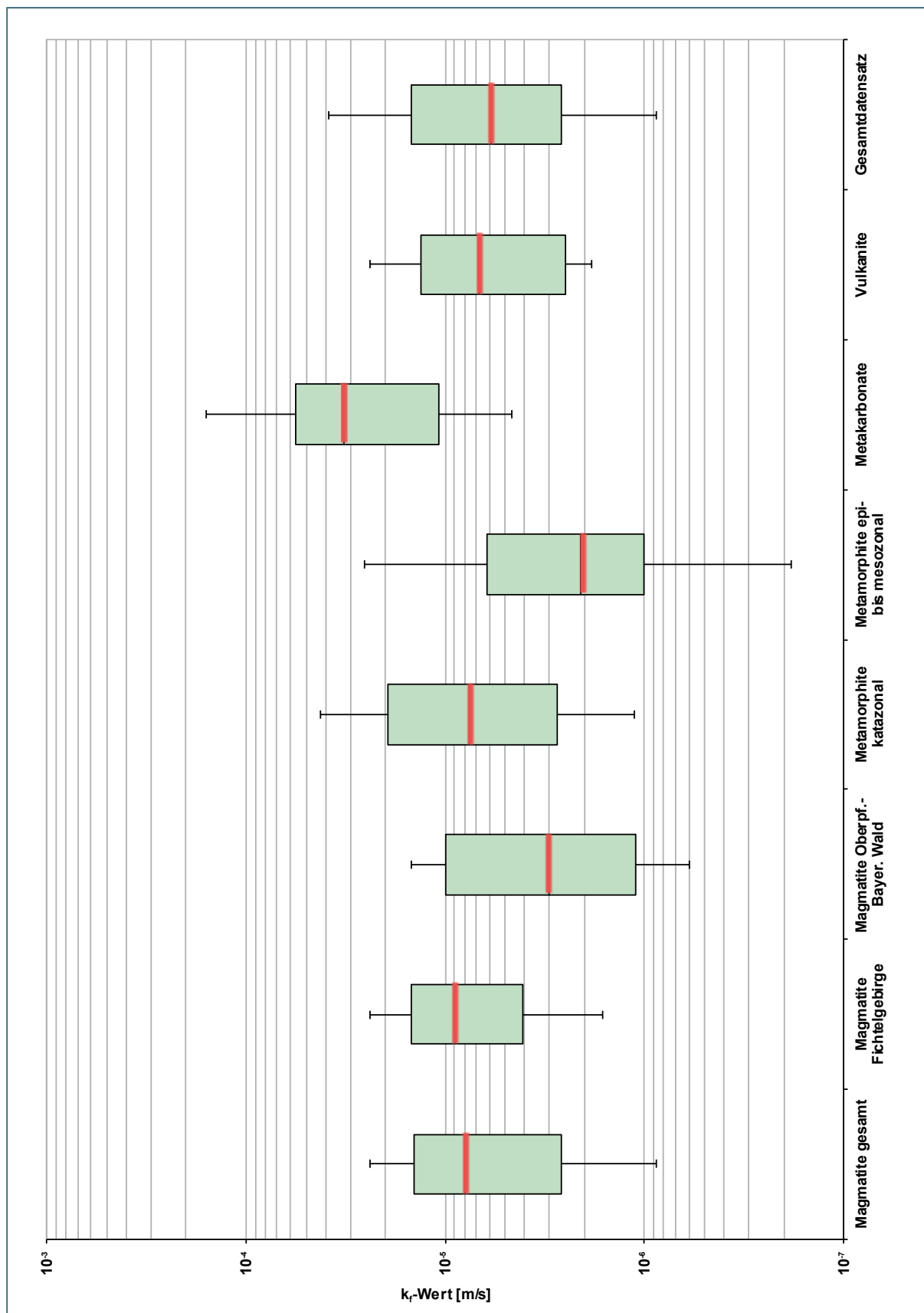


Abb. 6-3: Vergleich der Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) wichtiger hydrogeologischer Einheiten im Untersuchungsgebiet.

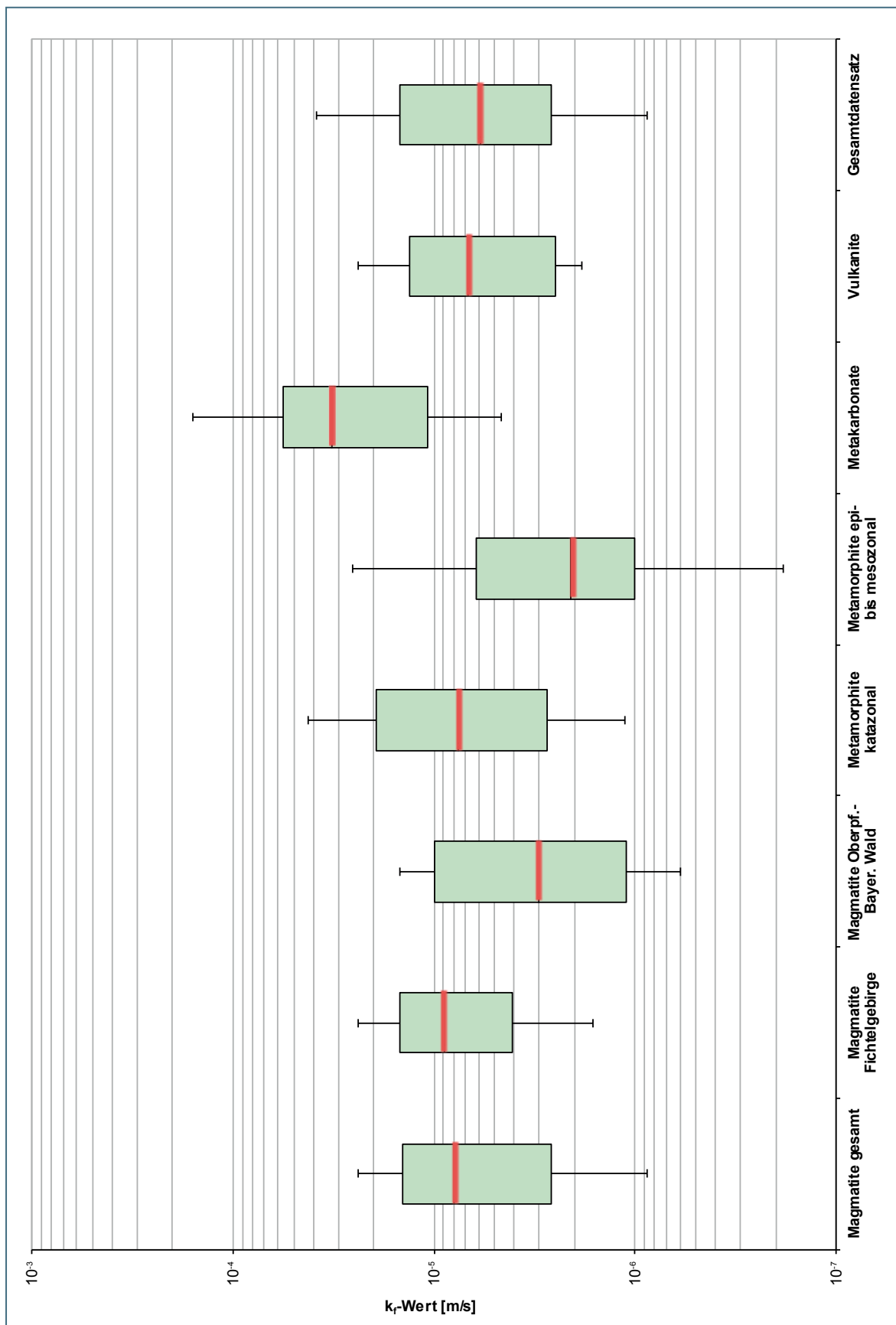


Abb. 6-4: Vergleich der Verteilung der Leistungs-Absenkungs-Quotienten bzw. spezifischen Ergiebigkeiten wichtiger hydrogeologischer Einheiten im Untersuchungsgebiet.

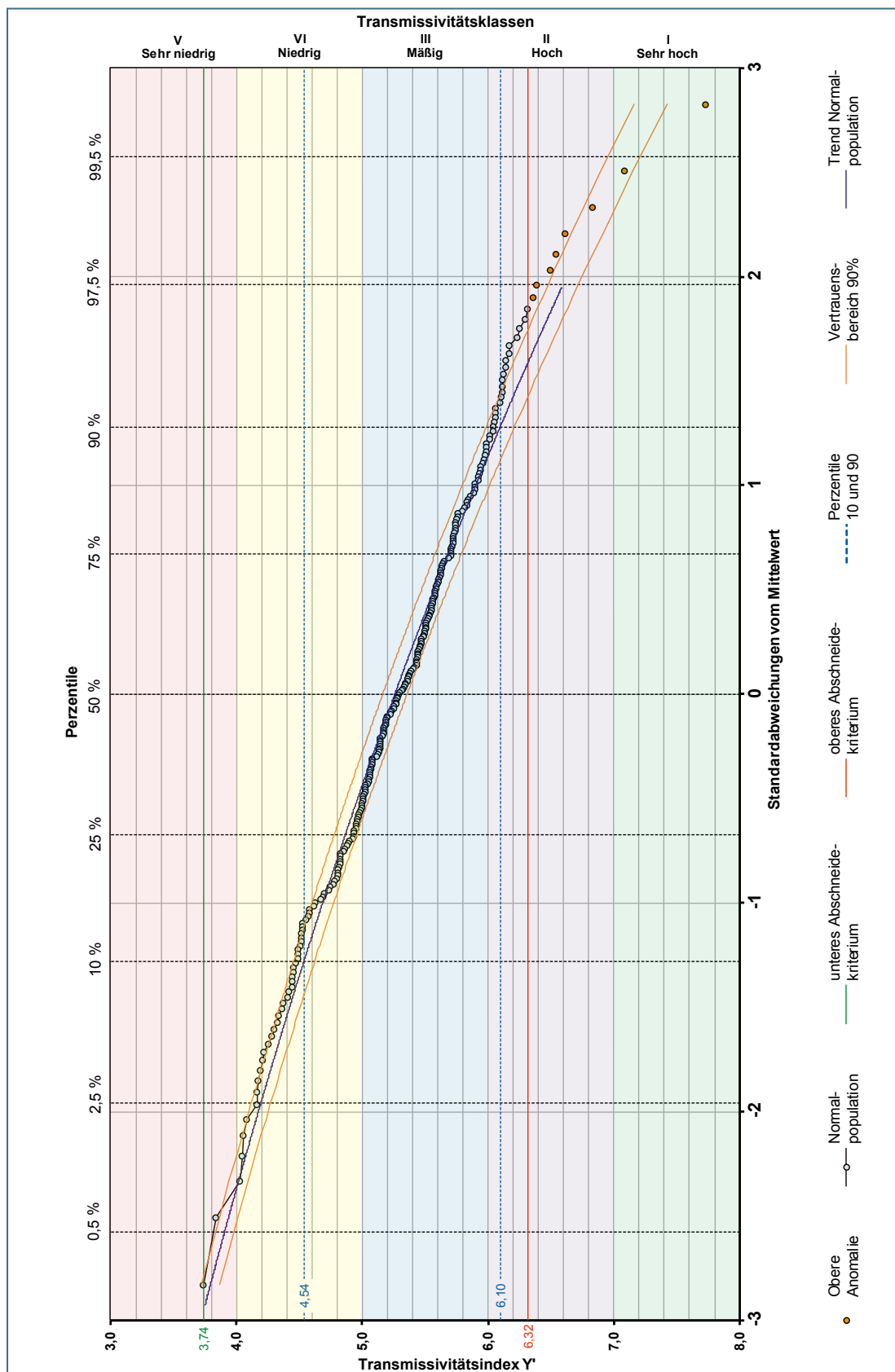


Abb. 6-5: Häufigkeitsverteilung und Klassifikation der Transmissivitätsindizes nach KRASNY (2002). Transmissivitätsindex $Y' = \log 10^6 \cdot q$, wobei q = spezifische Ergiebigkeit bzw. Leistungs-Absenkungs-Quotient $[l/(s \cdot m)]$. Werte in den Transmissivitätsklassen I und II sind hauptsächlich auf Pumpversuche in den Metakarbonaten des Wunsiedler Marmorzuges zurückzuführen.

7 Geologische Strukturen und Grundwasserführung

Im gesamten Untersuchungsgebiet wurden für insgesamt 282 Objekte mit Ausbautiefen zwischen 12 und 263 m hydraulische Kennwerte aus Pumpversuchen errechnet und die Raumlage dieser Brunnen im Hinblick auf ihre Nähe zu topografischen Lineamenten untersucht.

Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 zeigen die räumlichen Abhängigkeiten zwischen den errechneten Durchlässigkeitsbeiwerten bzw. den Leistungs-Absenkungs-Quotienten der einzelnen Brunnen zu den nächstgelegenen kartierten topografischen Lineamenten in Form von Grafiken, die die kürzeste Entfernung der jeweiligen Objekte zum nächstgelegenen kartierten Lineament darstellen. Dies erlaubt eine semiempirische Ableitung, in welchem Umfang sich die geologischen Strukturen auf die Grundwasserführung auswirken.

Bei der Auswertung dieser Diagramme zeigte sich, dass für die Einheit der Metakarbonate keine solche Abhängigkeit der Grundwasserförderung von der Lage zu den Lineamenten besteht. Hier wird die Grundwasserführung offensichtlich wesentlich von den Gesteinseigenschaften mit ihrer Verkarstungstendenz bestimmt. Dabei werden k_f -Werte bis zu $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s und Leistungs-Absenkungs-Quotienten bis zu 54 l/(s·m) erreicht. Die drei Werte für diese Einheit, die über $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s bzw. 5 l/(s·m) hinausgehen, sind aus darstellerischen Gründen in diesen Diagrammen nicht abgebildet.

Die beiden Diagramme zeigen einen deutlichen Abfall von k_f -Werten und Leistungs-Absenkungs-Quotienten mit zunehmendem Abstand von einem topografischen Lineament. Dabei ist festzustellen, dass Objekte mit geringen bis sehr geringen Durchlässigkeiten bzw. Ergiebigkeiten keinerlei räumliche Abhängigkeiten zu Lineamenten zeigen. Dagegen fällt eine starke Abnahme von hohen Durchlässigkeiten bzw. Ergiebigkeiten mit zunehmendem Abstand von einem Lineament auf.

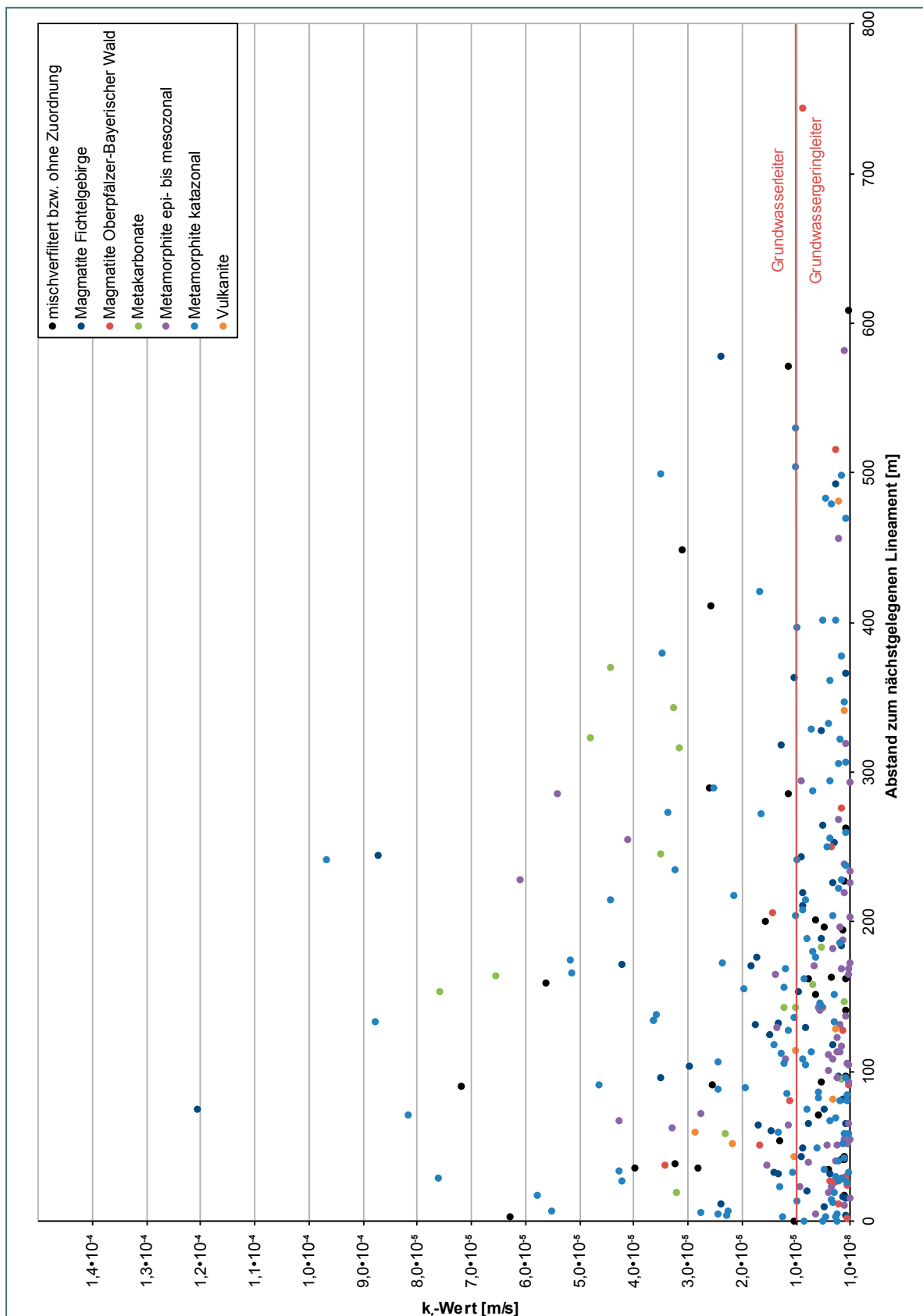


Abb. 7-1: Verhältnis von k_f -Werten zu Abständen zum nächstgelegenen topografischen Lineament. Während niedrige Durchlässigkeiten bei Brunnen jeden Abstands vorkommen können, konzentrieren sich höhere Durchlässigkeiten im Nahbereich der Lineamente (n = 282).

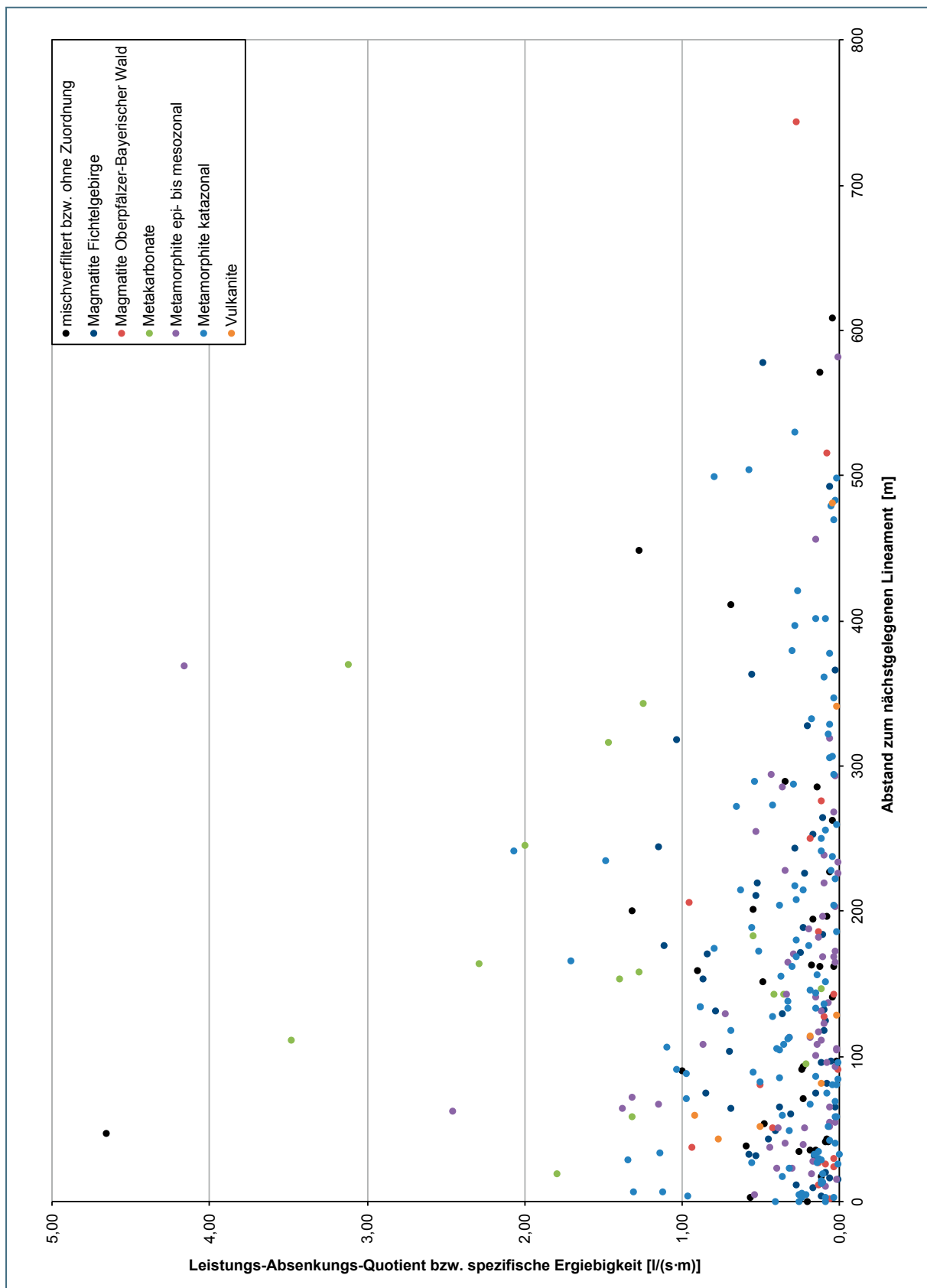


Abb. 7-2: Verhältnis von Leistungs-Absenkungs-Quotienten zu Abständen zum nächstgelegenen topographischen Lineament. Während niedrige Ergiebigkeiten bei Brunnen jeden Abstands vorkommen können, konzentrieren sich höhere Ergiebigkeiten im Nahbereich der Lineamente (n = 282).

8 Tiefenabhängigkeit von Gebirgsdurchlässigkeiten

Gesamtdatensatz

Zur Ermittlung der Tiefenabhängigkeit der Gebirgsdurchlässigkeiten wurden für das oben beschriebene Inventar an Pumpversuchen die jeweiligen Ausbautiefen bzw. Endteufen (für den Fall, dass die Ausbautiefen nicht bekannt sind) den berechneten k_F -Werten (Abb. 8-1) und Leistungs-Absenkungs-Quotienten (Abb. 8-2) gegenübergestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Art der Darstellung lediglich Näherungscharakter besitzen kann, da sich in kristallinen Kluftgrundwasserleitern die Wasserzutritte in Brunnen nicht gleichmäßig über die gesamte Filterstrecke verteilen, sondern über lokal begrenzte Wegsamkeiten wie Klüfte oder Störungen erfolgen. In der Realität variiert somit die Durchlässigkeit über die gesamte Filterstrecke eines Brunnens von effektiv 0 bis $>1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Der beim Pumpversuch ermittelte k_F -Wert integriert diesen Wertebereich für das untersuchte Tiefenintervall. Weiterhin setzt diese Art der Darstellung voraus, dass auch in den tieferen Bereichen der jeweiligen Brunnen noch Wasserzutritte erfolgen und die Vorgehensweise, ein tiefes Bohrloch als Pufferspeicher für gering schüttende oberflächennahe Wasserzutritte zu nutzen, beim vorliegenden Datensatz statistisch nicht in Erscheinung tritt. Messtechnisch kann die Lage von diskreten Wasserzutritten in Brunnen nur über Flowmeter-Untersuchungen nachgewiesen werden, die für die wenigsten Bohrungen existieren.

ZEITLHÖFLER (2007) wertete diesbezüglich 11 Flowmeter-Befahrungen von Brunnen der öffentlichen Wasserversorgung im zentralen Bayerischen Wald mit Ausbautiefen zwischen 47 und 64 m unter Gelände aus. Beim Vergleich der Ausbautiefen mit den Tiefenlagen der untersten Wasserzutritte zeigte sich, dass sich die Zutritte auf zwischen knapp 40 und 100 % der Filterstrecken verteilen. Bei mehr als der Hälfte der Brunnen teilen sich die Zutritte auf > 90 % der Filterstrecke auf. Dabei war zu beobachten, dass der Hauptanteil des zufließenden Grundwassers oberhalb von etwa 25 bis 30 m unter Gelände liegt, vereinzelt aber auch in tieferen Bereichen der Filterstrecken noch starke Wasserzutritte zu verzeichnen sind.

Bei der Betrachtung von Abbildung 8-1 fallen zunächst zwei Anomalien auf. Im Wertebereich um $1 \cdot 10^{-7}$ m/s liegen mehrere Brunnen mit Ausbautiefen zwischen 215 und 263 m. Diese liegen am Südrand des Fichtelgebirges und werden für balneologische Zwecke bzw. zur Abfüllung von Mineralwasser genutzt. Bei dieser Verwendung ist das Abteufen solch tiefer Bohrungen mit verhältnismäßig geringen Schüttungen wirtschaftlich rentabel. Für kommunale Wasserversorgungen oder auch privatwirtschaftlich genutzte Betriebsbrunnen wird im Grundgebirge kein Grundwasser mit Fördermengen von in der Regel < 2 l/s aus diesen Tiefen gefördert, woraus sich die nur spärlich vorhandenen Daten aus dem Tiefenintervall $> \text{ca. } 150$ m erklären. Dennoch ist auch bei den relativ wenigen Datenpunkten mit zunehmender Tiefe eine deutliche Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit erkennbar, wobei das Gebirge unterhalb 100 m u. GOK keineswegs als undurchlässig angesehen werden kann.

Die zweite Anomalie stellen die relativ stark streuenden Durchlässigkeiten der Metakarbonate dar. Diese liegen zwischen ca. $1 \cdot 10^{-6}$ und $3 \cdot 10^{-4}$ m/s wobei die höchsten k_F -Werte in den tiefsten Brunnen mit Ausbautiefen von ca. 170 m ermittelt wurden. Für den Gesamtdatensatz der Durchlässigkeiten in Metakarbonaten konnte keine Tiefenabhängigkeit festgestellt werden. Hier überwiegen lithologische Effekte wie Verkarstungserscheinungen, die auch in größeren Tiefen auftreten können.

Werden die Metakarbonate nicht berücksichtigt, so zeigt sich bei der semilogarithmischen Darstellung der k_F -Werte in Abbildung 8-1 eine kontinuierliche Abnahme hoher Durchlässigkeiten im Werte-

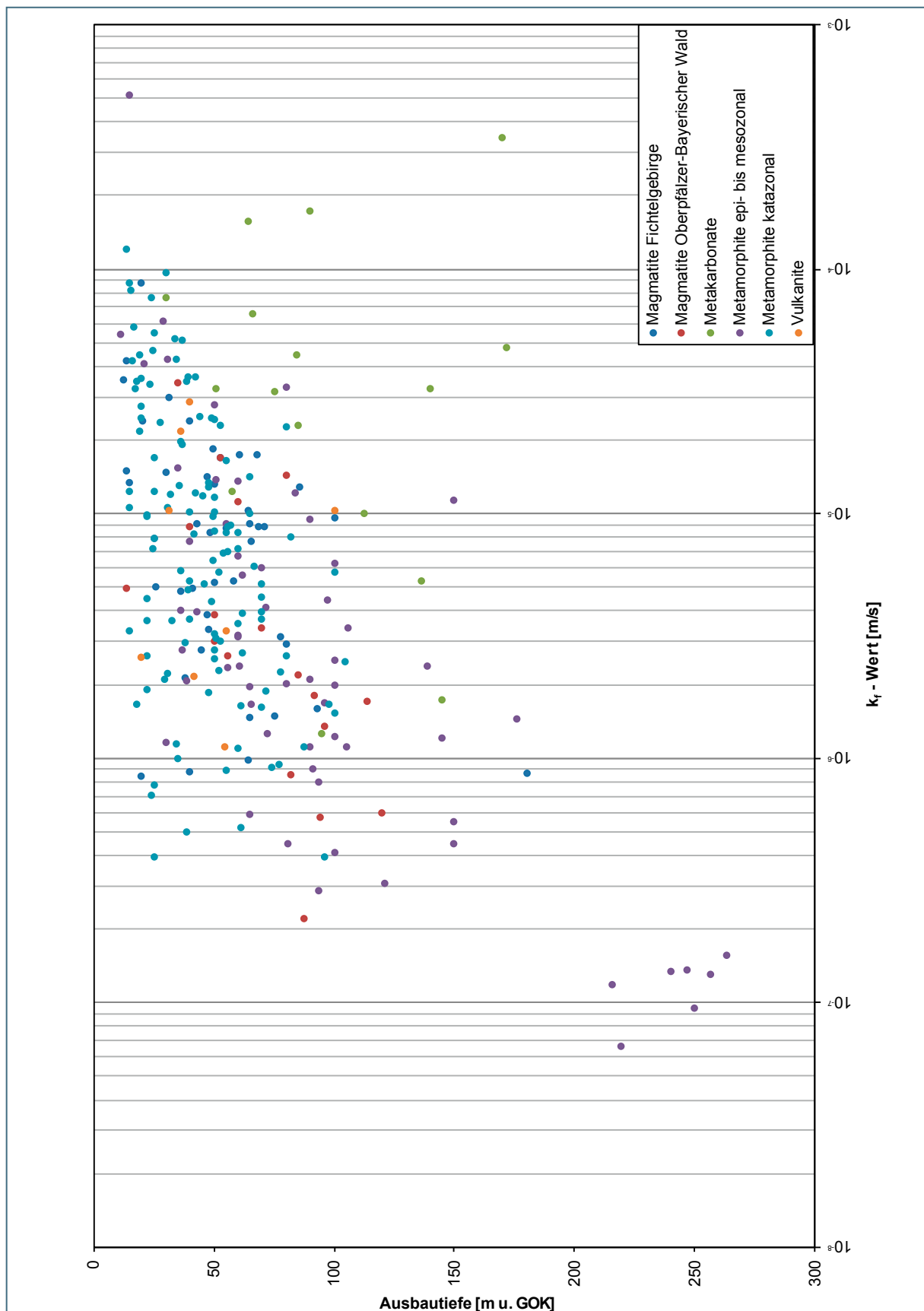


Abb. 8-1: Verhältnis der Durchlässigkeitsbeiwerte zur Bohrtiefe der untersuchten Wasserfassungen (n = 267)

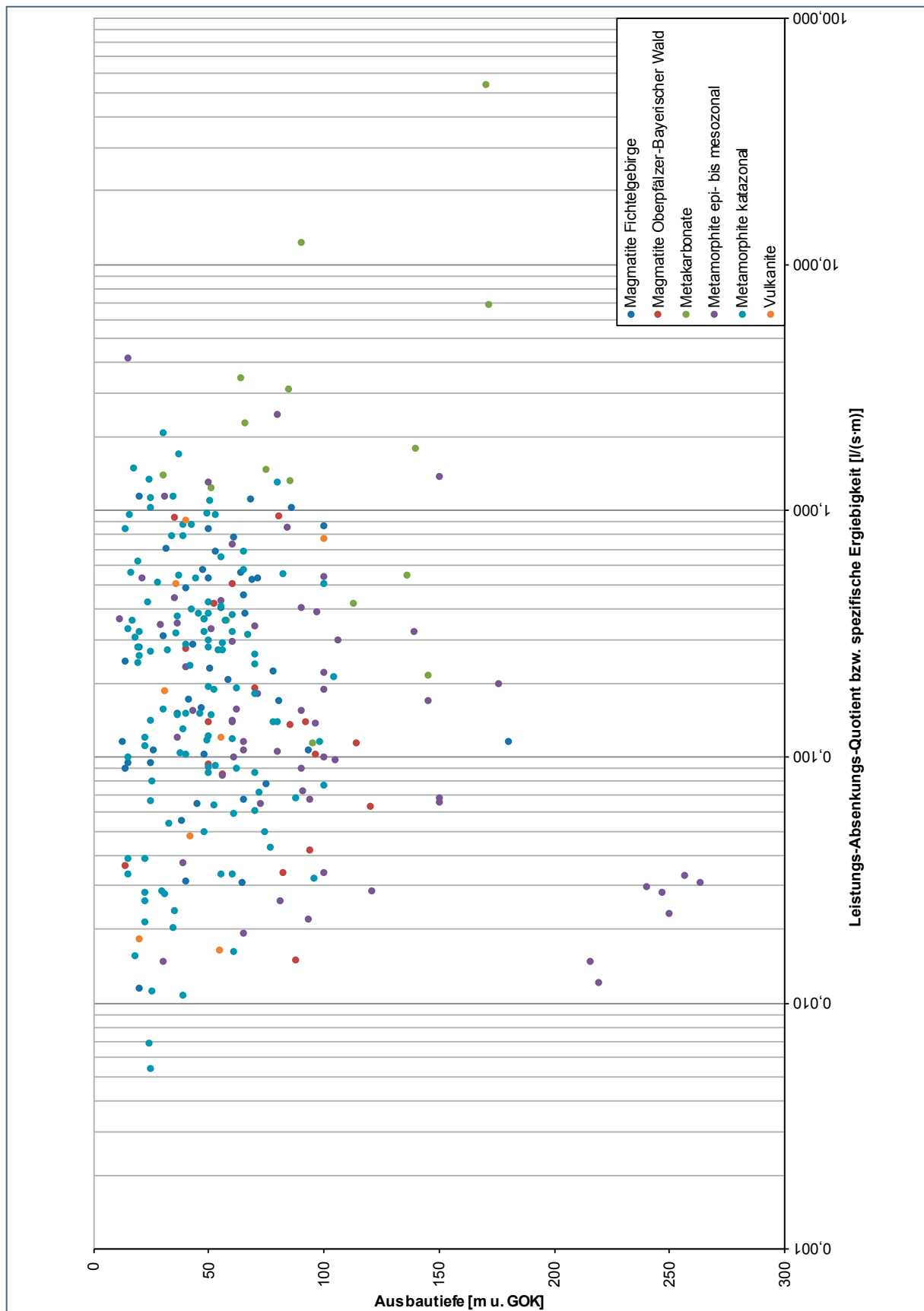


Abb. 8-2: Verhältnis der spezifischen Ergiebigkeiten bzw. Leistungs-Absenkungs-Quotienten zur Bohrtiefe der untersuchten Wasserfassungen (n = 267)

bereich zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $5 \cdot 10^{-4}$ m/s mit zunehmender Tiefe bis etwa 100 m unter Gelände, wobei geringe Durchlässigkeiten in jedem Tiefenintervall vorkommen können, während höhere Durchlässigkeiten vorwiegend auf geringere Tiefen beschränkt sind. Unterhalb von 100 m verläuft die weitere Verteilung der k_f -Werte zunächst ohne erkennbaren Trend in der Wertespanne zwischen ca. $3 \cdot 10^{-7}$ und $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Für das Tiefenintervall zwischen 150 und 215 m u. GOK liegen kaum Datenpunkte vor, sodass die weitere Entwicklung der Durchlässigkeiten in diesem Bereich nicht belegt ist. Es kann aber von einer Tendenz zu geringeren k_f -Werten ausgegangen werden.

Da in größeren Tiefen eine engständige Kleinzerklüftung in der Regel nicht mehr existiert, konzentriert sich der Grundwasserfluss auf wenige, lang aushaltende Großklüfte und Störungen. Die Wahrscheinlichkeit, diese mit einer Bohrung anzutreffen, ist im Vergleich zu Bohrungen im stärker geklüfteten oberflächennahen Bereich stark reduziert, vor allem, wenn diese Strukturen steil bis senkrecht einfallen. Die geringere Grundwasserhöflichkeit in Tiefbohrungen > 100 m ist in erster Linie diesem Umstand geschuldet. Wird aber eine größere Grundwasser führende Kluft oder Störung angefahren, so können auch dort verhältnismäßig große Entnahmemengen erreicht werden, die bei der Auswertung von Pumpversuchen an solch einem Brunnen zu relativ hohen k_f -Werten für das gesamte erschlossene Tiefenintervall führen.

Abbildung 8-2 zeigt das Verhältnis zwischen Ausbautiefe und Leistungs-Absenkungs-Quotienten bzw. spezifischer Ergiebigkeit. Auch hier treten die Mineral- und Heilwasserbrunnen des südlichen Fichtelgebirges und die in den Metakarbonaten ausgebauten Brunnen als eigenständige Punktwolken in Erscheinung. Der übrige Datensatz zeigt hingegen im Vergleich zur Verteilung der k_f -Werte eine eher heterogene Verteilung.

Vor allem der oberflächennahe Bereich bis ca. 50 m u. GOK weist eine sehr weite Wertespanne von ca. 0,005 bis $4 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ auf, die sich mit zunehmender Tiefe bis auf etwa 180 m in den Bereich von 0,1 bis $0,2 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ verjüngt. Da die spezifische Ergiebigkeit bzw. der Leistungs-Absenkungs-Quotient auch von der Art und Größe des Brunnenausbaus beeinflusst werden, erklären sich die relativ geringen Werte im Tiefenintervall bis 50 m in erster Linie dadurch, dass flachere Brunnen in der Regel mit geringeren Durchmessern ausgebaut werden und deren Ergiebigkeit dadurch entsprechend geringer ausfällt. Wird dieser Effekt berücksichtigt, so zeigt sich auch bei diesem Parameter eine tendenzielle Abnahme der Werte mit zunehmender Tiefe.

Wie bereits erwähnt, unterliegt die Korrelation hydraulischer Kennwerte mit den Ausbautiefen von Brunnen in kristallinen Kluftgrundwasserleitern gewissen Einschränkungen, da in diesen weder homogene noch isotrope Verhältnisse vorherrschen und die Gebirgsdurchlässigkeiten im Verlauf der jeweiligen Filterstrecken um mehrere Größenordnungen variieren. Auch die Grundwassermächtigkeit fließt zu einem gewissen Grad in die Berechnungen ein. Da diese in der Regel nicht bekannt ist, wurde sie behelfsweise mit den Ausbautiefen der Brunnen gleichgesetzt, wodurch ebenfalls Ungenauigkeiten bei der Auswertung entstehen. In der nachfolgend beschriebenen Fallstudie werden diese Einschränkungen weitgehend eliminiert, da lediglich kurze Gebirgsabschnitte mit Hydraulikpackern abgedichtet und auf ihre Durchlässigkeit untersucht wurden.

Fallstudie: Hydraulische Versuche im südlichen Passauer Wald

Im Rahmen von Erkundungsbohrungen im Grundgebirge südlich von Passau wurden an 22 Bohrungen mit Bohrlängen zwischen 30 und 550 m mit Hilfe von insgesamt 86 Einzel- und Doppelpacker-WD-Versuchen k_f -Werte zwischen $5,7 \cdot 10^{-14}$ und $2,8 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt. Als Versuchsmethodik kamen entweder modifizierte Lugeon-Tests mit verlängerter erster Druckstufe (FISCH & ZIEGLER, 2001) oder klassische Verfahren wie Pulse-, Slug- oder Drill Stem-Tests zum Einsatz, die anhand verschiedener Typkurvenverfahren (z. B. COOPER et al., 1967) ausgewertet wurden. Die dabei mit Doppelpackern untersuchten Gebirgsintervalle wiesen Mächtigkeiten zwischen 4 und 12 m auf.

Die Bohrungen erschlossen einerseits mylonitisierte Granite und hochmetamorphe Mylonitgneise, andererseits eine bunte Abfolge aus Gneisen, Diatexiten, Granitgängen, Kalksilikatfelsen, geringmächtigen Marmorlagen und Amphibolitgängen. Letztere sind in weiten Bereichen kataklastisch überprägt und von bruchhaften Störungen durchzogen. Vor allem entlang dieser Störungen sowie in den karbonatischen Lithologien wurden die höchsten Durchlässigkeiten ermittelt.

Vereinzelte Kataklastezonen im ungestörten Gesteinsverband auch geringe bis sehr geringe Durchlässigkeiten auf. Im Rahmen von Bohrarbeiten wurden diese Bereiche in zahlreichen Fällen stark aufgelockert und es kam zu Bohrkernverlusten. Bei der Bohrkernansprache wurden diese dann oftmals als durchlässige Wasserwegsamkeiten fehlinterpretiert. Erst die in-situ hydraulischen Versuche zeigten dann, dass auch nicht durch Bohrungen gestörte Kataklastezonen oftmals keine höheren k_f -Werte als das Rahmengestein aufweisen.

In Abbildung 8-3 werden die Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von der Messtiefe dargestellt. Da einige Bohrungen schräg bzw. fast horizontal in einen Steilhang abgeteuft wurden, wurde die am jeweiligen Messpunkt überlagernde Gebirgsüberdeckung anhand eines digitalen Geländemodells ermittelt. Daraus ergaben sich Messtiefen zwischen 13 und 260 m u. GOK.

Inwieweit sich der Trend einer weitgehend unveränderten Verteilung der Durchlässigkeiten in größere Tiefen hin fortsetzt ist schwer zu sagen, da hierfür nur wenige Daten vorliegen. So wurde z. B. bei einem Langzeit-Pumpversuch an der KTB-Vorbohrung in 4 km Tiefe eine Permeabilität von etwa $2 \cdot 10^{-15}$ m² ermittelt (ERZINGER et al. 2004), was bei normal mineralisiertem Grundwasser einem k_f -Wert von etwa $2 \cdot 10^{-8}$ m/s entspricht – ein Wert der im Bereich des Medians der im südlichen Passauer Wald bis über 260 m Tiefe ermittelten k_f -Werte (Abb. 8-3) liegt.

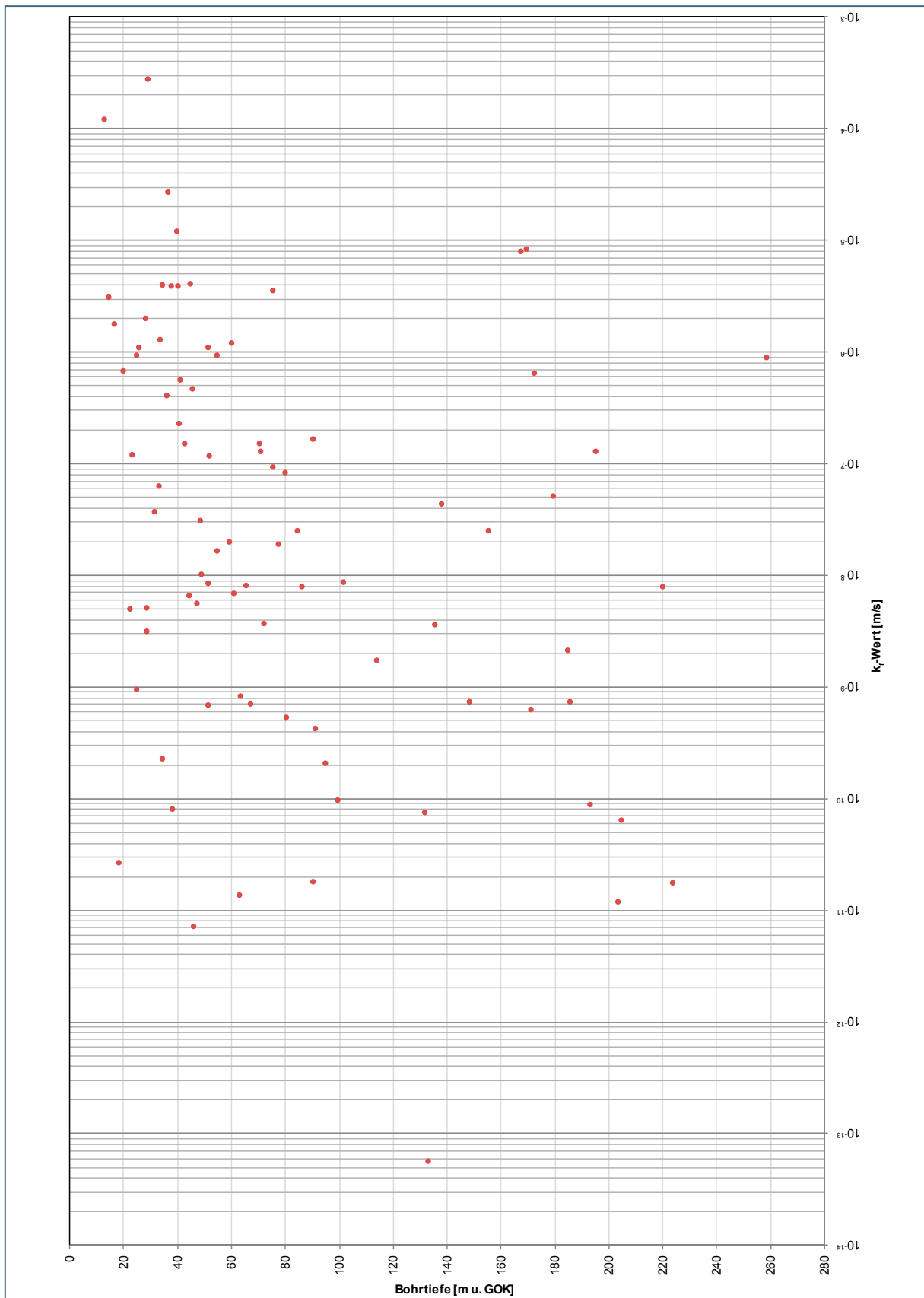


Abb. 8-3: Verhältnis der Kluftdurchlässigkeit zur Bohrtiefe im südlichen Passauer Wald, ermittelt aus Packerversuchen (86 Versuche in 22 Bohrungen).

9 Schlussfolgerungen

Die Lineamentdichte ist im gesamten ostbayerischen Grundgebirge flächendeckend hoch. Dies bedeutet, dass das Kristallin durchgehend bruchtektonisch beansprucht ist, wobei in der nördlichen Oberpfalz, dem Fichtelgebirge sowie Teilen der Münchberger Gneismasse und dem Frankenwald die höchsten Dichten zu finden sind. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich in der Egergrabentektonik sowie den verstärkt im Bereich des Frankenwaldes und der Münchberger Gneismasse zusätzlich zum NW–SE-Streichen auftretenden NE–SW verlaufenden Strukturen zu suchen. Im Teilraum Oberpfälzer-Bayerischer Wald werden hingegen vorwiegend die variskischen NW–SE streichenden Großstrukturen und nur untergeordnet N–S verlaufende Brüche reliefbildnerisch wirksam. Auch in granitischen Lithologien liegt die Lineamentdichte tendenziell höher.

Die lokal vorherrschenden Klufrichtungen weisen in der Regel sowohl Bezüge zu den in der jeweiligen Region vorherrschenden Lineamenten als auch zu den kartierten Störungen auf, wobei vor allem zwischen den relativen Häufigkeiten der eingemessenen Trennflächen und den längenmäßig dominanten Lineamenten in der Umgebung vereinzelt Diskrepanzen zu beobachten sind. Dies liegt teilweise in der meist nicht standardisierten Messmethodik bei der Erfassung des Trennflächengefüges (z. B. Über- oder Unterrepräsentation einzelner Kluftscharen aufgrund der Exposition von Felsaufschlüssen) sowie in zu kleinen Datensätzen lokaler Klufrichtungen begründet. Auch der Betrachtungsmaßstab bei der geostatistischen Auswertung der kartierten Lineamente beeinflusst den Grad der Übereinstimmung zwischen Lineament- und Trennflächenrichtungen.

Die Wasserwegsamkeiten im Grundgebirge weisen eine deutliche Korrelation mit Störungen dahingehend auf, dass die Bereiche höherer Durchlässigkeiten an die Nähe zu Lineamenten gebunden sind. Der in DIEPOLDER et al. (2011) gezeigte Zusammenhang von hohen Durchlässigkeiten und der Nähe zu Lineamenten bestätigt sich damit für den hier größeren Datensatz des gesamten Grundgebirges.

In Bezug auf die Differenzierung der hydrogeologischen Haupteinheiten zeigt sich für die Magmatite des Fichtelgebirges, die katazonalen Metamorphite und die Vulkanite eine recht ähnliche weitgehend lognormale Verteilung der k_f -Werte, die weitgehend der rangkorrelativen Verteilung des Gesamtdatensatzes entspricht. Erkennbare Abweichungen von diesen Werten gibt es nach unten für die Magmatite des Oberpfälzer-Bayerischen Waldes sowie die epi- bis mesozonalen Metamorphite und nach oben für die Metakarbonate. Vor allem die epi- bis mesozonalen Metamorphite zeigen einen sehr breiten Wertebereich, dessen unteres Ende sich an Durchlässigkeiten von $1 \cdot 10^{-7}$ m/s annähert. Da diese Haupteinheit ein sehr weites Spektrum an Metamorphosegraden vom schwach überprägten Tonstein bis zum „Epigneis“ zusammenfasst, ist auch die Schwankungsbreite der Durchlässigkeiten relativ hoch. Kleine k_f -Werte können dabei auf quellfähige Tonminerale bei niedrigmetamorphen Tonsteinen zurückzuführen sein.

Bei den hohen Durchlässigkeiten der Metakarbonate spielt das Trennflächengefüge nur eine untergeordnete Rolle. Zwar setzen Verwitterungsprozesse zunächst verstärkt an Klüften und Störungen an, deren Aufweitung durch chemische Lösungsvorgänge und die damit verbundene Erhöhung der k_f -Werte ist aber eine Funktion der lithologischen Eigenschaften.

Im untersuchten Rahmen konnte nur eine schwache Abhängigkeit der Durchlässigkeiten von der Bohrtiefe festgestellt werden, die sich vor allem auf das obere Ende des Wertebereiches bezieht. Dies bedeutet, dass sich die vorhandenen Trennflächen bis in größere Tiefen auf die Wasserwegsamkeit des Gebirges auswirken. Besonders hohe Werte $> 1 \cdot 10^{-5}$ m/s werden bevorzugt in geringen Tiefenbereichen < 50 m angetroffen und zeigen den Einfluss der oberen Verwitterungszone.

Mit Ausnahme von Brunnen, die in die Metakarbonate abgeteuft wurden, sind unterhalb von 100 m praktisch keine k_f -Werte $> 1 \cdot 10^{-5}$ m/s zu finden. Dies gilt sowohl für die Korrelation von Durchlässigkeiten mit den Ausbautiefen der Brunnen im Untersuchungsgebiet als auch für die tiefenorientierte Ermittlung von k_f -Werten mittels Packerversuchen im Passauer Wald.

Die im Passauer Wald untersuchten Bohrungen reichen bis in eine Tiefe von ca. 260 m. Eine Teufenlage, unterhalb derer das Grundgebirge als undurchlässig für Grundwasser angesehen werden kann, ist nach derzeitigen Erkenntnissen – auch hinsichtlich größerer Tiefenlagen > 1000 m – nicht absehbar und u. U. nicht gegeben, was auch der im Rahmen der KTB Vorbohrung in 4 km Tiefe durchgeführte Pumpversuch andeutet. Der daraus abgeschätzte k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-8}$ m/s liegt im Bereich des Medians der im südlichen Passauer Wald bis über 260 m Tiefe ermittelten Durchlässigkeiten.

Bei der Betrachtung der vorliegenden Ergebnisse darf nicht außer Acht gelassen werden, dass der untersuchte Datensatz (mit Ausnahme der Fallstudie Passauer Wald) ausschließlich Brunnen und Grundwassermessstellen enthält, deren Ergiebigkeit einen Ausbau als Wasserefassung gerechtfertigt hat. Bohrungen, in denen kein oder nur sehr wenig Wasser angetroffen wurde, werden in der Regel wieder verfüllt und tauchen somit nicht in der Datenbank auf. Dahingehend sind geringe bis sehr geringe Durchlässigkeiten vermutlich in der vorliegenden Studie unterrepräsentiert.

Dennoch zeigen die hier vorgestellten Ergebnisse, dass auch in dem häufig als Grundwassermangelgebiet angesehenen ostbayerischen Grundgebirge eine nennenswerte Grundwasserförderung aus Bohrbrunnen möglich ist, wobei eine zusätzliche Berücksichtigung der struktureologischen Verhältnisse bei der Festlegung der Bohrpunkte die Chance auf ergiebigere Brunnen erhöht. Ein jüngstes Beispiel ist die im Jahr 2013 abgeteufte Thermalwasserbohrung Weißenstadt, bei der neben einer relativ hohen Ergiebigkeit in den oberen 300 Metern noch in über 1000 m Tiefe Thermalwasser führende Klüfte erschlossen werden konnten (mündliche Mitteilung M. Piewak, Piewak & Partner, 2013).

10 Danksagung

Zum Gelingen dieser Studie trugen in nicht unerheblichem Maße mehrere Personen und Institutionen bei, denen an dieser Stelle recht herzlich gedankt sei. Frau Dr. Elena Galadí-Enríquez für die Bereitstellung ihres umfangreichen Inventars an Gefügemessungen aus dem Passauer Wald, Herrn Dr. Johann Rohrmüller für die wertvolle Unterstützung bei struktureologischen Fragestellungen und die Durchsicht des Manuskripts sowie Herrn Dr. Zbyněk Klose für die Unterstützung bei den GIS-Arbeiten.

11 Literatur

- AHNERT, F. (1999): Einführung in die Geomorphologie. – 440 S. Stuttgart (Ulmer).
- BARTON, C. C., LARSEN, E., PAGE, W. R., & HOWARD, T. M. (1993): Characterizing fractured rock for fluid-flow, geochemical, and paleostress modeling: Methods and preliminary results from Yucca Mountain, Nevada. – Denver, Colorado, United States Geological Survey.
- BÜTTNER, G., PAMER, R. & WAGNER, B. (2003): Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern. – GLA-Fachberichte, **20**: 88 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- COOPER, H. H., Jr., BREDEHOEFT, J. D. & PAPADOPULOS, S. S. (1967): Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water. – Water Resources Research, First Quarter 1967: 263–269.
- DIEPOLDER, G. W., KAINZMAIER, B., PUKOWIETZ, C., SPÖRLEIN, T., WAGNER, B., WILFERTH, T., ZEITLHÖFLER, M., BLOMENHOFER, A., BLUMENSTEIN, S. & ZOSEDER, K. (2011): Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 12 Donau-Wald. Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte 1 : 100 000. – 214 S., Augsburg (Bayer. Landesamt f. Umwelt).
- DIEPOLDER, G. W. & HEROLD, H. (2007): Mineral and Radon-rich Waters in Hardrock Terrains of Northeastern Bavaria. – in: MARQUES, J. M., CHAMBEL, A. & RIBERO, L. [eds.]: Proceedings of the Symposium on Thermal and Mineral Waters in Hard Rock Terrains. – Lisbon, Portugal, 21.-24. September 2007: 121–130, Aveiro (AIH-GP, International Association of Hydrogeologists – Portuguese Chapter).
- DIMROTH, E., SÖLLNER, K. & STETTNER, G. (1965): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000 Blatt 6038 Waldershof. – 129 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EISBACHER, G. H. (1991): Einführung in die Tektonik. – 1. Aufl.: 309 S. Stuttgart (Enke).
- ERZINGER, J., KÜMPEL, H.-J., RABBEL, W. & SHAPIRO, S. (2004): Energie- und Fluidtransport in kontinentalen Störsystemen: 1. Phase – Pumpversuch in der KTB Vorbohrung. – Poster zur FKPE-Sitzung, GeoZentrum an der KTB, 2.-3.09.2004, Windischeschenbach.
- FERRILL, D. A., WINTERLE, J., WITTMAYER, G., SIMS, D., COLTON, S. & ARMSTRONG, A. (1999): Stressed Rock Strains Groundwater at Yucca Mountain, Nevada. – GSA Today, **9**: 1-8.
- FISCH, H. R. & ZIEGLER, H. J. (2001): Alternatives Verfahren für die Durchführung von WD (Lugeon)-Tests. – Wasserwirtschaft, **91**: 7–8.
- GALADÍ-ENRÍQUEZ, E. (2006): Analyse hydrogeologisch relevanter Kluft- und Störungsflächen und Spannungsfelder im Fürstensteiner und Hauzenberger Granitpluton. – Projektbericht; 180 S. (unveröff.) München (Bayer. Landesamt für Umwelt).
- GALADÍ-ENRÍQUEZ, E., KROEMER, E., LOTH, G., PÜRNER, T., RAUM, G., TEIPEL, U. & ROHRMÜLLER, J. (2009): Erdgeschichte des Oberpfälzer Waldes. Geologische Karte 1 : 150 000, Augsburg (Bayer. Landesamt für Umwelt).

- GUPTA, R. P. (2003): Remote Sensing Geology. – 655 S., Berlin (Springer).
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2005): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 326 S., München (Elsevier).
- JENSEN, J. R. (2000): Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. – 544 S., Upper Saddle River, NJ (Prentice-Hall, Inc.).
- KRASNY, J. (1996): Hydrogeological environment in hard rocks: an attempt at its schematizing and terminological considerations. – in: Krasny, J. & Mls, J. (eds.): First Workshop on „Hard rock hydrogeology of the Bohemian Massif“ 1994. – Acta Universitatis Carolinae Geologica, **40/2**: 115–122.
- KRASNY, J. (2002): Quantitative hardrock hydrogeology in a regional scale. – NGU-Bull, **439**: 7–14.
- LANGGUTH, H. R. & VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. – 1005 S., Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- LIE, H. & GUDMUNDSSON, A. (2002): The importance of hydraulic gradient, lineament trend, proximity to lineaments and surface drainage pattern for yield of groundwater wells on Askøy, West Norway. – NGU-Bull, **439**: 51–60.
- MABEE, S. B., CURRY, P. J., & HARDCASTLE, K. C. (2002): Correlation of lineaments to ground water inflows in a bedrock tunnel: – Ground Water, **40**: 37–43.
- MABEE, S. B., UND HARDCASTLE, K. C. (1997): Analyzing Outcrop-Scale Fracture Features to Supplement Investigations of Bedrock Aquifers. – Hydrogeology Journal, **5**: 21–36.
- MABEE, S. B., HARDCASTLE, K. C. & WISE, D. U. (1994): A Method of Collecting and Analyzing Lineaments for Regional-Scale Fractured-Bedrock Aquifer Studies. – Ground Water, **32**: 884–894.
- MAULDON, M., DUNNE, W. M. & ROHRBAUGH, M. B., Jr. (2001): Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. – Journal of Structural Geology, **23**: 247–258.
- MIELKE, H. (1982): Geologische Karte von Bayern 1:25 000 Blatt 6037 Ebnath. München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA) (2000): Digitales Geländemodell der SRTM-Mission, Auflösung 3 Bogensekunden. – Washington, D.C. (USA).
- OLSSON, O., BLACK, J. H., GALE, G. E. & HOLMES, D. C. (1989): Site Characterization and Validation Stage 2 – Preliminary Predictions. – 159 S., Stockholm (Geological Survey of Sweden).
- RAUM, K.-D. (2002): Markierungstechnische, bruchtektonisch-gefügekundliche und fotogeologische Untersuchungen zur Ermittlung der Grundwasserfließverhältnisse in der Verwitterungszone kristalliner Gesteine in Quellgebieten des Oberpfälzer-Bayerischen Waldes (Ost-Bayern/ Deutschland). – 239 S., Diss. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

- SPENCER, E. W. & KOZAK, S. J. (1974): Determination of Regional Fracture Patterns in Precambrian Rocks - a Comparison of Techniques. In: HOGSON, R.A., S.P. GAY, J.Y. BENJAMINS (Hrsg.): First International Conference on New Basement Tectonics. – Salt Lake City, Utah, Utah Geological Association.
- STETTNER, G. (1960): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000 Blatt Nr. 5836 München. – 163 S., München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. – 191 S., Stuttgart (Enke).
- TEIPEL, U., GALADÍ-ENRÍQUEZ, E., GLASER, S., KROEMER, E. & ROHRMÜLLER, J. (2008): Erdgeschichte des Bayerischen Waldes. Geologische Karte 1:150 000. – Augsburg (Bayer. Landesamt für Umwelt).
- WALSH, G. J. & CLARK, S. F. (2000): Contrasting Methods of Fracture Trend Characterization in Crystalline Metamorphic and Igneous Rocks of the Windham Quadrangle, New Hampshire. – Northeast Geology and Environmental Sciences, **22**, S. 109–120.
- WILLIAMS, K. W. (2000): Surface and subsurface fracture characterization and the occurrence and characterization of subsurface flow along a cross-strike transect in eastern Massachusetts. – 264 S., Master's thesis University of Massachusetts, Amherst, Mass. (USA).
- WITTHÜSER, K. & HIMMELSBACH, T. (1998): Erhebungsmethoden von Kluftparametern für eine stochastische Kluftnetzgenerierung. – Grundwasser, **3**: 103–109.
- ZEITLHÖFLER, M. (2006): Bericht zur Lineamentanalyse auf Basis von SRTM-Satellitenhöhendaten für die Hydrogeologische Landesaufnahme im EU Ziel-2-Gebiet. – Projektbericht, Bayer. Landesamt f. Umwelt, München: 51 S. (unveröff.).
- ZEITLHÖFLER, M. (2007): Brittle Petrofabrics in the Central Bavarian Forest (SE Germany): Tectonic Evolution, Geomorphological Effects, and Hydrogeologic Implications. – 402 S., Diss. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
- ZEITLHÖFLER, M. & RAUM, K. D. (2005): Relationships between brittle tectonic structure and groundwater migration patterns in fractured rock aquifers of the Central Bavarian Forest, SE Germany. – In: FREIWALD, A., RÖHLING, H.-G. & LÖFFLER, S.-B. [Hrsg.]: GeoErlangen 2005. System Earth - Biosphere Coupling/Regional Geology of Central Europe. – International Conference and Annual Meeting of the Geologische Vereinigung (GV) and the Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG): 423–424, Erlangen (Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften).

