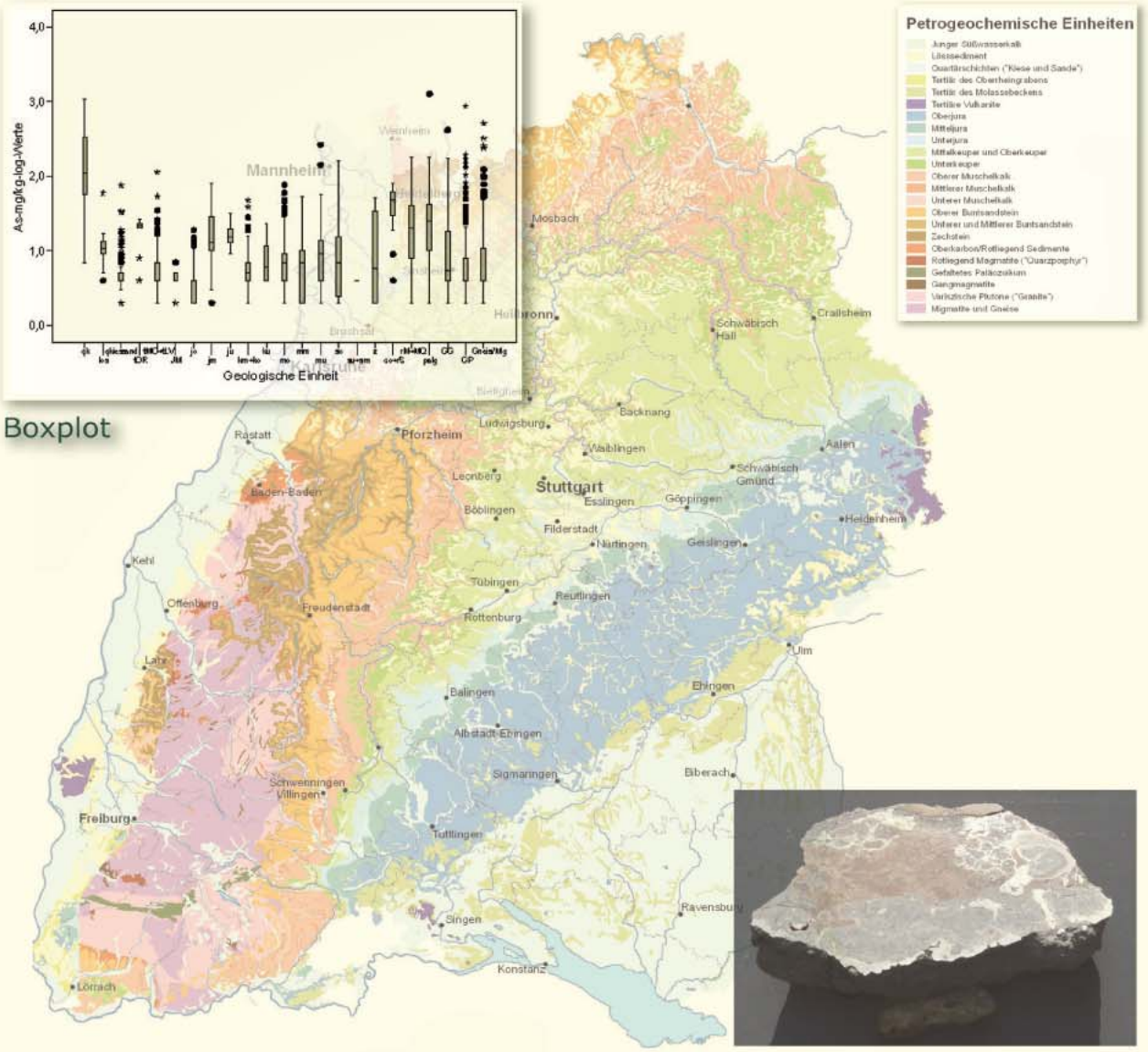
LGRB – Informationen 24
LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU

Geogene Grundgehalte (Hintergrundwerte) in den petrogeochemischen Einheiten von Baden-Württemberg



Baden-Württemberg
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Titelbild: Karte der petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg mit Boxplot für die Arsen-Gehalte in den petrogeochemischen Einheiten (links oben); Anschliff der Comptumbank im Mitteljura mit starker Pyrit-Vererzung (rechts unten).

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau

Geogene Grundgehalte (Hintergrundwerte) in den petrogeochemischen Einheiten von Baden-Württemberg

Bearbeiter:

MANFRED MARTIN

LGRB-Informationen	**24**	98 S.	62 Abb.	22 Tab.	40 Kt.	Freiburg i. Br. 2009

ISSN 1619-5329 LGRB – Informationen

Herausgeber: REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG – Abteilung 9
LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (LGRB)
Albertstraße 5, 79104 Freiburg i. Br.
Telefon: (0761) 208-3000
Telefax: (0761) 208-3029
E-Mail: abteilung9@rpf.bwl.de
Internet: http://www.rp-freiburg.de

Bearbeiter: Dr. Manfred Martin (RPF-LGRB)

Graphik: Dipl.-Ing. (FH) Joachim Schuff, Dipl.-Ing. (FH) Bettina Schmücking (alle RPF-LGRB)

Satz/Layout: Brigitte Wolf (RPF-LGRB)

Druck: NINO Druck GmbH, Im Altenschemel 21, 67435 Neustadt/Weinstraße

Ausgabe: Dezember 2009

© Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Vorwort

Chemische Elemente sind die Bausteine von Mineralen, aus denen sich wiederum die Gesteine zusammensetzen. Die Gesteine bilden die Erdkruste, aus ihnen gehen Böden hervor und diese beeinflussen zusammen mit den durchflossenen Gesteinen die hydrochemische Beschaffenheit des Grundwassers. Das Interesse an der geochemischen Zusammensetzung der Gesteine reicht daher über die Fragestellungen der Geowissenschaften hinaus.

Probenmaterial wird im Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg vornehmlich für die geologische und rohstoffgeologische Landesaufnahme sowie für Gutachten, Beratungen und Veröffentlichungen analysiert. Der gesamte vorhandene Datenbestand wurde für den vorliegenden Bericht kritisch gesichtet und neu ausgewertet. Fremdanalysen wurden nicht verwendet. Deshalb liegen nur Daten zugrunde, die nach einheitlichen Gesichtspunkten zustande gekommen sind. Das betrifft vor allem Probenahme, stratigraphische Einordnung, Analyseverfahren und Auswertung. Die Parameter wurden hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit zu stratigraphisch abgegrenzten geochemischen Einheiten ausgewertet. Für jeden Parameter werden zwei Kartendarstellungen, ein Boxplot und eine Tabelle vorgelegt.

Bei der Auswahl der 20 dargestellten Elemente und Oxide wurde deren Bedeutung für Bodenfunktion, Rohstoffqualität und Umweltrelevanz berücksichtigt. Für diese Themenbereiche lassen sich aus den Darstellungen wertvolle Abschätzungen für den Gehalt an chemischen Stoffen in einem bestimmten Gesteinsabschnitt vornehmen. Die ermittelten Werte sind anthropogen nicht beeinflusst. Darauf wurde bei der Probenauswahl besonders geachtet.

Der vorgelegte Bericht wird Abschätzungen von Gesteinsgehalten bzw. die Einordnung und Bewertung von Analysenergebnissen erleichtern; er soll die Einzelfall-bezogene Analyse vor Ort jedoch nicht ersetzen. Zu Auswirkungen von Gesetzen und Regelwerken auf die Verwertbarkeit von Gesteinen können Antworten gegeben und die Richtung aufgezeigt werden, in der vertiefte Untersuchungen sinnvoll sind.

Mit diesem Bericht werden die flächenhaften geologischen Informationen über das Land um einen wichtigen Themenbereich erweitert.

Watzel

Prof. Dr. Ralph Watzel
Abteilungsdirektor

Inhalt

Vorwort 3
1 Einleitung 7
2 Bisherige Untersuchungen 7
3 Definition petrogeochemischer Einheiten 8
4 Datenerhebung und Datenhaltung 12
4.1 Probenahme 12
4.2 Analytik 13
4.3 Datenhaltung 13
4.4 Statistische Auswertung 14
5 Ergebnisse der Auswertung und Interpretation 15
5.1 Ergebnisse 15
5.1.1 Aluminium (als Al_2O_3) 16
5.1.2 Arsen (As) 20
5.1.3 Barium (Ba) 24
5.1.4 Calcium (als CaO) 28
5.1.5 Chrom (Cr) 32
5.1.6 Kupfer (Cu) 36
5.1.7 Eisen (als Fe_2O_3) 40
5.1.8 Kalium (als K_2O) 44
5.1.9 Magnesium (als MgO) 48
5.1.10 Molybdän (Mo) 52
5.1.11 Natrium (als Na_2O) 56
5.1.12 Nickel (Ni) 60
5.1.13 Phosphor (als P_2O_5) 64
5.1.14 Blei (Pb) 68
5.1.15 Schwefel (S) 72
5.1.16 Silizium (als SiO_2) 76
5.1.17 Thorium (Th) 80
5.1.18 Uran (U) 84
5.1.19 Vanadium (V) 88
5.1.20 Zink (Zn) 92
5.2 Interpretation 96
6 Schlussfolgerungen und Ausblick 96
Literatur 97

1 Einleitung

Kenntnisse des Chemismus der Gesteine sind gefragt, wo es um die Nutzung mineralischer Rohstoffe, Standorte der Pflanzen- und Tierproduktion oder um Fragen des Umweltmonitorings geht.

Für 20 Elemente und Oxide und für 23 petrogeochemische Einheiten werden orientierende Kennwerte der geogenen Grundgehalte angegeben.

Der geogene Grundgehalt wird definiert als natürlicher, bildungsbedingter Stoffbestand des Gesteins inklusive eventuell vorhandener Vererzungen. Der Hintergrundgehalt eines Gesteins oder Bodens setzt sich zusammen aus dem geogenen Grundgehalt und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge.

Durch entsprechende Probenselektion wurde sichergestellt, dass die mitgeteilten geochemischen Gehalte ausschließlich geogene Grundgehalte repräsentieren. Sie sind wegen des Fehlens weiterer Stoffeinträge zahlenmäßig den Hintergrundwerten gleichzusetzen.

2 Bisherige Untersuchungen

Im Rahmen der Rohstoffprospektion wurden seit den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts Gesteine, Böden, Bachsedimente, Wässer und Pflanzen analysiert, um Kenntnisse über mögliche Lagerstätten nutzbarer Mineralien zu erhalten. Diese Arbeiten bezogen sich zunächst auf eng begrenzte Gebiete und einen eingeschränkten Umfang an Elementen. Mit dem Aufkommen moderner, leistungsfähiger Analysenmethoden und Fortschritten in der Datenverarbeitung wurde es möglich, großflächig und auf zahlreiche Elemente gleichzeitig zu untersuchen.

Seit 1977 wurde durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe eine systematische geochemische Multielementuntersuchung des Gesamtgebietes der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt. Um Aussagen über lagerstättenhöffige Gebiete und großräumige Belastungen treffen zu können, wurden stellvertretend für die anderen geologischen Kompartimente Wässer und Bachsedimente analysiert. Neben der Lagerstättensuche standen erstmals auch Fragen der Umweltbelastung im Zentrum des Interesses. Die Ergebnisse wurden im Geochemischen Altlas Bundesrepublik Deutschland dokumentiert (Fauth, H. et al. 1985). Parallel zur Einführung verschiedenster Richt- und Grenzwerte in Gesetzen, Verordnungen und sonstigen Regelwerken wurden in der Folge meist auf Ebene der Bundesländer für Wasser, Boden und gelegentlich auch für Gesteine flächenhafte Erhebungen geochemischer Hintergrundwerte durchgeführt.

Diese sind für das Kompartiment Boden im Jahr 2003 durch die Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz LABO und für Wasser in 2004 in eine bundesweite Übersicht eingeflossen (Kunkel et al. 2004). Der geochemische Atlas von Europa (Salminen 2005) beinhaltet keine Gesteinswerte, seine Datenbasis für Unterböden verzeichnet in Baden-Württemberg insgesamt nur acht Probenpunkte.

Für Hintergrundwerte in Gesteinen steht eine solche Zusammenfassung noch aus. Einzelne Bundesländer verfügen bereits über eine Zusammenstellung gesteinsbezogener geochemischer Kennwerte. Hier sei besonders auf den Geochemischen Atlas des Freistaates Sachsen (1996) und die CD-ROM „Digitaler Atlas Hintergrundwerte“ des Niedersächsischen Landesamts für Bodenforschung (1999) verwiesen.

In Baden-Württemberg existierte eine landesweite, lithologisch und stratigraphisch differenzierte Zusammenstellung von Hintergrundwerten in Gesteinen bislang nicht.

Der Grund hierfür ist vornehmlich in der geringen vorhandenen Datenbasis zu suchen. In bisherigen Arbeiten wurden meist nur einzelne oder einige wenige Elemente behandelt (Scholl, W. 1959; Walk, H. 1982 sowie Grupe, M. 1989), zudem war die stratigraphische und räumliche Spannweite solcher Untersuchungen meistens gering. In zahlreichen weiteren Untersuchungen wurden Bodenproben im Hinblick auf die Schwermetallgehalte ihrer Ausgangsgesteine untersucht, aber nicht die Gesteine selbst. Schwermetallgehalte in Gesteinen lassen sich jedoch nicht ohne Weiteres aus den Gehalten in Böden ableiten; durch bodenbildende Prozesse und Stoffumlagerungen kommt es bei zahlreichen Elementen zu Ab- oder Anreicherungen. Im sedimentären Bereich ist zudem oft die genaue stratigraphische Zuordnung der Bodenausgangsgesteine erschwert oder nicht möglich.

Eine Vergleichbarkeit der Detailuntersuchungen untereinander ist nicht zuletzt wegen methodischer

Unterschiede nur in stark eingeschränktem Maße gegeben. Lediglich für das Stadtgebiet und den Großraum von Stuttgart lagen breiter angelegte Studien zum Elementinhalt der dort auftretenden Schichtenfolge vor (JAHN et al. 1992, STAHR, K. 1992 und LOTZE, T. 1999).

3 Definition petrogeochemischer Einheiten

Die Beschreibung der geogenen Grundgehalte in Gesteinen Baden-Württembergs erfolgt getrennt für 23 petrogeochemische Gesteinseinheiten. Die Verbreitung der petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg geht aus Abbildung 3-1 hervor.

Petrogeochemische Einheiten sind spezielle geologische Einheiten, die – abhängig vom Bearbeitungs- und Darstellungsmaßstab – innerhalb gewisser Grenzen als einheitlich hinsichtlich Petrographie, Genese und Stoffinhalt betrachtet werden können. Dem Bearbeitungsmaßstab entsprechend konnte nur eine begrenzte Anzahl von petrogeochemischen Einheiten differenziert ausgewiesen werden. Ausgehend von 102 Karteneinheiten der digital vorliegenden geologischen Übersichtskarte von Baden-Württemberg im Maßstab 1 : 300 000 wurden in einem ersten Schritt 23 petrogeochemische Einheiten gebildet. Hierfür wurden geologische Karteneinheiten derart zusammengefasst, dass die neu gebildeten petrogeochemischen Einheiten im Bearbeitungsmaßstab weitgehend einheitliche geochemische Verhältnisse erwarten ließen. Die Tab. 3-1 stellt dar, welche Karteneinheiten zu petrogeochemischen Einheiten zusammengefasst wurden.

Die nachfolgende Beschreibung listet die wichtigsten Gesteinstypen auf. Zur Beurteilung der Auftretenshäufigkeit sind in Klammern die Flächenanteile angegeben, die die jeweiligen petrogeochemischen Einheiten an der Landesfläche von Baden-Württemberg einnehmen.

Das **Quartär** ist in die Einheiten junger Süßwasserkalk (0,06 %), Lösssediment (10,4 %) und Quartärschichten (25,9 %) gegliedert. Junger Süßwasserkalk umfasst pleistozäne bis holozäne (Sinter-) Kalkausfällungen, die auch als Travertin und Kalktuff bezeichnet werden. Bekanntester Vertreter ist der Stuttgart-Travertin. Lösssediment beinhaltet alle Lösssedimente, namentlich Löss und Lösslehm. Unter Quartärschichten zusammengefasst sind alle übrigen quartären Lockersedimente, vornehmlich Kiese und Sande des Oberrheingrabens und des Alpenvorlands, sonstige Bach- und Flussablagerungen sowie Umlagerungssedimente.

Das **Tertiär** besteht aus den Einheiten Tertiär des Oberrheingrabens (0,19 %), Tertiär des Molassebeckens (4,31 %) und tertiäre Vulkanite (0,66 %). Das Tertiär des Oberrheingrabens beinhaltet die tertiären Sedimente des Oberrheingrabens, welche im Wesentlichen aus Mergeln und Tonsteinen, untergeordnet aus Sanden und Kalken bestehen. Das Tertiär des Molassebeckens umfasst die sandigen bis tonigen, teilweise auch kalkigen Sedimente des Tertiärs im Alpenvorland, im Schichtstufenland, im Übergang zur Schwäbischen Alb und im Übergang zum Oberrheingraben. Tertiäre Vulkanite sind die jüngeren Vulkangesteine von Kaiserstuhl, Hegau, Mittlerer Alb, Katzenbuckel, Steinsberg u. a.

Der **Jura** wird traditionell in Ober- (10,5 %), Mittel- (2,34 %) und Unterjura (2,92 %) gegliedert. Von ziemlich mächtigen Kalksteinserien im Oberjura mit nur wenig Mergel-Zwischenlagen reicht das petrographische Spektrum zu Kalksteinen, Mergeln, Tonsteinen, Eisenoolithen und Sandsteinen der tiefer gelegenen Jura-Abteilungen.

Die **Trias** wurde in Mittel- und Oberkeuper (10,2 %), Unterkeuper (3,80 %), Oberen (6,39 %), Mittleren (1,61 %) und Unteren Muschelkalk (1,96 %), Oberen Buntsandstein (4,26 %) sowie Unteren mit Mittlerem Buntsandstein (2,08 %) gegliedert. Mittel- und Oberkeuper wurden zusammengefasst und zeichnen sich durch Sandsteinablagerung sowie Mergel-, Karbonat- (Kalk- und Dolomitstein) und Sulfathorizonte aus. Im Unterkeuper treten die gleichen Gesteinsarten auf; jedoch dominieren die tonreichen Sedimente, während Sandsteine mengenmäßig zurücktreten. Im dreigeteilten Muschelkalk nimmt der Karbonatanteil vom Oberen zum Unteren Muschelkalk ab. Geochemisch bedeutsam ist die Salinarformation im Mittleren Muschelkalk mit Steinsalz und Sulfatgesteinen. Der Obere Buntsandstein setzt sich aus den Tonsteinen der Röttone-Formation und dem violettroten, glimmerreichen Plattensandstein zusammen. Der Mittlere und Untere Buntsandstein besteht aus etwas gröberen, weiß bis rötlich gefärbten Sandsteinabfolgen und reicht stratigraphisch bis zum Eck-Horizont.

Die Schichten von **Perm** und **Oberkarbon** bestehen aus dem Zechstein (1,96 %), Oberkarbon / Rotliegend-Sedimenten (0,45 %) und den im Wesentlichen ins Rotliegend gestellten permischen Quarzporphyren (0,19 %). Der Zechstein besteht aus Sandsteinen, Arkosen, Fanglomeraten und wenig

Geochemische Karte von Baden-Württemberg

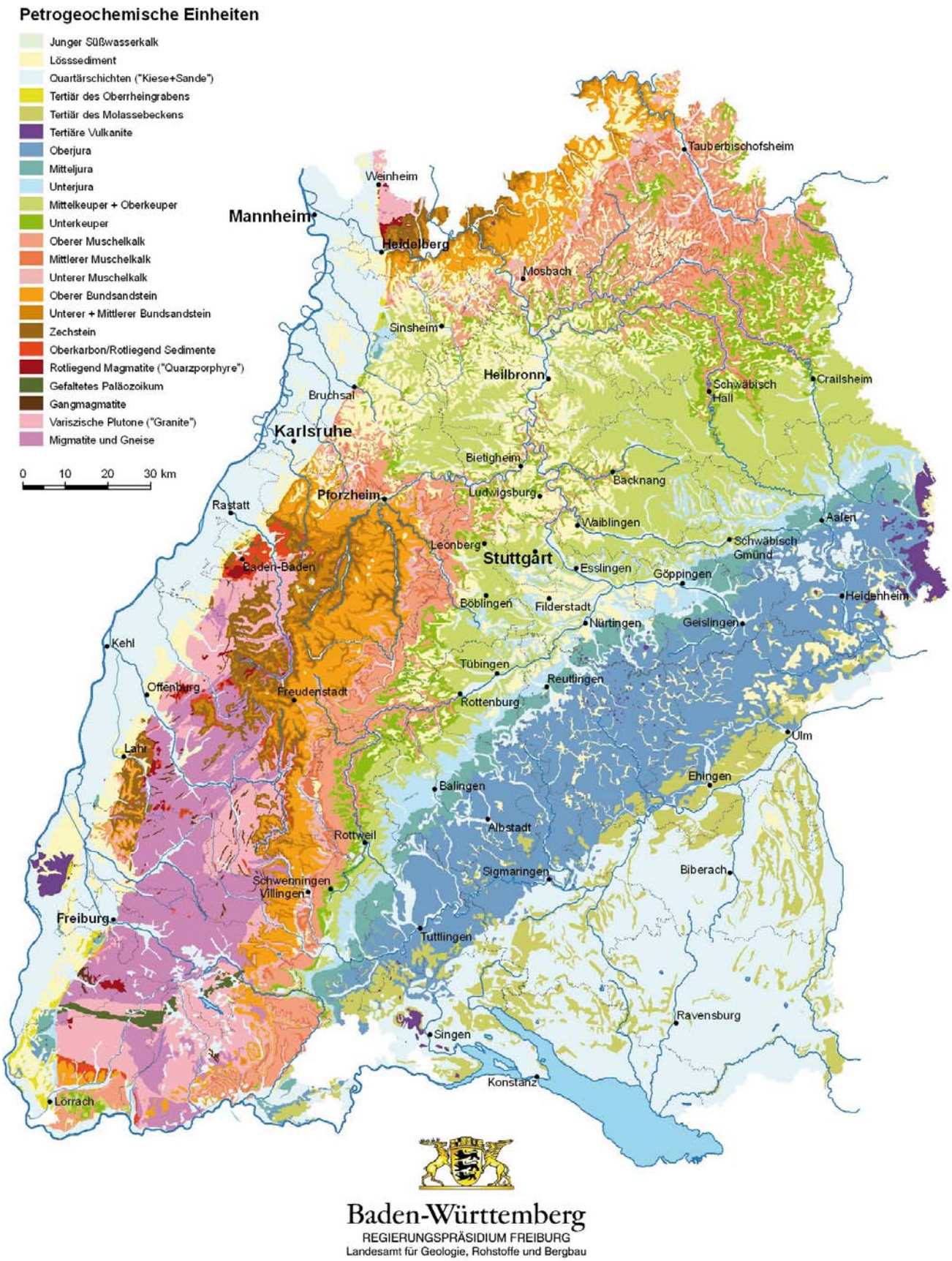


Abb. 3-1: Karte der petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Tab 3-1: Ableitung der petrogeochemischen Einheiten aus Karteneinheiten der geologischen Karte 1 : 300 000.

Petrogeochemische Einheit	Abkürzungen der Einheit lt. Schlüsselliste	Namen und Kürzel der dazugehörigen Einheiten lt. Karte 1 : 300 000
Junger Süßwasserkalk	qk	Stuttgart-Travertin (qkS) Junger Süßwasserkalk (qk)
Lösssediment	los	Lösssediment (los) Lösssediment auf Würm-Schotter (los/Wg)
Quartärschichten („Kiese + Sande“)	qk	Moorbildung (qht) Hochwassersediment (fh) Hangschutt (qu) Flugsande (fss) Würm-Schotter (Wg) Würm-Moränensediment (Wm) Riß-Beckensediment (Rb) Riß-Schotter (Rg) Riß-Moränensediment (Rm) Goldshöfe-Sand (GO) Älterer Flussschotter (ga) Mindel-Deckenschotter (Mg) Mindel-Moränensediment (Mm) Haslach-Deckenschotter (Hg) Günz-Deckenschotter (Gg) Donau-Deckenschotter (Dg) Umlagerungssediment mit Feuerstein (qumF‘)
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	Fluviatiles Jungtertiär (tF) Jungtertiärer Höhenschotter (tH) Jungtertiäres Seesediment (tS) Urbrenz-Sand (BR) Tüllingen-Formation (tTL) Niederrödern-Formation (tNS) Graue Mergel-Formation (tGS) Küstenkonglomerat-Formation (tK) Bohnerz-Formation (tBO)
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	Obere Süßwassermolasse, OSM (tOS) Konglomeratische OSM (KGO) Jüngere Juranagelfluh (J2) OSM-Süßwasserkalke (SKO) Brackwassermolasse (tBM) Obere Meeresmolasse (tOM) Untere Süßwassermolasse (tUS)
Tertiäre Vulkanite	JM	Basalttuff- und Basalt (B‘) Deckentuff (Df) Karbonatit (K‘) Phonolith (Ph‘) Essexit (E‘) Limburgit (L‘) Tephrit (T‘) Bunte Trümmermassen (XT) Ries-Suevit (XS)
Oberjura	jo	Massenkalk-Formation (joM) Liegende und Hangende Bankkalk-Formation (ki4-ti1) Lacunosamergel-, Untere und Obere Felsenkalk-Formation (ki1-ki3) Impressamergel- und Wohlgeschichtete Bankkalk-Formation (ox1-ox2) Kandern-, Korallenkalk-, und Nerineenkalk-Formation (oxKA-oxN)
Mitteljura	jm	Mitteljura (jm) Wedelsandstein- bis Ornatenton-Formation (bj1-cl) Eisensandstein-Formation (al2E) Opalinuston-Formation (al1)

Petrogeochemische Einheit	Abkürzungen der Einheit lt. Schlüsselliste	Namen und Kürzel der dazugehörigen Einheiten lt. Karte 1 : 300 000
Unterjura	ju	Unterjura (ju) Trias und Jura in Störungszonen (tr-j)
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	Oberkeuper (ko) Mittelkeuper (km) Bunte Mergel, Stubensandstein, Knollenmergel, Schilfsandstein, Gipskeuper: km3s-km5, km3u, km1-km3, km2, km1
Unterkeuper	ku	Unterkeuper (ku)
Oberer Muschelkalk	mo	Oberer Muschelkalk (mo) Mittlerer und Oberer Muschelkalk (mm-mo) Muschelkalk (m)
Mittlerer Muschelkalk	mm	Mittlerer Muschelkalk (mm)
Unterer Muschelkalk	mu	Unterer Muschelkalk (mu)
Oberer Buntsandstein	so	Oberer Buntsandstein (so)
Unterer + Mittlerer Buntsandstein	su + sm	Unterer Buntsandstein (su) Mittlerer Buntsandstein (sm)
Zechstein	z	Zechsteindolomit-Formation (zD) Tigersandstein-Formation bis Unterer Buntsandstein (zT-su) Tigersandstein-Formation bis Mittlerer Buntsandstein (zT-sm)
Oberkarbon-/ Rotliegend-Sedimente	co + rS	Rotliegend (r) Oberrotliegend (ro) Unterrotliegend (ru) Oberkarbon (co) Stefan-Schichten (cst) Konglomerat-Formation (cK)
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyre“)	rM + MQ	Rotliegend-Quarzporphyr (rQ) Münstertal-Quarzporphyr
Gefaltetes Paläozoikum	palg	Badenweiler-Lenzkirch-Schiefer-Gruppe (aBL) Spießhorn-Parametamorphite und Schlächtenhaus-Schiefer-Formation (gSP-aS) Baden-Baden-Schiefer-Gruppe (aBB) Protocanitengrauwacken-Formation und Vulkanit-Komplex (cdP-CVK) Konglomerat-Formation (cK)
Gangmagmatite	GG	Dunkler Gangmagmatit (GGd) Heller Gangmagmatit (GGh)
Variszische Plutone („Granite“)	GP	Granitplutone (GRP) Randgranit (GRA) Diorit-Gabbro-Komplex (GDG) Weschnitz-Pluton (GoWP) Erzenbach-Komplex (axE) Granodiorit des Unteren Wehratals (GoW)
Migmatite + Gneise	MI, gn, gSG, gMR, gNG, gMK, gBO	Paragneis (pg‘) Leukokrater Gneis (gl‘) Amphibolit (am‘) Flasergneis (gf‘) Wiese-Wehra-Formation (diW) Schiefer der Weinheim-Waldmichelbach-Einheit (gWWs‘) Migmatit-Komplex (MI) Tektonitzone (TZ)

Karbonaten. Der hierzu gehörende Tigersandstein wurde früher dem Unteren Buntsandstein zugerechnet.

Zu Rotliegend / Oberkarbon-Sedimenten zählen vornehmlich Arkosen, Sandsteine und Fanglomerate. Hiervon zu unterscheiden sind die Rotliegend-Magmatite, die petrographisch relativ einheitlich als „Quarzporphyre“ bezeichnet werden und als Decken und Stöcke vom Odenwald entlang des Oberrheingrabens bis zum Südschwarzwald verbreitet sind. Wegen der petrographischen Übereinstimmung werden hierzu auch die älter datierten Münstertal- und Stockberg-Quarzporphyre gezählt.

Das **nichtkristalline Grundgebirge** ist durch das gefaltete Paläozoikum (0,20 %) vertreten. Hierunter sind vornehmlich Gesteine aus der Badenweiler-Lenzkirch-Zone wie Konglomerate, schwach metamorphe Vulkanite, Tonsteine und Schiefer zu verstehen. Ein weiterer hierzu zählender Gesteinskomplex sind die sog. Alten Schiefer von Baden-Baden und Gaggenau.

Das **kristalline Grundgebirge** schließlich wurde gegliedert in Gangmagmatite (0,13 %), variszische Plutone (3,82 %) sowie Migmatite und Gneise (4,95 %).

Gangmagmatite sind alle magmatisch entstandenen Gesteine, die Gänge bilden. Verbreitet treten im Schwarzwald Granitporphyr, Ganggranit, Aplitgranit und Rhyodazit auf. Im Südschwarzwald haben die dunklen Lamprophyre ihr Hauptverbreitungsgebiet; sie weisen meist hohe Gehalte an sonst eher seltenen Elementen auf.

Die variszischen Plutone beinhalten überwiegend die schwarzwälder Granitplutone, ferner Granodiorite, Syenite, Durbachit und den Diorit-Gabbro-Komplex des Odenwalds.

Unter Migmatiten und Gneisen sind alle metamorphen Gesteine des Schwarzwalds und des Odenwalds zusammengefasst. Gneise sind metamorphe Gesteine mit wesentlichen Anteilen von Feldspat, meist auch mit Quarz, Glimmer, Amphibol oder Pyroxen. Migmatite zeigen neben metamorphen Texturen Anzeichen teilweiser Aufschmelzung. Neben vielen Gneisen und Migmatiten mit im weiteren Sinne granitischer Zusammensetzung sind hier auch basische bis ultrabasische Gesteine mit SiO_2-Gehalten unter 45 % vertreten. Hierzu gehören Amphibolite, Pyroxenite und Serpentinite. Sie sind z. B. reich an basaltophilen Elementen wie Chrom und Nickel.

Unter Berücksichtigung des Darstellungsmaßstabs wurden solche geologischen Einheiten zusammengefasst, die landesweit einheitlich auskartiert sind und im Zielmaßstab abgebildet werden können. Dabei sollte sich eine lückenlose Darstellung der Landesfläche ergeben. Die Zuordnung der Proben zu den jeweiligen Karteneinheiten musste detailliert bekannt und in der Labordatenbank dokumentiert sein. Als weiteres wichtiges Kriterium sollten geologische Einheiten, von denen bereits großflächig erhöhte Gehalte an einzelnen Elementen bekannt waren, immer nur einer petrogeochemischen Einheit angehören.

Die meisten petrogeochemischen Einheiten sind hinsichtlich ihrer lithologischen Zusammensetzung relativ homogen zusammengesetzt und von den anderen Einheiten unter diesem Aspekt gut unterscheidbar. Lediglich im Keuper wechseln auch die Hauptgesteinstypen Karbonatgestein, Mergelstein, Tonstein, Sandstein und Sulfatgestein bereits über kurze vertikale Distanz. Hier wird für die Zukunft ein stärkerer lithostratigraphischer Detaillierungsgrad der Auswertungen und Darstellungen angestrebt.

Bei der Aufbereitung der Analysen wurde ein sehr unterschiedlicher geochemischer Untersuchungsgrad der neu definierten petrogeochemischen Einheiten deutlich. Während für Oberjura, Ober- und Mittelkeuper, Muschelkalk und das kristalline Grundgebirge viele Untersuchungen vorlagen, ist das Quartär – gemessen an seinem Flächenanteil – deutlich unterrepräsentiert. Zur Bestimmung der rohstoffwirtschaftlichen Verwendbarkeit von Kiesen und Sanden bzw. für sedimentgeologische oder hydrogeologische Fragestellungen wurden geochemische Untersuchungen an diesen Materialien in der Vergangenheit fast nie angefertigt. Geochemische Analysen aus solchen Einheiten werden erst in jüngerer Zeit nachgefragt. Kleinere Analysenzahlen bei manch anderen Einheiten sind hauptsächlich auf deren geringe flächenhafte Verbreitung in Baden-Württemberg zurückzuführen.

4 Datenerhebung und Datenhaltung

4.1 Probenahme

Für die vorliegende Zusammenfassung der geogenen Grundgehalte an Elementen in Gesteinen wurde keine gesonderte Probenahmekampagne durchgeführt. Wie eingangs erwähnt, wurden vorhandene Analysenergebnisse aus der Labordaten-

bank ausgewertet, die auf Untersuchungen aus sehr unterschiedlichen Aufgabenstellungen beruhen. Das breit angelegte Spektrum von Fragestellungen garantiert in gewissem Maße eine für die Landesgeologie annähernd repräsentative Probenauswahl. Probenkollektive aus nur einem Untersuchungsanlass, wie z. B. der Prospektion, bergen die Gefahr untypischer und abnormal verteilter Analysenwerte.

Für die Auswahl der verwendeten Analysen wurde ein Kriterienkatalog erstellt, der hinsichtlich der Probenahme die folgenden Mindestanforderungen gewährleisten sollte: alle Probenpunkte müssen sowohl nach Lagekoordinaten als auch Höhe über NN genau verortet und in der Aufschluss- oder der Gewinnungsstellendatenbank des LGRB verzeichnet sein. Bei den Proben handelt es sich um Einzel- oder Schlitzproben aus natürlichen und künstlichen Übertageaufschlüssen, aus Kernbohrungen sowie um repräsentative Mischproben von Lockergesteinen. Viele der Proben wurden zur Beurteilung rohstoffkundlicher Verwendungsmöglichkeiten entnommen. Diese zeichnen sich durch eine große Anfangsmenge aus, aus der das Analysegut durch Einengungsverfahren gewonnen wurde. Vorteil ist eine hohe geologische Repräsentanz, zudem wirken sich kleine Inhomogenitäten oder Verunreinigungen kaum aus. Analysen aus dem Bohrgut von Meißelbohrungen wurden wegen möglicher An- und Abreicherungseffekte für diese Arbeit nicht verwendet. Alle Proben müssen hinsichtlich ihrer Gesteinsansprache nach dem Petrographieschlüssel, und hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit zu einer geologischen Einheit nach dem Symbolschlüssel Geologie Baden-Württemberg des LGRB eindeutig bezeichnet sein. Zur Kontrolle der korrekten lithologischen Ansprache wurden die Analysenwerte und – wo vorhanden – Röntgenbeugungsanalysen verwendet.

Es wurden nur Analysen ausgewertet, die den geogenen Grundgehalt der Gesteine Baden-Württembergs reflektieren. Der geogene Grundgehalt beschreibt die natürlichen chemischen Gehalte an Elementen und Stoffen. Hiervon zu unterscheiden ist definitionsgemäß der Hintergrundgehalt, der sich aus dem natürlichen geogenen Grundgehalt und dem zusätzlichen, diffusen, anthropogenen Stoffeintrag zusammensetzt. Die Proben zu dieser Arbeit wurden so gewählt, dass durch die Entnahmeart und -tiefe sämtliche anthropogenen Einflüsse ausgeschlossen werden können. Es wurde ferner auf frisches Gesteinsmaterial geachtet, natürliche Alterationen wie Verwitterung, Mineralisation oder hydrothermale Stoffveränderungen sollten möglichst ausgeschlossen bleiben, um eine Vergleichbarkeit der Werte zu ermöglichen.

4.2 Analytik

Die Elementgehalte wurden mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalytik bestimmt. Hierzu wurden alle Proben getrocknet und in einer Scheibenschwingmühle mit Wolframcarbideinsatz analysenfein gemahlen. Wegen Blindwerten aus dem Mahlgefäß sind bei diesem Verfahren keine Bestimmungen von Wolfram und Kobalt möglich. Die Elemente Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Ni, P, Pb, Si, V und Zn wurden aus Lithiumborat-Schmelzen, die Elemente As, Mo, S, Th und U aus mittels Presswachs hergestellten Presstabletten gemessen.

Die Analysen erfolgten an einem wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenz-Spektrometer, anfangs PW 1480, seit dem Jahr 2000 an einem 2404 der Fa. Philips (jetzt Fa. Panalytical). Die Eichung erfolgte über eine Auswahl von über 100 zertifizierten Geostandards. Die Langzeitstabilität des Messverfahrens wird über regelmäßige Monitormessungen, Rückmessungen von zertifizierten Referenzproben sowie über eine als Laborstandard wiederkehrend aufbereitete und gemessene Gesteinsprobe aus dem Kaiserstuhl gewährleistet.

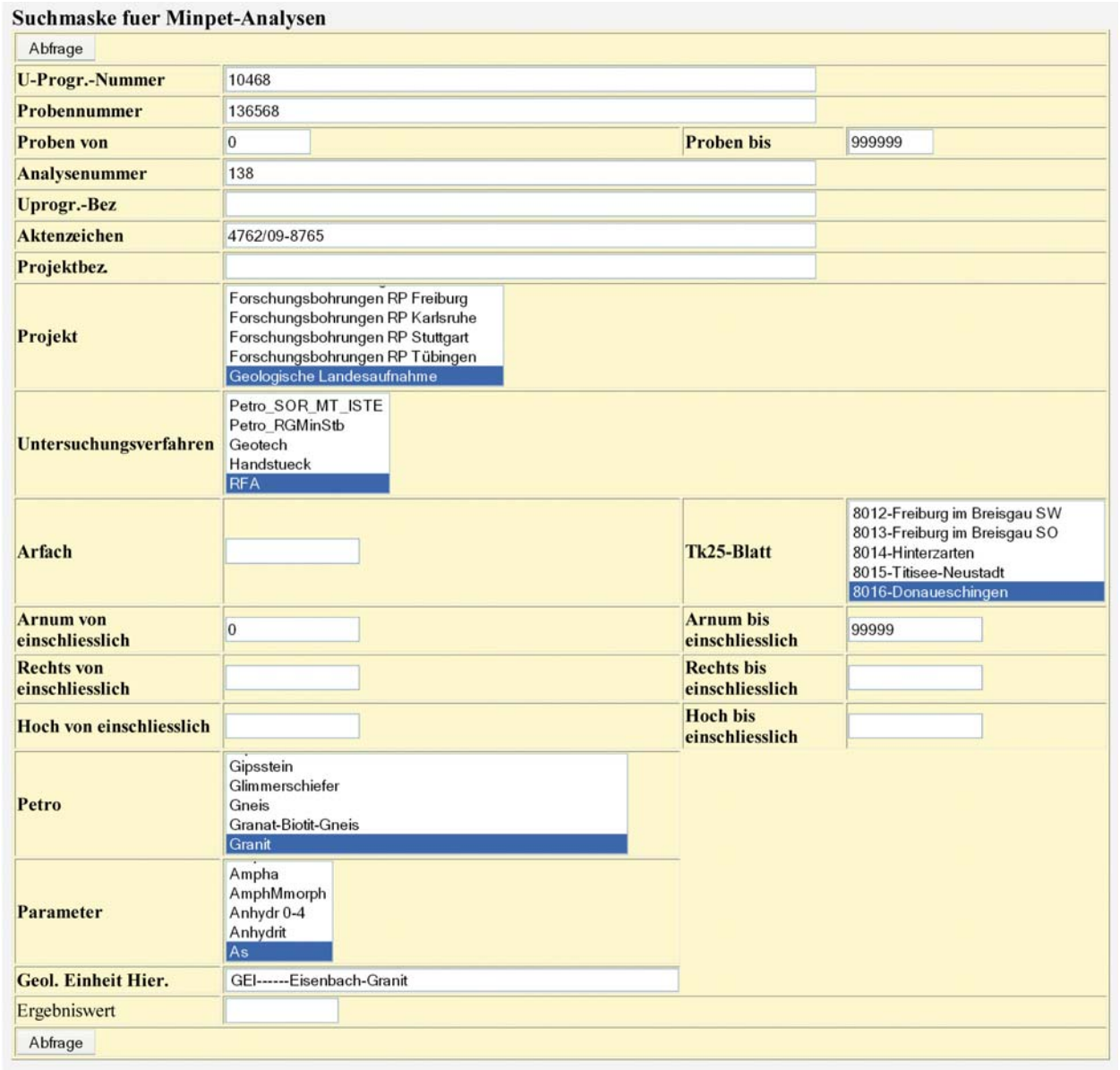
Bei den Analysenergebnissen handelt es sich stets um Gesamt- bzw. Totalgehalte. Für einzelne Elemente existieren Umrechnungsfaktoren, die einen Vergleich der Werte mit den in der Umweltgesetzgebung verwendeten Methoden ermöglichen. Die Gesamtgehalte stellen die Obergrenze der mit den anderen Analysenverfahren bestimmbaren Elementkonzentrationen dar.

4.3 Datenhaltung

Zwingende Voraussetzung für die Haltung, Auswertung und Darstellung großer Datenmengen ist eine leistungsfähige Datenbank. Alle geprüften Analysenergebnisse sind dauerhaft in der Labordatenbank des LGRB gespeichert.

Die Eingabe der Labordaten erfolgt über eine webbasierte Anwendung mit dynamisch aufgebauten Erfassungsmasken. Die Labordaten und die Metadaten für die dynamische Erstellung von Bildschirmmasken werden in einer PostgreSQL-Datenbank gehalten.

Sie erlaubt die Ablage aller chemischen, mineralogischen, physikalischen und geotechnischen Parameter. Die Analysen- und Probendaten der Labordatenbank sind verknüpft mit Aufschluss- und Lagedaten aus der Aufschlussdatenbank und der Gewinnungsstellendatenbank des LGRB. Im Teil Mineralogie und Petrographie der Labordatenbank



Suchmaske fuer Minpet-Analysen

Abfrage

U-Progr.-Nummer	10468		
Probennummer	136568		
Proben von	0	Proben bis	999999
Analysenummer	138		
Uprogr.-Bez			
Aktenzeichen	4762/09-8765		
Projektbez.			
Projekt	Forschungsbohrungen RP Freiburg Forschungsbohrungen RP Karlsruhe Forschungsbohrungen RP Stuttgart Forschungsbohrungen RP Tübingen Geologische Landesaufnahme		
Untersuchungsverfahren	Petro_SOR_MT_ISTE Petro_RGMinStb Geotech Handstueck RFA		
Arfach		Tk25-Blatt	8012-Freiburg im Breisgau SW 8013-Freiburg im Breisgau SO 8014-Hinterzarten 8015-Titisee-Neustadt 8016-Donaueschingen
Arnum von einschliesslich	0	Arnum bis einschliesslich	99999
Rechts von einschliesslich		Rechts bis einschliesslich	
Hoch von einschliesslich		Hoch bis einschliesslich	
Petro	Gipsstein Glimmerschiefer Gneis Granat-Biotit-Gneis Granit		
Parameter	Ampha AmphMmorph Anhydr 0-4 Anhydrit As		
Geol. Einheit Hier.	GEI------Eisenbach-Granit		
Ergebniswert			

Abfrage

Abb. 4.3-1: Recherche-Maske für mineralogisch-petrographische Analysen aus der Labordatenbank des LGRB.

bestehen Recherche- und Abfragemöglichkeiten nach sämtlichen Laborparametern sowie u. a. lithologischer und stratigraphischer Zuordnung der untersuchten Proben. Letztere Informationen sind ausschließlich in Übereinstimmung mit dem Symbolschlüssel Geologie des LGRB abgelegt. Abbildung 4.3-1 zeigt ein Abbild der entsprechenden Recherche-Maske.

4.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der geochemischen Parameter dient dazu, Verteilung und Wertebereiche für einzelne Elemente in den näher betrachteten petrogeochemischen Gesteinseinheiten zu ermitteln. Werte < Bestimmungsgrenze wurden zunächst näherungsweise gleich der halben Bestimmungsgrenze gesetzt. Für jedes Element und jede petrogeochemische Einheit wurden Anzahl der verwendeten Analysen, Minimum- und Maximumwert, arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung, 90. Perzentilwert und Median (= 50. Perzentilwert) in Tabellen angegeben. Für Einheiten mit weniger als zehn Analysenwerten (n < 10) sind die statistischen Kennwerte nicht gesichert. Als orientierende Werte werden sie dennoch mitgeteilt.

Aus den Medianwerten der einzelnen petrogeochemischen Einheiten wurde entsprechend ihres jeweiligen prozentualen Anteils an der Landesfläche ein gewichteter, flächenbezogener Medianwert

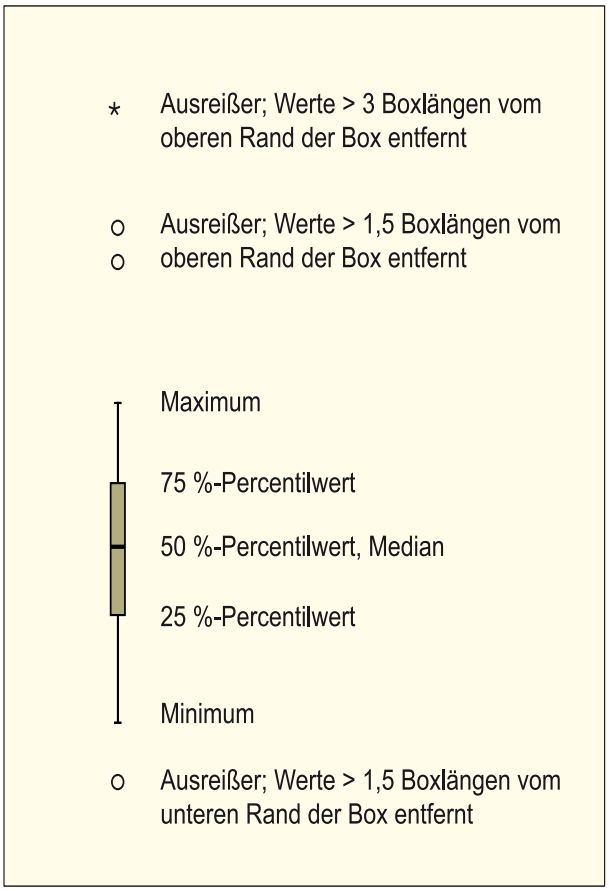


Abb. 4.4-1: Erläuterung der Boxplots.

errechnet, der etwa dem „mittleren Gehalt für Baden-Württemberg“ entspricht. Der flächenbezogene Median erlaubt Vergleiche von Elementgehalten in Baden-Württemberg mit den Clarke-Werten, die den mittleren Masseanteil eines chemischen Elements in der Erdkruste bis in eine Tiefe von 15 km beziffern.

Die ermittelten Perzentilwerte sind Messwerte, die von einem vorgegebenen prozentualen Anteil der Messwerte unterschritten werden. Der 50. und der 90. Perzentilwert sind unempfindlich gegen grobe Ausreißer. Sie sind im Wasser- und Bodenschutzbereich schon seit längerem eingeführt und erlauben Vergleiche von Analysen aus verschiedenen Kompartimenten. Der 90. Perzentilwert wird in Böden als Obergrenze des als sicher geltenden Hintergrundes angesehen. In den Kartendarstellungen dieser Studie sind beide Perzentilwerte dargestellt.

Für jedes Element wurde weiterhin ein Boxplot erstellt, in dem die Verteilung der geogenen Grundgehalte in den petrogeochemischen Einheiten graphisch dargestellt wird. Die Darstellung entspricht genau derjenigen, die auch in der Studie „Natürliche geogene Grundwasserbeschaffenheit in den hydrogeochemischen Einheiten Baden-Württembergs“ (Plum, Dietze, Armbruster & Wirsing 2009) verwendet wurde. Hierzu wurden die Messwerte zunächst logarithmiert, die weitere Verarbeitung der Analysendaten erfolgte mit Hilfe des Programms SPSS Statistics 17.0. Die Boxplots sind in Abbildung 4.4-1 erläutert.

5 Ergebnisse der Auswertung und Interpretation

5.1 Ergebnisse

Für jedes ausgewertete Element folgt eine schematisierte Beschreibung. Zusätzlich werden die statistischen Kennwerte in einer Tabelle, weitere Perzentilwerte zusätzlich in einem Boxplot dargestellt. Die Verteilung der 50. und der 90. Perzentilwerte wird aus je einer geochemischen Karte der Landesfläche ersichtlich. Die Klasseneinteilung in den geochemischen Elementkarten beruht auf der Gesamtverteilung des betreffenden Elements in allen dargestellten Gesteinseinheiten. Die Perzentilwerte und die Art ihrer Verteilung bedingen die Anzahl und Abstufung der Gehaltsklassen. Jeder Gehaltsklasse wird eine Farbe zugeordnet: grün weist auf relativ niedrige, gelb auf mittlere, und rote Farben auf relativ hohe Gehalte hin. Jede der 23 petrogeochemischen Einheiten erhält als Flächenfarbe die Farbe der Gehaltsklasse, in die ihr 50. bzw. 90. Perzentilwert fällt.

5.1.1 Aluminium (als Al_2O_3)

Aluminium ist mit 8,23 % in der Erdkruste vertreten und steht damit seiner Häufigkeit nach an 3. Stelle aller Elemente und an 1. Stelle der Metalle.

Die größte Menge von Aluminium kommt in Silikaten vor, zu denen die wichtigsten gesteinsbildenden Minerale wie Feldspäte (z. B. Orthoklas $KAlSi_3O_8$), Glimmer (z. B. Muskovit $KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH,F)_2$), Amphibole und Pyroxene zählen.

Trotz seines reichlichen Vorkommens gilt Aluminium als nicht essenziell. Auf Pflanzen und Tiere können freie Aluminium-Ionen, die bei der Verwitterung aluminiumhaltiger Minerale bei ph-Werten unter 4 entstehen, jedoch toxische Wirkung haben.

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 7,63 % Al_2O_3, entsprechend 4,04 % Al. Dies bedeutet, dass die baden-württembergischen Gesteine gegenüber dem CLARKE-Wert der oberen Erdkruste an Aluminium deutlich abgereichert sind.

Die P 90-Werte für Al_2O_3 der petrogeochemischen Einheiten schwanken deutlich zwischen 2,27 und 21,71 %.

Niedrige Werte (P 90: < 10 %) treten in quartären Süßwasserkalken, in Gesteinen des Oberjura, im Oberen- und Mittleren Muschelkalk sowie im Unteren- und Mittleren Buntsandstein auf.

Erhöhte Werte (P 90: > 10 – 15 %) finden sich in Lösssedimenten, in Quartärschichten, im Tertiär des Molassebeckens, im Unterkeuper, in Oberkarbon / Rotliegend Sedimenten und in Rotliegend-Magmatiten.

Hohe Werte (P 90: > 15 – 20 %) weisen die Gesteine aus dem Tertiär des Oberrheingrabens, tertiäre Vulkanite, Mittel- und Oberkeuper, Unterer Muschelkalk, Oberer Buntsandstein, gefaltetes Paläozoikum, Gangmagmatite, variszische Plutone und Migmatite und Gneise auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 20 %) wurden im Mittel- und Unterjura sowie im Zechstein festgestellt.

Dem Auftreten der häufigsten, o. g. gesteinsbildenden Minerale entsprechend kommen hohe Aluminiumgehalte in allen Kristallingesteinen Baden-Württembergs vor.

Bei den Sedimenten zeigt sich eine starke Korrelation von Aluminium mit dem Ton- und / oder Feldspatgehalt der Gesteine. Karbonate in Kalken und Quarz in Sandsteinen wirken verdünnend und erklären die niedrigen Gehalte im Oberjura und Teilen vom Muschelkalk und Buntsandstein.

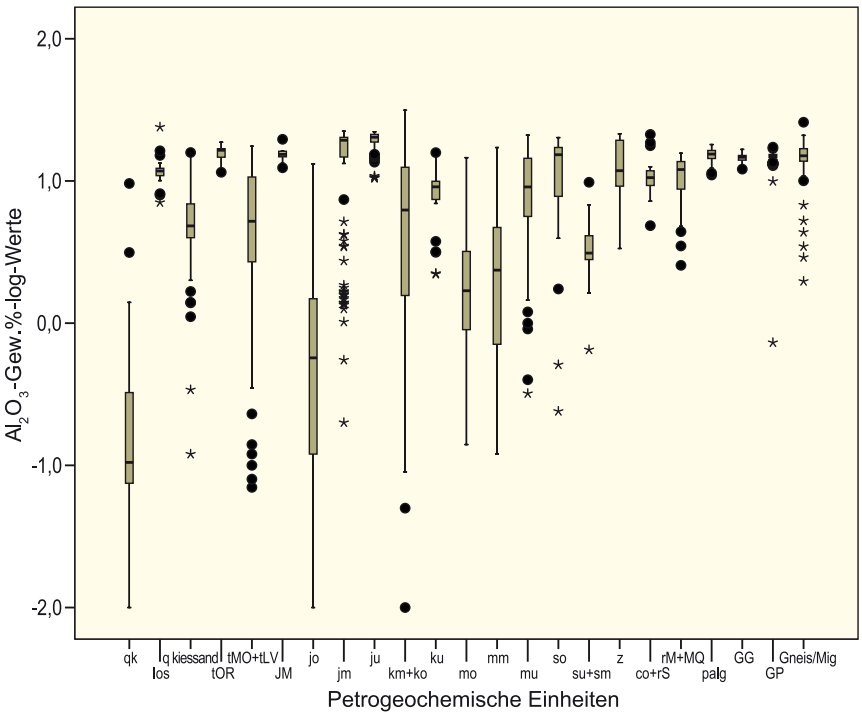


Abb. 5.1.1-1:

Boxplots für Aluminiumoxid (Al_2O_3); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.1-1: Statistische Kennwerte für Aluminiumoxid (Al_2O_3) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Aluminium (Al_2O_3) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,01	9,6	0,99	2,43	2,27	0,11
Lösssediment	los	40	7,06	23,93	11,90	2,55	13,20	11,76
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,12	15,85	6,02	3,31	11,83	4,83
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	11,51	18,72	15,66	2,24	17,22	16,45
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,07	17,53	6,93	4,99	14,62	5,21
Tertiäre Vulkanite	JM	9	12,38	19,63	15,37	2,04	16,88	15,37
Jura								
Oberjura	jo	1 152	0,01	13,18	1,22	1,67	3,56	0,57
Mitteljura	jm	133	0,2	22,37	15,84	7,03	21,16	19,34
Unterjura	ju	125	10,44	22,19	19,43	2,57	21,71	20,30
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	616	0,01	31,4	7,32	5,89	15,40	6,25
Unterkeuper	ku	25	2,21	15,82	8,60	3,63	12,79	9,09
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,14	14,59	2,52	2,50	5,62	1,69
Mittlerer Muschelkalk	mm	109	0,12	17,18	3,32	3,34	7,54	2,36
Unterer Muschelkalk	mu	117	0,32	21,02	10,01	5,71	18,01	9,08
Oberer Buntsandstein	so	64	0,24	20,19	13,03	5,41	17,98	15,30
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	0,65	9,79	3,70	1,80	5,62	3,11
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	3,35	21,45	13,05	6,00	20,27	11,81
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	4,85	21,24	10,96	3,18	12,55	10,56
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	2,55	15,65	10,97	3,38	14,71	12,03
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	11,01	18,04	15,31	1,55	16,98	15,45
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	123	12,11	16,67	14,60	0,88	15,83	14,69
Variszische Plutone („Granite“)	GP	236	0,73	17,29	14,91	1,22	15,89	15,05
Migmatite und Gneise	MI + gn	137	1,97	25,88	14,92	3,26	18,32	15,03
Alle Einheiten		**3 609**	**0,01**	**31,4**	**Flächen-gewichteter Median**			**7,63**

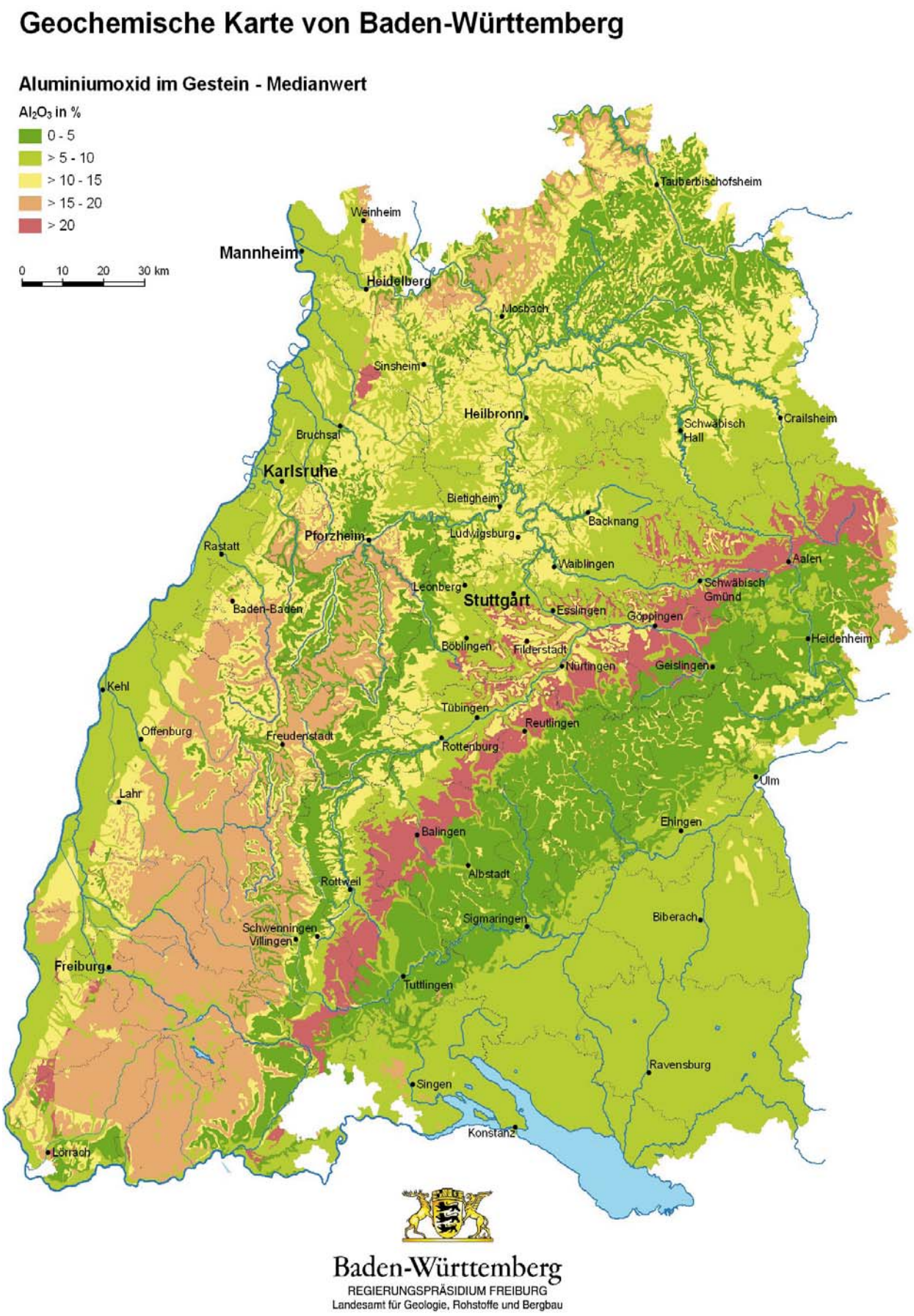


Abb. 5.1.1-2: Aluminiumoxid im Gestein – Medianwert.

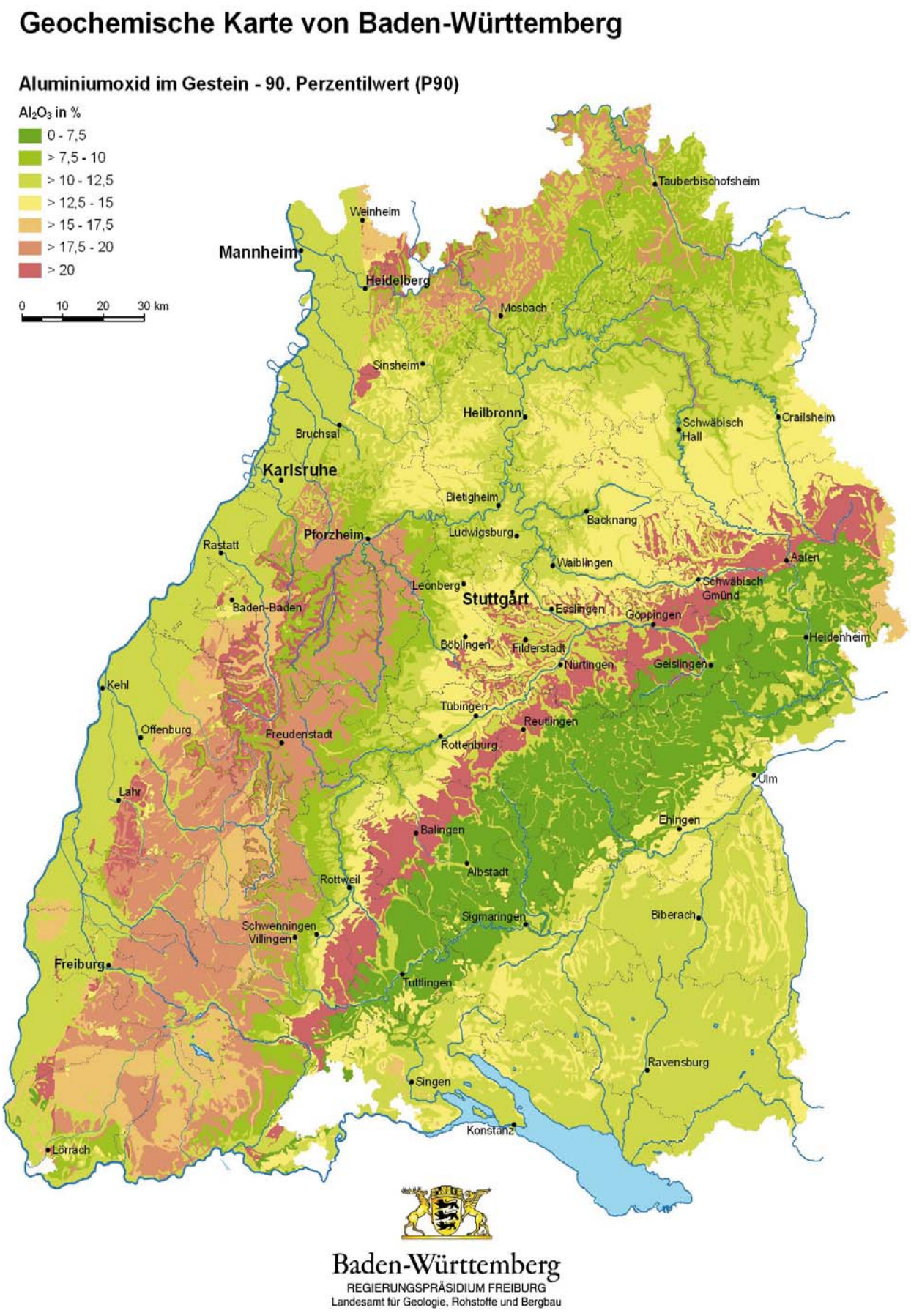


Abb. 5.1.1-3: Aluminiumoxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.2 Arsen (As)

Arsen ist zu 1,8 mg/kg in der oberen Erdkruste vertreten, nach seiner Häufigkeit steht es an 54. Stelle der Elemente und ist damit ungefähr so selten wie Beryllium oder Germanium. Arsen kommt in Erzgängen gediegen (elementar) vor, wichtige Arsenminerale sind Arsenkies (FeAsS), Löllingit ($FeAs_2$), Realgar (As_4S_4), Auripigment (As_2S_3) und As-Fahlerz (Tennantit, ~ Cu_3AsS_3).

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs liegt bei 6,2 mg/kg. Die Gesteine Baden-Württembergs sind gegenüber dem CLARKE-Wert an Arsen deutlich angereichert. Die Medianwerte der differenzierten petrogeochemischen Einheiten streuen zwischen 2 und 109 mg/kg.

Niedrige Gehalte (P 90: < 20 mg/kg) treten allgemein in Lösssedimenten und Quartärschichten, im Tertiär des Molassebeckens sowie in tertiären Vulkaniten, im Oberjura, im gesamten Keuper und im Oberen und Mittleren Muschelkalk auf.

Erhöhte Gehalte (P 90: > 20 – 50 mg/kg) finden sich im Tertiär des Oberrheingrabens, im Mittel- und Unterjura, im Unteren Muschelkalk, Buntsandstein, Zechstein und in den variszischen Plutonen.

Hohe Gehalte (P 90: > 50 – 80 mg/kg) weisen Rotliegend / Oberkarbonsedimente, Quarzporphyre des Rotliegend, Gangmagmatite sowie Migmatite und Gneise auf.

Sehr hohe Gehalte (P 90: > 80 mg/kg) wurden in den quartären Süßwasserkalken („Travertine“, P 90 = 792 mg/kg!) und im gefalteten Paläozoikum festgestellt.

Während vorgenannte Minerale fast ausschließlich in Gängen oder auf Klüften vorkommen, sind die Gehalte in magmatischen Gesteinen meist zu gering, um die Ausbildung eigenständiger As-Minerale zu ermöglichen. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass Arsen bei diesen Bildungsbedingungen vorwiegend in Sulfiden wie Pyrit (FeS_2) oder Magnetkies (Pyrrhotin, ~ FeS) gebunden ist. In Quarzporphyren aus Baden-Württemberg wurde auch $YAsO_4$ als primäre Arsen-Mineralphase nachgewiesen.

Geochemisch wichtig ist die Tatsache, dass Arsen als Arsenat (AsO_4^{3-}) mit Eisen (III)-hydroxiden zusammen ausfällt. In Sedimenten bindet es sich an solche Hydroxide, wie beispielsweise Goethit. Neben Pyrit ist Fahlerz (Tennantit, ~ Cu_3AsS_3) im sedimentären Umfeld ein weiterer wichtiger Arsenträger, auf den z. B. die Arsenbelastungen im Oberen Buntsandstein und im Unteren Muschelkalk großenteils zurückgeführt werden können.

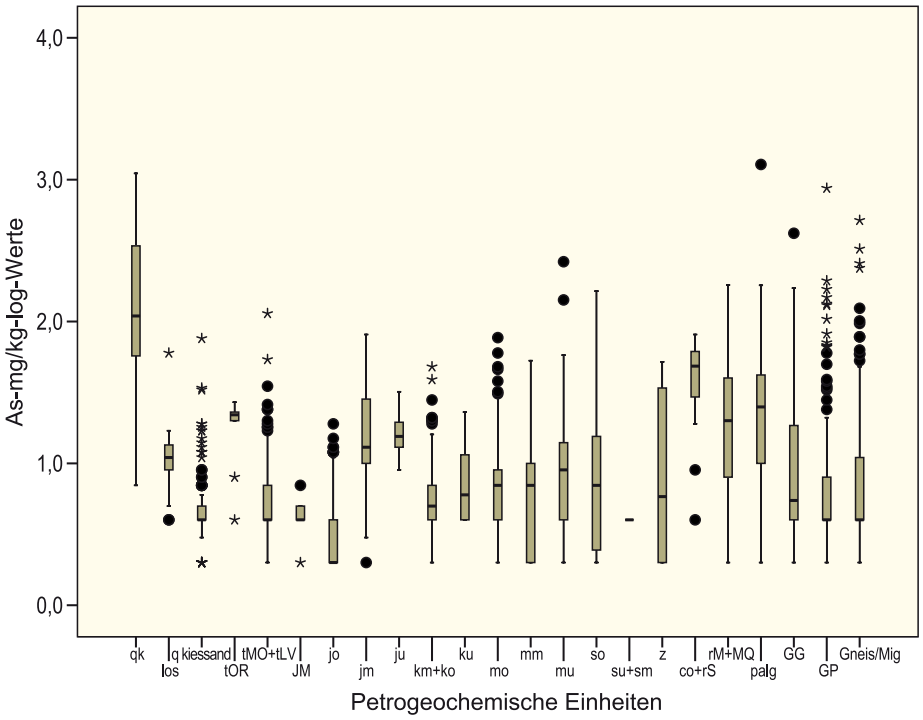


Abb. 5.1.2-1:

Boxplots für Arsen (As); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.2-1: Statistische Kennwerte für Arsen (As) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Arsen (As) in mg/kg Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	7	1 107	274	345	792	110
Lösssediment	los	35	4	60	12	8,8	15	11
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	112	2	76	6,6	8,4	12	4
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	4	27	19	7,4	25	22
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	117	2	114	7,8	12	15	4
Tertiäre Vulkanite	JM	9	2	7	4,2	1,3	5,4	4
Jura								
Oberjura	jo	710	2	19	3,3	2,3	7	2
Mitteljura	jm	19	2	81	22	23	50	13
Unterjura	ju	24	9	32	16	5,1	22	16
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	377	2	48	6,3	4,3	10	5
Unterkeuper	ku	20	4	23	8,4	5,3	14	6
Oberer Muschelkalk	mo	402	2	77	8,0	6,8	12	7
Mittlerer Muschelkalk	mm	86	2	53	8,4	8,8	15	7
Unterer Muschelkalk	mu	110	2	264	14	28	20	9
Oberer Buntsandstein	so	47	2	164	15	29	26	7
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	50	4	49	9,1	11	23	4
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	6	2	52	18	21	43	9,5
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	4	81	45	20	68	49
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	38	2	181	32	38	54	20
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	57	2	1 280	55	168	81	25
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	104	2	419	24	51	64	5,5
Variszische Plutone („Granite“)	GP	175	2	871	19	71	34	4
Migmatite und Gneise	MI + gn	105	2	517	26	69	59	4
Alle Einheiten		**2 661**	**2**	**1 280**	**Flächen-gewichteter Median**			**6,2**

Abb. 5.1.2-2: Arsen im Gestein – Medianwert.

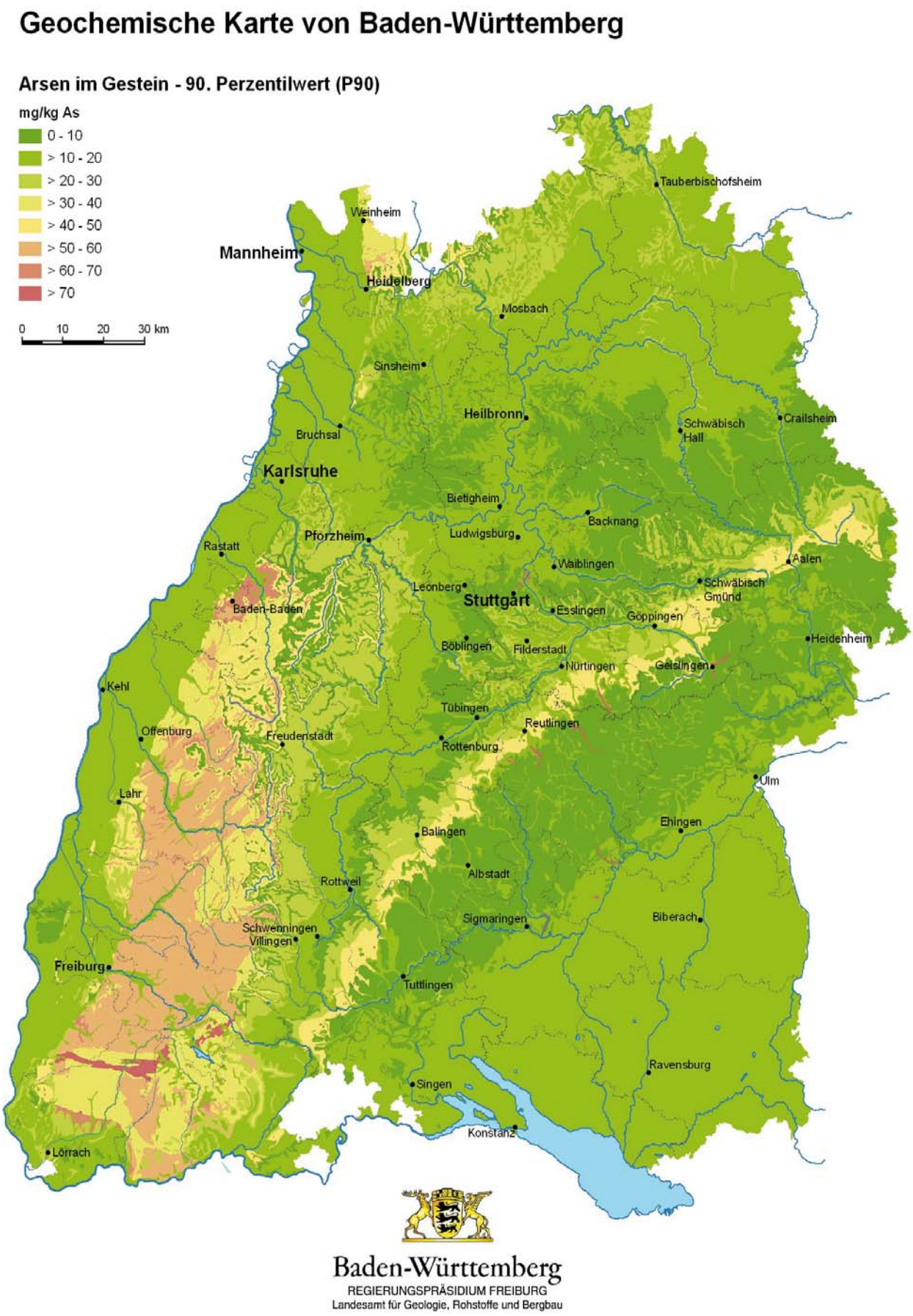


Abb. 5.1.2-3: Arsen im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.3 Barium (Ba)

Der mittlere Bariumgehalt der kontinentalen Erdkruste beträgt 425 mg/kg, es ist damit das 14.-häufigste Element. Die wichtigsten Bariumminerale sind Baryt ($BaSO_4$) und Witherit ($BaCO_3$).

Pflanzen nehmen Barium aus dem Boden auf und reichern es an. Für manche Algen ist Barium essenziell. Auch im menschlichen Körper wird Barium aufgenommen und ähnlich wie Calcium abgelagert. Alle löslichen Bariumverbindungen sind giftig.

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 278 mg/kg, was eine Abreicherung der baden-württembergischen Gesteine gegenüber dem CLARKE-Wert darstellt.

Die P 90-Werte der Gesteine Baden-Württembergs streuen in einem weiten Bereich von 50 bis 2 404 mg/kg.

Niedrige Werte (P 90: < 200 mg/kg) weisen quartäre Süßwasserkalke und Gesteine des Oberjura auf.

Leicht erhöhte Werte (P 90: > 200 – 400 mg/kg) treten bei Lösssedimenten und Quartärschichten, im Tertiär des Molassebeckens, in Gesteinen des Mittel- und Unterjura, des Unterkeupers sowie des Oberen- und Mittleren Muschelkalks auf.

Hohe Werte (P 90: > 400 – 800 mg/kg) finden sich im Tertiär des Oberrheingrabens, im Mittel- und Oberkeuper, im Unteren Muschelkalk, im gesamten Buntsandstein, im Zechstein und in Rotliegend-Magmatiten.

Sehr hohe Werte (P 90: > 800 mg/kg) wurden in tertiären Vulkaniten, in Oberkarbon / Rotliegend-Sedimenten, im gefalteten Paläozoikum, in Gangmagmatiten, in variszischen Plutonen und in Migmatiten und Gneisen festgestellt.

In der Natur kommt Barium nie in gediegener Form vor, sondern nur in Verbindungen. Es zählt zu den lithophilen (silikatliebend bzw. bevorzugt in der Erdkruste vorkommend) Elementen.

Nur wenn das Barium-Angebot groß genug ist, kommt es zur Bildung einer eigenständigen Ba-Mineralphase, meist in Form von Baryt. Dieser bildet als Gangart z. T. große Massen in hydrothermalen Mineralgängen oder er tritt extensiv verbreitet, z. T. als Konkretionen und Hohlraumfüllung in Sedimenten auf. Regional auftretende sehr hohe Einzelwerte im Buntsandstein (bis 1,9 % Ba) lassen sich durch die Infiltration des noch weitgehend unverfestigten Sediments durch Ba-führende Hydrothermen erklären.

Bei geringerem Barium-Dargebot tarnt sich Barium in anderen Wirtsmineralen. Der Ionenradius von Barium ähnelt dem von Kalium, weshalb sich Barium hauptsächlich an dessen Stelle in Kalifeldspat und Biotit einbaut. In Plagioklasen wird Barium in deutlich geringerem Maße aufgenommen (max. 0,1 %). Auch in Hornblenden können geringe Mengen eingebaut werden.

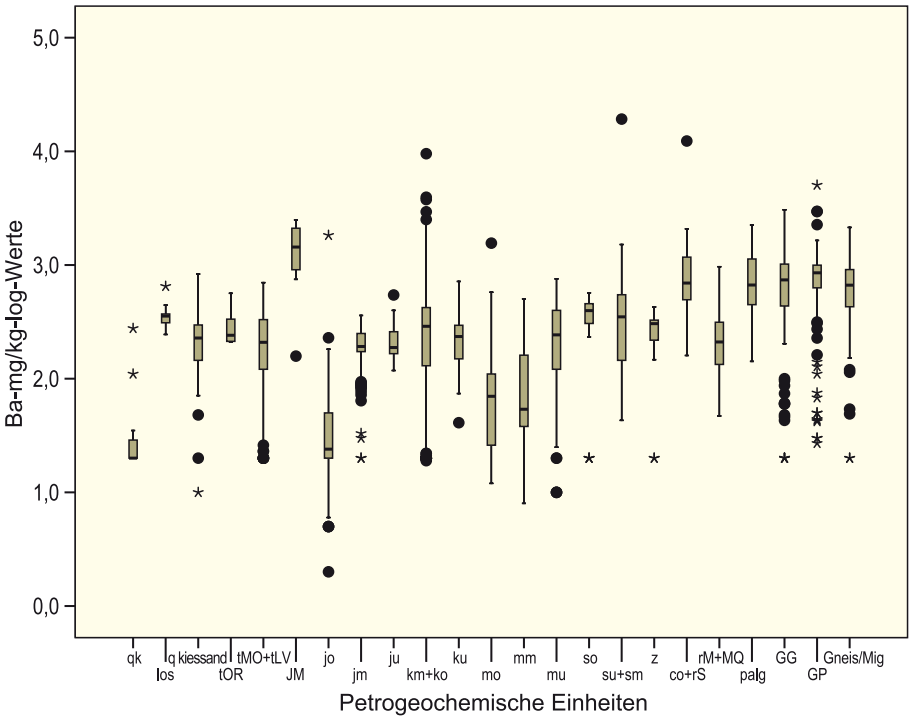


Abb. 5.1.3-1:

Boxplots für Barium (Ba); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.3-1: Statistische Kennwerte für Barium (Ba) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Barium (Ba) in mg/kg								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	20	277	44	66	73	20
Lösssediment	los	40	245	650	351	64	387	356
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	10	833	231	110	343	228
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	211	564	296	112	408	241
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	20	700	226	143	389	209
Tertiäre Vulkanite	JM	9	158	2 497	1 459	821	2 404	1 439
Jura								
Oberjura	jo	1 134	2	1 826	37	57	50	24
Mitteljura	jm	125	20	360	197	68	289	192
Unterjura	ju	125	118	545	216	70	311	188
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	587	19	9 535	384	565	705	289
Unterkeuper	ku	24	41	717	245	138	351	235
Oberer Muschelkalk	mo	183	12	1 558	103	146	209	70
Mittlerer Muschelkalk	mm	74	8	504	110	111	277	54
Unterer Muschelkalk	mu	69	10	755	263	183	507	243
Oberer Buntsandstein	so	49	20	570	372	121	487	397
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	43	19 224	1 042	3 512	779	350
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	15	20	428	269	127	412	305
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	160	12 329	1 238	2 187	1 680	694
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	47	966	279	223	658	211
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	142	2 249	812	511	1 551	667
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	121	20	3 058	827	591	1 601	740
Variszische Plutone („Granite“)	GP	211	27	5 048	850	499	1 295	854
Migmatite und Gneise	MI + gn	132	20	2 143	737	472	1571	665
Alle Einheiten		**3 370**	**23**	**19 224**	**Flächen-gewichteter Median**			**278**

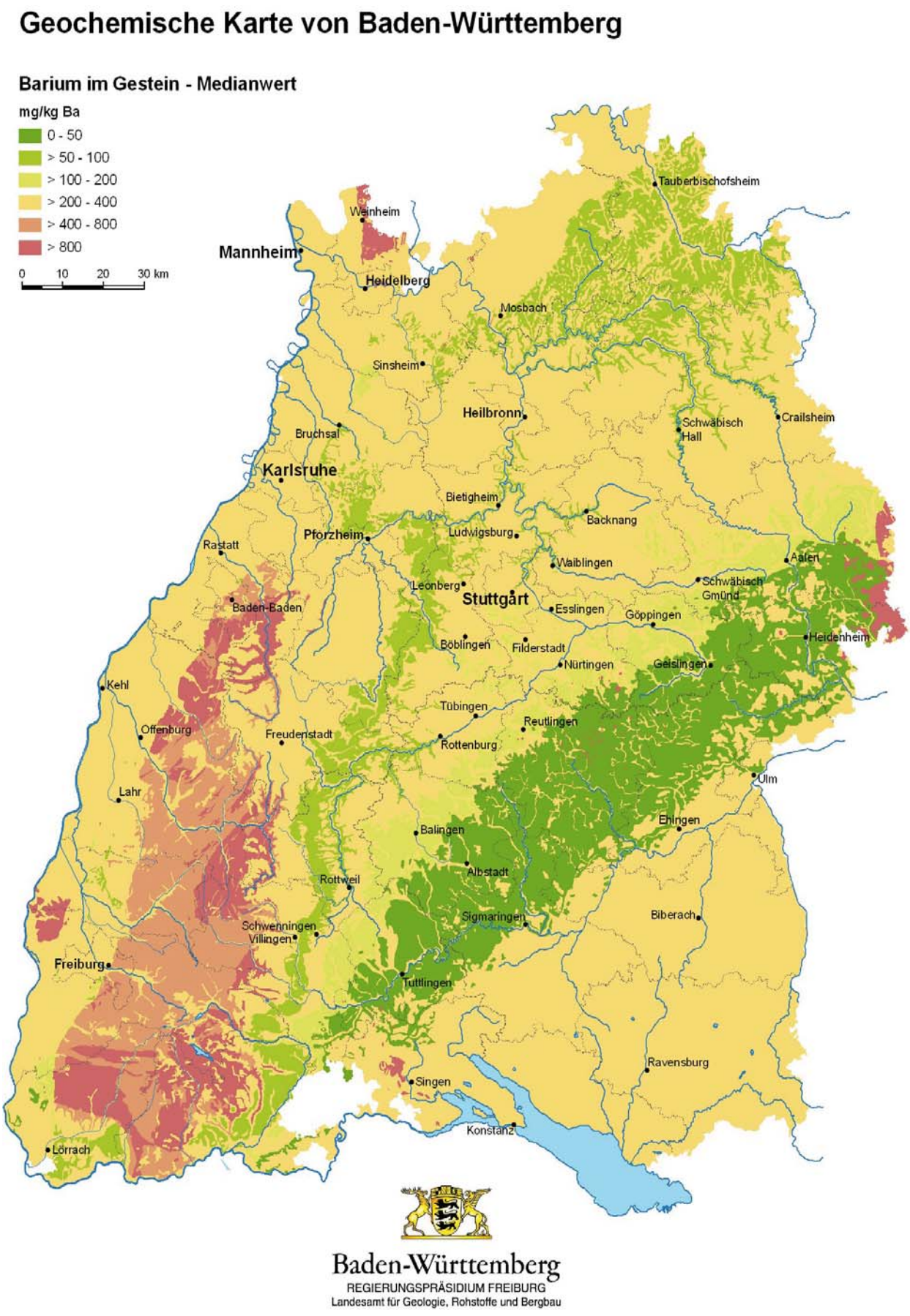


Abb. 5.1.3-2: Barium im Gestein – Medianwert.

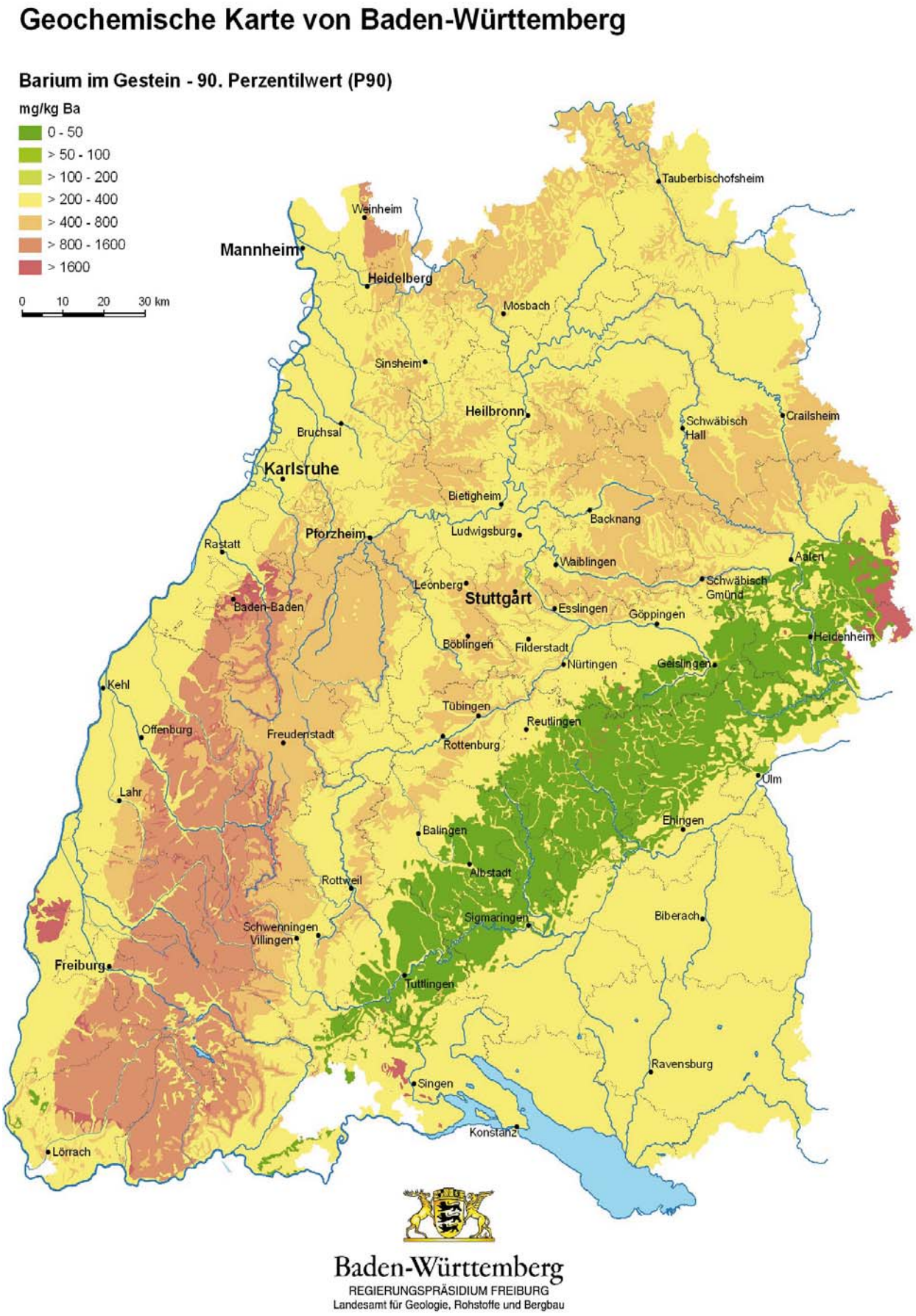


Abb. 5.1.3-3: Barium im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.4 Calcium (als CaO)

Calcium ist zu 4,15 % in der Erdkruste vorhanden, es ist das 5.-häufigste Element.

Calcium ist lithophil, d. h. es kommt in der Natur stets in Verbindungen vor, aus denen sich die Erdkruste und der obere Mantel maßgeblich zusammensetzen. Es existieren mehr als 700 Calciumminerale; deren Wichtigste sind: Calcit ($CaCO_3$), Dolomit ($CaMg[CO_3]_2$), Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), Anhydrit ($CaSO_4$), Fluorit (CaF_2) und Apatit ($Ca_5[F,OH/PO_4]_3$). Außerdem enthalten viele Feldspäte, vor allem Plagioklase (z. B. Anorthit $CaAl_2Si_2O_8$) hohe Calciumgehalte.

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs liegt bei 14,25 % CaO, entsprechend 10,18 % Ca. Gegenüber dem CLARKE-Wert sind die baden-württembergischen Gesteine um etwa das 2,5-fache an Calcium angereichert. Dies ist zumindest teilweise auf den hohen Flächenanteil karbonatischer Gesteine zurückzuführen.

Die P 90-Werte für CaO der petrogeochemischen Einheiten streuen in sehr weitem Rahmen zwischen 0,07 und 55,80 %.

Niedrige Werte (P 90: < 20 %) treten in Lösssedimenten, im Tertiär des Oberrheingrabens, in tertiären Vulkaniten, im Mittel- und Unterjura, im gesamten Buntsandstein, in Oberkarbon / Rotliegend-Sedimenten, in Rotliegend-Magmatiten, im gefalteten Paläozoikum, in Gangmagmatiten, variszischen Plutonen sowie in Migmatiten und Gneisen auf.

Erhöhte Werte (P 90: > 20 – 30 %) weisen quartäre Kiese und Sande sowie Gesteine des Unterkeupers und des Zechsteins auf.

Hohe Werte (P 90: > 30 – 50 %) wurden im Tertiär des Molassebeckens, im Mittel- und Oberkeuper und im Mittleren und Unteren Muschelkalk festgestellt.

Sehr hohe Werte (P 90: > 50 %) treten in quartären Süßwasserkalken sowie in den Kalksteinen des Oberjura und des Oberen Muschelkalks auf.

Die P 90-Werte für Calcium in den baden-württembergischen Gesteinen sind stark differenziert. Trotz der weiten Verbreitung calciumhaltiger Minerale wird schnell erkennbar, dass der bei weitem überwiegende Anteil des Calciums in Karbonatgesteinen gebunden ist. Im Mittelkeuper und im Mittleren Muschelkalk spielen zusätzlich Gips und Anhydrit eine größere Rolle als wichtige Calciumminerale. Sedimente mit höherem Tongehalt oder (Quarz)sandanteilen sowie magmatische und metamorphe Gesteine erweisen sich als relativ arm an Calcium.

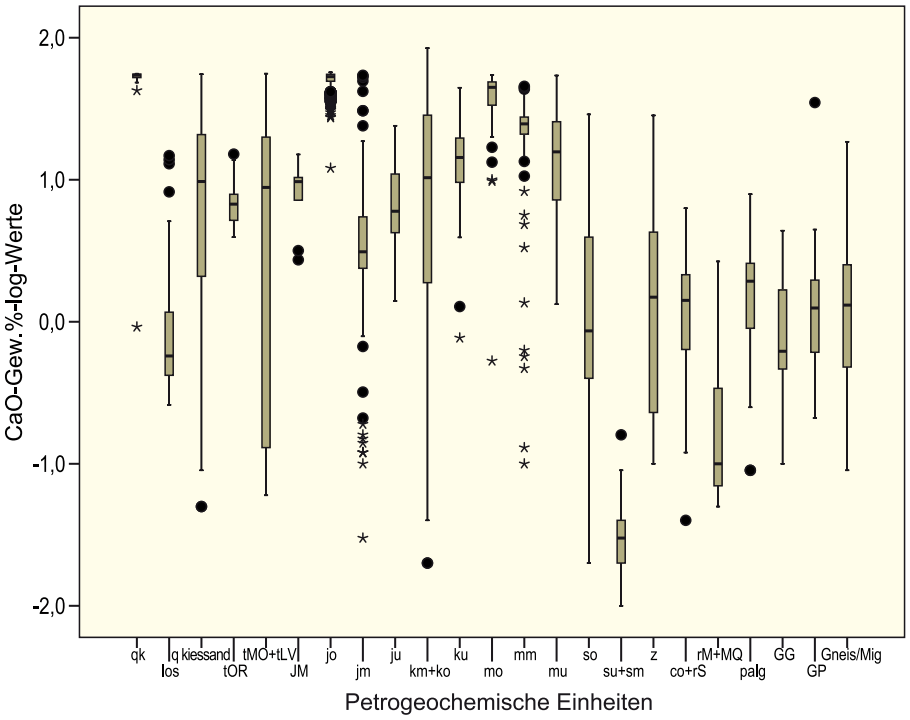


Abb. 5.1.4-1:

Boxplots für Calciumoxid (CaO); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.4-1: Statistische Kennwerte für Calciumoxid (CaO) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Calcium (CaO) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,92	55,84	50,07	13,56	55,55	54,47
Lösssediment	los	40	0,26	14,79	2,12	3,74	5,41	0,58
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,05	55,33	12,17	11,01	24,22	9,72
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	3,94	15,16	7,67	3,81	13,89	6,75
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,06	55,88	14,35	17,40	46,38	8,83
Tertiäre Vulkanite	JM	9	2,73	15,07	8,77	3,96	12,69	9,70
Jura								
Oberjura	jo	1 152	12,08	57,08	51,08	5,79	55,80	53,20
Mitteljura	jm	133	0,03	54,37	6,16	10,03	9,69	3,11
Unterjura	ju	125	1,4	24,01	7,74	4,65	14,33	6,00
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	616	0,02	84,52	15,04	14,16	30,95	10,34
Unterkeuper	ku	25	0,77	44,47	15,60	9,48	25,97	14,35
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,53	54,79	41,32	9,89	51,56	44,74
Mittlerer Muschelkalk	mm	109	0,1	45,5	24,02	9,47	34,98	24,74
Unterer Muschelkalk	mu	117	1,33	54,21	19,08	14,88	46,67	15,72
Oberer Buntsandstein	so	64	0,02	28,85	3,56	5,98	8,88	0,87
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	0,01	0,16	0,04	0,03	0,07	0,03
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	0,1	28,38	5,85	9,45	23,18	1,49
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	0,04	6,3	1,77	1,60	3,87	1,42
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	0,05	2,66	0,38	0,59	1,13	0,10
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	0,09	7,91	2,09	1,64	3,86	1,93
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	123	0,1	4,38	1,12	1,02	2,49	0,62
Variszische Plutone („Granite“)	GP	236	0,21	34,96	1,53	2,36	2,42	1,25
Migmatite und Gneise	MI + gn	137	0,09	18,52	2,12	2,65	5,39	1,31
Alle Einheiten		**3 609**	**0,01**	**84,52**	**Flächen-gewichteter Median**			**14,25**

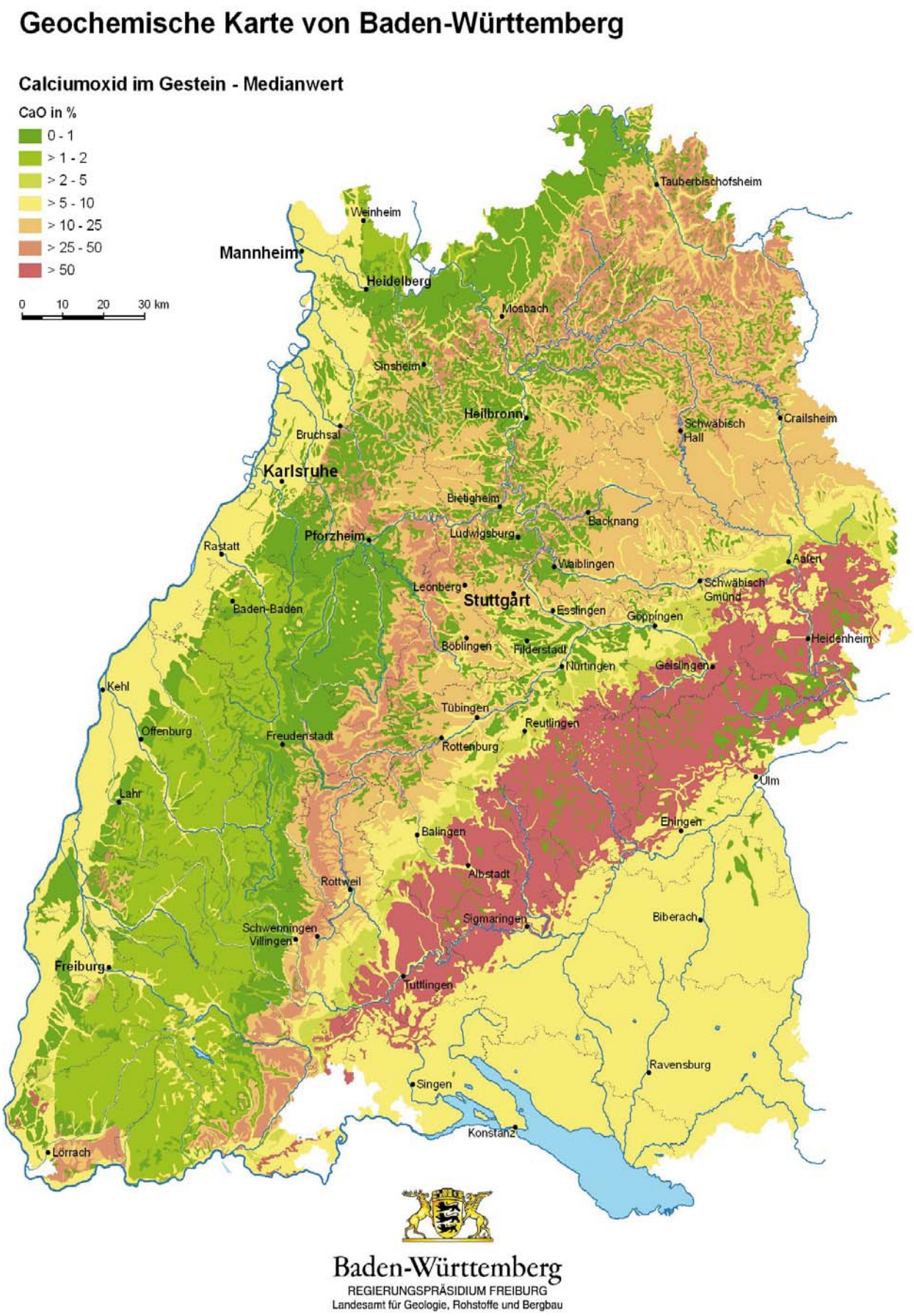


Abb. 5.1.4-2: Calciumoxid im Gestein – Medianwert.

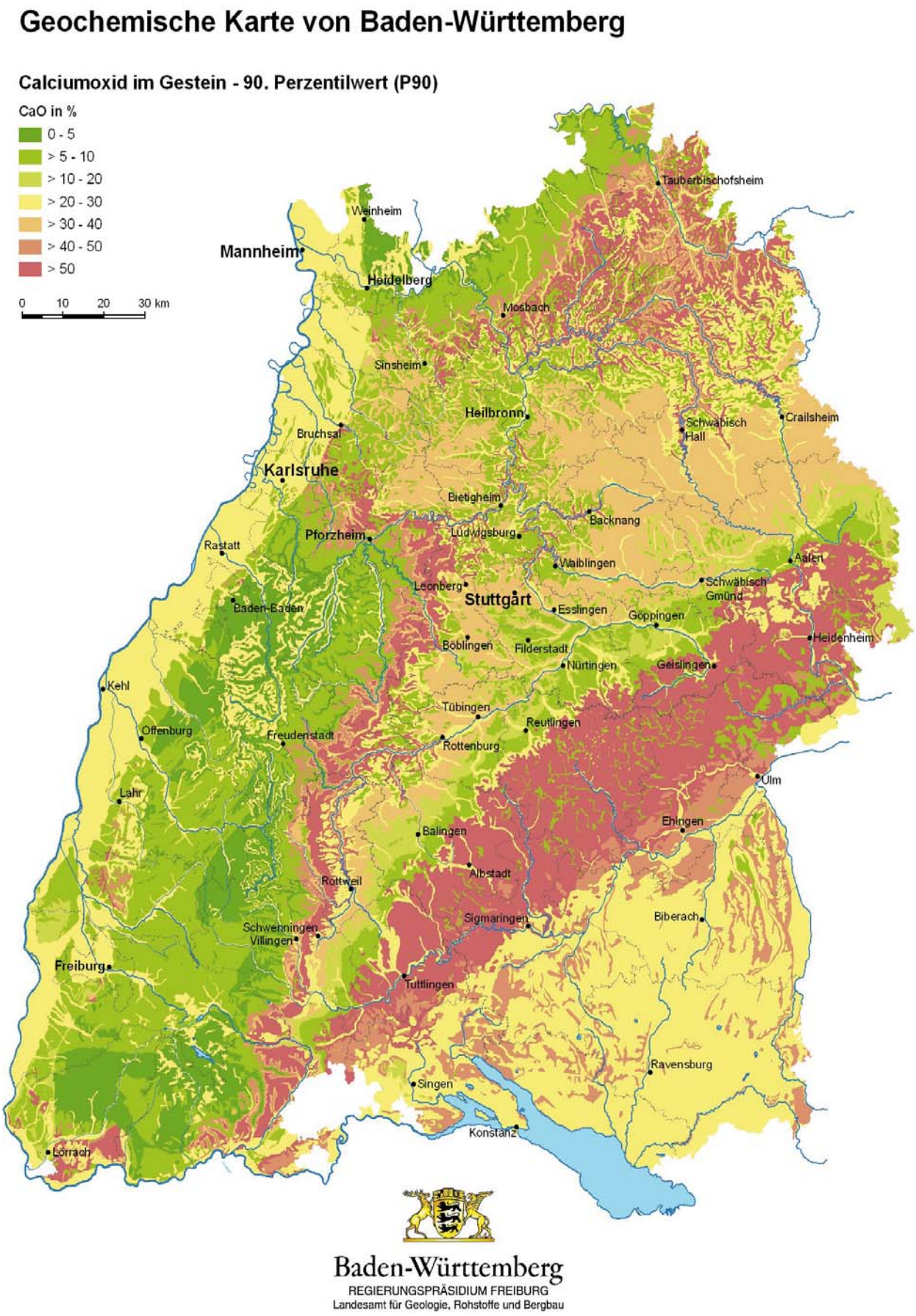


Abb. 5.1.4-3: Calciumoxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.5 Chrom (Cr)

Chrom ist mit 102 mg/kg in der Erdkruste vorhanden und steht seiner Häufigkeit nach an 21. Stelle der Elemente, noch vor Kupfer und Zink.

Das wichtigste Chromerz ist Chromit ($FeCr_2O_4$), aus dem metallisches Chrom und seine Verbindungen technisch fast ausschließlich hergestellt werden.

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs liegt bei 39 mg/kg. Ihr medianer Chromgehalt ist gegenüber dem CLARKE-Wert stark abgereichert.

Die P 90-Werte für Chrom in den ausgewiesenen petrogeochemischen Einheiten variieren sehr deutlich zwischen 8,2 und 225 mg/kg.

Niedrige Werte (P 90: < 75 mg/kg) treten in quartären Süßwasserkalken, tertiären Vulkaniten, Gesteinen des Oberjura, des gesamten Muschelkalks, des Oberen und Mittleren Buntsandsteins, des Oberkarbon / Rotliegend sowie in Rotliegend-Magmatiten und in variszischen Plutonen auf.

Erhöhte Werte (P 90: > 75 – 100 mg/kg) finden sich in Lösssedimenten, in Quartärschichten, im gesamten Keuper, im Oberen Buntsandstein und Sedimenten des Zechsteins.

Hohe Werte (P 90: > 100 – 200 mg/kg) weisen das Tertiär des Oberrheingrabens und des Molassebeckens, die Gesteine des Mittel- und Unterjura, Gangmagmatite sowie Migmatite und Gneise auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 200 mg/kg) wurden ausschließlich im gefalteten Paläozoikum ermittelt.

Von den verschiedenen Oxidationsstufen des Chroms sind nur das drei- und das sechswertige Chrom von praktischer Bedeutung. Chrom (III) ist unter normalen Umweltbedingungen die stabilste Oxidationsstufe, es kann unter bestimmten Umständen zu Chrom (VI) oxidiert werden. Für die biologische Wirksamkeit ist die Oxidationsstufe entscheidend; sechswertiges Chrom ist etwa 100 bis 1 000 mal giftiger als dreiwertiges.

Chrom ist für den Menschen essenziell, in höheren Konzentrationen und in Abhängigkeit von der Oxidationsstufe für Mensch, Tier und Pflanze jedoch mehr oder weniger stark toxisch.

Chrom zählt in Gesteinen zu den basaltophilen Elementen, d. h. es ist in basischen bis ultrabasischen Gesteinen deutlich angereichert. Die höchsten 90. Perzentilwerte im gefalteten Paläozoikum gehen auf metamorphe, basische Gesteine (Metabasite) der Badenweiler-Lenzkirch-Zone zurück. Die höchsten Einzelwerte (bis 2 620 mg/kg) wurden in Serpentiniten (Gruppe Migmatite und Gneise) gemessen. Chrom kann ferner auf Grund seines Ionenradius in Tonminerale eingebaut werden. Höhere 90. Perzentilwerte sind jeweils in den tonmineralreichen Abfolgen der Sedimente des Tertiärs, sowie des Mittel- und des Unterjura zu verzeichnen.

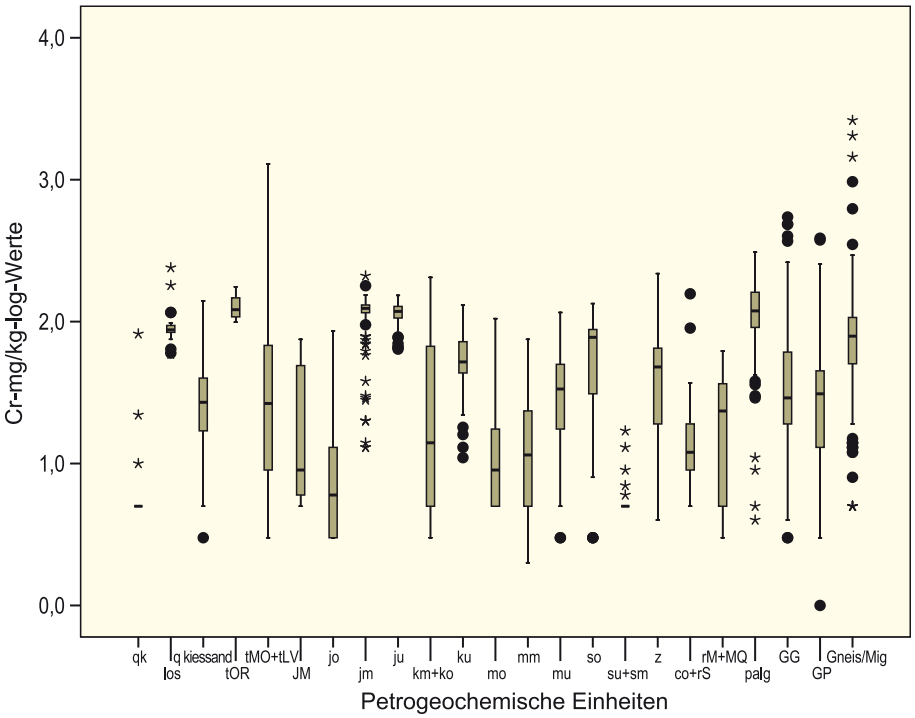


Abb. 5.1.5-1:

Boxplots für Chrom (Cr); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.5-1: Statistische Kennwerte für Chrom (Cr) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Chrom (Cr) in mg/kg Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	5	82	11	19	16	5
Lösssediment	los	40	59	240	94	30	100	88
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	3	140	35	26	79	27
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	99	176	129	25	155	122
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	3	1 293	67	168	113	27
Tertiäre Vulkanite	JM	9	5	75	28	27	58	9
Jura								
Oberjura	jo	701	3	86	11	11	25	6
Mitteljura	jm	124	13	210	115	34	140	124
Unterjura	ju	125	64	153	116	19	137	118
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	604	3	205	35	35	84	14
Unterkeuper	ku	24	11	131	56	30	94	52
Oberer Muschelkalk	mo	183	5	105	15	16	35	9
Mittlerer Muschelkalk	mm	84	2	75	16	14	34	12
Unterer Muschelkalk	mu	80	3	116	34	21	57	34
Oberer Buntsandstein	so	54	3	134	64	34	99	78
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	25	5	17	6,1	2,9	8,2	5
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	18	4	218	53	49	80	49
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	5	157	21	31	28	12
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	3	62	23	17	47	24
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	4	309	126	72	225	119
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	116	3	546	65	99	159	29
Variszische Plutone („Granite“)	GP	199	1	387	40	52	62	31
Migmatite und Gneise	MI + gn	136	5	2 620	137	313	175	79
Alle Einheiten		**2 965**	**1**	**2 620**	**Flächen-gewichteter Median**			**39**

Abb. 5.1.5-2: Chrom im Gestein – Medianwert.

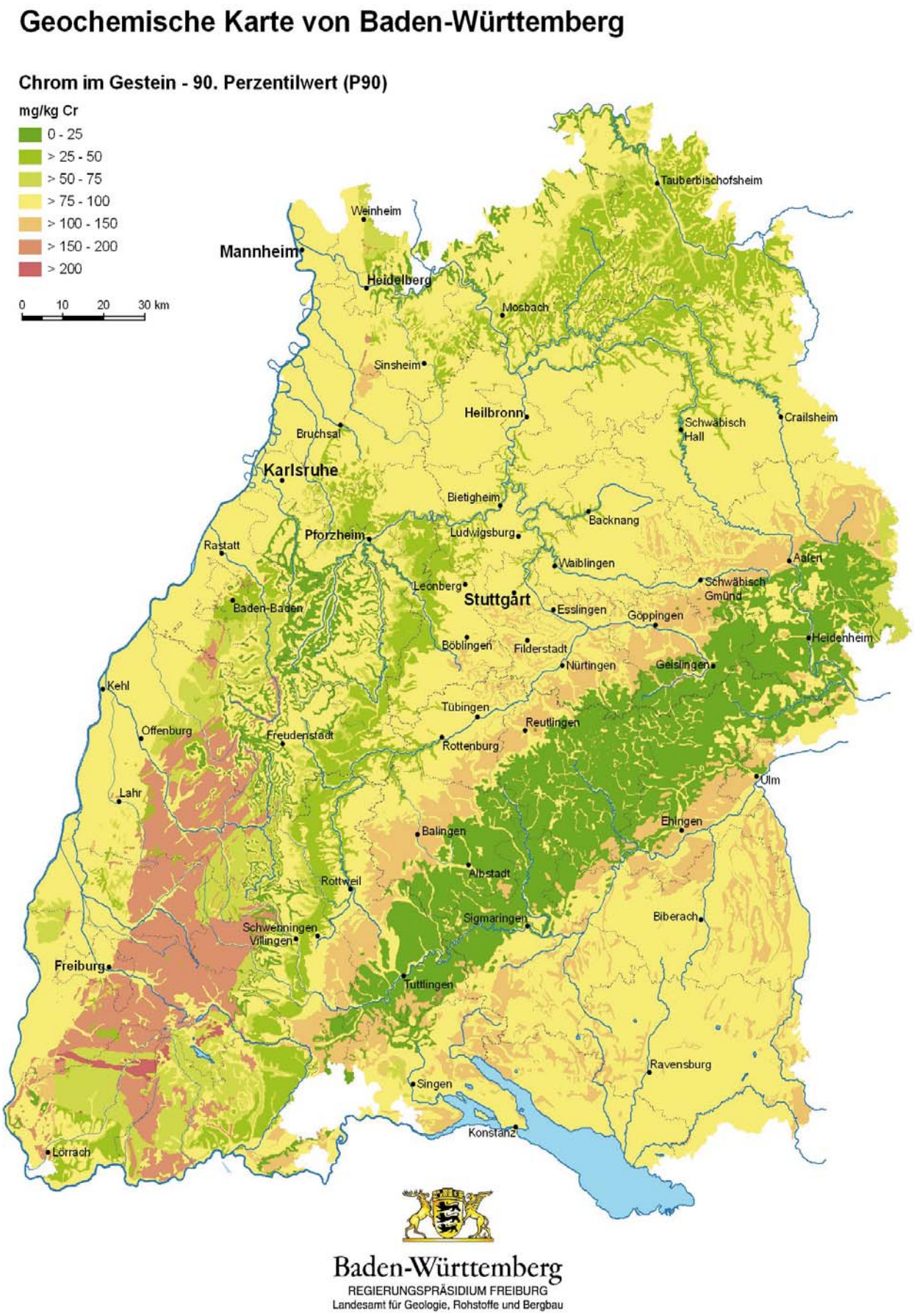


Abb. 5.1.5-3: Chrom im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.6 Kupfer (Cu)

Die natürliche Häufigkeit von Kupfer in der kontinentalen Erdkruste liegt bei 60 mg/kg. Kupfer liegt damit an 26. Stelle der Elemente. Die wichtigsten Kupferminerale sind Kupferkies (Chalkopyrit $CuFeS_2$), Kupferglanz (Chalkosin Cu_2S) und Fahlerz (Tennantit bzw. Tetraedrit ~ $Cu_3(As,Sb)S_3$). Untergeordnet spielen Malachit ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$) und Azurit ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$) als Verwitterungsprodukte eine Rolle. Durch ihre deutlich sichtbaren Eigenfarben grün und blau können sie oft schon einen ersten Hinweis auf geogen erhöhte Kupfergehalte liefern.

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 11 mg/kg, was eine starke Abreicherung der Gesteine Baden-Württembergs hinsichtlich Kupfer gegenüber dem CLARKE-Wert darstellt.

Die P 90-Werte für Kupfer in den petrogeochemischen Gesteinseinheiten schwanken in weitem Rahmen zwischen 5 und 174 mg/kg.

Die geringsten Werte (P 90: < 20 mg/kg) weisen quartäre Süßwasserkalke, die Kalksteine des Oberjura, des Oberen und Mittleren Muschelkalks, die Sedimente des Unteren und Mittleren Buntsandsteins, des Oberkarbon und Rotliegend sowie die Gangmagmatite und variszischen Plutone auf.

Etwas höhere Gehalte (P 90: > 20 – 40 mg/kg) wurden in Lösssedimenten und Quartärschichten, im Tertiär des Oberrheingrabens und Molassebeckens, in Gesteinen des Mitteljura, des Keupers, des Oberen Buntsandsteins und in Rotliegend-Magmatiten festgestellt.

Erhöhte Gehalte (P 90: > 40 – 80 mg/kg) weisen die Gesteine des Unterjura, des Unteren Muschelkalks, des gefalteten Paläozoikums sowie Migmatite und Gneise auf.

Die höchsten Gehalte (P 90: > 160 mg/kg) finden sich in tertiären Vulkaniten sowie in Sedimenten des Zechsteins, an dessen Basis in den nördlich gelegenen Bundesländern der „Kupferschiefer“ liegt.

Kupfer ist chalkophil, d. h. es hat eine starke Affinität zu Schwefel und bildet vornehmlich Sulfide. In magmatischen Gesteinen, im gefalteten Paläozoikum und in Sedimenten wurde meist Kupferkies als Kupferträger festgestellt, im sedimentären Bereich tritt häufig Fahlerz hinzu oder an dessen Stelle und wurde bisher im Zechstein, Buntsandstein, im Unteren Muschelkalk und im Unterjura nachgewiesen.

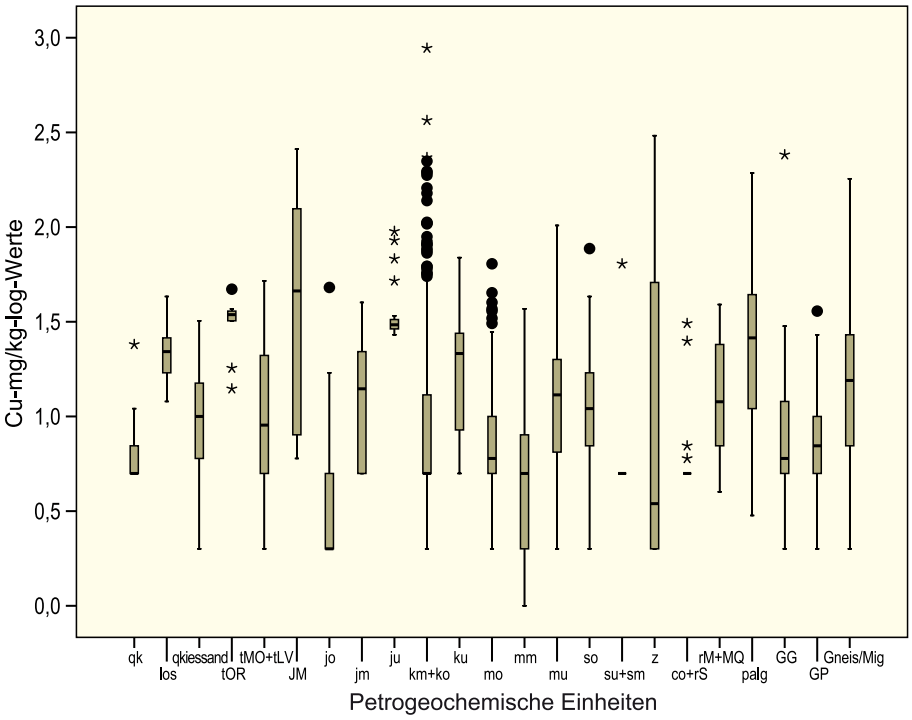


Abb. 5.1.6-1:

Boxplots für Kupfer (Cu); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.6-1: Statistische Kennwerte für Kupfer (Cu) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Kupfer (Cu) in mg/kg Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	5	24	6,9	4,8	9	5
Lösssediment	los	39	12	43	23	6,9	33	22
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	148	2	32	12	6,9	23	10
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	14	47	32	9,5	38	35
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	125	2	52	14	12	31	9
Tertiäre Vulkanite	JM	9	6	258	80	85	164	46
Jura								
Oberjura	jo	703	2	48	3,6	2,6	5	2
Mitteljura	jm	31	5	40	15	9,9	26	14
Unterjura	ju	24	27	95	38	19	63	31
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	604	2	881	16	45	29	5
Unterkeuper	ku	24	5	69	23	16	40	22
Oberer Muschelkalk	mo	183	2	64	9,3	8,3	18	6
Mittlerer Muschelkalk	mm	84	1	37	6,9	6,7	15	5
Unterer Muschelkalk	mu	80	2	102	20	23	51	13
Oberer Buntsandstein	so	54	2	77	15	12	29	11
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	5	64	7,0	11	5	5
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	18	2	304	48	89	174	3,5
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	5	31	6,7	6,0	6,2	5
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	4	39	16	10	33	12
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	3	193	34	34	69	26
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	116	2	241	11	23	19	6
Variszische Plutone („Granite“)	GP	199	2	36	7,8	4,6	12	7
Migmatite und Gneise	MI + gn	136	2	180	22	26	45	16
Alle Einheiten		**2766**	**1**	**23**	**Flächen-gewichteter Median**			**11**

Abb. 5.1.6-2: Kupfer im Gestein – Medianwert.

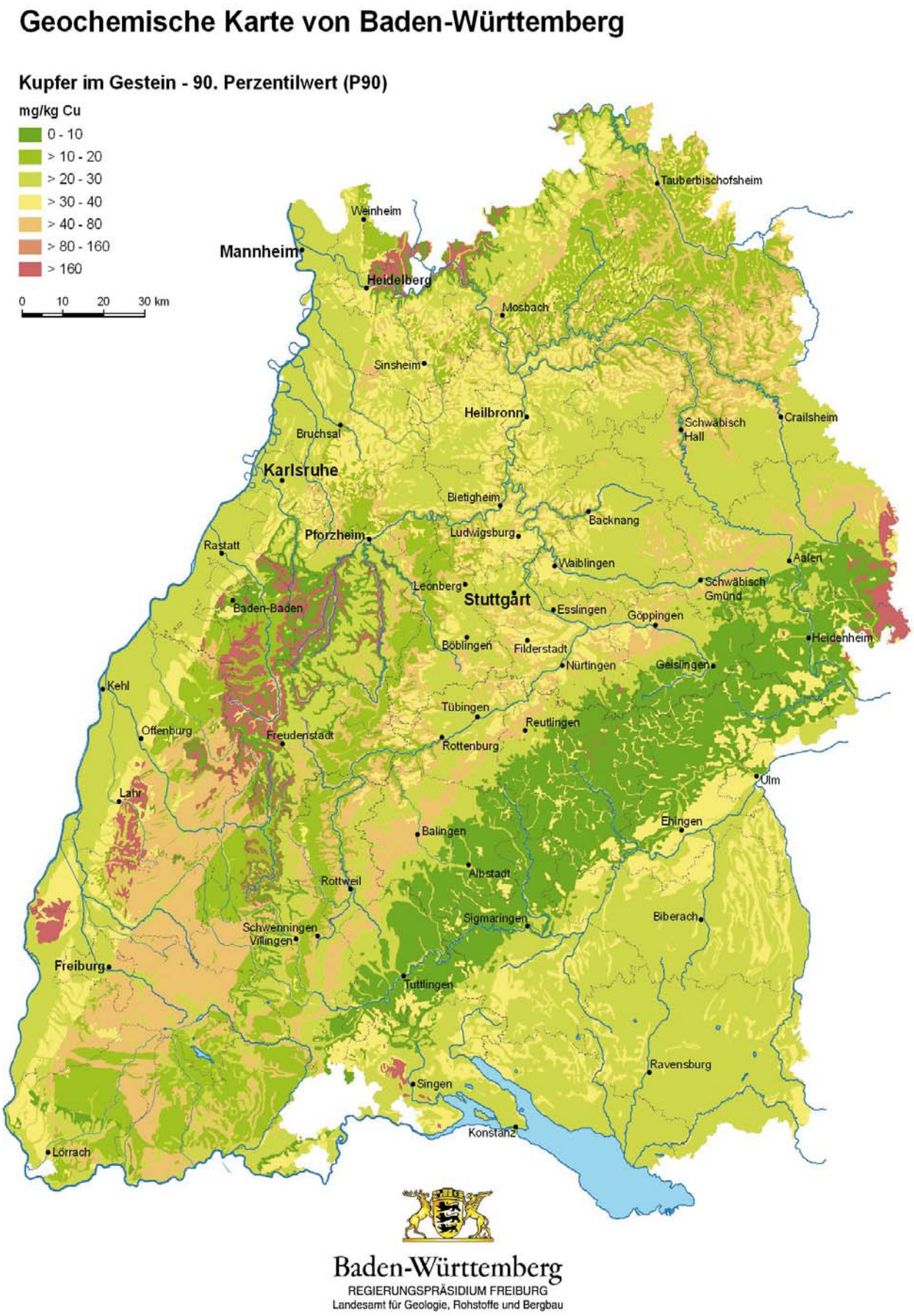


Abb. 5.1.6-3: Kupfer im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.7 Eisen (als Fe_2O_3)

Eisen ist zu 5,63 % in der kontinentalen Erdkruste vertreten und steht damit seiner Elementhäufigkeit nach an 4. Stelle. Gediegenes Eisen kommt in der Natur nur äußerst selten vor und findet sich dann meist in Eisenmeteoriten. Wichtige Eisenminerale sind Magnetit (Fe_3O_4), Hämatit (Fe_2O_3), Siderit ($FeCO_3$), Pyrit (FeS_2), Goethit (α-FeOOH) und Limonit ($FeOOH \cdot nH_2O$). Darüberhinaus ist Eisen ein wesentlicher Bestandteil zahlreicher, meist dunkel gefärbter, gesteinsbildender Minerale wie Pyroxene, Amphibole, Biotit (Glimmer), Glaukonit, Chlorit u. a.

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 2,401 % Fe_2O_3, entsprechend 1,68 % Fe. Für die baden-württembergischen Gesteine zeigt sich eine deutliche Abreicherung ihres durchschnittlichen Gehalts an Eisen gegenüber dem CLARKE-Wert für die obere Erdkruste.

Die P 90-Werte für Fe_2O_3 in den betrachteten petrogeochemischen Einheiten streuen zwischen 1,04 und 12,30 %.

Niedrige Werte (P 90: < 4 %) wurden in Gesteinen des Oberjura, des Oberen und Mittleren Muschelkalks, des Unteren und Mittleren Buntsandsteins und in Oberkarbon-/Rotliegend-Sedimenten festgestellt.

Erhöhte Werte (P 90: > 4 – 6 %) weisen quartäre Süßwasserkalke, Lösssedimente, Quartärschichten, der gesamte Keuper, Unterer Muschelkalk, Zechstein, Rotliegend-Magmatite, Gangmagmatite und variszische Plutone auf.

Hohe Werte (P 90: > 6 – 8 %) wurden im Tertiär des Oberrheingrabens und des Molassebeckens, im Mittel- und Unterjura und im Oberen Buntsandstein angetroffen.

Sehr hohe Werte (P 90: > 8 %) finden sich in tertiären Vulkaniten (12,30 %), im gefalteten Paläozoikum sowie in der Gruppe „Migmatite und Gneise“.

In Sedimenten wird der Eisengehalt maßgeblich vom Angebot und den während der Sedimentablagerung herrschenden Milieubedingungen gesteuert. Hohe Gehalte gehen auf starke Anreicherungen eines oder einiger weniger Fe-Minerale zurück. Diese sind nach ihrem Vorkommen und der häufig damit einhergehenden Färbung des Sediments klassische Anzeiger der Bildungsbedingungen und der Bindungsform. Beispielhaft seien aufgeführt: Hämatit (rötlich) = trocken, warm; Goethit (bräunlich) = humid, Verwitterungsbereich; Pyrit (in Sedimenten dunkelbraun bis schwarz, sonst goldgelb) = marin, anaerob; Glaukonit (grünlich) = marin, küstennah.

Die als sehr hoch eingestuften Gehalte in tertiären Vulkaniten (Essexite, Tephrite), im gefalteten Paläozoikum (Metagrauwacken, Schiefer) und in metamorphen Gesteinen (Amphibolite, Pyroxenite, Serpentinite) gehen auf die o. g. dunklen gesteinsbildenden Minerale, im Falle des gefalteten Paläozoikums zusätzlich auch auf Pyrit zurück.

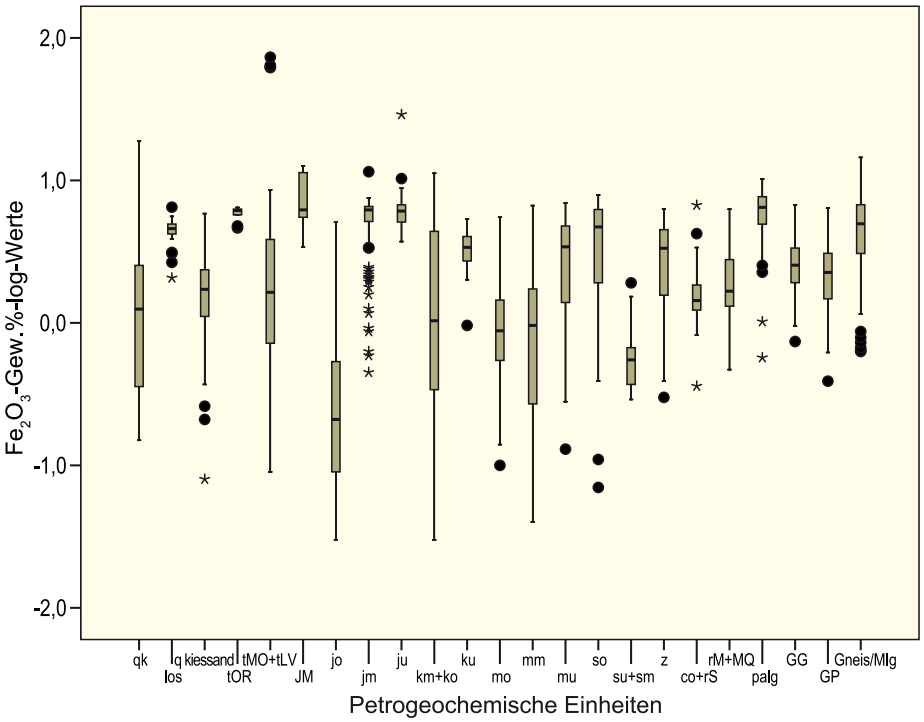


Abb. 5.1.7-1:

Boxplots für Eisenoxid (Fe_2O_3); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.7-1: Statistische Kennwerte für Eisenoxid (Fe_2O_3) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Eisen (Fe_2O_3) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,15	18,92	2,60	4,61	4,53	1,25
Lösssediment	los	40	2,07	6,49	4,51	0,80	5,28	4,59
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,08	5,85	2,05	1,35	4,46	1,72
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	4,64	6,46	5,88	0,65	6,38	6,15
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,09	73,28	4,29	11,01	6,57	1,64
Tertiäre Vulkanite	JM	9	3,4	12,6	8,03	3,55	12,30	6,21
Jura								
Oberjura	jo	1 152	0,03	5,09	0,44	0,56	1,23	0,21
Mitteljura	jm	133	0,45	11,51	5,55	1,79	6,80	6,21
Unterjura	ju	125	3,72	29,01	6,19	2,33	7,38	6,09
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	616	0,03	11,22	2,37	2,41	6,00	1,04
Unterkeuper	ku	25	0,96	5,37	3,43	1,07	5,03	3,39
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,1	5,52	1,11	0,85	2,08	0,88
Mittlerer Muschelkalk	mm	109	0,04	6,66	1,23	1,20	2,63	0,96
Unterer Muschelkalk	mu	117	0,13	6,94	3,28	1,87	5,83	3,42
Oberer Buntsandstein	so	64	0,07	7,88	4,27	2,25	6,81	4,72
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	0,29	1,91	0,63	0,37	1,04	0,55
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	0,3	6,32	3,10	1,95	5,68	3,34
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	0,36	6,7	1,77	1,16	2,75	1,44
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	0,47	6,28	2,17	1,38	4,15	1,67
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	0,57	10,21	6,10	2,09	8,35	6,47
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	123	0,74	6,75	2,79	1,29	4,99	2,54
Variszische Plutone („Granite“)	GP	236	0,39	6,38	2,41	1,13	4,12	2,26
Migmatite und Gneise	MI + gn	137	0,63	14,5	5,24	2,76	8,91	4,96
Alle Einheiten		**3 609**	**0,03**	**73,28**	**Flächen-gewichteter Median**			**2,40**

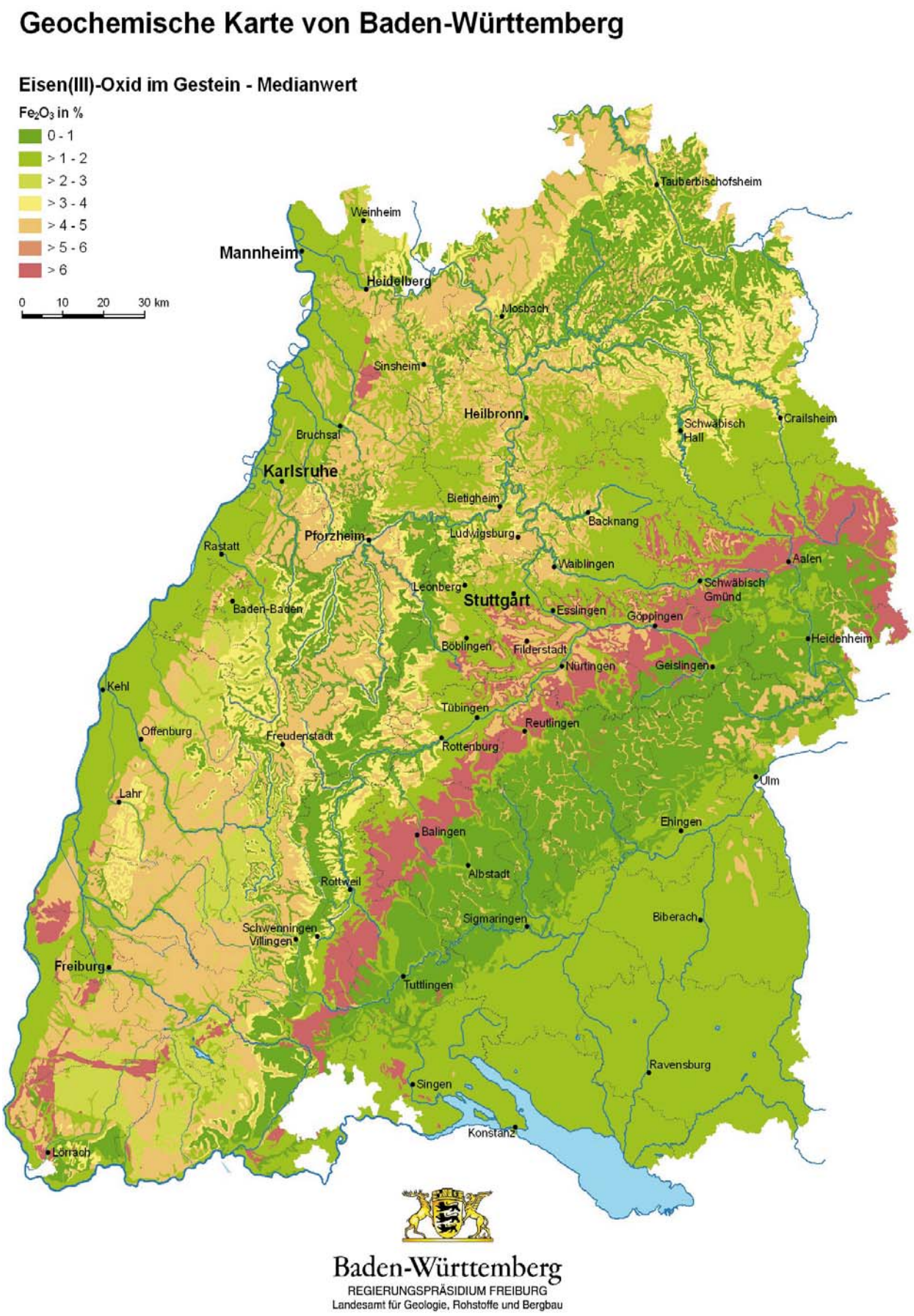


Abb. 5.1.7-2: Eisen(III)-Oxid im Gestein – Medianwert.

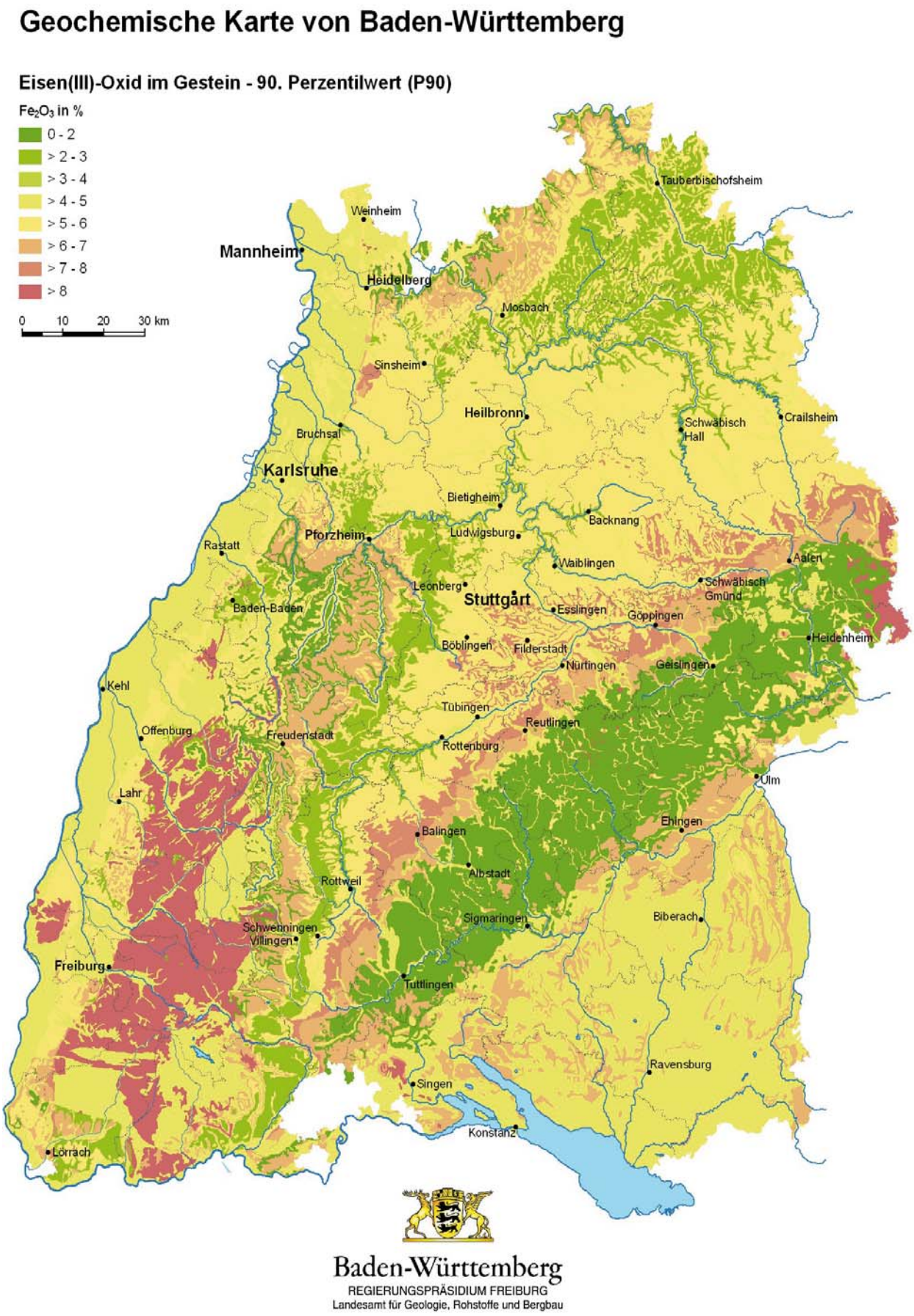


Abb. 5.1.7-3: Eisen(III)-Oxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.8 Kalium (als K_2O)

Kalium ist zu 2,09 % in der Erdkruste vertreten und steht seiner Elementhäufigkeit nach damit an 8. Stelle. Kalium ist noch reaktionsfreudiger als Natrium und kommt in der Natur ausschließlich in Verbindungen vor. Viele an der Gesteinsbildung beteiligte Minerale enthalten größere Mengen an Kalium; zu den bedeutsamsten zählen Kalifeldspat (Orthoklas $KAlSi_3O_8$) und Muskovit $KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH,F)_2$). Außerdem spielt Sylvin (KCl) in der Technik und als Düngemittel eine wichtige Rolle als Kaliummineral. Sylvin kommt jedoch im humiden Klimabereich wegen seiner hohen Löslichkeit oberflächennah nicht vor.

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 2,106 % K_2O, entsprechend 1,75 % K. Die Gesteine Baden-Württembergs sind hinsichtlich ihres mittleren Kaliumgehaltes gegenüber dem CLARKE-Wert der oberen Erdkruste nur leicht abgereichert.

Die P 90-Werte für K_2O der betrachteten petrogeochemischen Gesteinseinheiten schwanken stark zwischen 0,49 und 8,73 %.

Sehr niedrige Werte (P 90: < 2 %) weisen quartäre Süßwasserkalke und Kalke des Oberjura und des Oberen Muschelkalks auf.

Niedrige Werte (P 90: > 2 – 4 %) treten in Lösssedimenten, Quartärschichten, im Tertiär des Oberrheingrabens und des Molassebeckens, im Mittel- und Unterjura, Mittleren Muschelkalk sowie im Unteren und Mittleren Buntsandstein auf.

Erhöhte Gehalte (P 90: > 4 – 5 %) wurden in Mittel- und Oberkeuper, im Unteren Muschelkalk und im gefalteten Paläozoikum festgestellt.

Hohe Gehalte (P 90: > 5 – 8 %) finden sich in tertiären Vulkaniten, im Unterkeuper, im Oberen Buntsandstein, im Zechstein, im Oberkarbon / Rotliegend, in Gangmagmatiten, in variszischen Plutonen sowie in Migmatiten und Gneisen.

Sehr hohe Gehalte (P 90: > 8 %) treten in Rotliegend-Magmatiten (Quarzporphyr) auf.

In allen dieser Untersuchung zu Grunde liegenden Proben ist das Kalium in silikatischen, gesteinsbildenden Mineralen wie Feldspäten, Glimmern oder Tonmineralen gebunden. Bei ihrer Verwitterung kann Kalium in Lösung gehen, aber auch relativ rasch wieder in Tonmineralen fixiert werden.

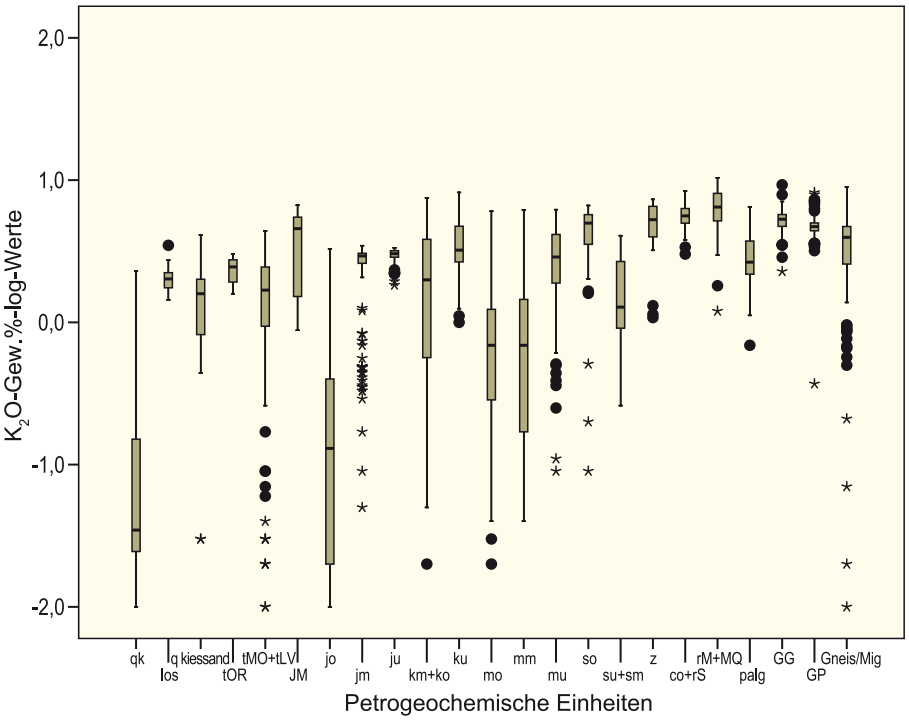


Abb. 5.1.8-1:

Boxplots für Kaliumoxid (K_2O); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.8-1: Statistische Kennwerte für Kaliumoxid (K_2O) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Kalium (K_2O) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,01	2,29	0,24	0,57	0,49	0,04
Lösssediment	los	40	1,44	3,48	2,03	0,39	2,41	2,02
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,03	4,1	1,52	0,74	2,33	1,59
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	1,59	3,02	2,40	0,49	3,00	2,46
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,01	4,39	1,68	1,02	3,07	1,69
Tertiäre Vulkanite	JM	9	0,88	6,66	3,73	2,18	5,94	4,56
Jura								
Oberjura	jo	1 151	0,01	3,27	0,30	0,40	0,87	0,13
Mitteljura	jm	133	0,05	3,46	2,46	1,00	3,15	2,93
Unterjura	ju	125	1,83	3,34	2,97	0,30	3,25	3,04
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	615	0,02	7,5	2,28	1,78	4,74	1,99
Unterkeuper	ku	25	1	8,19	3,54	1,71	5,60	3,22
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,02	6,04	0,94	0,95	1,86	0,69
Mittlerer Muschelkalk	mm	109	0,04	6,17	1,04	1,16	2,65	0,69
Unterer Muschelkalk	mu	117	0,09	6,2	2,96	1,50	4,99	2,88
Oberer Buntsandstein	so	64	0,09	6,63	4,50	1,61	6,09	4,99
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	0,26	4,07	1,73	1,13	3,40	1,28
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	1,08	7,32	4,95	2,05	7,16	5,27
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	3,02	8,39	5,57	1,13	6,79	5,61
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	1,2	10,39	6,41	2,02	8,73	6,47
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	0,69	6,47	2,94	1,24	4,40	2,65
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	121	2,28	9,27	5,24	0,91	6,21	5,31
Variszische Plutone („Granite“)	GP	211	0,37	8,18	4,76	0,76	5,43	4,71
Migmatite und Gneise	MI + gn	137	0,01	8,98	3,64	1,65	5,48	3,96
Alle Einheiten		**3 580**	**0,01**	**10,39**	**Flächen-gewichteter Median**			**2,11**

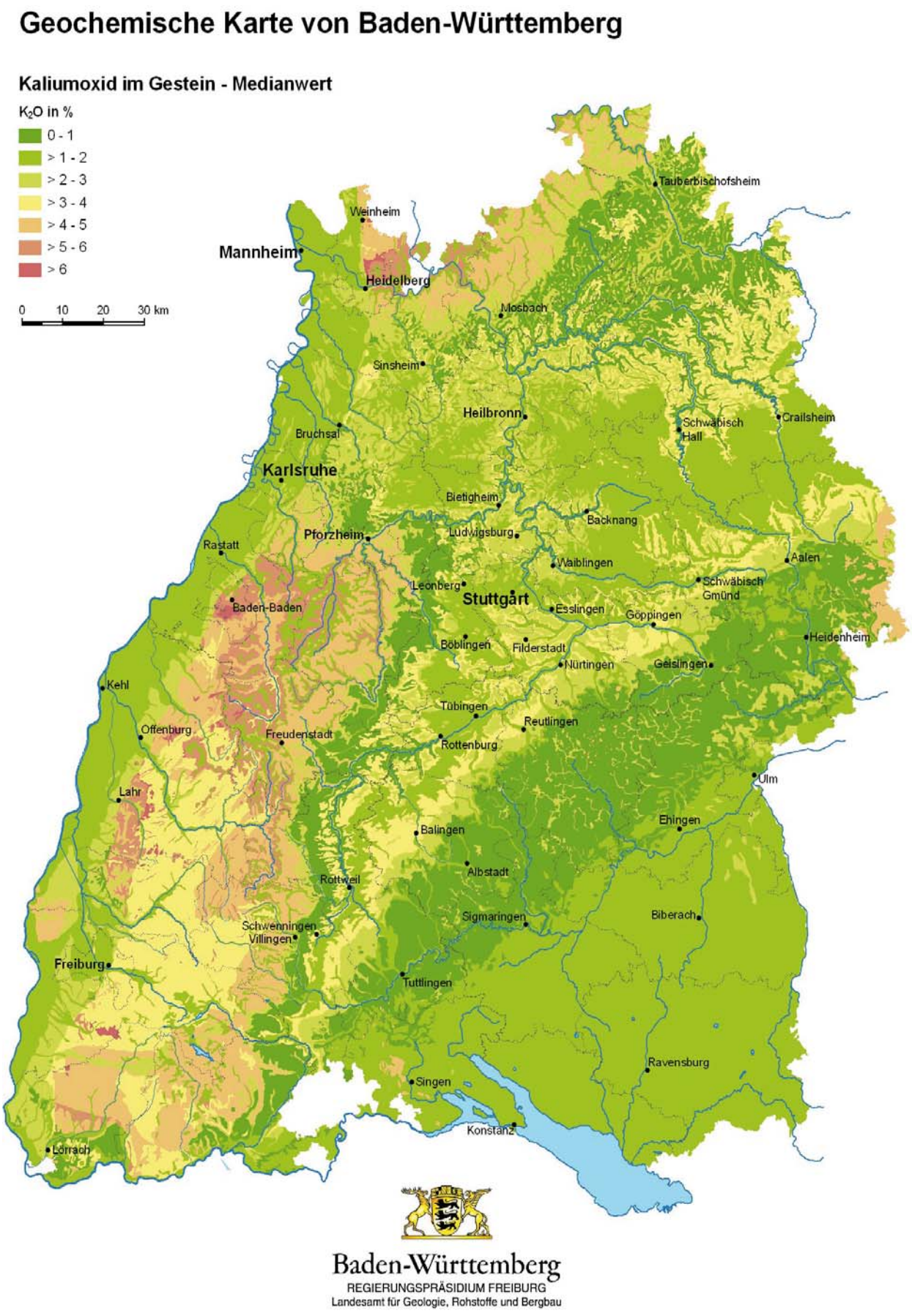


Abb. 5.1.8-2: Kaliumoxid im Gestein – Medianwert.

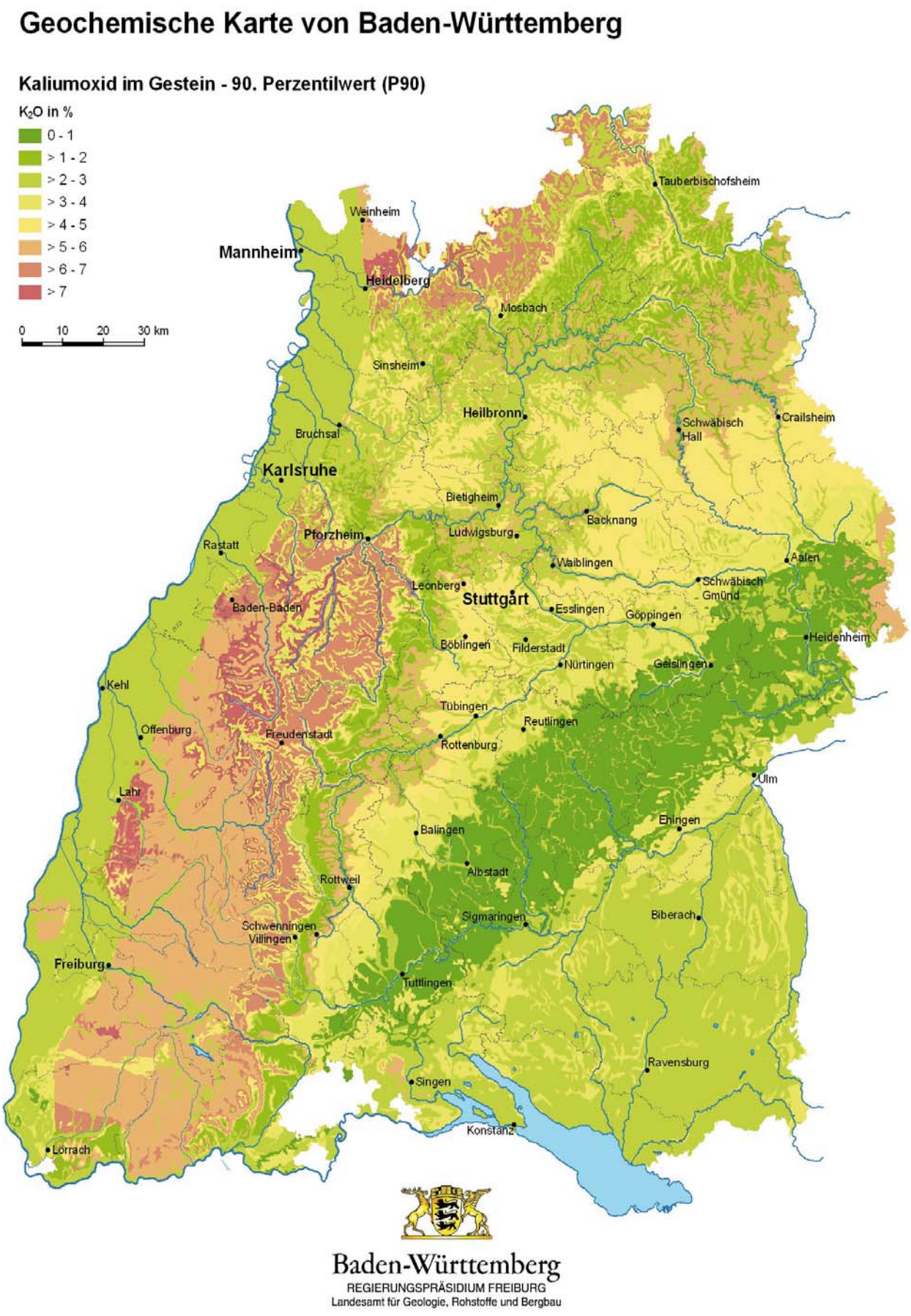


Abb. 5.1.8-3: Kaliumoxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.9 Magnesium (als MgO)

Magnesium ist mit einem Anteil von 2,33 % in der kontinentalen Kruste vertreten und steht seiner Häufigkeit nach an 7. Stelle.

Magnesium tritt in der Natur wegen seiner Reaktionsfreudigkeit nur in Verbindungen auf. Die häufigsten Magnesiumverbindungen finden sich unter den Silikaten, wie z. B. Olivin (Forsterit Mg_2SiO_4), Serpentin ($Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$) oder Talk ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$). Weitere wichtige Magnesiumminerale sind die beiden Karbonate Dolomit ($CaMg[CO_3]_2$) und Magnesit ($MgCO_3$).

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs erreicht 1,893 % MgO, entsprechend 1,14 % Mg. Der durchschnittliche Magnesiumgehalt der Gesteine Baden-Württembergs beträgt nur etwa die Hälfte des CLARKE-Werts für die obere Erdkruste.

Die P 90-Werte für MgO liegen in den verschiedenen petrogeochemischen Einheiten zwischen 0,19 und 16,76 %.

Niedrige Werte (P 90: < 1 %) wurden in quartären Süßwasserkalken sowie im Unteren und Mittleren Buntsandstein festgestellt.

Erhöhte Werte (P 90: > 1 – 8 %) finden sich in Lösssedimenten, Quartärschichten, im Tertiär des Oberrheingrabens und des Molassebeckens, in tertiären Vulkaniten, in Gesteinen des gesamten Jura, im Oberen Buntsandstein, im Oberkarbon / Rotliegend, Rotliegend-Magmatiten, im gefalteten Paläozoikum, in Gangmagmatiten und variszischen Plutonen sowie in Migmatiten und Gneisen.

Hohe Werte (P 90: > 8 – 16 %) weisen Mittel- und Oberkeuper, Mittlerer und Unterer Muschelkalk sowie der Zechstein auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 16%) treten in Gesteinen des Unterkeupers und des Oberen Muschelkalks auf.

Die statistische Auswertung zeigt, dass hohe und sehr hohe 90. Perzentilwerte für MgO nur in Sedimenten auftreten, in denen Dolomit eine Hauptkomponente darstellt.

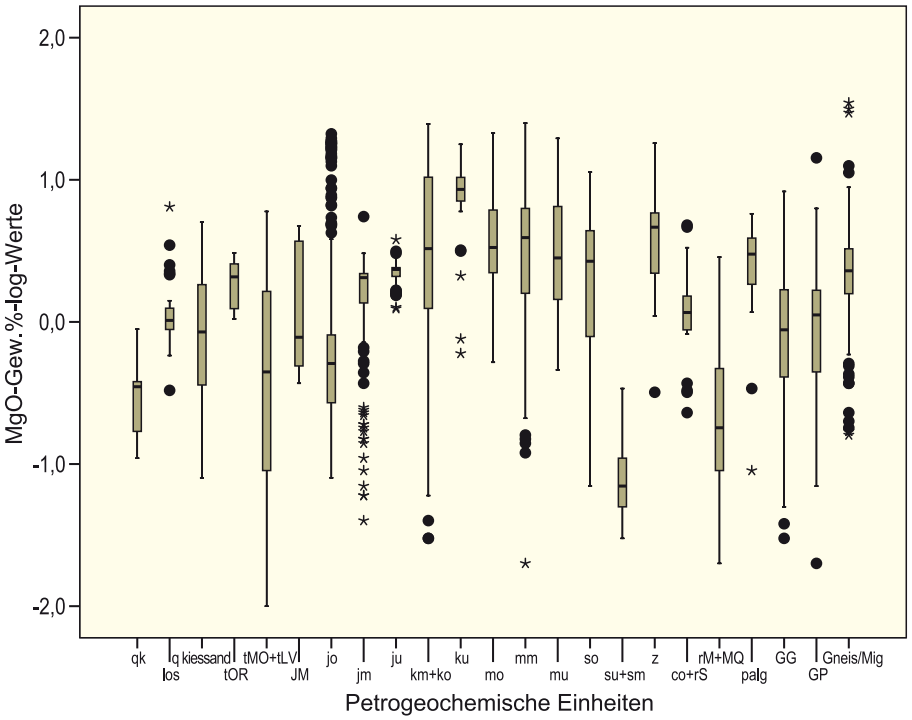


Abb. 5.1.9-1:

Boxplots für Magnesiumoxid (MgO); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.9-1: Statistische Kennwerte für Magnesiumoxid (MgO) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Magnesium (MgO) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,11	0,89	0,35	0,21	0,57	0,35
Lösssediment	los	40	0,33	6,45	1,32	1,01	2,20	1,03
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,08	5,03	1,26	1,16	2,90	0,85
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	1,05	3,06	2,02	0,75	3,02	2,08
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,01	5,99	1,04	1,27	2,77	0,45
Tertiäre Vulkanite	JM	9	0,37	4,75	2,07	1,87	4,43	0,78
Jura								
Oberjura	jo	1 152	0,08	21,06	1,06	2,46	1,78	0,51
Mitteljura	jm	133	0,04	5,51	1,71	0,81	2,27	2,05
Unterjura	ju	125	1,24	3,8	2,25	0,35	2,49	2,34
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	616	0,03	24,7	5,91	5,38	13,75	3,28
Unterkeuper	ku	25	0,6	17,78	8,68	4,66	16,12	8,56
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,52	21,27	5,62	5,52	16,76	3,34
Mittlerer Muschelkalk	mm	109	0,02	25,06	5,52	5,51	15,45	3,92
Unterer Muschelkalk	mu	117	0,46	19,58	4,85	4,63	12,44	2,82
Oberer Buntsandstein	so	64	0,07	11,33	3,07	2,56	6,18	2,68
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	0,03	0,34	0,10	0,08	0,19	0,07
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	0,32	18,11	5,62	5,08	13,15	4,64
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	0,23	4,8	1,46	1,10	2,93	1,17
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	0,02	2,86	0,42	0,56	1,02	0,18
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	0,09	5,77	2,91	1,26	4,34	3,00
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	123	0,03	8,28	1,41	1,61	3,07	0,88
Variszische Plutone („Granite“)	GP	236	0,02	14,27	1,30	1,35	2,26	1,12
Migmatite und Gneise	MI + gn	137	0,16	34,84	3,31	4,77	4,85	2,29
Alle Einheiten		**3 609**	**0,01**	**34,84**	**Flächen-gewichteter Median**			**1,89**

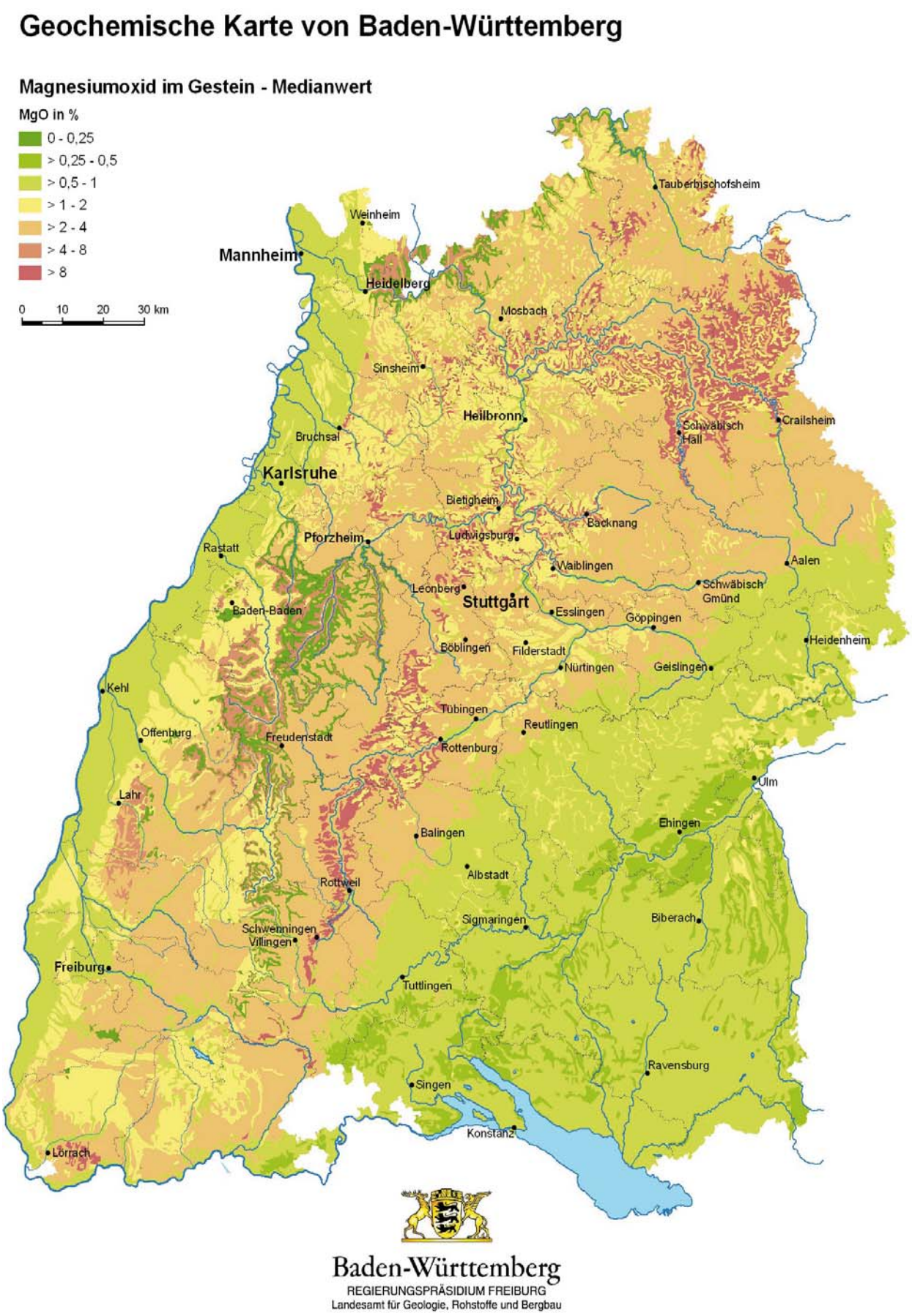


Abb. 5.1.9-2: Magnesiumoxid im Gestein – Medianwert.

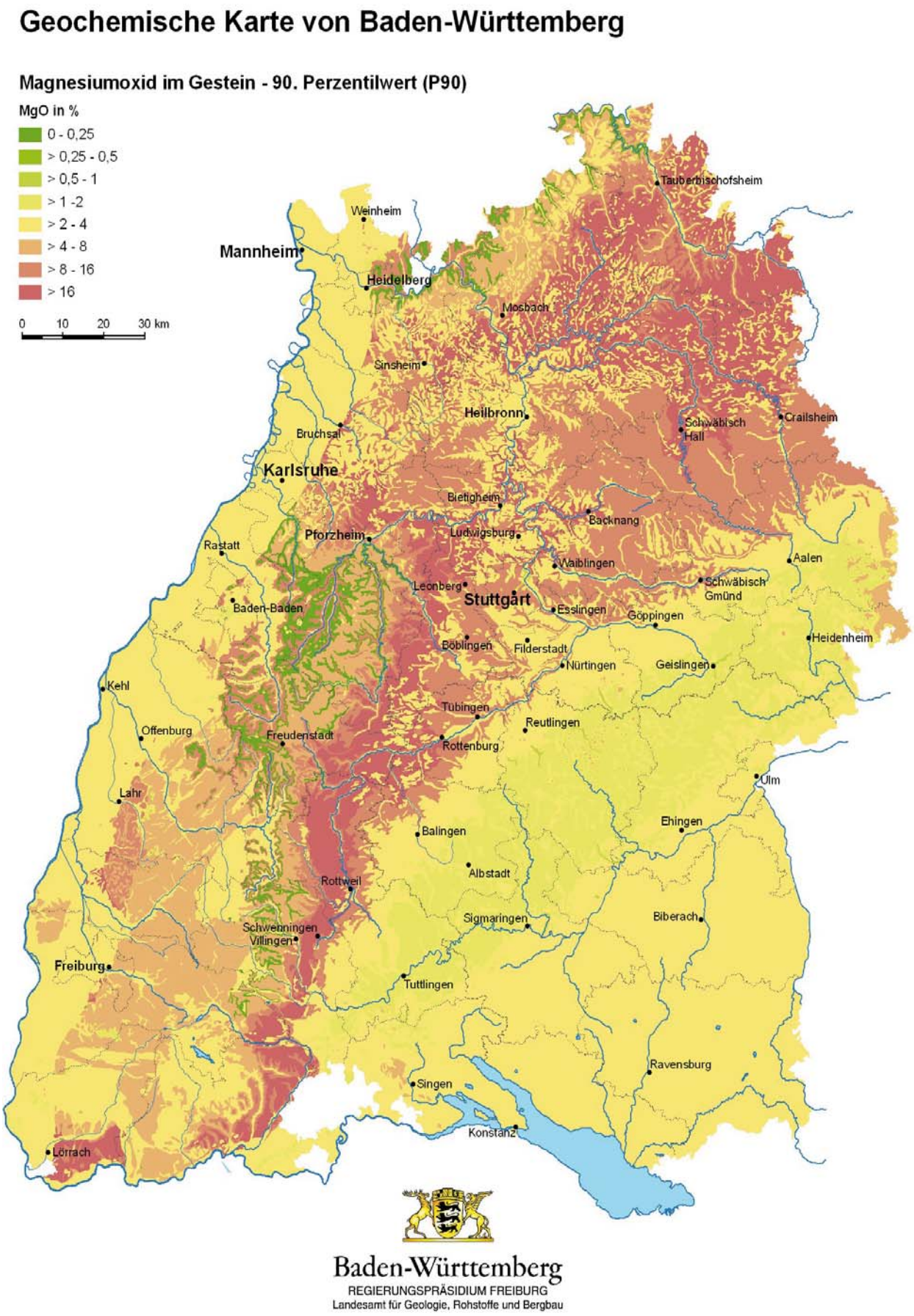


Abb. 5.1.9-3: Magnesiumoxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.10 Molybdän (Mo)

Molybdän ist mit 1,2 mg/kg am Aufbau der kontinentalen Erdkruste beteiligt und steht damit an 57. Stelle der Elementhäufigkeiten. Einziges wichtiges Molybdänerz ist Molybdänit (MoS_2). Gelegentlich tritt Wulfenit ($PbMoO_4$) in der Oxidationszone von Erzgängen und auf Bergbauhalden auf.

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs liegt bei 2,2 mg/kg Mo, was eine Anreicherung gegenüber dem CLARKE-Wert darstellt.

Die P 90-Werte für Molybdän der untersuchten petrogeochemischen Einheiten liegen zwischen 2 und 94 mg/kg.

Niedrige Gehalte (P 90: < 3 mg/kg) finden sich in quartären Lösssedimenten, Quartärschichten, im Tertiär der Molassebeckens, in tertiären Vulkaniten, im Jura, im Oberen und Unteren Muschelkalk, im Buntsandstein, im Zechstein, in Oberkarbon-/Rotliegend-Sedimenten, in Rotliegend-Magmatiten, in Gangmagmatiten und in variszischen Plutonen.

Erhöhte Gehalte (P 90: > 3 – 5 mg/kg) weisen Mittel- und Oberkeuper, Mittlerer Muschelkalk, gefaltetes Paläozoikum sowie Migmatite und Gneise auf.

Hohe Gehalte (P 90: > 5 – 10 mg/kg) wurden in quartären Süßwasserkalken und im Unterkeuper angetroffen.

Sehr hohe Gehalte (P 90: > 10 mg/kg) treten im Tertiär des Oberrheingrabens (94 mg/kg) auf.

Bei der magmatischen Gesteinsbildung wird Molybdän bevorzugt im Dachbereich von Granitplutonen als Molybdänit fixiert, zusammen mit Wolfram-, Zinn- und Fluoranreicherungen. Geringe Molybdän-Konzentrationen können auch in die Kristallgitter von Feldspäten und Biotiten eingebaut werden.

Molybdän ist ein für Säugetiere und Pflanzen essenzielles Spurenelement. Es reichert sich in Sedimenten an, die anoxisch und reich an organischer Substanz sind. Es kann in Gegenwart von Eisen in Pyrit eingebaut oder zusammen mit diesem als MoS_2 gefällt werden. Für pelagische Tiefseesedimente werden Gehalte von 4 – 18 mg/kg, für bituminöse Schwarzschiefer von etwa 70 mg/kg Molybdän genannt (DVWK 1998). Letztere Angaben stehen in guter Übereinstimmung mit den hohen Einzelwerten im Tertiär des Oberrheingrabens, die im Fischschiefer angetroffen wurden.

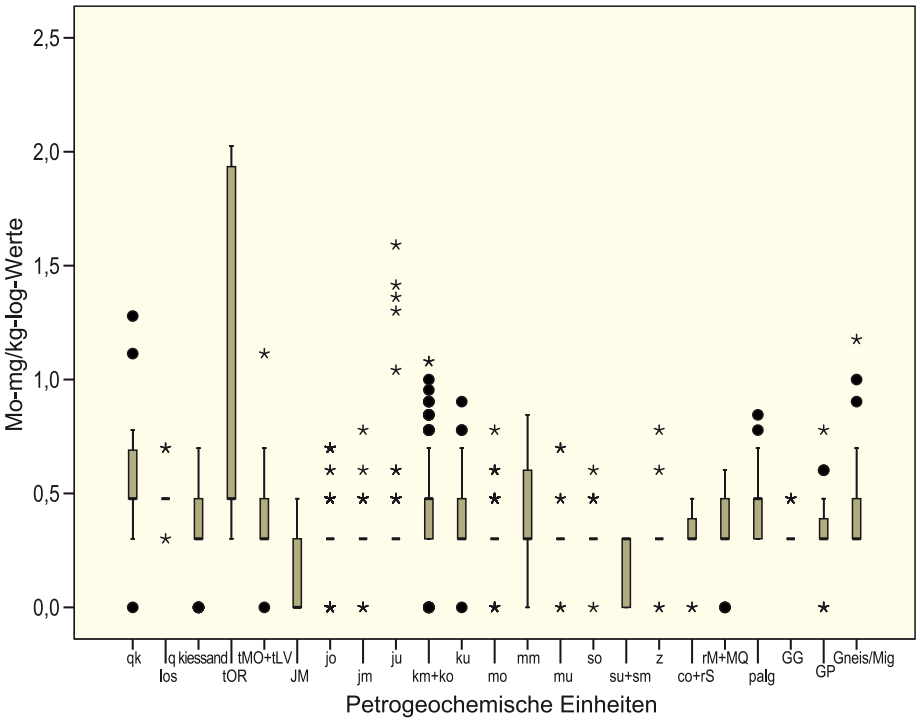


Abb. 5.1.10-1:

Boxplots für Molybdän (Mo); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.10-1: Statistische Kennwerte für Molybdän (Mo) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Molybdän (Mo) in mg/kg Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	1	19	5,0	4,6	9,5	3
Lösssediment	los	35	2	5	3,1	0,5	3	3
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	126	1	5	2,3	0,6	3	2
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	2	106	37	45	94	3
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	117	1	13	2,4	1,2	3	2
Tertiäre Vulkanite	JM	9	1	3	1,6	0,9	3	1
Jura								
Oberjura	jo	676	1	5	2,2	0,7	3	2
Mitteljura	jm	100	1	6	2,1	0,6	3	2
Unterjura	ju	97	2	39	3,3	5,3	3	2
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	384	1	12	2,9	1,4	4	3
Unterkeuper	ku	24	1	8	3,0	1,7	5,7	2
Oberer Muschelkalk	mo	185	1	6	2,2	0,7	3	2
Mittlerer Muschelkalk	mm	53	1	7	2,9	1,2	4	2
Unterer Muschelkalk	mu	40	1	5	2,2	0,9	3	2
Oberer Buntsandstein	so	48	1	4	2,2	0,5	3	2
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	1	2	1,6	0,5	2	2
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	1	6	2,2	1,1	2,4	2
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	1	3	2,2	0,5	3	2
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	46	1	4	2,5	0,7	3	2
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	57	2	7	3,0	1,2	5	3
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	104	2	3	2,1	0,3	2	2
Variszische Plutone („Granite“)	GP	175	1	6	2,3	0,6	3	2
Migmatite und Gneise	MI + gn	105	2	15	2,8	1,7	4	2
Alle Einheiten		**2487**	**1**	**106**	**Flächen-gewichteter Median**			**2,2**

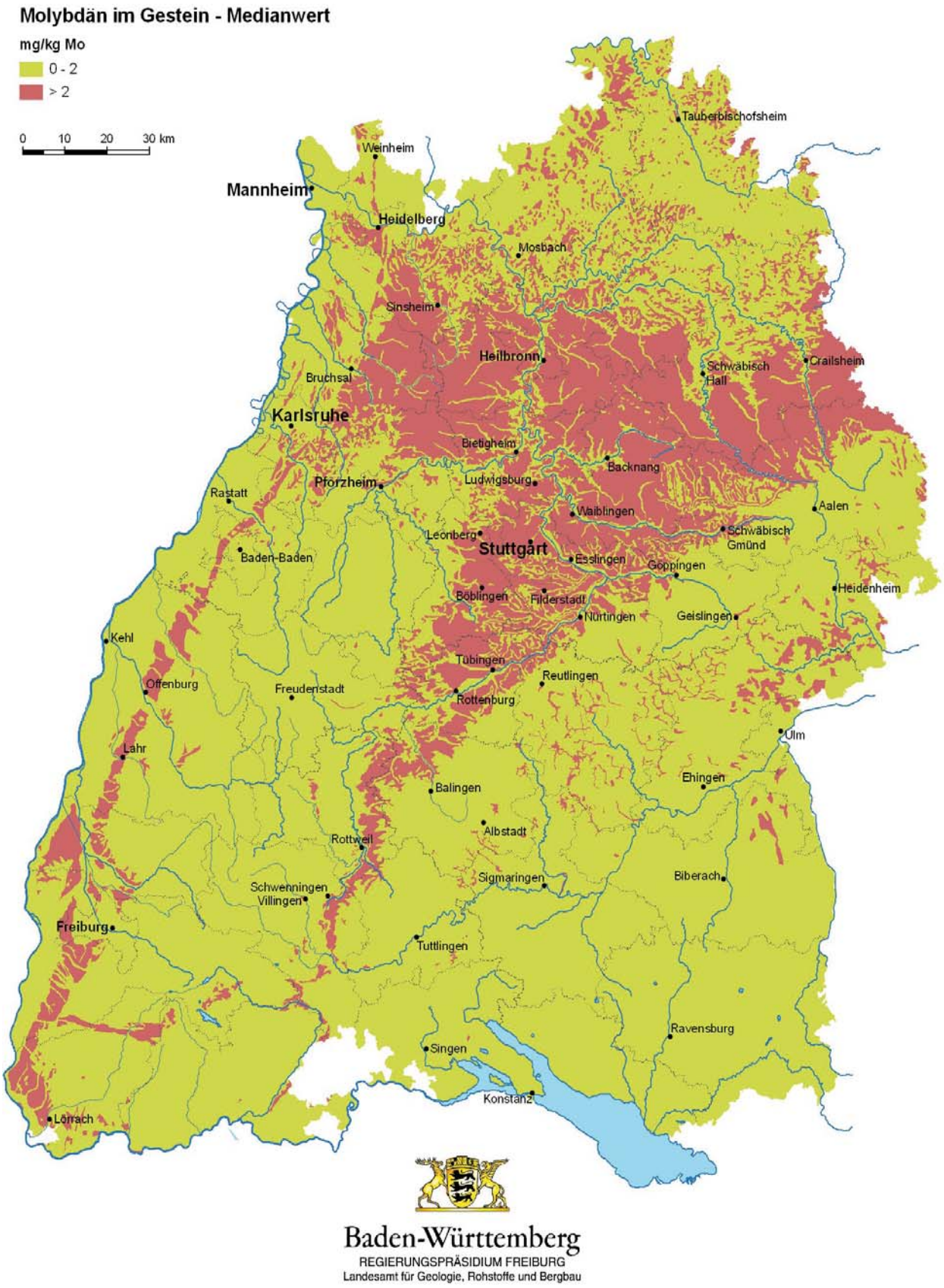


Abb. 5.1.10-2: Molybdän im Gestein – Medianwert.

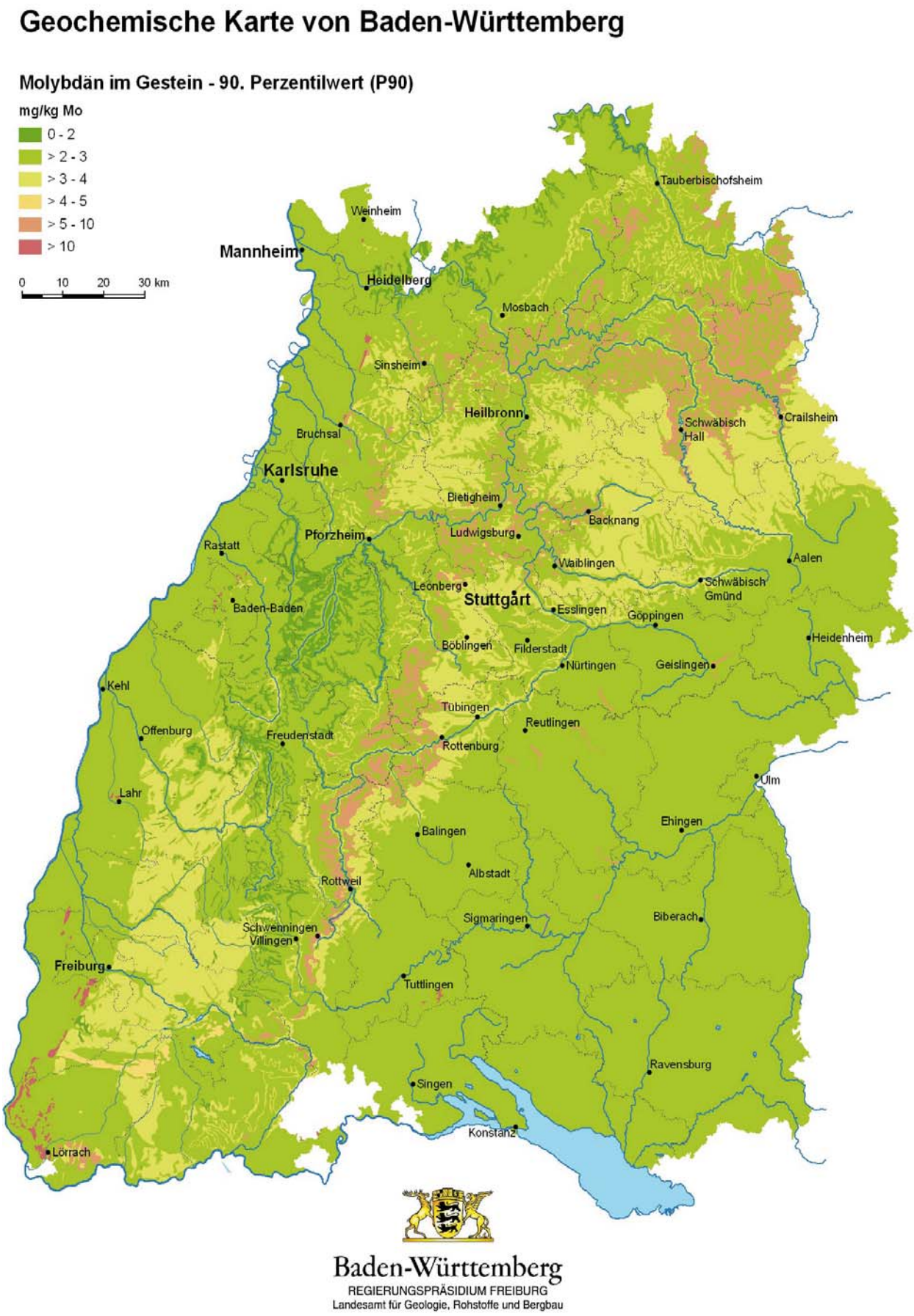


Abb. 5.1.10-3: Molybdän im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.11 Natrium (als Na_2O)

Natrium kommt mit 2,36 % in der oberen kontinentalen Erdkruste vor und steht seiner Häufigkeit in der oberen Erdkruste nach an 6. Stelle der Elemente. Natrium liegt in der Natur stets in Verbindungen vor; wichtigste Minerale sind Steinsalz (Halit, NaCl) und Silikate wie Natronfeldspat (Albit, $NaAlSi_3O_8$), Amphibole, Pyroxene u. a. Steinsalz tritt allerdings im humiden Klimabereich wegen seiner hohen Löslichkeit nicht an der Erdoberfläche auf.

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 0,623 % Na_2O, entsprechend 0,46 % Na. Für die Baden-Württembergischen Gesteine ergibt sich daraus eine recht deutliche Abreicherung ihres durchschnittlichen Gehalts an Natrium gegenüber dem CLARKE-Wert für die obere Erdkruste.

Die P 90-Werte für Na_2O der petrogeochemischen Einheiten streuen zwischen 0,05 und 4,56 %.

Niedrige Werte (P 90: < 0,4 %) weisen quartäre Süßwasserkalke, das Tertiär des Molassebeckens, der gesamte Jura, Unterkeuper, Oberer Muschelkalk, sowie Unterer und Mittlerer Buntsandstein auf.

Erhöhte Werte (P 90: > 0,4 – 0,8 %) finden sich im Tertiär des Oberrheingrabens, im Mittel- und Oberkeuper, im Mittleren und Unteren Muschelkalk, im Oberen Buntsandstein, im Zechstein und in Oberkarbon-/Rotliegend-Sedimenten.

Hohe Werte (P 90: > 0,8 – 3,2 %) treten in Lösssedimenten, in Quartärschichten und Rotliegend-Magmatiten auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 3,2 %) wurden in tertiären Vulkaniten, im gefalteten Paläozoikum, in Gangmagmatiten, in variszischen Plutonen sowie in Migmatiten und Gneisen angetroffen.

Hohe 90. Perzentilwerte in Lösssedimenten, in Quartärschichten und in Rotliegend-Magmatiten sind überwiegend an den Feldspatgehalt der zugehörigen Gesteine gebunden. Für die sehr hohen 90. Perzentilwerte, die allen Kristallingesteinen gemeinsam sind, kommen neben Feldspat auch weitere silikatische, gesteinsbildende Minerale als Natriumträger in Betracht. Dies sind besonders Amphibole, Pyroxene, Turmalin und weitere. Hohe Werte in der petrogeochemischen Einheit der tertiären Vulkanite lassen sich auf die Gesteinsgruppe der Phonolithe zurückführen, in denen Ägirinaugit und Natrolith als charakteristische Natriumminerale auftreten. Der Maximumwert von knapp 52 % Na_2O beruht auf Probenmaterial aus der Salinarformation des Mittleren Muschelkalks.

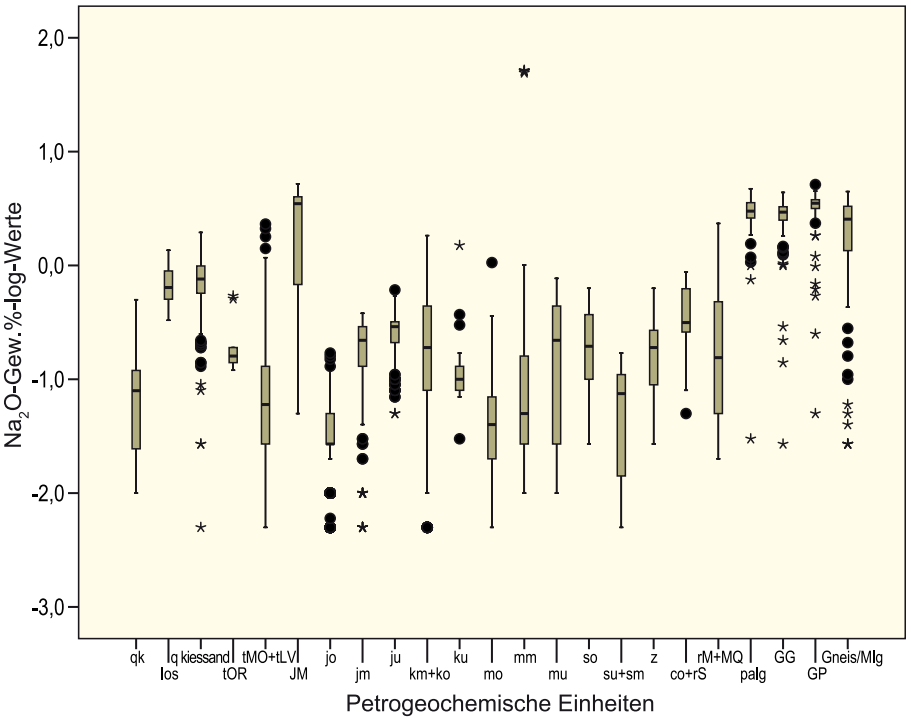


Abb. 5.1.11-1:

Boxplots für Natriumoxid (Na_2O); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.11-1: Statistische Kennwerte für Natriumoxid (Na_2O) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Natrium (Na_2O) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,01	0,5	0,11	0,12	0,19	0,08
Lösssediment	los	35	0,33	1,36	0,70	0,27	1,04	0,64
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,005	1,95	0,78	0,38	1,32	0,76
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	0,12	0,54	0,23	0,16	0,51	0,16
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,005	2,31	0,16	0,36	0,31	0,06
Tertiäre Vulkanite	JM	9	0,05	5,22	2,53	1,97	4,56	3,49
Jura								
Oberjura	jo	1 145	0,005	0,17	0,03	0,02	0,05	0,03
Mitteljura	jm	133	0,005	0,38	0,20	0,11	0,33	0,22
Unterjura	ju	125	0,05	0,61	0,26	0,11	0,34	0,29
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	622	0,005	1,83	0,32	0,36	0,74	0,19
Unterkeuper	ku	25	0,03	1,5	0,18	0,29	0,25	0,10
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,005	1,06	0,06	0,08	0,12	0,04
Mittlerer Muschelkalk	mm	107	0,01	51,89	2,49	10,74	0,55	0,05
Unterer Muschelkalk	mu	117	0,01	0,77	0,25	0,22	0,55	0,22
Oberer Buntsandstein	so	64	0,027	0,63	0,25	0,18	0,54	0,20
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	36	0,005	0,17	0,07	0,05	0,13	0,08
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	0,027	0,63	0,22	0,18	0,50	0,19
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	0,05	0,88	0,41	0,24	0,73	0,32
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	0,02	2,34	0,43	0,66	1,93	0,16
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	0,03	4,72	2,94	0,91	3,91	3,00
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	123	0,027	4,38	2,78	0,83	3,62	2,94
Variszische Plutone („Granite“)	GP	236	0,05	5,14	3,42	0,66	4,03	3,52
Migmatite und Gneise	MI + gn	137	0,027	4,46	2,35	1,16	3,65	2,55
Alle Einheiten		**3 608**	**0,005**	**51,89**	**Flächen-gewichteter Median**			**0,62**

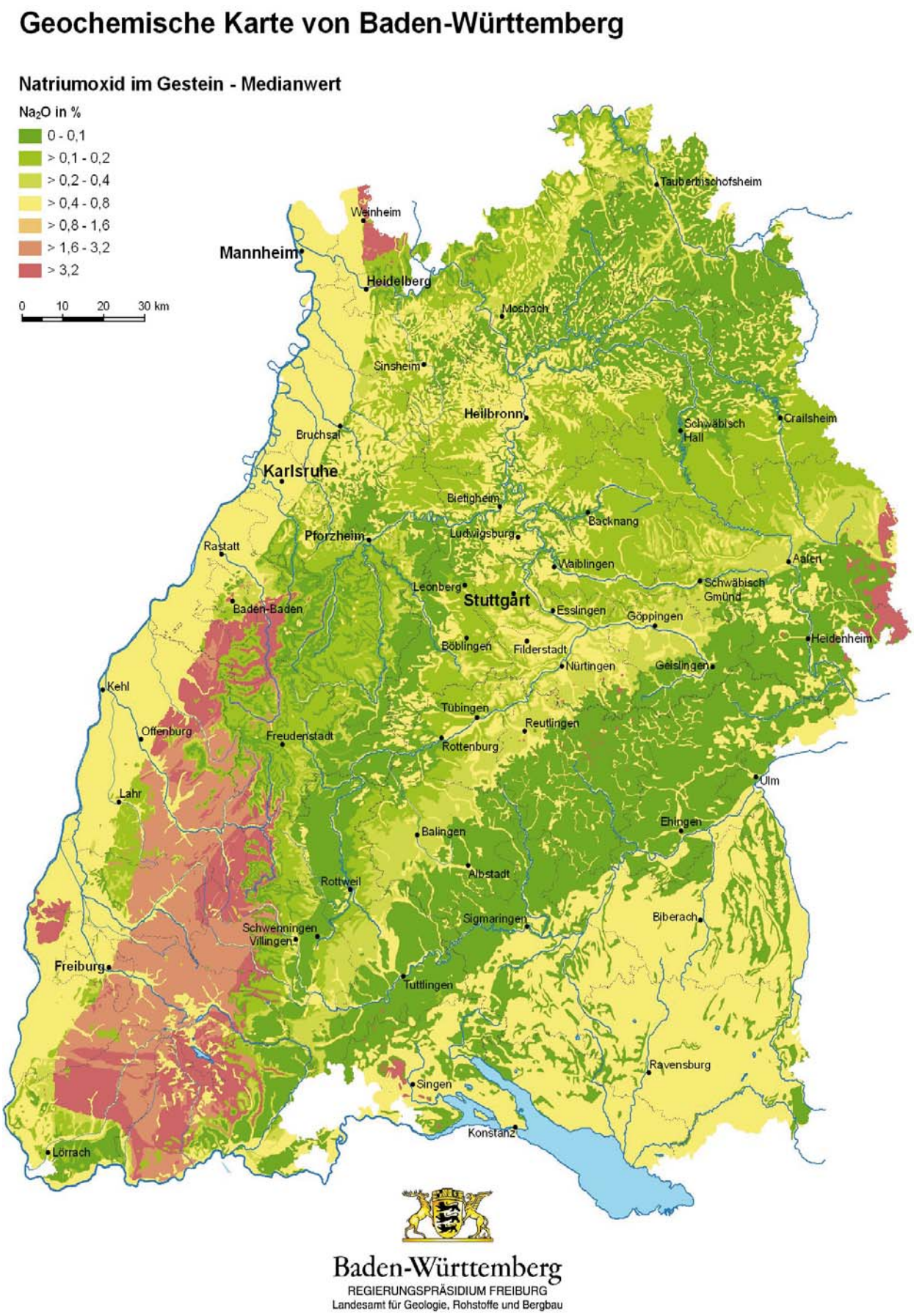


Abb. 5.1.11-2: Natriumoxid im Gestein – Medianwert.

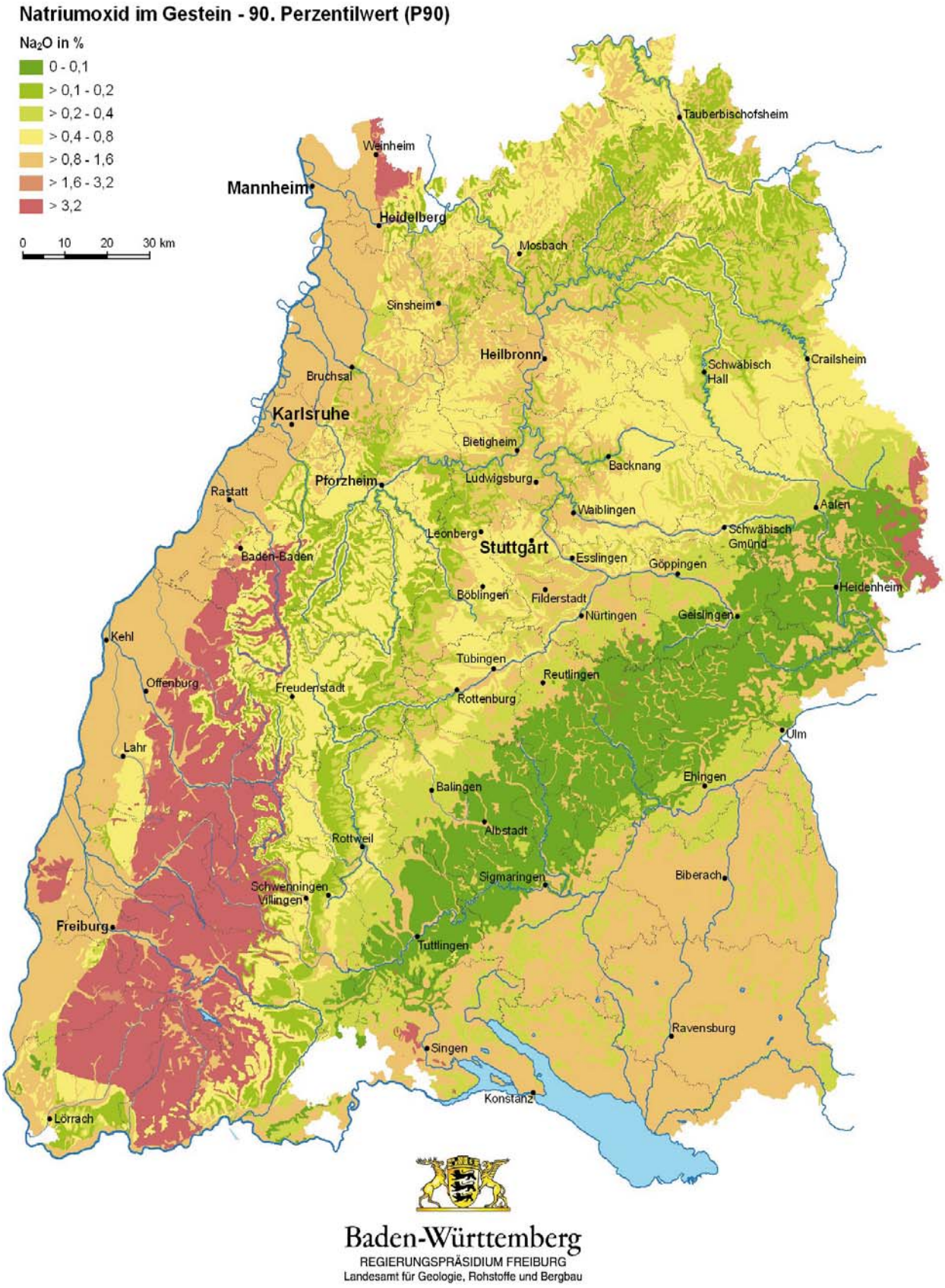


Abb. 5.1.11-3: Natriumoxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.12 Nickel (Ni)

Nickel liegt mit 84 mg/kg in der Erdkruste vor und steht seiner Häufigkeit nach an 23. Stelle. Es ist also häufiger als Kupfer oder Zink. Gediegen kommt Nickel nur in Eisenmeteoriten und vermutlich auch im Erdkern vor. Die wichtigsten Ni-Minerale sind Pentlandit ($(Fe,Ni)_9S$), Nickelin (NiAs), Millerit (NiS) und das Verwitterungsprodukt Annabergit ($Ni_3[AsO_4]_2 \cdot 8H_2O$).

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 18 mg/kg, was eine deutliche Abreicherung gegenüber dem CLARKE-Wert darstellt.

Die P 90-Werte der petrogeochemischen Gesteinseinheiten Baden-Württembergs streuen zwischen 5 und 95 mg/kg.

Niedrige Werte (P 90: < 30 mg/kg) treten in quartären Süßwasserkalken, tertiären Vulkaniten, im Oberjura, im Oberen- und Mittleren Muschelkalk, im Unteren- und Mittleren Buntsandstein, im Oberkarbon / Rotliegend, in Rotliegend-Magmatiten und in variszischen Plutonen auf.

Erhöhte Werte (P 90: > 30 – 50 mg/kg) finden sich in Lösssedimenten und Quartärschichten, in Gesteinen von Mittel- und Oberkeuper und im Unteren Muschelkalk.

Hohe Werte (P 90: > 50 – 80 mg/kg) weisen das Tertiär des Oberrheingrabens und des Molassebeckens, Mittel- und Unterjura, Unterkeuper, Oberer Buntsandstein, Zechstein, Gangmagmatite sowie Migmatite und Gneise auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 80mg/kg) wurden im gefalteten Paläozoikum angetroffen.

Nickel ähnelt dem Magnesium- und Eisen-Ion in Bezug auf Größe und Ladung, weshalb es oft in Mineralen wie Olivine, Pyroxene oder Amphibole eingebaut wird. Diese sind charakteristische Bestandteile von basischen und ultrabasischen Gesteinen. Die hohen Maximalwerte von 1 998 mg/kg bei den Migmatiten und Gneisen sind beispielsweise auf Serpentinite zurückzuführen.

Im sedimentären Bereich zeigt sich eine positive Korrelation der Ni-Gehalte mit dem Tonanteil, z. B. in Tertiärschichten, im Mittel- und Unterjura, Unterkeuper und Unteren Muschelkalk. Dies ist mit der relativ hohen Bindungsfähigkeit des Nickels an Tonminerale durch Adsorption an die Oberflächen und Diffusion in die Zwischenschichten zu erklären (BRINKER 1995). Auch eine Anlagerung an organische Substanz kommt bei tonigen Sedimenten in Frage.

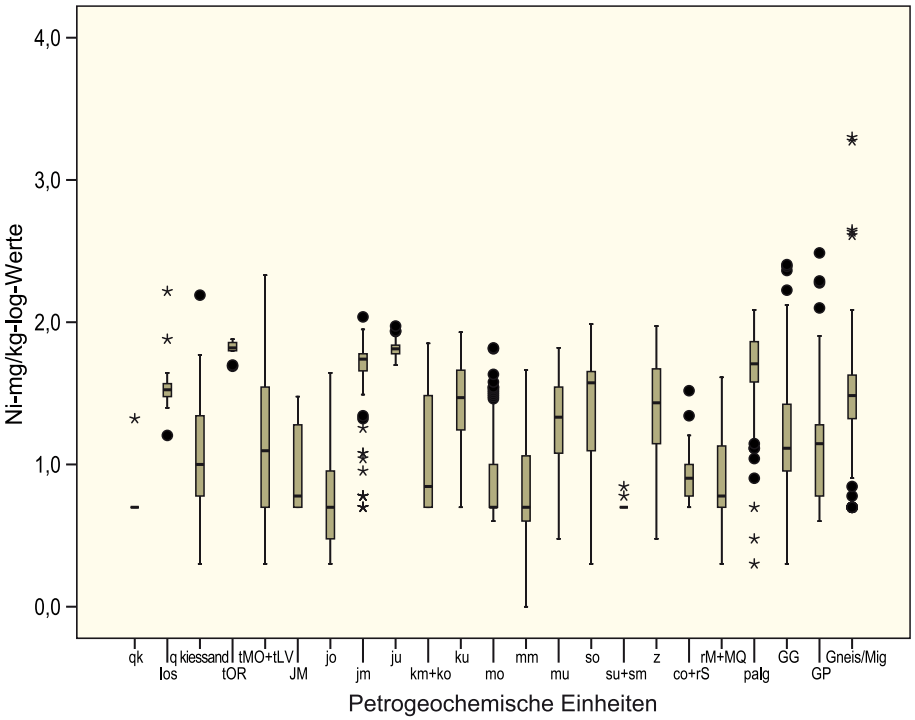


Abb. 5.1.12-1:

Boxplots für Nickel (Ni); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.12-1: Statistische Kennwerte für Nickel (Ni) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Nickel (Ni) in mg/kg Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	5	21	6,0	4,0	5	5
Lösssediment	los	40	16	165	37	22	42	34
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	2	155	19	19	46	10
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	49	76	65	9,1	74	66
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	2	214	29	41	56	13
Tertiäre Vulkanite	JM	9	5	30	12	9,1	21	6
Jura								
Oberjura	jo	701	2	44	7,5	7,1	17	5
Mitteljura	jm	124	5	109	50	19	67	55
Unterjura	ju	125	50	94	65	7,1	74	65
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	604	5	71	18	16	44	7
Unterkeuper	ku	24	5	85	33	22	58	30
Oberer Muschelkalk	mo	183	4	66	9,9	9,8	22	5
Mittlerer Muschelkalk	mm	104	1	46	9,0	8,7	19	5
Unterer Muschelkalk	mu	110	3	66	24	14	44	22
Oberer Buntsandstein	so	56	2	97	33	19	53	38
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	5	7	5,1	0,41	5	5
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	18	3	94	32	24	58	28
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	5	33	9,2	5,9	12	8
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	2	41	10	8,9	21	6
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	2	122	55	32	95	51
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	116	2	254	30	46	72	13
Variszische Plutone („Granite“)	GP	199	4	307	19	31	27	14
Migmatite und Gneise	MI + gn	136	5	1 998	69	238	59	31
Alle Einheiten		**3 021**	**1**	**1 998**	**Flächen-gewichteter Median**			**18**

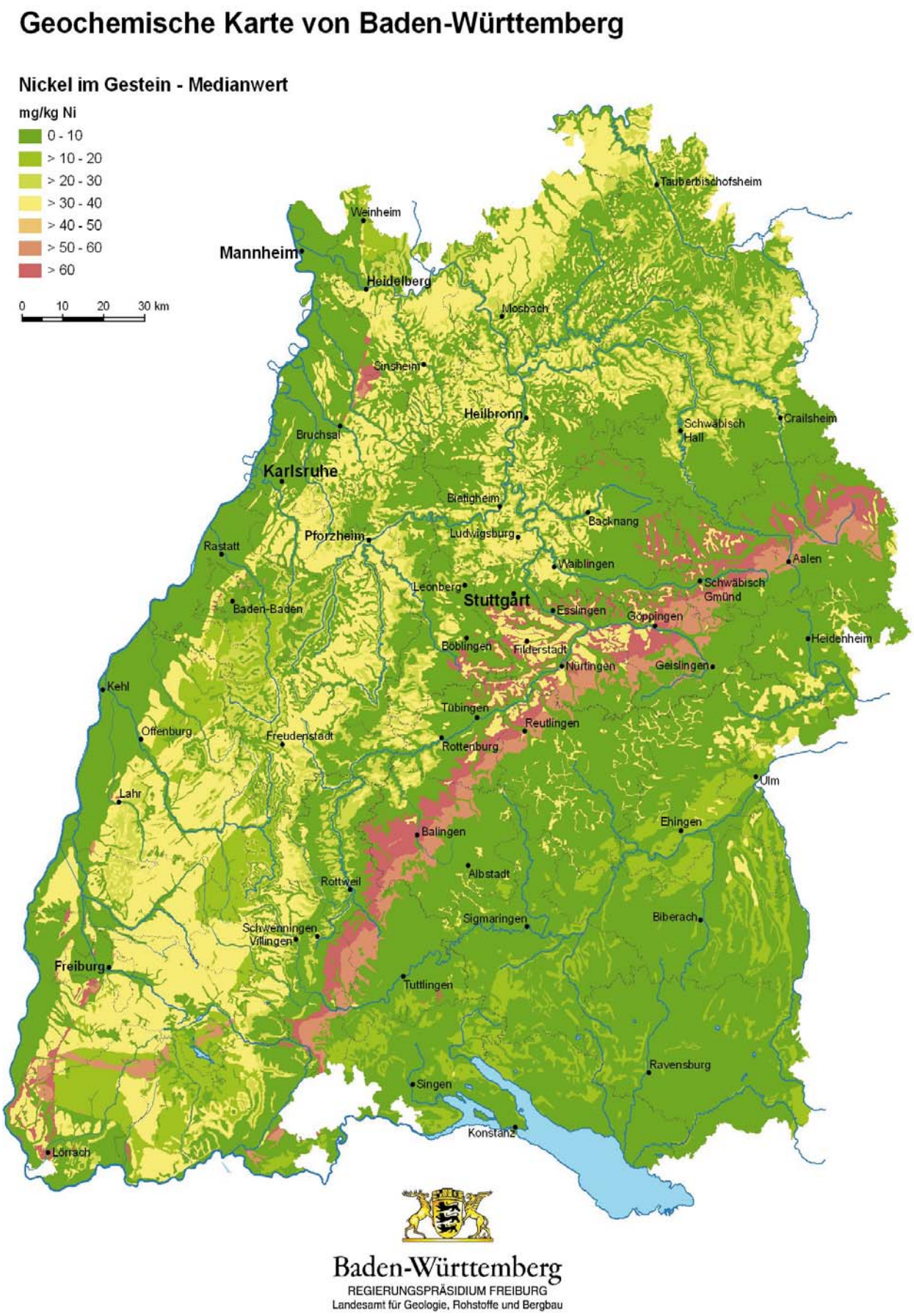


Abb. 5.1.12-2: Nickel im Gestein – Medianwert.

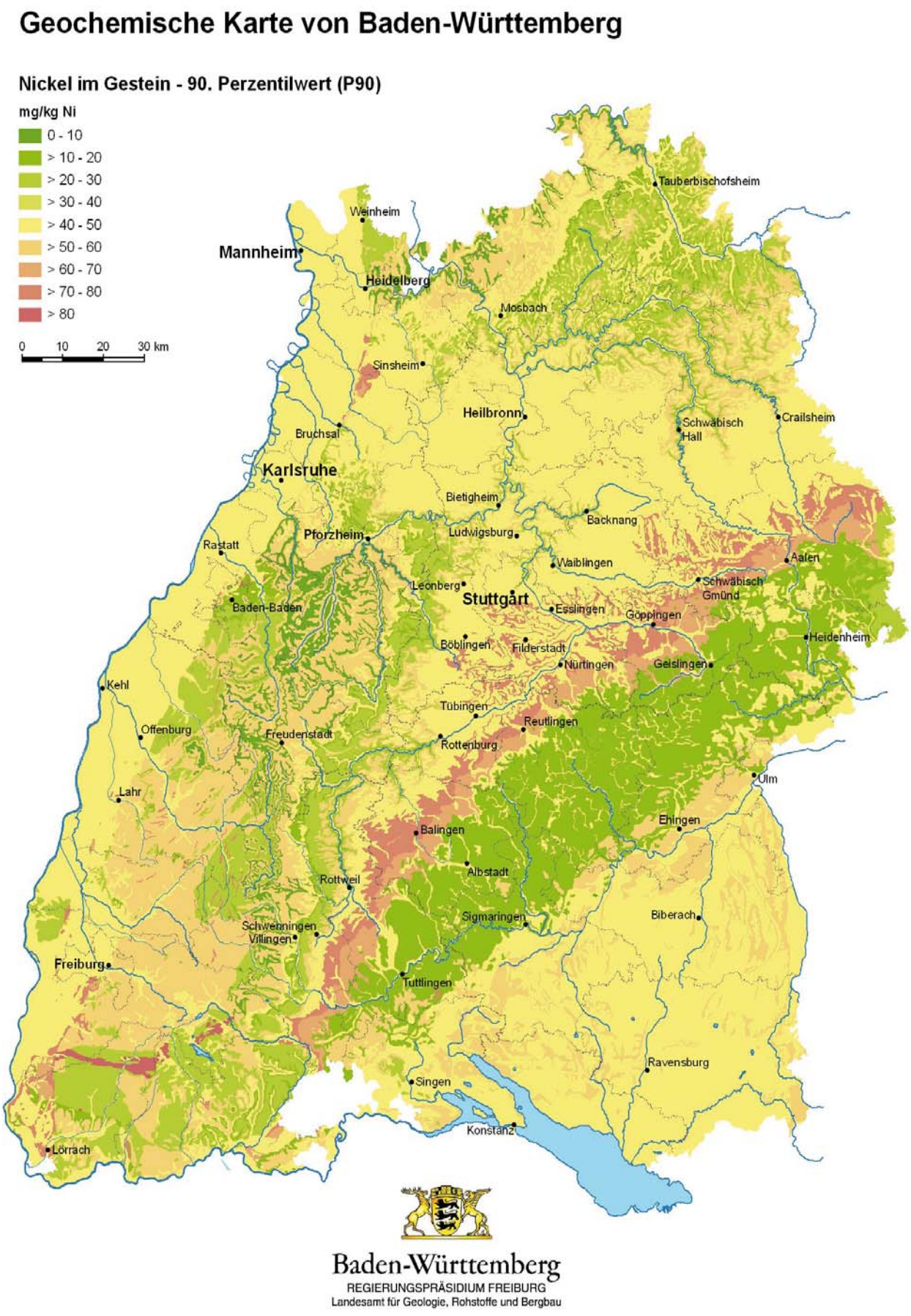


Abb. 5.1.12-3: Nickel im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.13 Phosphor (als P_2O_5)

Phosphor ist zu 0,105 % in der kontinentalen Erdkruste vorhanden und steht seiner Elementhäufigkeit nach an 11. Stelle. In elementarer Form kommt Phosphor auf der Erde nicht vor, sondern nur in Verbindungen. Die wichtigsten Phosphorminerale sind Apatit ($Ca_5[F,OH/PO_4]_3$), Vivianit ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$), Pyromorphit ($Pb_5(PO_4)_3Cl$) und Monazit ($Ce(PO_4)$).

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 0,0995 % P_2O_5, entsprechend 0,04 % P. Der mediane Gehalt der baden-württembergischen Gesteine an Phosphor liegt bei nur knapp der Hälfte des CLARKE-Werts.

Die P 90-Werte für P_2O_5 in den betrachteten petrogeochemischen Einheiten variieren zwischen 0,08 und 0,57 %.

Niedrige Werte (P 90: < 0,2 %) finden sich in quartären Süßwasserkalken, Lösssedimenten, Quartärschichten, im Tertiär des Oberrheingrabens sowie des Molassebeckens, im Oberjura, im Mittel- und Oberkeuper, im gesamten Muschelkalk und Buntsandstein sowie in den Oberkarbon/Rotliegend Sedimenten.

Erhöhte Werte (P 90: > 0,2 – 0,3 %) weisen Mittel- und Unterjura, Zechstein, Rotliegend-Magmatite und variszische Plutone auf.

Hohe Werte (P 90: > 0,3 – 0,4 %) wurden im gefalteten Paläozoikum und in Gangmagmatiten angetroffen.

Sehr hohe Werte (P 90: > 0,4 %) treten in tertiären Vulkaniten, im Unterkeuper sowie in Migmatiten und Gneisen auf.

Apatit – das wahrscheinlich wichtigste Phosphormineral in Baden-Württemberg – zählt zu den typischen Durchläufermineralen, d. h. er tritt unter nahezu allen Gesteinsbildungsbedingungen auf. Er fehlt in fast keinem magmatischen Gestein, ist häufig in Metamorphiten zu finden und tritt in Pegmatiten, hydrothermalen Gängen und in Sedimenten auf.

Als genereller Trend lässt sich feststellen, dass in Baden-Württemberg die Gesteine des Grundgebirges und die tertiären Vulkanite etwas höhere Werte aufweisen als die Sedimente. In den Sedimenten sind Mittel- und Unterjura und der Unterkeuper in etwas stärkerem Maße an Phosphor angereichert. Nach bisherigen Erfahrungen sind dies auch Sedimente, in denen Bonebeds auftreten können, d. h. Phosphor ist in diesen Schichten durch Organismen angereichert worden.

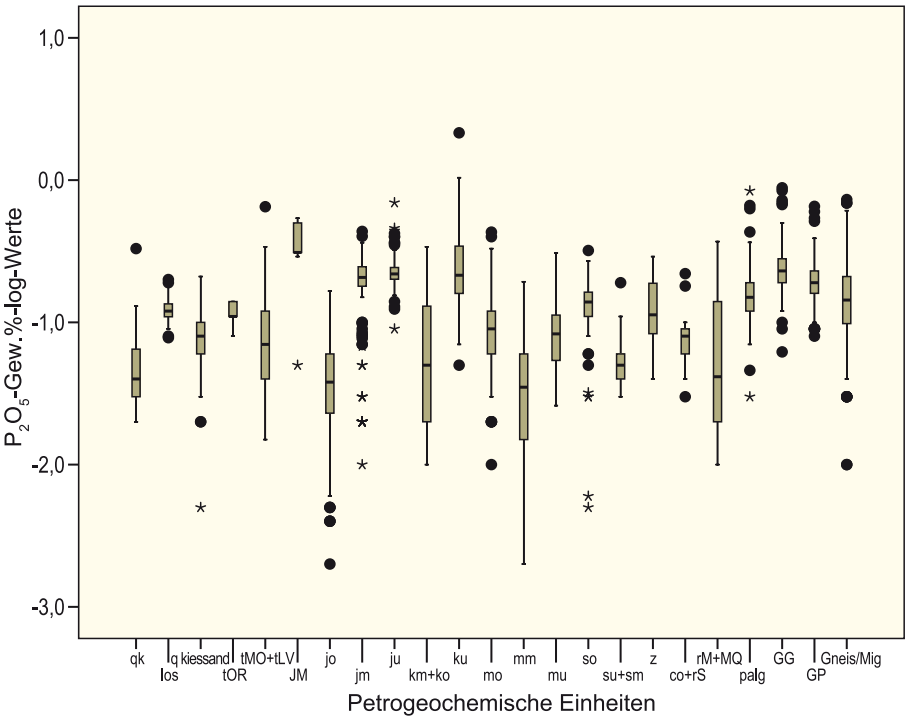


Abb. 5.1.13-1:

Boxplots für Phosphoroxid (P_2O_5); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.13-1: Statistische Kennwerte für Phosphoroxid (P_2O_5) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Phosphor (P_2O_5) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,02	0,33	0,06	0,08	0,10	0,04
Lösssediment	los	40	0,078	0,2	0,12	0,03	0,16	0,12
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,005	0,21	0,08	0,03	0,13	0,08
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	0,08	0,14	0,12	0,02	0,14	0,11
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,015	0,65	0,09	0,08	0,16	0,07
Tertiäre Vulkanite	JM	9	0,05	0,54	0,37	0,16	0,53	0,31
Jura								
Oberjura	jo	1 151	0,002	0,166	0,04	0,03	0,08	0,04
Mitteljura	jm	131	0,01	0,436	0,19	0,09	0,29	0,21
Unterjura	ju	125	0,09	0,694	0,23	0,07	0,29	0,22
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	608	0,01	0,34	0,08	0,07	0,18	0,05
Unterkeuper	ku	24	0,05	2,15	0,35	0,44	0,57	0,21
Oberer Muschelkalk	mo	203	0,01	0,431	0,10	0,06	0,15	0,09
Mittlerer Muschelkalk	mm	109	0,002	0,193	0,04	0,04	0,09	0,04
Unterer Muschelkalk	mu	111	0,026	0,308	0,09	0,05	0,13	0,08
Oberer Buntsandstein	so	57	0,005	0,32	0,13	0,06	0,19	0,14
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	0,03	0,19	0,06	0,03	0,10	0,05
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	19	0,04	0,29	0,13	0,07	0,22	0,11
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	0,03	0,22	0,08	0,04	0,10	0,08
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	0,01	0,37	0,09	0,09	0,24	0,04
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	0,03	0,84	0,19	0,14	0,33	0,15
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	121	0,062	0,883	0,26	0,13	0,36	0,23
Variszische Plutone („Granite“)	GP	211	0,08	0,654	0,20	0,08	0,29	0,19
Migmatite und Gneise	MI + gn	136	0,01	0,73	0,18	0,14	0,42	0,14
Alle Einheiten		**3 536**	**0,002**	**2,15**	**Flächen-gewichteter Median**			**0,10**

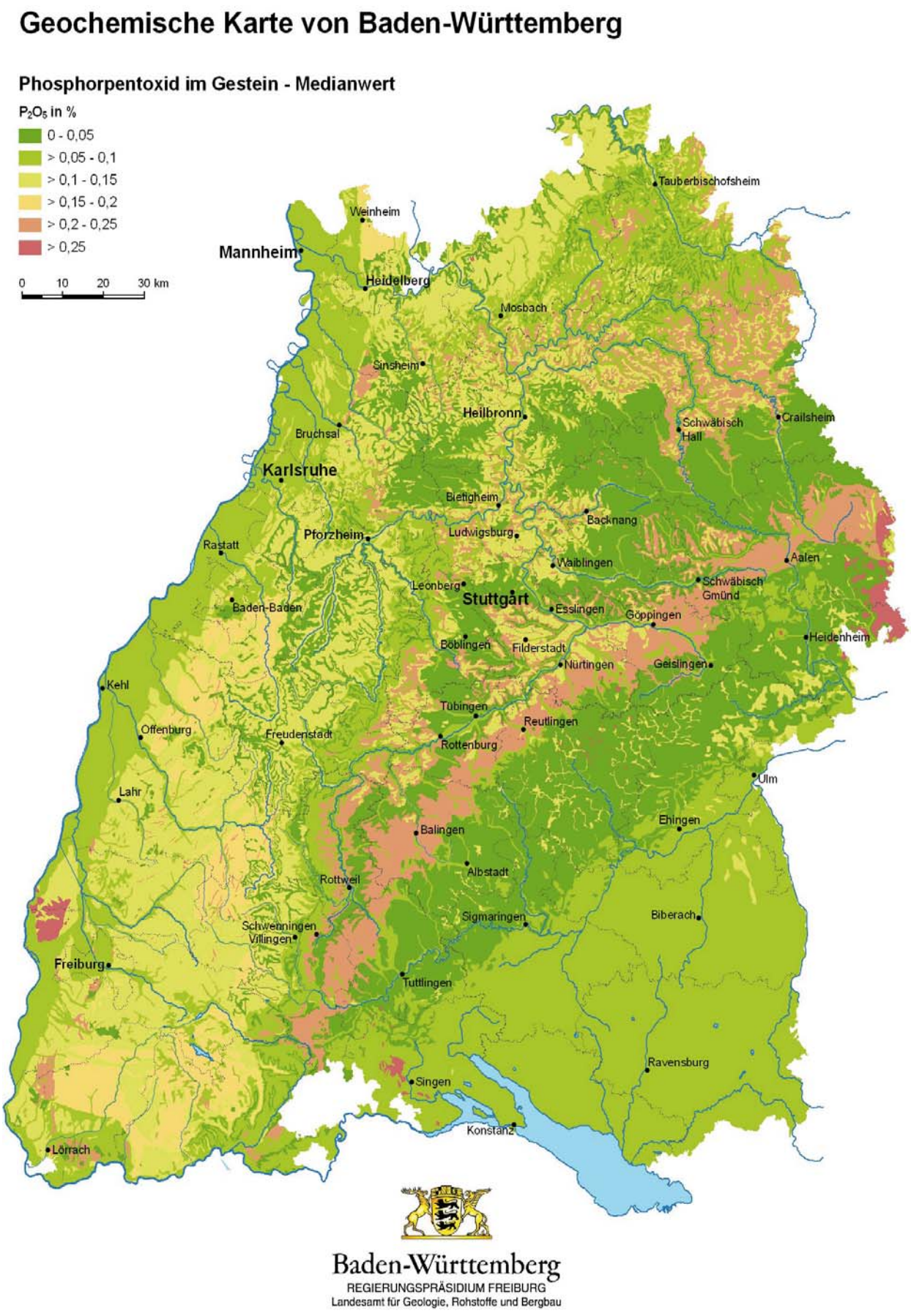


Abb. 5.1.13-2: Phosphorpentoxid im Gestein – Medianwert.

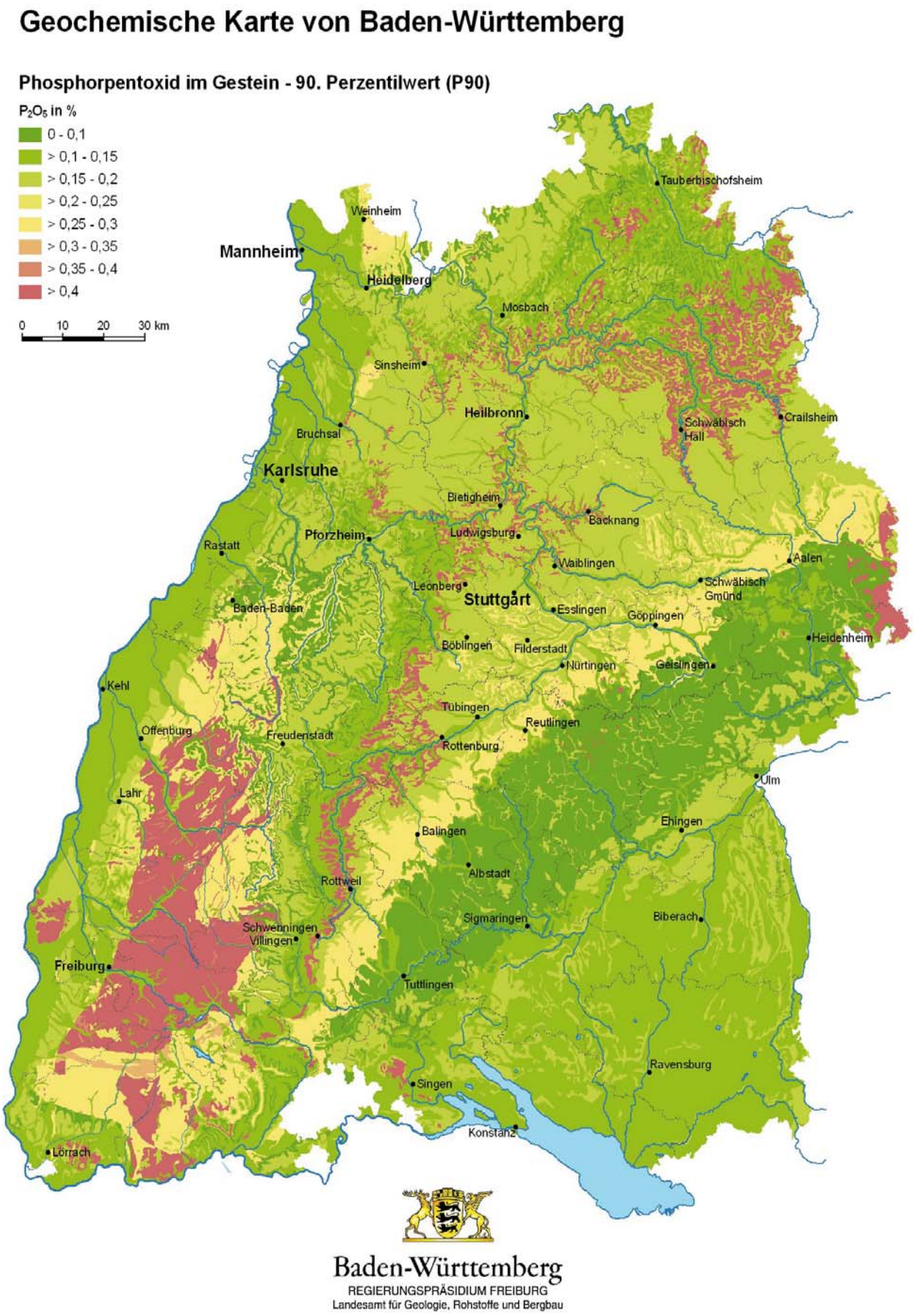


Abb. 5.1.13-3: Phosphorpentoxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.14 Blei (Pb)

Blei ist mit einer Häufigkeit von 14 mg/kg in der oberen kontinentalen Kruste vertreten und damit deutlich seltener als Kupfer, Zink, Chrom oder Nickel. Nach seiner Elementhäufigkeit steht es an 36. Stelle. Das wichtigste Bleimineral und wirtschaftlich bedeutend ist Bleiglanz (Galenit, PbS). Weitere wichtige Bleiminerale sind Cerussit ($PbCO_3$), Anglesit ($PbSO_4$), Pyromorphit ($Pb_5(PO_4)_3Cl$) und Mimetesit ($Pb_5(AsO_4)_3Cl$).

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine in Baden-Württemberg liegt bei 17 mg/kg und entspricht damit weitgehend dem CLARKE-Wert der oberen Erdkruste. Die 90. Perzentilwerte für Blei schwanken in baden-württembergischen Gesteinen zwischen 8,5 und 94 mg/kg.

Sehr niedrige Werte (P 90: < 20 mg/kg) findet man in quartären Süßwasserkalken, im Oberjura, im Oberen Muschelkalk sowie im Mittleren und Unteren Buntsandstein.

Erhöhte Werte (P 90: > 20 – 40 mg/kg) treten in Lösssedimenten und Quartärschichten sowie im Tertiär des Oberrheingrabens und des Molassebeckens und in tertiären Vulkaniten auf, außerdem im Mittel- und Unterjura, im Unterkeuper, im Oberen Buntsandstein sowie in den Oberkarbon-/Rotliegend-Sedimenten.

Mittlere P 90-Werte (P 90: > 40 – 50 mg/kg) ergeben sich für den Mittel- und Oberkeuper, sowie für Migmatite und Gneise.

Hohe Werte (P 90: > 50 – 80 mg/kg) wurden im Unteren Muschelkalk, im Zechstein, in den Rotliegend-Magmatiten, in Gangmagmatiten und in variszischen Plutonen festgestellt.

Sehr hohe Werte (P 90: > 80 mg/kg) weisen Mittlerer Muschelkalk und das gefaltete Paläozoikum auf.

Blei tritt in den gesteinsbildenden Mineralen hauptsächlich in Feldspäten und Glimmern auf. Für einen Großteil der Gehalte im kristallinen Grundgebirge und wahrscheinlich auch der Lösssedimente kann von einer derartigen Fixierung des Bleis ausgegangen werden.

Ziemlich arm an Blei sind die quartären Süßwasserkalke und die Kalksteine des Ober- und Mitteljura. Höhere Gehalte in mergeligen Partien zeigen die hohe Sorptionsfähigkeit von Blei an Tonmineralen, hauptsächlich an Kaolinit.

Höhere 90. Perzentilwerte und sehr hohe Einzelwerte bis 0,3 % (Mittelkeuper) und 1,0 % (Unterer Muschelkalk) spiegeln geogene, vorwiegend als PbS vorliegende schichtgebundene Vererzungen wieder. Im Mittelkeuper, im Mittleren und Unteren Muschelkalk sind diese an „Bleiglanzbänken“ und dicht darüber und darunter lagernden Horizonten konzentriert. Hohe Bleikonzentrationen im Kieselsandstein konnten mehrfach auf Bleiglanz zurückgeführt werden. Mindestens eine Quelle hoher Bleigehalte im gefalteten Paläozoikum („paläozoische Schiefer“) konnte durch Schwermineraluntersuchungen als fossile Seife mit Bleiglanz und Bleispießglanzen u. a. identifiziert werden.

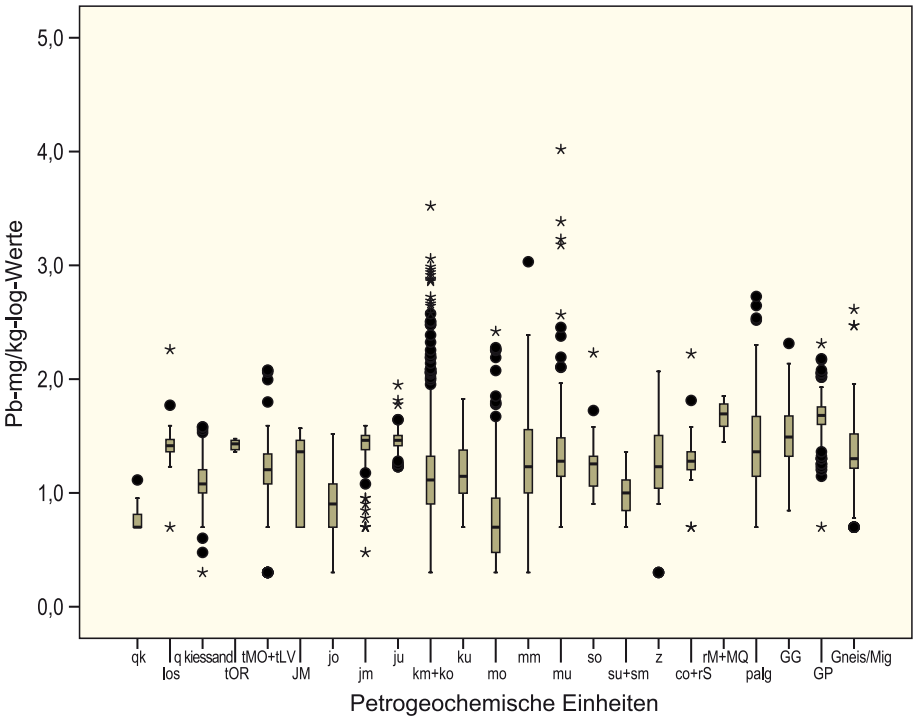


Abb. 5.1.14-1:

Boxplots für Blei (Pb); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.14-1: Statistische Kennwerte für Blei (Pb) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Blei (Pb) in mg/kg								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	5	13	6,1	2,2	8,5	5
Lösssediment	los	40	5	182	30	26	35	26
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	2	38	14	6,8	23	12
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	23	30	27	2,6	30	27
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	2	120	20	19	31	16
Tertiäre Vulkanite	JM	9	5	37	21	13	33	23
Jura								
Oberjura	jo	1 151	2	33	8,9	4,4	15	8
Mitteljura	jm	114	3	39	27	8,4	35	29
Unterjura	ju	125	17	89	30	8,7	37	29
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	604	2	3321	43	174	44	13
Unterkeuper	ku	24	5	67	20	17	40	14
Oberer Muschelkalk	mo	416	2	263	11	24	17	5
Mittlerer Muschelkalk	mm	105	2	1 076	45	111	94	17
Unterer Muschelkalk	mu	127	5	10 450	159	966	74	19
Oberer Buntsandstein	so	56	8	170	20	22	25	18
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	5	23	11	4,9	15	10
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	18	2	117	26	28	55	17
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	5	167	26	29	38	19
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	5	143	34	31	74	23
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	5	533	57	102	83	23
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	116	7	206	38	28	68	31
Variszische Plutone („Granite“)	GP	199	5	205	51	24	73	48
Migmatite und Gneise	MI + gn	136	5	411	32	48	50	20
Alle Einheiten		**3 712**	**2**	**10 450**	**Flächen-gewichteter Median**			**17**

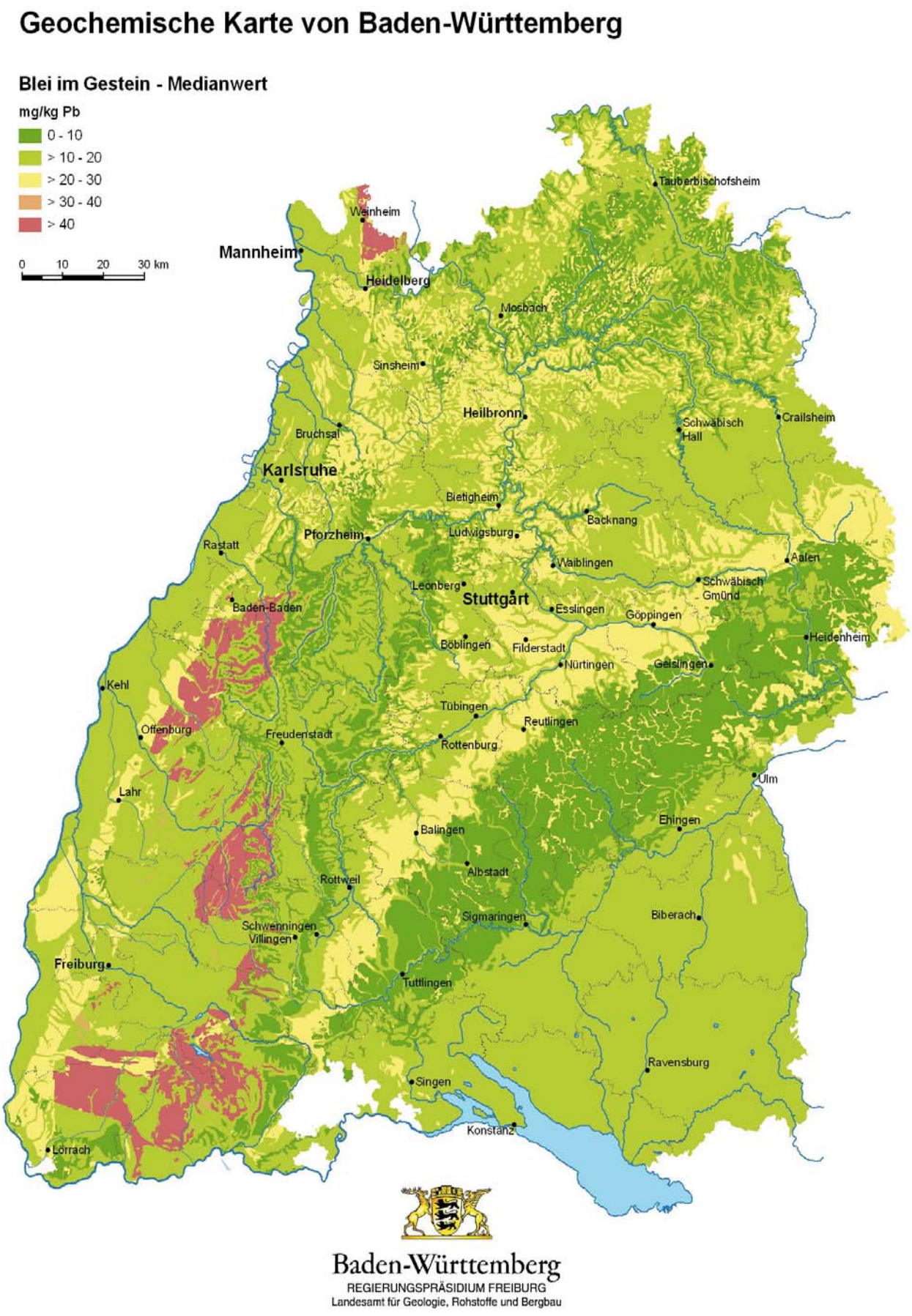


Abb. 5.1.14-2: Blei im Gestein – Medianwert.

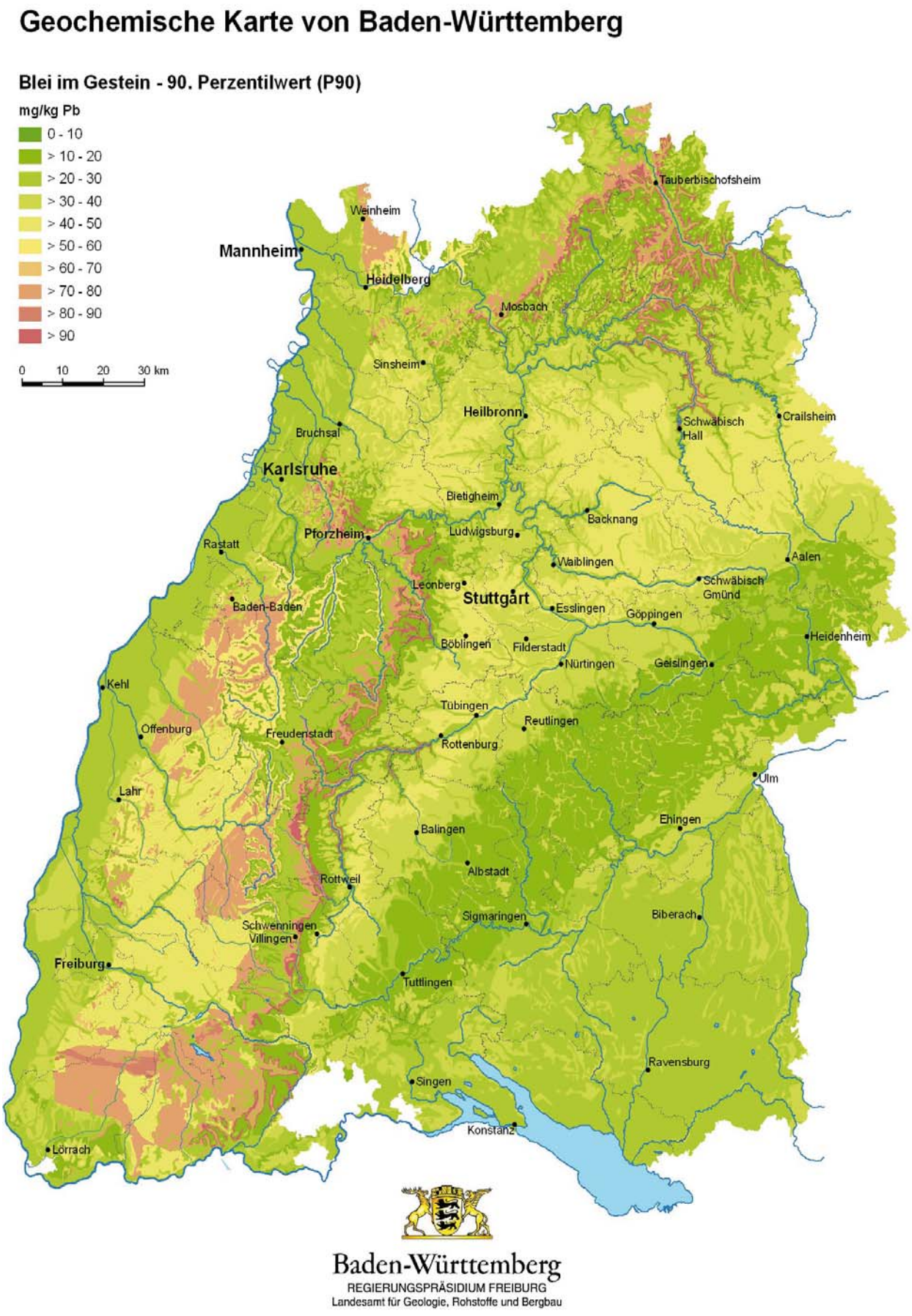


Abb. 5.1.14-3: Blei im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.15 Schwefel (S)

Schwefel liegt mit einem Gehalt von 0,035 % in der kontinentalen Erdkruste vor. Es steht seiner Häufigkeit nach an 16. Stelle der Elemente. Wichtigste Schwefelminerale sind unter aeroben Bedingungen die Sulfate Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) und Anhydrit ($CaSO_4$), untergeordnet Baryt ($BaSO_4$), unter anaeroben Bedingungen gediegener Schwefel und Sulfide wie Pyrit (FeS_2), Galenit (PbS), Zinkblende (ZnS) oder Chalkopyrit ($CuFeS_2$). Größere Mengen Schwefel finden sich auch in fossilen Brennstoffen wie Kohle, Öl und Gas.

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 0,075 % S. Gegenüber dem CLARKE-Wert für die obere kontinentale Kruste bedeutet dies etwa den doppelten Gehalt.

Die P 90-Werte für Schwefel in den betrachteten petrogeochemischen Einheiten reichen von 0,01 bis 22,35 %.

Niedrige Werte (P 90: < 0,1 %) treten in Lösssedimenten, Quartärschichten, im Tertiär des Molassebeckens, in tertiären Vulkaniten, im Unteren und Mittleren Buntsandstein, im Zechstein, Oberkarbon / Rotliegend, in Rotliegend-Magmatiten, in Gangmagmatiten, variszischen Plutonen und Migmatiten und Gneisen auf.

Erhöhte Werte (P 90: > 0,1 – 1,0 %) finden sich in quartären Süßwasserkalken, im gesamten Jura, im Oberen und Unteren Muschelkalk, im Oberen Buntsandstein und im gefalteten Paläozoikum.

Hohe Werte (P 90: > 1,0 – 10,0 %) weisen das Tertiär des Oberrheingrabens und Schichten des Unterkeupers auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 10,0 %) wurden im Mittel- und Oberkeuper (22,35 %) sowie im Mittleren Muschelkalk (17,84 %) festgestellt.

Die sehr hohen Werte spiegeln das Auftreten von Gips und Anhydrit in den Salinargesteinen des Gipskeupers und Mittleren Muschelkalks wieder.

Hohe Werte im Tertiär des Oberrheingrabens liegen als Pyrit, hohe Werte im Unterkeuper als Gips vor.

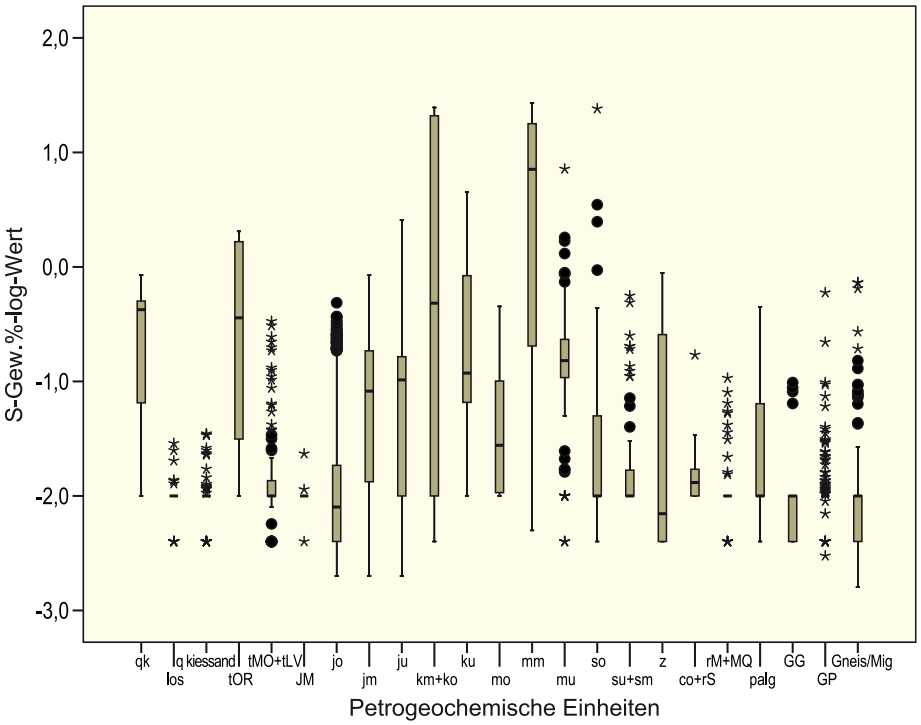


Abb. 5.1.15-1:

Boxplots für Schwefel (S); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.15-1: Statistische Kennwerte für Schwefel (S) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Schwefel (S) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,01	0,85	0,35	0,27	0,666	0,424
Lösssediment	los	37	0,004	0,029	0,01	0,01	0,014	0,010
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	126	0,004	0,035	0,01	0,01	0,012	0,010
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	9	0,01	2,05	0,85	0,91	1,878	0,359
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	117	0,004	0,34	0,03	0,06	0,063	0,010
Tertiäre Vulkanite	JM	10	0,004	0,023	0,01	0,01	0,013	0,010
Jura								
Oberjura	jo	1 117	0,004	0,49	0,03	0,06	0,132	0,008
Mitteljura	jm	61	0,004	0,85	0,16	0,21	0,460	0,082
Unterjura	ju	51	0,004	2,57	0,27	0,58	0,709	0,103
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	394	0,004	24,71	9,67	10,22	22,350	0,494
Unterkeuper	ku	25	0,01	4,52	0,67	1,13	2,137	0,118
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,01	0,45	0,07	0,08	0,172	0,028
Mittlerer Muschelkalk	mm	106	0,004	22,53	5,46	7,26	17,835	0,242
Unterer Muschelkalk	mu	117	0,004	7,18	0,29	0,70	0,576	0,081
Oberer Buntsandstein	so	61	0,004	24,11	0,56	3,12	0,427	0,010
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	111	0,01	0,56	0,03	0,08	0,061	0,010
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	8	0,004	0,021	0,01	0,01	0,014	0,007
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	22	0,01	0,032	0,01	0,01	0,023	0,013
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	36	0,01	0,11	0,02	0,02	0,054	0,010
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	57	0,004	0,45	0,06	0,09	0,162	0,010
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	106	0,004	0,01	0,01	0,01	0,010	0,004
Variszische Plutone („Granite“)	GP	219	0,004	0,6	0,20	0,04	0,015	0,010
Migmatite und Gneise	MI + gn	106	0,004	0,73	0,04	0,12	0,079	0,010
Alle Einheiten		**3 135**	**0,004**	**24,71**	**Flächen-gewichteter Median**			**0,075**

Abb. 5.1.15-2: Schwefel im Gestein – Medianwert.

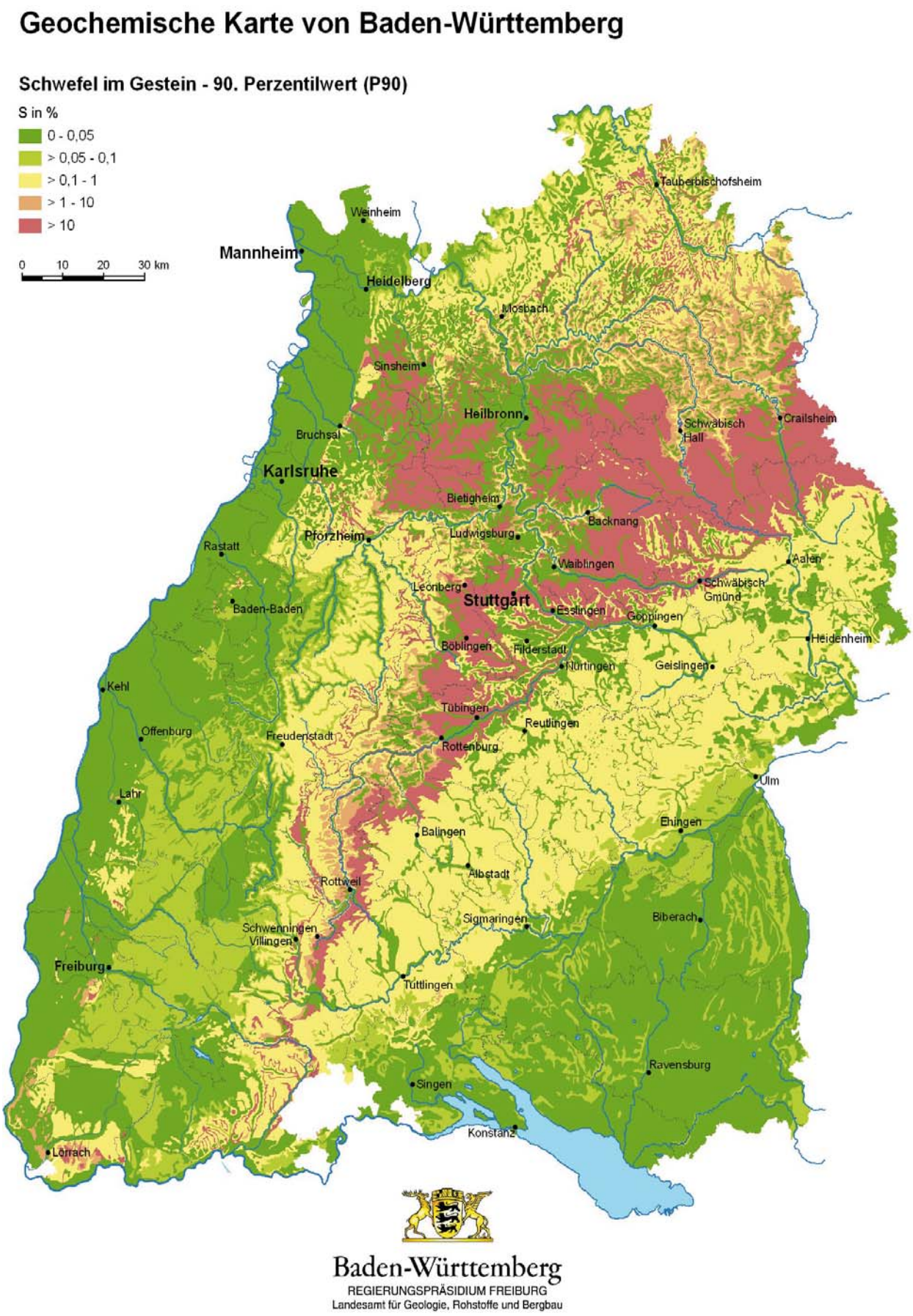


Abb. 5.1.15-3: Schwefel im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.16 Silizium (als SiO_2)

Silizium ist mit einem Anteil von 28,2 % nach Sauerstoff das zweithäufigste Element in der kontinentalen Erdkruste. Elementar kommt Silizium in der Natur nicht vor, wegen seines lithophilen Charakters tritt es in Gesteinen stets vierwertig als Siliziumdioxid (Quarz, SiO_2) oder in Form von Silikaten auf. Silikate bestehen aus SiO_4-Tetraedern, in denen ein Siliziumatom von vier Sauerstoffatomen umgeben ist. Zum Ladungsausgleich werden andere Metall-Kationen eingebaut. In Alumosilikaten ist ein Teil des Siliziums durch Aluminium substituiert. Quarz und Silikate machen zusammen etwa 90 % der Erdkruste aus. Mit Abstand häufigste Silikate sind die Feldspäte, weitere wichtige sind Glimmer, Tonminerale, Amphibole und Pyroxene.

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 48,57 % SiO_2, entsprechend 22,7 % Si. Für die baden-württembergischen Gesteine zeigt sich damit eine Abreicherung ihres Gehalts an Silizium gegenüber dem CLARKE-Wert für die obere Erdkruste.

Die P 90-Werte für SiO_2 in den dieser Studie zu Grunde liegenden petrogeochemischen Einheiten streuen sehr deutlich zwischen 11,5 % und 94,16 %.

Niedrige Werte (P 90: < 45 %) finden sich in quartären Süßwasserkalken, im Oberjura, im Oberen und im Mittleren Muschelkalk.

Erhöhte Werte (P 90: > 45 – 65 %) weisen Tertiärschichten des Oberrheingrabens, tertiäre Vulkanite, Unterjura und Unterkeuper auf.

Hohe Werte (P 90: > 65 – 80 %) treten in Lösssedimenten, im Mitteljura, Unteren Muschelkalk, Zechstein, Oberkarbon / Rotliegend, im gefalteten Paläozoikum sowie in den Einheiten des kristallinen Grundgebirges auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 80 %) wurden in quartären Kiesen und Sanden, im Tertiär des Molassebeckens, im Mittel- und Oberkeuper, im gesamten Buntsandstein und in den Rotliegend-Magmatiten („Quarzporphyr“) angetroffen.

Die niedrigsten 90. Perzentilwerte treten in den weitgehend reinen Kalksteinserien auf. Kleinere SiO_2-Gehalte gehen hier häufig auf biogene SiO_2-Anreicherungen durch Kieselalgen, Schwämme oder Radiolarien zurück. In Sedimenten korrelieren SiO_2-Gehalte mit dem Ton- und Sandanteil. Die höchsten SiO_2-Gehalte weisen (Quarz)-Sande und -Sandsteine auf, beispielsweise quartäre Sande, Molassesandsteine, Keupersandsteine und Buntsandstein.

Magmatische Gesteine werden u. a. durch ihren SiO_2-Gehalt klassifiziert: Gesteine mit 45 – 52 % SiO_2 werden als basisch, mit niedrigerem SiO_2-Gehalt als ultrabasisch, mit höherem Gehalt als intermediär und über 65 % SiO_2 als sauer bezeichnet. Der saure Rotliegend-Magmatismus hebt sich durch seinen Reichtum an SiO_2 vom basischen tertiären Vulkanismus deutlich ab. In basischen und ultrabasischen Gesteinen kann alles SiO_2 in Silikaten gebunden sein, es kommt dann nicht mehr zur Bildung von freiem Quarz. Im Gegensatz zu Quarz verwittern Silikate unter Oberflächenbedingungen in unterschiedlich starkem Maße. Für die Bodenbildung und dessen Anreicherung mit Nährstoffen besonders wichtig ist der Vorgang der wässrigen Lösung (= Hydrolyse) von Feldspäten, bei der es zur Neubildung von Tonmineralen und zur Freisetzung von pflanzenverfügbaren Nährstoff-Kationen kommt. In grober Näherung ist deshalb der SiO_2-Gehalt eines Gesteins ein Anzeiger für den Nährstoffgehalt daraus hervorgehender Böden: Je weniger SiO_2 (= Quarzgehalt), desto mehr Silikate (auch Karbonate u. a.), desto höher der Nährstoffgehalt des künftigen Bodens.

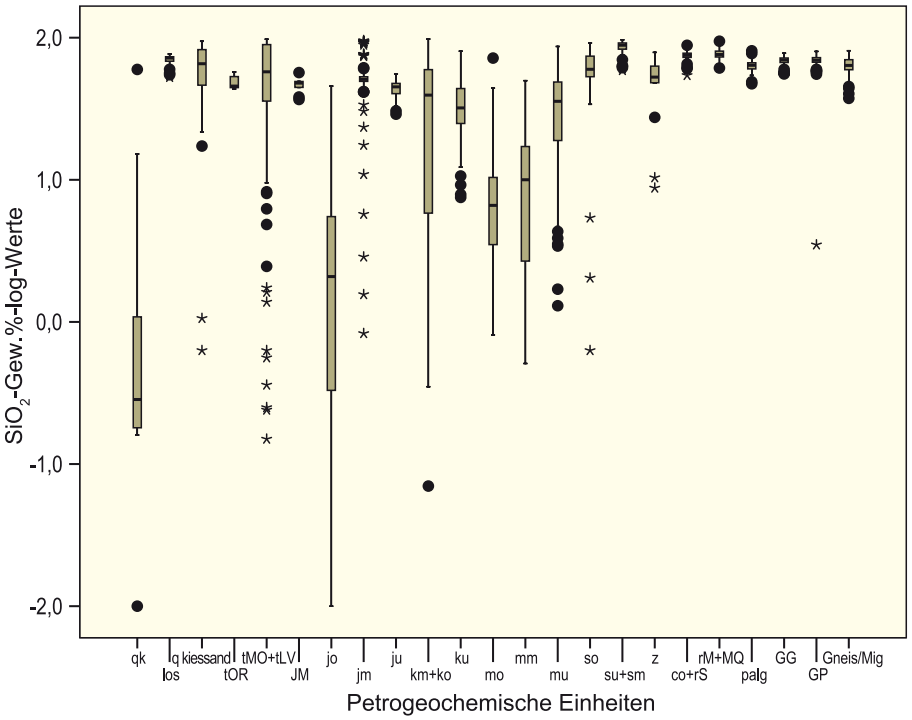


Abb. 5.1.16-1:

Boxplots für Siliziumoxid (SiO_2); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in %.

Tab. 5.1.16-1: Statistische Kennwerte für Siliziumoxid (SiO_2) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Silizium (SiO_2) in %								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	0,01	59,79	5,51	15,04	11,68	0,29
Lösssediment	los	40	52,65	76,8	69,71	6,22	74,41	71,89
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	0,63	94,36	64,00	19,61	87,91	65,60
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	43,59	57,4	48,43	5,12	53,94	45,66
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	0,15	97,6	56,41	30,87	92,81	57,55
Tertiäre Vulkanite	JM	10	36,75	56,82	46,46	5,76	49,97	47,93
Jura								
Oberjura	jo	1 186	0,01	45,66	4,02	5,17	11,50	2,09
Mitteljura	jm	133	0,83	95,58	53,49	17,37	76,59	50,89
Unterjura	ju	125	28,96	55,71	43,88	5,29	48,94	45,10
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	616	0,07	97,83	38,66	30,15	86,55	39,44
Unterkeuper	ku	25	7,52	80,36	34,64	18,92	51,87	32,06
Oberer Muschelkalk	mo	223	0,81	71,88	8,98	8,59	19,17	6,61
Mittlerer Muschelkalk	mm	109	0,51	49,84	11,80	10,49	25,76	10,01
Unterer Muschelkalk	mu	117	1,3	86,76	36,30	21,91	70,31	35,67
Oberer Buntsandstein	so	64	0,63	91,79	60,22	19,37	84,91	59,94
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	111	58,86	96,6	86,42	8,04	94,16	88,54
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	15	8,76	78,85	50,48	20,54	70,50	52,79
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	54,28	88,42	73,77	7,32	79,35	75,14
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	50	61,17	94,45	76,62	7,24	85,75	76,20
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	47,38	80,86	63,48	5,63	68,06	63,94
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	123	55,56	77,71	68,82	4,43	73,83	69,70
Variszische Plutone („Granite“)	GP	255	3,49	80,1	69,07	5,70	73,84	69,44
Migmatite und Gneise	MI + gn	137	37,43	80,97	63,94	7,80	74,15	63,82
Alle Einheiten		**3 738**	**0,01**	**97,83**	**Flächen-gewichteter Median**			**48,57**

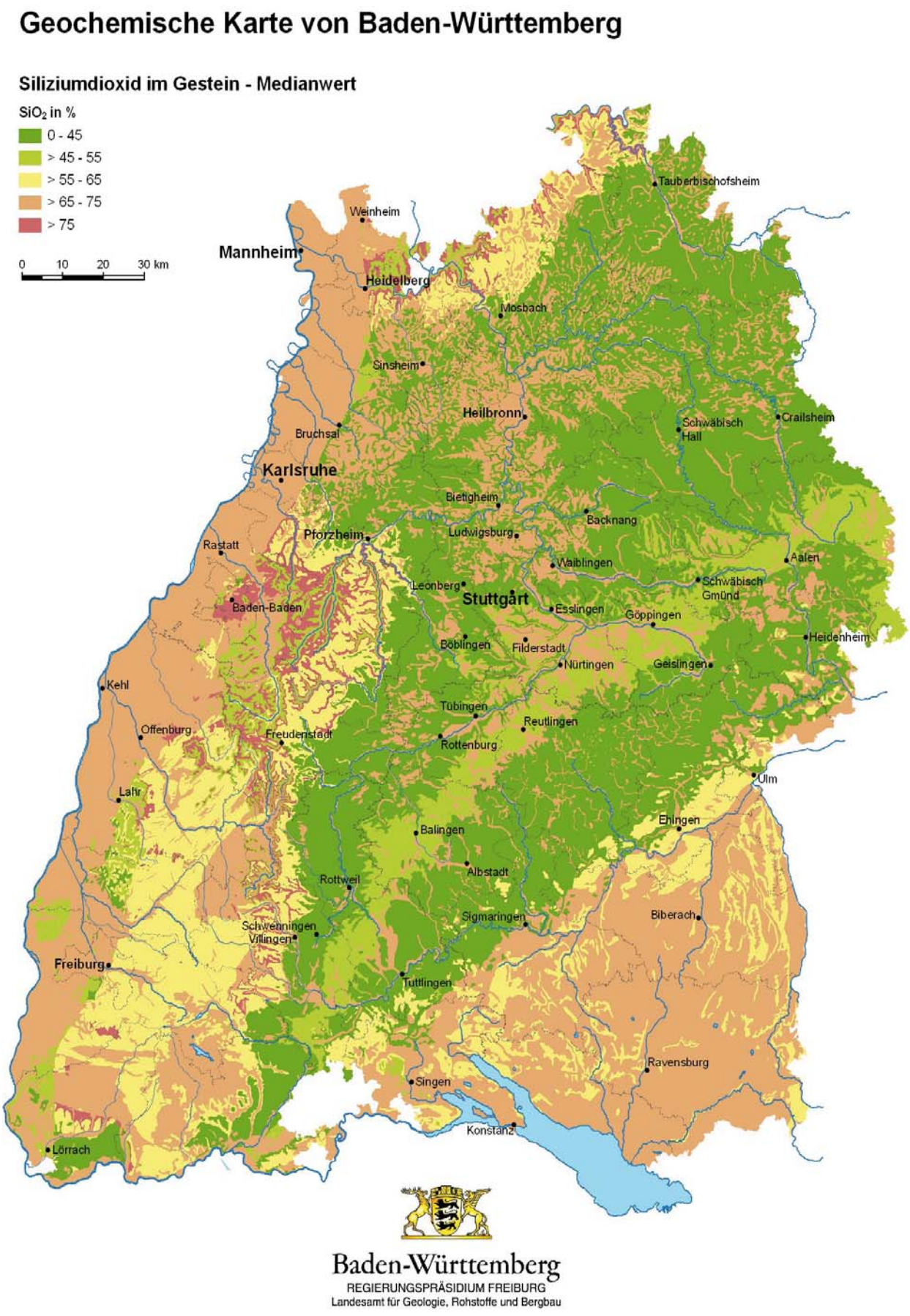


Abb. 5.1.16-2: Siliziumdioxid im Gestein – Medianwert.

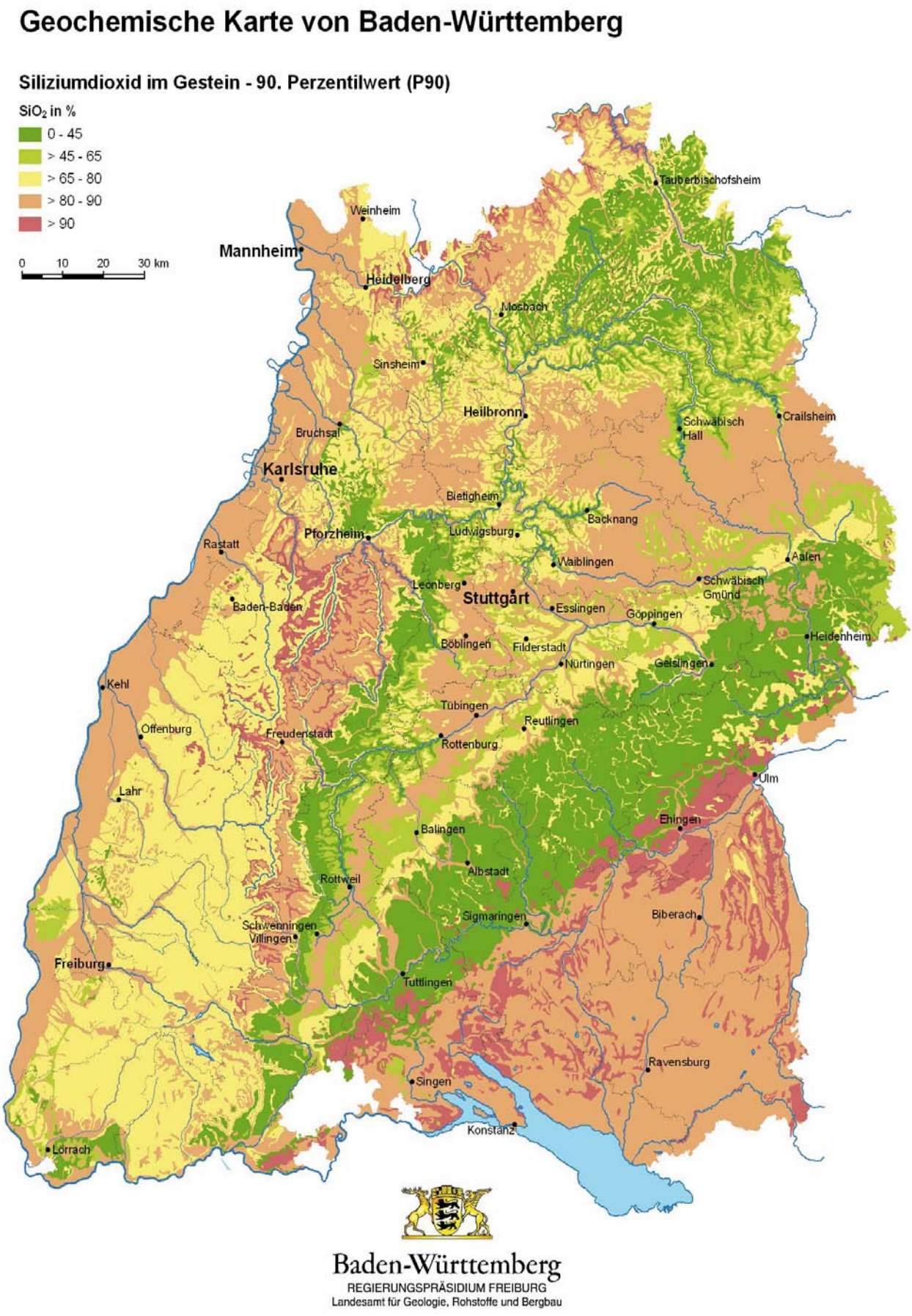


Abb. 5.1.16-3: Siliziumdioxid im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.17 Thorium (Th)

Thorium ist mit einem Anteil von 9,6 mg/kg in der oberen kontinentalen Kruste vorhanden und steht seiner Häufigkeit nach an 42. Stelle hinter Blei und Bor. Die wichtigsten Thoriumminerale sind Thorianit (ThO_2), Monazit ($(Ce,La,Nd,Th)PO_4$) sowie Thorit ($ThSiO_4$).

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 12 mg/kg Th. Er entspricht demnach weitgehend dem CLARKE-Wert für die obere Erdkruste.

Die P 90-Werte für Thorium der differenzierten petrogeochemischen Einheiten bewegen sich zwischen 9 und 52 mg/kg.

Niedrige Werte (P 90: < 20 mg/kg) finden sich in quartären Süßwasserkalken, Lösssedimenten, Quartärschichten, im Tertiär des Molassebeckens, im gesamten Keuper und Muschelkalk, im Unteren und Mittleren Buntsandstein und im gefalteten Paläozoikum.

Erhöhte Werte (P 90: > 20 – 25 mg/kg) wurden in Rotliegend-Magmatiten, variszischen Plutonen sowie in Migmatiten und Gneisen angetroffen.

Hohe Werte (P 90: > 25 – 35 mg/kg) weisen das Tertiär des Oberrheingrabens, tertiäre Vulkanite, Jura, Oberer Buntsandstein, Zechstein und Oberkarbon / Rotliegend auf.

Sehr hohe Werte (P 90: > 35 mg/kg) wurden für die Gruppe der Gangmagmatite gefunden.

Auf Grund seines lithophilen Charakters findet sich Thorium in sehr vielen silikatischen Gesteinen als Spurenelement. Es kann darüberhinaus auch in Karbonaten, Phosphaten und Tonen gebunden sein. Ein Verteilungspfad lässt sich folgendermaßen rekonstruieren: Thorit ist isomorph mit Zirkon ($ZrSiO_4$) und kann deshalb leicht in Zirkone eingebaut werden. Zirkon wiederum ist in fast allen Gesteinen wie Magmatiten, Metamorphiten sowie wegen seiner Verwitterungsstabilität in vielen Sedimenten vertreten. Auf diesem Wege gelangt Thorium in nahezu alle Gesteine. Im Gegensatz zu Uran ist Thorium deshalb nur selten in Lagerstätten angereichert.

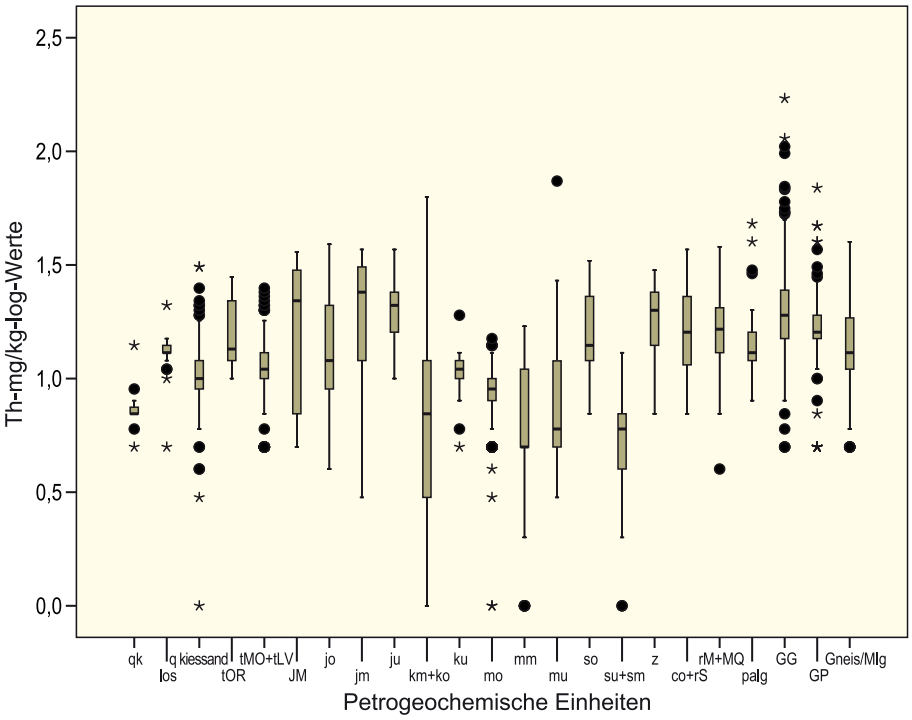


Abb. 5.1.17-1:

Boxplots für Thorium (Th); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.17-1: Statistische Kennwerte für Thorium (Th) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Thorium (Th) in mg/kg								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	126	1	31	10,8	4,5	16	10
Lösssediment	los	16	5	14	7,5	1,9	9	7
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	35	5	21	13,3	2,3	15	13
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	9	5	36	20,9	12,1	33	22
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	130	5	25	11,3	4,0	16	11
Tertiäre Vulkanite	JM	10	10	28	17,0	6,6	26	14
Jura								
Oberjura	jo	695	4	39	14,9	7,9	27	12
Mitteljura	jm	123	3	37	21,2	9,6	31	24
Unterjura	ju	125	10	37	21,1	7,0	33	21
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	380	1	63	8,5	7,1	15	7
Unterkeuper	ku	24	5	19	10,9	2,6	13	11
Oberer Muschelkalk	mo	184	1	15	9,0	2,4	12	9
Mittlerer Muschelkalk	mm	53	1	17	7,2	4,1	13	5
Unterer Muschelkalk	mu	39	3	74	10,7	11,9	18	6
Oberer Buntsandstein	so	49	7	33	17,0	7,1	28	14
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	1	13	5,6	3,1	10	6
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	18	7	30	18,9	7,4	28	20
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	27	7	37	17,5	8,5	28	16
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	4	38	17,6	6,5	24	17
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	59	8	48	15,1	6,8	19	13
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	116	5	171	26,0	23,2	52	19
Variszische Plutone („Granite“)	GP	199	5	69	17,4	6,9	22	16
Migmatite und Gneise	MI + gn	131	5	40	15,8	7,5	25	13
Alle Einheiten		**2621**	**1**	**171**	**Flächen-gewichteter Median**			**12**

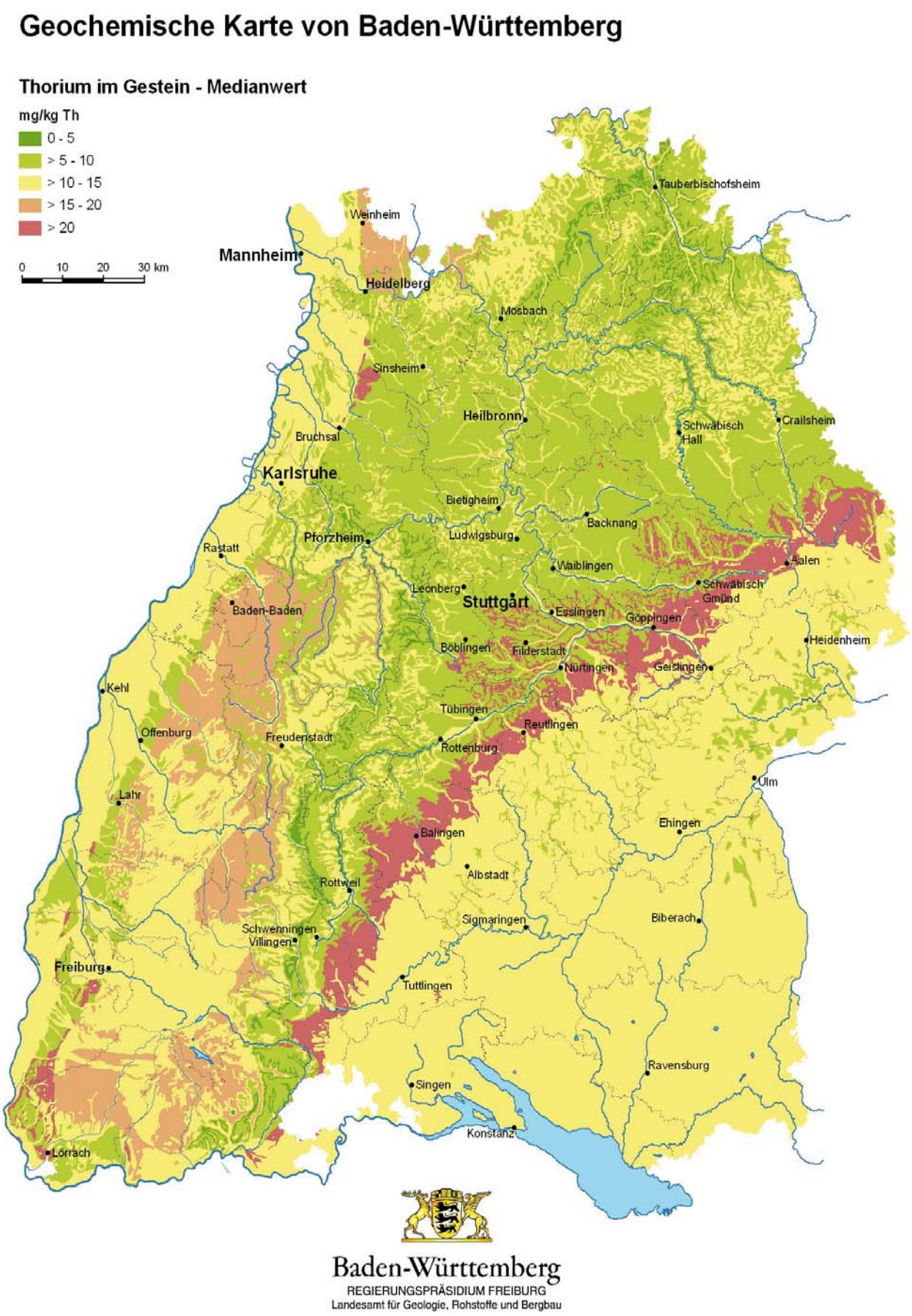


Abb. 5.1.17-2: Thorium im Gestein – Medianwert.

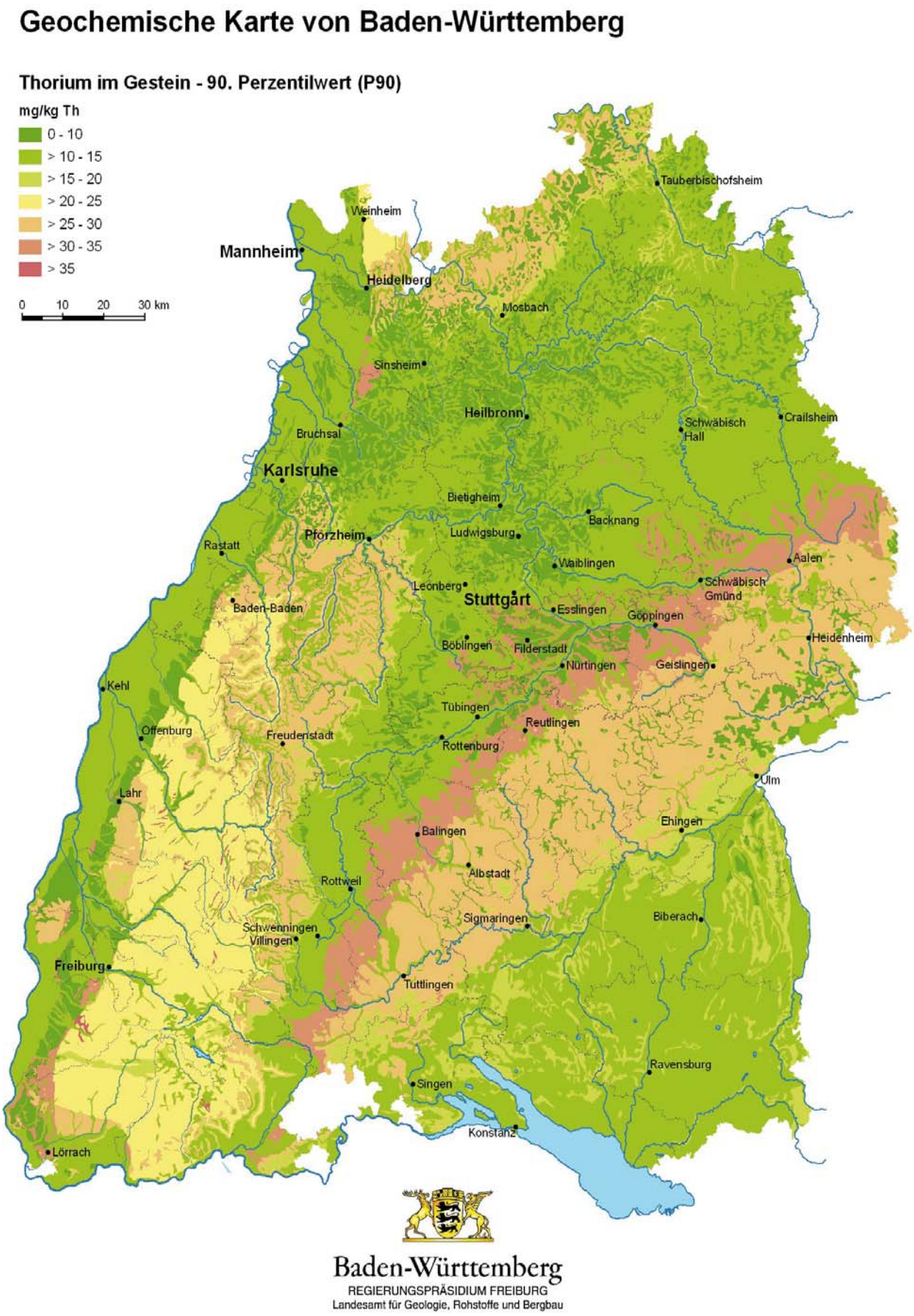


Abb. 5.1.17-3: Thorium im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.18 Uran (U)

Uran ist im Mittel zu 2,7 mg/kg in der Erdkruste vorhanden. Es steht an 54. Stelle der Elemente in der oberen kontinentalen Erdkruste. Uran liegt in der Natur nie in gediegener Form vor, sondern stets in sauerstoffhaltigen Mineralen, wie z. B. in Pechblende (Uraninit, UO_2), Coffinit ($U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$) oder Carnotit ($K_2(UO_2)2V_2O_8 \cdot 3H_2O$). Es gibt mehr als 200 verschiedene Uranminerale.

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 2,8 mg/kg. Der Urangehalt der Gesteine Baden-Württembergs entspricht also ziemlich genau dem CLARKE-Wert für die obere Kruste. Die P 90-Werte für Uran in Gesteinen Baden-Württembergs liegen zwischen 1 und 14 mg/kg.

Niedrige Gehalte (0 – 6 mg/kg) finden sich in quartären Süßwasserkalken und Lösssedimenten, im Tertiär des Molassebeckens, in den Gesteinen des Mittel- und Oberkeupers, im Oberen Muschelkalk und im Unteren und Mittleren Buntsandstein.

Erhöhte Gehalte (> 6 – 8 mg/kg) treten in Quartärschichten, im Oberjura, im Unterkeuper, im Mittleren Muschelkalk und im gefalteten Paläozoikum auf.

Hohe Gehalte (> 8 – 10 mg/kg) wurden im Tertiär des Oberrheingrabens, in tertiären Vulkaniten, im Unterjura, in den Gesteinen des Unteren Muschelkalks, des Oberen Buntsandsteins, in Rotliegend-Magmatiten und in variszischen Plutonen festgestellt.

Sehr hohe Gehalte (> 10 mg/kg) weisen die Gesteine des Mitteljura und Zechsteins sowie Gangmagmatite und Migmatite bis Gneise auf.

Hohe Maximalwerte treten im Mittelkeuper (27 mg/kg), in den Karbon-/Rotliegend-Sedimenten (30 mg/kg), in Ganggesteinen (29 mg/kg) und ganz besonders in den Graniten (69 mg/kg) auf und können hier auf bekannte Anreicherungen zurückgeführt werden.

Uran gilt als lithophil, weshalb es sich vorwiegend in silikatreichen Schmelzen anreichert; Magmatite wie Granite und Rhyolithe weisen deshalb die höchsten Urankonzentrationen auf. Uran wird in Kristallingesteinen nicht nur in Pechblende, sondern auch in akzessorischen Mineralen, wie Zirkon oder Monazit, eingebaut. Für die Bindung von Uran in Sedimentgesteinen sind andere Prozesse maßgebend:

– Aufgrund der geringen Verwitterungsbeständigkeit von Pechblende wird Uran zunächst zu UO_3 aufoxidiert, um schließlich durch Aufnahme von Fremdionen und H_2O leicht lösliche Hydroxide, Karbonate und Sulfate zu bilden. Später können auch schwerer lösliche Verbindungen entstehen wie Phosphate, Arsenate, Vanadate und Silikate.

– Die Anreicherung von Uran kann durch die vorliegenden Redoxbedingungen kontrolliert werden. Herrschen oxidierende Bedingungen vor, so ist Uran in wässrigen Lösungen relativ mobil. Bei reduzierenden Bedingungen ist Uran jedoch schwer löslich, wenig mobil und lagert sich bevorzugt an organisches Material an. Lokale Urananreicherungen sind deshalb oft an kohlige Substanz gebunden, wie z. B. an der Basis von Sandsteinen im Mittelkeuper.

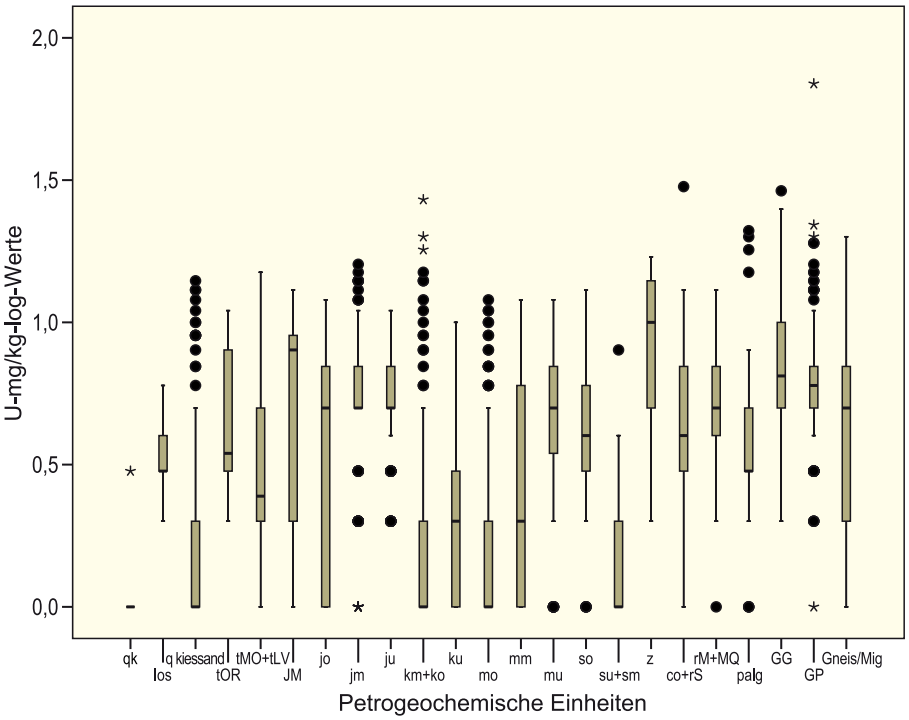


Abb. 5.1.18-1:

Boxplots für Uran (U); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.18-1: Statistische Kennwerte für Uran (U) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Uran (U) in mg/kg								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	1	3	1,1	0,5	1	1
Lösssediment	los	35	2	6	3,5	0,9	4	3
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	126	1	14	2,5	2,9	7	1
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	2	11	5,2	3,3	9,2	3,5
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	130	1	15	3,3	2,4	6	2,5
Tertiäre Vulkanite	JM	9	1	13	6,2	4,2	9,8	8
Jura								
Oberjura	jo	695	1	12	4,9	2,7	8	5
Mitteljura	jm	115	1	16	6,0	3,3	11	5
Unterjura	ju	125	2	11	5,5	2,0	8,6	5
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	380	1	27	2,2	2,6	4	1
Unterkeuper	ku	24	1	10	3,0	2,7	8	2
Oberer Muschelkalk	mo	183	1	12	1,9	2,2	5	1
Mittlerer Muschelkalk	mm	53	1	12	3,4	2,9	7,8	2
Unterer Muschelkalk	mu	39	1	12	5,4	3,0	9,2	5
Oberer Buntsandstein	so	49	1	13	5,0	2,9	9,2	4
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	1	8	1,7	1,4	3	1
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	18	2	17	9,1	4,9	14	10
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	1	30	5,9	5,4	9	4
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	1	13	5,8	2,7	9,7	5
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	59	1	21	4,6	4,2	8	3
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	116	2	29	8,3	4,8	14	6,5
Variszische Plutone („Granite“)	GP	199	1	69	6,7	5,5	9,2	6
Migmatite und Gneise	MI + gn	131	1	20	5,5	4,2	12	5
Alle Einheiten		**2614**	**1**	**69**	**Flächen-gewichteter Median**			**2,8**

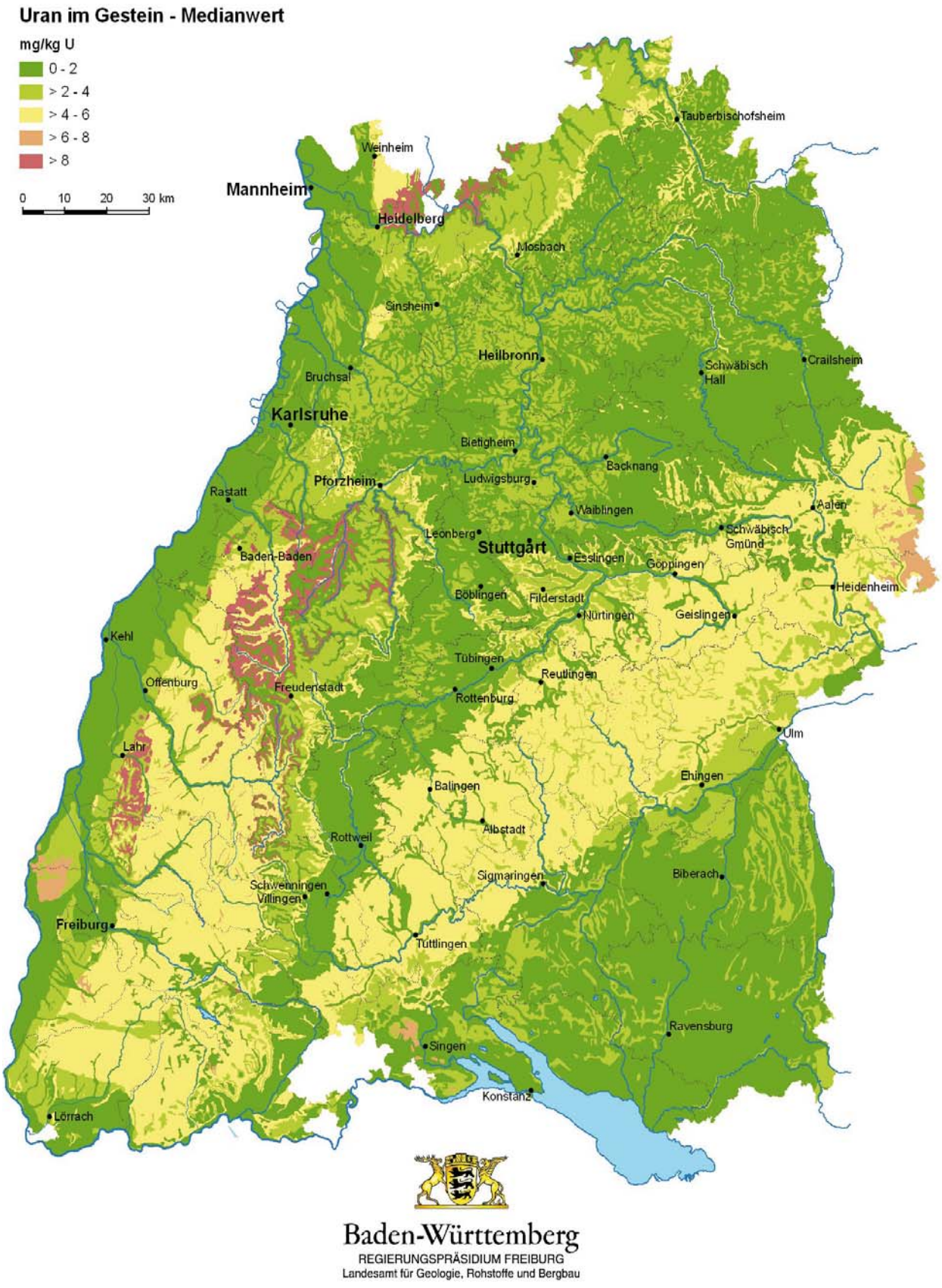


Abb. 5.1.18-2: Uran im Gestein – Medianwert.

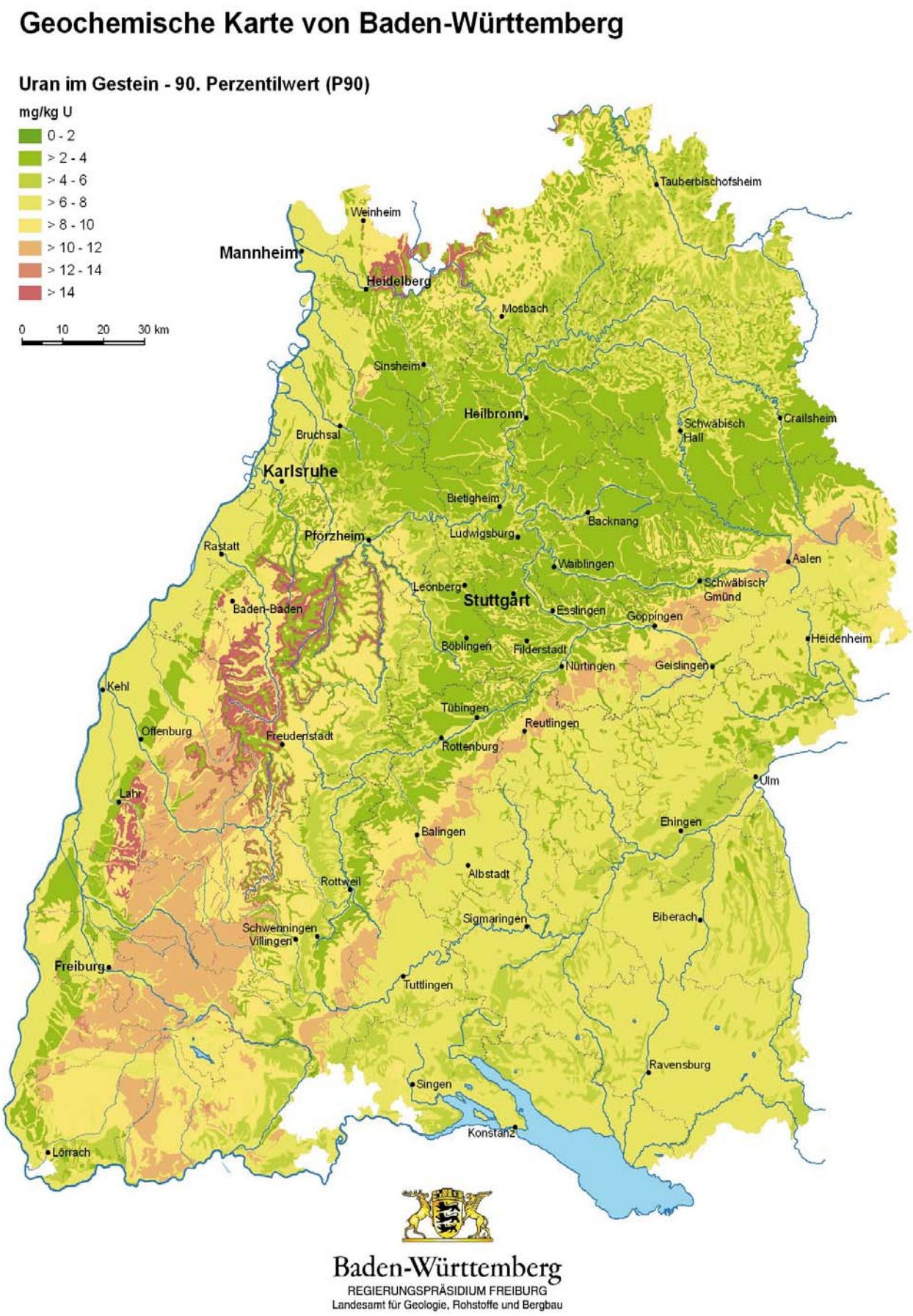


Abb. 5.1.18-3: Uran im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.19 Vanadium (V)

Vanadium ist zu 120 mg/kg in der kontinentalen Erdkruste vertreten und steht seiner Häufigkeit nach an 23. Stelle zwischen Strontium und Zink.

Wichtige Vanadiumminerale sind Vanadinit ($Pb_5(VO_4)_3Cl$), Descloizit ($Pb(Zn,Cu)[OH|VO_4]$), Carnotit ($K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$) und das Sulfid Patronit (VS_4). Mengenmäßig bedeutsamer und wichtiger Rohstoff für die Vanadiumgewinnung sind Eisenerze wie Titanomagnetit. Ihr Vanadiumgehalt liegt typisch bei 0,3 bis 0,8 %. Die Bauwürdigkeitsgrenze für Vanadium allein liegt bei 1 % V. Durch weitere Wertminerale (Fe, Cr, U, Pb) verschiebt sich diese Grenze auf 0,02 %. Größere Mengen an Vanadium sind auch in Kohlen und Erdöl gebunden. Bei der Verbrennung von 1 000 t Rohöl wird ca. 1 t V_2O_5 frei (Alloway 1999).

Der flächengewichtete Median für die oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 46 mg/kg V. Für die Gesteine Baden-Württembergs zeigt sich somit eine deutliche Abreicherung des medianen Vanadiumgehalts gegenüber dem Clarke-Wert für die obere Erdkruste. Hinsichtlich der für deutsche Kulturböden angegebenen Hintergrundwerte (10 – 100 mg/kg, Schaaf, R. 1982) besteht gute Übereinstimmung der Gehalte. Untersuchungen für die Erstellung des Bodenzustandberichts Kehl ergaben Vanadiumgehalte von 20 – 105 mg/kg Boden (UM, BZB Kehl 1995).

Die P 90-Werte für Vanadium der differenzierten petrogeochemischen Einheiten liegen zwischen 18 und 359 mg/kg.

Niedrige Werte (P 90: < 90 mg/kg) finden sich in quartären Süßwasserkalken, Quartärschichten, im Oberjura, im Unterkeuper, im Oberen und Mittleren Muschelkalk, im Unteren und Mittleren Buntsandstein, in Rotliegend-Magmatiten, in Gangmagmatiten und in variszischen Plutonen.

Erhöhte Werte (P 90: > 90 – 120 mg/kg) treten in Lösssedimenten, im Tertiär des Molassebeckens, im Mittel- und Oberkeuper, im Oberen Buntsandstein und im Oberkarbon/Rotliegend auf.

Hohe Werte (P 90: > 120 – 180 mg/kg) wurden im Mittel- und Unterjura, im Unteren Muschelkalk, im Zechstein, im gefalteten Paläozoikum sowie in Migmatiten und Gneisen angetroffen.

Sehr hohe Werte (P 90: > 180 mg/kg) weisen das Tertiär des Oberrheingrabens und tertiäre Vulkanite auf.

Vanadium (III) weist einen ähnlichen Ionenradius wie Fe (III) auf und ersetzt letzteres in vielen Eisenmineralen. Diesem Umstand entsprechend tritt Vanadium in eisenreichen, dunklen, basischen Magmatiten (z. B. tertiäre Vulkanite) häufiger auf als in hellen, sauren (Quarzporphyr und Granite). Tonreiche Sedimente liegen etwa dazwischen. Es gibt Hinweise, dass der Vanadiumgehalt mit dem Tonanteil steigt. Reine Kalke und Sandsteine sind arm an Vanadium.

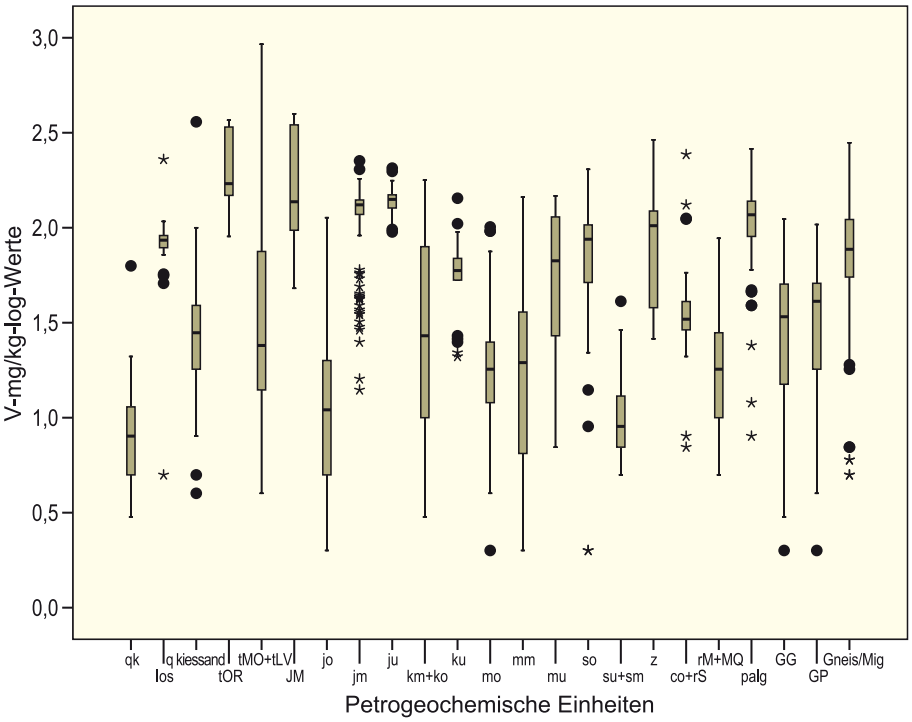


Abb. 5.1.19-1:

Boxplots für Vanadium (V); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.19-1: Statistische Kennwerte für Vanadium (V) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Vanadium (V) in mg/kg Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	3	63	11,9	14,4	18	8
Lösssediment	los	40	5	229	85,9	28,8	100	86
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	149	4	361	36,4	36,0	78	28
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	90	368	219,5	108,5	349	171
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	4	925	64,1	136,3	104	24
Tertiäre Vulkanite	JM	9	48	398	214,3	138,4	359	137
Jura								
Oberjura	jo	1 107	2	113	15,9	16,4	39	11
Mitteljura	jm	131	14	225	118,7	40,2	147	132
Unterjura	ju	125	95	206	141,6	20,0	172	141
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	591	3	178	44,2	38,7	99	27
Unterkeuper	ku	24	21	143	60,5	27,6	90	60
Oberer Muschelkalk	mo	183	2	101	22,3	16,5	44	18
Mittlerer Muschelkalk	mm	104	2	145	27,0	27,1	61	20
Unterer Muschelkalk	mu	110	7	147	71,4	44,9	131	67
Oberer Buntsandstein	so	56	2	203	78,9	38,8	112	87
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	5	41	11,8	7,8	18	9
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	16	26	290	98,3	68,4	160	103
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	7	243	47,0	45,1	106	33
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	49	5	88	23,3	18,7	46	18
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	8	260	115,6	49,7	167	117
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	116	2	111	38,8	27,5	82	34
Variszische Plutone („Granite“)	GP	199	2	104	39,5	23,5	78	41
Migmatite und Gneise	MI + gn	131	5	280	87,6	55,0	147	77
Alle Einheiten		**3 422**	**2**	**925**	**Flächen-gewichteter Median**			**46**

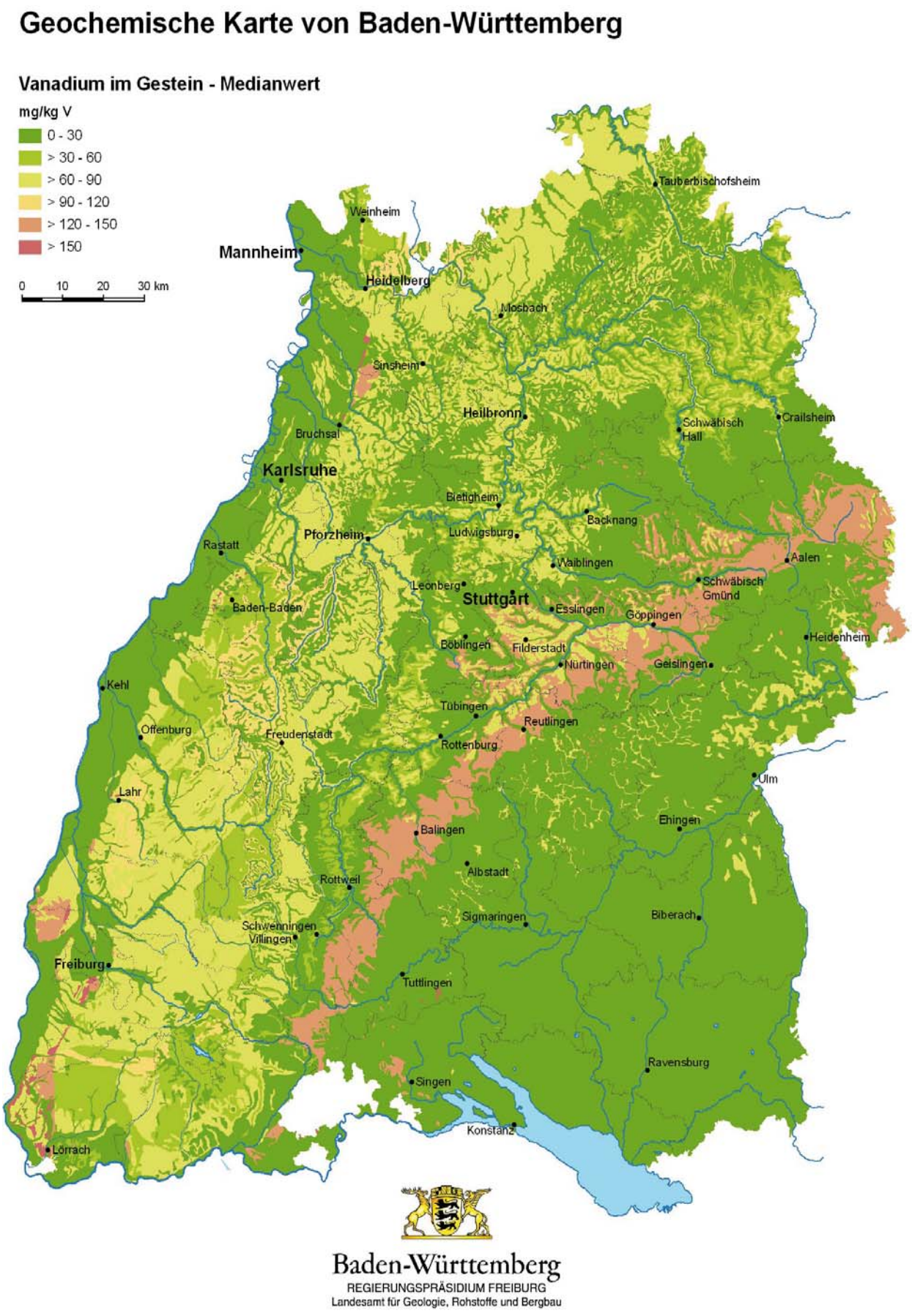


Abb. 5.1.19-2: Vanadium im Gestein – Medianwert.

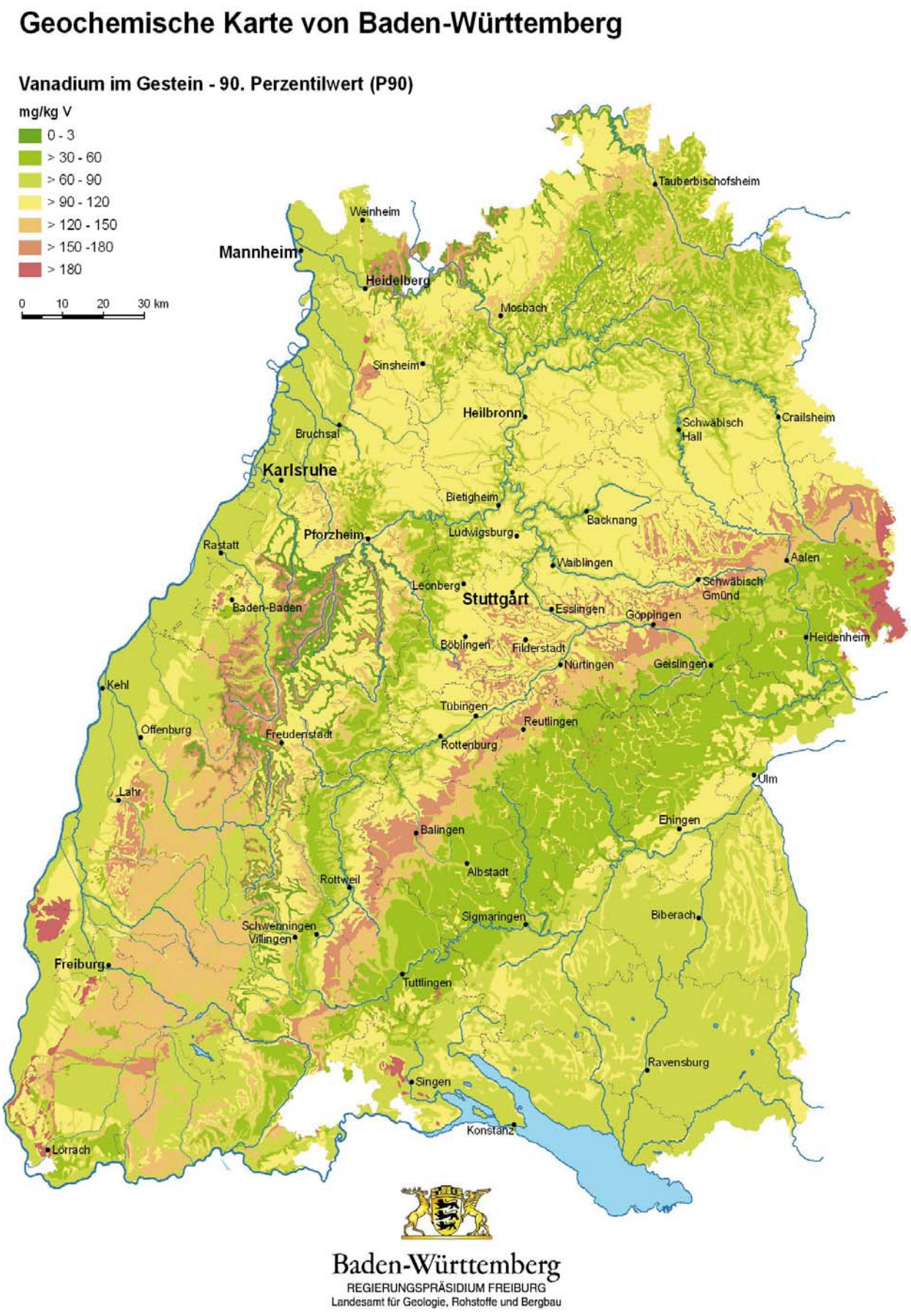


Abb. 5.1.19-3: Vanadium im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.1.20 Zink (Zn)

Zink ist zu 70 mg/kg in der Erdkruste vertreten. Es steht an 24. Stelle der Elementhäufigkeiten und ist damit häufiger als Kupfer oder Blei.

Wichtigstes Zinkmineral ist Zinkblende (Sphalerit, ZnS), erwähnenswert für den Verwitterungsbereich sind Smithsonit ($ZnCO_3$) und Hemimorphit ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$).

Der flächengewichtete Median der oberflächennahen Gesteine Baden-Württembergs beträgt 42 mg/kg, was eine Abreicherung baden-württembergischer Gesteine an Zink gegenüber dem CLARKE-Wert darstellt.

Die P 90-Werte für Zink in Gesteinen Baden-Württembergs schwanken deutlich zwischen 14 und 418 mg/kg.

Sehr niedrige Werte (P 90: < 60 mg/kg) weisen quartäre Süßwasserkalke, Gesteine des Oberjura, des Unteren und Mittleren Buntsandsteins, Oberkarbon-/Rotliegend-Sedimente und Rotliegend-Magmatite auf.

Niedrige Werte (P 90: > 60 – 90 mg/kg) treten in Lösssedimenten, Quartärschichten, im gesamten Keuper, im Unteren Muschelkalk, Zechstein und in den variszischen Plutonen auf.

Erhöhte Werte (P 90: > 90 – 120 mg/kg) finden sich im Tertiär des Molassebeckens, im Oberen Muschelkalk und im Oberen Buntsandstein sowie in Gangmagmatiten.

Hohe Werte (P 90: > 120 – 180mg/kg) wurden im Tertiär des Oberrheingrabens, in tertiären Vulkaniten, im Mittel- und Unterjura, im gefalteten Paläozoikum und in Migmatiten und Gneisen festgestellt.

Sehr hohe Werte (P 90: > 180 mg/kg) finden sich im Mittleren Muschelkalk mit 418 mg/kg.

Zink ist chalkophil, d. h. es bildet wie Kupfer und Blei bevorzugt Sulfide und kommt gemeinsam mit diesen Elementen in etwa vergleichbaren stratigraphischen Horizonten vor. Hohe Einzelwerte treten im Muschelkalk auf, wo Konzentrationen von 0,2 und 0,6 % erreicht werden. Im Oberen Muschelkalk ist ein Teil der hohen Gehalte auf metasomatische, von Kluftsystemen entlang des Rheingrabenrands ausgehende Vererzungen rückführbar. Im Mittleren und im Unteren Muschelkalk liegen den erhöhten Zinkgehalten stratiforme (schichtgebundene) geogene Anreicherungen zu Grunde. Sehr hohe Einzelwerte und ein gleichzeitig relativ niedriger 90. Perzentilwert weisen auf eine starke Konzentration des Zinks in eng begrenzten, diskreten Einzelhorizonten hin.

Mit erhöhten Gehalten an Zink gehen fast immer auch erhöhte Cadmium-Gehalte einher, da Zink und Cadmium sehr ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Natürliche Zinkblende enthält bis zu 0,5 % Cadmium.

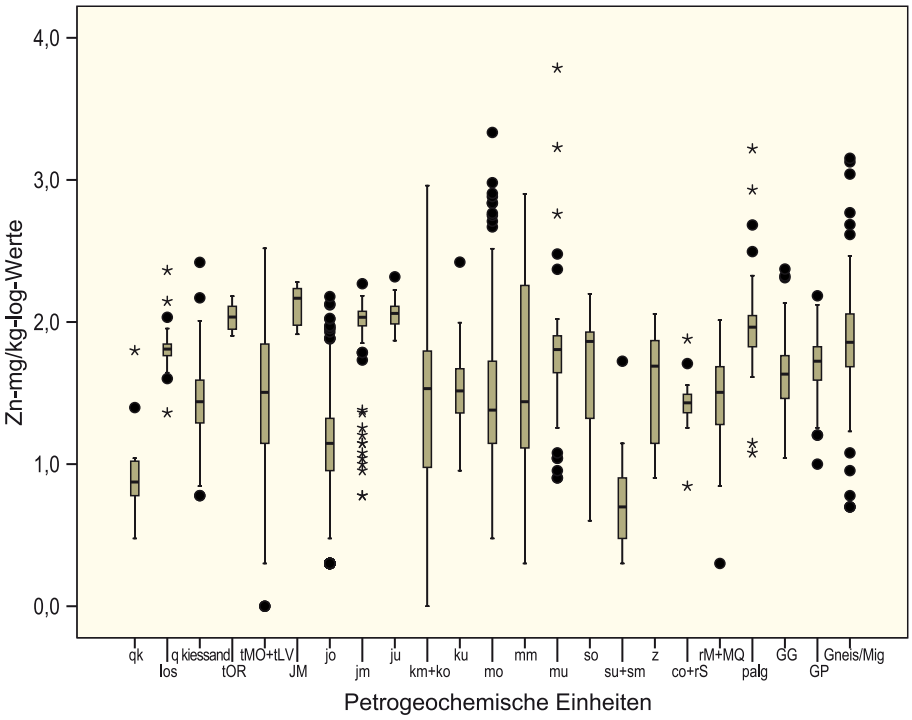


Abb. 5.1.20-1:

Boxplots für Zink (Zn); petrogeochemische Einheiten siehe Karte (Abb. 3-1); Gehalte in mg/kg.

Tab. 5.1.20-1: Statistische Kennwerte für Zink (Zn) für die verschiedenen petrogeochemischen Einheiten in Baden-Württemberg.

Zink (Zn) in mg/kg								
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)
Quartär								
Junger Süßwasserkalk	qk	16	3	63	12	15	18	7,5
Lösssediment	los	40	23	231	69	32	89	65
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	148	6	263	37	31	74	28
Tertiär								
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	80	152	112	25	144	109
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	134	1	330	50	56	113	32
Tertiäre Vulkanite	JM	9	82	191	135	43	177	147
Jura								
Oberjura	jo	1 152	2	151	18	15	32	14
Mitteljura	jm	114	6	186	100	35	130	108
Unterjura	ju	125	74	208	116	23	149	115
Trias								
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	604	1	912	42	52	84	34
Unterkeuper	ku	24	9	264	47	51	84	33
Oberer Muschelkalk	mo	183	3	2 158	81	214	120	24
Mittlerer Muschelkalk	mm	104	2	797	125	180	418	28
Unterer Muschelkalk	mu	110	8	6 130	137	600	88	64
Oberer Buntsandstein	so	56	4	158	63	38	108	73
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	29	2	53	8	9	14	5
Perm-Oberkarbon								
Zechstein	z	18	8	114	49	33	85	50
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	29	7	76	28	12	34	27
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	44	2	103	36	23	59	32
Nichtkristallines Grundgebirge								
Gefaltetes Paläozoikum	palg	61	12	1 657	139	230	171	92
Kristallines Grundgebirge								
Gangmagmatite	GG	121	11	236	52	37	95	43
Variszische Plutone („Granite“)	GP	211	10	153	56	25	87	53
Migmatite und Gneise	MI + gn	136	5	1 420	115	194	142	72
Alle Einheiten		**3 478**	**1**	**6 130**	**Flächen-gewichteter Median**			**42**

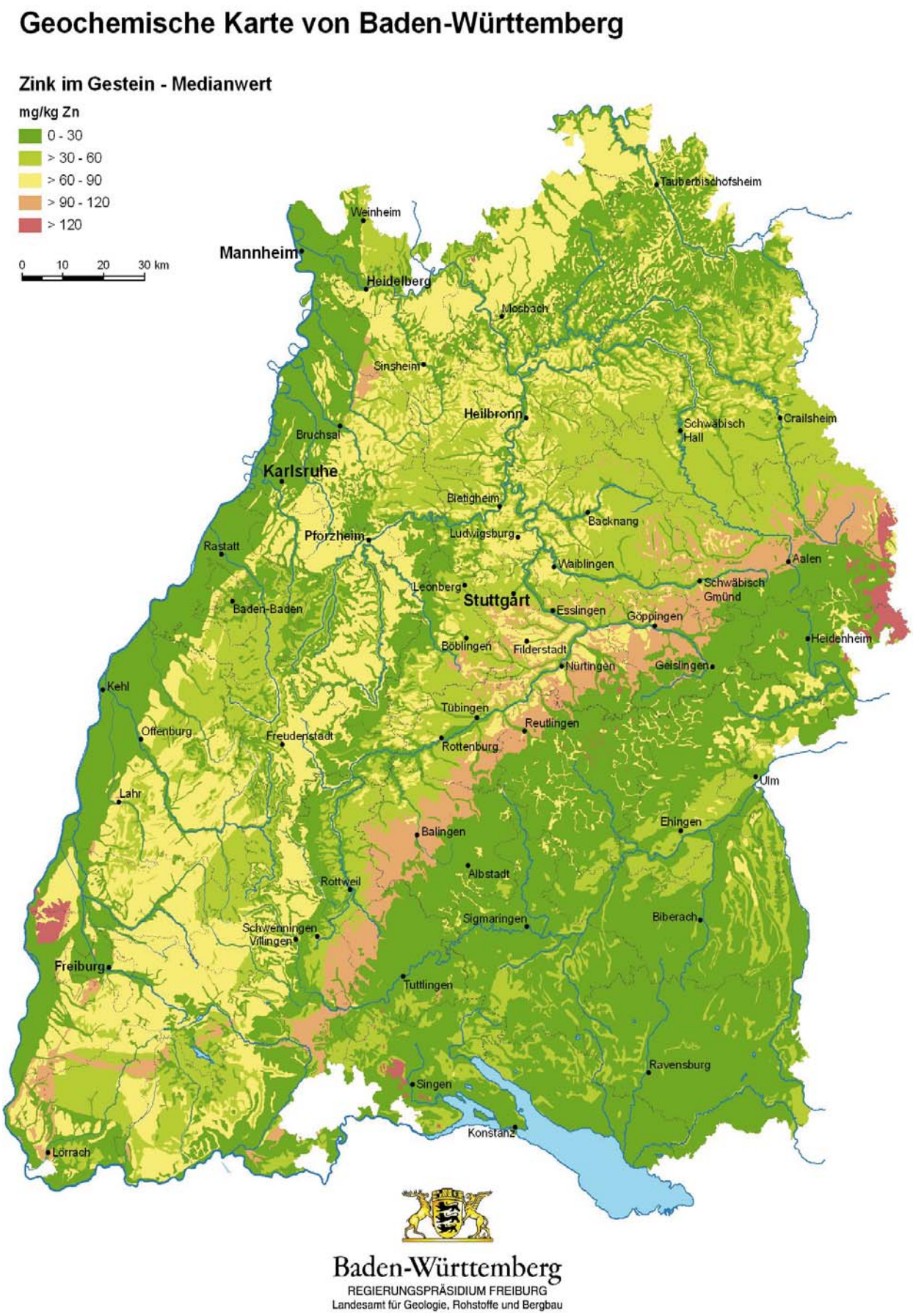


Abb. 5.1.20-2: Zink im Gestein – Medianwert.

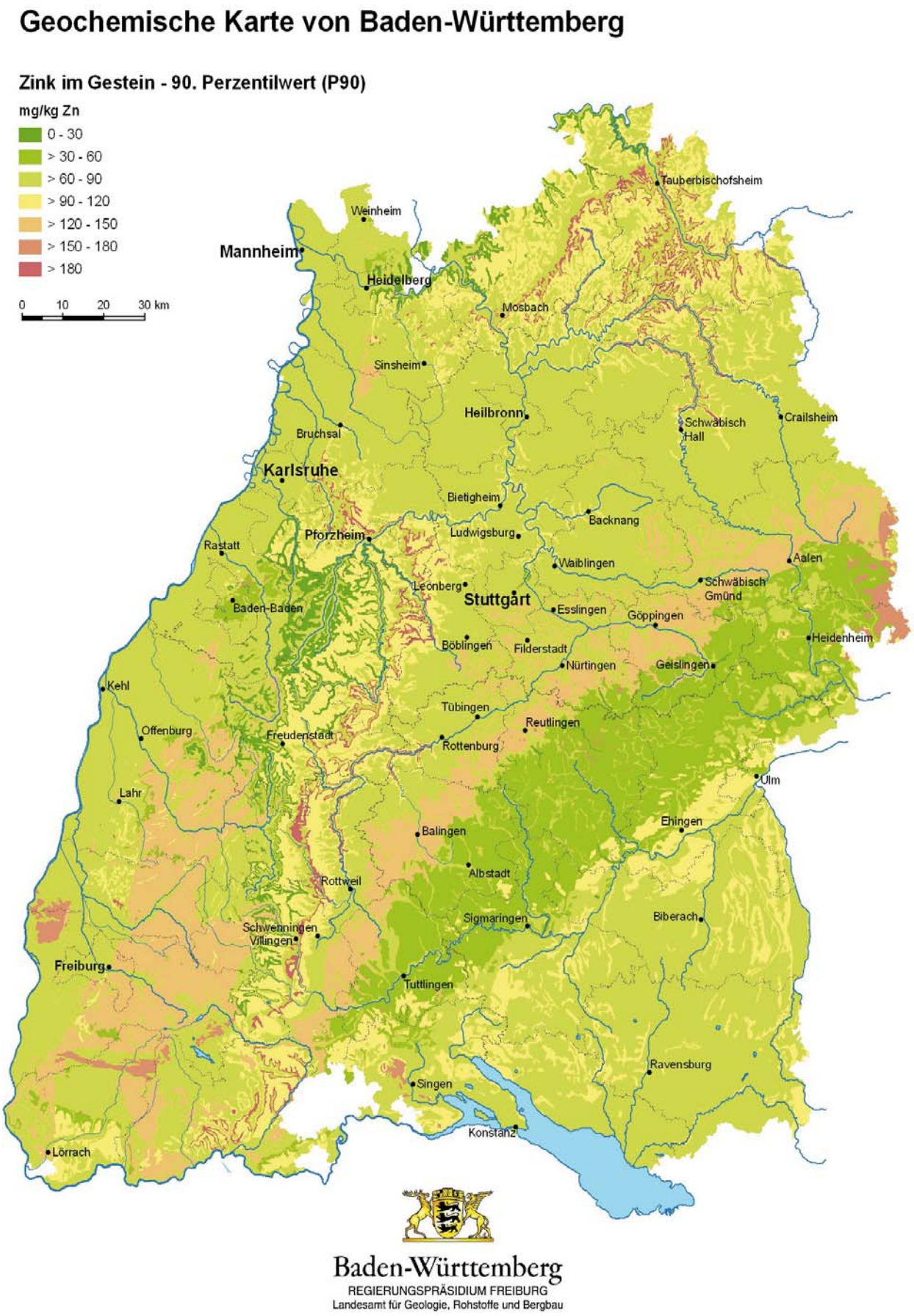


Abb. 5.1.20-3: Zink im Gestein – 90. Perzentilwert (P 90).

5.2 Interpretation

Die Auswertung des Analysenbestands nach den 23 petrogeochemischen Gesteinseinheiten führt im Gegensatz zu einer petrographisch orientierten Auswertung zu einem klar differenzierten Bild der geochemischen, geogenen Grundgehalte von Gesteinen in Baden-Württemberg. Trotz teilweise innerhalb kurzer Intervalle schwankender lithologischer Zusammensetzung lassen sich die petrogeochemischen Einheiten hinsichtlich ihres Elementinhaltes eindeutig beschreiben und voneinander trennen. Ein Ansatz nach petrographischer Zusammensetzung zeigt rasch, dass Gesteine einer Gesteinsart, z. B. Kalksteine oder Tonsteine, Gehalte eines bestimmten Elementes in der Bandbreite von „sehr gering“ bis „sehr hoch“ aufweisen können. Der lithologischen Gliederung liegt der Umstand zu Grunde, dass Bildungsprozess, -raum und -milieu wesentliche Bestimmungsfaktoren für die chemische Zusammensetzung einer Gesteinseinheit sind. Die Ähnlichkeit der genannten Faktoren für größere Gesteinseinheiten äußert sich in übereinstimmenden Analysenergebnissen auch für weiter entfernte, aber zur gleichen Einheit gehörende Proben und unterstreicht die Übertragbarkeit von punktbezogenen Einzelergebnissen in die Fläche. Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen, die auf Proben aus verschiedenen Bundesländern, aber übereinstimmenden geologischen Einheiten bezogen sind, wurde schon von Lotze (1999) herausgestellt. Im Umkehrschluss sind Vergleiche mit anderen Bundesländern nur insoweit zulässig, als vergleichbare Gesteinseinheiten vorliegen.

Tab. 5.2-1.: Vergleich der Kennwerte für Arsen mit dem Grenzwert 15 mg/kg.

ARSEN (As) in mg/kg									
Geochemische Einheit	Kürzel	Anzahl (n)	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std. Abw.	P 90	Median (P 50)	**> 15** (in %)
Quartär									
Junger Süßwasserkalk	qk	16	7	1 107	274	345	792	110	**97**
Lösssediment	los	35	4	60	12	8,8	15	11	**9**
Quartärschichten („Kiese+Sande“)	q	112	2	76	6,6	8,4	12	4	**8**
Tertiär									
Tertiär des Oberrheingrabens	tOR	10	4	27	19	7,4	25	22	**83**
Tertiär des Molassebeckens	tMO + tLV	117	2	114	7,8	12	15	4	**10**
Tertiäre Vulkanite	JM	9	2	7	4,2	1,3	5,4	4	**0**
Jura									
Oberjura	jo	710	2	19	3,3	2,3	7	2	**< 1**
Mitteljura	jm	19	2	81	22	23	50	13	**41**
Unterjura	ju	24	9	32	16	5,1	22	16	**53**
Trias									
Mittelkeuper + Oberkeuper	km + ko	377	2	48	6,3	4,3	10	5	**3**
Unterkeuper	ku	20	4	23	8,4	5,3	14	6	**9**
Oberer Muschelkalk	mo	402	2	77	8,0	6,8	12	7	**6**
Mittlerer Muschelkalk	mm	86	2	53	8,4	8,8	15	7	**10**
Unterer Muschelkalk	mu	110	2	264	14	28	20	9	**23**
Oberer Buntsandstein	so	47	2	164	15	29	26	7	**27**
Unterer und Mittlerer Buntsandstein	su + sm	50	4	49	9,1	11	23	4	**18**
Perm-Oberkarbon									
Zechstein	z	6	2	52	18	21	43	9,5	**50**
Oberkarbon / Rotliegend Sedimente	co + rS	32	4	81	45	20	68	49	**94**
Rotliegend Magmatite („Quarzporphyr“)	rM + MQ	38	2	181	32	38	54	20	**65**
Nichtkristallines Grundgebirge									
Gefaltetes Paläozoikum	palg	57	2	1 280	55	168	81	25	**67**
Kristallines Grundgebirge									
Gangmagmatite	GG	104	2	419	24	51	64	5,5	**35**
Variszische Plutone („Granite“)	GP	175	2	871	19	71	34	4	**15**
Migmatite und Gneise	MI + gn	105	2	517	26	69	59	4	**23**
Alle Einheiten		**2 661**	**2**	**1 280**	**Flächen-gewichteter Median**			**6,2**	

Die dargestellten statistischen Kennwerte erlauben keinen direkten Vergleich mit Prüf-, Maßnahmen- oder Grenzwerten von gesetzlichen oder untergesetzlichen Regelwerken. Hierzu muss auf die Verteilung der Einzelwerte zurückgegriffen werden. Als Beispiel für einen solchen Vergleich sei das Element Arsen und der Grenzwert 15 mg/kg (= LAGA Z 0-Wert; LAGA = Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall) ausgewählt. Der LAGA Z 0-Wert gibt die Untergrenze von Gehalten an, bis zu der ein unbeschränkter Einbau von Gesteinsmaterial möglich ist.

Tabelle 5.2.1 zeigt die statistischen Kennwerte für Arsen, jedoch ergänzt um eine Spalte, die die Anzahl der Überschreitungen des Grenzwertes von 15 mg/kg in Prozent aller Analysen je Gesteinseinheit angibt. Daraus wird ersichtlich, dass praktisch nur im Oberjura Überschreitungen dieses Grenzwertes nahezu ausgeschlossen werden können. Andererseits liegen bereits 15 % der Analysen der variszischen Plutone („Granite“) oder gar 65 % der gemessenen Werte aus den Rotliegend-Magmatiten über dem angenommenen Grenzwert. Auch Einheiten wie der Unterkeuper, deren Median und 90. Perzentilwert jeweils unter 15 mg/kg liegen, weisen, wie im Beispiel für Arsen, in 9 % der Fälle Grenzwertüberschreitungen auf. Es wird an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass mit den im vorliegenden Tabellenwerk dargestellten statistischen Kennwerten eine einzelfallbezogene Einstufung in Bezug auf Prüf-, Maßnahmen- und Grenzwertüberschreitungen nicht möglich ist.

Der 90. Perzentilwert kann nach bisheriger Erfahrung etwa als Obergrenze eines „typischen“, weiträumig-diffus geltenden geogenen Grundgehalts verstanden werden. Bei den obersten 10 % der Werte muss davon ausgegangen werden, dass kleinräumig begrenzte oder auf geringmächtige Einzelhorizonte begrenzte Elementanreicherungen (Vererzungen) mit enthalten sind. Bei der Auswahl der Proben wurden solche aus bekannten Anreicherungshorizonten bewusst in einem ihrer Verbreitung entsprechenden Maße in die Auswertung mit einbezogen. Das Auftreten solcher Einzelsituationen lässt sich an hohen Maximalwerten ablesen. Auch diese zählen definitionsgemäß zum geogenen Grundgehalt.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Darstellung von geogenen Grundgehalten in Gesteinen Baden-Württembergs. Der geogene Grundgehalt ist bei Fehlen eines anthropogenen Eintrags definitionsgemäß auch als Hintergrundgehalt anzusprechen. Hierzu wurde der im LGRB vorhandene Bestand an Elementanalysen in Gesteinen aufbereitet. Nach 23 petrogeochemischen Gesteinseinheiten getrennt werden statistische Parameter in Tabellen, Boxplots und Karten für insgesamt 20 Elemente dargestellt.

Gegenüber dem Clarke-Wert, der die medianen Elementhäufigkeiten für die obere kontinentale Erdkruste angibt, ergibt sich für Baden-Württemberg folgendes Bild:

- Abreicherung in Baden-Württemberg für Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Mg, Na, Ni, P, Si, V, Zn
- Etwa gleicher Gehalt in Baden-Württemberg für K, Pb, Th und U
- Anreicherungen in Baden-Württemberg für As, Ca, Mo und S

Die Auswahl der gezeigten Elemente aus dem vorhandenen Datenpool erfolgte hauptsächlich nach der Anzahl der je Element vorhandenen Einzelanalysen. Der Analysenumfang hat sich in der Vergangenheit entsprechend Aufgabenstellung und apparativen Möglichkeiten verändert. Für einzelne Elemente und geologische Einheiten ergibt sich eine sehr unterschiedliche Datendichte. In Einheiten mit geringer Datenbasis soll diese künftig durch gezielte Einzeluntersuchungen verbreitert werden und zu weiteren Elementdarstellungen führen.

In petrogeochemischen Einheiten wie Oberjura, Mittelkeuper oder im Oberen Muschelkalk erlaubt die große Anzahl vorhandener Analysen künftig eine weitere stratigraphische Differenzierung der Analysenergebnisse.

Die Daten zur Gesteinschemie werden fortlaufend aktualisiert und sollen künftig auch digital vorgehalten und einsehbar gemacht werden.

Literatur

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Leitfaden zum Umrechnungsprogramm – Methodenvergleich Gesamtgehalte Haupt- und Spurenelemente. – 518 S.; Hannover

Alloway, B. [Hrsg.] (1999): Schwermetalle in Böden; Analytik, Konzentrationen, Wechselwirkungen. – 540 S., 40 Abb., 83 Tab.; Berlin, Heidelberg (Springer).

Brinker, K. (1995): Schwermetallstatus der landwirtschaftlich genutzten Böden in Mecklenburg-Vorpommern.- Unveröffentl. Dipl.-Arb., Univ. Rostock.

DVWK (1996): Hydrogeochemische Stoffsysteme, Teil I. – Schriften **110**: 324 S., 83 Abb., 102 Tab.; Bonn.

DVWK (1998): Hydrogeochemische Stoffsysteme, Teil II. – Schriften **117**: 415 S., 84 Abb., 128 Tab.; Bonn.

Fauth, H., Hindel, R., Siewers, U. & Zinner, J. (1985): Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland, Verteilung von Schwermetallen in Wässern und Bachsedimenten. – 79 S.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).

Grupe, M. (1989): Schwermetallgehalte in Böden in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat. – Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch., **59/II**: 895—896; Oldenburg.

Jahn, R., Stahr, K. & Zauner, G. (1992): Gutachten zum geogenen Schwermetallbestand der Schichtenfolge des Stadtgebietes von Stuttgart. – Im Auftrag des Umweltamtes der Landeshauptstadt Stuttgart. – 47 S.; Hohenheim.

Kunkel, R., Voigt, H.-J., Wendland, F. & Hannappel, S. (2004): Die natürliche ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland. – Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment **47**: 204 S.; Jülich.

LABO (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden, 3. Aufl., 59 S. (Hrsg.: Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), http://www.labo-deutschland.de/pdf/LABO-HGW-Text.pdf.

LfU (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) (1994): Schwermetallgehalte in Böden aus verschiedenen Ausgangsgesteinen Baden-Württembergs. – Materialien zum Bodenschutz, Bd. **3**: 21 S.; Karlsruhe.

Lide, D. [Hrsg.] (2005): CRC Handbook of Chemistry and Physics. – 85. Aufl.; CRC Press, Boca Raton; Fl., USA.

Lotze, T. (1999): Geochemische Grundlagen zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Gesteinen in Baden-Württemberg. – Diss. TU Braunschweig. – 231 S.; Braunschweig.

Mederer, J., Hindel, R., Rosenberg, F., Linhard, E. & Martin, M. (1998): UAG „Hintergrundwerte" der Ad-hoc-AG Geochemie – Statusbericht Dezember 1996. – Geol. Jb. **G 6**: 130 S., 1 Abb., 10 Tab., 23 Anl.; Hannover.

Merian, E. [Hrsg.] (1984): Metalle in der Umwelt. – 722 S.; 22 Abb., 94 Tab.; Weinheim (Chemie).

NLfB (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 1999): Digitaler Atlas Hintergrundwerte. – Natürliche chemische Gehalte von Bachsedimenten, Böden, Gesteinen und Grundwasser in Niedersachsen und Bremen; CD-ROM, Hannover (NLfB).

Plum, H., Dietze, G., Armbruster, V. & Wirsing, G. (2009): Natürliche geogene Grundwasserbeschaffenheit in den hydrogeochemischen Einheiten Baden-Württembergs. – Informationen 23: 192 S.; Freiburg i. Br. (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau).

Rosenberg, F. & Sabel, K.-J. (1996): Hintergrundgehalte umweltrelevanter Schwermetalle in Gesteinen und oberflächennahem Untergrund Hessens. – Übersichtskarte 1 : 300 000, Wiesbaden (Hess. L.-Amt Bodenforsch.).

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (1996): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen, Teil 1, Spurenelementgehalte in Gesteinen. – 37 S., 14 Abb., 16 Tab.; Radebeul.

Salminen, R. [ed.] (2005): Geochemical Atlas of Europe; Geological Survey of Finland, Espoo, Finland. http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas.

Schaaf, R. (1982): Luftbelastung durch Metallverbindungen aus Produkten. – Texte 38/82; Berlin (Umweltbundesamt).

Scholl, W. (1959): Spurenelementuntersuchung in Gesteinen, Böden und Pflanzen des Schwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung des Kobalts. – Diss. TH Karlsruhe, 193 S.; Karlsruhe.

Stahr, K. (1992): Geogene Schwermetalle in Gesteinen und Böden der südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft – Abschlußbericht zum PWAB Forschungsprojekt PW 86013 (Projekt Wasser Abfall Boden; Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe): 103 S.; Karlsruhe.

UM (Umweltministerium Baden-Württemberg) [Hrsg.] (1995): Bodenzustandsbericht (BZB) Kehl – Schadstoffgehalte der Böden, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe; Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH (UMEG). – 58 S.; Karlsruhe.

Viereck-Götte, L., Brand, P. & Siepermann, M. (1997): Literaturstudie: Natürliche Grundgehalte von bodenrelevanten Metallen in Festgesteinen in NRW. – Endbericht im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen.

Walk, H. (1982): Die Gehalte der Schwermetalle Cd, Tl, Pb, Bi und weiterer Spurenelemente in natürlichen Böden und ihren Ausgangsgesteinen Südwestdeutschlands. – Diss. TH Karlsruhe, 170 S.; Karlsruhe.

LGRB – Informationen des Regierungspräsidium Freiburg · Abteilung 9

Bis Heft 9 Informationen des GLA – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg · Bis Heft 15 Informationen des LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg

Heft 6	(1994)	Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen 114 S., 65 Abb., 11 Tab.	10,– €
Heft 10	(2001)	Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser 64 S., 42 Abb., 15 Tab., 1 CD-ROM	10,– €
Heft 12	(1999)	Freiburg im Breisgau — Geologie und Stadtgeschichte 60 S., 28 Abb., 2 Tab., 1 Taf., Beil.: 2 Kt.	5,– €
Heft 15	(2004)	Exotische Gehölze im Kirchheimer-Arboretum Freiburg 36 S., 48 Abb.	5,– €
Heft 16	(2005)	Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg 79 S., 46 Abb.	10,– €
Heft 17	(2005)	Ergebnisse neuer Forschungsbohrungen in Baden-Württemberg 150 S., 17 Abb., 7 Tab., 3 Taf.	10,– €
Heft 18	(2006)	Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2006 202 S., 209 + 12 Abb., 15 Tab., 1 Kt.	10,– €
Heft 19	(2007)	Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg) 130 S., 118 Abb., 12 Tab.	10,– €
Heft 21	(2008)	Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse 82 S., 36 Abb., 3 Tab. im Anh., 10 Beil.	15,– €
Heft 22	(2009)	Beiträge zur Lithostratigraphie in Baden-Württemberg 146 S., 54 Abb., 5 Tab.	15,– €
Heft 23	(2009)	Natürliche geogene Grundwasserbeschaffenheit in den hydrogeochemischen Einheiten von Baden-Württemberg 192 S., 43 Abb., 55 Tab., 48 Kt.	15,– €

Preise zuzüglich Versandkosten.
Nicht aufgeführte Heft-Nummern sind zurzeit vergriffen