

# Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken

M. JODOCY & I. STOBER

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines Prognosetools zur Unterstützung standortbezogener Aussagen zur Fündigkeit hydrogeothermischer Projekte in Baden-Württemberg“ (GeoTool) hat das Regierungspräsidium Freiburg (RPF) Informationen über Porositäten und Permeabilitäten (Poro-Perm-Daten) potenzieller Speichergesteine des tieferen Untergrundes für die Regionen des Oberrheingrabens und des Südwestdeutschen Molassebeckens zusammengestellt. Zu diesem Zweck hat das RPF analoge Unterlagen aus Bohrungen der Kohlenwasserstoff (KW) – Industrie sowie aus Geothermie-, Thermal- und Mineralwasserbohrungen zusammengetragen, gesichtet und digital aufgearbeitet. Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der Datenrecherche.

## 2 Datenquellen

Grundlage für die Datenrecherche des RPF bildete die Kohlenwasserstoff-Datenbank (KW-DB) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Hannover. Eine Abfrage und Aufarbeitung der dort abgelegten Poro-Perm-Daten für Baden-Württemberg ergab einen Gesamtüberblick der beim LBEG digital erfassten Daten.

Zur Ergänzung dieses Datenbestands wurde für beide Zielregionen in Baden-Württemberg eine behördeninterne Datenrecherche in analogen Bohrunterlagen des RPF durchgeführt. Die Datenrecherche fand ohne Beschränkungen im Hinblick auf Teufenbereiche und einzelne lithostratigraphische Einheiten statt, um einen möglichst umfangreichen Datensatz über alle in den Zielregionen anzutreffenden geologischen Einheiten zu erhalten. Dabei konnten sowohl im Oberrheingraben als auch Molassebecken ergänzende Einzelwerte von bereits in der KW-DB erfassten Bohrungen sowie Datensätze aus bisher nicht aufgeführten Bohrungen in den Datenbestand integriert werden. Für den Oberrheingraben wurden zudem in einer grenzüberschreitenden Kooperation mit dem französischen „Bureau de Recherches Géologiques et Minières“ (BRGM) analoge Bohrakten aus dem linksrheinischen Teil des Oberrheingrabens in die Betrachtungen miteinbezogen. Ebenfalls enthalten sind im Rahmen des Projekts GeoTool erstmalig beschaffte Unterlagen der KW-Industrie. Eindeutige Doppelseinträge aus unterschiedlichen

Quellen wurden in einer anschließenden manuellen Einzelbetrachtung gezielt aussortiert. Eine Übersicht der zusammengetragenen Poro-Perm-Daten gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht zur Herkunft, Tiefenlage und Bestimmungsmethode der Poro-Perm-Daten

	Anzahl Bohrungen	Quelle			Teufe		Art der Messung			
		KW-DB	RPF	BRGM	Min	Max	Kern	Log	Kern+Log	unsicher
<b>Oberrhingraben</b>	120	37	168	403	88,5	2937,5	287	231	1	89
<b>Molassebecken</b>	139	537	339	0	79,0	2824,6	587	160	6	123

Hinsichtlich der Datenherkunft wurde in den vorliegenden Bohrakten im Allgemeinen zwischen Daten aus geophysikalischen Bohrlochmessungen (Logs) und Labormessungen aus Kernproben unterschieden. In einigen Fällen ließ die Datenlage keine eindeutige Quellenzuordnung zu. Selten wurden die in den Unterlagen angegebenen Porositäten und Permeabilitäten kombiniert aus Logs und Kernen abgeleitet (Tabelle 1).

Zur weiteren Verarbeitung wurden anhand der in der KW-DB angegebenen Kern-ID statistische Kenngrößen (Minimalwert, Maximalwert, arithmetischer Mittelwert und Median) zur Beschreibung einzelner Kernstrecken ermittelt. Auf gleiche Weise wurde mit den Daten aus französischen Bohrungen sowie analogen Bohrakten aus behördeninternen Archiven und Unterlagen der KW-Industrie verfahren, sofern die Datenlage die Identifikation einzelner Kernstrecken zuließ. Zum Teil waren die Daten bereits in den herangezogenen Quellen auf einzelne statistische Kenngrößen zusammengefasst worden. Diese Kenngrößen mussten ohne die Möglichkeit einer weiteren Kontrolle 1:1 übernommen werden.

Bezüglich der Verwendung des Begriffs „Porosität“ unterscheidet die KW-Industrie zwischen der **Gesamtporosität** und der **effektiven Porosität (Nutzporosität)**. Die Nutzporosität gibt dabei den Anteil des hydraulisch aktiven Porenvolumens wieder, während die Gesamtporosität zusätzlich noch isolierte Hohlraumanteile im Gestein berücksichtigt. Die effektive Porosität wird in der KW-Industrie in der Regel über das relativ einfache Verfahren der Sättigung und Wägung einer Kernprobe bestimmt. Dieses Standardverfahren kam bei den vorliegenden Kernuntersuchungen meist zur Anwendung, während Gesamtporositäten nur in seltenen Fällen als zusätzlicher Parameter bestimmt worden sind. Im Folgenden bezieht sich deswegen der Begriff Porosität immer auf den Parameter der nutzbaren Porosität.

### 3 Geologische und räumliche Herkunft der Daten

#### 3.1 Oberrheingraben (Anteil Baden-Württemberg und Frankreich)

Insgesamt liegen für die Region des Oberrheingrabens Anteil Baden-Württemberg und Frankreich 608 Einzelwerte zu Porositäten und / oder Permeabilitäten vor. Die Werte

stammen aus Teufen zwischen 88,5 und 2937,5 Metern unter Gelände (muG.) und erstrecken sich über die gesamte Schichtenfolge des Oberrheingrabens von der tertiären Grabenfüllung bis zur Rotliegend-Formation. Aus dem kristallinen Grundgebirge liegen keine Messungen vor. Die Daten verteilen sich mit rund 50 % des Gesamtdatenbestands auf Kernuntersuchungen und etwa 40 % auf Bohrlogs. 403 Datensätze aus Frankreich führen zu einer massiven Vergrößerung des nur wenige Bohrungen umfassenden rechtsrheinischen Datenbestands der KW-DB. Auch die behördeninternen oder über Anfragen bei der KW-Industrie zusammengetragenen Untersuchungen tragen mit 168 Einzelwerten zu einer erheblichen Vergrößerung des Datenbestands bei (vgl. Tabelle 1).

Abbildung 1 zeigt die Anzahl der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten verteilt auf die einzelnen erfassten lithostratigraphischen Einheiten. Die in den Anhängen 1 bis 4 enthaltenen Karten zeigen die räumliche Verteilung der Bohrungen mit korrespondierender stratigraphischer Differenzierung. Die Einheiten des Fluviatilen Jungtertiärs, der Landschneckenmergel- und Niederröden-Formation, der Grauen Mergel-Formation, der Pechelbronn-Formation und der Lymnänenmergel- sowie Böhnerz-Formationen sind der tertiären Grabenfüllung zuzuordnen. In diesen Einheiten spielen insbesondere sandige Lagen in der tertiären Schichtenfolge für hydrogeothermische Betrachtungen eine Rolle. Sie unterliegen jedoch kleinräumig sehr wechselhaften lithostratigraphischen und faziellen Verhältnissen. Die Daten aus dem Tertiär umfassen etwas mehr als die Hälfte aller im Oberrheingraben erfassten Bohrungen mit Poro-Perm-Daten. Sie sind vor allem im tief eingesunkenen Grabenabschnitt nördlich von Baden-Baden und im Umfeld des ehemaligen Erdölfelds Pechelbronn (Frankreich) anzutreffen (Anhang 1 und 2).

Es folgen die Gesteine des Jura (Anhang 2), wobei im südlichen Grabenabschnitt zwischen Basel und Kehl im Oberen und Mittleren Dogger (Mitteljura jm) die Kalkoolithe der Hauptrogenstein-Formation anzutreffen sind (Anhang 3). Der Hauptrogenstein wird als potenzieller hydrogeothermischer Nutzhorizont mit 32 Bohrungen separat aufgeführt.

Die Daten aus sieben Bohrungen des Oberen und Mittleren Keupers spielen hydrogeothermisch nur eine untergeordnete Rolle. Erst der nachfolgende Obere Muschelkalk gehört zu den wichtigsten potenziellen hydrogeothermischen Zielhorizonten im Oberrheingraben. Die 10 Bohrungen mit Daten aus der Lettenkeuper-Formation, dem Oberen Muschelkalk und der Oberen Dolomit-Formation (Mittlerer Muschelkalk) werden nachfolgend als „Oberer Muschelkalk - Aquifer“ zusammengefasst. Der Datenbestand dieses Gesteinskomplexes erstreckt sich über den gesamten südlichen und mittleren Oberrheingraben mit Schwerpunkt auf die Region zwischen Freiburg und Kehl (Anhang 3). Ursache für diese Verteilung ist die große Tiefenlage des Oberen Muschelkalks im nördlichen Grabenabschnitt in den Regionen um Rastatt und Heidelberg. Hier haben nur wenige Bohrungen den Oberen Muschelkalk erreicht.

Ebenfalls mit aufgenommen wurden Untersuchungen aus zwei Bohrungen im Mittleren und Unteren Muschelkalk. Der nachfolgende Buntsandstein zählt ebenfalls zu den

potenziellen hydrogeothermischen Nutzhorizonten. Anhang 4 zeigt die Verteilung der insgesamt 15 Bohrungen mit Poro-Perm-Daten. Sie erstrecken sich über den gesamten mittleren und südlichen Abschnitt des Oberrheingraben, wobei hier lediglich zwei Bohrungen aus Baden-Württemberg zum Datenbestand beitragen. Aus dem nördlichen Graben liegen nur Informationen aus einer Bohrung im Grabenrandbereich bei Bruchsal vor.

Die Rotliegend-Formation schließt den Datensatz des Oberrheingraben ab. Lediglich eine Bohrung aus dem Raum Offenburg liefert hier Informationen (Anhang 4).

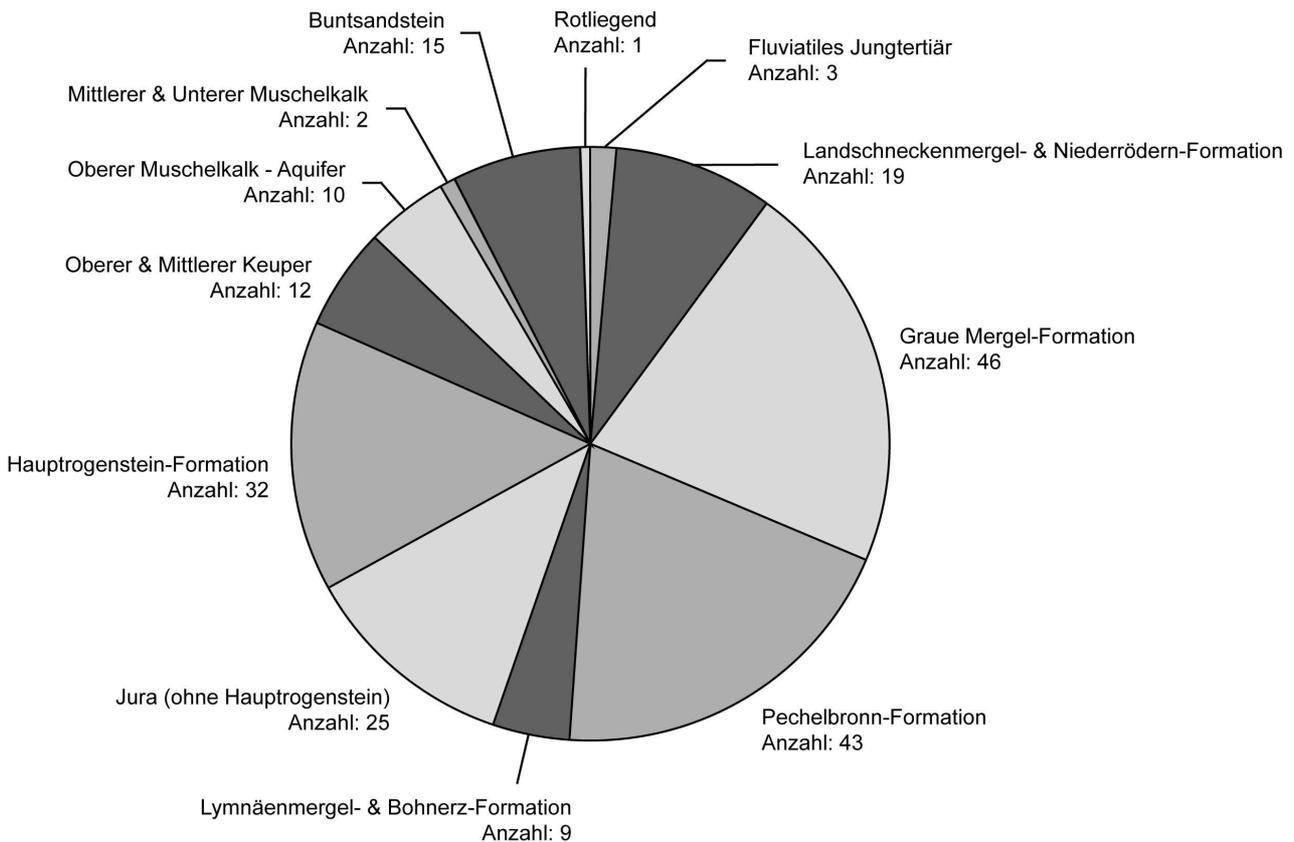


Abbildung 1: Anzahl der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten im Oberrheingraben differenziert nach geologischen Formationen.

### 3.2 Südwestdeutsches Molassebecken (Anteil Baden-Württemberg)

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Poro-Perm-Daten des Südwestdeutschen Molassebeckens. Aus dem baden-württembergischen Teil liegen nach Abschluss der Datenrecherche insgesamt 876 Einzelwerte mit Porositäten und / oder Permeabilitäten vor, die aus Teufen zwischen 79,0 und 2824,6 muG. stammen und die sich über die gesamte Schichtenfolge vom Tertiär bis ins kristalline Grundgebirge erstrecken. Mit 587 Datensätzen wurde der überwiegende Teil aus Kernuntersuchungen abgeleitet, lediglich

160 Werte sind eindeutig auf Bohrlogs als Datenquelle zurückzuführen. Die neuen 339 Werte aus Baden-Württemberg konnten den Datenumfang nochmals erheblich erweitern.

Abbildung 2 zeigt die Anzahl der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten verteilt auf die angetroffenen lithostratigraphischen Einheiten. Mit analoger stratigraphischer Differenzierung wird in den Anhängen 5 bis 7 die räumliche Verteilung der Datensätze veranschaulicht. Unter dem Oberbegriff Tertiär wurden überwiegend Untersuchungen in Gesteinen der Unteren Süßwassermolasse zusammengefasst, die in der Regel ohne weitere lithostratigraphische Differenzierung vorliegen. Sie dürften nach den vorliegenden Hinweisen im Bereich der Hauptsande (früher: Chattsande) durchgeführt worden sein. Die Daten aus dem Tertiär beschränken sich hauptsächlich auf die Region Fronhofen im zentralen Teil des Südwestdeutschen Molassebeckens (Anhang 5).

Das Grundwasserstockwerk des höheren Oberjura stellt eines der bedeutendsten hydrogeothermischen Potenziale im Süddeutschen Molassebecken dar. Die in der Unteren Meeresmolasse an der Tertiärbasis bereichsweise auf den Oberjura transgredierenden Bausteinschichten können stellenweise mit dem Oberjura-Grundwasserleiter kommunizieren. Sie sind im Südosten des Untersuchungsgebietes anzutreffen. Zusammen mit den Unteren Cyrenenschichten der Unteren Süßwassermolasse und den Einheiten des Oberjura werden sie im vorliegenden Bericht als Oberjura – Aquifer zusammengefasst. Die Untersuchungen in der Unteren Meeresmolasse bilden aufgrund ihrer Eigenschaft als potenzielle Speichergesteine für Kohlenwasserstoffe den Schwerpunkt im dargestellten Datensatz des Oberjura - Aquifers. Die Verteilung der Messungen beschränkt sich aus diesem Grund auf 48 Bohrungen aus dem südöstlichen Teil des Südwestdeutschen Molassebeckens zwischen Ochsenhausen und Bad Wurzach (Anhang 5).

Den umfangreichsten Datensatz bilden Werte aus dem Mittleren und Unteren Jura sowie dem Oberen und Mittleren Keuper. Er umfasst mit 98 Bohrungen die Hälfte aller Bohrungen mit Poro-Perm-Daten im Südwestdeutschen Molassebecken. Die Messungen erstrecken sich schwerpunktmäßig über die Regionen um Pfullendorf, Fronhofen und Mönchsrot (Anhang 6). Sie sind als Grundwasserleiter und damit aus hydrogeothermischer Sicht unbedeutend und werden aus diesem Grund nicht weiter betrachtet.

Im Gegensatz dazu stellt der Obere Muschelkalk wie im Oberrheingraben einen bedeutsamen hydrogeothermischen Zielhorizont dar. Gemeinsam mit Messungen aus der Lettenkeuper-Formation und ergänzenden Daten aus dem Unteren Muschelkalk werden die Daten im vorliegenden Bericht unter dem Oberbegriff Muschelkalk – Aquifer zusammengefasst dargestellt. Die 29 Bohrungen sind auf der Karte im Anhang 7 recht gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt. Lediglich die Regionen mit geringer Tiefenlage des Oberen Muschelkalks direkt südlich der Schwäbischen Alb werden durch die vorliegenden Messungen nicht abgebildet.

Die nachfolgenden Formationen des Buntsandsteins, des Perms und des kristallinen Grundgebirges werden aufgrund des geringen Datenumfangs und einer nicht immer eindeutigen Ansprache im lithostratigraphischen Bohrprofil summarisch dargestellt. Enthalten sind zwei Bohrungen mit Daten aus dem Oberkarbon bzw. dem kristallinen Grundgebirge. Die Lage der Bohrungen wird im Anhang 7 wiedergegeben. Die Buntsandstein-Formation ist lediglich im äußersten Nordwesten des Untersuchungsgebiets bei Mächtigkeiten von nur wenigen Metern anzutreffen und keilt nach Südosten aus. Ebenfalls mit eingeschränkter Verbreitung zeigen sich die Formationen des Perms nur in den westlichen und östlichen Randbereichen des baden-württembergischen Molassebeckens.

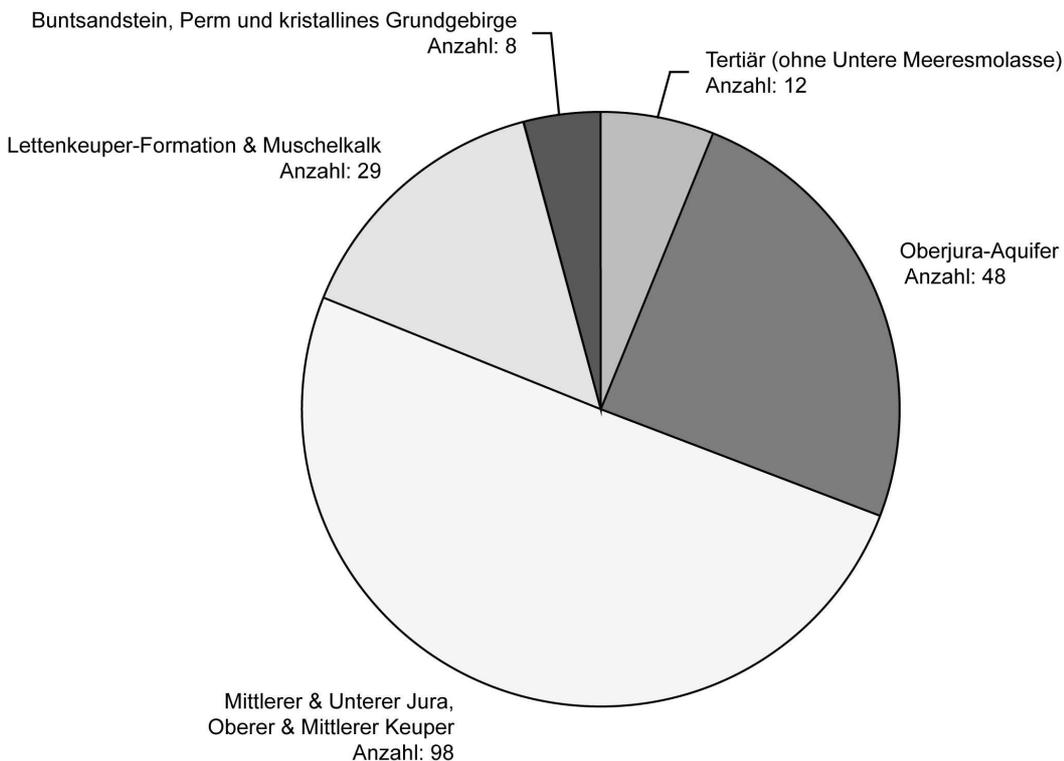


Abbildung 2: Anzahl der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten im Südwestdeutschen Molassebecken differenziert nach geologischen Formationen.

## 4 Größenordnungen

Zur Darstellung der Verteilung der Porositäten und Permeabilitäten in den untersuchten geologischen Formationen wird nachfolgend auf Box-Whisker-Plots zurückgegriffen. Diese ermöglichen eine einfache Veranschaulichung der Daten hinsichtlich der angetroffenen Größenordnungen und der Werteverteilung unter Verwendung robuster Streuungs- und Lagemaße.

Die Box wird durch das erste und dritte Quartil der zugrunde liegenden Datenreihe begrenzt. Unterhalb des 1. Quartils ( $Q_1$ ) liegen 25 % aller Fälle einer Datenreihe, während das 3. Quartil ( $Q_3$ ) 75 % aller Fälle beschreibt:

$$Q_1 = \frac{1}{4} \cdot n$$

$$Q_3 = \frac{3}{4} \cdot n$$

mit:  $Q_1$  = Messwert, unterhalb dessen genau  $\frac{1}{4}$  und oberhalb dessen  $\frac{3}{4}$  der Messwerte einer geordneten Reihe liegt

$Q_3$  = Messwert, unterhalb dessen genau  $\frac{3}{4}$  und oberhalb dessen genau  $\frac{1}{4}$  der Messwerte einer geordneten Reihe liegt

$n$  = Anzahl der Fälle.

Die Differenz zwischen erstem und drittem Quartil wird als Interquartilsabstand bezeichnet. Dieser durch die gefüllte Box dargestellte Bereich umfasst 50 % der Verteilung:

$$\text{Interquartilsabstand (QA)} = Q_3 - Q_1$$

Innerhalb der Boxplots wird als schwarzer senkrechter Strich der Median ( $\tilde{x}$ ) angezeigt. Der Median halbiert die geordnete Datenreihe in zwei gleich große Teile und wird deshalb auch als 2. Quartil bezeichnet:

$$\tilde{x} = x_{(n+1)/2} \quad \text{für ungerades } n$$

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} (x_{n/2} + x_{n/2+1}) \quad \text{für gerades } n$$

mit  $x_i$  = geordnete Werte aus zugrunde liegender Datenreihe.

Durch die Lage des Medians innerhalb der Box lässt sich die Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung ermitteln. Die Länge der Whisker (Fühler; im Diagramm als T-Balken dargestellt) basiert auf dem Ansatz von TUKEY (1977) und beträgt maximal das 1,5-fache der Höhe der Box bzw. des Interquartilsabstands. Punktwerte stellen Ausreißer innerhalb der Datenreihe dar, die noch außerhalb der Fühlerlänge angesiedelt sind. Als Stern markierte Einzelwerte sind extreme Ausreißer in einer Datenreihe.

Den Box-Whisker-Plots zugrunde gelegt wurden arithmetische Mittelwerte einzelner Kernstrecken, da dieser Datensatz den größten Umfang besitzt. Aufgrund der stark streuenden und häufig mit Ausreißerwerten versehenen Datenreihen wäre als Berechnungsgrundlage grundsätzlich der Median zu bevorzugen gewesen, da er weniger

auf Extremwerte reagiert. Dieser konnte jedoch nicht durchgehend bestimmt werden. Dies gilt insbesondere für Quellen mit bereits zusammengefassten Daten (vgl. Ausführungen unter 2).

Für die statistische Weiterverarbeitung der Permeabilitäten wurden die Einzelwerte zunächst logarithmiert. Diese logarithmierten Werte wurden zur Bestimmung der beschriebenen statistischen Kenngrößen (Quartile etc.) herangezogen. In wenigen Fällen wurde in den Originalunterlagen die Permeabilität mit „undurchlässig“ benannt. Aufgrund fehlender Kenntnisse zur jeweils zum Tragen kommenden verfahrenstechnischen unteren Bestimmungsgrenze, wurden diese Werte in der Konsequenz mit einer entsprechenden Permeabilität von null und damit für die weitere Verarbeitung als unplausibel eingestuft.

Auf eine detaillierte Analyse der Poro-Perm-Daten wird im Rahmen dieses Kurzberichts bewusst verzichtet. Eine eingehende Betrachtung wird Bestandteil separater Untersuchungen im Projekt GeoTool sein.

#### 4.1 Oberrheingraben (Anteil Baden-Württemberg und Frankreich)

Der jeweilige Datenumfang für die einzelnen betrachteten geologischen Formationen gestaltet sich sehr wechselhaft. Tabelle 2 zeigt die Anzahl der Einzelwerte im Oberrheingraben getrennt nach Porositäten und Permeabilitäten sowie in Abhängigkeit von der Bestimmungsmethode.

Tabelle 2: Datengrundlage im Oberrheingraben

Geologische Formation		Porosität			Permeabilität		
		Gesamt	Kern	Log	Gesamt	Kern	Log
Tertiär	Fluviatiles Jungtertiär	7	0	0	0	0	0
	Landschneckenmergel- & Niederrödern-Formation	49	18	17	12	12	0
	Graue Mergel-Formation	156	31	105	26	24	2
	Pechelbronn-Formation	148	62	77	53	52	0
	Lymnäenmergel- & Bohnerz-Formation	27	22	3	15	15	0
	Jura (ohne Hauptrogenstein)	67	57	4	51	51	0
	Hauptrogenstein	71	47	11	50	42	3
	Oberer & Mittlerer Keuper	34	31	2	28	28	0
	Oberer Muschelkalk - Aquifer	16	8	5	9	8	1
	Mittlerer & Unterer Muschelkalk	2	0	1	0	0	0
	Buntsandstein	25	7	6	13	7	4
	Rotliegend	1	1	0	1	1	0

Die Differenz aus der Summe der Kern- und Log-Daten zum Gesamtdatenbestand ergibt sich aus einer nicht eindeutigen Quellenzuordnung. Grundsätzlich liegen für alle erfassten

Formationen deutlich mehr Einzelwerte zu Porositäten als zu Permeabilitäten vor. Auch schwankt der Datenumfang für die einzelnen geologischen Formationen erheblich.

Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Porositäten für die untersuchten geologischen Formationen im Oberrheingraben. Wenngleich die Werte einer starken Streuung unterliegen, ist dennoch eine Tendenz zur Verringerung der Porosität zwischen Formationen der tertiären Schichtenfolge und geologisch älteren Formationen des Prätertiärs erkennbar. Innerhalb der prätertiären Schichtenfolge fallen zunächst keine Besonderheiten in der Verteilung auf, insbesondere nicht im Hinblick auf grundsätzlich erhöhte Porositäten in den hydrogeothermischen Zielhorizonten des Haupttrogensteins, Oberen Muschelkalks und Buntsandsteins. Dennoch sind bei vergleichender Betrachtung der Lage der 3. Quartile und der Ausdehnung der Whisker in allen drei Aquifern leichte Tendenzen zu vereinzelt auftretenden höheren Werten feststellbar. Für das Rotliegende liegt nur ein Messwert vor.

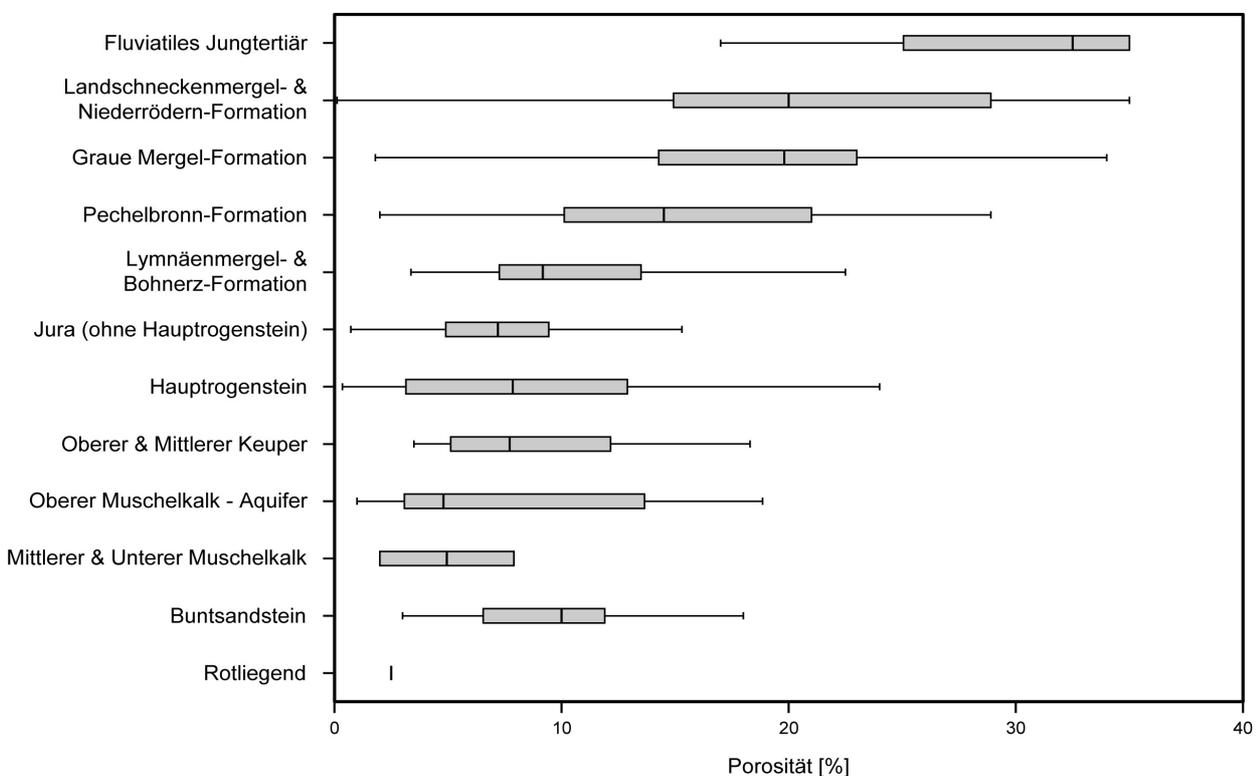


Abbildung 3: Box-Whisker-Plots der Porositäten im Oberrheingraben (gesamter Datenbestand).

Abbildung 4 differenziert die ermittelten Porositäten anhand der Bestimmungsmethode nach Daten aus Kernen und Logs. Grundsätzlich bestätigt sich die Tendenz zur Abnahme der Porositäten mit zunehmendem Formationsalter. Gleichzeitig wird deutlich, dass sich aus bohrlochgeophysikalischen Messungen abgeleitete Porositäten zum Teil deutlich von denen an Kernen im Labor bestimmten Werten unterscheiden. Der Datenbestand im Oberrheingraben zeigt meist erheblich höhere Porositäten in Logdaten.

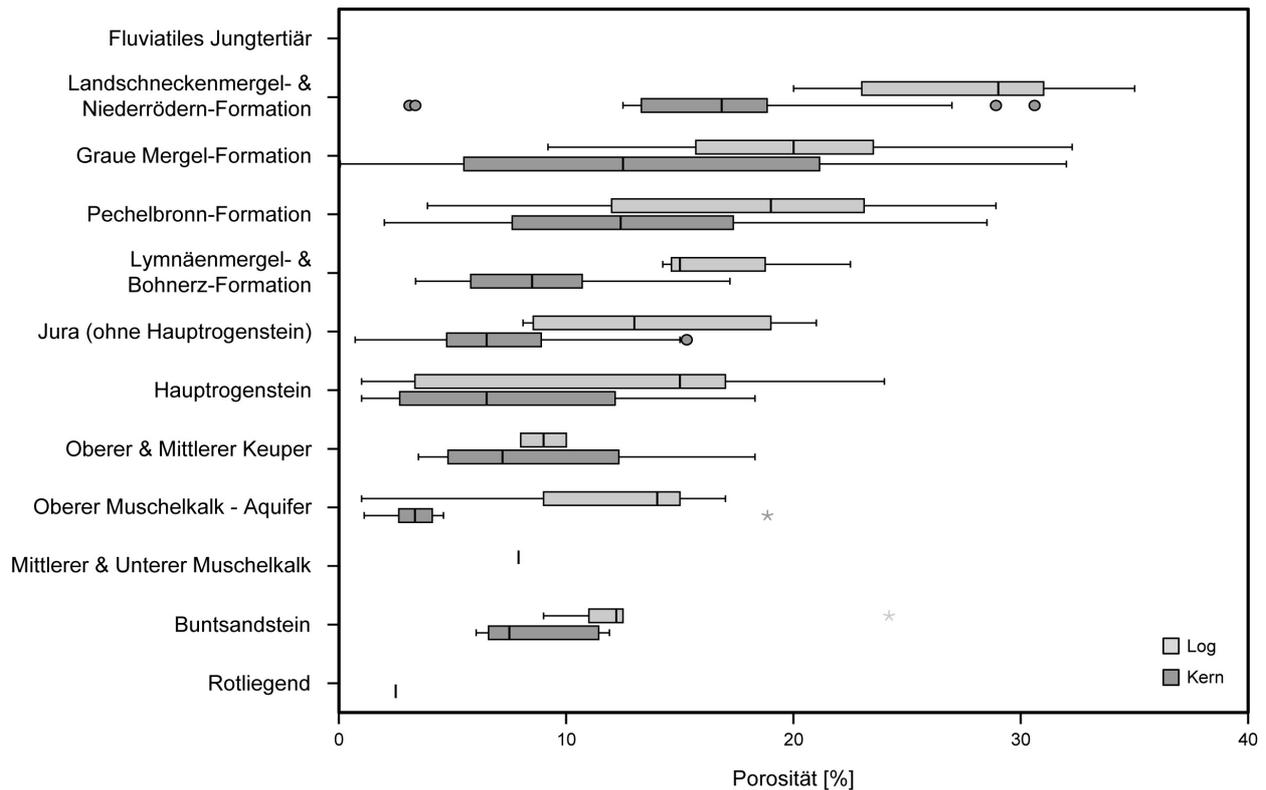


Abbildung 4: Box-Whisker-Plots der Porositäten im Oberrheingraben differenziert nach Bestimmungsmethoden (Bohrkern oder Log).

Bezüglich der Permeabilitäten ist ein recht ähnliches Bild erkennbar (Abbildung 5). Neben einer großen Streuung der Daten fallen mit Ausnahme der Lymnäenmergel- und Bohnerz-Formation vor allem die tertiären Formationen mit stellenweise recht hohen Matrixdurchlässigkeiten auf. Demgegenüber stehen die prätertiären Einheiten, die neben einer geringeren Streuung auch eine wesentlich kleinere Tendenz für erhöhte Permeabilitäten aufweisen. Einzige Ausnahme bildet ein Ausreißer im Datensatz der Buntsandstein-Formation. Auffallend sind die niedrigen Permeabilitäten in den Formationen des Hauptrogensteins und des Oberen Muschelkalks. Beide hydrogeothermischen Zielhorizonte zeigen im Vergleich zu den anderen Horizonten durch die Lage des 1. Quartils eine leichte Tendenz zu geringeren Permeabilitäten. Für das Fluviale Jungtertiär und den Mittleren und Unteren Muschelkalk liegen keine Werte vor. Die Rotliegend-Formation ist mit lediglich einem einzelnen Messwert vertreten.

Die nach Kernuntersuchungen und Logs differenzierte Abbildung 6 ändert dieses Bild grundsätzlich nicht. Die wenigen Permeabilitäten aus Logs (vgl. Tabelle 2) lassen keine abgesicherte Aussage zum unterschiedlichen Verhalten der Werte in Abhängigkeit der Bestimmungsmethode zu.

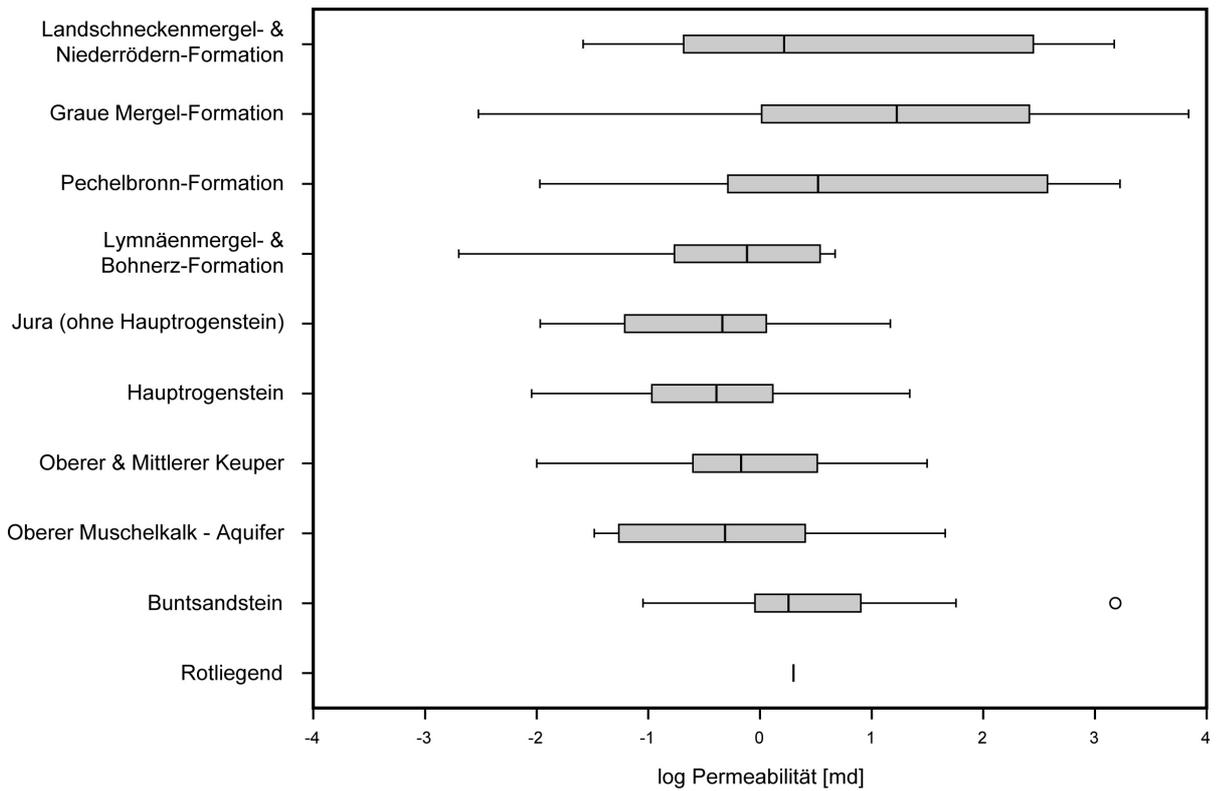


Abbildung 5: *Box-Whisker-Plots der Permeabilitäten im Oberrheingraben (gesamter Datenbestand).*

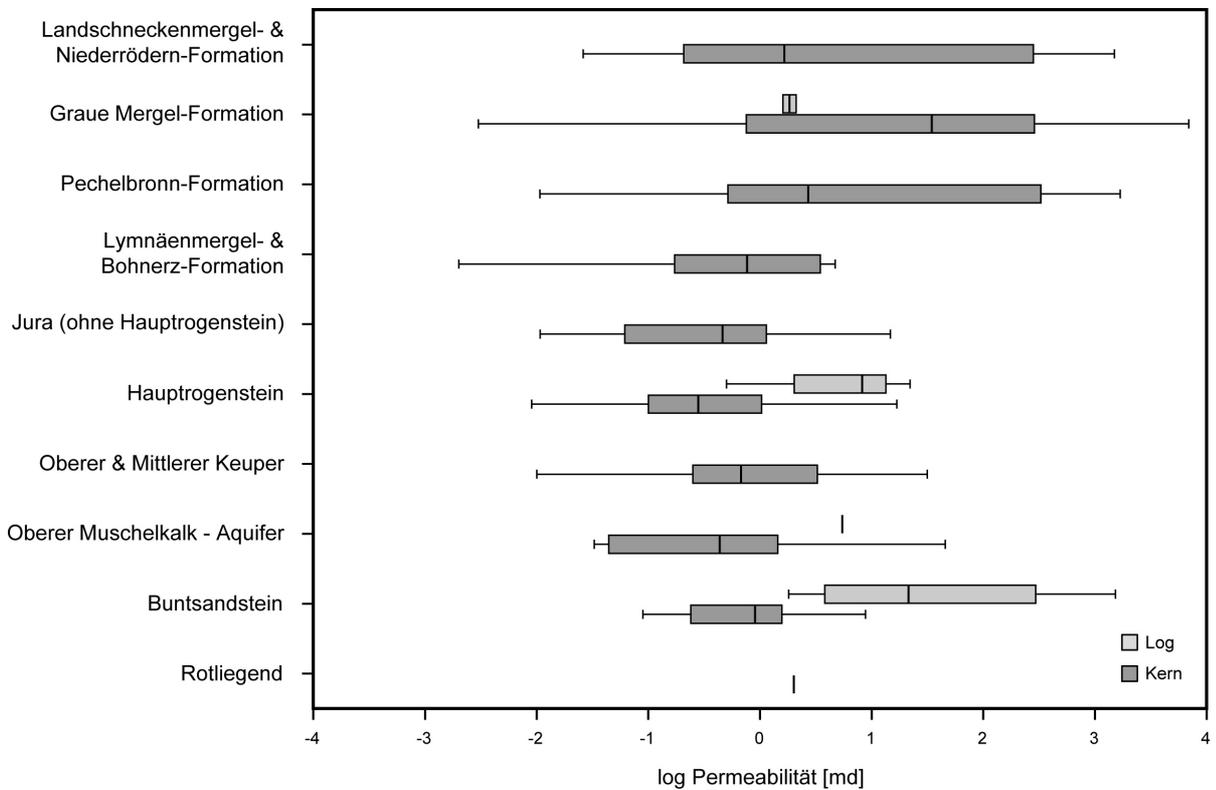


Abbildung 6: *Box-Whisker-Plots der Permeabilitäten im Oberrheingraben differenziert nach Bestimmungsmethoden (Bohrkern oder Log).*

Abbildung 7 stellt abschließend für den Oberrheingraben den Zusammenhang zwischen Porositäten und Permeabilitäten auf der Basis der Daten aus Kernuntersuchungen dar. Trotz eines eindeutig vorhandenen Zusammenhangs fällt die erhebliche Streuung der Datenpunkte um die eingetragene Ausgleichsgerade auf.

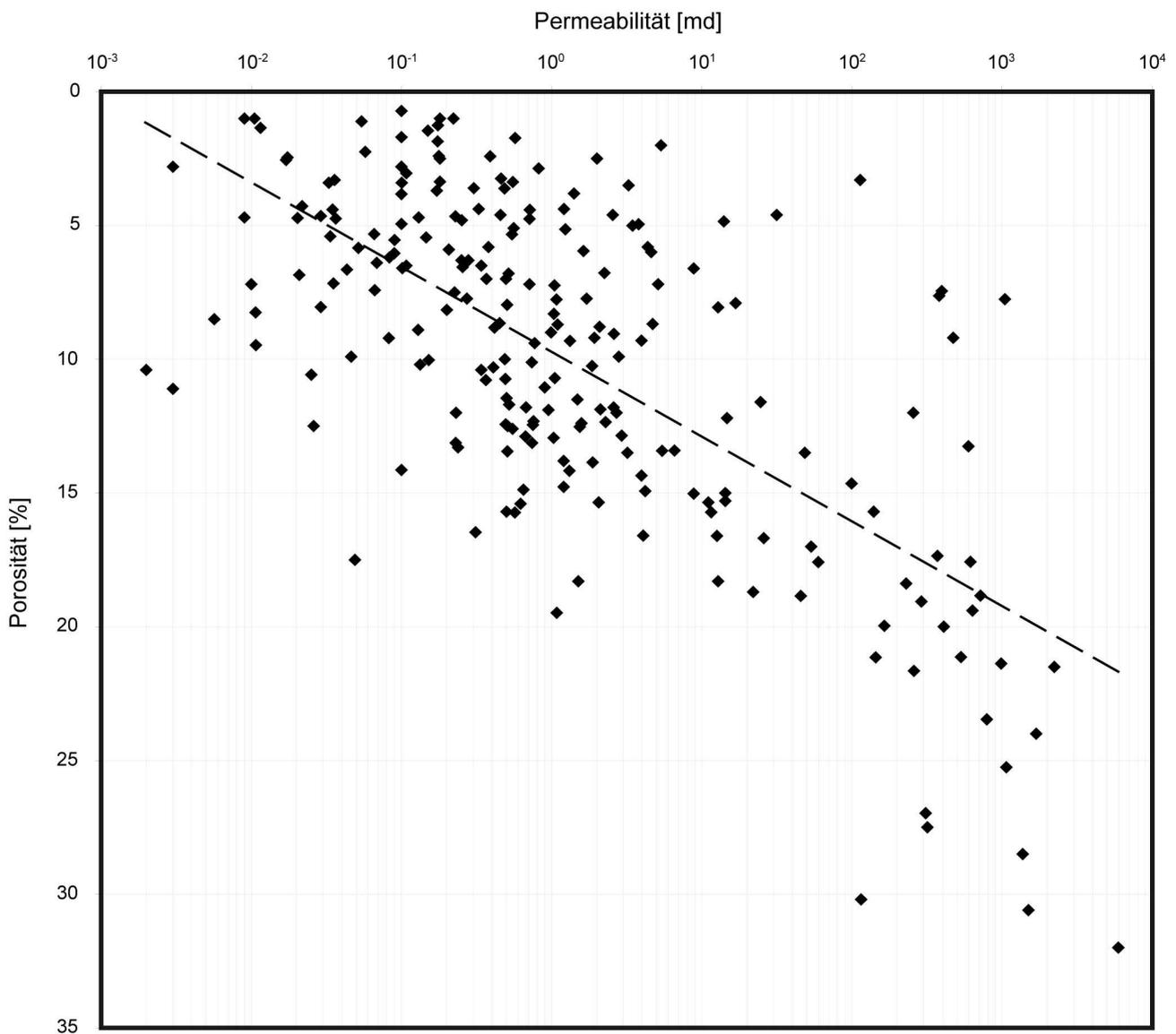


Abbildung 7: Korrelation zwischen Porositäten und Permeabilitäten aus Kernuntersuchungen im Oberrheingraben.

#### 4.2 Südwestdeutsches Molassebecken (Anteil Baden-Württemberg)

Für die Daten im Südwestdeutschen Molassebecken gelten über weite Strecken die bereits für die Datenreihen im Oberrheingraben getroffenen Aussagen. Der jeweilige Datenumfang für die einzelnen betrachteten geologischen Formationen gestaltet sich

demnach sehr wechselhaft. Tabelle 3 zeigt die Anzahl der Einzelwerte im Südwestdeutschen Molassebecken getrennt nach Porositäten und Permeabilitäten.

*Tabelle 3: Datengrundlage im Südwestdeutschen Molassebecken*

Geologische Formation	Porosität			Permeabilität		
	Gesamt	Kern	Log	Gesamt	Kern	Log
<b>Tertiär (ohne Untere Meeresmolasse)</b>	52	3	22	3	3	0
<b>Oberjura - Aquifer</b>	204	188	4	192	184	0
<b>Mittlerer &amp; Unterer Jura, Oberer &amp; Mittlerer Keuper</b>	544	353	116	375	340	3
<b>Lettenkeuper-Formation, Muschelkalk</b>	73	42	20	44	37	3
<b>Buntsandstein, Perm &amp; kristallines Grundgebirge</b>	10	6	1	8	6	0

Abbildung 8 zeigt die Verteilung der Porositäten für die untersuchten geologischen Formationen im Untersuchungsgebiet. Die Werte unterliegen einer starken Streuung, dennoch sind auch hier die gemessenen Porositäten in den tertiären Formationen tendenziell höher, ohne die deutliche Differenzierung wie im Oberrheingraben zu erreichen. Insgesamt wirkt der Datensatz im Molassebecken homogener.

Überraschend erscheinen zunächst die stellenweise recht hohen Porositäten der für hydrogeothermische Nutzungen nicht im Fokus stehenden Formationen des Mittleren und Unteren Jura sowie des Oberen und Mittleren Keupers. Dieser Umstand dürfte mit großer Wahrscheinlichkeit auf die in diesem Datensatz häufig enthaltenen Messungen aus Sandsteinfolgen des Mittleren Jura (Eisen- und Angulatensandstein) und des Keupers (Stubensandstein, Kieselsandstein und Schilfsandstein) zurückzuführen sein. Diese Sandsteine können in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung, der Art des Bindemittels und der Konsolidierung eine erhöhte hydraulisch aktive primäre Matrixporosität aufweisen.

Abbildung 9 differenziert die ermittelten Porositäten anhand der Bestimmungsmethode nach Daten aus Kernen und Logs. Grundsätzlich bestätigen sich auch in dieser Darstellung die erhöhten Porositäten im Tertiär. Gleichzeitig wird analog zu den Daten aus dem Oberrheingraben deutlich, dass sich aus bohrlochgeophysikalischen Messungen abgeleitete Porositäten zum Teil erheblich von denen an Kernen im Labor bestimmten Werten unterscheiden und eine Tendenz zu höheren Werten zeigen. Dies wird insbesondere bei Betrachtung der Informationen aus dem Tertiär erkennbar. Die Mediane der Verteilungen liegen in allen Formationen im Falle von Informationen aus Bohrlogs über den Werten der Kernuntersuchungen.

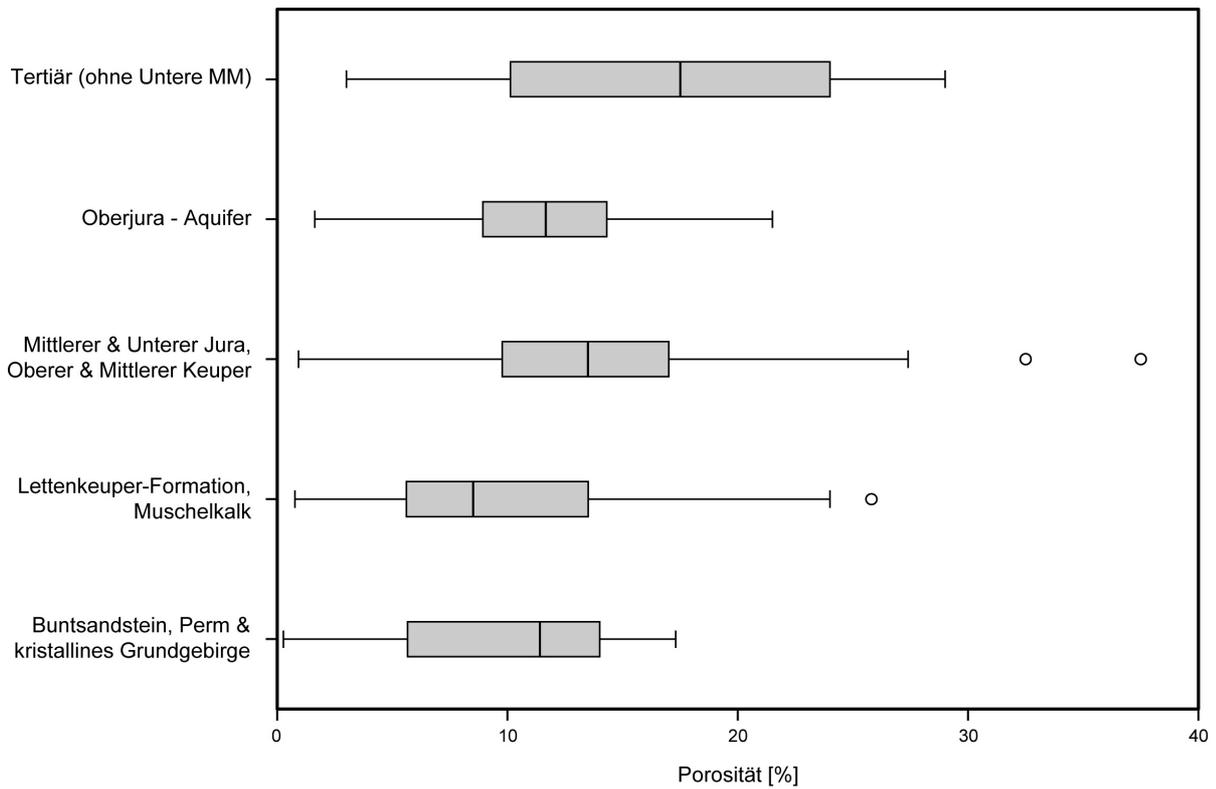


Abbildung 8: Box-Whisker-Plots der Porositäten im Südwestdeutschen Molassebecken (gesamter Datenbestand).

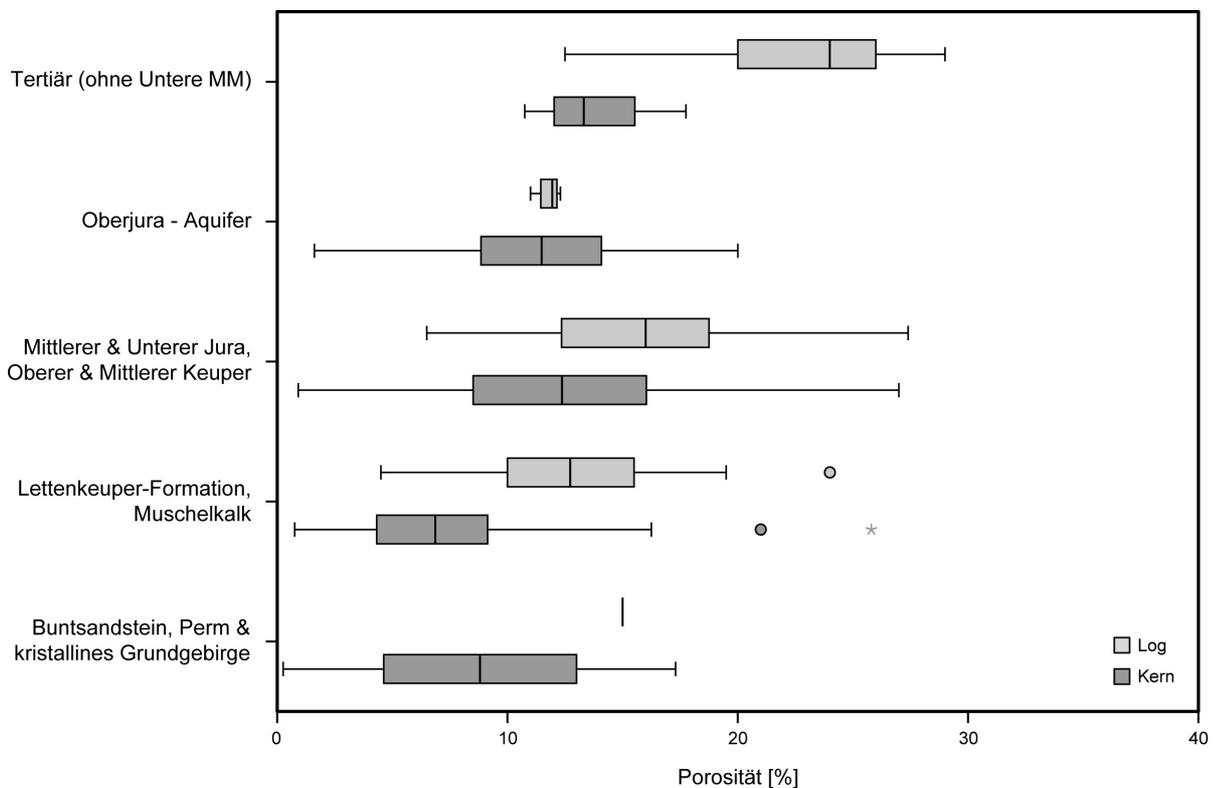


Abbildung 9: Box-Whisker-Plots der Porositäten im Südwestdeutschen Molassebecken differenziert nach Bestimmungsmethoden (Bohrkern oder Log).

Die Formationen mit erhöhten Porositäten spiegeln sich auch in tendenziell erhöhten einzelnen Permeabilitäten wider. Die höchsten ermittelten Werte stammen auch hier aus den Formationen des Mittleren und Unteren Jura sowie Oberen und Mittleren Keupers (Abb. 10). Insgesamt folgen die Verteilungen der Permeabilitäten im Südwestdeutschen Molassebecken dem grundsätzlichen Verteilungsmuster der Porositäten. Sie weisen demnach insgesamt höhere Matrixdurchlässigkeiten im Tertiär auf, während in den prätertiären Schichten häufiger auch niedrigere Werte angetroffen werden, wenngleich die relativen Unterschiede zwischen den betrachteten Formationen im Vergleich zum Oberrheingraben ausgeglichener erscheinen. Auffallend ist auch im Molassebecken, dass insbesondere in den hydrogeothermischen Zielhorizonten keine erhöhten Permeabilitäten erkennbar sind.

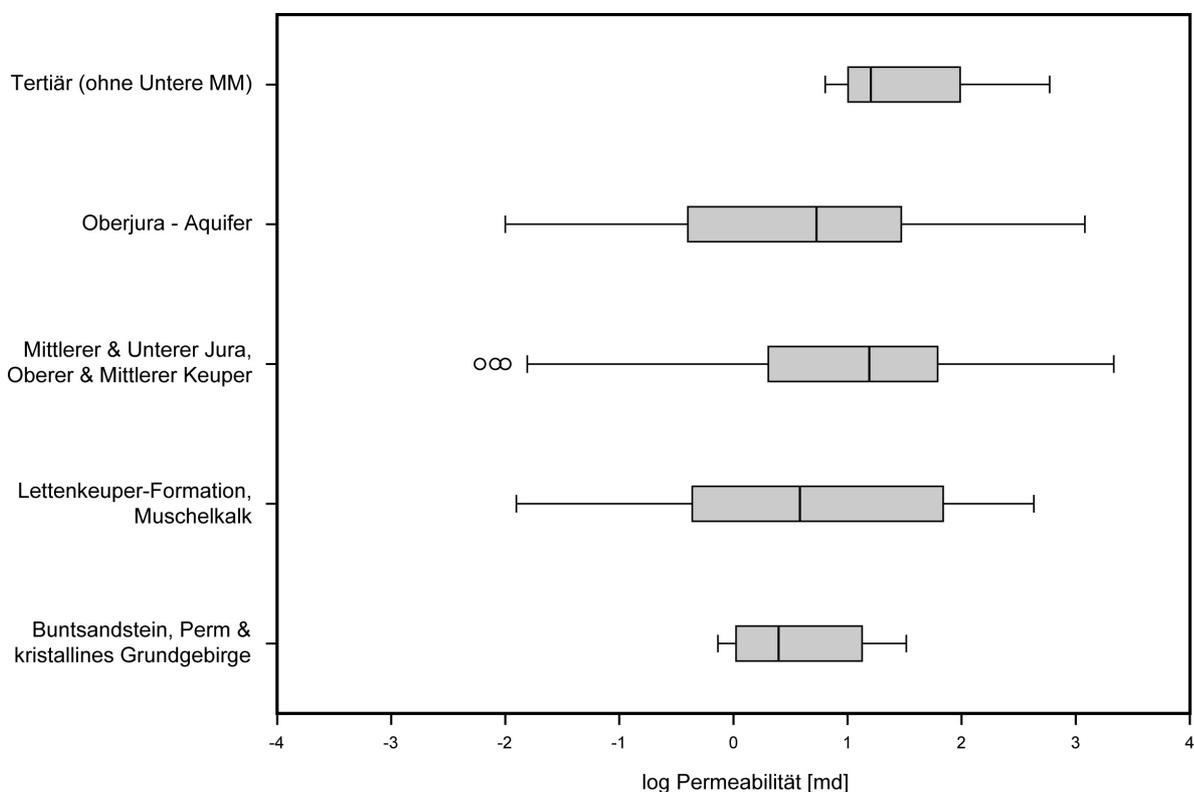


Abbildung 10: Box-Whisker-Plots der Permeabilitäten im Südwestdeutschen Molassebecken (gesamter Datenbestand).

Die nach Kernuntersuchungen und Logs differenzierte Abbildung 11 ändert dieses Bild grundsätzlich nicht. Einzelne hinsichtlich der Bestimmungsmethode unsichere Werte vor allem in den Formationen des Jura und Keuper verändern die prinzipielle Verteilung nicht. Die wenigen aus bohrlochgeophysikalischen Messungen abgeleiteten Permeabilitäten (vgl. Tabelle 3) lassen keine Aussage zum unterschiedlichen Verhalten der Permeabilitäten in Abhängigkeit der Bestimmungsmethode zu.

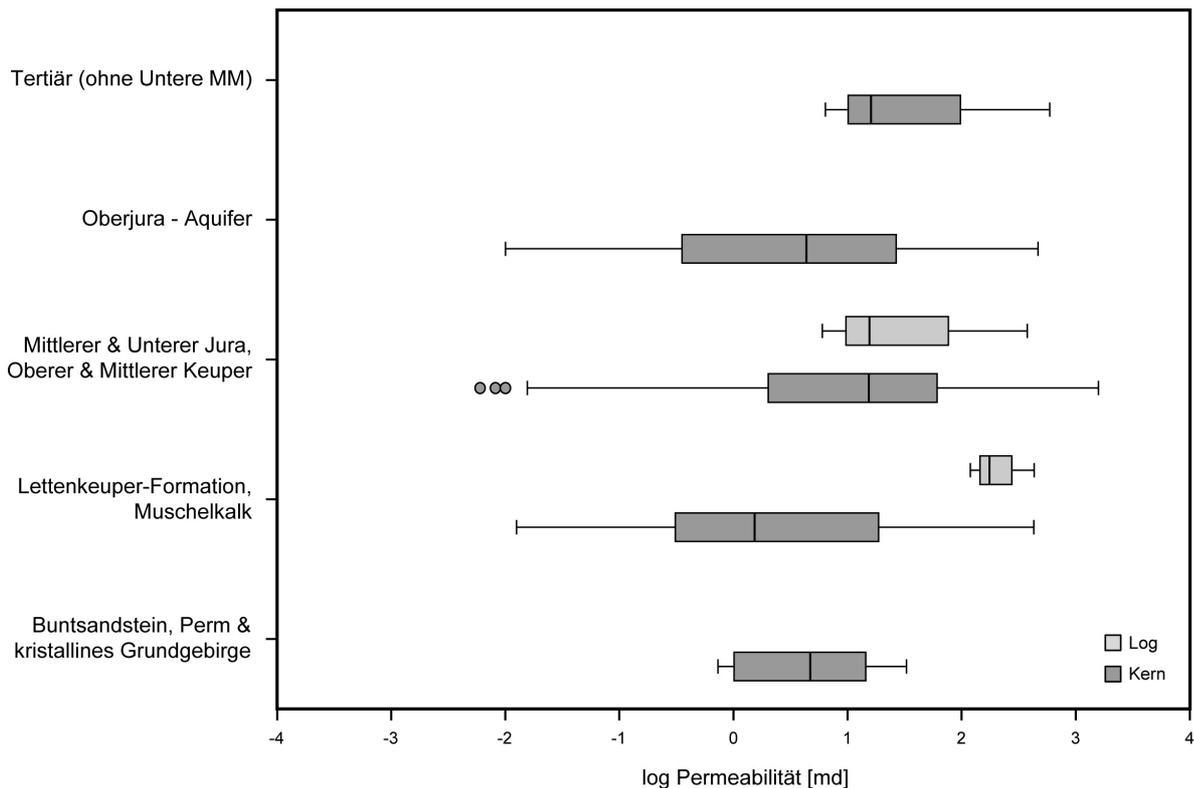


Abbildung 11: *Box-Whisker-Plots der Permeabilitäten im Südwestdeutschen Molassebecken differenziert nach Bestimmungsmethoden (Bohrkern oder Log).*

Abbildung 12 zeigt für die Region des Südwestdeutschen Molassebeckens den Zusammenhang zwischen Porositäten und Permeabilitäten. Es wurde für diese Darstellung lediglich auf eindeutige Untersuchungen aus Kerndaten zurückgegriffen. Die Streuung der Datenpunkte um die Regressionslinie ist – von wenigen Ausreißern abgesehen – gegenüber den Daten aus dem Oberrheingraben recht gering.

## 5 Allgemeine Anmerkungen

Hinsichtlich der Aussagekraft der Datenreihen muss festgehalten werden, dass vor allem für die Region des Oberrheingrabens der Datenumfang für die prätertiären Einheiten aus statistischer Sicht relativ gering ist. Dies gilt insbesondere für die ermittelten Permeabilitäten. Die Situation im Südwestdeutschen Molassebecken gestaltet sich diesbezüglich etwas besser, dennoch sind vor allem die Informationen zum Buntsandstein, Perm und kristallinen Grundgebirge im Hinblick auf die Verlässlichkeit von Aussagen auf der Basis der vorliegenden Verteilungsmuster unzureichend.

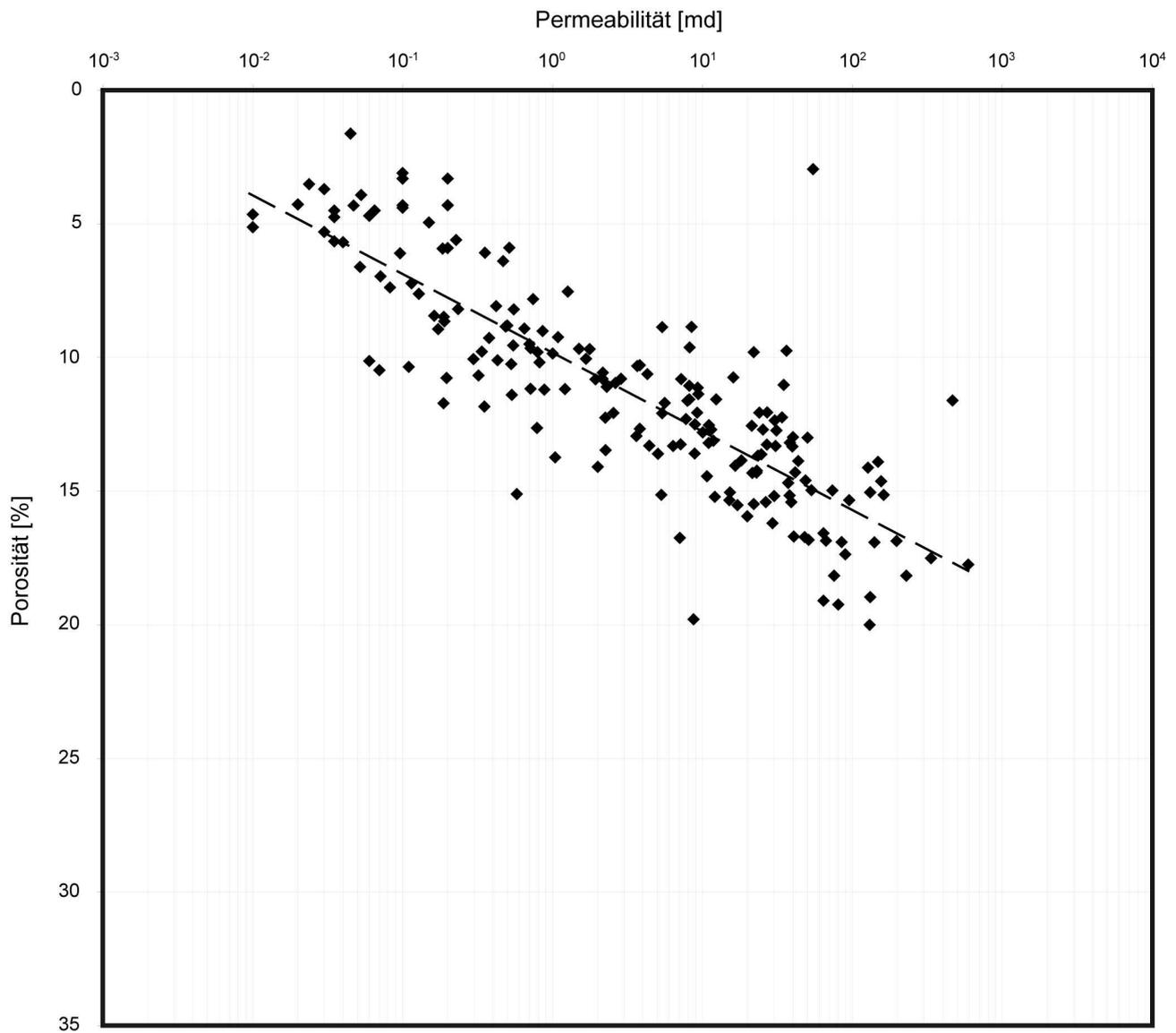


Abbildung 12: Korrelation zwischen Porositäten und Permeabilitäten aus Kernuntersuchungen im Südwestdeutschen Molassebecken.

Von diesem grundsätzlich einschränkenden Umstand abgesehen, deutet die Ausprägung der Box-Whisker-Plots in zahlreichen Formationen darauf hin, dass die jeweilig zugrunde liegende Datenreihe zum Teil von einer Normalverteilung (Porositäten) oder log-Normalverteilung (Permeabilitäten) abweicht.

Bei der Beurteilung der ermittelten Permeabilitäten (vgl. Münch et al., 2005) sollte zwischen im Labor durchgeführten Kernuntersuchungen und Daten aus bohrlochgeophysikalischen Messungen unterschieden werden.

## Dank

Unser Dank gilt der ExxonMobil Production Deutschland GmbH, der Gaz de France Suez Produktion Exploration Deutschland GmbH, der RWE Dea AG und der Wintershall Holding GmbH für die Erlaubnis zur Dateneinsicht. Weiterer Dank gilt dem „Service Géologique Régional Alsace“ des „Bureau de Recherches Géologiques et Minières“ (BRGM) in Straßburg für die freundliche Unterstützung und die Freigabe der französischen Daten. Ebenso bedanken möchten wir uns bei Herrn Dr. Brauner vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) als verantwortlichen Ansprechpartner zur Bereitstellung und Nutzung der Kohlenwasserstoff-Datenbank sowie für die freundliche Unterstützung bei der Dateneinsichtnahme.

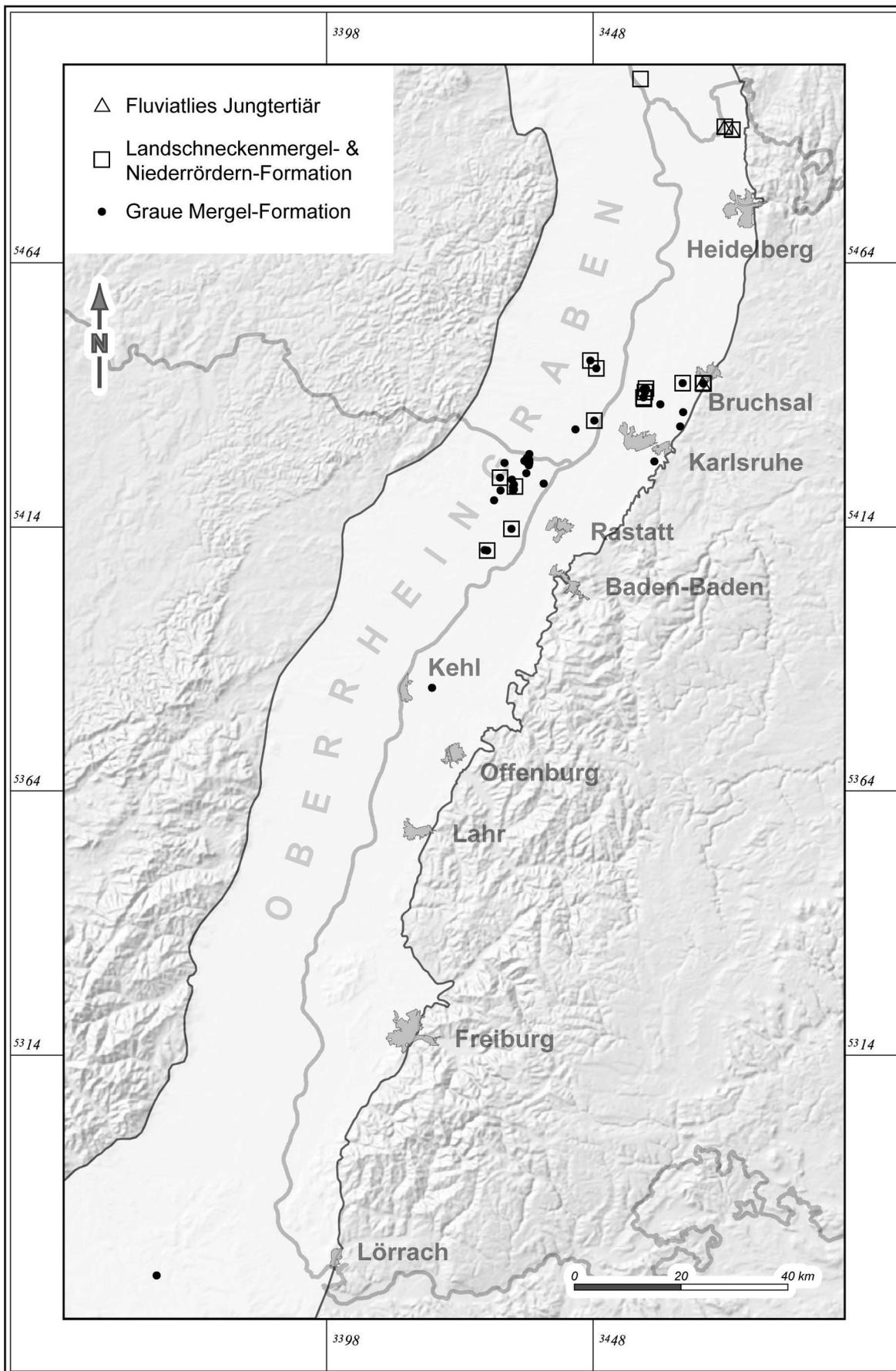
## Literatur

TUKEY, J. W. (1977): Exploratory data analysis. 1. Auflage, 688 Seiten; Addison-Wesley.

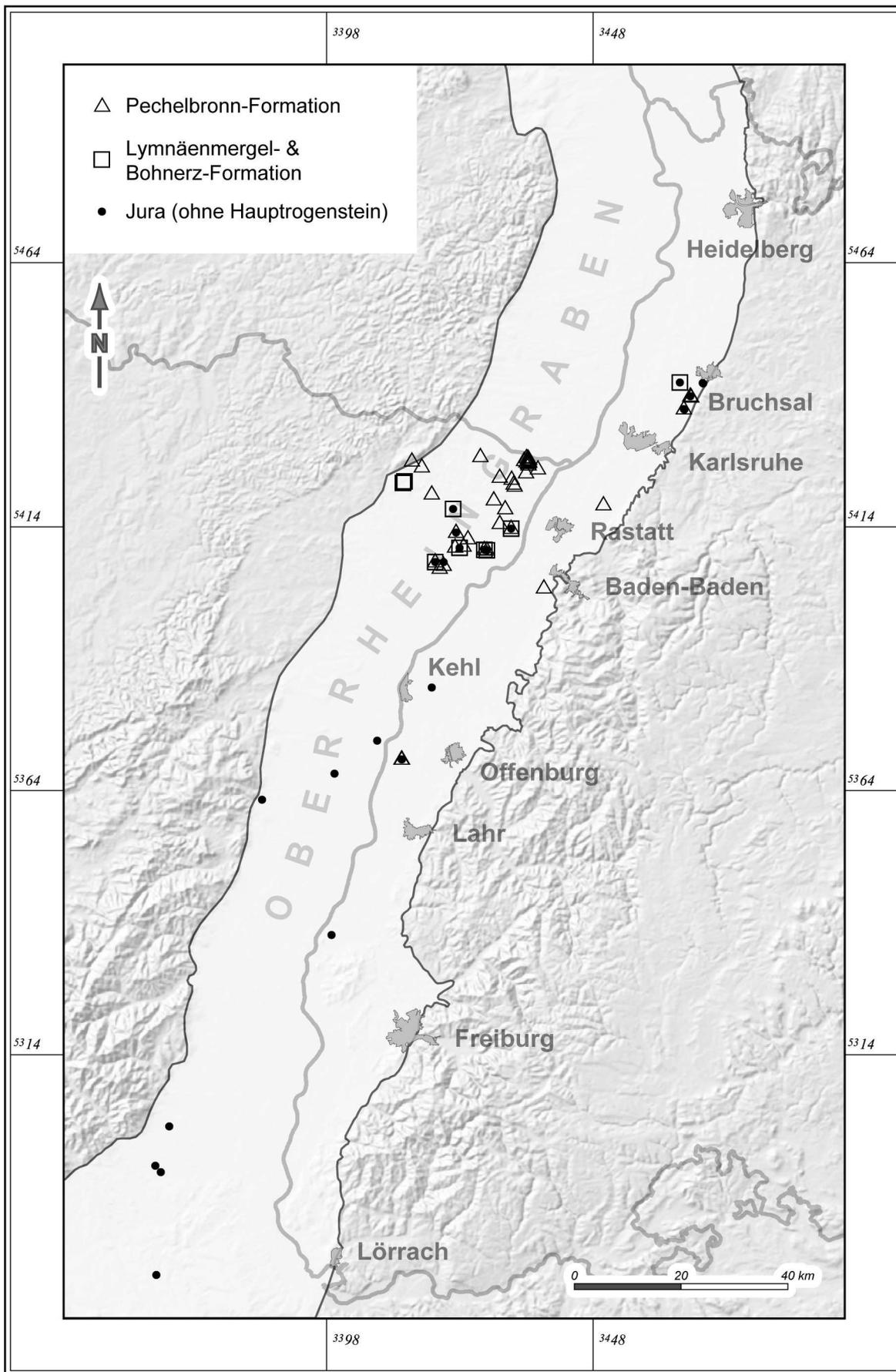
MÜNCH, W., SISTENICH, H. P., BÜCKER, CH. & BLANKE, T. (2005): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung im Oberreingraben. Eine Analyse der geologischen Bedingungen, der Bohr- und Fördertechnik sowie der Kraftwerkstechnik und Wirtschaftlichkeit. - VGB PowerTech, 10, 1 – 9.

Freiburg im Breisgau, 2. Juli 2010

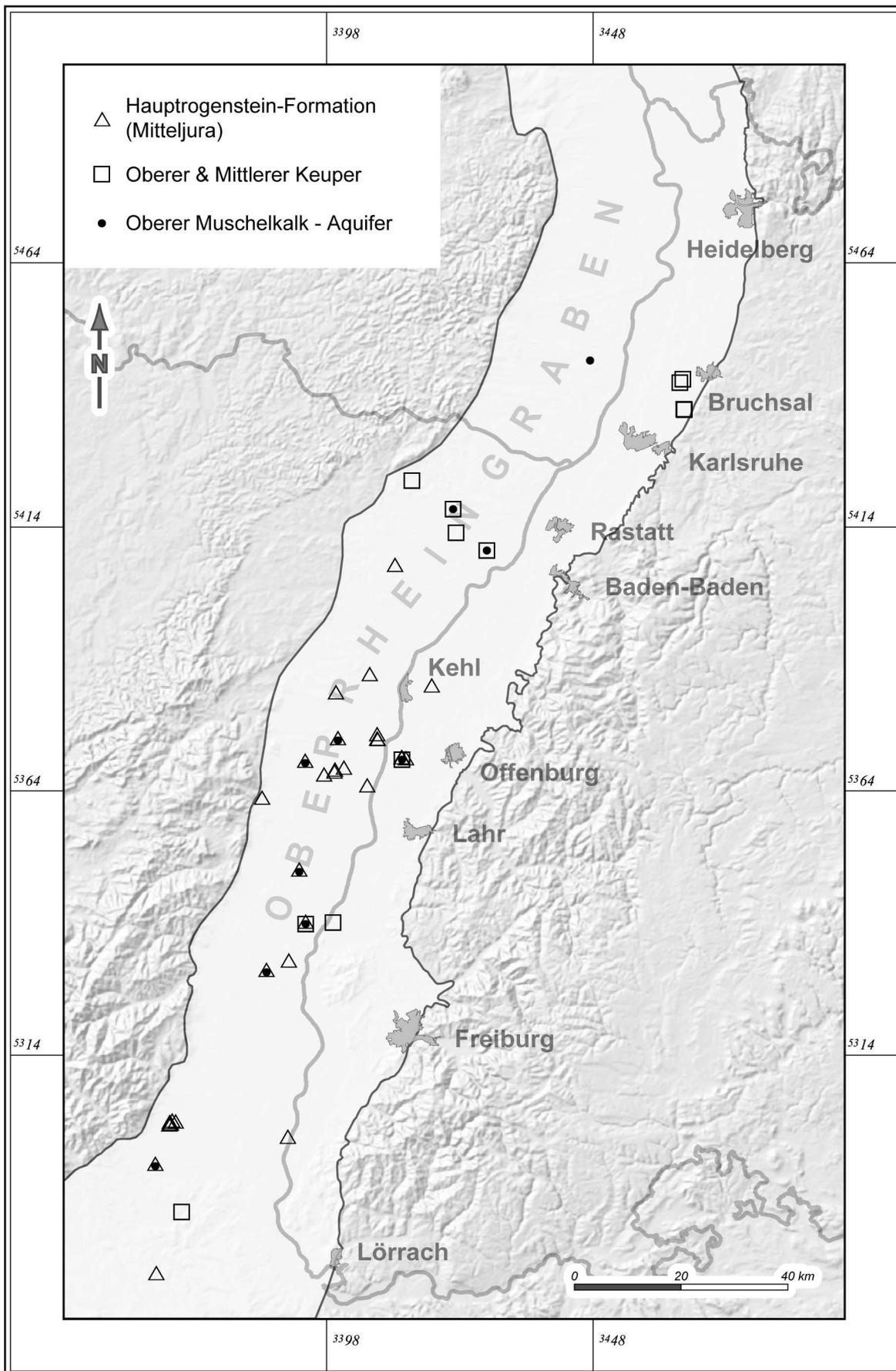
# Anhang



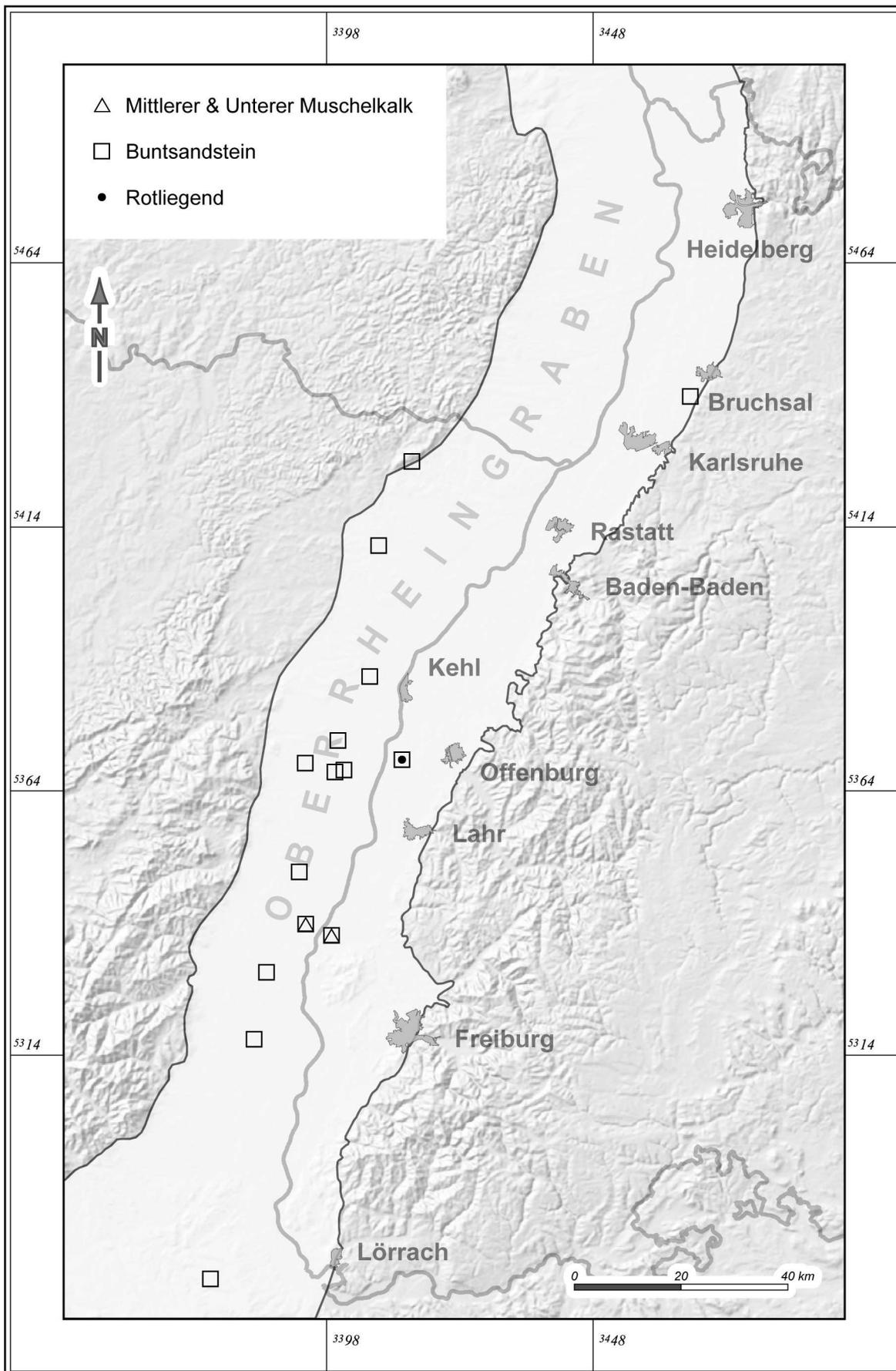
Anhang 1: Lage der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten im Oberreingraben (Teil 1).



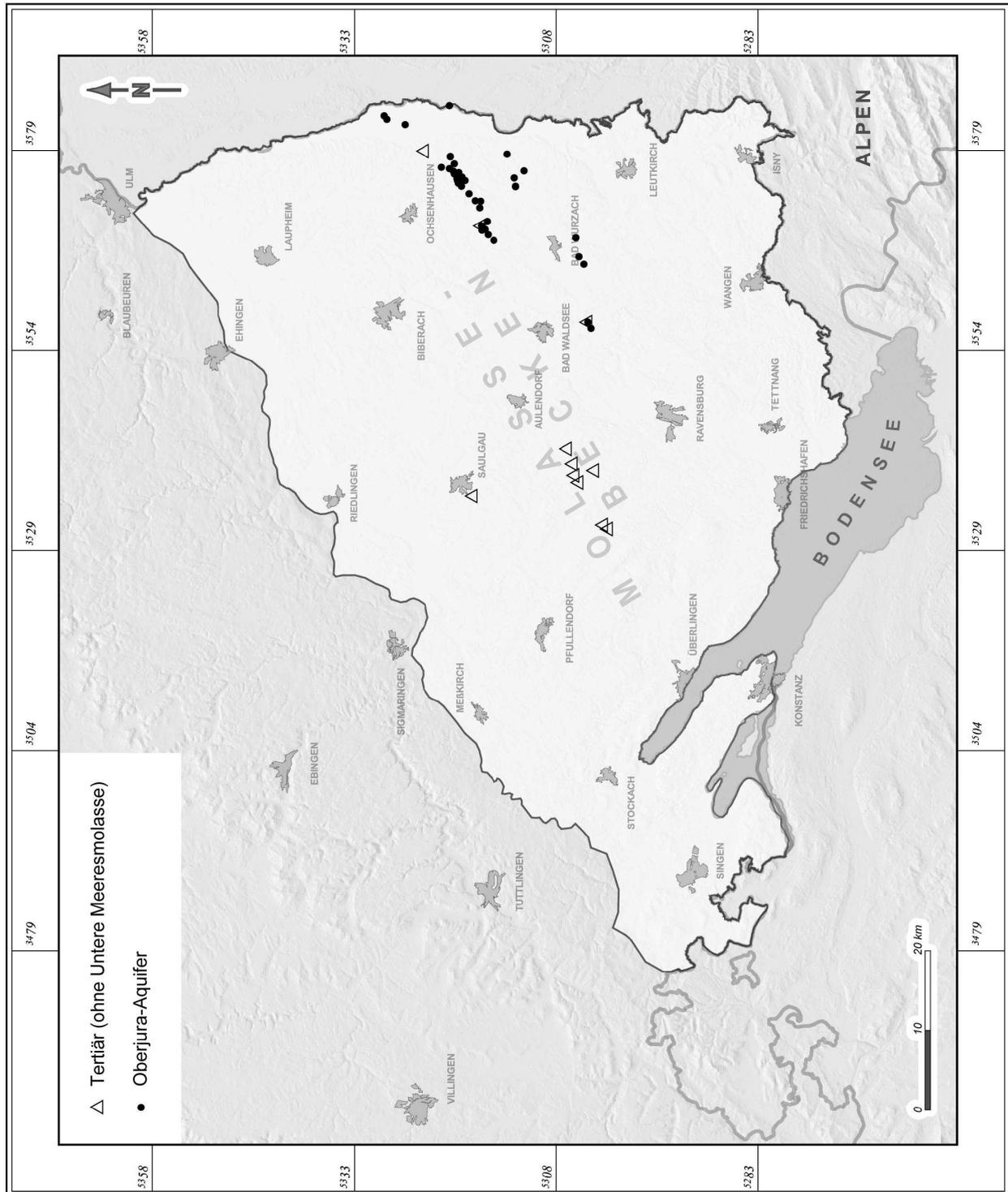
Anhang 2: Lage der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten im Oberheingraben (Teil 2).



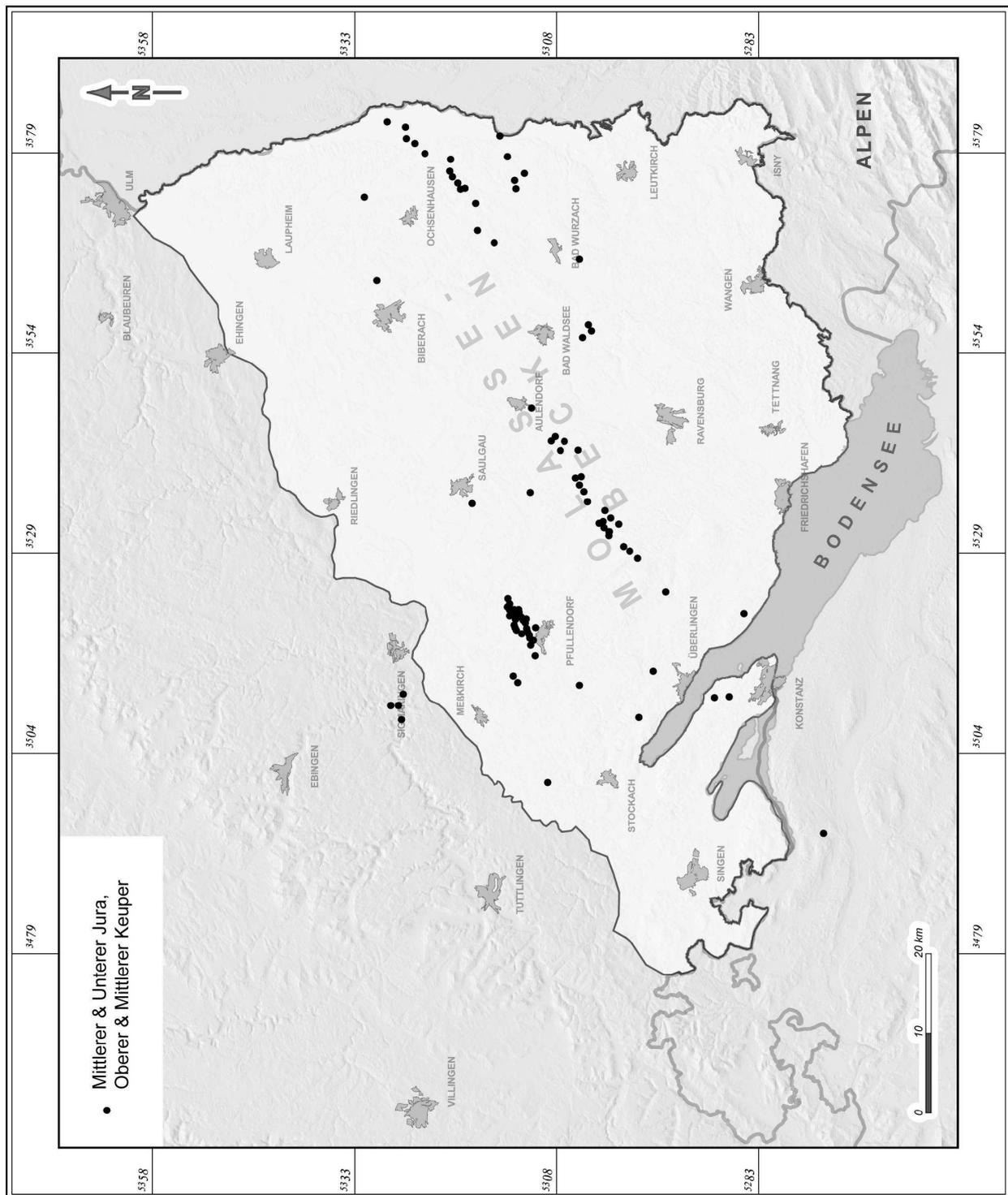
Anhang 3: Lage der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten im Oberrheingraben (Teil 3).



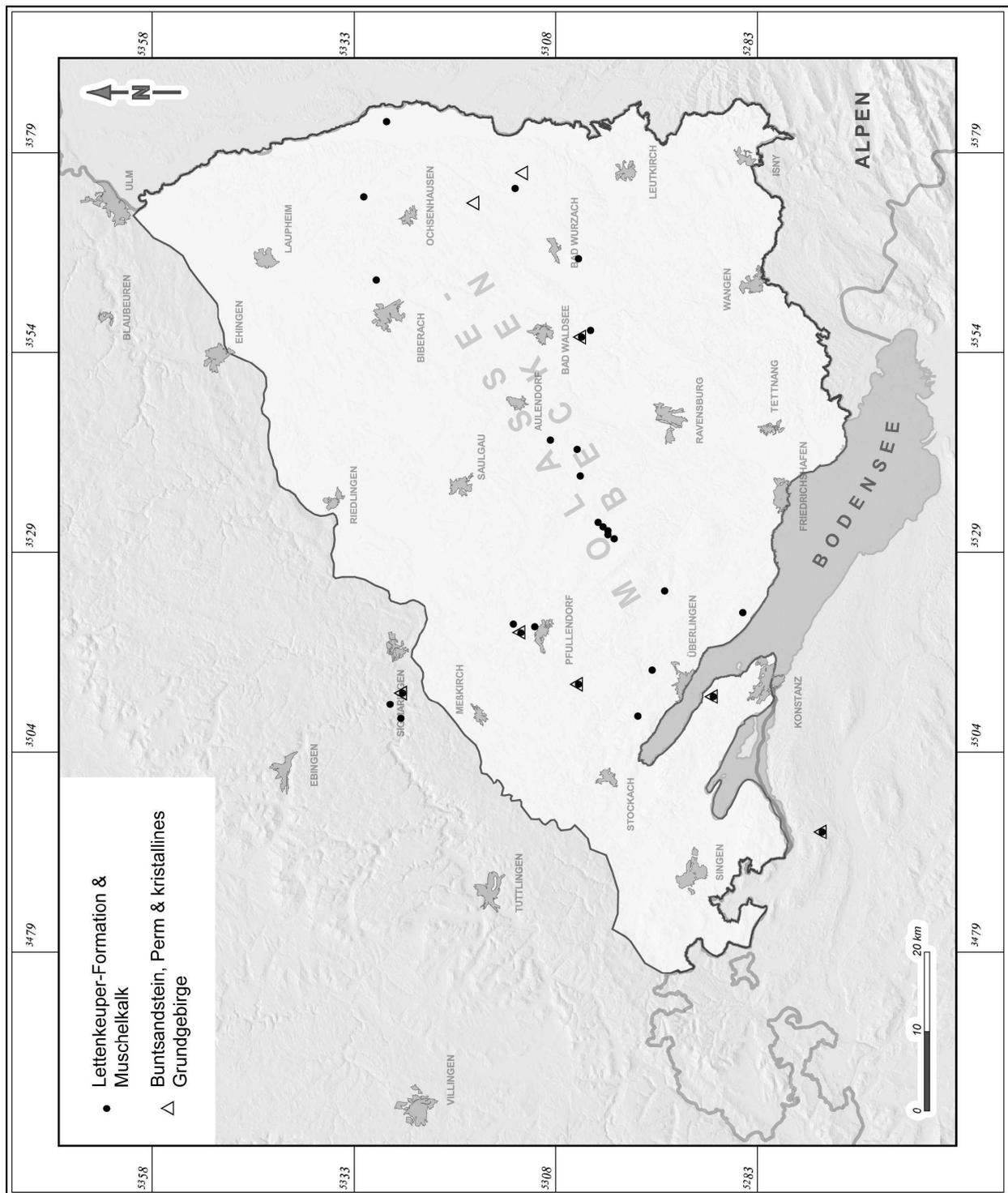
Anhang 4: Lage der Bohrungen mit Poro-Perm-Daten im Oberrheinigraben (Teil 4).



Anhang 5: Lage der Bohrungen mit Por-Perm-Daten im Molassebecken (Teil 1).



Anhang 6: Lage der Bohrungen mit Por-Perm-Daten im Molassebecken (Teil 2).



Anhang 7: Lage der Bohrungen mit Pro-Perm-Daten im Molassebecken (Teil 3).