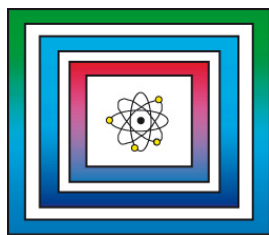


Standortauswahl

9S2018100000

Prognosemöglichkeiten
von großräumigen
Vertikalbewegungen für
Deutschland



Abschlussbericht

Hannover, Oktober 2019

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND
ROHSTOFFE HANNOVER

Standortauswahl

Prognose von Hebungen

Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für
Deutschland

Abschlussbericht

Autoren:	Jähne-Klingberg, Fabian, Stück, Heidrun, Dr., Bebiolka, Anke, Bense, Frithjof, Dr., Stark, Lena
Auftraggeber:	BGE
Auftragsnummer:	9S2018100000
Datum:	28.10.2019
Geschäftszeichen:	B3.1/B50161-10/2019-0004/001
Gesamtblattzahl:	139

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
1.1 Veranlassung	7
1.2 Definition des Ausschlusskriteriums großräumige Vertikalbewegungen im Gesetzestext	7
1.3 Einführung in das Thema	8
1.4 Erläuterung von wesentlichen Begriffen zum Thema	9
2 Ein Überblick über Methoden/Analysen zur Bestimmung von Vertikal- bewegungen und Denudation/Exhumation	13
2.1 Methoden	13
2.2 Oberflächenexpositionsdatierung	15
2.2.1 Kosmogene Nuklid-Datierung	15
2.2.2 Lumineszenz-Datierung	17
2.3 Temperatur-Sensitive Methoden	18
2.3.1 Niedrig-Temperatur Thermochronologie	18
2.3.1.1 U-Th/He Thermochronologie	18
2.3.1.2 Spaltspuren (z. B. Zirkon, Apatit)	20
2.3.2 Vitritreflexion	21
2.4 Druck-Sensitive Methoden	21
2.5 Diskussion der Unschärfen und Aussagekraft zur Verfügung stehender Methoden	22
3 Zusammenfassung großräumiger Vertikalbewegungen und Abtragungs- ereignisse in Deutschland seit dem Mesozoikum	25
4 Ursachen für großräumige Vertikalbewegungen (in Deutschland)	32
4.1 Kompilation von Prozessen mit Einfluss auf Vertikalbewegungen	32
4.2 Zusammenhang zwischen endogenen/exogenen Prozessen und Isostasie ..	36
4.3 Jungtertiäre bis rezent wirkende Prozesse mit Einfluss auf die Topo- grafiebildung und Hebung Deutschlands	37
5 Arbeiten der BGR zur Prognose zukünftiger und der Analyse vergangener Vertikalbewegungen	40
5.1 Arbeiten der BGR mit Bezug zu Hebungsprognosen im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse	40
5.1.1 Projekt VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben)	40

	Seite
5.1.2	Projekt ANSICHT (Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein) 42
5.1.3	Projekt CHRISTA (Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland) 44
5.1.4	Projekt ERAM FEP und Szenarien (Erstellung eines FEP-Katalogs und Entwicklung von Szenarien für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben) 44
5.2	Weitere laufende Projekte und Publikationen der BGR zu Vertikalbewegungen Deutschlands 46
5.2.1	Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) 46
5.2.2	Auftrag Nr. 8 des Direktorenkreises der SGD: GUK8 48
5.2.3	Auftrag 'Seismische Regionalisierung für Deutschland und angrenzende Gebiete' 49
5.2.4	Publikationen und abgeschlossene Projekte 49
6	Datengrundlage 52
6.1	An die BGE überstellte Daten des Bundes und der Länder zu Vertikalbewegungen 52
6.1.1	Bewertung der überstellten Daten in Hinsicht auf eine konsistente deutschlandweite Prognose zu großräumigen Vertikalbewegungen 53
6.2	Stand der Forschung zu Vertikalbewegungen und der Denudationsgeschichte Deutschlands 54
6.3	mögliche ergänzende Datengewinnung und Forschungsvorhaben 58
7	Vorschläge zur Kategorisierung und flächigen Darstellung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ 63
7.1	Kategorisierung einer Prognose zu zukünftigen Vertikalbewegungen unter Anwendung der Gleichung „Oberflächenhebung = Gesteinshebung – Exhumation“ 64
7.2	Betrachtung nach potentiell zugrundeliegenden Prozessen 66
7.3	Vorschlag für ein Kategorisierungsschema zu großräumigen Vertikalbewegungen 67
7.4	Darstellungsmöglichkeiten einer flächendeckenden Ausweisung von Vertikalbewegungen 69
7.4.1	Darstellung von jungtertiären bis quartären Hebungs- und Senkungsgebieten für Deutschland im Übersichtsmaßstab 69
7.4.2	Vorschläge zur Darstellung unterschiedlicher Detaillierungsgrade einer Ausweisung 71

Seite

7.4.3	Abschließende Bemerkungen zur Kartendarstellung des Ausschlusskriteriums	76
8	Prognostizierbarkeit von Vertikalbewegungen	78
8.1	Diskussion verschiedener geodynamischer Zukunftsszenarien und deren Prognostizierbarkeit für Deutschland	78
8.2	Zusammenfassung der Szenarienbetrachtung	87
9	Bewertung	88
10	Literaturverzeichnis	90
10.1	Zitate Tabelle 2-1: Auflistung von Methoden zur Ermittlung von Vertikalbewegungen und Abtragung.	115
10.2	Zitate Tabelle 4-2: Tabellarische Auflistung von Prozessen die zu Vertikalbewegungen führen können, insb. zu Hebung.	125
	Tabellenverzeichnis	134
	Abbildungsverzeichnis	136

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Jähne-Klingberg, Fabian, Stück, Heidrun, Dr., Bebiolka, Anke, Bense, Frithjof, Dr., Stark, Lena
Titel:	Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland
Schlagwörter:	Denudation, Exhumation, großräumige Vertikalbewegungen, Hebung, Methoden, Prozesse

In diesem Bericht zur Prognose großräumiger geogener Hebungen in Deutschland und dem Stand von Wissenschaft und Technik zu diesem Themenschwerpunkt (Arbeitspaket-Nr.: 9S2018100000) wird zudem eine Übersicht über vorhandene und erforderliche Daten zur Analyse von großräumigen Hebungen gegeben. Weiterhin werden die Möglichkeiten und Grenzen von Datenanalyse und Interpretation aufgezeigt und zugrundeliegende geologische und geodynamische Ursachen für großräumige Hebung zusammenfassend erläutert. Darauf aufbauend werden a) die Machbarkeit für Prognosen über einen Zeitraum von 1 Million Jahre zu großräumigen Hebungen, sowie b) die Erfordernisse für solche Prognosen abgeschätzt. Des Weiteren wird ein Vorschlag erarbeitet, ob und wie eine Kategorisierung von Prognosen erfolgen könnte.

Abstract

This report on the prognosis of large-scale geogenic uplift in Germany and the state of latest developments in science and technology on this topic (work package no.: 9S2018100000) also provides an overview of existing and required data for such prognosis. The possibilities and limits of evaluation of uplift are shown and the underlying geological and geodynamic potential causes for large-scale uplift are explained in a summarized manner. On this basis, a) the feasibility of large-scale uplift forecasts over a period of 1 million years and b) the requirements for such forecasts are estimated. In addition, a proposal is developed whether such prognosis could be done and how they could be categorised.

1 Einleitung

1.1 *Veranlassung*

Die Sicherheitsanforderungen an die Lagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) und das Standortauswahlgesetz (StandAG 2017) sehen einen Zeitraum von einer Million Jahre für den Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle vor. Für diesen Zeitraum sind u. a. geologische Prozesse auszuschließen, die mögliche Endlagerstandorte beeinträchtigen können. So könnten unter bestimmten Umständen auf den ersten Blick kaum wahrnehmbare Vertikalbewegungen der Erdkruste, von wenigen Millimetern pro Jahr, zur erhöhten Abtragung an der Oberfläche führen und in geologischen Zeitskalen zur Freilegung eines Endlagerstandortes führen. Um diese Gefährdung eines Endlagers auszuschließen wurden nach § 22, Absatz 2, Nummer 1 des Standortauswahlgesetzes (StandAG 2017) Regionen als ungeeignet definiert in denen eine großräumige geogene Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu erwarten ist.

Zur Erstellung einer Bewertungsbasis für die Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ übertrug die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit Wirkung vom 22.11.2018 das Arbeitspaket 9S2018100000 „Prognose von Hebungen“. Das Arbeitspaket hat als Zielstellung eine Übersicht über vorhandene und erforderliche Daten für solch eine Prognose zu erstellen, die Möglichkeiten und Grenzen ihrer Auswertung aufzuzeigen und zugrundeliegende geologische und geodynamische Ursachen für großräumige geogene Hebungen zusammenfassend zu erläutern. Darauf aufbauend sollen die Machbarkeit und Erfordernisse für Prognosen großräumiger Vertikalbewegungen über einen Zeitraum von 1 Million Jahre abgeschätzt werden. Des Weiteren soll ein Vorschlag erarbeitet werden wie eine Kategorisierung von Prognosen erfolgen könnte.

1.2 *Definition des Ausschlusskriteriums großräumige Vertikalbewegungen im Gesetzestext*

Im Kapitel 3 des Standortauswahlgesetzes wird in § 22 Absatz 1 Ausschlusskriterien ausgeführt, dass ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist, wenn mindestens eines der Ausschlusskriterien nach § 22 Absatz 2 zu diesem Gebiet erfüllt ist. Das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ ist nach § 22 Absatz 2 Nr. 1 wie folgt definiert: „es ist eine großräumige geogene Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu erwarten“.

In der Drucksache 18/11398¹ des deutschen Bundestages wird dieses Ausschlusskriterium auf Seite 68 wie folgt konkretisiert:

„Zu § 22 Absatz 2 Nummer 1 (Großräumige Vertikalbewegungen): Durch das Kriterium werden Gebiete ausgeschlossen, in denen über den Nachweiszeitraum großräumige Hebungen zu erwarten sind. Bewertungsgrundlage für das Kriterium ist die zu erwartende Hebungsrates, also die entsprechend heutiger Prognosen zu erwartende Hebung der Erdoberfläche pro Jahr, die wiederum über den Nachweiszeitraum zu mitteln ist. Liegt diese Hebungsrates im Mittel über 1 mm pro Jahr, so wäre über den Nachweiszeitraum mit einer resultierenden Hebung von mehr als 1000 m zu rechnen. Für Gebiete, die derart großen Hebungen ausgesetzt sind, ist eine Prognose der geologischen Gesamtsituation nicht mit der erforderlichen Sicherheit möglich. Es ist nicht auszuschließen, dass an der Geländeoberfläche verstärkt Erosion auftritt, die die notwendige Schutzwirkung der Überdeckung des Endlagers beeinträchtigen oder diese Schichten vollständig abtragen kann.“

1.3 Einführung in das Thema

Vertikalbewegungen der Erdoberfläche und Lithosphäre gehen auf das komplexe Zusammenwirken unterschiedlichster endogener und exogener Prozesse zurück. Um die Hebung der Erdoberfläche zu beschreiben reicht es nicht allein die endogen hervorgerufene Hebung zu beschreiben, sondern es muss auch die gleichzeitig exogen ablaufende flächige Abtragung (Denudation) mitberücksichtigt werden. Letztere ist dabei durch mehrere Einflussfaktoren bestimmt, wie zum Beispiel das Klima über die Zeit, die Verteilung und Existenz von Ablagerungsräumen im Umfeld gehobener Areale, rheologische Parameter der anstehenden Gesteine, geomorphologische Aspekte wie Relief, als auch Bodenbedeckung und Vegetation. Die Abhängigkeit dieser Prozesse von wiederum einer Vielzahl anderer Einflussfaktoren zeigt auf, dass Hebung und Erosion bzw. Denudation nicht im unmittelbaren und einfachen Zusammenhang stehen (siehe u. a. Wittmann et al. 2007, Sternai et al. 2019).

Zur Ermittlung und Abschätzung von Vertikalbewegungen verwenden die Geowissenschaften Methoden unterschiedlichster Disziplinen, welche sowohl qualitative als auch quantitative Analytik umfassen. Dabei beschreiben die verschiedenen methodischen Disziplinen ihre Ergebnisse teils auf Basis unterschiedlicher Begrifflichkeiten/Definitionen (u. a. Denudation, Erosion, Exhumation und Hebung). Eine deutschlandweite Prognose von Vertikalbewegungen über einen Zeitraum von 1 Million Jahre basierend auf bestehenden

¹ Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze einschließlich Begründung (Stand 07.03.2017)

Literaturdaten erfordert demzufolge vorab die genaue Kenntnis dieser unterschiedlichen Definitionen von ineinandergreifenden Prozessen. Dafür braucht es sowohl ein tiefgreifendes Prozess- und Methodenverständnis als auch die Auseinandersetzung mit den jeweiligen methodischen Unschärfen.

Im vorliegenden Bericht sollen daher zunächst die in der Literatur verwendeten Begriffe, die im Zusammenhang mit Vertikalbewegungen stehen, sowie die gängigsten analytischen Methoden zur Analyse von Vertikalbewegungen und Denudation, erörtert werden. Folgend wird auf Basis einer zusammenfassenden Betrachtung großräumiger Vertikalbewegungen und der Abtragungseignisse für Deutschland seit dem Mesozoikum die Bandbreite möglicher Bewegungsraten und Vertikalbewegungsbeträge für intrakontinentale Bereiche vermittelt. Im Anschluss werden verschiedene Prozesse die großräumige Hebung hervorrufen können vorgestellt und auf Literatur verwiesen die den Einfluss verschiedener Prozesse auf die Topografiebildung und Hebung Deutschlands diskutiert. Nach einer umfassenden Vorstellung bestehender Arbeiten der BGR zu Vertikalbewegungen und Erörterung der durch die geologischen Dienste der Länder und des Bundes an die BGE übermittelten Daten, erfolgt eine Bewertung der Aussagekraft dieser Daten für die Prognose großräumiger Vertikalbewegungen. Weiterhin werden Vorschläge zur Weiterentwicklung des Wissenstandes zu großräumigen Vertikalbewegungen durch ergänzende Forschungsvorhaben und Datenkompilationen sowie durch methodische Fortentwicklungen (u. a. der Messmethoden, Prozessmodellierung) präsentiert. Abschließend werden Möglichkeiten der Kategorisierung von Vertikalbewegungen für eine deutschlandweite Ausweisung aufgezeigt und die Prognostizierbarkeit von Vertikalbewegungen diskutiert.

Die Endlagerforschung in der Schweiz hat die Parameter Hebung und Abtragung für ausgewählte Regionen ebenfalls untersucht (NAGRA NTB 02-03 & NTB 99-08). Viele der Fragestellungen dieses Berichtes sind somit auch durch Berichte der NAGRA bearbeitet.

1.4 Erläuterung von wesentlichen Begriffen zum Thema

Bei der Analyse auf Vertikalbewegungen ist es entscheidend die Zusammenhänge zwischen Oberflächenhebung, Gesteinshebung und Exhumation sowie weiterer damit verknüpfter Definitionen genau zu verstehen. Dazu werden folgend notwendige Definitionen zusammenfassend dargestellt und auf weiterführende Literatur verwiesen.

Hervorgegangen aus unterschiedlichen geowissenschaftlichen Disziplinen und den damit verbundenen Methoden haben sich für die Beschreibung und Erfassung der „geogenen Hebung“, bzw. der damit verbundenen Prozesse, unterschiedliche Begriffe etabliert, die sich jedoch in ihrer Bedeutung überschneiden und ineinandergreifen. Die teils kontroverse

Nutzung der Begriffe Denudation, Erosion, Exhumation und Hebung führte zu einer (Re-) Definition durch England & Molnar (1990) sowie zur Weiterdifferenzierung durch Summerfield (1991), Summerfield & Brown (1991) und Ring et al. (1999).

England & Molnar (1990) beschreiben den Begriff Hebung folgendermaßen: Hebung bezieht sich auf den gegen den Gravitationsvektor gerichteten Versatz. Dieser Versatz kann nur beschrieben werden, wenn das versetzte Objekt und der Referenzrahmen spezifiziert sind. In der strukturgeologischen und tektonischen Literatur herrscht hierin häufig Konfusion, da entweder das Objekt oder der Referenzrahmen nicht spezifiziert sind. Hierbei sind die Objekte meist Gesteine oder Teile der Erdoberfläche, während sich der Referenzrahmen gewöhnlich auf die Erdoberfläche, ein stratigrafisches Niveau, den Meeresspiegel oder auf das Geoid bezieht. In den Geowissenschaften wird der Begriff Hebung allgemein für drei verschiedene Phänomene genutzt: Oberflächenhebung (surface uplift), Gesteinshebung (rock uplift) und Exhumation.

Entsprechend der zuvor genannten Basisliteratur, bezieht sich Oberflächenhebung (surface uplift U_S) auf Veränderungen in der Höhe (elevation; Abb. 1-1: $h_{s2}-h_{s1}$) der Erdoberfläche relativ zum Geoid. Gesteinshebung (rock uplift U_R) bezieht sich dagegen auf Änderungen in der vertikalen Position des Gesteins relativ zu einem Bezugsrahmen (/ -punkt), wie z. B. dem Geoid.

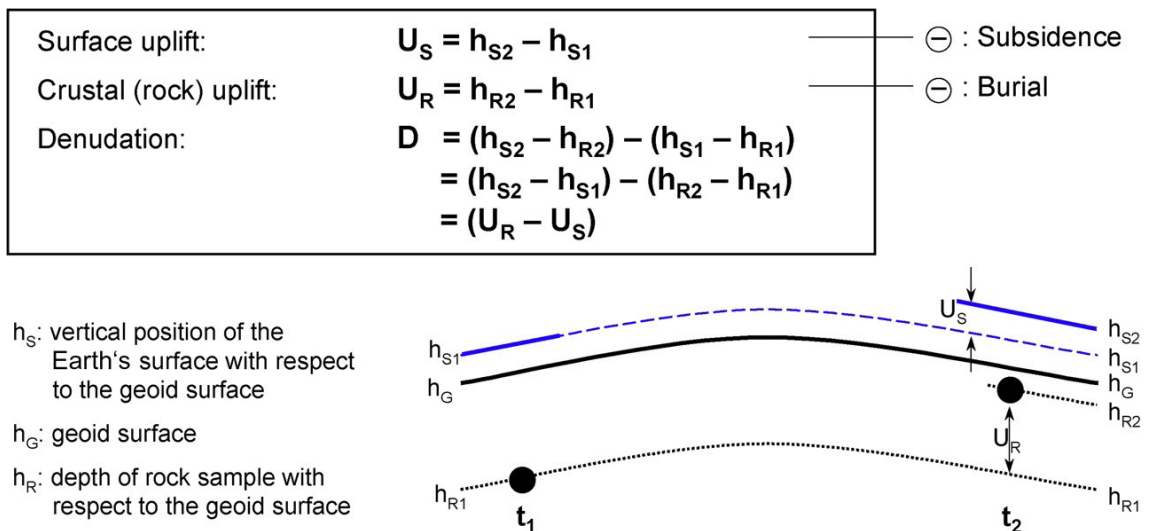


Abb. 1-1: Gleichungen und schematische Illustration des Zusammenhangs zwischen Oberflächenhebung, Gesteinshebung und Denudation (Lisker et al. 2009). Zur Veranschaulichung sind die Geoidoberfläche (h_G), die Tiefe einer Gesteinsprobe (h_R) sowie die vertikale Position der Erdoberfläche (h_S) relativ zu dieser in Form von Linien dargestellt. Aus den Differenzen der Bezugspunkte ergibt sich jeweils die Oberflächenhebung (U_S) und Gesteinshebung (U_R), sowie aus der Differenz dieser beiden die Denudation ($U_R - U_S$). Diese vereinfachte Gleichung gilt nur uneingeschränkt wenn es über den Betrachtungszeitraum nicht zur Ablagerung von Sedimenten (oder stetigen Umlagerung, wie in der Wüste durch Windtransport), Bedeckung mit Wasser/Eis oder Vulkaniten kommt.

Der Begriff Exhumation („Freilegung“ eines Gesteins oder Bezugspunktes im Untergrund) beschreibt den Versatz der Gesteine relativ zu Erdoberfläche, welcher wiederum eng verknüpft ist mit den Begriffen der Erosion und Denudation (England & Molnar 1990). Da Hebung hinsichtlich der Bewegung dem Gravitationsvektor entgegengerichtet verläuft, ist das Bezugsniveau nach England & Molnar (1990) entsprechend eine equipotentielle Gravitationsfläche, welche durch das Geoid repräsentiert wird. Die Exhumationsrate entspricht vereinfacht ausgedrückt der Erosionsrate oder der Rate der Entfernung des Hangenden (Deckgebirge/overburden). Auch wenn Exhumation Freilegung durch erosive Prozesse miteinschließt, so wird dieser Begriff meist für tektonisch induzierte Freilegung eines Gesteins verwendet (Abb. 1-2).

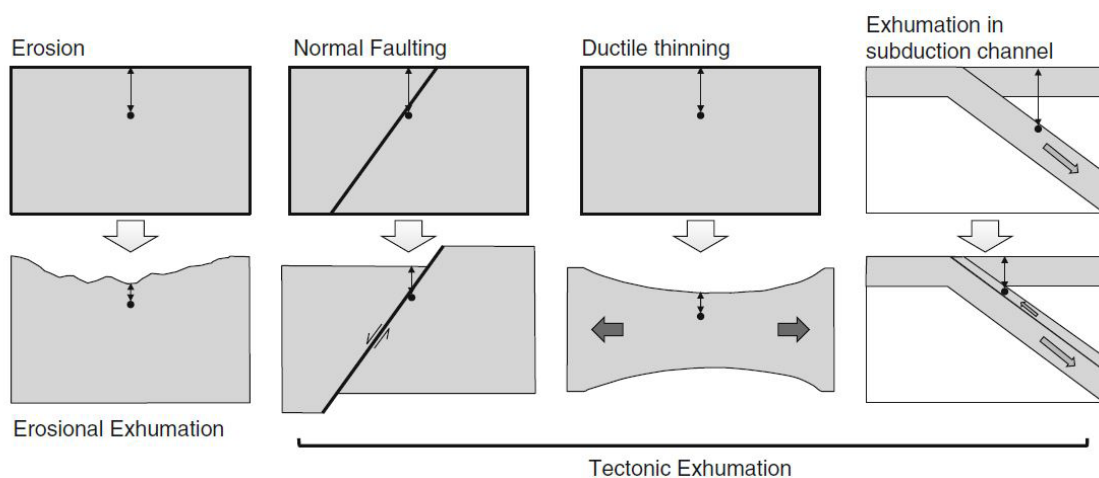


Abb. 1-2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Exhumationsarten, übergeordnet differenziert in erosionale und tektonische Exhumation (van der Beek 2014). In der oberen Reihe mit Abbildungen ist jeweils die Ausgangssituation illustriert. In der Unteren dagegen die Szenarien nach der Exhumation eines Gesteinspartikels (schwarzer Punkt). Die schwarzen Pfeile zeigen die Tiefe eines Gesteinspartikels unterhalb der Oberfläche vor und nach der Exhumation.

Die „tektonische Exhumation“ beschreibt den Prozess, durch den Gesteine ohne Erosion näher an die Erdoberfläche gelangen (Abb. 1-2). Anstelle von Erosion werden hier die überlagernden Gesteine durch andere Prozesse entfernt, beispielsweise durch Abschiebungen oder duktile Ausdünnung (Abb. 1-2). Exhumation kann durch diese Prozesse sehr schnell erfolgen, was zur Bildung eines topografischen Reliefs und zur schnellen Abkühlung (siehe Kapitel 2 & 4) in oberflächennahen Bereichen führt.

Denudation kann als Resultat klimatisch induzierter Erosion und/oder tektonisch induzierter Erosion angesehen werden (Ring et al. 1999). Im Bericht wird der Begriff Denudation für die flächige Abtragung einer Region, in einem definierten Betrachtungszeitraum, verwendet. Erosion wiederum beschreibt dagegen den gerichteten Prozess der Abtragung

von Verwitterungsprodukten (z. B. fluviatil, glazial, äolisch). Der Umfang der Abtragung (Abtragungsrates) ist neben der Transportart eine Funktion der Parameter des Fluids (Fließgeschwindigkeit/Reliefs), der gesteinsmechanischen Eigenschaften, des Klimas und der Vegetation.

Die Überschneidung der Begriffe Denudation (Abb. 1-1; D) und Exhumation besteht darin, dass beide aus der Abtragung von Material einer Region oder eines Punktes auf der Erdoberfläche resultieren. Nach Ring et al. (1999) bezieht sich Exhumation auf die Aufwärtsbewegung von Gesteinen relativ zu einem Referenzrahmen mit festem Bezug zur Erdoberfläche, während sich Denudation auf eine Abwärtsbewegung der Erdoberfläche relativ zu einem Referenzrahmen mit festem Bezug zum Gestein bezieht. Konträr dazu sehen Summerfield und Brown (1998) den Unterschied darin, dass Exhumation für Gesteine oder Oberflächen reserviert ist, die zuvor versenkt wurden, wohingegen es sich bei Denudation um eine eher generelle Bezeichnung handelt. Bezugssystem für beide ist die Geometrie der Paläooberfläche.

Denudation und Exhumation werden in der Fachliteratur trotz der in den genannten Definitionen gemachten Unterschiede (u. a. Ring et al. 1999, England und Molnar 1990) überwiegend synonym verwendet, wobei es in den unterschiedlichen Fachrichtungen der Geowissenschaften Tendenzen zur Bevorzugung jeweils einer dieser Begriffe gibt. Somit ist auf Basis von Literaturangaben zwischen Exhumation und Denudation kaum sicher zu unterscheiden. Nach Gallagher (2012) ist eine Konsequenz der Denudation die Entfernung jedes direkten Beweises der Hebung, sodass eine Ableitung der Abtragungsgeschichte und Hebungsrates erschwert sind.

Gemeinhin führt Hebung zu einer Änderung im Akkomodationsraum (base-level) von Flüssen und Ablagerungsräumen, was wiederum Änderungen bei der Exhumation/Denudation hervorrufen kann. Jedoch führt Hebung (uplift) weder zwangsläufig zu Denudation/Exhumation, noch besteht eine direkte zeitliche Beziehung zwischen Hebung und Exhumation/Denudation (u. a. Sternai et al. 2019, Fitzgerald et al. 1995).

Die grundlegende Beziehung zwischen den drei zuvor erörterten Begriffen lässt sich abschließend in der Gleichung „**Oberflächenhebung = Gesteinshebung – Exhumation**“ zusammenfassen. Alle drei Größen können, mit Ausnahme des Wertes Null, nach der genannten Gleichung nicht gleichzeitig den gleichen Betrag annehmen. Die Annahme, dass Gesteinshebung und Oberflächenhebung gleich sei, entspricht somit der Annahme, dass Exhumation gleich null ist – oft eine schwer zu rechtfertigende Annahme (England & Molnar 1990) (vorstellbar für tektonisch inaktive Regionen kontinentaler Schilde mit hoher Mächtigkeit von Lockersedimenten und stetiger Umverteilung dieser Sedimenthülle durch zum Beispiel Windtransport).

2 Ein Überblick über Methoden/Analysen zur Bestimmung von Vertikalbewegungen und Denudation/Exhumation

Eine direkte Quantifizierung von Hebung (rock- oder surface uplift) über vergangene geologische Zeiträume hinweg ist in der Regel nicht möglich, da dies die Kenntnis der Paläo-Höhenlage in Bezug auf ein Bezugsniveau (z. B. Meeresspiegel) voraussetzt. Verschiedene geowissenschaftliche Methoden können jedoch Informationen zu Exhumation- bzw. Denudationsbeträgen liefern. Aufgrund der Tatsache, dass diese Parameter (rock uplift, surface uplift, Denudation/Exhumation) nicht vollständig unabhängig voneinander sind (Kap. 1.4), liefern Informationen zu Exhumationsbeträgen und Exhumationsraten zumindest indirekte Hinweise auf vertikale Bewegungen.

2.1 *Methoden*

Im Folgenden werden ausgewählte Methoden zur Ermittlung von Vertikalbewegungen und Abtragung detaillierter beschrieben. Der Fokus liegt hierbei im Wesentlichen auf quantitativen Methoden zur Abschätzung von Exhumation bzw. Denudation, wie z. B. der Oberflächenexpositionsdatierung.

Vergleichende geomorphologische Methoden, beispielsweise die klassische tektonische Geomorphologie, welche anhand topografischer und morphologischer Indizien Rückschlüsse auf tektonische und erosive Prozesse (u. a. Hebung & Senkung) zu ziehen versuchen (beruhend auf den Theorien von u. a. Penck 1929 & 1953, Davis 1912) sind mit Literaturzitataten in Tabelle 2-1 aufgeführt, werden jedoch nicht im Detail beschrieben. Folgend vorgestellte analytische Methoden sind heutzutage auch ein Werkzeug geomorphologischer Analyse. Weiterhin unberücksichtigt, bei folgender Detailbeschreibung der Methoden, bleiben geodätische und fernerkundliche Verfahren, sowie etablierte qualitative geologische Verfahren. Generell gilt es jedoch anzumerken, dass zur Ermittlung von Vertikalbewegungen häufig mehrere dieser Ansätze vergleichend angewendet werden (u. a. Kelly 2010).

Zur allgemeinen Übersicht wurden sowohl die hier vorgestellten Methoden, als auch die im Weiteren unberücksichtigten Methoden, mit Referenzen weiterführender Literatur tabellarisch kompiliert (Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Auflistung von Methoden zur Ermittlung von Vertikalbewegungen und Abtragung, differenziert nach Art der Ergebnisse in Oberflächenhebung (OH), Gesteinshebung (GH) und Exhumation oder Bedeckung (E)/(pot. - potentiell/rel. - relativ)/(?) – unsichere Zuordnung). Neben der Nennung der Grundprinzipien der Methoden sind Referenzen mit grundlegenden Beschreibungen der Methoden sowie mit Anwendungsbeispielen für Deutschland und umgebende Gebiete aufgeführt. Die Methoden sind übergeordnet unterteilt nach Fachdisziplinen und werden grob nach qualitativen und quantitativen Verfahren unterschieden.

Methoden zur Bestimmung von Vertikalbewegungen & Abtragung		
Methodenauswahl nach Fachdisziplin	Grundprinzip/Ermittlung welchen Parameters?	Ausgewählte Referenzen
Geodäsie & Fernerkundung		
Nivellement	Höhendifferenz relativ zu Bezugspunkten (OH)	Barlier & Lefebvre (2001)
Radarinterferometrie (InSAR)	Entfernungsdifferenz zwischen Satellit und Erdoberfläche in Sichtlinie des Satelliten (Line of Sight) relativ zu einem Bezugspunkt (OH)	Klein et al. (2016), Ellenberg (1988, 1987) Kalia et al. (2018, 2017), Fuhrmann et al. (2015), Strozzi et al. (2011), Tesauro et al. (2006)
GPS/GNSS (global navigation satellite system)	Lagedifferenz eines Raumpunktes relativ zum geodätischen Referenzsystem (Z-Komponente ungenauer) (OH)	Sánchez et al. (2018), Fuhrmann et al. (2015), Fuhrmann et al. (2013)
Satelliten-Laser Abstandsmessung (SLR-Satellite Laser Ranging)	Höhenänderung zu vorangegangener Messkampagne (OH)	Degnan (1993)
Laser-Scanning	Lageänderung zu vorangegangener Messkampagne (OH)	Carter et al. (2007), Csatho et al. (2005)
Schwerfeldmessung	Messung Schwereanomalie - Ableitung potentieller isostatischer Ausgleichsbewegung (pot. GH)	Olsson et al. (2019), Steffen & Wu (2011), Tesauro et al. (2007), Steffen (2006), Ekman & Mäkinen (1996)
Oberflächenexpositionsdatierung		
kosmogene Nuklid-Datierung	Zeit seit Exposition (E & OH?)	Wittmann et al. (2017), Darvill (2013), Morel et al. (2003)
Lumineszenz-Datierung (TL, OSL)	Bedeckungsalter (E & OH?)	Hilgers (2007), Geyh (2005), Krebetschek (1995), Morel et al. (2003), Schleicher & Geyh (1990)
Temperatur-Sensitive Methoden		
U-Th/He, K-Ar/ Ar-Ar Thermochronologie	Schließungstemperatur von Mineralen, Rekonstruktion der Abkühlungsgeschichte (E)	Zeiler (2014) Japsen et al. (2018), Lange et al. (2008), Vernon et al. (2008), Hejl et al. (2003), Fitzgerald et al. (1995)
Spaltspuren (u. a. an Zirkon, Apatit)	erreichte maximale Versenkung/ Temperatur (E)	Japsen et al. (2018), Arfai & Lutz (2018), Beyer (2015), Bruns et al. (2013), Adriasola Muñoz (2007)
Vitrinitreflexion		
Druck-Sensitive Methoden		
Porositäts-Auflast(Tiefen-)abhängigkeit	Abweichung von ermittelten Idealkurven der Tiefenabhängigkeit von Porosität (E / GH?)	Medina et al. (2008), Bird & Nelson (2005), Japsen et al. (2002), Kelly (2010), Magara (1980), Menpes (1997), Menpes & Hillis (1996, 1995)
Radiokarbon-Altersdatierung (C14-Methode)		
Radiokarbon-Altersdatierung (C14-Methode)	Altersdatierung Kohlenstoff (für holozäne - quartäre Sedimente) - Absolutalter ca. des Zeitpunktes des Absterben organischer Masse (E / GH?)	Vink et al. (2007), Fowler et al. (1986)
Stabile Isotopen Paleoaltimetrie (δ18O/δD)		
Stabile Isotopen Paleoaltimetrie (δ18O/δD)	Höhenänderung über die Zeit (nur durchführbar in Gebieten mit großen Höhenänderungen) (OH / E?)	Botsyun et al. (2019), Mulch (2016)
Geomorphologische Methoden		
Flächen-Neigungs-Relation	Abschätzung von Hebungsrate und Erosionsbeständigkeit (E / GH?)	Lague et al. (2003), Lague et al. (2000)
Analyse von Fließnetzen und Flussprofilen	Abschätzung von Hebungsrate und Erosion (insb. bei hohen Raten) (E / OH?)	Frings et al. (2019), Winterberg & Willett (2019), Glotzbach (2015), Demoulin (2011), Roberts & White (2010), Turowski et al. (2006)
Abschätzungen auf Basis heutiger Sedimentflusfrachten	Auf Basis quantitativer Messungen zu heutigen Flussfrachten (E)	Hinderer et al. (2013)
Flußterrassenanalyse, Küsten-Terrassen	relative Alter, mit Stratigraphie/Paläontologie Absolutalter, Hebung zu Bezugsfläche (rel. GH)	Preuss et al. (2019), Padoja et al. (2018 & 2014), Vink et al. (2007), Steinmüller (1992), Muhs et al. (1992)
Gletscherprofilanalyse	Aktivität der Hebung (OH?)	Headley et al. (2012)
Analyse von Verwitterungskrusten und Paläoböden (Saprolite, Laterite, Terra Rossa)	Alter von Freilegungsereignissen, Oberflächenalter, Definition von Bezugsflächen (rel. OH)	Ackerer et al. (2016), Migon & Lidmar-bergström (2001), Wagenbreth (1972)
Analyse von Erosionsraten basierend auf kosmogenen Nukliden	Denudationsraten bezogen auf Einzugsgebiete oder Flußabschnitte (E)	Schaller et al. (2016, 2001)
Morphostratigraphie	relative Altersabfolge der Bildung von Oberflächenformen (rel. OH / GH?)	Strasser et al. (2010), Peulvast et al. (2009), Ahnert (1996 & 1989), Penck (1953)
Rumpflächennanalyse	Genese und relative Alter (Bezug auf zum Bsp. Stratigraphie) (rel. OH)	König (2008), Hofbauer (2001), ahnert (1996 & 1989)
Analyse von Meeresspiegelzeichnungen /partiell Seespiegeländerungen	relative Höhenlage datierbarer, flachmarin/lakustriner & Strand-sedimente zur heutigen Küstenlinie (unter Berücksichtigung des Meeres-/Seespiegels zum Bildungszeitpunkt der Sedimente) (GH)	Rennie & Hansom (2011), Vink et al. (2007), Ekman & Mäkinen (1996)
Paläogeografie/Stratigraphie & Weitere		
Analyse der Flusssystementwicklung in Relation zur Hebung	Einfluss von Vertikalbewegungen auf Flussverläufe und Sedimentation (rel. OH?)	Lange (2012), Preusser (2008)
Liefergebietsanalysen an Sedimenten	Zeitpunkt der Exhumation in Liefergebieten (E)	von Eynatten et al. (2008), Weltje & von Eynatten (2004)
Paläogeografie/	Stratigraphisch eingeordnete flachmarine/küstennahe Fazies weit über den Meeresspiegel gehoben (rel. GH)	Sissingh (2006a & b), Voigt et al. (2004), Sissingh (2003), Gemmer et al. (2002), Clausen & Huuse (2002), Wagenbreth (1972)
Stratigraphie	Raten der Versenkung und Hebung über die Zeit (GH / E?)	Warsitzka et al. (2016), Beyer (2015), Scheck & Bayer (1999)
Beckenanalyse	Qualitative Herleitung bezogen auf angenommene Prozesse und Kinematiken (GH)	Japsen et al. (2018), Kley (2018), Holford et al. (2009), Japsen et al. (2002), Ludwig (2001a & b), Badley et al. (1989)
Tektonische Analysen	Modelle der Strukturentwicklung über die Zeit, basierend auf Annahmen zur Kinematik (GH / E?)	Tanner & Krawczyk (2017), Warsitzka et al. (2016), Malz et al. (2015), Brandes & Tanner (2014), Jähne & Kley (2011), Daéron et al. (2007), Laubscher (2003)
Strukturrestaurierung & kinematische Vorwärtsmodellierung		
Überlegend qualitative Methoden		

2.2 Oberflächenexpositionsdatierung

2.2.1 Kosmogene Nuklid-Datierung

Kosmogene Nuklide sind Isotope die durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre oder auf Gesteinsoberflächen gebildet werden. Mittels der Oberflächenexpositionsdatierung (auch Terrestrial Cosmogenic Nuklide Dating) kann durch die Bestimmung der Konzentrationen von kosmogenen Radionukliden (z. B. ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl siehe Tab. 2-2) in Oberflächengesteinen ermittelt werden wie lange das untersuchte Gestein der kosmischen Strahlung ausgesetzt war. Damit kann im einfachsten Fall ein Mindestexpositionsalter oder, bei geeigneten Messkombinationen, das Expositionsalter und die Erosionsrate bestimmt werden (Abb. 2-1) (s. a. Wittmann et al. 2017).

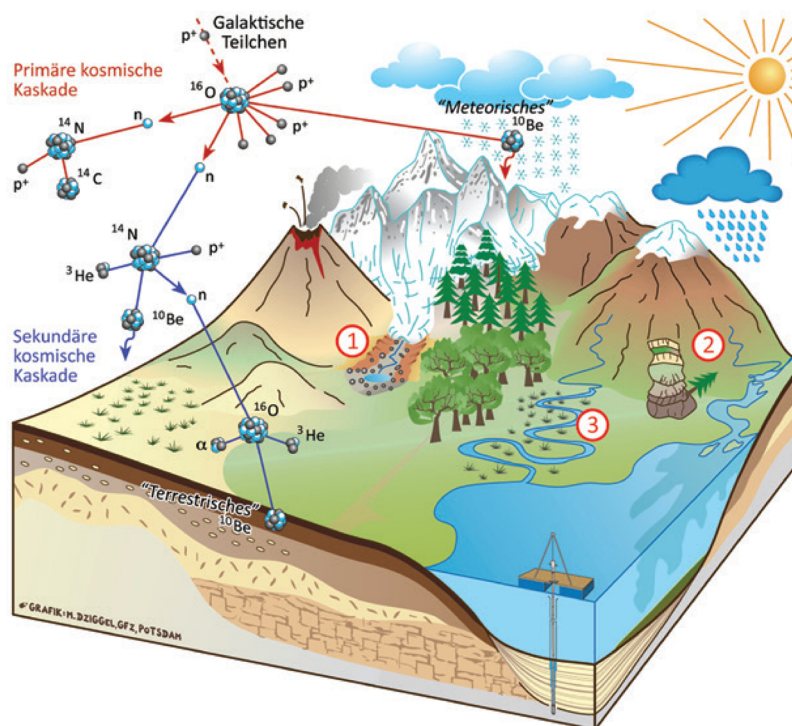


Abb. 2-1: Bildung kosmogener Nuklide (am Beispiel des ^{10}Be) und typische Landschaftselemente, die mittels kosmogener Nuklide untersucht werden: 1) Datierung von Ablagerungen, 2) Erosion im Gebirge 3) Sedimenttransport (aus Wittmann et al. 2017).

Das Verhältnis des durch kosmische Strahlung entstehenden kosmogener Nuklids zu dem jeweils stabilen Isotop ist u. a. abhängig von der Höhenlage, der geomagnetischen Breite, der Strahlungsgeometrie und einer möglichen Schwächung der Strahlung durch Abschirmungen (z. B. Bedeckung). Die spezifischen Strahlungsbedingungen und damit das Verhältnis der Isotope zueinander müssen vor der Altersbestimmung festgelegt bzw. abgeschätzt werden können. Im Falle konstanter oder nicht stattfindender Erosion

repräsentiert das gemessene Alter die Dauer der Exposition des Gesteins an der Oberfläche. Herrscht Erosion vor, so ist das gemessene Alter eine Funktion der Erosionsrate und ein Minimalalter der Exposition (Abb. 2-2).

Tab. 2-2: Übersicht der kosmogenen Isotope, ihrer Halbwertszeiten und typischer Wirtsminerale (aus Gallagher 2012).

Isotop	Halbwertszeit	Wirtsmineral/Wirtsgestein
³ Ne	stabil	Olivin
²¹ Ne	stabil	Olivin, Quarz
¹⁰ Be	1,51 x 10 ⁶ Jahre	Quarz
²⁶ Al	7,50 x 10 ⁵ Jahre	Quarz
³⁶ Cl	3,01 x 10 ⁵ Jahre	Kalzit, Gesamtgestein

Der maximale Betrachtungszeitraum der Methode ist abhängig von den radioaktiven Verfallseigenschaften des jeweiligen Isotops (Tab. 2-2). Im Allgemeinen kommt es ab einem Zeitraum von 4 bis 5 Halbwertszeiten zu einer Äquilibration des radioaktiven Zerfalls und der radiogenen Neubildung der Isotope (Abb. 2-2). Im Fall des langlebigen ¹⁰Be ergibt sich daraus ein maximaler Betrachtungszeitraum von 5-6 Millionen Jahren (Tab. 2-2). Der Zeitpunkt dieser Äquilibration ist jedoch auch abhängig von der Erosionsrate (Abb. 2-2b, siehe u. a. Gallagher 2012, Wittmann et al. 2017).

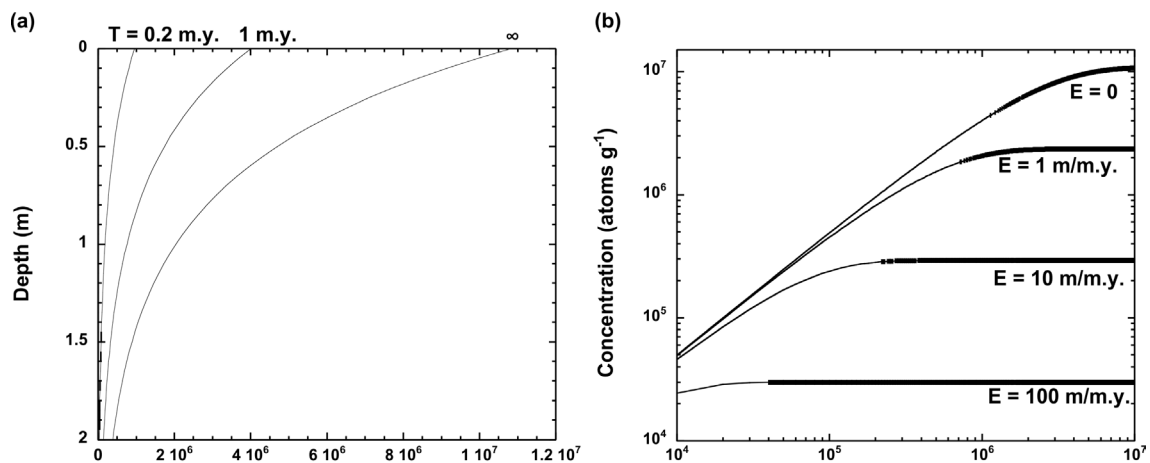


Abb. 2-2: a) Produktion von ¹⁰Be als Funktion der Tiefe für 3 Zeiträume. Die Akkumulationsrate der Isotope ist abhängig von der Intensität kosmischer Strahlung. $t = \infty$ repräsentiert Gleichgewichtsbedingungen zwischen Zerfall und Entstehung; b) Konzentration von ¹⁰Be als Funktion der Zeit für verschiedene Erosionsraten (E). Höhere Erosionsraten führen zu einer früheren Äquilibration von Entstehung und Zerfall des radiogenen Isotops (aus Gallagher 2012).

2.2.2 Lumineszenz-Datierung

Das Phänomen der Lumineszenz basiert auf einem durch ionisierende Strahlung (natürliche Hintergrundstrahlung, z.B. Spuren radioaktiver Elemente in den Mineralen eines Gesteins) hervorgerufenen Signal (gespeicherte Energie), welches sich in dem zu datierenden Mineral (Dosimeter) proportional zur Zeit akkumuliert. Diese Energie wird bei geeigneter Stimulation als Licht (Lumineszenz) wieder abgegeben (Krebetschek 1995, Hilgers 2007).

Grundsätzlich werden die unterschiedlichen Lumineszenz-Techniken nach Art der Stimulation unterschieden. Die Anregung der Lumineszenz kann durch Wärmezufuhr (Thermolumineszenz, TL) oder durch Photonen (optisch stimulierte Lumineszenz, OSL) erfolgen. Geeignete Dosimeter sind, unter anderem auch aufgrund ihres häufigen Vorkommens vor allem Quarz und Feldspat (Schleicher & Geyh 1990, Geyh 2005). Die große Bedeutung der OSL für geomorphologische Fragestellungen besteht in der direkten Datierung von Sedimentationsaltern, bzw. dem Zeitpunkt der lichtdichten Überdeckung des Gesteins. Um die Lumineszenz zur Sedimentdatierung nutzen zu können ist eine Nullstellung der „geomorphologischen Uhr“ notwendig. Im Falle der OSL-Untersuchungen geschieht dies durch Lichtexposition, das sogenannte Bleichen, im Zuge von Transport- und Ablagerungsprozessen. Nach Abdeckung mit weiterem Sediment wird erneut zeitabhängig das OSL-Signal durch die konstant wirkende ionisierende Strahlung aufgebaut. Das aus diesem akkumulierten Signal nach Probenahme datierte Ereignis repräsentiert demnach die Zeit seit der letzten Lichtexposition bzw. Sedimentation (Abb. 2-3) (Prescott & Robertson 1997, Aitken 1998, Wallinga 2002, Hilgers 2007). Der datierbare Altersbereich der OSL-Methodik für Quarz reicht zuverlässig von 0,01 bis > 100 ka, ist jedoch maßgeblich von probenspezifischen Eigenschaften des untersuchten Minerals (Dosimeter) und der Intensität der ionisierenden Strahlung abhängig (Geyh 2005).

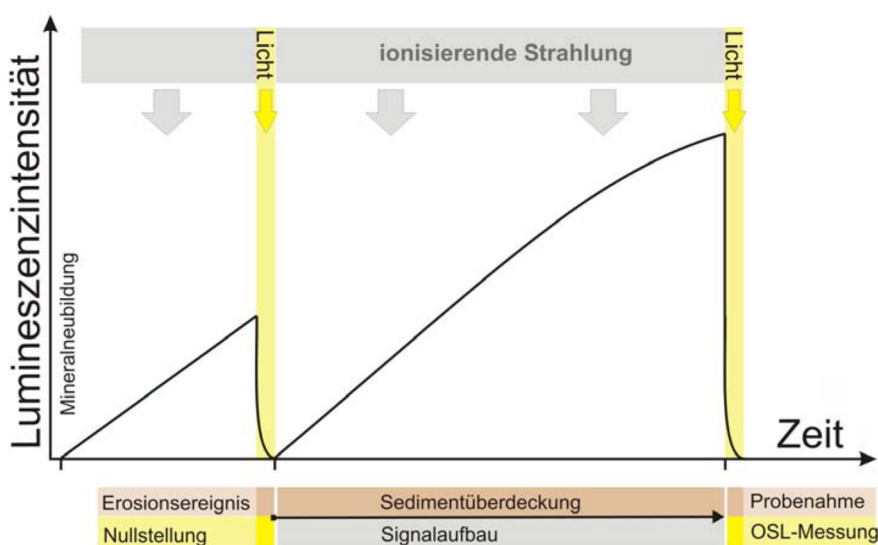


Abb. 2-3: Prinzip der OSL-Datierung (nach Aitken 1998, aus Fuchs 2008).

2.3 Temperatur-Sensitive Methoden

Die gängigsten Temperatur-sensitiven Methoden zur Bestimmung von Exhumation- und Erosion sind die Niedrig-Temperatur Thermochronologie (Spaltspurendatierung, (U-Th)/He-Datierung) und die Ermittlung von Versenkung über die Zeit auf Basis der Vitrinit-Reflexion. Diese finden Anwendung sowohl an Oberflächenproben als auch, abhängig von der Temperatursensitivität der verwendeten Methode, in Tiefenaufschlüssen (z. B. Bohrkernen) bis zu Tiefen von über 6 km.

2.3.1 Niedrig-Temperatur Thermochronologie

2.3.1.1 U-Th/He Thermochronologie

Die (U-Th)/He Datierung beruht auf der Akkumulation von Heliumatomen im Kristallgitter verschiedener Minerale. Die Heliumatome entstehen durch den Alphazerfall der Isotope von U, Th und Sm (siehe z. B. Zeitler 2014).

Aufgrund ihres häufigen Auftretens in verschiedenen Gesteinslithologien sowie des vergleichsweise hohen Gehalts an U und Th, sind die Minerale Apatit und Zirkon die gemeinhin am häufigsten genutzten Minerale für die (U-Th)/He-Datierung. Weitere datierbare Minerale sind u. a. Epidot, Titanit und Fluorit. Die Temperatursensitivität von Zirkon und Apatit, die sogenannte „partielle Retentionszone“ (partial retention zone, PRZ) liegt im Bereich von 180-140°C, beziehungsweise 80-40°C (Abb. 2-4).

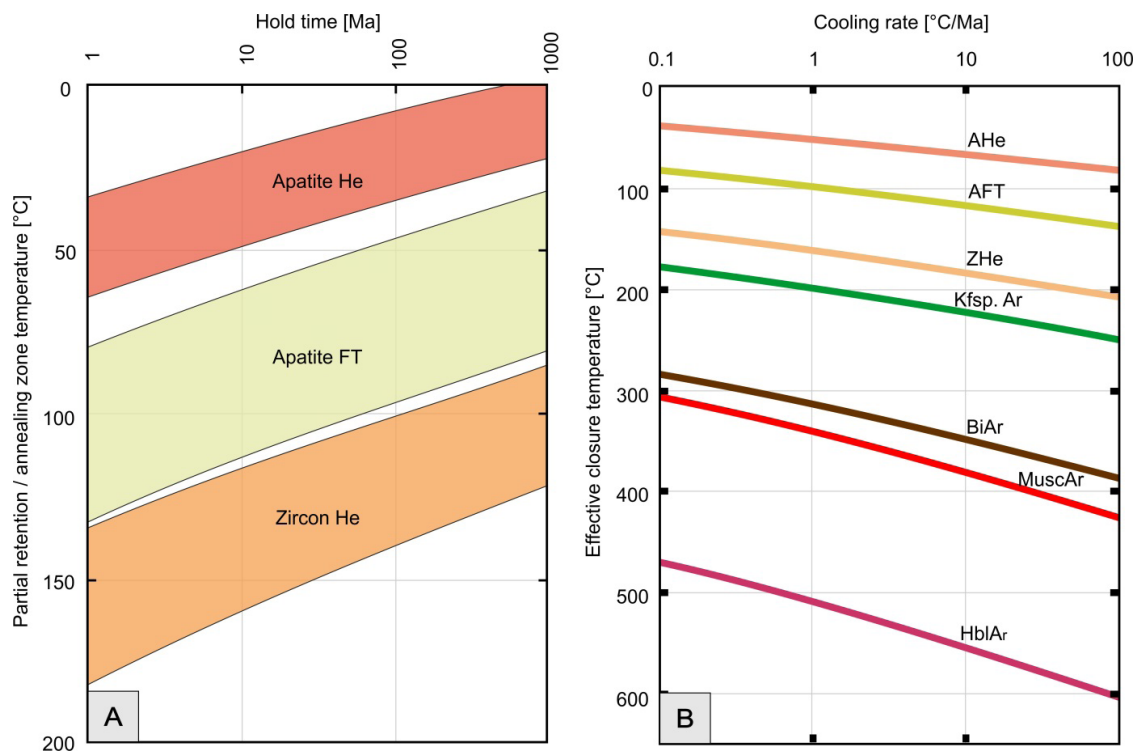


Abb. 2-4: a) Vereinfachte Temperaturbereiche für die Partielle Helium Retentionszone (PRZ) von Apatit und Zirkon, sowie der Partial Annealing Zone (PAZ) für Apatit Spaltspuren. b) effektive Schließungstemperatur verschiedener thermochronologischer Systeme. Die effektive Schließungstemperatur ist dabei eine Funktion der Abkühlungsgeschwindigkeit. AHe = Apatit, Helium, AFT = Apatit Spaltspuren, ZHe = Zirkon, Helium, KFsp = Kalifeldspat, Ar = Argon, Bi = Biotit, Musc. = Muskovit, Hbl. = Hornblende (nach Reiners & Brandon 2006).

In diesem Temperaturbereich nimmt die Diffusion von Heliumatomen aus dem Kristallgitter aufgrund nachlassender thermischer Gitterschwingungen allmählich ab. Als Folge verbleibt ein Teil des Heliums im Kristallgitter und akkumuliert sich dort (→ partial retention zone). Beim Unterschreiten der PRZ-Temperaturen verbleiben die neu entstehenden Heliumatome vollständig im Kristallgitter. Die Akkumulation, bzw. die Retention von Heliumatomen im Kristallgitter eines Minerals ist somit, neben mineralspezifischen Parametern, maßgeblich von der Abkühlungsgeschichte des Wirtsgesteins abhängig und kann somit als Proxy für die Erosions-/Denudationsgeschichte dienen (Abb. 2-5; siehe z. B. Wolf et al. 1996, Wagner & Van den Haute 1992, Green et al. 1986).

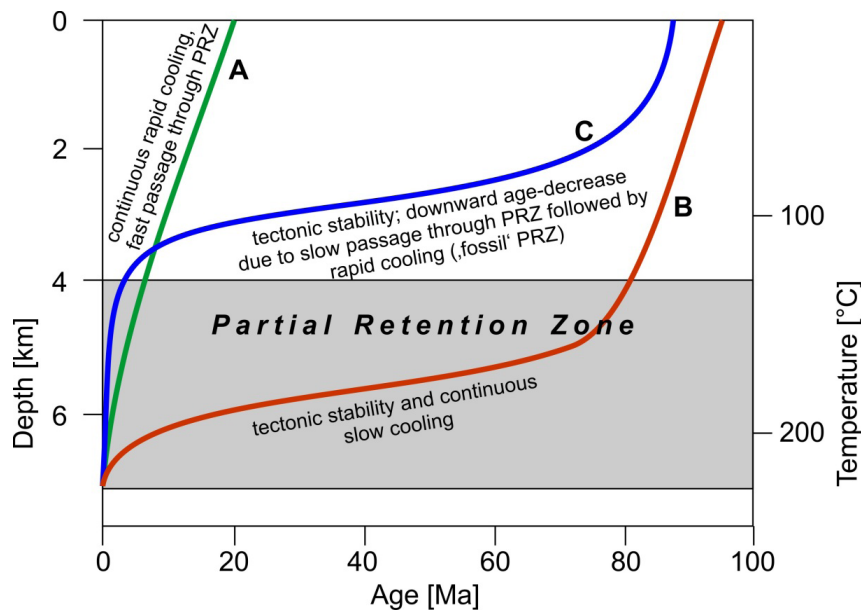


Abb. 2-5: Idealisierte Abkühlungspfade in Abhängigkeit des tektonischen Settings und der Verweildauer im Bereich der partiellen Retentionszone (Braun 2002).

2.3.1.2 Spaltspuren (z. B. Zirkon, Apatit)

Spaltspuren sind lineare Schäden im Kristallgitter welche durch den spontanen Zerfall von ^{238}U entstehen. Die beim Zerfall entstehenden Produkte (größere Ionen) stoßen einander linear ab, wobei sie das umgebende Kristallgitter schädigen und eine lineare Schädigung, die Spaltspur hinterlassen. Der spontane Zerfall von ^{238}U unterliegt üblichen Zerfallsgesetzen, wobei die Anzahl der Spaltspuren der Anzahl der durch Zerfall gebildeten Tochterisotope entspricht. Durch das Zählen der vorhandenen Spaltspuren und Messung des heutigen Urangehalts kann ein Alter des Minerals errechnet werden.

Spaltspuren sind temperaturempfindlich. Ab einer bestimmten Temperatur beginnen sich die Spaltspuren zu verkürzen, ein Vorgang der als „annealing“ (Ausglühen) bezeichnet wird. Dies kann dazu führen, dass die Anzahl der Spaltspuren (bzw. der Tochterisotope) infolge vollständiger Ausheilung abnimmt und somit ein ermitteltes Alter jünger ist als das tatsächliche Alter des Wirtsmaterials. Da der Grad der Verkürzung der Spaltspuren temperaturabhängig ist, kann das ermittelte Alter zusammen mit der statistischen Verteilung der Spaltspurlängen Rückschlüsse auf die Abkühlungsgeschichte des Wirtsgesteins geben.

Der Temperaturbereich über den eine Verkürzung der Spaltspuren zu beobachten ist, wird als „partial annealing zone“ (PAZ) bezeichnet. Für Apatit liegt diese im Bereich von etwa 120-50°C (Abb. 2-4) und somit im Bereich zwischen der Temperatursensibilität der (U-Th)/He-Methode für Apatit und Zirkon (z. B. Gallagher et al. 1998, Vrolijk et al. 1992).

2.3.2 Vitritreflexion

Mit zunehmender Inkohlung wird organisches Material umgewandelt. Eines der Produkte dieser Umwandlung ist Vitrit. Mit zunehmender Temperatur steigt die Reflektivität des Vitrits, welcher somit als Temperaturindikator genutzt werden kann. Die Reflektivität des Vitrits wird unter dem Mikroskop gemessen und als prozentualer Anteil des reflektierten Lichtes (%Ro) am gesamten auf die Vitritoberfläche einfallendem Licht ausgedrückt.

Ein wesentlicher Unterschied zu den zuvor genannten temperatursensitiven Methoden ist, dass die Vitritreflexion lediglich ein Indikator für die maximale Temperatur ist, während Spaltspuren- und (U-Th)/He-Datierungen auch Informationen über die Temperaturvariation über die Zeit liefern können. Dennoch lässt die Vitrit-Reflexion Rückschlüsse auf die "Paläo-Versenkungstiefe" und damit auch auf mögliche Exhumationsbeträge zu.

2.4 Druck-Sensitive Methoden

Die gängigste Druck-sensitive Methode zur Abschätzung von Erosion/Exhumation basiert auf der zunehmenden Reduktion der Porosität eines Sedimentgesteins mit zunehmender Versenkungstiefe. Mit der vereinfachenden Annahme, dass die Abnahme der Porosität eine Funktion der maximalen Versenkungstiefe und irreversibel ist, sind Rückschlüsse auf die "Paläo-Versenkungstiefe" möglich (u. a. Kelly 2010, Menpes 1997). Gelangt das Gestein infolge von Denudation in geringere Tiefen, ist die Porosität infolge der Abtragung der überlagernden Schichten geringer als für diese Tiefe zu erwarten wäre. Ist die Beziehung zwischen Porosität und Tiefe bekannt ist es somit möglich, anhand der beobachteten Porosität auf die maximale Versenkungstiefe zu schließen und somit den Betrag der Denudation/Exhumation einzugrenzen (Abb. 2-6).

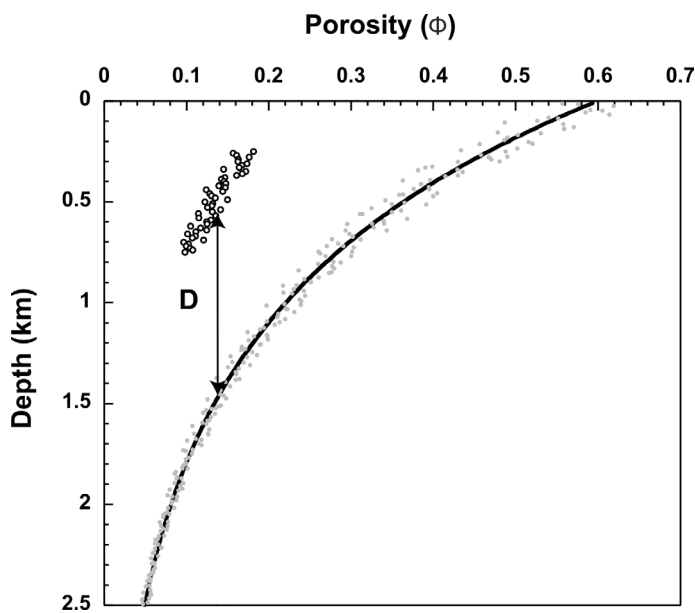


Abb. 2-6: Prinzip der Abschätzung von Denudation/Exhumationsbeträgen basierend auf Porositätsmessungen. Die offenen Kreise repräsentieren eine von Denudation beeinflusste Probe und zeigen ungewöhnlich geringe Porosität für die beobachtete Tiefe. Der Denudationsbetrag (D) kann durch den Vergleich zu gemessenen Porositätswerten einer nicht von Denudation betroffenen Referenzprobe (schwarze Linie) ermittelt werden (aus Gallagher 2012).

2.5 ***Diskussion der Unschärfen und Aussagekraft zur Verfügung stehender Methoden***

Vertikalbewegungen, insb. Hebung der Oberfläche, lokal oder regional, aus geologischen Überlieferungen abzuleiten ist häufig mit vielen Unschärfen behaftet. Meist sind in Regionen langanhaltender Hebung die Sedimente, welche für eine quantitative Analyse dieser Vertikalbewegungen und deren Datierung notwendig wären, großflächig abgetragen (siehe auch Kapitel 3 & 4). Vergangene Ereignisse mit geringen Amplituden der Hebung sind mit heutigen Methoden meist gar nicht erst analytisch bestimmbar. Bei der Herleitung von absoluten Vertikalbewegungen ist auch immer ein bestimmtes Bezugsniveau zu berücksichtigen (Geoid, Meeresspiegel), welches sich über längere Zeiträume ebenfalls ändern kann. Meeresspiegelschwankungen im Quartär waren küstenabschnittsweise teils deutlich größer als 100 m. In Folge änderten sich auch die großräumigen Sedimenttransport- und Ablagerungsmuster, ohne das größere tektonisch induzierte Hebungen erfolgten.

Nur unter seltenen Konstellationen werden datierbare Sedimente (zum Beispiel mit hohem C_{org} -Anteil oder datierbare Fossilien) bei Hebung über den Meeresspiegel langfristig erhalten. Datierungen von Terrassierungen, als auch Analysen von „Störungsstufen“ (fault escarpment) lassen auch dann meist nur Rückschlüsse für die jüngere Vergangenheit zu und/oder nur für eng begrenzte Bereiche.

Das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ zielt insbesondere auf die Ausweisung „großräumiger geogener Hebung“ ab. Abwärts gerichtete Vertikalbewegungen, die Subsidenz in einem Becken oder Graben und die Raten dieser Senkungsbewegungen sind durch den häufigen Erhalt syntektonischer Sedimente meist deutlich besser herzuleiten als Hebung über das Ablagerungsniveau. Aber auch dort sind analytische Unschärfen zum Beispiel bei der Interpretation des Kompaktionsverhaltens von Sedimenten zu berücksichtigen (Warsitzka et al. 2016).

Die Sensitivität der vorgestellten analytischen Methoden basiert u. a. auf der Dauer der Exposition an der Erdoberfläche (Oberflächen-Expositionsdatierung), sich verändernde Temperaturbedingungen während der Exhumation (Thermochronologie) oder sich verändernde Druckbedingungen (Veränderung der Auflast durch Erosion/Subsidenz). Wie zuvor beschrieben, beruhen die Resultate dieser Methoden auf verschiedenen Modellannahmen, wie zum Beispiel die Änderung des thermischen Gradienten über die Zeit. Auch dieser ist, umso weiter man in der Vergangenheit zurückschaut oder in die Zukunft prognostiziert, mit größeren Unschärfen anzugeben. Ebenso ist die Filterung/Reduktion rezent gemessener geodätischer Messreihen auf endogene, klimatische, anthropogene Anteile als auch den Einfluss von Gezeiten und dem Grundwasser meist nicht eindeutig.

Die skizzierten Unschärfen einzelner methodischer Ansätze (Tab. 2-1) legen nahe, dass Aussagen zur zukünftigen Abtragung, und erst recht zu Vertikalbewegungen, stets auf voneinander unabhängigen oder nicht direkt voneinander abhängigen Analysen begründet sein sollten. So sind gleiche/ähnliche Aussagen, die sich sowohl aus stratigrafischen und geomorphologischen Herleitungen, analytischen Datierungsmethoden und geodätischen Vermessungen ergeben, deutlich vertrauenswürdiger als solche die konträr zueinanderstehen. Aufgrund der jeweiligen Einschränkungen der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden und Herleitungen fällt es schwer, für die längerfristige Abschätzung von Vertikalbewegungen oder Abtragung über die Zeit bestimmte Ansätze zu bevorzugen. Aussagen begründet auf Resultaten moderner Analytik sind aufgrund der Quantifizierbarkeit häufig einfacher zu vertreten. Jedoch sollte dabei stets berücksichtigt werden, dass diesen Ergebnissen verschiedene teils stark unterbestimmte Modellannahmen (z. B. zur Wärmeflussentwicklung, zum geothermischen Gradient, zu Diffusionsparametern) zugrunde liegen. Durch die damit einhergehenden Unschärfen ist die Quantifizierbarkeit der Resultate letztlich auch wieder zu relativieren. Aussagen zu endogenen Prozessen auf Basis geodätischer Daten sind in den meisten Fällen auch nur modellbasierte Annahmen und kein direktes Resultat aus Messungen. Da die Ergebnisse analytischer oder fernerkundlicher Verfahren meist schwer ohne weitere Informationen zu interpretieren sind, wird oder sollte für eine schlüssige Interpretation auf endogen verursachte Vertikalbewegungen stets eine Kombination von „klassischen“ geomorphologischen/geologischen Betrachtungsweisen mit modernen analytischen Verfahren angestrebt werden.

Wichtige geowissenschaftliche Disziplinen der vergangenen Dekaden wie Paläontologie, Stratigraphie, Regionalgeologie, die einen Wissensschatz über fast die gesamte phanerozoische Strukturentwicklung aufgebaut haben, sind in den letzten Jahren unter der Fülle an analytischen Studien ein wenig ins Abseits geraten. Große Fortschritte im Verständnis der komplexen Zusammenhänge hinter Vertikalbewegungen der Oberfläche und Lithosphäre werden sich erst mit der Förderung und Fortentwicklung althergebrachter Ansätze sowie der Verknüpfung mit „modernen“ analytischen Ansätzen ergeben.

3 Zusammenfassung großräumiger Vertikalbewegungen und Abtragungseignisse in Deutschland seit dem Mesozoikum

Im folgenden Kapitel wird eine Zusammenfassung der Strukturentwicklung von Mittel- und Westeuropa seit dem Mesozoikum gegeben. Warum aber der Blick soweit zurück in die geologische Vergangenheit, wenn der Prognosezeitraum für das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ nur 1 Million Jahre beträgt? Die Erdkruste Mitteleuropas wird durch eine nicht klar bestimmte Anzahl an Krustensegmenten aufgebaut, die während des Paläozoikum aggregierten. Diese Krustenbildung war mit dem Ende der variszischen Orogenese im Karbon nahezu abgeschlossen. Seit dem Rotliegend ist die mittel- und westeuropäische geologische Strukturentwicklung durch Intraplattentektonik und damit einhergehende Prozesse bestimmt. Der Blick zurück ermöglicht einen Überblick von Vertikalbewegungen und deren Dimension seit dem Rotliegenden und liefert so Hinweise darauf welche Prozesse in so einem Strukturumfeld möglich sind, wie schnell diese ablaufen und was für Auswirkungen diese auf ihr Umfeld haben.

Die Geologie von Deutschland ist in den letzten 250 Mio. Jahren durch eine Vielzahl langlebiger, aber auch kurzphasiger tektonischer Episoden geprägt (u. a. Kley et al. 2008). Hierbei wurde Deutschland die meiste Zeit durch große Beckensysteme und umgebende Plattformgebiete geprägt. Während der mesozoischen Entwicklungsgeschichte lagen in Deutschland sogar überwiegend marine Bedingungen vor. Der Untergrund von Nord- und Teilen Mitteldeutschlands wird durch die Ablagerungen des südlichen Permbeckens (SPB; Teil des zentraleuropäischen Beckensystems) und dessen Randlagen bestimmt. Die höchste Beckensubsidenz ist dabei in N-S gerichteten Gräben innerhalb des Beckens erfolgt. Sowohl im Horn-Graben als auch im Glückstadt-Graben wurden dabei für die Trias teils enorme Absenkungen von mehreren hundert Metern pro Mio. Jahre nachgewiesen (u. a. Warsitzka et al. 2016, Vejbaeck 1990). Nach der beginnenden Grabentektonik entlang des Horn-Graben, Glückstadt-Graben und auch anderen Bereichen des SPB im Unteren bis Mittleren Buntsandstein (Warsitzka et al. 2016, Vejbaeck 1990) ist fast beckenweit ein Erosionsereignis im Übergang von der Hardeggen-Formation zur Solling-Formation (Mittlerer Buntsandstein) belegt. Dabei wurden stellenweise in wenigen hunderttausend Jahren große Mengen Sediment umverteilt und es kam stellenweise zum Abtrag mehrerer 100 m von zuvor abgelagertem Buntsandstein (Röhling 1991).

Im Zuge der Grabentektonik kam es ab der Mittleren Trias auch zu intensiver Salztektonektonik entlang dieser Grabenstrukturen. Die höchsten Subsidenzraten und Exhumierungsraten im Bereich von Salzstrukturen wurden dabei in der oberen Trias erreicht (Warsitzka et al. 2019 & 2016). Warsitzka et al. (2016) diskutieren für einzelne Salzstrukturen im Glückstadt-Graben Subsidenzanomalien für den Mittleren Keuper, welche mehrere hundert Meter pro Mio. Jahre betragen können.

Süddeutschland war während dieser Zeit durch meist langsame bis moderate stetige Sedimentation ohne bedeutende Grabentektonik geprägt. Dadurch wurden in diesen sich entwickelnden flachen Becken und Plattformgebieten deutlich geringere Subsidenzraten erreicht als im Zentralteil des südlichen Permbeckens.

Hochlagen/ Abtragungsgebiete an den Rändern des SPB (Rynköbing Fyn Hoch, Böhmisches Masse, Vindelizische Masse, London-Brabant Massif, möglicherweise partiell Rheinische Masse) treten dann erst deutlich zum Ende der Trias hervor (Beutler et al. 2012, Barnasch 2009, Franz 2008, Ziegler 1990) und sind wie die Hebung von Fennoscandia im Norden während der oberen Trias durch klastischen Eintrag nachzuweisen (u. a. Paul et al. 2009). Für die Böhmisches Masse nimmt man jedoch auch schon eine längere Exhumierungsgeschichte und eine wichtige Rolle als Liefergebiet für den Buntsandstein im norddeutschen Becken (z. B. Puff & Radzinski 2014) an. In der weiteren Entwicklung ändern sich häufig die Ausdehnungen und Ausprägungen von Hochlagen, Plattformbereichen und Subsidenzzentren. Jedoch sind insbesondere der Großteil der Böhmisches und der Rheinischen Masse, aber auch das London-Brabant Massif, möglicherweise schon seit der späten Trias, jedoch spätestens ab dem Jura, nahezu stetig Abtragungsgebiete (Ziegler 1990). Die wenigen spät-paläozoischen und mesozoischen reliktschen Vorkommen in diesen Regionen und angrenzenden Gebieten (Malkovský 1987, Schröder et al. 1997) und Erkenntnisse aus geowissenschaftlichen Datierungsmethoden (z. B. Apatit-Spaltspuren) geben jedoch keine Hinweise auf starke Hebungstendenzen bis zur Kreide (Beyer 2015, Lange et al. 2008). So ist in diesem Zeitraum für diese Hochlagen von eher geringen Hebungsraten von Zehnermetern bis vielleicht episodisch über 100 m pro Mio. Jahre auszugehen. Die vermutlich geringen Vertikalbewegungsraten können mit Hilfe moderner Analysemethoden nur qualitativ abgeschätzt, nicht aber quantitativ bestimmt werden. Zumindest schienen aber schon seit dem frühen Mesozoikum langlebige Hebungsprozesse und isostatische Ausgleichs entlang der Ränder des SPB zu wirken, die im Wechselspiel mit der Abtragung des anstehenden Gebirges standen (u. a. Lange et al. 2008, Glasmacher et al. 2002). Vom Mitteljura bis in die Unterkreide ist für Norddeutschland und die Deutsche Nordsee eine weitere wichtige tektonische Phase festzuhalten. Insbesondere entlang der Südränder des SPB kam es zu intensiver Grabenbildung während des Malm und der Unterkreide, wodurch sich das Niedersachsen-Becken herausbildete. Damit verbunden war auch eine erneute Intensivierung der Salztektunik (Warsitzka et al. 2019). Subsidenzraten wie während der Herausbildung von Horn-Graben und Glückstadt-Graben während der Trias wurden dabei wahrscheinlich nicht mehr erreicht (Warsitzka et al. 2019, Bruns et al. 2013, Vejbaek 1990). Etwa gleichzeitig zum Rifting im südlichen Niedersachsen und angrenzenden Gebieten ist in der äußeren deutschen Nordsee mit dem Zentral-Graben und an der Sorgenfrei-Tornquist-Zone nördlich der deutschen Ostsee ebenfalls

verstärkte Riftingaktivität zu verzeichnen. Im Zentral-Graben ist die erneute Riftingaktivität ebenfalls mit intensiver Salztektunik gekoppelt. Hohe Mächtigkeiten von Oberjura in Randsenken von Diapiren lassen auch hier auf höhere Subsidenzraten schließen (u. a. van Winden et al. 2018). Während des Rifting des Zentral-Graben (ca. mittlerer bis oberer Jura) kam es gleichzeitig im Bereich der nördlichen Nordsee zur Herausbildung einer größeren thermischen Domstruktur (u. a. Graversen 2006, Evans et al. 2003, Underhill & Partington 1993) mit einem weitgreifenden Einfluss auf Sedimentation und Erosion im gesamten Bereich der Nordsee. Durch die Bildung des Nordseedoms kam es auch zur großflächigen Hebung und Erosion im Bereich der deutschen Nordsee (u. a. Kockel 1995). Dieses damalige thermische Ereignis bestimmte die Erosion und Hebung für ein Gebiet mit der vielfachen Größe (deutlich größer als das deutsche Hoheitsgebiet) der vulkanisch geprägten Eifel. Mechanismen zur Herausbildung dieser Anomalie und die daraus entstandene Dimension der Vertikalbewegungen (vermutlich bis zu 2 km Abtragung im Zentrum über einen Zeitraum < 30 Mio. Jahre) und großflächigen Abtragung werden u. a. in Graversen (2006) und Underhill & Partington (1993) aufgezeigt.

Für Süddeutschland ist mit der Ablagerung überwiegend mariner Sedimente ab dem Jura und bis zu der Herausbildung der Alpen im Tertiär eine stetige Zunahme des Einflusses der Tethys zu beobachten. Auch während dieses Zeitabschnitts zeigt sich Süddeutschland im Vergleich zu den Gebieten Nord- und Mitteldeutschlands als tektonisch ruhiger.

Eine massive Änderung in dieser langlebigen, auf die Zeitmaßstäbe gemittelt fast monotonen, Intraplatten-Becken/Plattform-Historie erfolgte mit einem global nachzuweisenden Wechsel im plattentektonischen Rahmen (Matthews et al. 2012) während/mit Beginn der Oberkreide. Große Bereiche des südlichen Permbecken, insbesondere die Abschnitte, die während des Oberjura und der Unterkreide große Absenkung erfahren haben, wurden während der Oberkreide invertiert. Es bildeten sich jedoch auch neue Sockelaufschiebungen heraus (u. a. Harz-Nordrandstörung, Gardelegen-Störung, Haldensleben-Störung). Teils wurden vermutlich abschnittsweise ältere permokarbone, oder im Fall der Lausitz-Überschiebung jurassisch-kretazische (Voigt 2009), Vorzeichnungen als Aufschiebung reaktiviert. Diese Hebungsstrukturen sind insbesondere im Süden des südlichen Permbecken zu finden. Aber auch im Nordosten entlang des Grimmener Walls (nördliches Mecklenburg-Vorpommern) und noch weiter nördlich, entlang des Sorgenfrei-Tornquist Störungssystems, kam es zur Strukturinversion und Heraushebung von ehemaligen Becken und Grabenbereichen. Kley & Voigt (2008) rechnen diese Intraplatteneinengungstektonik einer Fernwirkung der Konvergenz von Afrika, Iberia und Europa zu. Frühere Vorstellungen (u. a. Ziegler 1987) gingen noch davon aus, dass diese Einengungs- und Hebungsphase einer frühen Entwicklung des Alpenorogens zuzuordnen ist und nicht im Zusammenhang mit der

Herausbildung der Pyrenäen steht. Jedoch stellen Kley & Voigt (2008) auch heraus, dass diese Vorstellung nicht mit neueren Erkenntnissen zum plattentektonischen Rahmen und der sedimentären Überlieferung im Einklang stehen und somit nicht der Grund für die in der Oberkreide über fast das ganze zentraleuropäische Beckensystem nahezu gleichförmige NNE-NE orientierte Einengungstektonik sein kann. Die Zeitlichkeit des Hebungspulses und die Denudation (flächige Abtragung) ist für eine Vielzahl an Strukturen entlang des Beckens datiert (u. a. von Eynatten et al. 2019, Thomson & Zeh 2000). Dabei ist festzuhalten, dass der überwiegende Anteil des heute festzustellenden Abtrages des mesozoischen und von Teilen des paläozoischen Deckgebirges während der Oberkreide stattfand. Der Harz und andere Sockelhochlagen zeigen dabei die größte Hebung und Abtragung. Für den Harz wird von einer Denudation von über 5000 m in der Oberkreide ausgegangen (von Eynatten et al. 2019, Voigt et al. 2004), davon der überwiegende Anteil vom Mittel-Santon bis ins frühe Campan. Von Eynatten et al. (2008) belegen durch Provenienzzanalysen das der Abtrag des mesozoischen Deckgebirges bis zum frühen Campan wahrscheinlich abgeschlossen war. Der Harz als die oberkretazische Einengungsstruktur mit der wahrscheinlich größten Hebung/Abtragung zeigt maximale gemittelte Abtragungsraten von ca. 1000 m pro Mio. Jahre für diesen Zeitabschnitt (von Eynatten et al. 2008, Voigt et al. 2004). Maximale mittlere Exhumierungsraten sind mit 0,53 mm/a auch für das invertierte Niedersachsenbecken modelliert (Senglaub et al. 2006). Es ist natürlich nicht vollends auszuschließen, dass zeitweise deutlich schnellere Vertikalbewegungen stattfanden. Für die Gesamtheit aller oberkretazischen Hebungsstrukturen im Becken wird eine Aktivität vom Turon/Coniac bis ins frühe Paläozän angegeben (u. a. Kley & Voigt 2008). Es ist daher anzunehmen, dass die einzelnen Strukturen über das zentraleuropäische Becken verteilt in dieser Zeitspanne, von ca. 30 Mio. Jahre, im Detail unterschiedliche Hauptaktivitätsphasen besitzen, wobei ein Maximum der Einengungstektonik für das Campan festzuhalten ist (u. a. Kley 2018, de Jager 2003). Malz et al. (2014) geben für die gesamte oberkretazische Einengung mittlere horizontale Verkürzungsraten von 0,75 - 1 mm/a an. Bei einer angenommenen Aufschiebung von 45° Einfallen entspricht das in etwa auch der resultierenden Hebung. Kein tektonisches Ereignis des Mesozoikums von Deutschland konnte eine ähnliche Signifikanz in Bezug auf Hebung und Abtragung entwickeln und bis auf die Herausbildung der Alpen hat diese tektonische Episode auch kein Gleichnis in der folgenden känozoischen Strukturentwicklung.

Im Zusammenhang mit der starken lokalen/regionalen Hebung entlang einiger Strukturen, insbesondere in Mitteleuropa, während der Oberkreide, erfolgte auch eine starke Abtragung des Deckgebirges. Mit Beginn des Känozoikums war durch diese intensive Abtragung entlang der Sockelhochlagen vermutlich nur noch ein Restrelief erhalten. Doornenbal & Stevenson (2010) illustrieren mit mehreren Paläokarten die weitere känozoische Hebungs- und Senkungsgeschichte im Detail. Abbildung 3-1 & 3-2 zeigen Gebiete mit Subsidenz und Hebung nach Doornenbal & Stevenson (2010) für Mittel- und Westeuropa zur Zeit des Paläogen und Neogen.

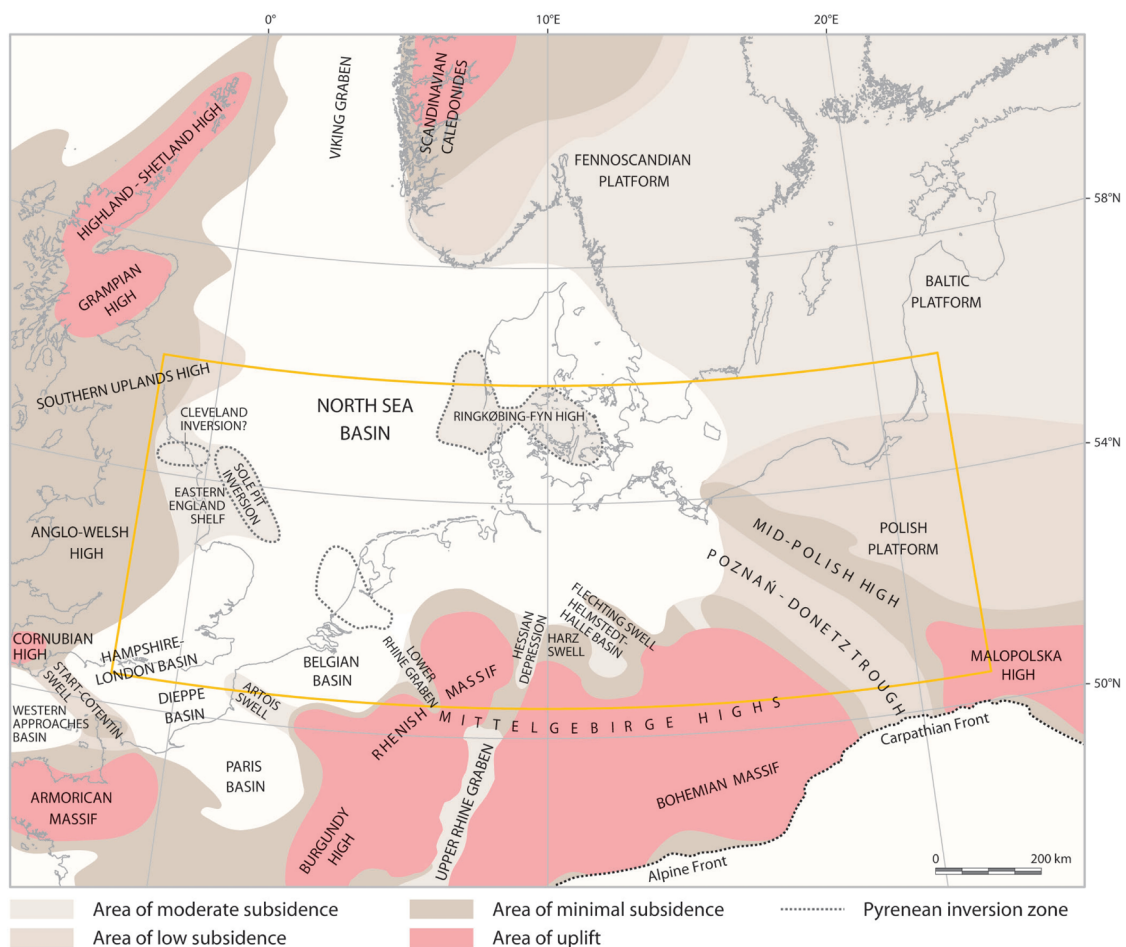


Abb. 3-1: Übersicht der Hebungs- und Senkungsgebiete in Mittel- und Westeuropa während des frühen Känozoikum (Paläogen) nach Doornenbal & Stevenson (2010).

Für das Känozoikum werden verschiedene Phasen regionaler Hebung postuliert (u. a. Kley 2018, King 2006, Huuse 2002): Paläozän bis frühes Eozän, spätes Eozän bis Oligozän, Mittelmiozän. Ab dem Miozän wird zudem eine beschleunigte Hebung von Skandinavien beobachtet (u. a. Japsen et al. 2018). In Doornenbal & Stevenson (2010) wird (in chapter 12 (Cenozoic)) anhand von 12 paläogeografischen Karten die Entwicklung vom Paläozän bis ins Quartär dargestellt. Danach scheint der Großteil von Deutschland bis ins Eozän durch Abtragung charakterisiert zu sein.

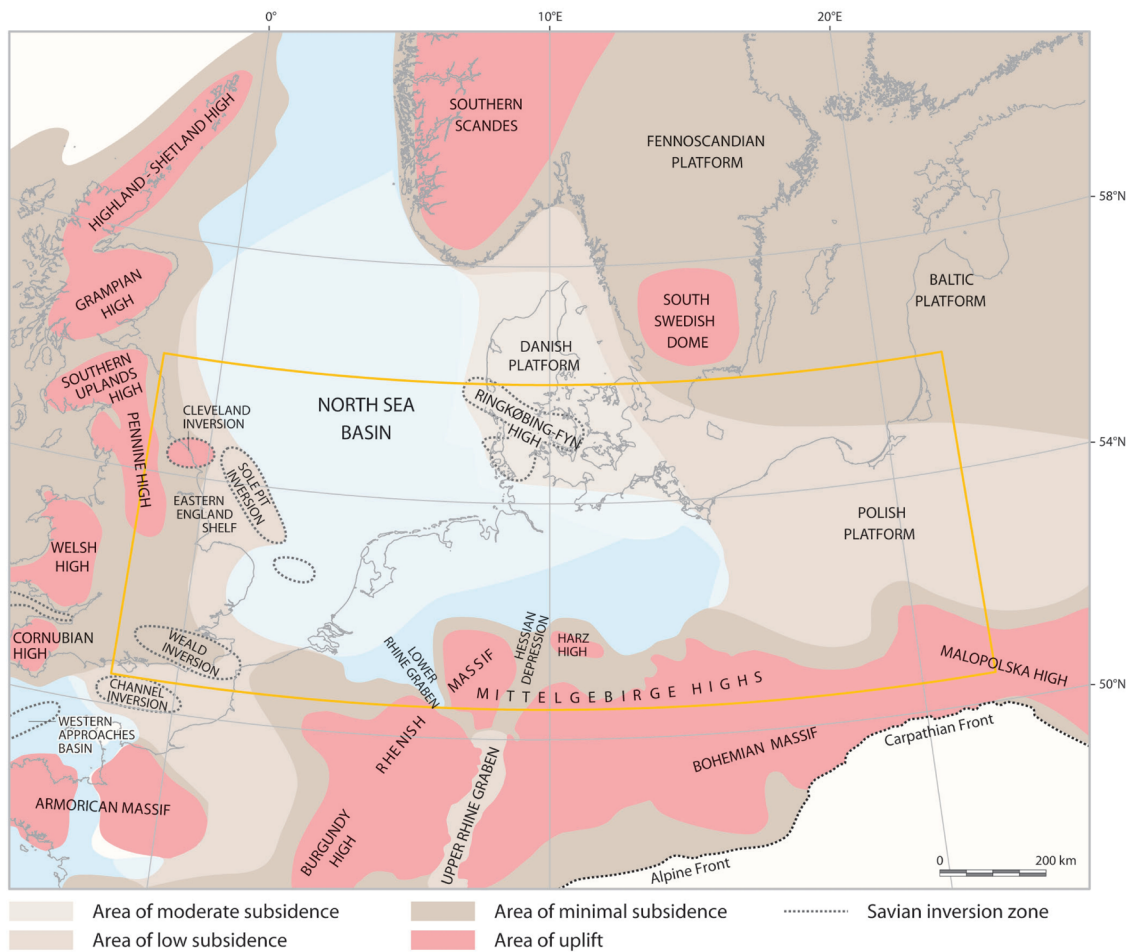


Abb. 3-2: Übersicht der Hebungs- und Senkungsgebiete in Mittel- und Westeuropa während des Neogen und entsprechende Strukturelemente aus Doornenbal & Stevenson (2010).

Durch eine Transgression und vermutlich eine Abnahme der großflächigen Hebungsbewegungen wurden marine Sedimente eozänen bis oligozänen Alters bis auf Höhe Mitteldeutschlands abgelagert. Ebenfalls entwickelte sich seit dem Eozän ein marines Vorlandbecken (heutiges Molassebecken) nördlich der Alpenfront, welches zum späten Oligozän hin allmählich von einer tiefer marinen Fazies in flachmarine Verhältnisse überging. Im Miozän verlandet das Molassebecken allmählich und füllt sich ab diesen Zeitpunkt mit Abtragungsprodukten der sich hebenden Alpen. Für Mitteldeutschland und Norddeutschland ist vom späten Oligozän bis ins Pliozän ebenfalls eine erneute Verlandung zu beobachten. Dabei lässt sich aus Karten in Doornenbal & Stevenson (2010) deuten, dass sich die Faziesräume vom späten Oligozän bis ins mittlere Miozän nur langsam verschoben haben und erst zwischen mittleren Miozän und frühen Pliozän terrestrische Sedimente marine Ablagerungen für Norddeutschland und die Küstenregion verdrängen. Ab diesem Zeitpunkt spielt auch fluvialer Sedimenttransport eine ganz bedeutende Rolle. Der größte Teil der heutigen Flusstäler Deutschlands sind in ihrer Entstehung vermutlich auf pliozäne bis quartäre Alter zu datieren. Somit ist auch der Großteil der Hebung der

Mittelgebirge Mitteldeutschlands auf einen Zeitraum von mehr als 20 Mio. Jahren vom Miozän bis Pliozän einzuschränken. Zeitlich genauer lassen sich die Hebungen der Mittelgebirge jedoch nur schlecht einschränken. Jedoch gibt es keine Anzeichen dafür, dass Hebungsraten entsprechend des Oberkreideereignis auch nur ansatzweise erreicht wurden. Die Hebung ist vermutlich auf andere Prozesse als während der Oberkreide zurückzuführen. So waren die größten Vertikalbewegungen während der Oberkreide klar durch Bewegungen entlang größerer Störungen dominiert und daher auf kleinere Gebiete beschränkt. Dieser Hebung entlang größerer Störungen war eine großflächige Hebung deutlich geringerer Amplitude unterlagert, wodurch auch Gebiete wie das Thüringer Becken und das hessische Bergland während der Oberkreide flächig bis auf die Trias abgetragen wurden. Die neogene Hebung Mitteldeutschlands scheint dagegen anderen Mustern zu folgen (u. a. Meier et al. 2016) und ist vermutlich, auch wenn große Überschneidungen zu Hebungsregionen der Oberkreide bestehen, auf andere Prozesse zurückzuführen. Für die Eifel wird im Vergleich zum Rest von Mitteldeutschland von einigen Autoren eine verstärkte Hebung im Quartär angenommen. So geben Garcia-Castellanos et al. (2000) für die letzten 800 ka eine Hebung von bis zu 250 m für die Eifel an.

4 Ursachen für großräumige Vertikalbewegungen (in Deutschland)

Die Vertikalbewegungen der Oberfläche aber auch die des Untergrundes sind das Resultat aus einem Zusammenspiel einer Vielzahl an exogenen und endogenen Prozessen. Deswegen ist für das Verständnis dieser Bewegungen ein breites Grundwissen in der Geomorphologie, Geologie und Geodynamik notwendig. Im folgenden Unterkapitel erfolgt zunächst eine kurze Erläuterung der in dieser Studie vorgenommenen Kompilation. Prozesse, die zu Vertikalbewegungen führen, sind mit Angabe ausgewählter Parameter in einer Tabelle kompiliert dargestellt und es wird auf Literatur verwiesen, die diese Prozesse für Mitteleuropa postuliert oder diese grundlegend beschreibt. Da insbesondere paläogene bis rezente Vorgänge für die heutige Topografie Deutschlands verantwortlich sind, wird weiterführende Literatur zu känozoischen Vertikalbewegungen und zugrundeliegenden Prozessen nach Regionen unterteilt kurz vorgestellt.

4.1 *Kompilation von Prozessen mit Einfluss auf Vertikalbewegungen*

Eine Vielzahl verschiedener Prozesse endogenen und exogenen Ursprungs können Einfluss auf das Hebungs- und Senkungsverhalten der Erdoberfläche und Lithosphäre nehmen (Tab. 4-1). Dabei kommt es meist zur Überlagerung verschiedener, teils gegenläufiger Prozesse. Eine Bewertung des Anteils einzelner Prozesse an der Gesamthebung/-senkung über die Zeit ist daher meist nur qualitativ möglich.

Tab. 4-1: Tabellarische Zusammenfassung von Prozessen die zu Vertikalbewegungen führen können, insb. zu Hebung. Mögliche maximale Hebungsamplituden (Spalte a), Ausdehnungen von Strukturen (Spalte b) und mögliche Prozessgeschwindigkeiten (Spalte c) sind aus einer Kompilation von Publikationen entnommen/ abgeschätzt. Weiterhin ist basierend auf einer Literaturrecherche das Potenzial des jeweiligen Prozesses abgeschätzt, Hebungsbeträge entsprechend des Ausschlusskriteriums zu erreichen (Spalte d & e). Spalte „f“ zeigt ob dieser Prozess Relevanz für die Hebung in Deutschland seit dem Neogen besitzt. Eine Legende zur Tabelle ist folgend über die Gesamtdauer der Hebung beigefügt. Mit „Hebung“ (uplift) wird in dieser Tabelle, wie auch in den meisten Prozessbeschreibungen die Gesteinshebung gemeint.

Spalte	a	b	c	d	e	f
Prozess	mögl. max. Amplitude (vertikal)	Wellenlänge	Geschwindigkeitspotenzial des Prozesses	Sind 1000 m / Mio. Jahre Hebung für diesen jeweiligen Prozess im globalen Vergleich vorstellbar?	Ist Hebung von 1000 m / Mio. Jahre mit dem jeweiligen Prozess alleine im rezenten plattentektonischen Rahmen für Deutschland vorstellbar?	Relevanz für Neogen bis Heute für DTL?
bruchhafte Verformung und Faltung der Lithosphäre						
Über-/Aufschiebung	++	~	+ bis ++	(I)	(I)	(I)
Transpression	+ bis ++	~	+ bis ++	(I)	(I)	(I)
Faltung	~ bis +?	~	~ bis +	(II)	(II)	(I)
lithosphärische & gekoppelte Faltung	+	+	~ bis +?	?	(III)	(II)
krustale Faltung	+	~? bis +	~ bis +?	?	(II)	(II)
Salzverteilung in Sedimentbecken						
regionale Salzverteilung	~	~ bis +	~ bis +	(II)	(II)	(II)
Salzaufstieg in Salzdiapiren	~ bis +?	~	+ bis +++?	(I)	(I)	(I)
Konvektion des Mantels, thermische & Umwandlungsprozesse						
Mächtigerkeitsreduktion der Mantellithosphäre durch thermische Erosion	+ bis +++?	+	- bis ~?	(III)	(III)	(II)
Mächtigerkeitsreduktion der Mantellithosphäre durch Delamination	+ bis +++?	+	+ bis +++?	(II)	(II)	(II)
dynamische Topografie	+	++	- bis +?	(II)	(II)	(I)
Asymmetrie im Rifting mit Einfluß auf Asthenosphärenfluss	+	++	- bis ~?	(II)	(II)	(II)
Mantelplume (siehe auch dynamische Topografie)	+	+ bis ++	- bis ~?	(II)	(I)	(I)
Krustenverdickung (einzelne Prozesse können in mehreren tect. Regimes wirken)						
Subduktions-Erosion	+ bis +++?	+	- bis +?	(III)	(III)	(III)
Überschiebungstektonik / tektonische Verkürzung	++	~ bis +	+ bis ++	(I)	(I)	(I)
Akkretion subkrustal (an aktiven Plattengrenzen)	+ bis +++?	+ bis +++?	~ bis +?	?	(III)	(III)
magmatisches underplating / Intrusion	+ bis +++?	+ bis +++?	~ bis +?	(II)	(II)	(II)
Hydratisierung des Mantels (Subduktion)	+?	+++	- bis +?	(III)	(III)	(III)
Fließen der Unterkruste	+	+ bis +++?	~ bis +?	(II)	(III)	(II)
Rifting bezogene Mechanismen						
Riftschulterhebung durch mechanische Entlastung der Lithosphäre / footwall unloading	+	+	~ bis +?	(II)	(II)	(II)
Riftschulterhebung durch thermische & geodynamische Effekte	+	+	~ bis +?	(II)	(III)	(II)
ausschließlich subduktionsbezogene Mechanismen						
slab break-off	++	+ bis +++?	+ bis ++	(I)	(I)	(II)
Subduktion von aseismischen Rücken (auch andere Anomalien in der subduzierenden Platte)	++	+ bis +++?	+ bis ++	(I)	(II)	(III)
Stauchung der überfahrenden verdickten Lithosphärenplatte	+ bis +++?	+	+	(II)	(III)	(III)
lithosphärische Flexur der Unterplatte	~ bis +?	+	- bis ~?	(III)	(III)	(III)
exogene Mechanismen						
glaziale Isostasie	~ bis +	+ bis ++	+ bis ++	(III)	(II)	(I)
Meeresspiegelschwankung	~ bis +?	++	+ bis ++	(III)	(III)	(III)
Denudation / Erosion	+ bis +++?	+ bis +++?	- bis ++	(I)	(I)	(I)

Legende zur Tabelle endogene(exogene) Ursachen für Vertikalbewegungen mit Fokus auf Hebung

- Spalte a: ~ = wenige m Hebung/Senkung + = wenige 100 m bis 2 km ++ = > 2 km ? = unsicher, unwahrscheinlicher
 Spalte b: ~ = 0 bis wenige 10er km + = 10er km bis 100erte km ++ = 100erte km bis > 1000 km ? = unsicher, unwahrscheinlicher
 Spalte c: - = langsam (< 0,1 mm im Jahresmittel) ~ = mittel + = schnell ++ = sehr schnell (mehrere mm im Jahresmittel) ? = unsicher, unwahrscheinlicher
 Spalte d: grün (I) = ja gelb (II) = mit Einschränkungen / eher unwahrscheinlich rot (III) = nein / ? = unsicher
 Spalte e: grün (I) = ja/ohne Einschränkungen im heutigen plattentektonischen Rahmen für DTL möglich gelb (II) = mit Einschränkungen / eher unwahrscheinlich / für Regionen nicht vollends auszuschließen rot (III) = unwahrscheinlich / aufgrund möglicher max. Prozessgeschwindigkeiten und anderer Einschränkungen
 Spalte f: grün (I) = ja/Relevanz gelb (II) = theoretisches Konzept konkurrierend zu Anderen / für einzelne Regionen nicht ausschließbar rot (III) = keine Relevanz / nicht plausibel für DTL

Tab. 4-2: Ausgewählte Literaturzitate zu den in Tab. 4-1 aufgelisteten Prozessen. Tabellarische Auflistung von Prozessen die zu Vertikalbewegungen führen können, insb. zu Hebung. Die jeweiligen Prozesse sind nach ihrem Wirken in bestimmten tektonischen Regimen oder bezogen auf verschiedene tektonische Stockwerke (Mantel, Asthenosphäre, Lithosphäre, Kruste, Oberkruste/Sedimenthülle) gruppiert. Die Benennung der Prozesse in Englisch sprachiger Fachliteratur und ausgewählte Literaturzitate sind ebenfalls mit aufgeführt.

Prozess	Englische Nomenklatur	Ausgewählte Literaturzitate
bruchhafte Verformung und Faltung der Lithosphäre		
Über-/Aufschiebung	thrust tectonics	Caër et al. (2018), McPhee et al. (2018), Malz et al. (2015), Fossen (2010), Giambiagi et al. (2009), McClay (1992)
Transpression	transpression	Rotstein & Schaming (2011), Fossen (2010), Dewey et al. (1998), Linzer et al. (1995)
Faltung	folding related to thrust tectonics	Brandes & Tanner (2014), Fossen (2010), Boyer (1986)
lithosphärische & gekoppelte Faltung	lithosphere/ coupled folding	Bourgeois et al. (2007), Cloetingh & Van Wees (2005), Marotta et al. (2000), Cloetingh (1999)
krustale Faltung	crustal folding	Bourgeois et al. (2007), Cloetingh & Van Wees (2005), Marotta et al. (2000), Cloetingh (1999)
Salzverteilung in Sedimentbecken		
regionale Salzverteilung	salt redistribution	Warsitzka et al. (2019), Jackson & Hudec (2017), Warsitzka et al. (2016)
Salzaufstieg in Salzdiapiren	salt dome uplift	Jackson & Hudec (2017), Harding & Huuse (2015), Brewer & Kenyon (1996),
Konvektion des Mantels, thermische & Umwandlungsprozess		
Mächtigerkeitsreduktion der Mantellithosphäre durch thermische Erosion	thermal erosion	Guex et al. (2016), Roberts & Bally (2012), Lorenzo & Vera (1992)
Mächtigerkeitsreduktion der Mantellithosphäre durch Delamination	delamination	Krystopowicz & Currie (2013), Chalot-Prat & Girbacea (2000), Schott & Schmeiling (1998), Kay & Mahburg Kay (1993)
dynamische Topografie	dynamic topography	Osei Tutu et al. (2018), Flament et al. (2013), Braun et al. (2013), Heine et al. (2008), Meyer & Foulger (2007)
Asymmetrie im Rifting mit Einfluss auf den Asthenosphärenfluss	depleted MOR-asthenosphere shifted beneath continents because of net rotation of the lithosphere	Carminati et al. (2009), Doglioni et al. (2003)
asthenosphärisches Diapir Modell (siehe auch mantle plume)	asthenospheric diapir, hot mantle "fingers" from Iceland plume	Pascal & Oleson (2009), Rohrmann & van der Beek (1996)
Mantel-Plume (siehe auch dynamische Topografie)	mantle plume	Tan et al. (2018), Barth et al. (2007), Meyer & Foulger (2007), Guillou-Frotier et al. (2007), Ritter et al. (2001), Granet et al. (1995)
Krustenverdickung (einzelne Prozesse können in mehreren tekt. Regimen wirken)		
Subduktions-Erosion	subduction erosion	Stern (2011), von Huene et al. (2004), Giese et al. (1999)
Überschiebungstektonik / tektonische Verkürzung	thrust tectonics	Caër et al. (2018), McPhee et al. (2018), Malz et al. (2015), Fossen (2010), Giambiagi et al. (2009), McClay (1992)
Akkretion subkrustal (an aktiven Plattengrenzen)	sub-crustal accretion	Theissen-Krah et al. (2016), Giese et al. (1999), Kazmin & Byakov (2000), Kimura et al. (1993)
magmatisches underplating / Intrusion	magmatic underplating / intrusion	Karlstrom et al. (2014), Thybo & Artemieva (2013), Giese et al. (1999), Cox et al. (1993)
Hydratisierung des Mantels (Subduktion)	hydration of mantle	Gerya & Yuen (2003), Giese et al. (1999), Peacock (1993), DeVore (1983)
Fließen der Unterkruste	Lower crustal flow	Li et al. (2018), Westaway (2017), Clark et al. (2005)
Rifting bezogene Mechanismen		
Riftschulterhebung durch mechanische Entlastung der Lithosphäre / Legend-Blocks	flexural uplift of rift flanks due to mechanical unloading /footwall unloading	van Balen et al. (1995), Judson May et al. (1994), Chéry et al. (1992), Weissel & Karner (1989), Fitzgerald et al. (1986)
Riftschulterhebung durch thermische & geodynamische Effekte	uplift due to thermal processes or geodynamic effects (e.g. buoyancy forces)	Graversen (2006), Chéry et al. (1992), Buck (1986), Mareschal (1983)
Ausschließlich subduktionsbezogene Mechanismen		
Abreißen eines Teils der subduzierenden Platte	slab break-off	Kästle et al. (2019), Vissers et al. (2016), Schildgen et al. (2012), Buiter (2000)
Subduktion von aseismischen Rücken (auch andere Anomalien in der subduzierenden Platte)	uplift of overriding plate due to subduction of aseismic ridges and seamounts	Flórez-Rodríguez et al. (2019), Schildgen et al. (2012), Watts et al. (2010)
Stauchung der überfahrenden verdickten Lithosphärenplatte	buckling of a thick continental lithosphere	Doglioni et al. (1994)
lithosphärische Flexur der Unterplatte	lithospheric flexure of the subducting plate	Contreras-Reyes & Garay (2017), Husson et al. (2012), Andeweg & Cloetingh (1998)
Exogene Mechanismen		
glaziale Isostasie	glacial isostasy	Müller et al. (2012), Steffen & Wu (2011), Ekman & Mäkinen (1996)
Meeresspiegelschwankung	sea-level oscillation	Pedoja et al. (2014), Flowers et al. (2012), Seibold & Seibold (2012), Rennie & Hansom (2011), Müller et al. (2008)
Denudation / Erosion	denudation / erosion	Sternai et al. (2019), Medvedev et al. (2008), Wittmann et al. (2007)

Die hier gemachte Aufzählung von Prozessen (Tab. 4-1 & 4-2) erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Jedoch sind die in der Literatur am häufigsten postulierten Prozesse aufgeführt, die im Einklang mit der modernen Theorie der Plattentektonik/Intraplattentektonik stehen (u. a. Fossen 2010, van der Pluijm & Marshak 2004). Ähnliche Kompilierungen (u. a. Kley 2018, Arfai et al. 2018, Giese et al. 1999) bildeten dabei die Grundlage für Tabelle 4-1. Bis auf wenige Referenzen (u. a. Cloetingh et al. 1999), die auch den Impact auf die Topografie beschreiben, sind die in Tabelle 4-1 gemachten Aussagen zu Prozessen nicht direkt aus einzelnen Publikationen ablesbar und sind daher aus einer Kompilation qualitativer Beschreibungen zu Prozessen abgeschätzt. Es wird darauf hingewiesen, dass einige der aufgeführten Prozesse in Gänze oder für Regionen noch kontrovers diskutiert werden. Da Hebungen der Oberfläche und Kruste häufig auch im Zusammenhang mit Subsidenz im Umfeld stehen, sogar teils auf den gleichen Prozess zurückzuführen sind, werden in Tabelle 4-1 auch Prozesse dargestellt die gleichzeitig andernorts zu Subsidenz führen können (u. a. Artemieva 2007, Cloetingh et al. 1999).

Vorstellungen und Thesen zu möglichen endogen wirkenden Mechanismen und deren Einfluss auf Mantel- und Asthenosphärendynamik, sowie auch das Verhalten der gesamten Lithosphäre sind meist aus generischen numerischen Modellen abgeleitet (u. a. Karlstrom et al. 2014, Braun et al. 2013, Cloetingh et al. 2006, Schott & Schmeling 1998, Mareschal 1983). Ein eindeutiger Beleg der umfassenden Anwendbarkeit dieser Thesen auf das komplexe System Erde fehlt häufig. Die häufige Unterbestimmtheit von Parametern und zu treffenden Randannahmen geodynamischer Modelle resultiert in einer Vielzahl an möglichen Ergebnissen, welche sich teils auch deutlich widersprechen können.

Bestimmte Prozesse sind nach derzeitigem Wissensstand aufgrund ihrer Bedeutung für einzelne tektonische Regime und Regionen besonders hervorzuheben. So ist es sicherlich einleuchtend, dass an aktiven Plattenrändern andere Prozesse dominieren als in Rift-Regionen oder im Inneren von tektonischen Platten. Deutschland befindet sich innerhalb der eurasischen Platte. Daher spielen Prozesse die im Zusammenhang mit Hebungen entlang aktiver Plattengrenzen stehen für Vertikalbewegungen Mitteleuropas vermutlich nur eine untergeordnete Rolle (Ausnahme: Prozesse bei denen größere Fernwirkungen ins Platteninnere anzunehmen sind) (u. a. Schildgen et al. 2012, Giese et al. 1999).

Ergänzend zu den qualitativen Abschätzungen von **Bewegungsraten** in Tabelle 4-1 muss noch erwähnt werden, dass hohe rezente Bewegungsraten über 1 mm/a in der Gesteinshebung oder Oberflächenhebung nur ein weiches Indiz für das Erreichen des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ von > 1000 m pro Mio. Jahre sind. So können endogene und exogene Prozesse kurzfristig hohe Vertikalbewegungsbeträge erzeugen, jedoch nicht über den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre aktiv sein. Auch können sich im Laufe des Nachweiszeitraums durch die Wechselwirkung mit

anderen Prozessen gegenläufige Senkungstendenzen einstellen, sodass am Ende des Nachweiszeitraums relative Höhenänderungen von weit unter 1000 m und gemittelte Vertikalbewegungsraten von deutlich unter 1 mm/a resultieren. Daher ist die Prognose von Vertikalbewegungen basierend auf kurzen Meßreihen der Bewegungsraten ohne ein umfängliches Verständnis der Ursachen für Schwankungen zugrundeliegender Prozesse mit größeren Unschärfen belegt. Ein anschauliches Beispiel für gegenintuitives Verhalten von Oberflächenhebung bietet die Bruchtektonik. So kann es zum Beispiel an einer aktiven Abschiebung über mehrere Jahre im Liegend-Block zu Hebungsbewegungen > 1 mm/a im Zuge der Entlastung durch ein Abschiebungseignis kommen. Diese für geologische Zeiträume kurzfristigen Ereignisse sind gemittelt auf 1 Million Jahre Nachweiszeitraum vermutlich nicht mehr aufzulösen und für die Gesamthebung einer Region möglicherweise unbedeutend.

4.2 Zusammenhang zwischen endogenen/exogenen Prozessen und Isostasie

Alle Änderungen von Gesteinsdichten (durch Temperatur) oder von Krusten- und Lithosphärenmächtigkeiten (durch Temperatur, Delamination, Erosion, Dehnungs- oder Einengungstektonik, Auf- und Abbau von Eis-/Wasserauflast) führen zu isostatischem Ausgleich (Watts 2001). Die einzigen nicht durch Isostasie bedingten bzw. vermittelten Hebungsprozesse, die in Tabelle 4-1 & 4-2 erwähnt werden, sind gebunden an:

lokale Deformation: Diese ist aufgrund der Biegesteifigkeit von Kruste oder Lithosphäre zu kurzweilig für isostatischen Ausgleich. Somit betrifft dies auch alle Prozesse die in Tabelle 4-1 mit nur einem lokalen-regionalen Impakt vermerkt sind (Tab 4-1: Spalte b:“~“).

lithosphärische Faltung führt idealerweise zu einem langwelligen Faltenzug aus Synklinalen und Antiklinalen der sich insgesamt isostatisch ausgleichen muss (u. a. Cloetingh et al. 1999) und dabei einsinkt. Jedoch fällt dieser isostatische Effekt vermutlich deutlich geringer aus, als die Hebung entlang der gebildeten Antiklinalenscheitel.

Dynamische Topografie beschreibt die Topografie, die nicht durch ein isostatisches Gleichgewicht der Kruste oder der Lithosphäre erklärt werden kann. Es ist anzunehmen, dass diese Resttopografie, nach Abzug des isostatischen Beitrags aus der beobachteten Topografie, Bereiche mit unterschiedlichem Auftrieb und Konvektion im Mantel abbildet (Abweichungen vom Schwimmgleichgewicht). Höhenunterschiede aufgrund der dynamischen Topografie liegen häufig in der Größenordnung von einigen hundert Metern bis zu wenigen Kilometern.

4.3 Jungtertiäre bis rezent wirkende Prozesse mit Einfluss auf die Topografiebildung und Hebung Deutschlands

Alpen und nördliches Alpenvorland: Im Süden von Deutschland sind mit dem Molassebecken und den frontalen Überschiebungen des Faltengebirges Alpen Strukturen vorhanden, die sich insbesondere entlang von Plattengrenzen häufen. Die eigentlichen Plattenränder und die damit verknüpften Phänomäne wie Subduktion, Vulkanismus und stark erhöhte Seismizität sind in diesem Fall im Mittelmeerraum verortet. Subduktion spielt für das Alpenorogen seit dem Neogen keine treibende Rolle mehr, sondern Kontinent-Kontinent Kollision mit einer ausgeprägten Überschiebungs- und Blattverschiebungstektonik, in einigen Regionen aber auch aktive Grabenbildung. Le Breton et al. (2017) diskutieren die zukünftige Bewegung der mit Eurasia kollidierenden Adriatischen Platte (Apulia). Dabei zeigt sich, dass anstatt einer nordwärtsgerichteten Bewegung für die nächsten 20 Millionen Jahre eher eine Rotation gegen den Uhrzeigersinn die Bewegung dieser aktiven Platte, im Süden der Alpen, dominiert und zu stark ausgeprägter Neotektonik in den Ostalpen und Dinariden führt. Es ist zu vermuten, dass die tektonische Aktivität im Raum der deutschen Alpen stagnieren könnte. Weiterhin diskutieren Sternai et al. (2019) den Einfluss von glazialer Isostasie, von Denudation, verschiedenen Prozessen die zur Krustenmächtigkeitszunahme führen, eines „slab break-off“ und von Fließen des Mantels auf die Hebung der Alpen. Entgegen dem Ergebnis von Mey et al. (2016), dass 90 % der derzeit ermittelten Gesteinshebung der Alpen auf glazial isostatischen Ausgleich zurückzuführen sind, ermitteln Sternai et al. (2019) einen glaziisostatischen Anteil an der Gesamthebung der West- und Zentral-Alpen von 10 - 30 %. Unabhängig der frappierenden Unterschiede in der Bewertung des Einflusses glazialer Isostasie ist zu erwähnen das die Hebungsraten der nördlichen Alpen im Vergleich zu anderen aktiven Orogenen derzeit gering sind (u. a. Sternai et al. 2019). Der Hebunganteil, der durch glaziale Isostasie hervorgerufen wird, ist wahrscheinlich innerhalb der nächsten 100.000 Jahre ausgeglichen. So erscheint die Annahme einer Abnahme oder Stagnation der Hebungsbewegungen für die nächsten 1 Million Jahre für die deutschen Alpen als plausibel.

Oberrhingraben, Schwarzwald & Vogesen: Im Südwesten von Deutschland ist mit dem Oberrhingraben eine weitere prominente tektonische Struktur vorhanden. Das Haupttriftstadium begann im Unteren Oligozän bei anhaltenden nordwärts gerichteten Bewegungen der Alpen (Meschede 2015, Frisch & Meschede 2013, Dèzes et al. 2004) und führte zur Ablagerung der mächtigen tertiären Abfolgen des Oberrhingraben. Dieses oligozäne Subsidenzzentrum wird durch eine über 100 km breite Aufwölbung der Kruste überlagert. So liegen die bis zu ca. 4° geneigten oberjurassischen Kalke der Schwäbischen Alb heute in den westlichen Bereichen, die an den Schwarzwald grenzen, auf Höhen bis knapp über 1000 m (Meschede 2015). Meschede (2015) verweist weiterhin darauf, dass im Schwarzwald und in den Vogesen das mesozoische Deckgebirge großflächig bis auf

den paläozoischen Untergrund abgetragen worden ist und Hebungsbeträge von über 2500 m seit dem Oligozän angenommen werden. Diese starke paläogene und neogene Heraushebung und Denudation des Schwarzwald und der Vogesen steht im Kontrast zur Abtragung der Mittelgebirge Mitteldeutschlands (u. a. Thüringer Wald, Harz) die hauptsächlich während der Oberkreide stattfand. Die Ursache für die Hebung im Bereich des Schwarzwald und der Vogesen wird nach wie vor kontrovers diskutiert (u. a. Rotstein & Schaming 2011 & 2010, Ziegler & Dezes 2007). Zur Debatte stehen unter Anderem ein paläogen bis neogen aktiver Mantel-Plume und dadurch auch gesteigerte vulkanische Aktivität (z. B. Kaiserstuhl), Rifting bezogene Mechanismen und lithosphärische Faltung.

Eine umfassende Betrachtung des Themas Hebung und Abtragung der Region Nordschweiz und Südwestdeutschland sind dem NAGRA-Bericht NTB 02-03 (2002; Kap. 8.3) und Müller et al. (2002, NTB 99-08) zu entnehmen.

Mitteldeutschland mit dem Thüringer Wald, dem Erzgebirge und Harz sowie angrenzende Mittelgebirge (u. a. Bayerischer Wald): In Kapitel 3 wird dargelegt, dass nach Ende der oberkretazischen Einengungstektonik ein Großteil des oberkretazisch erzeugten Reliefs des Thüringer Waldes und Harzes als auch anderer Sockelhochlagen wieder nahezu eingeebnet war. Ab dem Ende des Oligozän wurden, in etwa zeitgleich zum Schwarzwald, diese Bereiche erneut gehoben, bloß bei weitem nicht in dem Ausmaß wie Schwarzwald und Vogesen (u. a. Doornenbal & Stevenson 2010, Sissingh 2006B, Ludwig 2001B, Steinmüller 1992, Wagenbreth & Steiner 1990). Für die Hebung dieser Region stehen derzeit folgende Prozesse zur Diskussion: lithosphärische Faltung, dynamische Topografie, Kompression des Vorlandes über das Vorlandbecken nach Norden hinaus (Ferneinwirkung) durch die Alpen (Ziegler 1987) und ein Mechanismus bei dem abgereicherte MOR-Asthenosphäre im Laufe der Zeit durch die Nettorotation der Lithosphäre relativ nach Osten unter Eurasia verschoben wurde (Prozess in Tab. 4-1: „Asymmetrie im Rifting mit Einfluß auf den Asthenosphärenfluss“; Carminati et al. (2009)).

Rheinisches Schiefergebirge & Eifel: Für die Eifel und das Rheinische Schiefergebirge werden dieselben Prozesse für großräumige Vertikalbewegungen wie für Mitteldeutschland diskutiert. Jedoch aufgrund der tertiären vulkanischen Geschichte dieser Region und geophysikalischer Belege wird von vielen Autoren ein Mantel-Plume als Ursache für die neogene und quartäre Hebung der Eifel vermutet (u. a. Ritter et al. 2001). Meyer & Foulger (2007) dagegen sehen Bezüge des Vulkanismus zu Subduktionsprozessen in den Alpen, welche die Deformation und Strömung in der europäischen kontinentalen Kruste und dem darunterliegenden flachen Mantel beeinflussen.

Norddeutschland und Deutsche Ost- und Nordsee: Die Hebungs- und Senkungs-
bewegungen Norddeutschlands seit dem letzten glazialen Maximum sind ganz entscheidend
durch isostatische Ausgleichsbewegungen im Zuge des Rückzuges des skandinavischen
Eisschildes (je nach Modellannahme bis zu 2500 m mächtig) bestimmt. Steffen (2006) und
Steffen & Wu (2011) errechnen auf Basis von Schweremodellierungen die verbleibende
Hebung durch glaziale Isostasie. Die dargestellten Modelle zeigen maximale verbleibende
Hebungen für Zentralskandinavien von deutlich unter 200 m. Da verschiedene Belege zur
vergangenen Hebungsgeschichte Skandinaviens zeigen, dass Teile Skandinaviens und
umliegender Regionen (u. a. norddeutsche Küsten) seit dem Abschmelzen der Eisschilde
deutlich über diesen Betrag hinausgehoben wurden (u. a. Seibold & Seibold 2012), erscheint
es plausibel, dass die durch den glazial isostatischen Ausgleich hervorgerufene Hebung
irgendwann in den nächsten 100.000 Jahre zum Stillstand kommt. Seibold & Seibold (2012)
geben ebenfalls Beispiele für die Änderung der Hebungsrate seit dem letzten glazialen
Maximum und beschreiben damit die deutliche Abnahme der Bewegungen bis heute.

Doch Skandinavien und die Deutsche Nordsee unterliegen schon seit weit vor den
quartären Eiszeiten größeren Vertikalbewegungen (u. a. Evans et al. 2003). Der Großteil
der heutigen Topografie von Skandinavien (teilweise 2000 m ü. NN) ist eine Folge von
Hebungsprozessen, die seit dem Paläogen wirksam sind. Japsen et al. (2018 & 2002)
beschreiben die neogene Hebung von Südnorwegen und den sogenannten „South
Swedish Dome“. Für den „South Swedish Dome“ diskutieren Japsen et al. (2002) auch eine
jüngere pliozäne Hebungsphase. An zugrundeliegenden Prozessen für die paläogene bis
neogene Hebung Skandinaviens werden verschiedene Prozesse im Zusammenhang mit
dem Atlantik-Rifting diskutiert. Dazu gehören auch die These eines asthenosphärischen
Diapir, der ausgehend von Island fingerartig bis Skandinavien austrahlt (u. a. Pascal &
Oleson 2009). Aber auch „dynamische Topografie“ oder das Fließen der Unterkruste
werden als mögliche Ursachen für langsame aber im Paläogen und Neogen stetig wirkende
Hebungen aufgeführt.

5 Arbeiten der BGR zur Prognose zukünftiger und der Analyse vergangener Vertikalbewegungen

5.1 Arbeiten der BGR mit Bezug zu Hebungsprognosen im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse

Die BGR ist seit vielen Jahren in diverse Forschungsvorhaben eingebunden mit dem Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für Endlager radioaktiver Abfälle zu entwickeln und deren Anwendbarkeit zu testen. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit sind neben der jetzigen Situation an einem potenziellen Standort, zukünftig mögliche Entwicklungen des Endlagersystems zu berücksichtigen (Lommerzheim et al. 2015). Vertikale Bewegungen sowohl großräumig als auch lokal zählen zu den geologischen Merkmalen und Prozessen, die für die Integrität der geologischen Barriere eine besondere Bedeutung haben könnten und sind somit Teil dieser Betrachtungen.

Sowohl in den standortbezogenen Bearbeitungen für Gorleben und Morsleben als auch für Studien mit generischen Endlagerstandorten wurden Prognosen für Vertikalbewegungen in Deutschland betrachtet. Die getroffenen Aussagen sind dabei aus Literaturstudien abgeleitet. Es erfolgte im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse keine Datenerhebung und Auswertung.

- VSG Langzeitprogose (Mrugalla 2011)
- VSG FEP Katalog (Wolf et al. 2012)
- ANSICHT Langzeitprogose NORD (Mrugalla 2014)
- ANSICHT Langzeitprognose SÜD (Stark 2014)
- ANSICHT FEP-Katalog NORD (Stark et al. 2015a)
- ANSICHT FEP-Katalog SÜD (Stark et al. 2015b)
- CHRISTA FEP Katalog „multipler ewG“ und “überlagernder ewG” (in Bearbeitung)
- Verschiedene Berichte zum ERAM

5.1.1 Projekt VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben)

In der Langzeitprogose und im FEP-Katalog (Features, Events and Processes) im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Endlagerstandort Gorleben (Mrugalla 2011, Wolf et al. 2012) wird erläutert, dass nach Ludwig & Schwab (1995) und Ludwig (2001b) für die letzten 30 Millionen Jahre ein genereller Trend der Abwärtsbewegung von

0,01 mm/a nachgewiesen ist. In Mrugalla (2011) wird ausgeführt, dass dies auf eine Million Jahre hochgerechnet eine Senkung des Gebietes von 10 m entspricht und es wird davon ausgegangen, dass die Senkungsbewegung auch in der Zukunft weiter anhalten wird. Dementsprechend wird die Schlussfolgerung gezogen, dass eine weiträumige Hebung der Erdkruste in den nächsten eine Million Jahren für die Sicherheitsanalyse im Rahmen der VSG nicht von Bedeutung ist.

Weitere Prozesse, die mit einer Hebung bzw. mit Vertikalbewegungen der Erdkruste in der Region Gorleben in Verbindung gebracht werden können, werden in der Langzeitprognose und im FEP-Katalog für den Standort Gorleben bewertet und Ungewissheiten bei der Prognose für zukünftige Prozessabläufe werden diskutiert. Im Ergebnis wird in der Region keine Orogenese und kein intrusiver oder extrusiver Magmatismus in den nächsten eine Million Jahren erwartet. Für Deutschland ist lediglich in der Eifel und im Vogtland mit einer Reaktivierung vulkanischer Tätigkeit zu rechnen. Diese Gebiete liegen jedoch in einer Entfernung zum Standort, die eine direkte Beeinflussung ausschließt. Der Magmatismus wäre an tief reichende seismisch aktive Schwächezonen in der Erdkruste gebunden. Solche Zonen sind aus dem Nahbereich um Gorleben nicht bekannt. Es wird ausgeführt, dass für das in der Literatur (Hoffmann et al. 1996, Rabbel et al. 1995) zitierte und aufgrund seismischer Untersuchungen und Schwereanomalien abgeleitete herzynisch verlaufende, paläozoische Elbe-Lineament im Raum um den Standort keine nachweisbare Beeinflussung jüngerer mesozoischer oder känozoischer Schichten nachgewiesen werden kann. Deshalb wird für die nächste eine Million Jahre ein aktives tektonisches Geschehen entlang des Lineamentes ausgeschlossen.

Nach Mrugalla (2011) treten rezent am Standort Gorleben keine isostatischen Ausgleichsbewegungen und daraus resultierende Deformationen in der Erdkruste auf, die im Zusammenhang mit einer erhöhten Eisauflast bei einer Vergletscherung der Region stehen. Die letzte Kaltzeit (Weichsel) hat am Standort keine Gletscherüberdeckung erzeugt, die eine entsprechende Auflast bewirkt hätte. Ein Nachweis für Krustendeformationen während der Saale- und Elster-Kaltzeit konnte am Standort bisher nicht erbracht werden.

Für die Zukunft wird mit weiteren Eiszeiten innerhalb der kommenden eine Million Jahre gerechnet, von denen einige auch die Intensität der Elster- und Saale-Kaltzeit erreichen können (Mrugalla 2011). Treten solche Kaltzeiten auf, ist auch der Aufbau der damals erreichten Eismächtigkeiten am Standort erneut möglich bzw. auch höhere Eismächtigkeiten sind nicht auszuschließen. Für eine höhere Eismächtigkeit als die elster- und saalezeitliche Eismächtigkeit wird eine geringe Krustendeformation am Standort nicht ausgeschlossen.

In Wolf et al. (2012) wird angemerkt, dass in der Literatur verschiedentlich eine Initiierung des Salzaufstiegs durch die Inlandeisauflast diskutiert wird. Es wird ausgeführt, dass für den Standort Gorleben keine geologischen Befunde für einen Salzaufstieg durch Eisauflast vorhanden sind. Eine Steilstellung, z. B. von elsterzeitlichen Randsenkensedimenten, aufgrund eines durch die Saale-Kaltzeit verursachten Salzaufstiegs wurde nicht nachgewiesen. Auch die geringe Dauer einer Eisüberlagerung wird als Indiz für einen nur minimalen Einfluss auf das Aufstiegsverhalten eines Salzstocks gewertet.

5.1.2 Projekt ANSICHT (Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein)

Ziel des Forschungsprojektes ANSICHT war es, die Methodik der Langzeitsicherheitsanalyse mit FEP-Katalog und Szenarien für Tongestein als mögliches Wirtsgestein zu entwickeln. Basierend auf zwei generischen Standortmodellen (NORD & SÜD), die jeweils an den Gegebenheiten in Nord- und Süddeutschland angelehnt sind, wurde jeweils ein modellspezifischer FEP-Katalog erstellt (Stark et al. 2015a, Stark et al. 2015b). Die Kataloge beinhalten eine möglichst umfassende Komponenten- und Prozessbeschreibung des generischen Endlagersystems. Zusätzlich wurde jeweils eine Langzeitprognose erstellt, die die mögliche natürliche Entwicklung der Geosphäre für einen Zeitraum von einer Million Jahre in die Zukunft beschreibt (Mrugalla 2014, Stark 2014). Als Grundlage für die geologischen Rahmenbedingungen wurde größtenteils auf die Ergebnisse der „Regionalen Tonstudie“ (Hoth et al. 2007) zurückgegriffen.

Modell NORD:

Die Annahmen zu zukünftigen vertikalen Bewegungen für das Modellgebiet NORD erfolgten auf Grundlage der Ergebnisse des Neogeodynamica Baltica Projektes (Garetsky 2001). Die Hebungs- und Senkungsbeträge seit Beginn des Rupelium im Oligozän (vor ca. 34 Million Jahren) wurden überwiegend anhand der Verstellung von marin tertiären Transgressionssedimenten abgeleitet (Stark et al. 2015a). Basierend auf dieser Grundlage wurden für das Modell geringe flächenhafte Hebungen angenommen, die weit unterhalb des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ nach § 22 Absatz 2 Nr. 1 (StandAG 2017) liegen. Teil der Betrachtung ist außerdem eine Prüfung, ob die Funktion der Barrierewirkung der Tongesteine für ein in dieser geologischen Situation generisch erstelltes Endlager beeinträchtigt wäre. Durch großräumige Hebungen, abgeleitet nach Garetsky (2001), ergeben sich jedoch keine nachweisbaren Auswirkungen, da nur geringe differentielle Bewegungen im Maßstab eines Endlagerstandortes die Folge wären und die zu schlussfolgernde Erosion im Zeitraum von 1 Mio. Jahre zu gering wäre um bestehende Barrieren entscheidend zu schwächen. Prozesse wie Erosion oder Sedimentation, die indirekt von Vertikalbewegungen abhängen (z. B. über die Tieferlegung der Erosionsbasis oder Schaffung von Sedimentationsraum), sind ebenfalls Teil des FEP-Kataloges.

In der Langzeitprognose NORD erfolgte eine überregionale Betrachtung von möglichen wirkenden Prozessen, die Vertikalbewegungen zugrunde liegen können (Mrugalla 2014). So können auch zukünftig Krustendeformationen in Abhängigkeit der Gletscherausbreitung eine Rolle spielen und zu einer Überlagerung der verschiedenen Prozesse führen. Es wird auch auf die Ungewissheiten und Grenzen der Prognosemöglichkeiten eingegangen.

Modell SÜD:

Da insbesondere in südlichen Regionen Süddeutschlands Vertikalbewegungen in engem Zusammenhang mit der orogenen Entwicklung der Alpen stehen oder von damit zu begründenden Prozessen dominiert werden, sind diese Prozesse in die Bewertung der Langzeitsicherheit des generischen Modells SÜD mit eingeflossen. Die Interaktion zwischen alpidischer Gebirgsbildung und der Bildung des Oberrheingrabens bestimmen seit dem Oligozän die weiträumigen Vertikalbewegungen in dieser Region. Das generische Endlagerstandortmodell wurde so platziert, dass es nicht in der Nähe der Alpenhauptüberschiebung und nicht in der Nähe von aktiven Störungszonen des Alpenvorlandes liegt sowie eine langanhaltende und mächtige Eisbedeckung, resultierend aus einer zukünftigen Alpenvergletscherung, nicht wahrscheinlich ist. Für die Abschätzung der Vertikalbewegungen werden Literaturangaben aus geomorphologischen Untersuchungen übernommen, die im regionalen Umfeld des Endlagerstandortmodells SÜD liegen. Dementsprechend wird im FEP-Katalog (Stark et al. 2015b) über den Prognosezeitraum von einer Million Jahre eine geringe Hebung angenommen, die weit unterhalb des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ nach § 22 Absatz 2 Nr. 1 (StandAG 2017) liegt. Auch für dieses Modell wird das Fazit gezogen, dass sich der angenommene Hebungsprozess weiträumig und ohne differenzierte kleinräumige Vertikalbewegungen auswirkt. Innerhalb des Endlagerstandortmodells werden keine Relativbewegungen erwartet. Direkte Auswirkungen auf die Geosphäre und das Endlagersystem sind daher unwahrscheinlich.

In der überregionalen Betrachtung in der Langzeitprognose ANSICHT Süd (Stark 2014) werden Prozesse diskutiert, die im Zusammenhang mit der geodynamischen Entwicklung der Alpen stehen. Es werden verschiedenen Veröffentlichungen zitiert, die vielfältige Prozesse diskutieren welche in der Vergangenheit allein oder in Kombination zur Hebung der Alpen geführt haben können, darunter Mantelprozesse, Krustenverdickung oder lithostatische Ausgleichsprozesse nach dem Abschmelzen von Eis und/oder Erosion von Gesteinsmaterial (z. B. Cederbom et al. 2011, Champagnac et al. 2009). Zusätzlich werden Ungewissheiten betrachtet, die sich z. B. aus der Kontinuität der Hebungsprozesse im Alpenvorland ergeben. Glaziostatische Ausgleichsbewegungen werden für das Modell SÜD ausgeschlossen, da innerhalb der nächsten eine Million Jahre keine langanhaltende und mächtige Eisbedeckung am Modellstandort wahrscheinlich ist.

5.1.3 Projekt CHRISTA (Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland)

Im Projekt CHRISTA werden zwei unterschiedliche Endlagerkonzepte betrachtet und dafür generische geologische Modelle entwickelt, die standortunabhängige aber repräsentative geologische Situationen für Deutschland widerspiegeln. Damit soll die Methode eines Sicherheitsnachweises für Kristallingesteine getestet und weiterentwickelt werden. Für die generischen Modelle wurden geeignete Werte aus unterschiedlichen Regionen übertragen, um die Prozessabläufe darstellen zu können.

Der Modelltyp „multipler ewG“ (ewG = einschlusswirksamer Gebirgsbereich) entspricht dem typischen geologischen Umfeld eines aus kristallinen Gesteinen aufgebauten Mittelgebirges. Für diesen Modelltyp werden sehr geringe vertikale Bewegungsraten angenommen. Die Auswirkung auf das Endlagersystem wird als vernachlässigbar eingeschätzt, da durch die langsamen, großflächigen und sich über lange Zeiträume erstreckenden Vertikalbewegungen keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen auf die Geosphäre und das Grubengebäude für die nächsten eine Million Jahre erwartet werden.

Für das generische Modell „überlagernder ewG“ wird ebenfalls eine Mittelgebirgsregion mit einem überwiegend durch permisches Salinar und triassische Gesteine überlagerten kristallinen Basement zu Grunde gelegt. Auch hier werden sehr geringe flächenhafte Hebungen mit sehr geringen Bewegungsraten angenommen. Die Übertragung der Werte erfolgte in Anlehnung an Ludwig (2001b), wo für die nördlichen Bereiche der Mittelgebirge Hebungstendenzen dargestellt sind. Auch für dieses Modell werden keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen durch diese großräumigen Vertikalbewegungen erwartet.

5.1.4 Projekt ERAM FEP und Szenarien (Erstellung eines FEP-Katalogs und Entwicklung von Szenarien für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben)

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) liegt im oberen Allertal östlich von Helmstedt zwischen den Ortschaften Walbeck im Nordwesten und Alleringersleben im Südosten. Im mittel- und nordeuropäischen Maßstab gesehen liegt der Standort südlich der Zentraleuropäischen Subsidenzzone (Aizberg et al. 2001). Für diese südlich angrenzenden Gebiete wird seit dem Oligozän (seit ca. 34 Millionen Jahren) eine Krustenhebung bis zur Mittelgebirgsregion beschrieben (Ludwig 2001b).

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für das ERAM wurden Berichte erstellt, die u. a. Aussagen zur vertikalen Bewegung der Kruste in der Standortregion machen bzw. aus denen Interpretationen zur vertikalen Krustenbewegung vorgenommen werden

können. Lotsch (1998) verglich bei der Untersuchung tertiärer Sedimente die Höhenlage der Basis der obereozänen bis oligozänen Transgressionsfläche auf der Weferlinger Triasplatte mit der auf der Lappwald-Scholle. Er kommt zu dem Resultat, dass sich die Region um das ERAM seit dem Oligozän (d. h. nach ca. 34 Millionen Jahren) weitläufig gehoben hat. Unterschiedliche Höhenlagen der Transgressionsfläche deuten darauf hin, dass die Weferlinger Triasplatte und die Flechtingen-Roßlau-Scholle im Zeitraum nach dem Oligozän einheitlich herausgehoben worden sind, während die Allertalzone für die tertiären Hebungsbewegungen eine Schollengrenze zwischen Weferlinger Triasplatte und Lappwald-Scholle bildete. Die Lappwald-Scholle wurde nach Lotsch (1998) seit dem Obereozän/ Oligozän stärker gehoben als die Weferlinger Triasplatte.

Gerardi & Wildenborg (1999) verwenden die Methodik der Flussschotterterrassendatierung, um zu quantitativen Aussagen über vertikale Bewegungen im jüngeren Quartär zu kommen. Für den Standort ERAM werden zwei mittlere Hebungsgeschwindigkeiten für das jüngere Quartär angegeben, die durch die unterschiedliche Interpretation der Altersstellung der quartären Flussschotterterrassen bedingt sind. Es wird eine mittlere Hebungsgeschwindigkeit von 0,027 mm/Jahr bei einer angenommenen Hebungsperiode von einer Million Jahre und eine mittlere Hebungsgeschwindigkeit von 0,045 mm/Jahr bei einer angenommenen Hebungsperiode von 400.000 Jahren angegeben. Kugler & Villwock (1995) geben für den Zeitraum Frühweichsel bis Holozän Geschwindigkeiten von 0,03 mm/Jahr bis 0,08 mm/Jahr für vertikale Hebungsbewegungen des Allertales an.

Für die bergmännische Überwachung des Grubengebäudes und seiner weiteren Umgebung sind Feinnivellements durchgeführt worden. Die ermittelten rezenten Bewegungen zeigen nach Storck (1988) ein uneinheitliches Bild von Senkungen und Hebungen und liefern keine belastbaren Aussagen zu rezent wirkenden geologischen Prozessen im Bereich der Allertalzone.

Rezente Vertikalbewegungen werden für Sachsen-Anhalt in Ellenberg (1988) und Schwab & Rappsilber (2008) mit -0,5 bis -2 mm/Jahr angegeben, wobei die Region des ERAM im Oberen Allertal mit -1,5 bis -2 mm/Jahr gekennzeichnet ist. Diese Angaben beruhen auf einzelnen Nivellementmesskampagnen (Ellenberg 1987, 1988). Sie erfassen daher keine langfristigen Vertikalbewegungen.

Der Hebung des gesamten Bearbeitungsgebietes wirken in der Allertalzone regionale Prozesse, z. B. die flächenhafte Subrosion und die eng begrenzte Subrosion (Dolinenbildung), entgegen (Best & Zirngast 1998). Dabei können die eng begrenzten Absenkungsgeschwindigkeiten durch Subrosion höher sein als die weit gespannten Hebungsgeschwindigkeiten.

5.2 Weitere laufende Projekte und Publikationen der BGR zu Vertikalbewegungen Deutschlands

5.2.1 Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD)

Mit der Umsetzung des Konzeptes des Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) ab 2016 (Lege et al. 2019, Lege et al. 2016a, Kalia et al. 2014) intensivierte die BGR die Nutzung satellitengestützter Radardaten für die Bewertung geologischer und anthropogen induzierter Oberflächendeformationen, sowie den Aufbau von Methodenkompetenz und Interpretationsfähigkeiten. Dabei zeigt sich insbesondere der große Nutzen der InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) Daten für Planung- und Monitoringaufgaben als auch für die Gefährdungsanalyse. Es sind vier bundesweit einheitlich prozessierte Persistent Scatterer Interferometrie Datensätze des aufsteigenden und absteigenden Orbits des Copernicus-Satelliten Sentinel-1 verfügbar. Um die Daten der Nutzergemeinschaft zur Verfügung zu stellen wird ein WebGIS als integraler Bestandteil des BGR-Geoviewers entwickelt (Kalia & Vienken 2019). Aufgrund der räumlichen Auflösung der Sentinel-1 Daten ist der primäre Anwendungsbereich die regionale Skala.

In Lege et al. (2019) wird weiterhin ausgeführt, dass zur Qualitätssicherung der bundesweiten Bodenbewegungsdaten einheitlich aufbereitete GNSS-Geschwindigkeiten von 230 SAPOS® Referenzstationen zu Verfügung stehen. Im Ergebnis zeigen weniger als 20 % aller SAPOS®-Referenzstationen mittlere Geschwindigkeiten von mehr als 1 mm/a. Die größte Bewegungsrate ergibt sich im bis jetzt ausgewerteten Betrachtungszeitraum für die Referenzstation Emden Knock mit 2,1 mm/a in westlicher Richtung bei einer Absenkrate von 2,0 mm/a (Lege et al. 2019). Die Station liegt im Einflussbereich der Gasgewinnung des Gasfeldes Groningen. Kalia et al. (2017) zeigen weiterhin auf einer Reihe von Karten Gebiete mit einer Indikation für ausgewählte Bewegungsprozesse (Abb. 5-1). Für eine Differenzierung verschiedener sich potentiell überlagernder Bewegungsprozesse ist ein vertieftes Wissen der einzelnen sich ggf. gegenseitig beeinflussenden Prozesse notwendig. Dieses Prozessverständnis könnte bspw. durch numerische Modellierung verbessert werden. Systematische Hebungen treten nach Lege et al. (2019) in Teilen Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommern, in der Eifel und im bayerischen Voralpenraum auf. Als erste Interpretationsansätze werden noch anhaltende isostatische Ausgleichsbewegungen nach dem Abschmelzen der Gletscher der letzten Eiszeit, der Magmatismus der Eifel und die Hebung der Alpen diskutiert. Potentielle glazial-isostatische Ausgleichsbewegungen im Fernfeld der Gletscher der letzten Eiszeit wurden ebenfalls im Rahmen des BBDs diskutiert (Lege et al. 2016b).

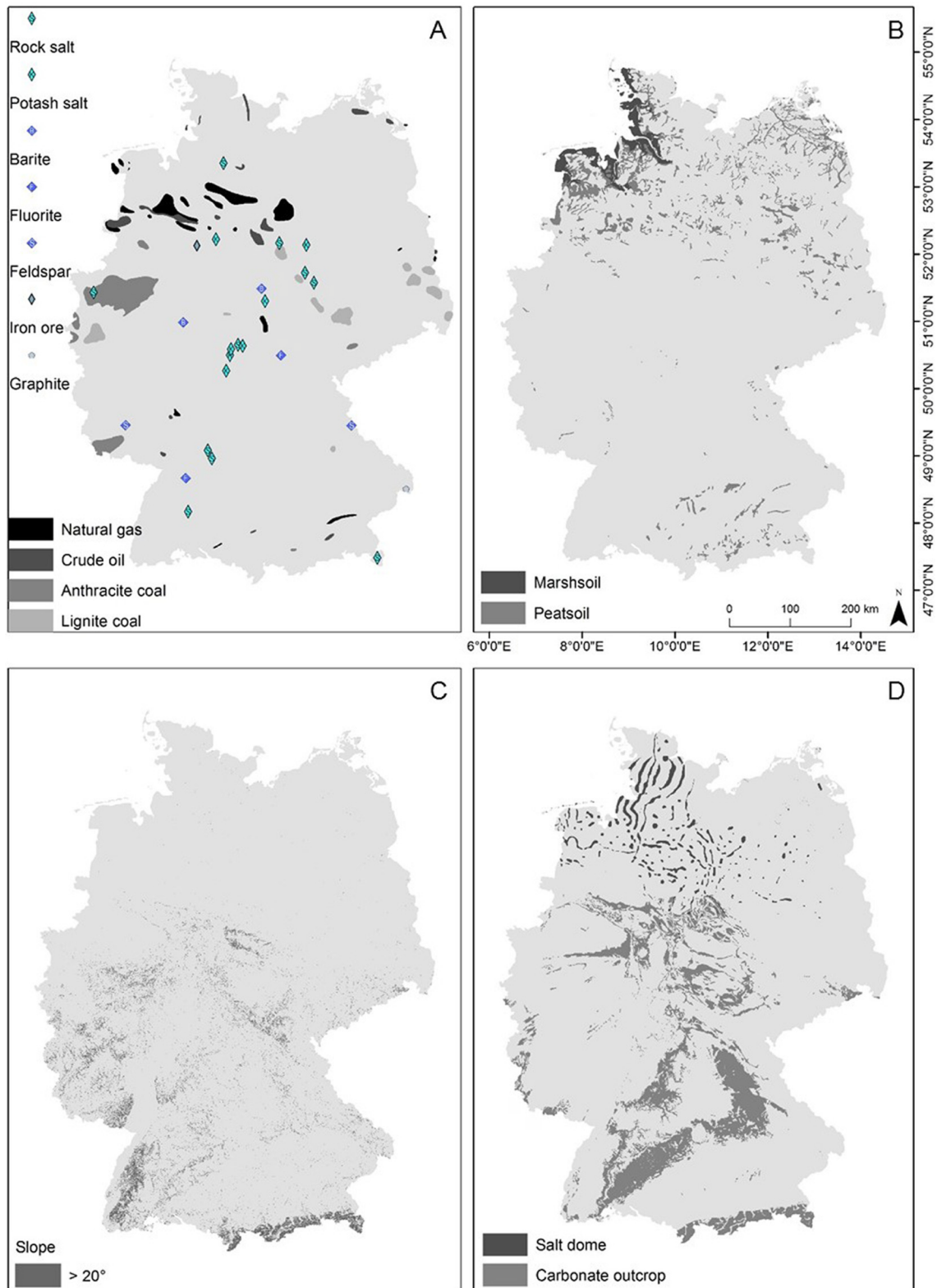


Abb. 5-1: Geologische Themenkarten mit hervorgehobenen Gebieten, in denen folgend genannte Ursachen potentiell zu Vertikalbewegungen führen können: Bergbau & Bergbaufolgen (A), Kompaktion von Torfen und Marschböden (B), Massenbewegungen in Gebieten mit hohen Hangneigungen (> 20°) (C) und Subrosion in Gebieten mit Karbonat- und Salzgesteinen (D) nach Kalia et al. (2017).

In 16 Pilotstudien hat die BGR in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten Deutschlands Gebiete mit potentiell anthropogenen geologischen Bewegungsursachen (z. B. (Alt-)Bergbau, Kavernenspeicherung) sowie Gebiete mit potentiell geologischen Bewegungsursachen (z. B. Moorsackung, Salztektunik) untersucht. Eine Bewertung der Oberflächendeformation verursacht durch den Betrieb von Kavernenspeichern im Bereich von Wilhelmshaven wurde in Kalia et al. (2018) diskutiert.

5.2.2 Auftrag Nr. 8 des Direktorenkreises der SGD: GUK8

Bei Bauvorhaben in Gebieten mit Erdbebengefährdung ist nicht nur die Stärke und Häufigkeit von Erdbeben zu berücksichtigen, sondern auch die Beschaffenheit des Untergrundes. In der DIN EN 1998-1/NA Eurocode 8 wird der geologische Untergrund unterhalb von 30 m Tiefe entsprechend in drei verschiedene Klassen aufgeteilt: „R“ für Festgestein, „T“ für flache Sedimentbecken und Übergangszonen und „S“ für tiefe Sedimentbecken. Der seit 2018 laufende Auftrag hat die Bereitstellung einer aktualisierten Karte der geologischen Untergrundklassen für die Neufassung der DIN EN 1998-1/NA Eurocode 8 (Bemessung und Konstruktion von Bauwerken des Hoch- und Ingenieurbaus in Erdbebengebieten) zum Ziel.

Auf der 166. Sitzung des Direktorenkreises der SGD (DK, 13.-14. September 2016) wurde beschlossen: „Der DK bittet die BGR, die Aufgabe der länderübergreifenden Zuordnung der von den SGD bereitgestellten lithologischen Beschreibungen zu geologischen Untergrundklassen für die Neufassung von DIN EN 1998-1/NA nach den Kriterien des Normenausschusses durchzuführen“. Nach Bereitstellung grundlegender Daten seitens des Normenausschusses NA 005-51-06 AA „Erdbeben, Sonderfragen“ im DIN Normenausschuss Bauwesen (NA Bau) im Juli 2017 und folgender Abstimmung zwischen BGR und den Ländern wurde ein Konzept erstellt. Danach kompiliert die BGR Untergrunddaten der betroffenen Bundesländer NW, HE, SN, ST, TH, BW, BY (bereitgestellt in einer horizontalen Auflösung von 1 x 1 km) und RP. Die neue Karte wird auf Basis eines vereinfachten geologischen 3D-Modells erstellt. Dieses enthält die Flächen der Tertiärbasis, der Quartärbasis und der Oberfläche. Für RP wird ein vereinfachtes geologisches 3D-Modell im Rahmen des Auftrages durch die BGR erarbeitet.

Die regionalskalige Ausweisung der Verbreitung, der Mächtigkeiten und der Tiefenlagen von tertiären und quartären Sedimenten kann neben der hier vorgestellten Anwendung letztlich auch wichtige Basisinformationen für die Analyse von Vertikalbewegungen in diesen Gebieten liefern. Die Fertigstellung der Karte ist für Ende 2020 geplant.

5.2.3 Auftrag ‘Seismische Regionalisierung für Deutschland und angrenzende Gebiete’

In einer Auftragsstudie der BGR (B 4.4) an die Universität Göttingen sollen bestehende Konzepte zur Ausweisung erdbebengeografischer Einheiten und seismotektonischer Regionen Deutschlands (z. B. Leydecker 2011, Grünthal et al. 2009) überprüft werden. Auf der Basis eines modifizierten Konzeptes soll eine neue seismotektonische Regionalisierung Deutschlands vorgenommen werden, die neuere Erkenntnisse zur Struktur und Festigkeit von Kruste und Lithosphäre, zu Störungssystemen, zum Spannungsfeld, zu Vertikalbewegungen und zur Seismizität berücksichtigt. Die seismotektonische Regionalisierung ist eine Anforderung des sicherheitstechnischen Regelwerkes des Kerntechnischen Ausschuss (KTA 2011: KTA 2201.1). Seismotektonische Regionen sind in der KTA 2201.1 wie folgt definiert:

„Eine seismotektonische Einheit ist ein Gebiet, in dem Gleichartigkeit hinsichtlich der Erdbeben-tätigkeit, der geologischen Struktur und Entwicklung und der tektonischen, insbesondere der neotektonischen Verhältnisse angenommen wird. Eine seismotektonische Einheit kann auch eine seismische Quellregion sein.“

Endogen hervorgerufene Vertikalbewegungen und Seismizität stehen oft in enger Beziehung zueinander. Daher wird die Studie zu diesem Auftrag voraussichtlich relevante Beiträge zum Thema des vorliegenden Berichtes liefern, insbesondere zu den zugrundeliegenden endogenen Prozessen von Vertikalbewegungen sowie zur Struktur der Kruste und Lithosphäre.

5.2.4 Publikationen und abgeschlossene Projekte

Mitarbeiter der BGR haben in Zusammenarbeit mit außerhäusigen Partnern oder als Mitautoren zu Aspekten der vertikalen Krustenbewegung oder zu Themen, die damit indirekt in Verbindung stehen, in den letzten Jahren geforscht und Ergebnisse veröffentlicht. Die BGR hat mit den Arbeiten zum Geotektonischen Atlas eine lange Tradition in der Erkundung des tieferen Untergrundes von Nordwestdeutschland und dem deutschen Teil der Nordsee (u. a. Müller et al. 2016, Baldschuhn et al. 2001). Seit der Wiedervereinigung sind aber auch verschiedene strukturgeologische Grundlagen zu Untergrundstrukturen im Ostteil der Republik durch die BGR erarbeitet worden (u. a. Best & Zirngast 1998). All diese Studien befassen sich zwar meist nicht direkt mit dem Parameter der Vertikalbewegung oder der Gebirgsabtragung, enthalten jedoch die Grundlagen, um dazu Aussagen treffen zu können. In jüngerer Vergangenheit wurden ebenfalls verschiedene Fragestellungen bearbeitet und als Tagungsbeiträge oder Publikationen in Fachzeitschriften veröffentlicht, die Aussagen zu Vertikalbewegungen und Denudation insbesondere für das norddeutsche Becken und umgebende Gebiete ermöglichen:

- Vink et al. (2007) kompilieren eine Vielzahl relativer Meeresspiegeldaten (RSL) des Holozän in Nordwest-Europa (Belgien, Niederlande, NW Deutschland und die südliche Nordsee). Durch den Vergleich der Daten kann teils auf relative Krustenbewegungen zurückgeschlossen werden. Für die aus den Daten abgeleitete Subsidenz werden glaziale und / oder hydro-isostatische Ursachen angenommen, die möglicherweise andere noch wirkende tektonische Einflüsse maskieren. Für Belgien wird ein deutlich geringerer glazialisostatischer Einfluss als in der südlichen Nordsee nachgewiesen. Die Subsidenz im Bereich der deutschen Nordsee wird als Effekt des postglazialen Kollapses des peripheren forebulge (flexurelle Aufwölbung in Front einer Auflast auf die Lithosphäre) im Randbereich des Weichsel-Inlandeisschildes verstanden. Die RSL-Daten wurden mit geodynamischen Modellen (u. a. Steffen 2006) verglichen, um die Viskosität der Lithosphäre besser bestimmen zu können. Lokal zeigen sich aus der Analyse aber auch auffallende Anomalien wie im Bereich von Helgoland mit ~0,35 Metern Hebung pro tausend Jahre für das Holozän, was auf aktiven Zufluss von Zechsteinsalz zum Helgoland-Salzkissen hinweisen könnte.
- In Arfai et al. (2018) wird detailliert ein Gebiet mit anormal hoher quartärer Subsidenz im Nordwesten des deutschen Nordseesektors analysiert. Dabei wurden maximale Subsidenzraten für das Quartär von 480 m pro Mio. Jahre bei Teufenlagen des Quartär von über 1000 m ermittelt. Arfai et al. (2018) zeigen als Resultat, dass Kompaktion und Auflast induzierte Subsidenz ca. 75 % der beobachteten quartären Subsidenz erklären können. Verschiedene Prozesse werden vorgestellt und diskutiert, die den restlichen Anteil der Subsidenz erklären könnten.
- Arfai et al. (2014) geben einen umfassenden Überblick zur strukturellen Entwicklung des sogenannten Entenschnabels, dem nordwestlichsten Teil des deutschen Nordseesektors. Die Arbeit beruht auf einer Neukartierung von mehr als ein dutzend Leithorizonten des tieferen Untergrundes, der Kartierung und Modellierung von über 20 Salzstrukturen und über 800 Störungen dieser Region. Diese grundlegende Kartierungsarbeit und strukturelle Analyse bildet die Basis für ein 3D-Subsidenzmodell als Teil einer Petroleumsystemmodellierung (Arfai & Lutz 2018). Dieses Subsidenzmodell wurde unter anderem durch Vitritdaten aus Tiefbohrungen gestützt. Wesentliche Hebungs- und Erosionsereignisse des späten Paläozoikums und des Mesozoikums lassen sich deutlich aus den Subsidenzkurven des Modells ablesen. Dabei fallen insbesondere die Hebungsbewegungen im Bereich des Zentralen-Grabens im Zuge der Herausbildung des Nordseedoms (Graversen 2006) und durch die oberkretazische Inversionstektonik dieser Region auf.

- Warsitzka et al. (2016) analysieren im Detail die tektonische Entwicklung des Glückstadt-Grabens und die damit verbundene Halotektonik, die zur Herausbildung mehrerer Salzmauern mit Längsausdehnungen über mehrere 10er Kilometer und Tiefen, bis zum Fuß der Strukturen, von teils über 6 km führte. Durch ein sogenanntes Backstripping konnte die geometrische Entwicklung des Post-Zechsteins der Region über die Zeit dargestellt werden. Mehrere resultierende Subsidenzkurven für verschiedene Lokationen des Grabens verdeutlichen die Varianz der Subsidenz innerhalb des Grabens und unterscheiden nach dem Anteil der Subsidenz, der sich durch Salzabwanderung ergibt und der tektonischen Subsidenz. Auffällig ist auch, dass hohe Subsidenzraten mit mehreren hundert Metern pro Millionen Jahre nur während der Trias nachweisbar sind.
- Warsitzka et al. (2019) kompilieren eine Vielzahl an publizierten Informationen zur Salzstrukturentwicklung des südlichen Permbeckens und erstellen daraus mehrere Kartenreihen zur Initiierung von Salzstrukturen, zu deren Hauptentwicklungsphase und zur Zeitlichkeit der Bedeckung von Salzstrukturen. Weiterhin werden für unterschiedliche Regionen verschiedene Auslösermechanismen für die Salzstrukturentwicklung definiert und diskutiert. Die Erkenntnisse dieser Kompilationsarbeit können eine Basis bilden, um Aussagen zur potenziellen Reaktivierbarkeit bestehender Salzstrukturen durch etwaige zukünftig eintretende endogene und exogene Prozesse zu treffen und so das Potenzial für differentielle Vertikalbewegungen im Bereich dieser Strukturen abzuschätzen.
- Das Projekt InSpEE (Abschlussbericht 2016) bietet ebenfalls eine Vielzahl wertvoller Informationen zu Salzstrukturen Deutschlands, die für Analysen etwaiger Vertikalbewegungen entlang dieser Strukturen von Nutzen sind. Ziel des Verbundvorhabens InSpEE – Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) war zunächst die Erarbeitung und Bereitstellung von Auslegungsgrundlagen und geologisch-geotechnischen Basisdaten sowie von Kriterien zur Standortauswahl für die Errichtung von Salzkavernen für die Speicherung von Wasserstoff und Druckluft. Darauf aufbauend erfolgte eine Abschätzung des Energiespeicherpotentials der norddeutschen Salzstrukturen für erneuerbare Energien in Form von Wasserstoff und Druckluft. Damit einhergehend wurde eine umfassende Datenbank zu den Salzstrukturen Deutschlands erstellt in der auch Parameter zur Strukturentwicklung enthalten sind.
- Weiterhin wurden in den letzten Jahren verschiedene Beiträge auf Tagungen zur oberkretazischen Inversionstektonik im Bereich des Norddeutschen Beckens, der mitteldeutschen Mittelgebirge und der Nordsee vorgestellt (u. a. Jähne-Klingberg et al. 2016, Jähne-Klingberg et al. 2015, Jähne et al. 2013, Jähne et al. 2011, Jähne & Kley 2011, Jähne et al. 2010, Malz et al. 2014).

6 Datengrundlage

6.1 *An die BGE überstellte Daten des Bundes und der Länder zu Vertikalbewegungen*

Nach Datenanfrage der BGE (BGE; 02.08.2017) wurden durch die BGR und die Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands Daten und weiterführende Informationen zu „großräumigen Hebungsraten“ an die BGE zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ (§ 22 Abs. 2 (2) StandAG) übermittelt. Eine weitere Anfrage zu geodätischen Vermessungen erfolgte durch die BGE an das Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG). Ein entsprechender Bericht des BKG „Bestimmung von Höhenänderungen aus Nivellementdaten in Deutschland“ liegt der BGE vor. Eine Übermittlung der darin gezeigten Daten steht gegenwärtig noch aus (Stand 30.07.2019).

Die nach Leistungsbeschreibung von der BGR durchzuführende Sichtung der bei der BGE eingegangenen Daten und weiterführende Informationen (zu Vertikalbewegungen) erfolgte auf Basis einer aussagekräftigen Übersichtspräsentation der BGE. Die vom geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen an die BGE gelieferten Daten und Informationen konnten durch die BGR aufgrund rechtlicher Limitierungen nicht eingesehen werden. Aufgrund der Kürze der Projektlaufzeit und zum Teil rechtlicher Limitierungen konnten von der BGR keine Datensätze im Detail analysiert werden. Dennoch lässt sich die Übersichtspräsentation für eine Analyse nutzen: Hervorzuheben ist, dass äußerst heterogene Datensätze und Informationen an die BGE übermittelt wurden. Wenige der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD'e) übermittelten nach Aussage der BGE digitale Datensätze (MV, BB, ST, NW). Allein die SGD'e von Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Brandenburg machten flächendeckend für das jeweilige Bundesland Aussagen. Neben der BGR verwies auch der SGD von Bremen und Thüringen auf den an der BGR in 2016 initiierten Bodenbewegungsdienst (BBD) (siehe Kapitel 5.2.1). Des Weiteren wurde von vielen SGD'en sowie der BGR eine Vielzahl publizierter Fachliteratur, mit überwiegend lokalen bis regionalen Angaben, aufgelistet. Eine Übersicht wesentlicher publizierter Daten erfolgt in Unterkapitel 6.2. Auffallend ist auch, dass keine Übereinstimmung in der Wahl der zugrundeliegenden Bewertungsmethode für großräumige Vertikalbewegungen zwischen den SGD'en besteht. Es wird sich neben unterschiedlichen geodätischen Messmethoden (bodengestützten Feinnivellements, INSAR, GNSS, bodengestützte und satellitengestützte Absolutgravimetrie) ebenfalls auf stratigrafische und geomorphologische Herleitungen gestützt. Somit beziehen sich einige SGD'e auf rezente Bodenbewegungen, andere auf Herleitungen aus der tertiären Strukturgeschichte Deutschlands und wieder andere auf prognostische Aussagen die auf einzelne Modellannahmen (MV) aufbauen.

6.1.1 Bewertung der überstellten Daten in Hinsicht auf eine konsistente deutschlandweite Prognose zu großräumigen Vertikalbewegungen

Die bis dato der BGE zur Verfügung gestellten Datensätze ermöglichen keine über Gesamtdeutschland **flächendeckend vergleichbare** Aussage zu zukünftig zu erwartenden Vertikalbewegungen. Selbst Datensätze einzelner Bundesländer zum rezenten Hebeverhalten zeigen, unter anderem aufgrund unterschiedlich gewählter Studienansätze, teils deutliche Diskrepanzen zu Angaben der SGD'e angrenzender Bundesländer. So bezieht sich beispielsweise Mecklenburg-Vorpommern auf Steffen & Wu (2011), die Anpassungen an zuvor bestehende Vorstellungen nach Ekman & Mäkinen (1996) unter Verwendung von Absolutschweremessungen der GRACE-Mission vornehmen. Der SGD von Sachsen-Anhalt bezieht sich dagegen auf in Ellenberg (1988) vorgestellte Resultate topografischer Feinnivellements. Gleichzeitig verweist der SGD Sachsen-Anhalt aber auch auf Radaraten, welche im völligen Kontrast zu den Angaben von Ellenberg (1988) stehen. Der SGD Brandenburg dagegen bezieht sich auf eine Kartendarstellung der Vertikalbewegungen seit Beginn des Rupel aus dem Neogeodynamica Baltica Project (Ludwig 2001b). Ähnlich heterogen sind auch die Angaben für die anderen Bundesländer.

Der Detailgrad der einzelnen Belegdaten ist ebenfalls sehr unterschiedlich. Auch die Aussagekraft der einzelnen Daten allgemein und über die Fläche ist auf Basis der gelieferten Daten nicht abzuleiten. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher zugrundeliegender Methoden sind ohne weitergehende Untersuchungen ein Großteil der bereitgestellten Datensätze nicht miteinander in Bezug zu setzen.

Nach Einsicht der bei der BGE eingegangenen Daten lässt sich sagen, dass ohne grenzübergreifend abgestimmte Aussagen der Landesvermessungsdienste und des BKG zu rezenten Vertikalbewegungen, sowie zu Vertikalbewegungen während des Jungtertiär und des Quartär durch die SGD'e, eine konsistente Ausweisung von Vertikalbewegungen alleine auf Basis der von den Landesbehörden übermittelten Daten über Gesamtdeutschland nicht erzielbar sein wird. Eine eher qualitative generalisierte Betrachtung des Ausschlusskriteriums sollte mit den der BGE zur Verfügung stehenden Daten und einer ergänzenden Literaturrecherche jedoch möglich sein (siehe dazu auch Kapitel 3, 4 & 6.2). Für die Gebiete und Bundesländer mit Grundgebirgshochlagen muss sich die Ausweisung vergangener Vertikalbewegungen zwangsläufig auf andere Methoden und Argumentationsketten beziehen (flächige Erosion datierbarer Sedimente, kaum Informationen zur Paläofazies) als für Bundesländer mit Tertiär- und Quartärbedeckung. Da gerade die Herleitung vergangener Vertikalbewegungen auf einer Vielzahl multi-disziplinärer Erkenntnisse aufbaut, ist die Gestaltung einer Abfrage bei Datenhaltern bezogen auf diese Daten auch nur schwerlich mit dem Anspruch realisierbar, sämtliche als Indikator für Vertikalbewegungen verwendbare Daten zu erfassen. So könnten durchaus bei den SGD'en und anderen geowissenschaftlichen Institutionen noch eine Vielzahl

an Informationen vorliegen (vermutlich meist in analoger Form), die möglicherweise eine Konkretisierung von vergangenen Vertikalbewegungen für bestimmte Regionen erlauben. So besitzen die meisten SGD'e häufig große Datenbestände zum Quartär und dem Tertiär (viele Bohrdaten), deren deutschlandweite Kompilierung, Harmonisierung und flächenhafte Darstellung neue Einblicke ermöglichen würde. Die Auswertung dieser geologischen Informationen hinsichtlich Aussagen zu Vertikalbewegungen bedeutet jedoch mit Sicherheit einen großen zeitlichen und personellen Aufwand.

Abschließend sollte deutlich darauf hingewiesen werden, dass eine klare Entscheidung gefällt werden muss, welchen Datensätzen und Angaben eine stärkere Aussagekraft für längerfristige Zukunftsprognosen zugesprochen wird. Dies bedarf einer Abwägung, die wahrscheinlich nur qualitativ erfolgen kann. Werden die lückenhaften Daten und darauf basierenden qualitativen Aussagen über jungtertiäre/quartäre Abtragung und Vertikalbewegungen, aufgrund der größeren Zeitspanne die dargestellt wird und der klarer zu fassenden geologischen Ursachen, bevorzugt für Zukunftsprognosen betrachtet? Oder sollen sich Prognosen überwiegend auf die (noch wachsende) Vielzahl an immer noch widersprüchlichen geodätischen Messungen und deren quantitativen Aussagen stützen? Die folgenden und vorangegangenen Kapitel sollen den Lesenden ermöglichen, sich eine eigene Meinung dazu zu bilden.

6.2 *Stand der Forschung zu Vertikalbewegungen und der Denudationsgeschichte Deutschlands*

So heterogen die von den SGD'en und der BGR an die BGE gelieferten Daten und Informationen sind, so heterogen zeigt sich auch der Stand der Forschung zu Vertikalbewegungen Deutschlands. Aufgrund der Fülle an Publikationen die dazu Informationen bieten, wird folgend nur auf einige neuere exemplarisch hingewiesen. Die Anzahl an Publikationen, die tertiäre bis rezente Vertikalbewegungen und Abtragung überregional ausweisen, ist für Deutschland und umgebende Regionen überschaubar (u. a. Vestøl et al. 2019, Kley 2018, Japsen et al. 2018, Arfai et al. 2018, Beyer 2015, Frisch & Meschede 2013, Garetsky et al. 2001b, Frischbutter & Schwab 2001, Sánchez et al. 2018). Deutschlandweite Aussagen zu rezenten Vertikalbewegungen (Frischbutter & Schwab 2001 & 1995) werden nur im Rahmen des Neogeodynamica Projekt (Garetsky et al. 2001b) gemacht. Ebenfalls wurde in diesem Projekt eine Karte der Vertikalbewegungen für den Zeitraum seit dem Rupel (ca. 33,5 Mio. Jahre) erstellt (Ludwig 2001b). Weiterhin ergeben sich aus dem Vergleich der Höhenreferenzsysteme DHHN 92 und des DHHN 2016 des BKG Informationen zu flächendeckenden Höhenänderungen (Klein et al. 2016). Inwiefern der Vergleich der Referenzsysteme tatsächlich nur Höhenänderungen zeigt oder auch noch eingeflossene Korrekturen, welche Grund der Abweichungen zwischen

den Referenzsystemen sein könnten, ist basierend auf veröffentlichten Informationen des BKG (<https://www.bkg.bund.de>) nicht abschließend bewertbar (Klein et al. 2016). Es sind jedoch teils frappierende Unterschiede zur von Frischbutter & Schwab (2001) erstellten Karte der rezenten Vertikalbewegungen festzustellen, die wiederum auf einer anderen Datengrundlage beruht.

Doornenbal & Stevenson (2010) zeigen auf Basis einer Kompilation in mehreren Karten die känozoische Entwicklung für das zentraleuropäische Beckensystem und bieten somit eine Basis für Rückschlüsse auf großräumige Vertikalbewegungen. Ebenfalls weisen verschiedene stratigrafische und paläogeografische Übersichtsstudien zum Känozoikum (Sissingh 2006A & B, Berger et al. 2005, Sissingh 2003) Bereiche von Abtragung und Ablagerung aus, jedoch meist ohne Angabe von Beträgen. Meist sind publizierte Ergebnisse zur Abtragung und Vertikalbewegungen auf einzelne Lokationen und Strukturregionen bezogen (u. a. Paul 2019, von Eynatten et al. 2019, Tanner & Krawczyk 2017, Klein et al. 2016, König 2008, von Eynatten et al. 2008, Adriasola Muñoz 2007, Voigt et al. 2004). Folgend wird insbesondere auf Regionen mit deutlicher neogener Hebung und Abtragung im Detail eingegangen und auf aktuelle Literatur dazu verwiesen:

Für den Bereich der Alpen und des Alpenvorlandes gibt es neuere Vermessungen der Höhenänderung auf Basis von GPS-Satelliten und Stationen (Sánchez et al. 2018, Nocquet et al. 2016, Serpelloni et al. 2016). Diese weichen ebenfalls von den Daten des BKG und der Karte von Frischbutter & Schwab (2001) ab. Sowohl zur Hebungs- und Deformationsgeschichte als auch für zukünftige Bewegungen ist für den Alpenraum deutlich mehr als für die restlichen Gebiete Deutschlands publiziert (u. a. Liao et al. 2018, Le Breton et al. 2017, Ortner et al. 2015). Ein großer Teil der Publikationen in den letzten Jahren analysiert die Denudation und lokale Erosion (zum Beispiel entlang von Flüssen) unter Verwendung von Oberflächenexpositionsdatierung und Thermochronologie (Kapitel 2.2 & 2.3) um daraus auf die Wechselwirkung zwischen exogener Abtragung und endogenen Prozessen zu schließen (Klotz et al. 2019, Legrain et al. 2015, Wölfler et al. 2012, Cederbom et al. 2011, Champagnac et al. 2009, Vernon et al. 2008, Wittmann et al. 2007). Unter Anderem darauf basierend werden intensive Diskussionen über die möglichen ursächlichen Prozesse geführt (u. a. Cederbom et al. 2011, Schlunegger & Mosar 2011). Insbesondere ist jedoch eine aktuelle, kontrovers geführte Diskussion über den Anteil glazialer Isostasie an der Gesamthebung der Alpen hervorzuheben (Sternai et al. 2019, Mey et al. 2016).

Oberheingraben, Schwarzwald, Schwäbische Alb: Das aktuelle Hebungs- und Senkungsverhalten des Rheingraben und umgebender Regionen wird in Fuhrmann et al. (2015 & 2013) auf Basis einer Kompilation bzw. Vergleich von GPS (mit 80 Feststationen (GURN)), InSAR-Daten, sowie Nivellment-Wiederholungsmessungen im Abstand von ca. 25 Jahren seit 1922 dargestellt.

Die Hebungsgeschichte des Schwarzwald und zu erwartende zukünftige Hebungsraten in der Region werden umfassend in einer Antwort im Kontext des Technischen Forum Sicherheit (Frage 122: Einfluss der Schwarzwald-Hebung auf die Standortgebiete in der Nordschweiz und südlich angrenzender Gebiete) durch das ENSI (Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat) beantwortet (ENSI 2015). Eine umfassende Betrachtung des Themas Hebung und Abtragung der Region Nordschweiz und Südwestdeutschland sind dem NAGRA-Bericht NTB 02-03 (2002; Kap. 8.3) und Müller et al. (2002, NTB 99-08) zu entnehmen.

Weiterhin wurden für die Region in den letzten Jahren verschiedene Studien auf Basis geomorphologischer Untersuchungen (Strasser et al. 2010) und kosmogener Nuklid-Datierung veröffentlicht (Wolff et al. 2018, Steinhofel et al. 2017, Morel et al. 2003). Die paläogeografische Entwicklung des Rheingraben vom Eozän bis ins Pliozän ist unter anderem aus Berger et al. (2005) und Schwarz & Henk (2005) zu entnehmen. Laubscher (2003 & 1992) sowie Ziegler & Fraefel (2009) geben einen Überblick über die Entwicklung des Faltenjura und die damit einhergehenden Änderungen im Drainagesystem. Auch wenn die Hebungs- und Senkungsgeschichte der Region relativ gut bekannt ist, so wird die Ursache für die Hebung im Bereich des Schwarzwald und der Vogesen nach wie vor kontrovers diskutiert (u. a. Rotstein & Schaming 2011 & 2010, Ziegler & Dezes 2007).

Eifel, Ardennen, Rheinische Masse: Neben dem Alpenraum wurden insbesondere die Eifel und umgebende Bereiche in den letzten Jahrzehnten intensiver auf Vertikalbewegungen untersucht. Dabei werden Aussagen zu Vertikalbewegungen überwiegend auf Basis geodätischer Daten (Klein et al. 2016), geomorphologischer Analysen (u. a. Demoulin 2011, Sougnéz & Vanacker 2010, Demoulin et al. 2009, Hoffmann et al. 2007, Fischer 1987), Terrassenanalysen (Preuss et al. 2019) und Expositionsdatierungen (Meyer et al. 2010, Schaller et al. 2004) vorgenommen. So zeigen Garcia-Castellanos et al. (2000), kompiliert auf Basis von Meyer & Stets (1998) und van Balen et al. (2000), die Hebung der letzten 800.000 Jahre in der Region. Demoulin & Hallot (2009) stellen auf Basis von Flußprofil- und Terrassenanalysen ein Modell der Vertikalbewegungen mit deutlich geringeren Beträgen vor. In Demoulin et al. (2009) werden Abtragungsraten auf Basis von Berechnungen zu Flußeinschnitten, Ergebnissen zur interfluve Abtragung aus der Oberflächenexpositionsdatierung gegenübergestellt (Schaller et al. 2004). Dabei zeigen sich Unterschiede in den Exhumierungsraten von bis zu 13 mm/ka (Demoulin et al. 2009). Einige wenige Publikationen begründen ihre Aussagen zu Vertikalbewegungen der Region auf numerischen Modellen (Guillou-Frottier et al. 2007, Garcia-Castellanos et al. 2000). Ebenfalls sind zur Entwicklung des Rheins und zu seiner heutigen Flussfracht (derzeitige Abtragung) verschiedene Publikationen veröffentlicht (u. a. Frings et al. 2019, Peeters et al. 2015, Preusser 2008).

Bayerischer Wald, Fichtelgebirge, Böhmisches Massiv & süddeutsche Großscholle:

Für die Region wurde seit der Jahrtausendwende nur wenig zur Känozoischen Hebung- und Exhumierungsgeschichte veröffentlicht. Ende der 1990er wurden mit Bezug auf die KTB Tiefbohrung verschiedene tektonische Analysen durchgeführt, die ein grobes Bild der Entwicklung der Region im Känozoikum zulassen (Schröder & Peterek 2001, Peterek et al. 1997, Peterek & Schröder 1997). Die vorangegangene kretazische Hebungsepisode ist dagegen in der Region durch verschiedene thermochronologische Studien gut gefasst (u. a. Vamvaka et al. 2013, Wagner et al. 1997). Für die östlich angrenzende Böhmisches Massiv wurde die Känozoische Hebungsgeschichte und Topografiebildung überwiegend auf Flussnetz- und Terrassenanalysen aufgebaut (u. a. Pánek & Kapustová 2016, Popotnig et al. 2013, Tyráček et al. 2004 & 2001). Für wenige größere Flüsse (Neckar, Regen) wurden auch Erosionsraten basierend auf kosmogenen Nukliden ermittelt (Schaller et al. 2001). Grobe qualitative Herleitungen der Känozoischen Hebung des Bayerischen Waldes basieren unter anderem auf der Analyse geomorphologischer Strukturformen (Eitel 2002).

Thüringer Wald, Erzgebirge, Harz, Thüringer Becken: Studien auf Basis moderner geomorphologischer Methoden und Expositionsdatierung sind in diesen Regionen bis jetzt nicht verfügbar. Das kretazische Hebungseignis ist jedoch durch eine Vielzahl thermochronologischer, sedimentologischer und tektonischer Analysen gut erfasst (u. a. von Eynatten et al. 2019, Tanner & Krawczyk 2017, Beyer 2015, Coubal et al. 2015, Kley 2013, Ventura et al. 2009, von Eynatten et al. 2008, Lange et al. 2008, Voigt et al. 2004). König (2008) gibt eine umfassende Zusammenfassung zu einer Vielzahl geomorphologischer Studien zu Känozoisch eingestuften Rumpfflächen im Harz. Die Mehrdeutigkeit der Ergebnisse dieser Publikationen lässt jedoch keine eindeutigen Schlüsse zu. König (2008) diskutiert daher auf Basis der Analyse von tertiären Restsedimenten im Harz dessen mögliche Hebungsgeschichte. Paul (2019) führt eine Diskussion ob es überhaupt eine Hebung des Harzes im Quartär und spätem Jungtertiär gab und erklärt relative Höhenunterschiede gleicher Stratigrafien mit Subrosion im Untergrund. Neben neueren Beschreibungen zur Flussentwicklung der Elbe (Lange 2012) ist nur noch deutlich ältere Literatur verfügbar. So diskutiert Steinmüller (1992) zum Beispiel die Entwicklung des Fließnetzes und des Reliefs der Region. Wagenbreth (1972) beschreibt auf Basis von tertiären Kaolinvorkommen die tektonische Verkipfung des Reliefs. Rausch (1996) schließt auf Basis von Geröllanalysen im Weser Flusssystem auf die spätquartäre Denudation.

Hessisches Bergland und Osnig: Für diese Regionen wurde keine neuere, weiterführende Literatur zu Känozoischen Vertikalbewegungen gefunden, als die zuvor erwähnten Übersichtstudien zum zentraleuropäischen Beckensystem (Doornenbal & Stevenson 2010, Sissingh 2006A & B, Sissingh 2003).

Deutsche Nord- & Ostsee und deren Küstenregionen: Da die meisten Studien auf die Hebungsgeschichte des Fennoskandischen Schildes fokussiert sind, wird Deutschland nur randlich betrachtet (u. a. Steffen & Wu 2011, Steffen 2006). Die quartäre bis rezente Hebungs- und Senkungsgeschichte in der deutschen Nordsee zeichnet sich durch eine Überlagerung von glazialisostatischen, hydrostatischen Effekten und Salzumverteilung im Untergrund aus (Vink et al. 2007). Arfai et al. (2018) beschreiben im äußersten Nordwesten der deutschen Nordsee eine anormal hohe quartäre Subsidenz und diskutieren mögliche Ursachen. Seibold & Seibold (2012) geben Beispiele für die Änderung der Hebungsrate entlang der Ostseeküste seit dem letzten glazialen Maximum und zeichnen damit ein deutliches Bild der Abnahme der Bewegungen bis heute.

6.3 mögliche ergänzende Datengewinnung und Forschungsvorhaben

Eine **quantitative** Prognose großräumiger Vertikalbewegungen, für die nächsten 1 Mio. Jahre in Deutschland, und insbesondere die detaillierte Charakterisierung von Teilgebieten, wird verschiedene Arten der Modellierung (statisch & dynamisch) erfordern. Zur Bestimmung notwendiger Eingangsparameter und anzunehmender Randbedingungen dieser Modelle, zur weiteren Überprüfung und Verifizierung, als auch zur Abschätzung der Fehler und Bandbreiten daraus gewonnener Prognosen braucht es eine möglichst gut gesicherte Datenbasis. Das umfasst im Fall der Prognose von Vertikalbewegungen und Denudation ein breites Spektrum an geologischen und geophysikalischen Informationen zum Untergrund Deutschlands und Mitteleuropas, für die bis dato meist nur **qualitative** flächige Aussagen oder Abschätzungen möglich sind. Für präzisere flächendeckende Aussagen zu Hebungen über die qualitative Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ hinaus oder für eine Detaillierung in ausgewählten Teilgebieten werden folgende Empfehlungen für eine ergänzende Datengewinnung im Rahmen von Forschungsvorhaben gemacht:

Geodätische Daten: Natürlich sind die Fortschritte in den letzten Jahren bei der Satellitengeodäsie ein gutes Vorzeichen für den Erkenntnisgewinn zu Vertikalbewegungen. Jedoch werden die notwendigen Zeitreihen aller Voraussicht nach in ihrer Länge niemals ausreichend sein, um als alleinige Grundlage für die Bewertung von Vertikalbewegungen über hunderttausende oder Millionen von Jahren zu dienen. Nach wie vor sind geodätisch gemessene Vertikalbewegungsraten nur selten mit aus geologischen Analysen ermittelten Bewegungsraten des Quartär und Jungtertiär in Einklang zu bringen. Selbst bodengestützte Messungen zeigen teils noch deutliche Abweichungen zu satellitengestützten Aussagen zur Bodenbewegung (u. a. Kuzmin 2017); vermutlich auch ein Effekt unterschiedlich gewählter Reduktionen auf die Datensätze (Groten 2003). Eine flächendeckende, hochauflösende, gesicherte, geodätische Datenbasis als auch eine gut gestützte Trennung nach einzelnen

Komponenten dieser Vertikalbewegungen, würde ein deutlich klareres widerspruchsfreies Bild rezenter Bewegungen und ein besseres Verständnis der kurzzeitigen Schwankungen ermöglichen (z. B. der für den Bodenbewegungsdienst Deutschland erstellte SAPOS-Datensatz (Lege et al., 2019)). Auch gilt es, verschiedene unabhängige Messmethoden wie InSAR und bodengestützte (u. a. van Camp 2011) als auch satellitengestützte Absolutschweremessungen (u. a. Steffen et al. 2009) und daraus gezogene Schlüsse verstärkt miteinander zu vergleichen und in Einklang zu bringen. Bis jetzt publizierte Karten und Datensätze zu Vertikalbewegungen sind teils noch sehr widersprüchlich oder zeigen nur Teilregionen Deutschlands (u. a. Sternai et al. 2019, Sánchez et al. 2018, BKG 2019, Frischbutter & Schwab 2001). Der Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) wäre eine mögliche Stelle, die mit den notwendigen Kapazitäten Analysen und Forschungen zu endogenen und exogenen Einflüssen auf die Vertikalbewegungen Deutschlands koordinieren und vorantreiben könnte.

Flächendeckende Karten/Modelle von Leithorizonten des Quartär und Jungtertiär mit Angabe von Tiefenlage, Mächtigkeit, Fazies und Alter: Viel wäre schon gewonnen, wenn die Daten zum Quartär und Jungtertiär von Deutschland, die durch die geologischen Dienste und Studien der Universitäten in den letzten Dekaden erhoben wurden zusammengetragen, harmonisiert und kompiliert werden würden. Solch eine Kartengrundlage existiert bis jetzt nicht für Deutschland und wenn, dann nur in Teilregionen der einzelnen Bundesländer. Mit flächenhaften Informationen über Fazies, Alter, Mächtigkeit, Tiefen- und Höhenlage von quartären und jungtertiären Leithorizonten könnte zumindest für Becken, Gräben und Plattformgebiete ein sehr viel deutlicheres Bild über Dimensionen und Beständigkeit von Bewegungsraten der letzten Jahrtausende dargestellt werden. Auch in Mittelgebirgslagen sind teils Residuen tertiärer Sedimente, zum Beispiel als Dolinenfüllung, erhalten, deren genaue Analyse und Datierung neue Erkenntnisse über die Hebung der Mittelgebirge liefern könnte.

Neudatierung quartärer bis jungtertiärer Ablagerungen und Vulkanite als auch von Rumpfflächen: Viele Datierungen und Altersangaben zum Quartär und Jungtertiär sind regional aufgrund veralteter, nicht mehr zeitgemäßer Ansätze zu hinterfragen. Eine systematische Datierungskampagne, unter anderem mit Niedrigtemperaturdatierungsmethoden und Oberflächenexpositionsdatierung (siehe Kap. 2.2 & 2.3), zu unterbestimmten oder kontrovers diskutierten quartären, tertiären Ablagerungen und Vulkaniten wäre sowohl für Fragestellungen des Vulkanismus als auch zur zeitlichen Eingrenzung von Vertikalbewegungen von großem Interesse. So zeigen Preuss et al. (2019) am Beispiel der Oberen Terrassengruppe im Oberen Mittelrheintal die Unschärfen bei der zeitlichen Zuordnung von Flussterrassen ohne absolute Altersangaben, und dass Unterschiede in der quartären Zuordnung der Terrassen zu anderen Autoren mehrere hunderttausend Jahre betragen können.

Im Großteil der deutschen Mittelgebirge zeigen sich auf verschiedenen Höhen vielfach Verebnungsflächen, die Abtragungsprozesse andeuten, die scheinbar unbeeindruckt von lithologischen Wechsellagen und Vorzugsflächen der Gesteine wirkten. Mögliche Erklärungen für diese sogenannten Rumpfflächen (peneplains) sind: marine Abrasion, Endstadium des Davisschen Zyklus der fluvial gesteuerten Formentwicklung, „Doppelte Einebnung“ und Pedimentierung (Ahnert 1996, Felix-Henningsen 1990, Büdel 1981). Entlang dieser Flächen finden sich teils mächtige Saprolithe: in vermutlich warm-humidem Klima chemisch, tiefenverwittertes Gestein (Valeton 1983). Aus der Kenntnis der Alter dieser Flächen und deren Höhenlage könnte man Abschätzungen zur Hebung dieser Regionen machen. Die Deutung dieser sogenannten Rumpfflächen wird schon seit weit über 100 Jahren vorgenommen. König (2008) beschreibt die Geschichte der mehrfachen Umdeutung dieser Flächen für den Harz und gibt einen guten Einblick über die Mehrdeutigkeit der vorhandenen Resultate. Eitel (2002) beschreibt das Flächensystem des Bayerischen Waldes und verweist auf nicht gut gesicherte Deutungen der höchst gelegenen Rumpfflächen als jurassisch-kretazische Bildungen. Tiefergelegene Geländestufen bei ca. 750 m über dem heutigen Meeresspiegel werden dem Oligozän zugerechnet. Datierungen die möglicherweise an Gesteinsalterationen oder Fluideinschlüssen als auch an Sedimentresiduen möglich wären wurden bis jetzt noch nicht systematisch durchgeführt. Wenn eine quantitative Datierung von Rumpfflächen gelingt, könnte man die Hebungs- und Abtragungsgeschichte der deutschen Mittelgebirge substantieller belegen.

Kompilation geomorphologischer Studien: Zusammen mit den zuvor gemachten Vorschlägen zur Neudatierung und Kartierung quartärer und jungtertiärer Sedimente erscheint eine Kompilation verschiedener geomorphologischer Studien für Deutschland sinnvoll. So könnte die Zeitlichkeit und Geschwindigkeit erosiver Prozesse, als auch die Entwicklung des deutschen Flussnetzes besser dargestellt werden. Neben den zuvor genannten Rumpfflächen gibt es eine Vielzahl weiterer geomorphologischer Auffälligkeiten die durch interdisziplinäre Ansätze vermutlich konsistenter zu deuten wären. Ein prominentes Beispiel ist die Entwicklung des Rhein-Donauentwässerungssystems welches im engen Zusammenhang mit der Hebung der Schwäbischen Alb und dem Rheinischen Massif (u. a. Preuss et al. 2019, Yanites et al. 2013, Demoulin & Hallot 2009) steht, aber auch die Entwicklung der Elbe (Lange 2012) zeigt den starken Einfluss von Hebung und Senkung auf die Flussnetzentwicklung. Eine bessere zeitliche Eingrenzung der Entstehung von tiefen Tälern in den deutschen Mittelgebirgen wie dem Harz und thüringischen Schiefergebirge und ein verbessertes Prozessverständnis (u. a. Wolff et al. 2018, Strasser et al. 2010, Demoulin et al. 2009, Steinmüller 1992) würde ebenfalls ein klareres Bild über die Schwankungsbreite der Denudation liefern.

Catchment (Flusseinzugsgebiet) – Studien/kosmogene Nuklide – Karten der Denudation für Deutschland: In den letzten Jahren wurden auf Basis der Analyse von kosmogenen Nukliden verschiedene Flusseinzugsgebiete insbesondere in Süddeutschland (u. a. Wolff et al. 2018, Morel et al. 2003, Schaller et al. 2001) und im Rheinischen Massif (u. a. Rixhon et al. 2011) untersucht, Abtragungsraten für die letzten Jahrtausende bestimmt und mit heutigen Flussfrachten verglichen. Große Teile von Deutschland sind dagegen noch nicht mit dieser Analyseverfahren bearbeitet. Eine Kompilation aller bestehenden Ergebnisse zu Abtragungsraten auf Basis kosmogener Nuklide in Verbindung mit Analysen an noch nicht untersuchten Flusssystemen (z. B. Elbe, Saale, Werra, Fulda, Leine, Weser) würde flächendeckende Aussagen zur zukünftigen Abtragung enorm stützen. Insbesondere wäre zu prüfen, inwiefern die Abtragungsraten in den heutigen Mittelgebirgslagen sich zu den weniger stark gehobenen Gebieten unterscheiden.

Manteltomografische, gravimetrische und refraktionsseismische Studien: Wie unter anderem im Kapitel 4 aufgezeigt, bedingt ein besseres endogenes Prozessverständnis ein besseres Abbild der Oberkruste, als auch der gesamten Lithosphäre. Das gilt nicht nur für Prognosen zukünftiger Hebungen, sondern auch für die Prognose von zukünftigem Vulkanismus und Seismizität. Viele Strukturen, die durchaus wesentlich für den Aufstieg von Fluiden und Magma in der Kruste sein können oder auch scheinbare lineare Häufungen von seismischen Ereignissen erklären könnten, müssen nicht zwingend an der heutigen Oberfläche ihren Ausdruck finden, sind aber in hochauflösenden Darstellungen der Bouguer-Schwere (Ekinici & Yiğitbaş 2015, Moreno et al. 2015, Everaerts & De Vos 2012) oder in refraktionsseismischen Daten (u. a. DEKORP-Basin Research Group 1999) häufig erkennbar. Die meisten Theorien und Modelle zum Wirken endogener Prozesse in einer Region basieren zudem auf Annahmen aus manteltomografischen und tiefenseismischen Experimenten. Die große Schwankungsbreite der publizierten Ergebnisse zur MOHO (u. a. Molinari & Morelli 2011, Grad et al. 2009) oder Lithosphären-Asthenosphärengrenze (u. a. Meier et al. 2016, Jones et al. 2010) zeigt sehr deutlich, dass bei der Datenbasis noch große Fortschritte notwendig sind (u. a. Hetényi 2018b, Knapmeyer-Endrun et al. 2017, Meier et al. 2016, Jones et al. 2010). Internationale Kooperationen wie das AlpArray Seismic Network, zur besseren Darstellung des Alpenorogen und der Vorländer (u. a. Hetényi et al. 2018a & b), geben vor, wie etwaige Projekte für Deutschland aufgebaut werden könnten. So wäre durchaus eine Norderweiterung dieses Array sinnvoll. Auch neue refraktionsseismische Experimente entsprechend der DEKORP Linien oder die einheitliche Reprozessierung vorhandener Daten mit modernen Methoden würden sicherlich neue Erkenntnisse zur Krustenstruktur bringen. Besonders erwähnenswert sind auch Fortschritte bei der gravimetrischen Auflösung des Untergrundes. So zeigen Analysen in Nachbarländern sehr eindrucksvoll den Erkenntniszuwachs zum tieferen Untergrund durch höher auflösende gravimetrische Daten (u. a. Moreno et al. 2015, Everaerts & De Vos 2012, Meurers & Ruess 2009).

Vergleichende globale tektonische Analysen: Eine althergebrachte, doch selten umfassend angewandte Methode der Geowissenschaften ist der Vergleich des eigenen lokalen/ regionalen Untersuchungsgebietes mit ähnlichen Situationen andernorts. So gibt es weltweit durchaus einige Intraplatten-Regionen (z. B. Nord- und Südamerika, Asien) deren Entwicklungsgeschichte uns wichtige Informationen zu möglichen Schwankungsbreiten exogen und endogen wirkender Prozesse für Mitteleuropa liefern könnte.

7 Vorschläge zur Kategorisierung und flächigen Darstellung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur Kategorisierung einer deutschlandweiten Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ nach § 22 II Nr. 1 (StandAG 2017) vorgestellt. Ebenfalls werden mögliche Darstellungsarten, für die Ausweisung des Kriteriums als Karte, beschrieben. Kategorisierung wird in diesem Zusammenhang als Unterteilung in verschiedene Ausweisungsklassen verstanden, sowie der zusätzlichen Beschreibung der Festlegung dieser Klassen und ihrer Bedeutung. Die scheinbar einfachste durchzuführende Ausweisung wäre in Gebiete, wo das Ausschlusskriterium erfüllt ist und wo nicht. Jedoch zeigt sich die Ausweisung im Detail als deutlich komplexer. Fragen die sich bei einer räumlichen Ausweisung ergeben sind zum Beispiel:

- Wie definiert man eine Kategorie im Detail?
Bedeutet ein ermittelter Wert von 999 m/Mio. a Gesteinshebung, dass das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ nicht erfüllt ist? Oder wie lassen sich methodische Unschärfen bei der Kategorisierung und Ausweisung mitberücksichtigen?
- Welcher Parameter wird für die Ausweisung genutzt? Bezieht man sich auf die prognostizierte Oberflächenänderung über die Zeit? Bezieht man sich auf die prognostizierte Abtragung? Oder nutzt man für die Ausweisung „großräumiger Vertikalbewegungen“ die prognostizierte Gesteinshebung? (siehe dazu auch Kap. 1.4)
- Wie gestaltet man den Übergang zwischen zwei Kategorien auf einer Karte? Diskret als Linie oder als fließender Übergang?
- Wie gewährleistet man bei einer flächigen Ausweisung, dass Gebiete mit unterschiedlicher Datenqualität und Datenquantität identifizierbar bleiben?
- Wie vermittelt man die räumliche Präzision einer Aussage (den Maßstab der Ausweisung)? Wie genau kann man den Einflussbereich eines endogenen Prozesses fassen?
- Wie gewichtet man verschiedene Informationen, die für eine Ausweisung zur Verfügung stehen? Vertraut man eher qualitativen Aussagen, die aus der Studie eines längeren Zeitraums gewonnen worden? Oder bezieht man sich auf Ergebnisse quantitativer Methoden, mit kurzen Meßreihen, die mit größeren Unschärfen in die Zukunft zu extrapolieren sind?

- Welche Dynamik ist für das zu prognostizierende System zu erwarten? Können Prognosen auf rezenten Messungen und Studien vergangener Prozessabläufe aufgebaut werden oder ist ein fundiertes Prozessverständnis rezent ablaufender Prozesse, deren Überlagerung und deren zukünftige Fortentwicklung entscheidender? Berücksichtigt man Prozesse in einer Prognose, die heute noch nicht nachweisbar sind?

Diese Fragen werden folgend nur andiskutiert, jedoch sollen die dargestellten Kategorisierungsansätze (Kap. 7.1 & 7.2) mögliche Lösungswege und Antworten aufzeigen. In Unterkapitel 7.3 wird ein exemplarisches Klassifikationsschema vorgestellt, welches die Aussagekraft unterschiedlich detaillierter Aussagen zur flächendeckenden Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ in Bezug zu einer geodynamischen Annahme und dem angestrebten Detailgrad darstellt. In Unterkapitel 7.4 werden, an den jeweiligen Detailgrad einer Ausweisung angepasste Möglichkeiten der Kartendarstellung von Vertikalbewegungen vorgestellt.

7.1 Kategorisierung einer Prognose zu zukünftigen Vertikalbewegungen unter Anwendung der Gleichung „Oberflächenhebung = Gesteinshebung – Exhumation“

Dieser Kategorisierungsansatz baut auf der Anwendung der im Unterkapitel 1.4 erläuterten Gleichung „**Oberflächenhebung = Gesteinshebung – Exhumation**“ auf.

Die Ergebnisse der in Kapitel 2 vorgestellten Methoden zur Charakterisierung von Vertikalbewegungen der Oberfläche und Abtragung/Exhumation werden bei diesem Ansatz über die zuvor genannte Gleichung in Bezug gesetzt. Die Gleichung zeigt auch, dass ein direkter Vergleich zwischen Methoden, welche die Oberflächenhebung messen und anderen, welche die Exhumation oder Abtragung ermitteln, nicht möglich ist.

Um einen Bezug zwischen Oberflächenhebung und Exhumation herstellen zu können, muss die Gesteinshebung auf Basis der wirkenden Prozesse abgeschätzt werden. Gesteinshebung als Parameter kann nur qualitativ, zum Beispiel aus Relativbezügen stratigrafischer Korrelationen, hergeleitet werden oder ist das Ergebnis aus numerischen Prozessmodellen. Erklärend dazu werden in Kapitel 4 endogene und exogene Prozesse vorgestellt, sowie deren Einfluss auf die maximal denkbare Gesteinshebung, die Geschwindigkeit der Hebung und die Wellenlänge (laterale Strukturausdehnung). Kapitel 3 gibt zudem einen Überblick über Dauer, Intensität und Einflussbereich von in der mesozoischen und känozoischen Vergangenheit Mitteleuropas abgelaufenen Hebungs- und Senkungsvorgängen. Unter der Annahme, dass man die dominierenden endogenen und exogenen Prozesse für

Intrakontinentalbereiche beschreiben kann und diese über den Betrachtungszeitraum stabil abgelaufen sind oder zukünftig werden, ist eine qualitative Abschätzung der durch diese Prozesse hervorgerufenen Vertikalbewegung möglich. Dadurch ergibt sich folglich die Möglichkeit ermittelte Vertikalbewegungen der Oberfläche mit Analysen zur Abtragung und Exhumation zu vergleichen.

Qualitative Erkenntnisse über Relativbewegungen auf Basis geomorphologischer oder strukturgeologischer Analysen (Kapitel 2.1) könnten den zuvor genannten Vergleich zusätzlich stützen. Da jeder Parameter in der oben genannten Gleichung, als auch die zugrundeliegenden Analysen selbst, wiederum von weiteren Parametern abhängen, würde sich als Ergänzung zu dem vorgestellten Datenvergleich eine Sensitivitätsanalyse anbieten (z. B. Monte-Carlo).

Die anschließende Kategorisierung könnte in Bereiche unterscheiden/ausweisen, wo die zuvor genannte Gleichung lösbar ist (unabhängige Analysen zur Oberflächenhebung und Exhumation sind im Bezug zur abgeschätzten Gesteinshebung vergleichbar – hohe Aussagekraft der Messdaten für diese Regionen) und in Bereiche, wo die Gleichung Diskrepanzen aufzeigt. Letzteres wäre gleichbedeutend damit, dass man die Zusammenhänge für diese Region noch nicht vollends erfasst/verstanden hätte. Eine Verknüpfung mit einer stochastischen Methode wie der Monte-Carlo-Simulation würde noch zusätzliche Abstufungen in der Ausweisung ermöglichen, zum Beispiel nach der Streuung von Ergebnissen von unterschiedlichen Studien der gleichen geowissenschaftlichen Disziplin (z. B. Geodäsie) oder nach Unschärfen der Eingangsdaten. Regionen in denen ähnliche methodische Ansätze oder wiederholte Messungen zu einem ähnlichen Ergebnis führen, sind natürlich mit einer höheren Konfidenz zu belegen, als diese wo verschiedenen Messergebnisse konträr zueinanderstehen. Die Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ würde in einer weiteren Kartenebene erfolgen und Bereiche ausweisen, die nach den Messungen unterhalb oder oberhalb des Ausschlusskriterium liegen. Als Resultat hätte man eine Ausweisung nach Ausschlusskriterium mit zusätzlicher Angabe der Konfidenz der regionalen Ausweisung.

Auch wenn man durch diesen Analyseweg eine Möglichkeit geschaffen hat methodenübergreifend zu vergleichen, so bleibt doch die Herausforderung, dass Messungen rezenter Höhenänderungen mit geodätischen Methoden nur kurze Zeiträume betrachten und die endogene Komponente in den gemessenen Datensätzen häufig nicht sicher zu fassen ist. Änderungen der Absoluthöhe in kurzen Zeiträumen können sowohl durch exogene oder auch durch Prozesse im flachen Untergrund hervorgerufen sein (z. B. Grundwasserschwankungen). Mit den längeren Betrachtungszeiträumen anderer Methoden (z. B. Thermochronologie, kosmogene Nuklide), von hunderten bis Millionen Jahre, verlieren auch starke kurzfristige bis mittelfristige Schwankungen häufig an Bedeutung gegenüber stetig ablaufenden Prozessen mit niedrigeren Bewegungsraten.

7.2 **Betrachtung nach potentiell zugrundeliegenden Prozessen**

In Tabelle 4-1 sind diejenigen Prozesse mit aufgeführt, die das Potential besitzen Hebungsbeiträge über mehrere hundert Meter und mehr in 1 Million Jahre zu generieren. Ob diese Prozesse 1000 m Gesteinshebung in einer Million Jahre erreichen können, mit anderen Prozessen kombiniert wirken oder zukünftig wirken könnten, wird in Kapitel 4 & 8 andiskutiert.

Unter der Annahme eines gleichbleibenden oder einem sich nur sehr langsam ändernden geodynamischen Rahmens innerhalb der nächsten 1 Million Jahre, könnte man eine Ausweisung auch bezogen auf eine Modellierung der in Kapitel 4 aufgeführten Prozesse durchführen. Wie in Kapitel 6 erläutert, ist die Datenbasis jedoch derzeit noch nicht ausreichend, um Modelle für genaue **quantitative** Zukunftsprognosen zu erstellen. Qualitative Aussagen sind für diese generalisierte Annahme wahrscheinlich möglich. Jedoch müsste zuvor Konsens bei den Vorstellungen zu wirkenden Prozessen hergestellt werden (Kap. 4).

Unter der Annahme einer starken Änderung in der exogenen oder endogenen Dynamik könnte man vermutlich noch eine qualitative Ausweisung der maximal möglichen Raten einzelner anzunehmender Prozesse (z. B. Aufschiebungstektonik) machen. Diese Ausweisung wäre natürlich mit großen Unschärfen belegt. Jedoch ist zu erwähnen, dass gerade endogene Prozesse einer gewissen Trägheit unterliegen. Dies bedeutet, dass die Annahme eines endogenen Prozesses der plötzlich in Kraft tritt und schon am Anfang seines Wirkens maximal mögliche Bewegungsraten hervorbringt, unrealistisch ist. Somit müsste man, wenn sich dieser Prozess oder Wechsel im tektonischen Regime sich jetzt noch nicht andeutet für die nächsten 1 Million Jahre eine nicht klar definierte Übergangszeit mit einkalkulieren. Daraus würde sich ergeben, dass man für Prozesse die jetzt noch nicht für Regionen klar in Erscheinung treten auch nicht die maximal mögliche Gesteinshebung für die nächsten 1 Million Jahre annehmen kann.

In den folgenden Unterkapiteln 7.3 & 7.4 werden jeweils Vorschläge für ein Kategorisierungsschema und für Darstellungsformen für eine flächendeckende Ausweisung gemacht.

7.3 Vorschlag für ein Kategorisierungsschema zu großräumigen Vertikalbewegungen

Wie zuvor erwähnt hängt die Aussagekraft einer Ausweisung von Vertikalbewegungen ganz entscheidend von geodynamischen und klimatischen Modellannahmen (geodynamisches Szenario) ab. Mit dem Grad der Unterbestimmtheit des jeweils zugrundeliegenden geodynamischen Modells oder mit dem fehlenden Prozessverständnis sinkt auch die Aussagekraft der Zukunftsprognose. Ebenfalls sinkt in der Regel mit Zunahme im Detailgrad der Ausweisung oder Aussage (verschiedene Detailgrade der Ausweisung) auch die Konfidenz dieser Ausweisung (Abb. 7-1). Je höher der Detailgrad einer Ausweisung von Vertikalbewegungen desto größer muss die räumliche Präzision und Genauigkeit des Prognosemodells sein. Die Genauigkeit eines Modells lässt sich jedoch nur erhöhen, wenn man die zugrundeliegende Datenbasis verbessern und verifizieren kann, zum Beispiel durch einen Vergleich unabhängiger Methoden wie in Unterkapitel 7.1 beschrieben.

Die zuvor beschriebenen Zusammenhänge werden folgend in einem generalisierten Schema (Abb. 7-1) dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung der vorgenommenen Unterteilung nach verschiedenen Aussagen erfolgt in Tabelle 7-1. Die hier vorgestellte Unterteilung ist eine unter mehreren gleich plausiblen Unterteilungsmöglichkeiten. Es soll jedoch hier illustrativ ein fließender Übergang von einer eher qualitativen Ausweisung zu einer quantitativen abgebildet werden. Im Folgenden werden vorgenommene Unterteilungen mit qualitativen Begriffen umschrieben um Abstufungen in der Konfidenz und Güte einzelner Aussagen, Szenarios oder Detaillierungsgrade zu verdeutlichen. Dabei werden die zur Beschreibung gewählten Begrifflichkeiten **höchst wahrscheinlich**, **wahrscheinlich**, **vermutlich** und **möglicherweise** nicht im statistischen Sinn oder entsprechend der Verwendung in der Szenarienanalyse der Endlagerung (ESK 2012) angewendet, sondern in einer absteigenden Folge empirischer Abgrenzungen.

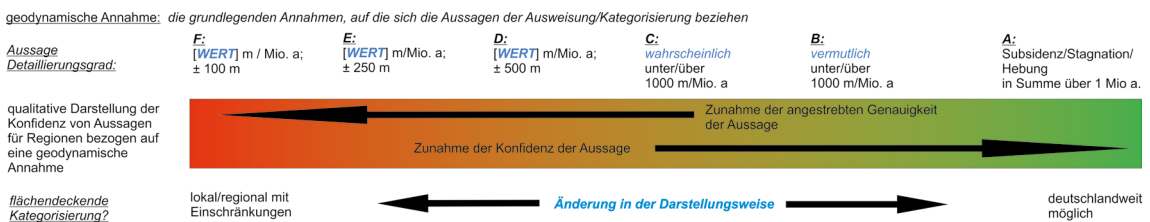


Abb. 7-1: Vorschlag für ein Kategorisierungsschema für eine Ausweisung großräumiger Vertikalbewegungen. Die zu treffenden Aussagen (verschiedene Detailgrade der Ausweisung) und die darauf basierende flächenhafte Darstellung beziehen sich auf eine zugrundeliegende geodynamische Modellannahme. Die Konfidenz der folgenden flächendeckenden Ausweisung der Prognose von Vertikalbewegungen für 1 Million Jahre hängt letztlich vom Detaillierungsgrad der Aussage, der gewählten Darstellungsform (Kapitel 7.4) und den Unschärfen der zuvor getroffenen geodynamischen Modellannahme selbst ab. Eine umfassendere Beschreibung der hier vorgenommenen Unterteilung in verschiedene Aussagen erfolgt in Tabelle 7-1. Die Verwendung der Begriffe vermutlich und wahrscheinlich soll in diesem Fall die Zunahme der Güte einer Aussage verdeutlichen.

Tab. 7-1: Beschreibung der in Abbildung 7-1 gemachten Aussagen (verschiedene Detailgrade der Ausweisung) zur flächendeckenden Ausweisung von Vertikalbewegungen. Die hier vorgestellte Unterteilung soll einen fließenden Übergang von einer eher qualitativen Aussage (A) zu einer quantitativen (F) abbilden. Die Verwendung der Begriffe vermutlich und wahrscheinlich soll in diesem Fall die Zunahme der Güte einer Aussage verdeutlichen.

Aussage zur Ausweisung von Vertikalbewegungen [Kurzform]	beschreibender Text zur Aussage
<u>A:</u> Subsidenz/Stagnation/Hebung in Summe über 1 Mio. a	Keine Angabe von diskreten Werten. In Summe senkt oder hebt sich die Region über den Zeitraum von 1 Million Jahre oder es kann von einem nahezu stabilen Zustand ausgegangen werden. Die Ausweisung der Gebiete für Senkung und Hebung darf sich räumlich überschneiden. Dies entspricht dann Gebieten mit geringen Hebungs- oder Senkungsraten.
<u>B:</u> vermutlich unter/über 1000 m/Mio. a	Keine Angabe von diskreten Werten. Qualitative Ausweisung von Regionen die <u>vermutlich</u> 1000 m/Mio. a Vertikalbewegung überschreiten. Diese Aussage entspricht der Angabe einer <u>Tendenz</u> für eine Region unter oder über 1000 m/Mio. a zu liegen. Dabei wird nicht unterschieden um wie viel das Ausschlusskriterium nicht erreicht oder übertroffen wird.
<u>C:</u> wahrscheinlich unter/über 1000 m/Mio. a	Keine Angabe von diskreten Werten. Qualitative Ausweisung von Regionen die <u>wahrscheinlich</u> 1000 m/Mio. a Vertikalbewegung überschreiten. Gebiete mit möglichen Vertikalbewegungen über 500 m/Mio. a und Werten von annähernd 1000 m/Mio. a sind mit vertretbaren Unschärfen ausweisbar. Diese Aussage entspricht der Angabe einer <u>Tendenz</u> für eine Region das Ausschlusskriterium zu erfüllen oder nicht. Es wird eine qualitative Unterscheidung nach Regionen mit stärkerer Senkung und Hebung vorgenommen.
<u>D:</u> [WERT] in m/Mio. a; ± 500 m	Quantifizierbare Aussage mit Angabe der Unschärfe. Wertbezogene Ausweisung von Gebieten mit Vertikalbewegungen über und unter 1000 m/Mio. a mit Angabe einer Unschärfe von 500 m/Mio. a. Das bedeutet das Hebungs- und Senkungsbereiche mit prognostizierten Werten über 500 m Senkung/Hebung pro Million Jahre potentiell auch das Ausschlusskriterium erfüllen könnten.
<u>E:</u> [WERT] in m/Mio. a; ± 250 m	Quantifizierbare Aussage mit Angabe der Unschärfe. Wertbezogene Ausweisung von Gebieten mit Vertikalbewegungen über und unter 1000 m/Mio. a mit Angabe einer Unschärfe von 250 m/Mio. a. Das bedeutet das potentielle Hebungs- und Senkungsbereiche mit prognostizierten Werten über 750 m Senkung/Hebung pro Million Jahre potentiell auch das Ausschlusskriterium erfüllen könnten.
<u>F:</u> [WERT] in m/Mio. a; ± 100 m	Quantifizierbare Aussage mit Angabe der Unschärfe. Wertbezogene Ausweisung von Gebieten mit Vertikalbewegungen über und unter 1000 m/Mio. a mit Angabe einer Unschärfe von 100 m/Mio. a. Das bedeutet das potentielle Hebungs- und Senkungsbereiche mit prognostizierten Werten über 900 m Senkung/Hebung pro Million Jahre potentiell auch das Ausschlusskriterium erfüllen könnten.

7.4 Darstellungsmöglichkeiten einer flächendeckenden Ausweisung von Vertikalbewegungen

Neben der gewählten Kategorisierung ist die Darstellungsart der Ausweisung von Vertikalbewegungen in einer Karte von großer Bedeutung. Die Darstellungsart muss so gewählt werden, dass Sie den Inhalt und den Detaillierungsgrad der Ausweisung des Kartenthemas (Kap. 7.3) widerspiegelt. Heutzutage werden Geoinformationen häufig in Karten mit flächendeckenden Farbverläufen dargestellt, in denen ein oder mehrere Parameter farbcodiert sind (u. a. Sánchez et al. 2018, Bruns et al. 2013). Dabei wird häufig fälschlicherweise eine gleich gute Datengrundlage und Prognosemöglichkeit über die gesamte Fläche impliziert. Dies sollte, wenn möglich bei der Ausweisung von endlagerrelevanten Themen vermieden werden. Folgend werden an Beispielen grundlegende Möglichkeiten der Darstellung von großräumigen Vertikalbewegungen entsprechend des in Unterkapitel 7.3 vorgeschlagenen Kategorisierungsschemas und der damit notwendigen Darstellung von Unschärfen vorgestellt.

7.4.1 Darstellung von jungtertiären bis quartären Hebungs- und Senkungsgebieten für Deutschland im Übersichtsmaßstab

Der Ausdruck endogener Prozesse an der Oberfläche ist abhängig von der Biegesteifigkeit der Lithosphäre und lässt sich am besten durch Kreis- und Ellipsenformen abbilden. Je mächtiger das durch den Prozess deformierte Intervall von Mantel und Lithosphäre ist, desto größer ist in der Regel auch sein Einflussbereich an der Oberfläche (Abb. 7-2). Auch die Amplitude der hervorgerufenen Hebung ist abhängig davon wie mächtig das in den Prozess miteinbezogene Intervall aus Kruste und Mantel ist (u. a. Cloetingh et al. 2005). Hebungen aufgrund von Aufschiebungstektonik, lassen sich am besten auf Karten als längliche, häufig lokal begrenzte Ellipsen generalisieren. Wohingegen mantle plumes sich am ehesten als Kreisformen generalisieren lassen.

Exogene Einflüsse sind meist durch gerichteten Transport (fluvial, marin, glazial, äolisch) oder durch großräumige Trends zu beschreiben. Dadurch sind die hervorgerufenen isostatischen Ausgleichsformen auch eher durch großräumige Trends zu beschreiben.

Vor einer Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ nach § 22 Absatz 2 Nr. 1 (StandAG 2017) durch die BGE bietet sich die Unterteilung von Deutschland in Gebiete, die sich in der jungtertiären-quartären Vergangenheit in Summe eher gehoben oder gesenkt haben, an (Abb. 7-1 & Tab. 7-1: „Aussage: Subsidenz/ Stagnation/Hebung in Summe über 1 Mio. Jahre“). Auf Basis einer generalisierten Karte von Deutschland mit den Gebirgshochlagen und Beckenbereichen (Abb. 7-2) werden in einem ersten Schritt die Bereiche, die sich im Jungtertiär bis Quartär gehoben und gesenkt haben mit Kreisen oder Ellipsen umrahmt (Abb. 7-3A).

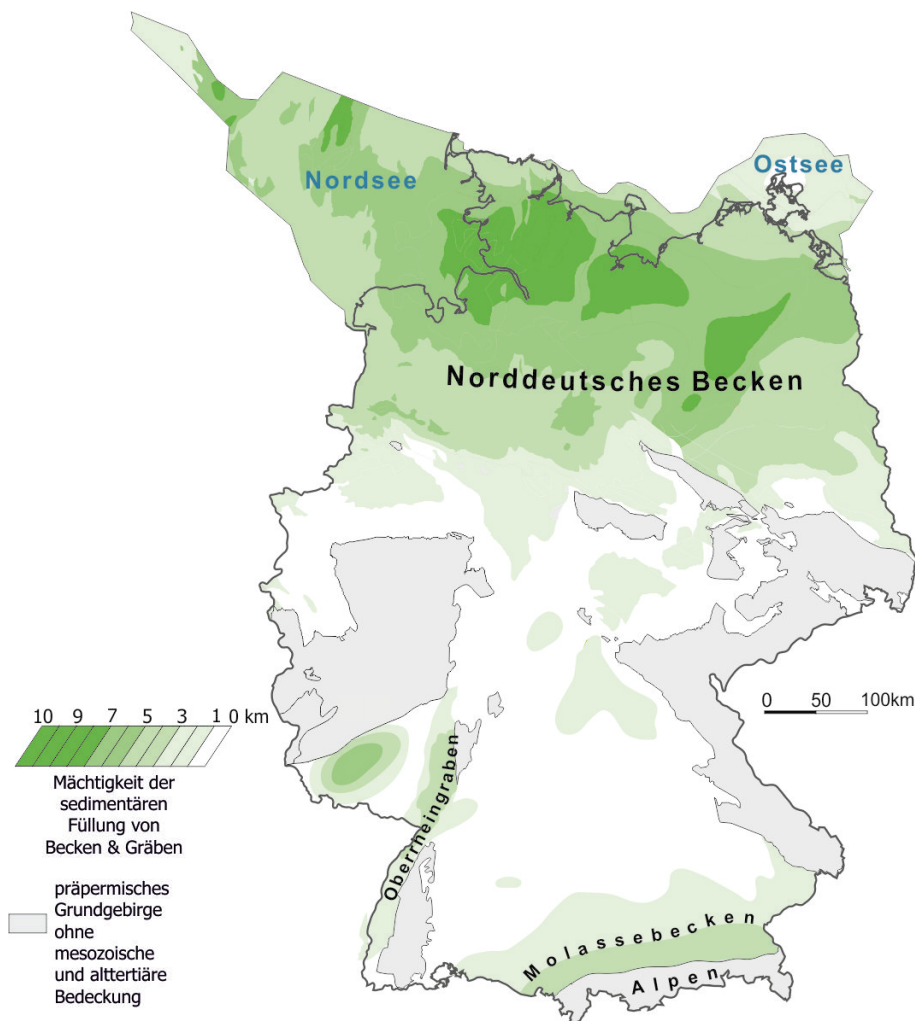


Abb. 7-2: Ausdehnung und Sedimentmächtigkeit spät-paläozoischer bis känozoischer Becken in Deutschland einschließlich der deutschen Sektoren der Nord- und Ostsee. Mittel- und Süddeutschland ist durch großflächige Abtragung mesozoischer Abfolgen gekennzeichnet. In Mittelgebirgsregionen ist an der Oberfläche großflächig das paläozoische und teils das präkambrische Grundgebirge anstehend.

Dabei überschneiden sich letztlich in einigen Regionen diejenigen gezeichneten Formen die Senkung andeuten mit denjenigen die Hebung andeuten. Das scheint in vielen Fällen tatsächlich auf Gebiete hinzuweisen, die in der jungtertiären Vergangenheit wahrscheinlich nur relativ geringe Hebungs- und Senkungsbewegungen zeigten (deutlich kleiner als 500 m Vertikalbewegung, vermutlich häufig < 250 m während des Neogen bis Heute). Abschließend werden, um zu einer finalen Übersichtsdarstellung zu kommen, diejenigen Ellipsen, die Hebung ausweisen miteinander verschmolzen und ebenfalls jene die Senkung ausweisen (Abb. 7-3B). Die dadurch entstandeneren komplexeren Verschnittformen von Hebungs- und Senkungsbereichen können ein Hinweis darauf sein, dass sich verschiedene, regional wirkende Prozesse in diesen Regionen überlagern. Jedoch kann das Abweichen von idealisierten Vorstellungen der Oberflächendeformation auch auf räumlich unterschiedliches Deformationsverhalten der Lithosphäre oder nicht klar zu fassende Abweichungen von idealisierten Vorstellungen zu Prozessen hinweisen.

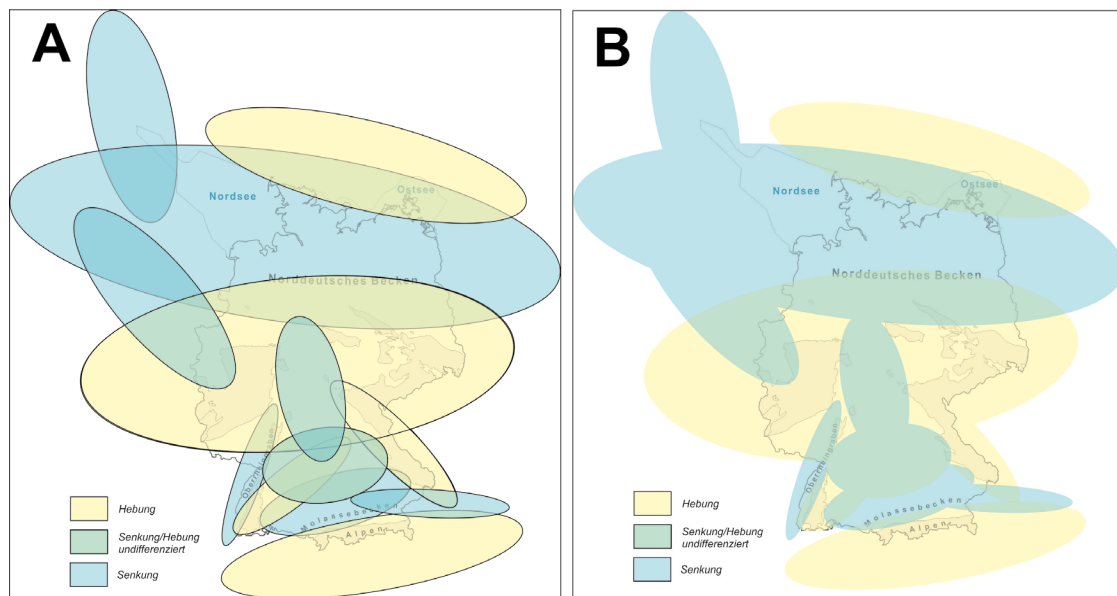


Abb. 7-3: Erstellung einer schematischen Kartendarstellung zu jungtertiären bis quartären Hebungs- und Senkungsbereichen Deutschlands (qualitative Klasseneinteilung ohne Beträge) auf Basis geometrischer Grundformen zur Verbildlichung des Abstraktionsgrades. (A) In einem ersten Erstellungsschritt werden Bereiche die sich im Jungtertiär bis Quartär gehoben und gesenkt haben mit Kreisen oder Ellipsen umrahmt. Dabei können sich die Ausweisungsellipsen überschneiden und Bereiche hervorheben, die über den gesamten Betrachtungszeitraum geringere Vertikalbewegungen zeigten (deutlich kleiner 500 m Hebung/Senkung). (B) In einem zweiten Schritt werden die Ausweisungsellipsen miteinander verschnitten.

Die Wahl von einfachen geometrischen Formen zur Ausweisung von Hebungs- und Senkungsregionen ist eine Möglichkeit den Abstraktionsgrad einer Übersichtsdarstellung einzuhalten. Auch werden durch diese Generalisierung Gebiete ähnlicher großräumiger Vertikalbewegungen und vermutlich auch die Einflussgebiete zugrundeliegender endogener Prozesse hervorgehoben. Die einzelnen „Ausweisungsellipsen“ in Abbildung 7-3 sind bewusst nicht auf Deutschland beschnitten, um zu verdeutlichen, dass die Regionen gleicher/ähnlicher Vertikalbewegungen und somit vermutlich auch die Einflussbereiche von ablaufenden endogenen Prozessen eher im mitteleuropäischen Kontext auf kontinentaler Skala zu untersuchen sind und nicht nur bezogen auf Deutschland.

7.4.2 Vorschläge zur Darstellung unterschiedlicher Detaillierungsgrade einer Ausweisung

In Abbildung 7-1 wurde aufgezeigt, dass eine Ausweisung von Vertikalbewegungen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (Kap. 7.3: Aussagen) erfolgen kann/sollte. Jedoch sollte damit auch die Art der Darstellung an den Detaillierungsgrad (Tab. 7-1) angepasst werden. Folgend werden für die im Unterkapitel 7.3 vorgestellte Kategorisierung an den Detaillierungsgrad angepasste Darstellungsarten anhand eines fiktiven Beispiels

vorgeschlagen. Wie in Unterkapitel 7.4.1 angemerkt werden für qualitative Aussagen (siehe Tab. 7-1: Aussage/Detaillierungsgrad A-C) und diskrete Ausweisungen mit einer großen Unschärfe (siehe Tab. 7-1: Aussage D) geometrische Grundformen (Ellipsen & Kreise) als Basis für die Ausweisung von Vertikalbewegungen verwendet (Abb. 7-4 bis 7-7).

Wie in Unterkapitel 7.4.1 diskutiert spiegelt dies am besten den Charakter einer Übersichtsdarstellung wieder. Der jeweilig höhere Detaillierungsgrad in der Ausweisung basiert zur besseren Nachvollziehbarkeit der Darstellung auf der nächst größeren Ausweisung (z. B. Abb. 7-6 basiert auf Abb. 7-5).

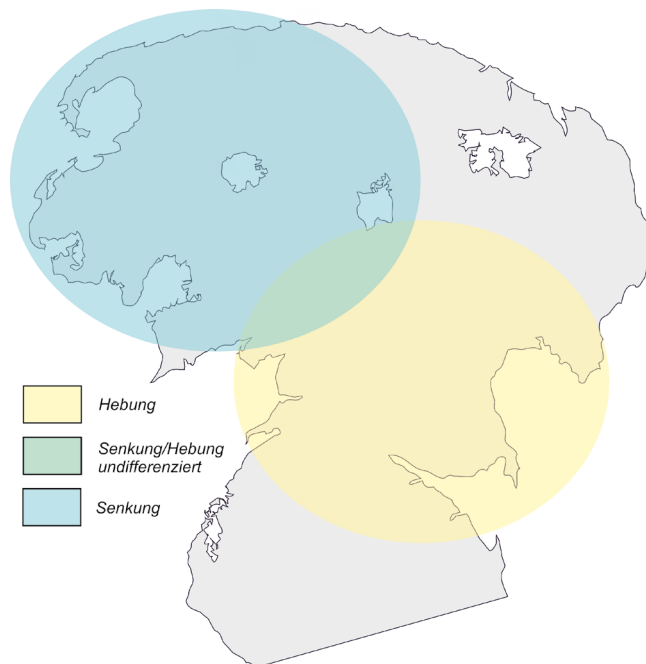


Abb. 7-4: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte qualitative Übersichtsbetrachtung von Hebungen und Senkungen; Aussage A (Detaillierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Die Ausweisungsellipsen (in diesem Fall Kreise) für Hebung und Senkung können sich überschneiden und Bereiche hervorheben, die über den gesamten Betrachtungszeitraum geringere Vertikalbewegungen zeigen.

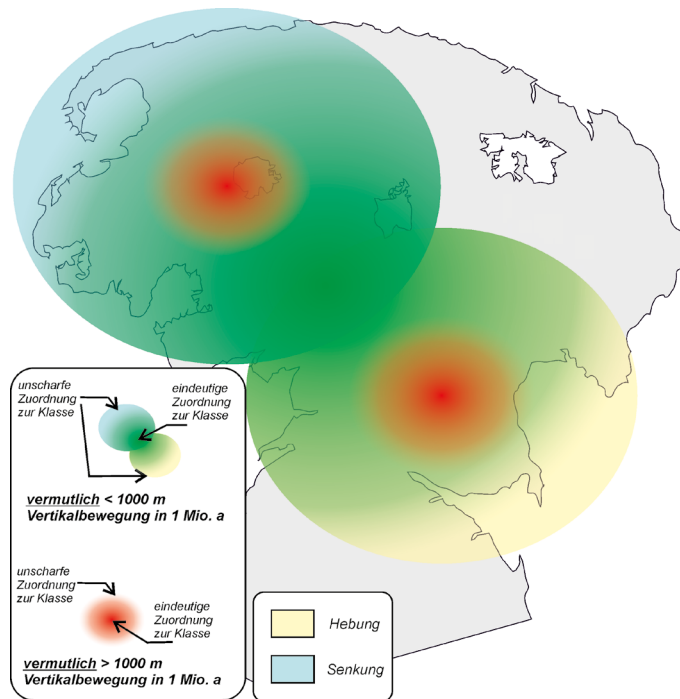


Abb. 7-5: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte qualitative Übersichtsausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage B (Detailierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Der qualitative Eindruck der Ausweisung wird durch fehlende Isolinien und unscharfe Übergänge zwischen den Ausweisungsklassen verstärkt. Die Ausweisungsellipsen für Hebung & Senkung aus Abb. 7-4 sind der Ausweisung nach Aussage B farblich hinterlegt (beige & blau).

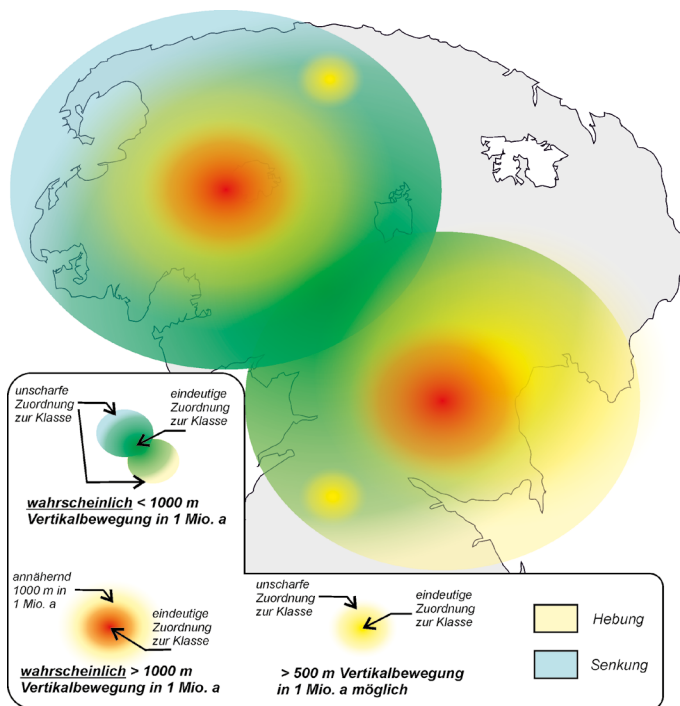


Abb. 7-6: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte qualitative Übersichtsausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage C (Detailierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Der Detailgrad der Ausweisung ist im Vergleich zur Abbildung 7-5 gestiegen. Zusätzlich werden Regionen mit Vertikalbewegungen > 500 m extra ausgewiesen. Die Ausweisungsellipsen für Hebung (beige) & Senkung (blau) aus Abb. 7-4 sind der Ausweisung nach Aussage C farblich hinterlegt.

Um den qualitativen Charakter der Übersichtsdarstellungen (Abbildungen 7-4 bis 7-6) zu verstärken und eine Diskretisierung zu vermeiden wurde bewusst auf die Darstellung von Isolinien verzichtet. Da die einzelnen Darstellungsklassen wiederum eine Unschärfe in ihrer Flächenausweisung besitzen wurden zur Darstellung auf den Karten (Abb. 7-5 bis 7-7 und Abb. 7-9) für die Klassen verschiedene Farbtransparenzverläufe gewählt. Zu den Bereichen einer unscharf definierten Ausweisung hin, entlang der Ausweisungsgrenzen einer Klasse, nimmt in den gezeigten Beispielen die Farbtransparenz zu.

Für die in Tabelle 7-1 dargestellten quantifizierbaren Ausweisungsklassen (D-F) werden zusätzlich zu den Farbverläufen der vorangegangenen Darstellungen (Abb. 7-5 bis 7-6) Isolinien dargestellt. Die Unschärfe in der Ausweisung wird durch gestrichelte Isolinien symbolisiert (Abb. 7-7 bis 7-9). Ebenfalls entspricht der dargestellte Isolinienabstand bei der Ausweisung der Klassen D-F (Tabelle 7-1) dem Betrag der definierten Unschärfe der jeweiligen Klasse.

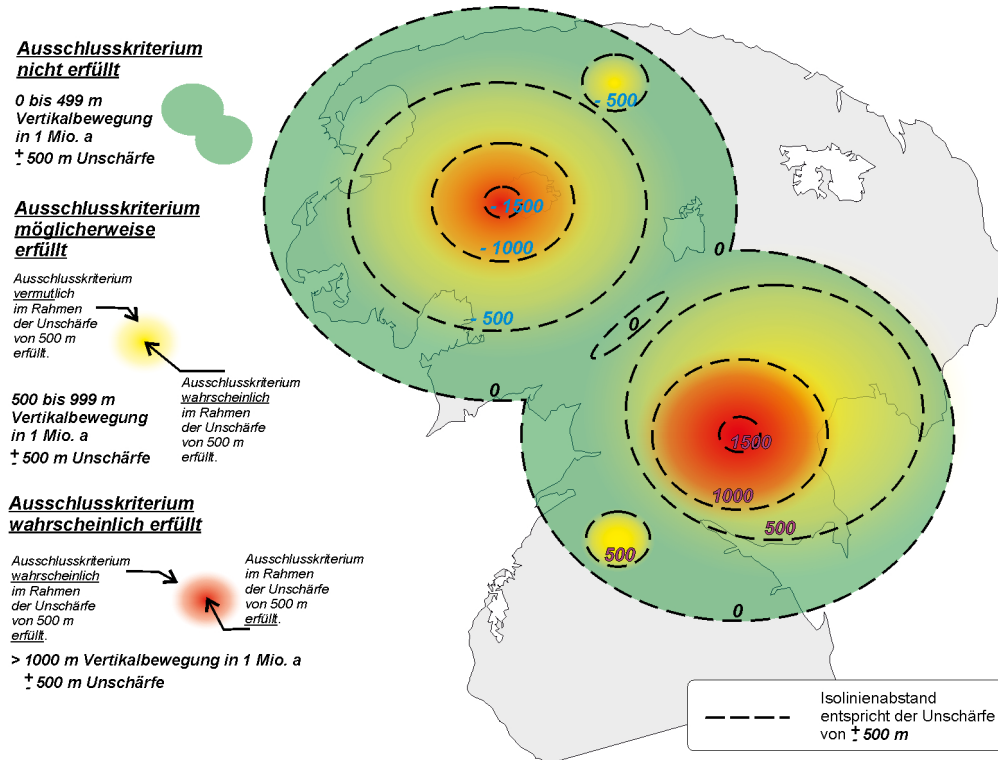


Abb. 7-7: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte quantitative Übersichtsausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage D (Detailierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Diese Darstellung soll sowohl der großen definierten Unschärfe (500 m) dieses Detailierungsgrad und der qualitativen Inhalte als auch den zugrundeliegenden quantitativen Auswertungen gerecht werden.

Abbildung 7-8 zeigt einen Vorschlag zur Darstellung für die Ausweisung in einer hohen Auflösung. Entsprechend des hohen Detaillierungsgrad dieser Darstellung wurde bei der Ausweisung des Ausschlusskriteriums von den generalisierten Geometrien abgewichen und entsprechend ein exemplarisches Prognoseergebnis skizziert. Aufgrund der hohen Auflösung dieser Darstellung (Abb. 7-8) wurden für die Ausweisungsklassen keine Farbverläufe mehr angewendet, da dies gegenintuitiv zur dargestellten detaillierten quantitativen Ausweisung wäre. Es ist jedoch zu bezweifeln, dass eine Zukunftsprognose von Vertikalbewegungen über 1 Million Jahre in solch einem Detaillierungsgrad wie in Abb. 7-8 skizziert jemals möglich sein wird.

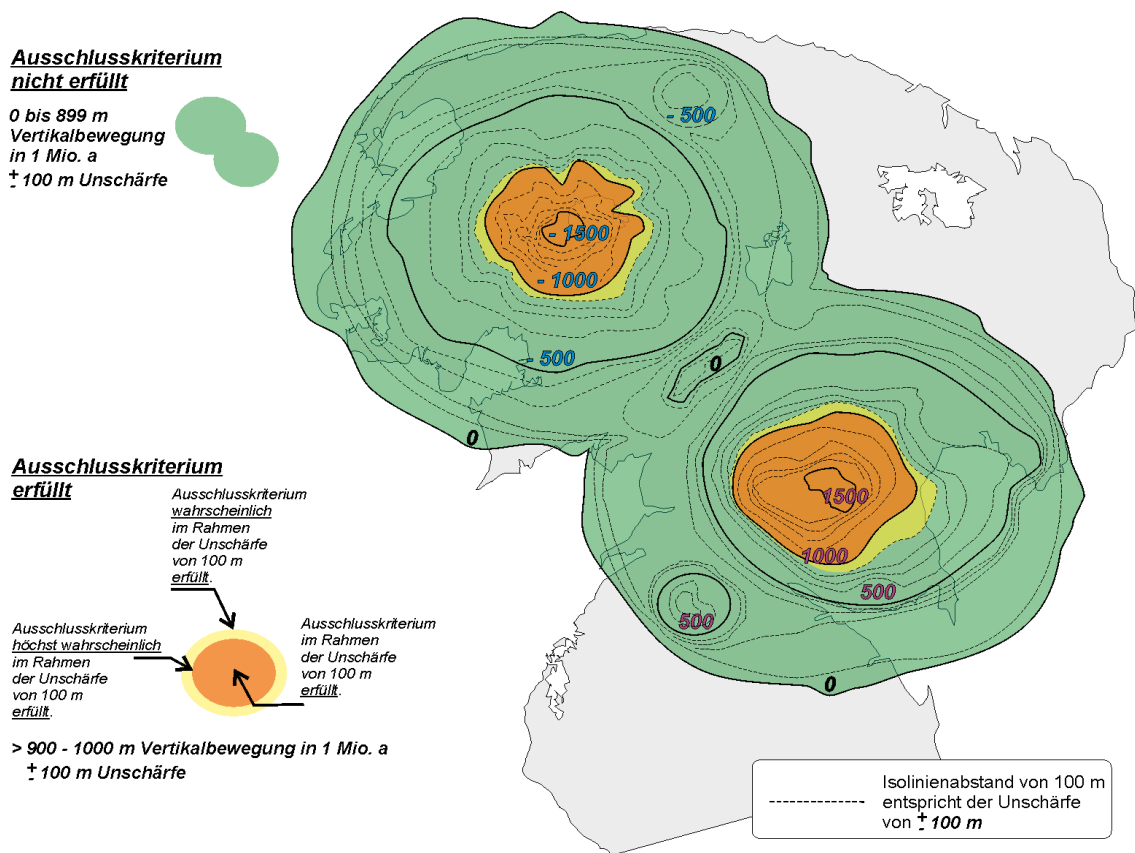


Abb. 7-8: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte quantitative Detailausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage F aus Tabelle 7-1. Es wird ein Darstellungsvorschlag für eine höchst mögliche Auflösung einer Zukunftsprognose dargestellt. Aufgrund des hohen Detailgrads werden die Ausweisungsgebiete und Isolinien nicht mehr generalisiert als Kreis oder Ellipse dargestellt.

In Abbildung 7-9 wird alternativ ein Darstellungsvorschlag für Hebung anstatt für Vertikalbewegungen (entsprechend Abb. 7-7) vorgeschlagen. Im Unterschied zu Abbildung 7-7 sind nur Bereiche mit Hebung nach dem Ausschlusskriterium bewertet.

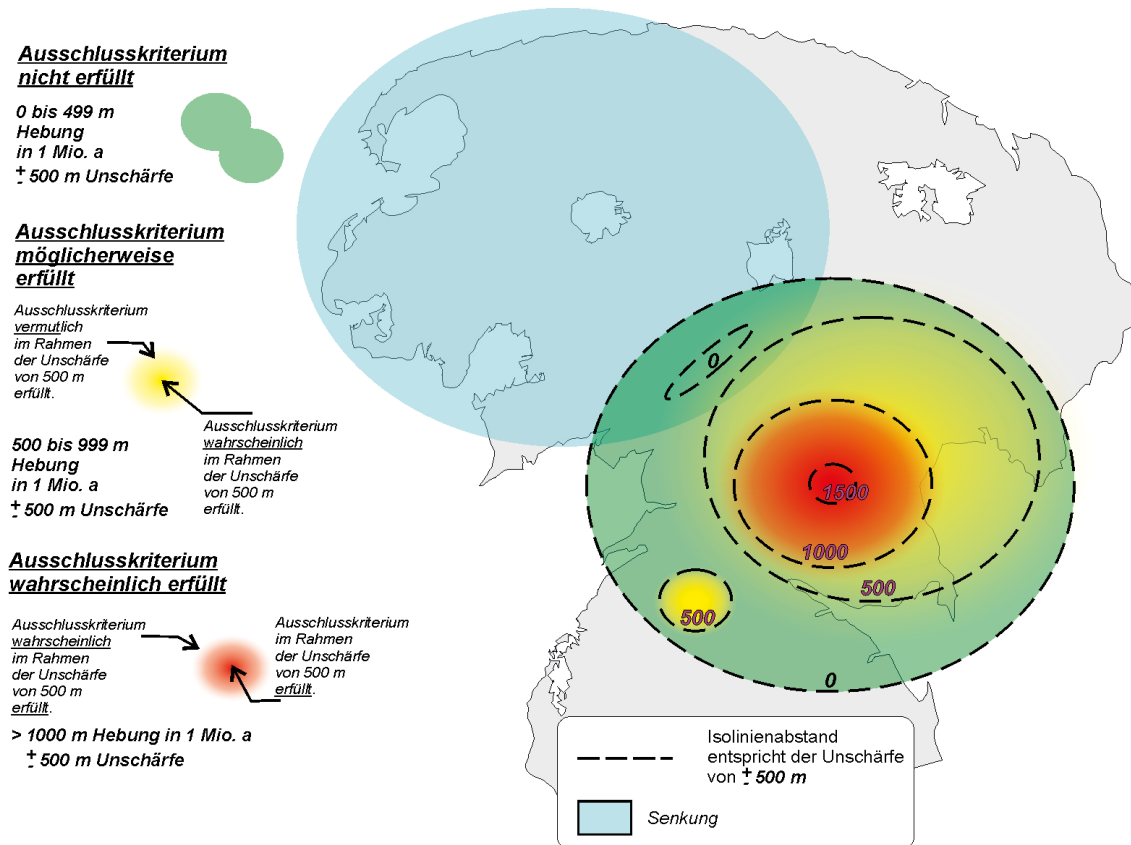


Abb. 7-9: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte exemplarische quantitative Übersichtsausweisung von großräumigen Hebungen anstatt von Vertikalbewegungen (Abb. 7-7).

7.4.3 Abschließende Bemerkungen zur Kartendarstellung des Ausschlusskriteriums

Maßstab & Maßstabszahl: Es bleibt zu prüfen in welchem Maßstab eine Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ durchgeführt werden kann oder ob es überhaupt möglich ist, nur einen Maßstab für eine Prognose zu definieren. Damit einhergeht auch eine dementsprechend angepasste topografische Grundlagenkarte als Basis für eine Karte zu wählen. Der richtig gewählte Kartenmaßstab und eine zugehörige maßstabsgerechte Topografie kann entscheidend Einfluss auf die Außenwirkung einer Darstellung nehmen.

Es ist entscheidend, die Maßstabsfrage einer Prognose an prominenter Stelle zu diskutieren um eine spätere falsche Nutzung oder Fehldeutungen der Ausweisung nach dem Ausschlusskriterium zu vermeiden.

Zusätzliche Darstellung der Datenpunktverteilung: In Unterkapitel 7.1 wurde darauf eingegangen, dass einer flächenhaften Ausweisung von Vertikalbewegungen eine zusätzliche Karte der Datenverteilung (z. B. Methode, Quantität, Qualität) beiliegen sollte oder, wenn möglich, diese Information in eine Karte der Ausweisung des Ausschlusskriteriums mit integriert wird. Auch dies kann dem Betrachter wertvolle Informationen schnell zugänglich machen, um den Karteninhalt richtig zu deuten.

Kartenmetadaten: Wichtige Karten/Karthemen werden häufig nach der Veröffentlichung nicht so genutzt wie dies vom Ersteller vorgesehen war. Umso wichtiger ist es bei der Veröffentlichung digitaler Kartendaten als Web-Service oder SHAPE-Datei auf die Angabe wesentlicher Informationen als digitales Meta-Datum zu achten.

„Oberflächenhebung = Gesteinshebung – Exhumation“: In den Kapiteln 1.4 und 7.1 wurde aufgeführt, dass vor einer Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ zu klären ist, welche Datengrundlagen hierfür dienen sollen. Stellt man die prognostizierte Gesteinshebung, die Oberflächenhebung oder die Exhumation dar? Sind für alle drei Parameter Informationen verfügbar bzw. abzuleiten, sollten idealerweise für alle drei Parameter Karten erstellt werden. Dies würde wahrscheinlich positiv zur Verständlichkeit der getroffenen Ausweisung des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ beitragen.

8 Prognostizierbarkeit von Vertikalbewegungen

8.1 *Diskussion verschiedener geodynamischer Zukunftsszenarien und deren Prognostizierbarkeit für Deutschland*

Anhand von vier Szenarien zur geodynamischen und klimatischen Entwicklung in den nächsten Jahrillionen soll die jeweilige Aussagekraft der Prognose und der Detailgrad der Ausweisung für Vertikalbewegungen in Deutschland diskutiert werden. Dabei wird teils auf die in Kapitel 4 vorgestellten endogenen und exogenen Prozesse Bezug genommen. Ebenfalls werden zur Diskussion Kenntnisse der strukturgeologischen Entwicklung von Deutschland herangezogen (Kap. 3). Die folgende Szenarienanalyse und Diskussion baut auf den in Kapitel 7 vorgestellten Kategorisierungsansätzen auf.

Die vier zu diskutierenden Annahmen sind:

- **Szenario I:** Die nächsten 1 Million Jahre werden eine ähnliche Dynamik und Schwankungsbreite in Bezug auf Vertikalbewegungen wie im Holozän zeigen. Die dominierenden endogenen und exogenen Prozesse zeigen für die nächsten 1 Million Jahre nur geringe Schwankungen und verändern sich zukünftig nur wenig.
- **Szenario II:** Die Schwankungen exogener und endogener Prozesse in den nächsten 1 Million Jahren bewegen sich im Rahmen der jungtertiären bis rezenten Überlieferung für Europa.
- **Szenario III:** Die nächsten 1 Million Jahre sind durch einen fließenden, stetigen geodynamischen Wandel geprägt. Neue endogene Prozesse haben schon begonnen, jedoch sind sie bislang nicht weiter erfasst oder stellen sich im Laufe der nächsten 1 Million Jahre erst ein. Das Klima schwankt im Rahmen der känozoischen Überlieferung für Europa.
- **Szenario IV:** In den nächsten 1 Million Jahren stellt sich für Deutschland und Mitteleuropa sprunghaft ein geodynamischer Wechsel ein mit der Initialisierung von Prozessen, die hohe Vertikalbewegungsraten von über 1000 m/Mio. Jahre hervorbringen können. Die exogenen Prozesse schwanken im Rahmen der känozoischen Überlieferung für Deutschland.

Szenario I: (keine bis geringe Dynamik endogener und exogener Prozesse im Betrachtungszeitraum).

Für diese Zukunftsprognose wird aufgrund des kurzen Betrachtungszeitraums (Holozän) den rezenten geodätischen Messdaten und verschiedenen Expositionsdatierungsverfahren ein hoher Stellenwert eingeräumt. In Abbildung 8-1 ist eine Abschätzung der vermuteten Prognosegüte für verschiedene Detaillierungsgrade (siehe Kap. 7.4.1 & 7.4.2) dargestellt unter der Annahme, dass die zugrundeliegenden Studien für diesen Zeitraum gleiche/ähnliche Resultate für Gesamtdeutschland zeigen. Jedoch wurde in Kapitel 6 auf große Unterschiede zwischen verschiedenen geodätischen Messungen und im Vergleich zu Ergebnissen anderer Methoden (z. B. kosmogene Nuklide) hingewiesen. Einige geodätische Studien zeigen derzeitige flächige Vertikalbewegungen von deutlich über 1 mm/a (z. B. Klein et al. 2016, Frischbutter & Schwab 2001) was im deutlichen Kontrast zu ermittelten Hebungsraten im Jungtertiär bis Quartär steht (z. B. Müller et al. 2002, NTB 99-08). Auch zeigen Meßreihen der jüngeren Vergangenheit teilweise gegenläufige Trends zu Analysen der quartären bis tertiären Vergangenheit.

Unter Berücksichtigung dieser sich widersprechenden Resultate ist die Aussagekraft für das **Szenario I** geringer einzuschätzen als für das geodynamische/klimatische **Szenario II** (vielleicht auch **III?**), da für dieses Szenario gemittelte Vertikalbewegungen des Jungtertiärs bis heute relativ gut abzuschätzen sind und so bei der angenommenen Dynamik der Prozesse mit geringeren Unschärfen in die Zukunft zu extrapolieren wären. Die Ausweisung des vorgestellten **Szenario I** ist für die Detaillierungsgrade E und F (Abb. 8-1 & Tab. 8-1) nur mit weiterer Grundlagenforschung deutschlandweit möglich (siehe auch Kap. 6.3). Wenn jedoch eine widerspruchsfreie Datengrundlage gegeben wäre, so ließe sich dieses Szenario wahrscheinlich am besten über alle in Kapitel 7 definierten Detailgrade (Tab. 7-1 & Abb. 7-1) ausweisen.

Aussage / Detaillierungsgrad der Prognose:

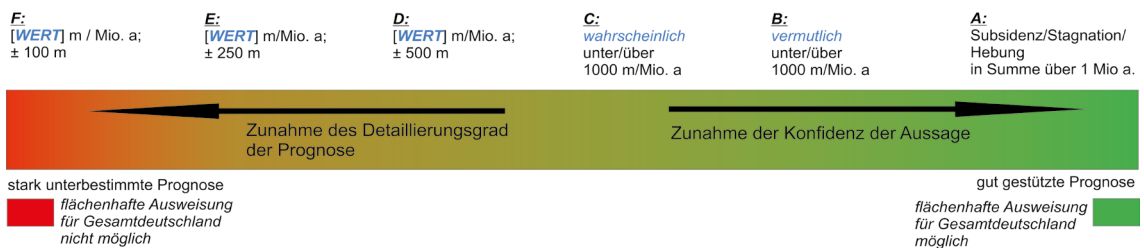


Abb. 8-1: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische **Szenario I**: endogene und exogene Prozesse zeigen eine Dynamik wie im Holozän. Prognosen in den Detaillierungsgraden A bis C (siehe auch Tab. 8-1) sind mit vertretbaren Unschärfen über Gesamtdeutschland auszuweisen. Quantitative Ausweisungen sind nur mit Einschränkungen möglich. Das Schema skizziert die Annahme unter der Voraussetzung eines widerspruchsfreien Basisdatensatz der momentan für Deutschland nicht vorliegt.

Tab. 8-1: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische *Szenario I (ausgehend von heute, keine bis geringe Dynamik endogener und exogener Prozesse im Betrachtungszeitraum (Holozän))*. Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die in der Tabelle dargestellte Einschätzung gilt unter der Annahme einer konsistenten sich nicht widersprechenden Datenbasis (derzeit nicht der Fall). Die Einschätzung ob, eine Prognose erstellt werden kann, wird durch die Verwendung der Begriffe *möglich, höchst wahrscheinlich möglich, wahrscheinlich, vermutlich, vielleicht möglich* vorgenommen. Die Reihung der Begrifflichkeiten spiegelt die Zunahme einer negativen Einschätzung wider.

Aussage/Detaillierungsgrad der Prognose	Abschätzung der Aussagekraft der Prognose und Ausweisung für Deutschland
Beschreibung (siehe Tab. 7-1)	
<u>A</u> : Subsidenz/Stagnation/Hebung in Summe über 1 Mio. a	deutschlandweit möglich.
<u>B</u> : vermutlich unter/über 1000 m/Mio. a	deutschlandweit möglich.
<u>C</u> : wahrscheinlich unter/über 1000 m/Mio. a	höchst wahrscheinlich deutschlandweit möglich. Mit Abnahme der Konfidenz für die deutschen Alpen.
<u>D</u> : [WERT] in m/Mio. a; ± 500 m	wahrscheinlich bis vermutlich deutschlandweit möglich unter der Annahme der Zunahme von Unschärfen in derzeit aktiven Hebungs- und Senkungsgebieten (Alpen, Teile des Rheinischen Schiefergebirges/Eifel?).
<u>E</u> : [WERT] in m/Mio. a; ± 250 m	vielleicht deutschlandweit möglich außer für den Alpenraum. Unter Annahme der Zunahme von Unschärfen für rezent aktive Hebungs- und Senkungsgebiete (Alpen, Teile des Rheinischen Schiefergebirges/Eifel?, Nordsee (Entenschnabel)).
<u>F</u> : [WERT] in m/Mio. a; ± 100 m	für einige Regionen Deutschlands nicht konsistent auszuweisen (u. a. Nordsee (Entenschnabel), Eifel, Teile des Rheingraben und angrenzender Hochlagen, Alpen, Mittelgebirgsregionen Mitteldeutschlands). Nur in Regionen mit geringen endogen hervorgerufenen Vertikalbewegungen und einem sehr guten Prozessverständnis der Haupteinflussfaktoren möglicherweise durchführbar.

Szenario II: (endogene und exogene Prozesse schwanken in Rahmen der jungtertiären bis rezenten geologischen Überlieferung).

Diese Annahme (Abb. 8-2 und Tabelle 8-2) zur zukünftigen endogenen Dynamik und klimatischen Fortentwicklung entspricht in etwa den Modellvorstellungen aus bereits abgeschlossenen Betrachtungen zur Endlagersicherheitsanalyse der BGR (Kap. 5), schließt aber auch die von der NAGRA durchgeführten Betrachtungen mit ein (ENSI 2015, Müller et al. 2002, NAGRA 2002). Geodätische Messdaten haben vermutlich für die Prognose dieses Szenarios eine geringere Aussagekraft als die in Tabelle 2-1 aufgeführten Datierungsmethoden oder qualitative Methoden, da der gemittelte Trend der Vertikalbewegungen aus der jungtertiären-quartären Vergangenheit für die Extrapolation in die Zukunft Verwendung findet. Wenn die geodätischen Messdaten diesen Trend widerspiegeln kann das auf stabile Prozesse in einer Region hinweisen und die Zukunftsprognose in dieser Region dementsprechend stützen.

Die Prognose wird auf Basis der bekannten klimatischen Schwankungsbreite für das Jungtertiär und Quartär erstellt. Das bedeutet, dass auch Inlandsvergletscherung und wie momentan vorherrschend eine deutliche Klimaerwärmung mit einkalkuliert sind. Dadurch spielen Änderungen in den exogen getriggerten Abtragungsprozessen und damit verbundene isostatische Ausgleichsbewegungen für diese Prognose eine größere Rolle. Die klimatisch hervorgerufenen, für den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre vermutlich schnell (Vergleich zu vergangenen Eiszeitzyklen) ablaufenden Wechsel in der Abtragung und Sedimentation erzeugen nach **Szenario II** in Summe keine hohen Amplituden der Hebung. Es dürfen nach der Annahme auch lokal/regional Vertikalbewegungsraten von zeitweise deutlich über 1 mm/a auftreten. Jedoch, wie in Unterkapitel 4.1 erläutert, bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass am Ende des Betrachtungszeitraum das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ erfüllt ist. Für endogen hervorgerufene Vertikalbewegungsraten werden über den Betrachtungszeitraum langsame Ab- und Zunahmen zugelassen. Es muss weiterhin erwähnt werden, dass isostatische Ausgleichsbewegungen durch Gletscher oder Wasserauflast (oder Entlastung) zu großen Anteilen reversibel sind und sich über die Zeit nicht akkumulieren (u. a. Watts 2001). Weiterhin muss auch ergänzend erwähnt werden, dass für isostatische Ausgleichsbewegungen von 1000 m/Mio Jahre für die mitteleuropäische Lithosphäre unrealistisch hohe Gletscherauflasten angenommen werden müssten.

Aussage / Detaillierungsgrad der Prognose:

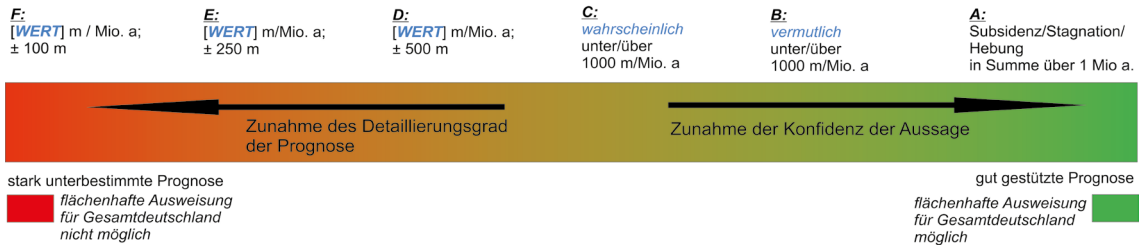


Abb. 8-2: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische *Szenario II*: endogene und exogene Prozesse schwanken im Rahmen der jungtertiären (neogenen) bis rezenten Überlieferung. Prognosen in den Detaillierungsgraden *A* bis *B* (siehe auch Tab. 8-2) sind wahrscheinlich über Gesamtdeutschland auszuweisen. Die Detaillierungsgrade *C* & *D* sind vermutlich mit Einschränkungen für einige Regionen für Gesamtdeutschland ausweisbar. Die Detaillierungsgrade *E* & *F* sind vermutlich derzeit nicht mit vertretbaren Unschärfen flächig ausweisbar.

Tab. 8-2: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische *Szenario II* (endogene und exogene Prozesse schwanken im Rahmen der jungtertiären (neogenen) bis rezenten Überlieferung). Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die Verwendung der absteigenden Folge der Begrifflichkeiten *möglich*, *wahrscheinlich möglich*, *vermutlich möglich*, *vermutlich nicht möglich* und *nicht möglich* verdeutlicht die zunehmende Verschlechterung der Einschätzung für die Erstellung von Prognosen.

Aussage/Detaillierungsgrad der Prognose	Abschätzung der Aussagekraft der Prognose und Ausweisung für Deutschland
Beschreibung (siehe Tab. 7-1)	
A: Subsidenz/Stagnation/Hebung in Summe über 1 Mio. a	deutschlandweit möglich.
B: <i>vermutlich</i> unter/über 1000 m/Mio. a	deutschlandweit möglich.
C: <i>wahrscheinlich</i> unter/über 1000 m/Mio. a	wahrscheinlich deutschlandweit möglich. Mit Abnahme der Konfidenz der Ausweisung für Teilregionen (insb. deutsche Alpen und Nordsee (Entenschnabel)).
D: [WERT] in m/Mio. a; ± 500 m	vermutlich deutschlandweit möglich unter der Annahme der Zunahme von Unschärfen in derzeit aktiven Hebungs- und Senkungsebenen (Alpen, Teile des Rheinischen Schiefergebirges/Eifel?, Nordsee (Entenschnabel), Teile des norddeutschen Beckens, angrenzende Gebiete zum Eger-Graben).
E: [WERT] in m/Mio. a; ± 250 m	vermutlich deutschlandweit nicht möglich. Nur für Gebiete mit vermutlich geringer zukünftiger Aktivität (u. a. Teile der Ränder des norddeutschen Beckens, Teile von Franken und des Thüringer Beckens).
F: [WERT] in m/Mio. a; ± 100 m	deutschlandweit nicht möglich. Nur in Regionen mit geringen endogen hervorgerufenen Vertikalbewegungen, wenig Relief und einem sehr guten Prozessverständnis der Haupteinflussfaktoren möglicherweise durchführbar.

Szenario III: *(fließender, stetiger geodynamischer Wandel in den nächsten 1 Mio. Jahren. Das Klima schwankt im Rahmen der känozoischen Überlieferung für Europa).*

Dieses Szenario wirkt auf den ersten Blick spekulativ, da von etwas ausgegangen wird, was sich derzeit einer Nachweisführung verwehrt. Jedoch sollte man auch solche spekulativen Modelle als Möglichkeit in Betracht ziehen. Wenn selbst in diesen Szenarien ein Wirken von Prozessen die hohe Vertikalbewegungsraten oder hohe Abtragungsraten hervorrufen, sich als unrealistisch herausstellt, dann stützt das auch die Gesamtheit der vorangegangenen weniger extremen Szenarien. Es gibt nur wenige Prozesse die in Intraplattenregionen hohe Vertikalbewegungsraten hervorrufen können (Kap. 4). Für Mitteleuropa gibt es derzeit keine Anzeichen oder Theorien über mögliche Änderungen im tektonischen Regime. Jedoch sind auch Fernwirkungen von möglichen Änderungen im mediterranen Raum oder im Atlantik mit zu berücksichtigen. Es ist jedoch unrealistisch, dass diese Fernwirkungen in den nächsten 1 Million Jahren entscheidend die regionalen Vertikalbewegungsmuster Deutschlands beeinflussen werden. In Kapitel 4 werden Vorstellungen von Le Breton et al. (2019) dargelegt, die eher auf eine Abnahme der Hebungsraten für die nördlichen Ausläufer der Alpen schließen lassen. Eine weitere interessante Entwicklung die in den letzten Jahren diskutiert wird ist, dass verschiedene Phänomene vor der portugiesischen Atlantikküste als Hinweis auf eine beginnende Subduktion des Atlantiks in dieser Region gedeutet werden (u. a. Duarte et al. 2018). Inwiefern diese Entwicklung, wenn Sie tatsächlich einsetzt, Einfluss auf die Intraplattengeodynamik von Mitteleuropa nimmt lässt sich ohne weiterführende geodynamische Modellierungen nur mutmaßen. Wahrscheinlich sollte es trotz der gewählten Freiheitsgrade dieses Szenarios möglich sein für den Detaillierungsgrad **A** und **B** substanzielle qualitative Prognosen für Deutschland zu treffen. Für einige Regionen wie die nordwestliche Deutsche Nordsee, die deutschen Alpen und Teile der deutschen Mittelgebirgsregionen ist aber von größeren Unschärfen bei der Ausweisung auszugehen. Quantitative Aussagen der Detaillierungsgrade **E** und **F** (Abb. 8-3 & Tab. 8-3) sollten für solch spekulative Szenarios ohne weiterführendes Prozessverständnis eher nicht erfolgen.

Aussage / Detaillierungsgrad der Prognose:

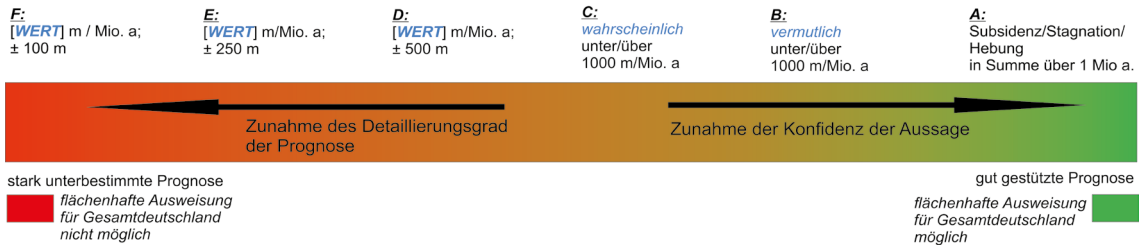


Abb. 8-3: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische *Szenario III*: fließender, stetiger geodynamischer Wandel. Klima schwankt im Rahmen der känozoischen Überlieferung. Eine Prognose für den Detaillierungsgrad A (siehe auch Tab. 8-3) ist wahrscheinlich über Gesamtdeutschland möglich, vermutlich auch für Detaillierungsgrad B. Mit größeren Unschärfen ist möglicherweise auch der Detaillierungsgrad C ausweisbar. Die Detaillierungsgrade E und F sollten aufgrund des spekulativen Charakter nicht für dieses Szenario ausgewiesen werden.

Tab. 8-3: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische *Szenario III*. Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/ Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die Verwendung der absteigenden Folge der Begrifflichkeiten *wahrscheinlich möglich*, *vermutlich möglich*, *möglicherweise zu spekulativ*, *zu spekulativ* verdeutlicht die zunehmende Verschlechterung der Einschätzung für die Erstellung von Prognosen.

Aussage/Detaillierungsgrad der Prognose	Abschätzung der Aussagekraft der Prognose und Ausweisung für Deutschland
Beschreibung (siehe Tab. 7-1)	
A: Subsidenz/Stagnation/Hebung in Summe über 1 Mio. a	wahrscheinlich deutschlandweit möglich.
B: vermutlich unter/über 1000 m/Mio. a	vermutlich deutschlandweit möglich.
C: wahrscheinlich unter/über 1000 m/Mio. a	mit größeren Unschärfen vermutlich deutschlandweit möglich.
D: [WERT] in m/Mio. a; ± 500 m	möglicherweise zu spekulativ.
E: [WERT] in m/Mio. a; ± 250 m	zu spekulativ; sollte ohne weitere Daten und Prozessmodelle nicht erfolgen.
F: [WERT] in m/Mio. a; ± 100 m	zu spekulativ; sollte ohne weitere Daten und Prozessmodelle nicht erfolgen.

Szenario IV: (sprunghafter geodynamischer Wechsel; hohe Vertikalbewegungsraten von über 1000 m/Mio. Jahre möglich; exogene Prozesse schwanken im Rahmen der känozoischen Überlieferung).

Dieses Szenario entspricht einer Situation die zuletzt zur Zeit der Oberkreide vorlag, das sich in nur kurzer Zeit der plattentektonische Rahmen derartig umstellt, sodass auch Intraplattenbereiche (Mitteleuropa) in nur kurzer Zeit ihr Verhalten völlig umstellen (u. a. Matthews et al. 2012). Die damalige Inversionstektonik erzeugte Hebung und Abtragung entlang großer oft steiler Sockelstörungen (u. a. Harz-Nordrandstörung, Haldensleben Störung, Gardelegen-Flexur/Störung, Thüringer Wald, Niedersächsisches Becken). Dabei wurden Abtragungsraten (Eynatten et al. 2008) und Deformationsraten (Malz et al. 2014) für große Teile Deutschlands erreicht, die ein Erfüllen des Ausschlusskriteriums „großräumige Vertikalbewegungen“ nahelegen würden. Solch ein Szenario für die nächsten 1 Million Jahre anzunehmen ist jedoch hochgradig spekulativ, insbesondere wenn die klimatischen Einflüsse auch nicht klar gefasst sind. Bei dem Oberkreideereignis wurden meist zuvor angelegte Grabenstrukturen als Aufschiebungen reaktiviert. Das heisst, es lagen schon Vorzeichnungen vor, die richtig orientiert zur Einengung lagen und deswegen in nur kurzer Zeit auf die Umstellung im plattentektonischen Rahmen reagiert haben (u. a. Kley & Voigt 2008). Da nicht klar ist mit welcher Ausrichtung dieser sprunghafte Wechsel im tektonischen Regime sich einstellen könnte ist auch nicht klar welche bereits existierenden Strukturen eine Rolle spielen könnten und wie sie dann möglicherweise reaktiviert werden könnten. Man könnte bezogen auf das bestehende Störungsmuster Deutschlands das gleiche **Szenario IV** mit Variationen in den Hauptspannungsrichtungen analysieren um das Potential dieses Szenarios zu eruieren. Möglicherweise stellt sich bei einer solchen Sensitivitätsstudie heraus, dass die Amplitude und Rate der Hebung sich unabhängig von Vorzeichnungen des Grundgebirges oder der jeweiligen Ausrichtung von Einengung/ Extension zum Strukturmuster Deutschlands verteilt. Eine Abschätzung der Aussagekraft von Prognosen zu diesem Szenario ist aufgrund des hohen spekulativen Charakters vorerst nicht möglich. Vermutlich könnten auf Basis von wenigen Prozessmodellen mit variierenden Grundannahmen grundlegende Muster von Hebung und Senkung mit groben Abschätzungen für Vertikalbewegungen innerhalb Deutschlands ausgewiesen werden (Detaillierungsgrad **A & B**, Abb. 8-4).

Aussage / Detaillierungsgrad der Prognose:

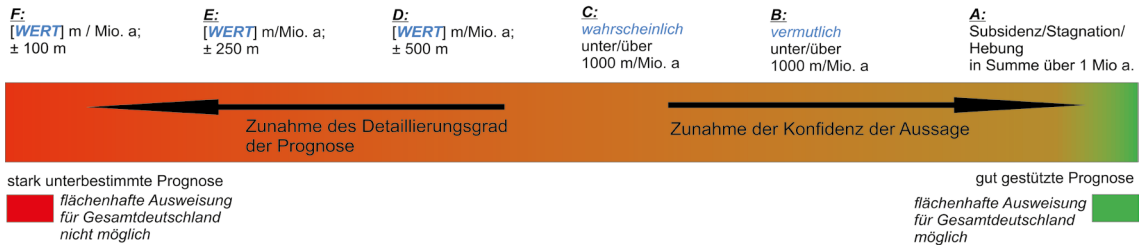


Abb. 8-4: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische *Szenario IV*: sprunghafter Wechsel im tektonischen Regime. Klima schwankt im Rahmen der känozoischen Überlieferung. Eine Prognose für den Detaillierungsgrad A (siehe auch Tab. 8-4) ist vermutlich über Gesamtdeutschland möglich, möglicherweise auch für Detaillierungsgrad B. Alle anderen in Tabelle 7-1 vorgestellten Detaillierungsgrade sollten aufgrund des spekulativen Charakter nicht für dieses Szenario ausgewiesen werden.

Tab. 8-4: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische *Szenario IV*. Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/ Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die Verwendung der absteigenden Folge der Begrifflichkeiten *vermutlich möglich*, *vielleicht möglich*, *möglicherweise zu spekulativ*, *zu spekulativ* verdeutlicht die zunehmende Verschlechterung der Einschätzung für die Erstellung von Prognosen.

Aussage/Detaillierungsgrad der Prognose	Abschätzung der Aussagekraft der Prognose und Ausweisung für Deutschland
Beschreibung (siehe Tab. 7-1)	
A: Subsidenz/Stagnation/Hebung in Summe über 1 Mio. a	<i>vermutlich deutschlandweit möglich.</i>
B: <i>vermutlich</i> unter/über 1000 m/Mio. a	<i>vielleicht deutschlandweit möglich.</i>
C: <i>wahrscheinlich</i> unter/über 1000 m/Mio. a	<i>möglicherweise zu spekulativ.</i>
D: [WERT] in m/Mio. a; ± 500 m	<i>zu spekulativ; sollte ohne weitere Daten und Prozessmodelle nicht erfolgen.</i>
E: [WERT] in m/Mio. a; ± 250 m	<i>zu spekulativ; sollte ohne weitere Daten und Prozessmodelle nicht erfolgen.</i>
F: [WERT] in m/Mio. a; ± 100 m	<i>zu spekulativ; sollte ohne weitere Daten und Prozessmodelle nicht erfolgen.</i>

8.2 Zusammenfassung der Szenarienbetrachtung

Gut begründete Aussagen für das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegung“ (Vertikalbewegungen > 1000 m im Zeitraum von 1 Million Jahre), sind derzeit nur unter bestimmten Annahmen (siehe Kapitel 8) zur zukünftigen geodynamischen (endogenen & exogenen) Entwicklung Deutschlands und nur mit Unschärfen in der räumlichen Darstellung deutschlandweit möglich. Wie zuvor dargestellt, sinkt die Konfidenz einer Aussage aufgrund nicht ausreichender Aussagekraft der Daten mit der Detaillierung für eine Region deutlich (Kap. 7). Qualitative Aussagen (in etwa entsprechend zum Detailgrad der im Ausschlusskriterium gefordert wird) zur zukünftigen Entwicklung von Vertikalbewegungen sind für die zuvor beschriebenen Szenarien, bis auf die hochgradig spekulativen, wahrscheinlich erzielbar.

Unter vergleichbaren Annahmen wie im skizzierten **Szenario II** (Kap. 8.1) kommen verschiedene Studien zur Endlagerforschung (ENSI 2015, Müller et al. 2002, NAGRA 2002; siehe auch Kap. 5) zu dem Schluss, dass für die nächsten 1 Million Jahre Vertikalbewegungen und Denudation vermutlich den Betrag von 1000 m in Deutschland und der Schweiz nicht übersteigen werden (vielleicht mit Ausnahmen einiger Bereiche in den zentralen Alpen; in den Berichten nicht genau präzisiert). Jedoch ist auch deutlich zu machen, dass spezifischere Aussagen wie „Vertikalbewegungen **über oder unter 500 m** in einer definierten Region“ mit größeren Unschärfen belegt sind. Ebenfalls ist für eine sicherere Aussage, insbesondere für den deutschen Alpenraum, ein besseres Prozessverständnis erforderlich. Bislang gibt es keinen wissenschaftlichen Konsens zum Prozessverständnis im Alpenraum oder für die Vertikalbewegungen in der Eifel (u. a. Mey et al. 2016, Sternai et al. 2019, Meyer & Foulger, Ritter et al. 2001). Für die deutschen Mittelgebirge Harz, Bayerischer Wald und Thüringer Wald sind, auch wenn dort umfangreich zu anderen geowissenschaftlichen Fragestellungen publiziert wurde, aufgrund der ungenügenden Datenbasis, nur grobe Aussagen und Analogieschlüsse zum paläogenen und neogenen Hebungsverlauf möglich. Solange diese Lücken bestehen, wird eine deutschlandweite Aussage mit **bundesweit ähnlicher/gleicher Konfidenz** zu Vertikalbewegungen für Deutschland nicht möglich sein. Dies wird erst, sofern überhaupt, eine deutschlandweite numerische Multiparameter-Modellbasis, die auch angrenzende Länder miteinschließt, gut gestützte Daten jeder Region Deutschlands enthält und mit zu testenden Annahmen auf Basis eines ausgereiften geodynamischen Prozessverständnisses gespeist wird, ermöglichen. Erst dann sind **quantitative** Ergebnisse erzielbar, und Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines Ereignisses könnten dann ohne umfängliche Erläuterungen qualitativer Aussagen angegeben werden.

9 Bewertung

Die Mehrheit an möglichen Analysemethoden zur geologischen Strukturentwicklung ergeben als Resultat die Abtragung (Denudation) oder Abtragungsrates. Die heutige Verteilung der Gesteine an der Oberfläche ist ebenfalls das Resultat von einer Vielzahl an Abtragungseignissen seit dem Spätpaläozoikum. Großräumige Vertikalbewegungen über geologische Zeiträume bestimmen natürlich mit, in welcher Region tendenziell abgetragen wird und in welcher es zur Ablagerung kommt. Jedoch wie in Unterkapitel 1.3 schon angesprochen und folgend mehrfach beleuchtet, besteht in den meisten Fällen kein **direkter** Zusammenhang zwischen Hebung und Abtragung. Wenn die für Deutschland viel diskutierten Rumpfflächen auf Mittelgebirgen tatsächlich, wie postuliert, paläogenen oder kretazischen Alters sind, so wäre das ein klarer Hinweis dafür dass Hebung und Abtragung gebietsweise mit sehr unterschiedlichen Raten erfolgt. Bei Annahme großräumiger Hebungsprozesse ist durchaus vorstellbar, dass Erosion erst von den Rändern des Hebungsbereiches zum Zentrum hin einschneidet und im Zentrum der Hebung über lange Zeiträume nur geringe Abtragung stattfindet. Wiederum ist auch vorstellbar, dass unter bestimmten klimatischen Voraussetzungen die Erosion eines Gebirgsreliefs die Hebung desselben übersteigt.

Publizierte Aussagen zu endogen hervorgerufenen Vertikalbewegungen sind häufig eine grobe Ableitung auf Basis der datierbaren Abtragung/Exhumation, geodätischer Vermessungen oder auf Basis von Relativbezugspunkten die sich aus der Strukturentwicklung ergeben. In älteren Publikationen werden Aussagen zur Hebung meist durch die heutigen Höhenlagen von Leitstratigrafien (z. B. flachmarine Sedimente), aber auch auf Basis von geomorphologischen Zeigern (Rumpfflächen, Terrassen etc.) gemacht. In neueren Publikationen dominieren Aussagen auf Basis quantitativer Analytik. Es ist jedoch aufgrund der jeweiligen methodischen Unschärfen ein Trugschluss, Aussagen zu Vertikalbewegungen nur auf das Eine oder Andere zu begründen. Das heutige Relief ist eine Momentaufnahme aus dem Wechselspiel aus Hebung, Senkung, Ablagerung und Erosion. Wie die Hebung- und Senkungsgeschichte zwischen Heute und dem gewählten Bezugspunkt in der Vergangenheit genau aussieht ist oft nur schwer zu fassen. Moderne geodätische Messungen offenbaren die Komplexität des Systems. Gebiete, von denen man aus der geologischen Überlieferung erwarten würde, dass sie sich heben sollten, scheinen sich in Abhängigkeit vom gewählten geodätischen Datensatz derzeit abzusenken. Klimaeinflüsse, Grundwasserfluss, Schwankungen im Wachstum der Vegetation, Bodenbildung und die menschlichen Einflüsse auf die Oberfläche und den Untergrund (Bergbau, Grundwasserentnahme) überdecken in kurzen Messreihen häufig langsame aber stetig wirkende endogene Prozesse. Der eigentliche Einfluss und die Variabilität geodynamischer Prozesse wird nach wie vor rege diskutiert.

Wie zuvor erwähnt, ist Denudation (Abtragung) für größere Bereiche in der Regel mit geringeren Unschärfen anzugeben, da oft weniger Annahmen zu treffen wären als bei der Ausweisung von Hebung. In einer Beratungsunterlage der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe - Arbeitsgruppe 3: „Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen vom 21.09.2015 (K-Drs./AG3-36)“ wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass für die Sicherheit eines Endlagers die Abtragung und Abtragsrate die entscheidenden Größen sind. Ebenfalls wird auch angemerkt, dass für die jüngere geologische Geschichte der letzten Millionen Jahre keine Abtragungseignisse in Größenordnungen von 1000 m bekannt sind.

Jegliche Prognose zur Hebung und Senkung von Deutschland in den nächsten 1 Million Jahren hängt massiv von den Annahmen die man zum zukünftigen geodynamischen Werdegang trifft ab (Kap. 8). Wirken zukünftig dieselben Prozesse wie in den vergangenen Jahrmillionen oder ist mit größeren Änderungen zu rechnen? Deutschland liegt weit entfernt von tektonisch aktiven Plattengrenzen, an denen häufig größere Vertikalbewegungen auftreten. Ein sprunghafter geodynamischer Wechsel, mit potenziell hohen Vertikalbewegungsraten, wie zur Oberkreide erscheint nach heutigen Vorstellungen in naher Zukunft als unwahrscheinlich. Die für Mitteleuropa diskutierten, vermutlich zurzeit wirkenden endogenen Prozesse bringen nach heutigem Kenntnisstand nur Hebungsraten deutlich unter 1000 Meter pro Million Jahre hervor (siehe Kap. 4). Auch sind die derzeit anzunehmenden Maximalbeträge der Hebung, die wahrscheinlich gerade wirkende endogene Prozesse während ihrer Wirkungsdauer hervorbringen können, nicht viel größer als 1000 m. Somit liegt die Annahme nahe, dass 1000 m Hebung in den nächsten 1 Million Jahren für Deutschland unwahrscheinlich ist. Tausend Meter **Abtragung**, lokal oder regional, in Teilen der Alpen für die nächsten 1 Million Jahre ist dagegen ein durchaus vorstellbares Szenario. Das genaue Zusammenspiel exogener und endogener Prozesse ist jedoch nach wie vor nicht ausreichend verstanden. Auch muss angenommen werden, dass ein gleichzeitiges Wirken mehrerer endogener Prozesse möglich ist und neben manteldynamischen Prozessen von den Plattengrenzen ausgehende Fernwirkungen auch für Deutschland eine Rolle spielen könnten.

Prognosen mit qualitativen Charakter und zunehmenden Unschärfen, umso weiter man in die Zukunft schaut, sind sicherlich heute schon möglich. Verlässliche quantifizierbare flächige Zukunftsprognosen auf Basis von Modellen zu diesen komplexen geodynamischen Zusammenhängen verlangen jedoch eine genauere, konsistentere und flächendeckendere Datenbasis als heute vorhanden. Eine Darstellungsform der Ausweisung des Ausschlusskriteriums ohne diskrete Übergänge zwischen Gebieten wo das Ausschlusskriterium erfüllt wäre oder nicht, entsprechend der in diesem Bericht vorgestellten Darstellungsvorschläge (Kap. 7), entspräche somit der Unsicherheit im Stand der Forschung.

10 Literaturverzeichnis

- Adriasola Muñoz, Y. (2007): The thermal history of the western Lower Saxony Basin, Germany. – Monographie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen: 165 p.; Aachen.
- Ahnert, F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. – Stuttgart (Ulmer).
- Aitken, M.J. (1998): An introduction to optical dating; the dating of Quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence. – 276 p.; United Kingdom (Oxford University Press : Oxford, United Kingdom).
- Aizberg et al. (2001): Map No. 8 - Neotectonic structural subdivision - Beginning of Oligocene until the Recent. – In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (2001): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and adjacent areas. Results of IGCP project 346. – Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge, 1: pp. 1-48.
- Arfai, J. & Lutz, R. (2018): 3D basin and petroleum system modelling of the NW German North Sea (Entenschnabel). – Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series, 8(1): pp. 67-86. DOI:10.1144/pgc8.35.
- Arfai, J., Franke, D., Lutz, R., Reinhardt, L., Kley, J. & Gaedicke, C. (2018): Rapid Quaternary subsidence in the northwestern German North Sea. – Scientific Reports, 8(1): pp. 11524-11524. DOI:10.1038/s41598-018-29638-6.
- Arfai, J., Jähne, F., Lutz, R., Franke, D., Gaedicke, C. & Kley, J. (2014): Late Palaeozoic to Early Cenozoic geological evolution of the northwestern German North Sea (Entenschnabel): New results and insights. – Netherlands Journal of Geosciences, 93(4): pp. 147-174. DOI:10.1017/njg.2014.22.
- Artemieva, I.M. (2007): Dynamic topography of the East European craton: Shedding light upon lithospheric structure, composition and mantle dynamics. Global and Planetary Change, 58(1-4): pp. 411-434.
- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor - Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. – Geologisches Jahrbuch, A 153: pp. 3-95.

- Barnasch, J. (2009): Der Keuper im Westteil des Zentraleuropäischen Beckens (Deutschland, Niederlande, England, Dänemark): diskontinuierliche Sedimentation, Litho-, Zyκλο- und Sequenzstratigraphie. – Stratigraphy, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: 262 p.; Halle.
- Berger, J.-P., Reichenbacher, B., Becker, D., Grimm, M., Grimm, K., Picot, L., Storni, A., Pirkenseer, C., Derer, C. & Schaefer, A. (2005): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. – International Journal of Earth Sciences, **94**: pp. 697-710.
- Best, G. & Zirngast, M. (1998): Projekt Morsleben. Analyse der strukturellen Entwicklung des Salzstruktur Oberes Allertal und ihrer Umgebung. – Abschlussbericht, 120 S, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Beutler, G., Junker, R., Niediek, S. & Roessler, D. (2012): Tektonische Diskordanzen und tektonische Zyklen im Mesozoikum Nordostdeutschlands. Tectonic unconformities and tectonic cycles of the Mesozoic in northeastern Germany, **163**(4): pp. 447-468. DOI:10.1127/1860-1804/2012/0163-0447.
- Beyer, D. (2015): Evolution of reservoir properties in the Lower Triassic aquifer sandstones of the Thuringian Syncline in Central Germany. – University of Jena: Jena, Germany; Germany.
- BGE (02.08.2107). Abfrage der Daten für die Anwendung der Ausschlusskriterien. https://www.bfe.bund.de/SharedDocs/IP6/BfE/DE/20170802_BGE-geologischeDienste_Datenabfrage-Ausschlusskriterien.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [31.07.2019].
- BKG (2019): Die Höhenbezugsfläche von Deutschland - Höhenänderungen zwischen DHHN92 und DHHN2016. – Webpage - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. <https://www.bkg.bund.de/DE/Ueber-das-BKG/Geodaesie/Integrierter-Raumbezug/Hoehe-Deutschland/hoehe-deutsch.html> [Online access: 15.05.2019].
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.
- Brandes, C. & Tanner, D.C. (2014): Fault-related folding; a review of kinematic models and their application. – Earth Science Reviews, **138**: pp. 352-370. DOI:10.1016/j.earscirev.2014.06.008.
- Braun, J. (2002): Quantifying the effect of recent relief changes on age-elevation relationships. – Earth Planet. Sci. Lett., **200**: S. 331-43.

- Bruns, B., di Primio, R., Berner, U. & Littke, R. (2013): Petroleum system evolution in the inverted Lower Saxony Basin, northwest Germany: a 3D basin modeling study. – *Geofluids*, **13**(2): pp. 246-271. DOI:10.1111/gfl.12016.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Leibniz Universität Hannover - Institut für Geotechnik / Abteilung Unterirdisches Bauen (IGtH) and KBB Underground Technologies GmbH (KBB UT) (2016): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). – Technical Report 03ESP323B. ENERGIESPEICHER - Forschungsinitiative der Bundesregierung. 346 S. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/InSpEE_Abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Online access: 01.10.2018].
- Büdel, J. (1981): Klima-Geomorphologie. – 304 S., Berlin: Borntraeger.
- Burger, D. & Siegler, F. (2019): Die Obere Terrassengruppe im Oberen Mittelrheintal - Orte neuer Beobachtungen und Interpretationen (Exkursion E am 25. April 2019). – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.*, **101**: p. 32. DOI:10.1127/jmogv/101/0005.
- Cederbom, C. E., Van der Beek, P., Schlunegger, F., Sinclair, H. D. & Oncken, O. (2011): Rapid extensive erosion of the North Alpine foreland basin at 5-4 Ma. *Basin Research*. – Blackwell Publishing Ltd, **23**(5): 528-550.
- Champagnac, J.-D., Schlunegger, F., Norton, K., Blanckenburg, F. v., Abbühl, L. M. & Schwab, M. (2009): Erosion-driven uplift of the modern Central Alps. – *Tectonophysics*, **474**: 236–249.
- Cloetingh, S., Cornu, T., Ziegler, P.A. & Beekman, F. (2006): Neotectonics and intraplate continental topography of the northern Alpine Foreland. – *Earth Science Reviews*, **74**(3-4): pp. 127-196. DOI:10.1016/j.earscirev.2005.06.001.
- Cloetingh, S. & Van Wees, J.D. (2005): Strength reversal in Europe's intraplate lithosphere: Transition from basin inversion to lithospheric folding. – *Geology*, **33**(4): pp. 285-288.
- Cloetingh, S., Ziegler, P.A., Beekman, F., Andriessen, P.A.M., Matenco, L., Bada, G., Garcia-Castellanos, D., Hardebol, N., Dèzes, P. & Sokoutis, D. (2005): Lithospheric memory, state of stress and rheology: neotectonic controls on Europe's intraplate continental topography. – *Quaternary Science Reviews*, **24**(3): pp. 241-304. DOI:10.1016/j.quascirev.2004.06.015.

- Coubal, M., Málek, J., Adamovič, J. & Štěpančíková, P. (2015): Late Cretaceous and Cenozoic dynamics of the Bohemian Massif inferred from the paleostress history of the Lusatian Fault Belt. – *Journal of Geodynamics*, **87**: pp. 26-49. DOI:10.1016/j.jog.2015.02.006.
- Davis, W.M. (1924): Die erklärende Beschreibung der Landformen. – Leipzig/Berlin (B.G.Teubner).
- de Jager, J. (2003): Inverted basins in the Netherlands, similarities and differences. – *Netherlands Journal of Geosciences*, **82**(4): pp. 355-366.
- DEKORP-BASIN_Research_Group (1999): Deep crustal structure of the Northeast German basin: New DEKORP-BASIN'96 deep profiling results. – *Geology*, **27**: pp. 55-58.
- Demoulin, A. (2011): Basin and river profile morphometry: A new index with a high potential for relative dating of tectonic uplift. – *Geomorphology*, **126**(1): pp. 97-107. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.10.033.
- Demoulin, A. & Hallot, E. (2009): Shape and amount of the Quaternary uplift of the western Rhenish shield and the Ardennes (western Europe). – *Tectonophysics*, **474**(3): pp. 696-708. DOI:10.1016/j.tecto.2009.05.015.
- Demoulin, A., Hallot, E. & Rixhon, G. (2009): Amount and controls of the quaternary denudation in the Ardennes massif (western Europe). – *Earth Surface Processes And Landforms*, **34**(11): pp. 1487-1496. DOI:10.1002/esp.1834.
- Dèzes, P., Schmid, S.M. and Ziegler, P.A. (2004): Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. – *Tectonophysics*, **389**(1-2): pp. 1-33.
- Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 341 p.; Houten (EAGE Publications b.v. Houten).
- Duarte, J.C., Schellart, W.P. & Rosas, F.M. (2018): The future of Earth's oceans: consequences of subduction initiation in the Atlantic and implications for supercontinent formation. – *Geological Magazine*, **155**(1): pp. 45-58. DOI:10.1017/S0016756816000716.
- Eitel, B. (2002): Flächensystem und Talbildung im östlichen Bayerischen Wald (Großraum Passau-Freyung). – In: RATUSNY, A. (Hrsg.): Flusslandschaften an Inn und Donau. Passau (= Passauer Kontaktstudium Erdkunde. Band **6**), S. 19-34.

- Ekinci, Y.L. & Yiğitbaş, E. (2015): Interpretation of gravity anomalies to delineate some structural features of Biga and Gelibolu peninsulas, and their surroundings (north-west Turkey). – *Geodinamica Acta*, **27**(4): pp. 300-319. DOI:10.1080/09853111.2015.1046354.
- Ekman, M. & Mäkinen, J. (1996): Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia. – *Geophysical Journal International*, **126**(1): pp. 229-234. DOI:10.1111/j.1365-246X.1996.tb05281.x.
- Ellenberg, J. (1988): Rezente vertikale Krustenbewegungen als geologische Prozesse. – Dissertation B, 141 Seiten, Akademie der Wissenschaftender DDR; Potsdam.
- Ellenberg, J. (1987): Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen als geologischer Prozeß. – Forschungsbereich, 134 Seiten, Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Physik der Erde, Institutsteil Jena; Jena.
- England, P.C. & Molnar, P. (1990): Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks. – *Geology (Boulder)*, **18**(12): pp. 1173-1177.
- ENSI (2015): Frage 122: Einfluss der Schwarzwald-Hebung auf die Standortgebiete in der Nordschweiz. – Technisches Forum Sicherheit, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI. 22.07.2018. <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/einfluss-der-schwarzwald-hebung-auf-die-standortgebiete-in-der-nordschweiz/>.
- ESK (2012): Empfehlung der Entsorgungskommission. – Leitlinie zur Einordnung von Entwicklungen in Wahrscheinlichkeitsklassen. Revidierte Fassung vom 13.11.2012 -Verabschiedung durch die ESK im Umlaufverfahren, 12 S., 4 Abb.; Bonn.
- Evans, D.J., Graham, C., Armour, A. & Bathurst, P. (2003): *The Millennium Atlas: Petroleum geology of the central and northern North Sea*. – 390 p.; London (The Geological Society).
- Everaerts, M. & De Vos, W. (2012): Gravity acquisition in Belgium and the resulting Bouguer anomaly map. – 2012. **58**: 1-39 p.
- Felix-Henningsen, P. (1990): Die mesozoisch-tertiäre Verwitterungsdecke (MTV) im Rheinischen Schiefergebirge - Aufbau, Genese und quartäre Überprägung. – 192 p.; Berlin - Stuttgart (Gebr. Borntraeger).
- Fischer, F. (1987): Tertiary relief generations between the Vosges and the Hunsrück mountains. – *GeoJournal*, **15**(4): pp. 425-434. DOI:10.1007/bf00189082.

- Fitzgerald, P.G., Sorkhabi, R.B., Redfield, T.F. & Stump, E. (1995): Uplift and denudation of the central Alaska Range; a case study in the use of apatite fission track thermochronology to determine absolute uplift parameters. – *Journal of Geophysical Research*, **100**(B10): p. 175. DOI:10.1029/95JB02150.
- Franz, M. (2008): Litho- und Leitflächenstratigraphie, Chronostratigraphie, Zyklus- und Sequenzstratigraphie des Keupers im östlichen Zentraleuropäischen Becken (Deutschland, Polen) und Dänischen Becken (Dänemark, Schweden). – University of Halle: 198 p.; Halle.
- Frings, R.M., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S. & Hoffmann, T. (2019): From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth Science Reviews*, 196: p. 102830. DOI:10.1016/j.earscirev.2019.04.002.
- Frischbutter, A. & Schwab, G. (2001): Recent vertical movements (map 4). – In: *Neogeodynamica Baltica IGCP-Projekt 346*. Brandenb. Geowiss. Beitr., **8**(1): pp. 27-31.
- Frischbutter, A. & Schwab, G. (1995): Karte der rezenten vertikalen Krustenbewegungen in der Umrahmung der Ostsee-Depression. Ein Beitrag zu IGCP-Projekt Nr. 346 „Neogeodynamica Baltica“. – *Brandenburg. Geowiss. Beiträge*, **2**(2): pp. 59-67.
- Frisch, W. & Meschede, M. (2013): *Plattentektonik und Gebirgsbildung*. – 5. Aufl. Wissenschaftliche Buchgesellschaft/Primus-Verlag, Darmstadt (196 S., 1. Auflage 2005).
- Fuchs, M. (2008): *Optisch stimulierte Lumineszenzuntersuchungen an fluviatilen Sedimenten aus dem Lena-Delta (sibirische Arktis)*. – Diplomarbeit, Technische Universität Dresden Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften Institut für Geographie, Dresden, 161 S.
- Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., Van Leijen, F., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R. & Heck, B. (2015): Combining InSAR, Levelling and GNSS for the Estimation of 3D Surface Displacements. – DOI:10.5270/Fringe2015.pp80.
- Fuhrmann, T., Heck, B., Knöpfler, A., Masson, F., Mayer, M., Ulrich, P., Westerhaus, M. & Zippelt, K. (2013): Recent surface displacements in the Upper Rhine Graben - Preliminary results from geodetic networks. – *Tectonophysics*, **602**: pp. 300-315. DOI:10.1016/j.tecto.2012.10.012.

- Gallagher, K. (2012): Uplift, denudation, and their causes and constraints over geological timescales. – In: Roberts, D.G. & Bally, A.W. (Eds.): Regional Geology and Tectonics: Principles of Geologic Analysis. – pp. 608-644; Amsterdam (Elsevier). DOI:10.1016/B978-0-444-53042-4.00022-4.
- Gallagher, K., Brown, R.W. and Johnson, C. J., (1998): Geological Applications of Fission Track Analysis. – Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, **26**: S. 519-572.
- Garcia-Castellanos, D., Cloetingh, S. & Van Balen, R. (2000): Modelling the Middle Pleistocene uplift in the Ardennes–Rhenish Massif: thermo-mechanical weakening under the Eifel? – Global and Planetary Change, **27**(1): pp. 39-52. DOI:10.1016/S0921-8181(01)00058-3.
- Garetsky, R.G., Aizberg, R.Y., Karabanov, A.K., Kockel, F., Ludwig, A.O., Lykke-Andersen, H., Ostaficzuk, S., Palijenko, V.P., Sim, L.S., Sliupa, A. & Stackebrandt, W. (2001): The neogeodynamic state of the Baltic Sea depression and adjacent areas - some conclusions from the IGCP-Project 346: Neogeodynamica Baltica. Der neogeodynamische Zustand der Ostseesenke und benachbarter Gebiete - einige Schlussfolgerungen aus dem IGCP-Projekt 346: Neogeodynamica Baltica. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., **8**(1): 43-47.
- Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (2001b): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and adjacent areas. Results of IGCP project 346. – Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge, **1**: pp. 1-48.
- Gerardi, J. & Wildenborg, A.F.B. (1999): Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. – Abschlussbericht, 252 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Geyh, M.A. (2005): Handbuch der physikalischen und chemischen Altersbestimmung. – 211 p.; Darmstadt (Wissenschaftliche Buchges.).
- Glasmacher, U.A., Mann, U. & Wagner, G.A. (2002): Thermotectonic evolution of the Barrandian, Czech Republic, as revealed by apatite fission-track analysis. – Tectonophysics, **359**(3): pp. 381-402. DOI:10.1016/S0040-1951(02)00538-3.
- Grad, M., Tiira, T. & Group, E.W. (2009): The Moho depth map of the European Plate. – Geophysical Journal International, **176**(1): pp. 279-292. DOI:10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x.

- Graversen, O. (2006): The Jurassic-Cretaceous North Sea Rift Dome and Associated Basin Evolution. – Search and Discovery Article for presentation at AAPG Annual Convention: pp. 1-5.
- Green, P.F., Duddy, I.,R., Gleadow, A.,J.,W., Tingate, P., Laslett, G.,M. (1986): Thermal annealing of fission tracks in apatite. – Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, **59**: S. 237–253. DOI:10.1016/0168-9622(86)90074-6.
- Groten, E. (2003): Ist die Modellbildung in der Geodäsie hinreichend zukunftstauglich? – zfv, **128**(3): p. 4.
- Grünthal, G., Bosse, C. & Stromeyer, D. (2009): Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland: Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07 ‚Stauanlagen‘. – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Scientific Technical Report STR09/07; Potsdam. DOI:10.2312/GFZ.b103-09076.
- Guillou-Frottier, L., Burov, E., Nehlig, P. & Wyns, R. (2007): Deciphering plume–lithosphere interactions beneath Europe from topographic signatures. – Global and Planetary Change, **58**(1): pp. 119-140. DOI:10.1016/j.gloplacha.2006.10.003rep23168.
- Hetényi, G. et al. (2018a): The AlpArray Seismic Network: A Large-Scale European Experiment to Image the Alpine Orogen. – Surveys in Geophysics, **39**(5): pp. 1009-1033. DOI:10.1007/s10712-018-9472-4.
- Hetényi, G., Plomerová, J., Bianchi, I., Kampfová Exnerová, H., Bokelmann, G., Handy, M.R. & Babuška, V. (2018b): From mountain summits to roots: Crustal structure of the Eastern Alps and Bohemian Massif along longitude 13.3°E. – Tectonophysics, **744**: pp. 239-255. DOI:10.1016/j.tecto.2018.07.001.
- Hilgers, A. (2007): The chronology of Late Glacial and Holocene dune development in the northern Central European lowland reconstructed by optically stimulated luminescence (OSL) dating. – Dissertation, Köln: 353 p.
- Hoffmann, T., Erkens, G., Cohen, K.M., Houben, P., Seidel, J. & Dikau, R. (2007): Holocene floodplain sediment storage and hillslope erosion within the Rhine catchment. – The Holocene, **17**(1): pp. 105-118. DOI:10.1177/0959683607073287.
- Hoffmann, N., Stieve, H., Pasternak, G. (1996): Struktur und Genese der Mohorovicic-Diskontinuität (Moho) im Norddeutschen Becken - ein Ergebnis langzeitregistrierter Steilwinkelseismik. – Zeitschrift für Angewandte Geologie, **42**(2): S. 138-148.

- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007). Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Huuse, M. (2002): Late Cenozoic palaeogeography of the eastern North Sea Basin: climatic vs tectonic forcing of basin margin uplift and deltaic progradation. – Bulletin of the Geological Society of Denmark, **49**: pp. 145-170.
- Jähne-Klingberg, F., Bense, F. & Kley, J. (2016): Estimating masked deformation in basins influenced by halotectonics and structural inversion - the example of the Lower Saxony Basin. – Geological Society of London - Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin, 7-9 September, London.
- Jähne-Klingberg, F., Bense, F. & Kley, J. (2015): "Geological elevators"? - the example of a Muschelkalk block surrounded by Zechstein next to the Sontra Graben (NE Hesse). – GeoBerlin 2015 conference Earth System Dynamics, 4-7 October, Berlin, Poster & Abstract.
- Jähne, F., Arfai, J., Lutz, R. & Kuhlmann, G. (2011): Structural evolution of the German Central Graben. – DGG GeoMunich 2011, Fragile Earth, 04.09-07.09.2011.
- Jähne, F. & Kley, J. (2011): Structural balancing of the Lower Saxony basin and the southern border of the Northwest German Basin. – DGG GeoMunich 2011, Fragile Earth, 04.09-07.09.2011, Poster & Abstract.
- Jähne F., Malz, A. & Kley, J. (2010): Thüringen im Mittelpunkt der kretazischen Inversions-tektonik. – 20. Jahreshauptversammlung Thüringischer Geologischer Verein e.V., Jena, 04.06-05.06.2010, Poster & Abstract.
- Japsen, P., Bidstrup, T. & Lidmar-Bergström, K. (2002): Neogene uplift and erosion of southern Scandinavia induced by the rise of the South Swedish Dome. – In: Doré, A.G., Cartwright, J.A., Stoker, M.S., Turner, J.P. & White, N. (Eds.): Exhumation of the North Atlantic margin: timing, mechanism and implications for petroleum exploration. – **196**: pp. 183-207; London (Geological Society Special Publication).
- Jones, A.G., Plomerova, J., Korja, T., Sodoudi, F. & Spakman, W. (2010): Europe from the bottom up: A statistical examination of the central and northern European lithosphere-asthenosphere boundary from comparing seismological and electromagnetic observations. – Lithos, **120**(1): pp. 14-29. DOI:10.1016/j.lithos.2010.07.013.

- Kalia, A.C. & Vienken, S. (2019): Big Geospatial Data - Identifying Hazards with GIS Technology. – Bitkom Big Data.AI Summit, Berlin, 10.04.2019, <https://www.hub.berlin/programme-2019/big-geospatial-data-identifying-hazards-gis-technology> (accessed on: 25.07.2019).
- Kalia, A.C., Frei, M. & Lege, T. (2018): PSI-based German Ground Motion Service (BBD) to investigate natural and anthropogenic induced underground movements. – In: The Mechanical Behavior of Salt IX : proceedings : SALTMECH IX, Sept 12-14, 2018, BGR, Hannover, Germany. Ed.: Fahland, S. et al., ISBN: 978-3-9814108-6-0.
- Kalia, A.C., Frei, M. & Lege, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. – Remote Sensing of Environment, **202**: pp. 234-249. DOI:10.1016/j.rse.2017.05.015.
- Kalia, A., C., Frei, M., Lege, T. (2014): Preparation of a national Copernicus service for detection and monitoring of land subsidence and mass movements in the context of remote sensing assisted hazard mitigation. – In: Proceedings of SPIE (9245), Earth Resources and Environmental Remote Sensing / GIS Applications V. Ed.: Ulrich, M., Karsten, S., Amsterdam, DOI:10.1117/12.2067268.
- K-Drs./AG3-36 (21.09.2015): Beratungsunterlage zu TOP 5 der 12. Sitzung am 22. September 2015 Hinweise zu den „Geowissenschaftlichen Kriterien“ unter Bezug auf K-Drs. /AG3-33 „Geowissenschaftliche Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens (Entwurf 2, 20. August 2015). – Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz - Arbeitsgruppe 3: Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen.
- Kelly, J.E. (2010): THE POST-TRIASSIC UPLIFT AND EROSION HISTORY OF THE SOUTHWESTERN UK. – 619 p.; Birmingham (University of Birmingham).
- King, C. (2006): Paleogene and Neogene: uplift and a cooling climate. – In: Brenchley, P.J. & Rawson, P.F. (Eds.): The Geology of England and Wales. – pp. 397-427; London (The Geological Society).
- Klein, W., Krickel, B., Riecken, J. & Salamon, M. (2016): Eine interdisziplinäre Betrachtung der vertikalen Bodenbewegungen in der Eifel. – zfv, **141**(1): p. 8. DOI:10.12902/zfv-0103-2015.
- Kley, J. (2018): Timing and spatial patterns of Cretaceous and Cenozoic inversion in the Southern Permian Basin. – Special Publication - Geological Society of London, **469**(1): pp. 19-31. DOI:10.1144/SP469.12.

- Kley, J. (2013): Saxonian tectonics in the 21st century. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, **164**(2): pp. 295-311.
- Kley, J. & Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: Effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. – *Geology*, **36**(11): pp. 839-842. DOI:10.1130/g24930a.1.
- Kley, J., Franzke, H.-J., Jähne, F., Krawczyk, C., Lohr, T., Reicherter, K., Scheck-Wenderoth, M., Sippel, J., Tanner, B. & Van Gent, H. (2008): Strain and stress. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Hg.): Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin System: 97-124, Berlin (Springer).
- Klotz, T., Pomella, H., Reiser, M., Fügenschuh, B. & Zattin, M. (2019): Differential uplift on the boundary between the Eastern and the Southern European Alps: Thermochronologic constraints from the Brenner Base Tunnel, **31**. DOI:10.1111/ter.12398.
- Knapmeyer-Endrun, B., Krüger, F. & Geissler, W.H. (2017): Upper mantle structure across the Trans-European Suture Zone imaged by S-receiver functions. – *Earth and Planetary Science Letters*, **458**: pp. 429-441. DOI:10.1016/j.epsl.2016.11.011.
- Kockel, F. (ed.) (1995): (mit Beiträgen von R. Baldschuhn, G. Best, F. Binot, U. Frisch, U. Gross, U. Jürgens, H.-G. Röhling & S. Sattler-Kosinowski, S.): Structural and palaeogeographical development of the German North Sea sector. – *Beitr. Reg. Geol. Erde*, **26**: 96 S.
- Kommission Lagerung Hoch Radioaktiver Abfallstoffe (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. – Berlin 683 S.
- König, W. (2008): Zeitliche und genetische Einordnung von tertiären Sedimentvorkommen im Mittelharz und im Harzvorland - Ein Beitrag zur Reliefentwicklung und zur Karstmorphogenese im Harz. – Dissertation.
- Krebetschek, M. (1995): Lumineszenz-Datierung quartärer Sedimente Mittel-, Ost- und Nordostdeutschlands. – Dissertation, TU Bergakademie Freiberg: 122 p.; Freiberg.
- KTA (2011): KTA 2201, Teil 1, Sicherheitstechnische Regel des KTA. Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen. (Kerntechnischer Ausschuss (KTA)).

- Kugler, H. & Villwock, G. (1995): Interpretation der Untersuchungsergebnisse der Morphogenetischen Kartierung Untersuchungsgebiet ERA Morsleben hinsichtlich jüngerer geodynamischer Bewegungen. – ARGE geol. Forschung und Erkundung GmbH Halle/ Aerocart GmbH Delitzsch, 10. S.
- Kuzmin, Y.O. (2017): Paradoxes of the comparative analysis of ground-based and satellite geodetic measurements in recent geodynamics. – *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, **53**(6): pp. 825-839. DOI:10.1134/s1069351317060027.
- Lange, J.-M. (2012): Die Elbe im östlichen Sachsen. – pp. 24-55. DOI:10.13140/RG.2.1.4798.6724.
- Lange, J.-M., Tonk, C. & Wagner, G.A. (2008): Apatitspaltspurdaten zur postvariszischen thermotektonischen Entwicklung des sächsischen Grundgebirges - erste Ergebnisse. DOI:10.13140/RG.2.1.4798.6724 – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, **159**(1): pp. 123-132. DOI:10.1127/1860-1804/2008/0159-0123.
- Laubscher, H. (2003): Balanced sections and the propagation of décollement: A Jura perspective. DOI:10.13140/RG.2.1.4798.6724 – *Tectonics*, **22**(6): DOI:10.1029/2002tc001427.
- Laubscher, H. (1992): Jura kinematics and the Molasse Basin. – **67**: 121-133 p.
- Le Breton, E., Handy, M.R., Molli, G. & Ustaszewski, K. (2017): Post-20 Ma Motion of the Adriatic Plate: New Constraints From Surrounding Orogens and Implications for Crust-Mantle Decoupling. – *Tectonics*, **36**(12): pp. 3135-3154. DOI:10.1002/2016tc004443.
- Lege, T., Kalia, A. & Frei, M. (2019): Aspekte des Bodenbewegungsdienstes Deutschland. – GeoMonitoring 2019, Tagung des DVW Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformatik und Landmanagement e.V., März 2019 an der Leibniz Universität Hannover. DOI:10.15488/4511.
- Lege, T., Kalia, A. & Frei, M. (2016a): Bodenbewegungsdienst Deutschland - Konzept, Pilotanwendungen und weiteres Vorgehen. – In: 76. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft gemeinsam mit der Arbeitsgemeinschaft Extraterrestrische Forschung und dem Fachverband Extraterrestrische Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 14.-17. März 2016 in Münster. DOI:10.2312/dgg76.

- Lege, T., Frei, M., Kalia, A. & (2016b): Integrated InSAR based Copernicus ground motion service for Germany: paleoseismic aspects. – In: Proceedings of the 7th International INQUA Workshop on Paleoseimology, Active Tectonics and Archaeoseismology (“PATA Days”), Ed.: McCalpin, J., Grützner, C.; 30 May-3 June 2016, Crestone, Colorado, USA, ISBN: 978-0-9974355-2-8.
- Legrain, N., Dixon, J., Stüwe, K., von Blanckenburg, F. & Kubik, P. (2015): Post-Miocene landscape rejuvenation at the eastern end of the Alps. – *Lithosphere*, **7**(1): pp. 3-13. DOI:10.1130/l391.1.
- Leydecker, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. – *Geol. Jahrbuch, Reihe E, Heft 59*.
- Liao, J., Gerya, T. & Malusà, M.G. (2018): 3D modeling of crustal shortening influenced by along-strike lithological changes: Implications for continental collision in the Western and Central Alps. – *Tectonophysics*, **746**: pp. 425-438. DOI:10.1016/j.tecto.2018.01.031.
- Lisker, F., Ventura, B. & Glasmacher, U.A. (eds.) (2009): *Thermochronological Methods: From Palaeotemperature Constraints to Landscape Evolution Models*. – London (Geological Society of London). DOI:10.1144/SP324.
- Lommerzheim, A., Bebiolka, A., Jahn, S., Jobmann, M., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel A. & Stark, L. (2015). Szenarienentwicklung für das Endlagerstandortmodell NORD - Methodik und Anwendung, Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. – Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-17-2014-AP, Peine.
- Lotsch, D. (1998): Projekt Morsleben: Geologische Bearbeitung von Kreide und Tertiär. – Abschlussbericht I 064, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Ludwig, A.O. (2001a): Recent position of surfaces of Holsteinian interglacial marine and limnic sediments, and of Saalian glacial river terraces (Explanatory notes to map 3). – *Neogeodynamica Baltica IGCP-Project 346*. Brandenburgische Geowiss. Beiträge, **8**(1): pp. 21-25.
- Ludwig, A.O. (2001b): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). – In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (Eds.): *Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346*. – Vol. **8**, Brandenburgische Geowiss. Beitr.: 5-12; Kleinmachnow.

- Ludwig, A.O. & Schwab, G. (1995): Neogeodynamica Baltica - ein internationales Kartenprojekt (IGCP-Projekt Nr. 346). Deutsche Beiträge zur Charakterisierung der vertikalen Bewegungen seit Beginn des Rupelian (Unteroligozän) bzw. seit Ende der Holstein-Zeit. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, **2**(2): S. 47-57.
- Malkovský, M. (1987): The Mesozoic and Tertiary basins of the Bohemian Massif and their evolution. – *Tectonophysics*, **137**(1-4): pp. 31-42. DOI:10.1016/0040-1951(87)90311-8.
- Malz, A., Madritsch, H. & Kley, J. (2015): Improving 2D seismic interpretation in challenging settings by integration of restoration techniques: A case study from the Jura fold-and-thrust belt (Switzerland). – *Interpretation*, **3**(4): pp. SAA37-SAA58. DOI:10.1190/INT-2015-0012.1.
- Malz, A., Kley, J. & Jähne-Klingberg, F. (2014): Is past deformation of continental interiors a key to understanding modern intraplate seismicity? – AGU Fall Meeting, San Francisco; 12/2014 (Poster).
- Matthews, K.J., Seton, M. & Müller, R.D. (2012): A global-scale plate reorganization event at 105-100Ma. – *Earth and Planetary Science Letters*, **355-356**: pp. 283-298. DOI:10.1016/j.epsl.2012.08.023.
- Meier, T., Soomro, R.A., Viereck, L., Lebedev, S., Behrmann, J.H., Weidle, C., Cristiano, L. & Hanemann, R. (2016): Mesozoic and Cenozoic evolution of the Central European lithosphere. – *Tectonophysics*. DOI:10.1016/j.tecto.2016.09.016.
- Meschede, M. (2015): *Geologie Deutschlands: ein prozessorientierter Ansatz*. – Springer Spektrum: Berlin [u. a.].
- Meurers, B. & Ruess, D. (2009): A new Bouguer gravity map of Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*. – *Mitteilungen der Oesterreichischen Geologischen Gesellschaft*, **102**(1): pp. 62-70.
- Mey, J., Scherler, D., Wickert, A.D., Egholm, D.L., Tesauro, M., Schildgen, T.F. & Strecker, M.R. (2016): Glacial isostatic uplift of the European Alps. – *Nature Communications*, **7**: p. 13382. DOI:10.1038/ncomms13382.
- Meyer, H., Hetzel, R. & Strauss, H. (2010): Erosion rates on different timescales derived from cosmogenic ¹⁰Be and river loads: implications for landscape evolution in the Rhenish Massif, Germany. – *International Journal of Earth Sciences*, **99**(2): pp. 395-412. DOI:10.1007/s00531-008-0388-y.

- Meyer, W. & Stets, J. (1998): Junge Tektonik im Rheinischen Schiefergebirge und ihre Quantifizierung. – Z. dtsh. geol. Ges., **149**(3): pp. 359-379.
- Molinari, I. & Morelli, A. (2011): EPcrust: a reference crustal model for the European Plate. – Geophysical Journal International, **185**(1): pp. 352-364. DOI:10.1111/j.1365-246X.2011.04940.x.
- Morel, P., Von Blanckenburg, F., Schaller, M., Kubik, P.W. & Hinderer, M. (2003): Lithology, landscape dissection and glaciation controls on catchment erosion as determined by cosmogenic nuclides in river sediment (the Wutach Gorge, Black Forest). – Terra Nova, **15**(6): pp. 398-404. DOI:10.1046/j.1365-3121.2003.00519.x.
- Moreno, D., Verbeeck, K., Camelbeeck, T., Batist, M., Oggioni, F., Zurita Hurtado, O., Versteeg, W., Jomard, H., Collier, J., Gupta, S., Alain, T. & Vanneste, K. (2015): Fault activity in the epicentral area of the 1580 Dover-Strait/Pas-de-Calais earthquake (North-western Europe). – Geophysical Journal International, **201**(2): 528-542 p. DOI:10.1093/gji/ggv041.
- Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Stand: 20.04.2014; Hannover.
- Mrugalla, S. (2014). Methodik und Anwendung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein - Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Norddeutschland - ohne Endlagereinfluss. – Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Müller, C., Jähne-Klingberg, F., von Goerne, G., Binot, F. & Roehling, H.-G. (2016): Vom Geotektonischen Atlas („Kockel-Atlas“) zu einem 3D-Gesamtmodell des Norddeutschen Beckens; Basisinformationen zum tieferen Untergrund von Norddeutschland. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft fuer Geowissenschaften, **167**(2-3): pp. 65-106. DOI:10.1127/zdgg/2016/0072.
- Müller, W.H., Naef, H. & Graf, H.R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland : Textband und Beilagen. – Technischer Bericht; NTB/Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle; 99-08. Wettingen (Nagra).
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse; Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. – Technischer Bericht; NTB/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle ; 02-03. Wettingen (Nagra).

- Nocquet, J.M., Sue, C., Walpersdorf, A., Tran, T., Lenôtre, N., Vernant, P., Cushing, M., Jouanne, F., Masson, F., Baize, S., Chéry, J. & van der Beek, P.A. (2016): Present-day uplift of the western Alps. – *Scientific Reports*, **6**: p. 28404. DOI:10.1038/srep28404.
- Ortner, H., Aichholzer, S., Zerlauth, M., Pilser, R. & Fügenschuh, B. (2015): Geometry, amount, and sequence of thrusting in the Subalpine Molasse of western Austria and southern Germany, European Alps. – *Tectonics*, **34**(1): pp. 1-30. DOI:10.1002/2014tc003550.
- Pánek, T. & Kapustová, V. (2016): Long-Term Geomorphological History of the Czech Republic. – In: Pánek, T. & Hradecký, J. (Eds.): *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*. – pp. 29-39; Cham (Springer International Publishing). DOI:10.1007/978-3-319-27537-6_4.
- Paul, J. (2019): Hat sich der Harz im jüngeren Tertiär und Quartär gehoben? – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, **170**(1): pp. 95-107. DOI:10.1127/zdgg/2019/0181.
- Paul, J., Wemmer, K. & Wetzel, F. (2009): Keuper (Late Triassic) sediments in Germany - indicators of rapid uplift of Caledonian rocks in southern Norway. – *NORWEGIAN JOURNAL OF GEOLOGY*, **89**: pp. 193-202.
- Peeters, J., Busschers, F.s. & Stouthamer, E. (2014): Fluvial evolution of the Rhine during the last interglacial-glacial cycle in the southern North Sea basin: A review and look forward. – *Quaternary International*, **357**. DOI:10.1016/j.quaint.2014.03.024.
- Penck, W. (1953): *Morphological Analysis of Land Forms. A Contribution to Physical Geology*. – *Geological Magazine*, **90**(06): p. 441.
- Penck, W. (1924): *Die Morphologische Analyse. Ein Kapitel der physikalischen Geologie*. – *Geographische Abhandlungen*, **2**(2); Stuttgart (J. Engelhorns).
- Peterek, A., Rauche, H., Schröder, B., Franzke, H.J., Bankwitz, P. & Bankwitz, E. (1997): The late- and post-Variscan tectonic evolution of the Western Border fault zone of the Bohemian Massif (WBZ). – In: Rauche, H., Schroeder, B., Franzke, H.J., Bankwitz, P. & Bankwitz, E. (Eds.): *Geologische Rundschau*. – Vol. **86**: pp. 191-202; Federal Republic of Germany (Springer International : Berlin, Federal Republic of Germany).

- Peterek, A. & Schröder, B. (1997): Neogene fault activity and morphogenesis in the basement area north of the KTB drill site (Fichtelgebirge and Steinwald). – *Geologische Rundschau*, **86**(1): pp. 185-190.
- Popotnig, A., Tschegg, D. & Decker, K. (2013): Morphometric analysis of a reactivated Variscan fault in the southern Bohemian Massif (Budějovice basin, Czech Republic). – *Geomorphology*, **197**: pp. 108-122. DOI:10.1016/j.geomorph.2013.04.042.
- Prescott, J.R. & Robertson, G.B. (1997): Sediment dating by luminescence: a review. – *Radiation Measurements*, **27**(5): pp. 893-922. DOI:10.1016/S1350-4487(97)00204-7.
- Preuss, J., Burger, D. & Siegler, F. (2019): Die Obere Terrassengruppe im Oberen Mittelrheintal - Orte neuer Beobachtungen und Interpretationen (Exkursion E am 25. April 2019). – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.*, **101**: p. 32. DOI:10.1127/jmogv/101/0005.
- Preusser, F. (2008): Characterisation and evolution of the River Rhine system. *Geologie en Mijnbouw*. – *Netherlands Journal of Geosciences*, **87**(1): pp. 7-19.
- Puff, P. & Radzinski, K.-H. (2014): Der Buntsandstein in der Thüringischen Senke. – *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, **69**: pp. 421-448. DOI:10.1127/sdgg/69/2014/421.
- Rabbel, W., Förster, K., Schulze, A., Bittner, R., Röhl, J., Reichert, J.C.: A high-velocity layer in the lower crust of the North German Basin. – *Terra Nova*, **7**(3): S. 327-337, 1995.
- Rausch, M. (1996): Mengenbestimmung der jungen Abtragungsprodukte des Thueringer Waldes am Beispiel des Weser-Fluss-Systems. Amount of the young erosion-products of the Thueringer Wald, located in the deposits of the Weser River system, **46**: pp. 91-98.
- Reiners, P.W., Brandon, M.T. (2006): Using Thermochronology to Understand Orogenic Erosion. – *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **34**: S.419-466.
- Rennie, A. & Hansom, J. (2011): Sea level trend reversal: Land uplift outpaced by sea level rise on Scotland's coast. – *Geomorphology*, **125**(1): 193-202 p. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.09.015.
- Ring, U., Brandon, M.T., Willett, S.D. & Lister, G.S. (1999): Exhumation processes. – *Geological Society Special Publications*, **154**: pp. 1-27.

- Rixhon, G., Braucher, R., Bourlès, D., Siame, L., Bovy, B. & Demoulin, A. (2011): Quaternary river incision in NE Ardennes (Belgium)-Insights from $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ dating of river terraces. – *Quaternary Geochronology*, **6**(2): pp. 273-284. DOI:10.1016/j.quageo.2010.11.001.
- Röhling, H.-G. (1991): A Lithostratigraphic Subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German Lowlands and the German Sector of the North Sea, Based on Gamma-Ray and Sonic Logs. – *Geologisches Jahrbuch*, **A 119**: pp. 3-24.
- Rotstein, Y. & Schaming, M. (2011): The Upper Rhine Graben (URG) revisited: Miocene transtension and transpression account for the observed first-order structures. – *Tectonics*, **30**(3). DOI:10.1029/2010tc002767.
- Rotstein, Y. & Schaming, M. (2010): Miocene transpression is the cause for the uplift of the Vosges and Black Forest Mountains.– *Geophysical Research Abstracts*, **12**. EGU General Assembly 2010; Vienna (Copernicus).
- Sánchez, L., Völksen, C., Sokolov, A., Arenz, H. & Seitz, F. (2018): Present-day surface deformation of the Alpine Region inferred from geodetic techniques. – *Earth System Science Data Discussions*, 2018: pp. 1-29. DOI:10.5194/essd-2018-19.
- Schaller, M., Ehlers, T.A., Stor, T., Torrent, J., Lobato, L., Christl, M. & Vockenhuber, C. (2016): Spatial and temporal variations in denudation rates derived from cosmogenic nuclides in four European fluvial terrace sequences. – *Geomorphology*, **274**: pp. 180-192. DOI:10.1016/j.geomorph.2016.08.018.
- Schaller, M., von Blanckenburg, F., Hovius, N., Veldkamp, A., van den Berg, Meindert W. & Kubik, P.W. (2004): Paleoerosion Rates from Cosmogenic ^{10}Be in a 1.3 Ma Terrace Sequence: Response of the River Meuse to Changes in Climate and Rock Uplift. – *The Journal of Geology*, **112**(2): pp. 127-144. DOI:10.1086/381654.
- Schaller, M., von Blanckenburg, F., Hovius, N. & Kubik, P.W. (2001): Large-scale erosion rates from in situ-produced cosmogenic nuclides in European river sediments. – *Earth and Planetary Science Letters*, **188**(3): pp. 441-458. DOI:10.1016/S0012-821X(01)00320-X.
- Schleicher, H. & Geyh, M.A. (1990): Absolute age determination; physical and chemical dating methods and their application. – Germany (Springer-Verlag : Berlin, Federal Republic of Germany).
- Schlunegger, F. & Mosar, J. (2011): The last erosional stage of the Molasse Basin and the Alps. – *International Journal of Earth Sciences*, **100**: pp. 1147-1162.

- Schott, B. & Schmeling, H. (1998): Delamination and detachment of a lithospheric root. – *Tectonophysics*, **296**(3): pp. 225-247. DOI:10.1016/S0040-1951(98)00154-1.
- Schröder, B. & Peterek, A. (2001): Känozoische Hebungs- und Abtragungsgeschichte im Umfeld des westlichen Egergrabens. – *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, **152**(2-4): pp. 387-403. DOI:10.1127/zdgg/152/2001/387.
- Schröder, B., Ahrendt, H., Peterek, A. & Wemmer, K. (1997): Post-Variscan sedimentary record of the SW margin of the Bohemian Massif; a review. – *Geologische Rundschau*, **86**(1): pp. 178-184.
- Schwab & Rappsilber (2008): Neotektonik. – In Bachmann, G., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M.): *Geologie von Sachsen-Anhalt*. – S. 44-50. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung; Stuttgart. ISBN: 987-3-510-65240-2.
- Schwarz, M. & Henk, A. (2005): Evolution and structure of the Upper Rhine Graben: insights from three-dimensional thermomechanical modelling. – *International Journal of Earth Sciences*, **94**(4): pp. 732-750. DOI:10.1007/s00531-004-0451-2.
- Serpelloni, E., Vannucci, G., Anderlini, L. & Bennett, R.A. (2016): Kinematics, seismotectonics and seismic potential of the eastern sector of the European Alps from GPS and seismic deformation data. – *Tectonophysics*, **688**: pp. 157-181. DOI:10.1016/j.tecto.2016.09.026.
- Sissingh, W. (2006a): Kinematic sequence stratigraphy of the European Cenozoic Rift System and Alpine Foreland Basin: Correlation with Mediterranean and Atlantic plate-boundary events. – *Geologie en Mijnbouw* **85**(2). DOI:10.1017/S0016774600077921.
- Sissingh, W. (2006b): Syn-kinematic palaeogeographic evolution of the West European Platform: correlation with Alpine plate collision and foreland deformation. – *Netherlands Journal of Geosciences*, **85**(2): pp. 131-180.
- Sissingh, W. (2003): Stratigraphic framework of the European Cenozoic Rift System: a visual overview. (Utrecht). – *Geologica Ultraiectina*, Special Publication.
- Sougnéz, N. & Vanacker, V. (2011): The topographic signature of Quaternary tectonic uplift in the Ardennes massif (Western Europe). Stratigraphic framework of the European Cenozoic Rift System: a visual overview. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**: 1095-1107 p. DOI:10.5194/hess-15-1095-2011.

- Strasser, A., Strasser, M. & Seyfried, H. (2010): Quantifying erosion over timescales of one million years: A photogrammetric approach on the amount of Rhenish erosion in southwestern Germany. – *Geomorphology*, **122**(3): pp. 244-253. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.06.027.
- StandAG (2017): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- Stark, L. (2014). Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland - ohne Endlagereinfluss. – Ergebnisbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Keller, S. & Gerardi, J. (2015a). FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau. – Ber.-Nr.: TEC-22-2014-AP, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH; Hannover, Braunschweig, Peine.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K. & Rübel, A. (2015b). FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD - Konzept und Aufbau. – Ber.-Nr.: TEC-16-2016-TB, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH; Hannover, Braunschweig, Peine.
- Steffen, H. & Wu, P. (2011): Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia - A review of data and modeling. – *Journal of Geodynamics*, **52**(3): pp. 169-204. DOI:10.1016/j.jog.2011.03.002.
- Steffen, H., Gitlein, O., Denker, H., Mueller, J. & Timmen, L. (2009): Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry. – *Tectonophysics*, **474**(1-2): pp. 69-77. DOI:10.1016/j.tecto.2009.01.012.
- Steffen, H. (2006): Determination of a consistent viscosity distribution in the Earth's mantle beneath Northern and Central Europe. – Germany.
- Steinboefel, G., Breuer, J., von Blanckenburg, F., Horn, I. & Sommer, M. (2017): The dynamics of Si cycling during weathering in two small catchments in the Black Forest (Germany) traced by Si isotopes. – DOI:10.1016/j.chemgeo.2017.06.026.

- Steinmüller, A. (1992): Zur Frage der Reliefgenerationen im Bereich der Mittelgebirgsschwelle - dargestellt am Beispiel des Flußgebietes der Saale. – In: Billwitz, K., Janke, W. & Jäger, K.-D. (Eds.): Jungquartäre Landschaftsräume: Aktuelle Forschungen zwischen Atlantik und Tienschan. – pp. 127-135; Berlin, Heidelberg (Springer Berlin Heidelberg). DOI:10.1007/978-3-642-76745-6_14.
- Sternai, P., Sue, C., Husson, L., Serpelloni, E., Becker, T.W., Willett, S.D., Faccenna, C., Di Giulio, A., Spada, G., Jolivet, L., Valla, P., Petit, C., Nocquet, J.-M., Walpersdorf, A. & Castelltort, S. (2019): Present-day uplift of the European Alps: Evaluating mechanisms and models of their relative contributions. – *Earth Science Reviews*, **190**: pp. 589-604. DOI:10.1016/j.earscirev.2019.01.005.
- Storck, G. H. (1998): Projekt ERA Morsleben. Geologische Standortbeschreibung. – Verfahrensunterlage P 78, 274 S. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Strasser, A., Strasser, M. & Seyfried, H. (2010): Quantifying erosion over timescales of one million years: A photogrammetric approach on the amount of Rhenish erosion in southwestern Germany. – *Geomorphology*, **122**(3): pp. 244-253. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.06.027.
- Summerfield, M.A. (1991): *Global geomorphology; an introduction to the study of landforms.* – United Kingdom (Longman Sci. and Tech. : Essex, United Kingdom).
- Summerfield, M.A. & Brown, R.W. (1998): Geomorphic Factors in the Interpretation of Fission-Track Data. – In: van den Haute, P. & de Corte, F. (Eds.): *Advances in Fission-Track Geochronology: A selection of papers presented at the International Workshop on Fission-Track Dating, Ghent, Belgium, 1996.* – pp. 269-284; Dordrecht (Springer Netherlands). DOI:10.1007/978-94-015-9133-1_17.
- Tanner, D.C. & Krawczyk, C.M. (2017): Restoration of the Cretaceous uplift of the Harz Mountains, North Germany: evidence for the geometry of a thick-skinned thrust. – *International Journal of Earth Sciences*, **106**(8): pp. 2963-2972. DOI:10.1007/s00531-017-1475-8.
- Thomson, S.N. & Zeh, A. (2000): Fission-track thermochronology of the Ruhlá Crystalline Complex: new constraints on the post-Variscan thermal evolution of the NW Saxo-Bohemian Massif. – *Tectonophysics*, **324**(1-2): pp. 17-35.

- Tyráček, J., Westaway, R. & Bridgland, D. (2004): River terraces of the Vltava and Labe (Elbe) system, Czech Republic, and their implications for the uplift history of the Bohemian Massif. – Proceedings of the Geologists' Association, **115**(2): pp. 101-124. DOI:10.1016/S0016-7878(04)80022-1.
- Tyráček, J. (2001): Upper Cenozoic fluvial history in the Bohemian Massif. – Quaternary International, **79**(1): pp. 37-53. DOI:10.1016/S1040-6182(00)00121-X.
- Underhill, J.R. & Partington, M.A. (1993): Jurassic thermal doming and deflation in the North Sea: implications of the sequence stratigraphic evidence. – In: Parker, J.R. (Ed.): Petroleum Geology of Northwest Europe. – Proceedings of the 4th Conference, **4**: pp. 337-345.
- Valeton, I. (1983): Klimaperioden lateritischer Verwitterung und ihr Abbild in den synchronen Sedimentationsräumen. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft **134**: 413-452.
- Vamvaka, A., Siebel, W., Chen, F. & Rohrmueller, J. (2013): Apatite fission-track dating and low-temperature history of the Bavarian Forest (southern Bohemian Massif). – International Journal of Earth Sciences, Geologische Rundschau, **103**(1): pp. 103-119. DOI:10.1007/s00531-013-0945-x.
- Van Balen, R.T., Houtgast, R.F., Van der Wateren, F.M., Vandenberghe, J. & Bogaart, P.W. (2000): Sediment budget and tectonic evolution of the Meuse catchment in the Ardennes and the Roer Valley Rift System. – Global and Planetary Change, **27**(1-4): pp. 113-129.
- Van Camp, M., de Viron, O., Scherneck, H.-G., Hinzen, K.-G., Williams, S.D.P., Lecocq, T., Quinif, Y. & Camelbeeck, T. (2011): Repeated absolute gravity measurements for monitoring slow intraplate vertical deformation in western Europe. – Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **116**(8). DOI:10.1029/2010jb008174.
- van der Beek, P. (2013): Exhumation (Thermochronology). – In: Rink, W.J. & Thompson, J. (Eds.): Encyclopedia of Scientific Dating Methods. – pp. 1-5; Dordrecht (Springer Netherlands). DOI:10.1007/978-94-007-6326-5_249-1.
- Van der Pluijm, B.A., Marshak, S. & Allmendinger, R.W. (2004): Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. (W.W. Norton).
- van Winden, M., de Jager, J., Jaarsma, B. & Bouroulllec, R. (2018): New insights into salt tectonics in the northern Dutch offshore: a framework for hydrocarbon exploration. – Geological Society, London, Special Publications, **469**. DOI:10.1144/sp469.9.

- Vejbaek, O.V. (1990): The Horn Graben and its relationship to the Oslo Graben and the Danish Basin. – *Tectonophysics*, **178**: pp. 29-49.
- Ventura, B., Lisker, F. & Kopp, J. (2009): Thermal and denudation history of the Lusatian Block (NE Bohemian Massif, Germany) as indicated by apatite fission-track data. – *Geological Society, London, Special Publications*, **324**(1): pp. 181-192. DOI:10.1144/sp324.14.
- Vernon, A.J., van der Beek, P.A., Sinclair, H.D. & Rahn, M.K. (2008): Increase in late Neogene denudation of the European Alps confirmed by analysis of a fission-track thermochronology database. – *Earth and Planetary Science Letters*, **270**(3): pp. 316-329. DOI:10.1016/j.epsl.2008.03.053.
- Vestøl, O., Ågren, J., Steffen, H., Kierulf, H. & Tarasov, L. (2019): NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. – *Journal of Geodesy*. DOI:10.1007/s00190-019-01280-8.
- Vink, A., Steffen, H., Reinhart, L. & Kaufmann, L. (2007): Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). – *Quaternary Science Reviews*, **26**: 3249-3275.
- Voigt, T. (2009): Die Lausitz-Riesengebierts-Antiklinalzone als kreidezeitliche Inversionsstruktur: Geologische Hinweise aus den umgebenden Kreidebecken. – *Z. geol. Wiss.*, **37**(1-2): pp. 15-39.
- Voigt, T., Eynatten, H. & Franzke, H.-J. (2004): Late Cretaceous unconformities in the Subhercynian Crataceous Basin (Germany). *Acta Geologica Polonica*, **54**: pp. 675-696.
- von Eynatten, H., Dunkl, I., Brix, M., Hoffmann, V.-E., Raab, M., Thomson, S.N. & Kohn, B. (2019): Late Cretaceous exhumation and uplift of the Harz Mountains, Germany: a multi-method thermochronological approach. – *International Journal of Earth Sciences*, **108**(6): pp. 2097-2111. DOI:10.1007/s00531-019-01751-5.
- von Eynatten, H., Voigt, T., Meier, A., Franzke, H.J. & Gaupp, R. (2008): Provenance of Cretaceous clastics in the Subhercynian Basin: constraints to exhumation of the Harz Mountains and timing of inversion tectonics in Central Europe. – *International Journal of Earth Sciences*, **97**(6): pp. 1315-1330. DOI:10.1007/s00531-007-0212-0.

- Vrojlik P, Donelick RA, Queng J, Cloos M. (1992) Testing models of fission track annealing in apatite in a simple thermal setting: site 800, leg 129. – In: Larson, R; Lancelot, Y et al. (ed.): Proc. Ocean Drilling Program, Scientific Results. **129**:169-176; College Station Texas (Ocean Drilling Program).
- Wagenbreth, O. & Steiner, W. (1990): Geologische Streifzüge - Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg. – 4. Auflage ed.: VIII, 196 p.; (Springer Spektrum). DOI:10.1007/978-3-662-44728-4.
- Wagenbreth, O. (1972): Kaolinlagerstätten, Tektonik und Paläomorphologie. – Wissenschaftliche Zeitschrift // Hochschule für Architektur und Bauwesen **19**(1): pp. 23-31.
- Wagner, G.A., Coyle, D.A., Duyster, J., Henjes-Kunst, F., Peterek, A., Schröder, B., Stöckhert, B., Wemmer, K., Zulauf, G., Ahrendt, H., Bischoff, R., Hejl, E., Jacobs, J., Menzel, D., Lal, N., Van den haute, P., Vercoutere, C. & Welzel, B. (1997): Post-Variscan thermal and tectonic evolution of the KTB site and its surroundings. – Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **102**(8): pp. 18221-18232. DOI:10.1029/96jb02565.
- Wagner, G.A., van Den Haute, P. (1992): Fission-track dating. – Enke, Stuttgart.
- Wallinga, J. (2002): Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: a review. – Boreas, **31**(4): pp. 303-322. DOI:10.1111/j.1502-3885.2002.tb01076.x.
- Warsitzka, M., Jähne-Klingberg, F., Kley, J. & Kukowski, N. (2019): The timing of salt structure growth in the Southern Permian Basin (Central Europe) and implications for basin dynamics. – Basin Research, **31**(2): pp. 337-360. DOI:10.1111/bre.12323.
- Warsitzka, M., Kley, J., Jähne-Klingberg, F. & Kukowski, N. (2016): Dynamics of prolonged salt movement in the Glückstadt Graben (NW Germany) driven by tectonic and sedimentary processes. – International Journal of Earth Sciences **105**: pp. 1-25. DOI:10.1007/s00531-016-1306-3.
- Watts, A.B. (2001): Isostasy and flexure of the lithosphere. – United Kingdom (University of Cambridge: Cambridge, United Kingdom).
- Wittmann, H., Niedermann, S. & Scherler, D. (2017): Wie schnell ändert sich eine Landschaft? Kosmogene Nuklide als Zeugen für Erosion und Oberflächenalter. – System Erde, **7**(1): pp. 20-25. DOI:10.2312/GFZ.syserde.07.01.3.

- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A. & Weber, J. R. (2012). FEP-Katalog für die VSG. – Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. GRS 283; Köln. ISBN: 978-3-939355-58-8.
- Wolf, R.A., Farley, K.A., Silver, L.T. (1996): Helium diffusion and low temperature thermochronometry of apatite. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**(21): S. 4231-4240.
- Wolff, R., Hetzel, R. & Strobl, M. (2018): Quantifying river incision into low-relief surfaces using local and catchment-wide ¹⁰Be denudation rates. – *Earth Surface Processes And Landforms*, **43**(11): pp. 2327-2341. DOI:10.1002/esp.4394.
- Wölfler, A., Stüwe, K., Danišik, M. & Evans, N.J. (2012): Low temperature thermochronology in the Eastern Alps: Implications for structural and topographic evolution. – *Tectonophysics*, **541-543**(6): pp. 1-18. DOI:10.1016/j.tecto.2012.03.016.
- Yanites, B.J., Ehlers, T.A., Becker, J.K., Schnellmann, M. & Heuberger, S. (2013): High magnitude and rapid incision from river capture; Rhine River, Switzerland. – *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **118**(2): pp. 1060-1084. DOI:10.1002/jgrf.20056.
- Zeitler, P.K., (2014): U-Th/He Dating. – In: *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*, Springer Science+Business Media Dordrecht 2014, DOI:10.1007/978-94-007-6326-5_131-1.
- Ziegler, P.A. & Fraefel, M. (2009): Response of drainage systems to Neogene evolution of the Jura fold-thrust belt and Upper Rhine Graben. – *Swiss Journal of Geosciences*, **102**(1): pp. 57-75. DOI:10.1007/s00015-009-1306-4.
- Ziegler, P.A. & Dèzes, P. (2007): Cenozoic uplift of Variscan Massifs in the Alpine foreland: Timing and controlling mechanisms. – *Global and Planetary Change*, **58**(1-4): pp. 237-269. DOI:10.1016/j.gloplacha.2006.12.004.
- Ziegler, P.A. (1990): *Geological atlas of Western and Central Europe*. – 239 S., Den Haag (Elsevier).
- Ziegler, P.A. (1987): Late Cretaceous and Cenozoic intra-plate compressional deformations in the Alpine foreland - a geodynamic model. – *Tectonophysics*, **137**(1-4): pp. 389-420. DOI:10.1016/0040-1951(87)90330-1.

10.1 Zitate Tabelle 2-1: Auflistung von Methoden zur Ermittlung von Vertikalbewegungen und Abtragung.

Ackerer, J., Chabaux, F., van der Woerd, J., Viville, D., Pelt, E., Kali, E., Lerouge, C., Ackerer, P., di Chiara Roupert, R. & Negrel, P. (2016): Regolith evolution on the millennial timescale from combined U-Th-Ra isotopes and in situ cosmogenic (super 10) Be analysis in a weathering profile (Strengbach catchment, France). – *Earth and Planetary Science Letters*, **453**: pp. 33-43. DOI:10.1016/j.epsl.2016.08.005.

Adriasola Muñoz, Y. (2007): The thermal history of the western Lower Saxony Basin, Germany. – Monographie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen: 165 p.; Aachen.

Ahnert, F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. – Stuttgart (Ulmer).

Ahnert, F. (1989): Landforms and Landform Evolution in West Germany. – 347 p.; (Schweizbart).

Arfai, J. & Lutz, R. (2018): 3D basin and petroleum system modelling of the NW German North Sea (Entenschnabel). – Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series, **8**(1): pp. 67-86. DOI:10.1144/pgc8.35.

Badley, M.E., Price, J.D. & Backshall, L.C. (1989): Inversion, reactivated faults and related structures: seismic examples from the southern North Sea. – Geological Society, London, Special Publications, **44**(1): pp. 201-219. DOI:10.1144/gsl.sp.1989.044.01.12.

Barlier, F. & Lefebvre, M. (2001): A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences. – In: Bleeker, J.A.M., Geiss, J. & Huber, M.C.E. (Eds.): The Century of Space Science. – pp. 1623-1651; Dordrecht (Springer Netherlands). DOI:10.1007/978-94-010-0320-9_66.

Beyer, D. (2015): Evolution of reservoir properties in the Lower Triassic aquifer sandstones of the Thuringian Syncline in Central Germany. – University of Jena: Jena, Germany; Germany.

Bird, K.J. & Nelson, P.H. (2005): Porosity-depth trends and regional uplift calculated from sonic logs, National Petroleum Reserve in Alaska. – Scientific Investigations Report.

Botsyun, S., Sepulchre, P., Donnadiou, Y., Risi, C., Licht, A. & Caves Rugenstein, J.K. (2019): Revised paleoaltimetry data show low Tibetan Plateau elevation during the Eocene. – *Science*, **363**(6430): p. eaaq1436. DOI:10.1126/science.aaq1436.

- Brandes, C. & Tanner, D.C. (2014): Fault-related folding; a review of kinematic models and their application. – *Earth Science Reviews*, **138**: pp. 352-370. DOI:10.1016/j.earscirev.2014.06.008.
- Bruns, B., di Primio, R., Berner, U. & Littke, R. (2013): Petroleum system evolution in the inverted Lower Saxony Basin, northwest Germany: a 3D basin modeling study. – *Geofluids*, **13**(2): pp. 246-271. DOI:10.1111/gfl.12016.
- Carter, W., Shrestha, R. & Clint Slatton, K. (2007): Geodetic Laser Scanning. – Vol. **60**. DOI:10.1063/1.2825070.
- Clausen, O.R. & Huuse, M. (2002): Mid-Paleocene palaeogeography of the Danish area. – *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, **49**: pp. 171-186.
- Csatho, B., Schenk, T., Krabill, W., Wilson, T., Lyons, W., McKenzie, G., Hallam, C., Manizade, S. & Paulsen, T. (2005): Airborne laser scanning for high-resolution mapping of Antarctica. – *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **86**(25): pp. 237-238. DOI:10.1029/2005eo250002.
- Daëron, M., Avouac, J.-P. & Charreau, J. (2007): Modeling the shortening history of a fault tip fold using structural and geomorphic records of deformation. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**(B3). DOI:10.1029/2006jb004460.
- Darvill, C. (2013): Cosmogenic nuclide analysis. – In: *Geomorphological Techniques*. pp. 1-25; London, UK (British Society for Geomorphology).
- Degnan, J.J. (1993): Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: a Review. – In: *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology*. pp. 133-162. DOI:10.1029/GD025p0133.
- Demoulin, A. (2011): Basin and river profile morphometry: A new index with a high potential for relative dating of tectonic uplift. – *Geomorphology*, **126**(1): pp. 97-107. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.10.03.
- Ekman, M. & Mäkinen, J. (1996): Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia. – *Geophysical Journal International*, **126**(1): pp. 229-234. DOI:10.1111/j.1365-246X.1996.tb05281.x.
- Ellenberg, J. (1988): Rezente vertikale Krustenbewegungen als geologische Prozesse. – Dissertation B, 141 Seiten, Akademie der Wissenschaftender DDR; Potsdam.

- Ellenberg, J. (1987): Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen als geologischer Prozeß.
– Forschungsbereich, 134 Seiten, Akademie der Wissenschaften der DDR,
Zentralinstitut für Physik der Erde, Institutsteil Jena; Jena.
- Fitzgerald, P.G., Sorkhabi, R.B., Redfield, T.F. & Stump, E. (1995): Uplift and denudation
of the central Alaska Range; a case study in the use of apatite fission track
thermochronology to determine absolute uplift parameters. – *Journal of Geophysical
Research*, **100**(B10): p. 175. DOI:10.1029/95JB02150.
- Fowler, A.J., Gillespie, R. & Hedges, R.E.M. (1986): Radiocarbon dating of sediments. –
Radiocarbon, **28**(2A): pp. 441-450.
- Frings, R.M., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S. & Hoffmann, T. (2019):
From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. – *Earth
Science Reviews*, **196**: p. 102830. DOI:10.1016/j.earscirev.2019.04.002.
- Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., Van Leijen, F., Mayer, M., Westerhaus, M.,
Hanssen, R. & Heck, B. (2015): Combining InSAR, Levelling and GNSS for the
Estimation of 3D Surface Displacements. – DOI:10.5270/Fringe2015.pp80.
- Fuhrmann, T., Heck, B., Knöpfler, A., Masson, F., Mayer, M., Ulrich, P., Westerhaus, M. &
Zippelt, K. (2013): Recent surface displacements in the Upper Rhine Graben -
Preliminary results from geodetic networks. – *Tectonophysics*, **602**: pp. 300-315.
DOI:10.1016/j.tecto.2012.10.012.
- Gemmer, L., Huuse, M., Clausen, O.R. & Nielsen, S.B. (2002): Mid-Palaeocene
palaeogeography of the eastern North Sea basin: integrating geological evidence
and 3D geodynamic modelling. – *Basin Research*, **14**: pp. 329-246.
- Geyh, M.A. (2005): *Handbuch der physikalischen und chemischen Altersbestimmung.*
211 p.; Darmstadt (Wissenschaftliche Buchges.).
- Glotzbach, C. (2015): Deriving rock uplift histories from data-driven inversion of river
profiles. – *Geology (Boulder)*, **43**(6): pp. 467-470. DOI:10.1130/G36702.1.
- Headley, R.M., Roe, G. & Hallet, B. (2012): Glacier longitudinal profiles in regions of active
uplift. – *Earth and Planetary Science Letters*, **317-318**: pp. 354-362. DOI:10.1016/j.
epsl.2011.11.010.
- Hejl, E., Sekyra, G. & Friedl, G. (2003): Fission-track dating of the south-eastern Bohemian
massif (Waldviertel, Austria): thermochronology and long-term erosion. – *Inter-
national Journal of Earth Sciences*, **92**(5): pp. 677-690.

- Hilgers, A. (2007): The chronology of Late Glacial and Holocene dune development in the northern Central European lowland reconstructed by optically stimulated luminescence (OSL) dating. – Dissertation, Köln: 353 p.
- Hinderer, M., Kastowski, M., Kamelger, A., Bartolini, C. & Schlunegger, F. (2013): River loads and modern denudation of the Alps - A review. – *Earth-Science Reviews*, **118**: 11-44 p. DOI:10.1016/j.earscirev.2013.01.001.
- Hofbauer, G. (2001): Die Diskussion um die Entstehung der Süddeutschen Schichtstufenlandschaft: Eine historisch-methodologische Skizze mit einem Modell zur fluvial gesteuerten Schichtstufen-Morphogenese. – *Natur und Mensch*, Jubiläumsausgabe 200 Jahre NHG, **85-108**. Nürnberg.
- Holford, S.P., Green, P.F., Duddy, I.R., Turner, J.P., Hillis, R.R. & Stoker, M.S. (2009): Regional intraplate exhumation episodes related to plate-boundary deformation. – *Geological Society of America Bulletin*, **121**(11-12): pp. 1611-1628. DOI:10.1130/b26481.1.
- Jähne, F. & Kley, J. (2011): Structural balancing of the Lower Saxony basin and the southern border of the Northwest German Basin. – DGG GeoMunich 2011, Fragile Earth, 04.09-07.09.2011, Poster & Abstract.
- Japsen, P., Green, P.F., Chalmers, J.A. & Bonow, J.M. (2018): Mountains of southernmost Norway; uplifted Miocene peniplains and re-exposed Mesozoic surfaces. – *Journal of the Geological Society of London*, **175**(5): pp. 721-741. DOI:10.1144/jgs2017-157.
- Japsen, P., Bidstrup, T. & Lidmar-Bergström, K. (2002): Neogene uplift and erosion of southern Scandinavia induced by the rise of the South Swedish Dome. – In: Doré, A.G., Cartwright, J.A., Stoker, M.S., Turner, J.P. & White, N. (Eds.): *Exhumation of the North Atlantic margin: timing, mechanism and implications for petroleum exploration*. – Geological Society Special Publication, **196**: pp. 183-207; London.
- Kalia, A.C., Frei, M. & Lege, T. (2018): PSI-based German Ground Motion Service (BBD) to investigate natural and anthropogenic induced underground movements. – In: *The Mechanical Behavior of Salt IX – Proceedings SALTMECH IX*, Sept 12-14, 2018, BGR, Hannover, Germany. Ed.: Fahland, S. et al., ISBN: 978-3-9814108-6-0.
- Kalia, A.C., Frei, M. & Lege, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. – *Remote Sensing of Environment*, **202**: pp. 234-249. DOI:10.1016/j.rse.2017.05.015.

- Klein, W., Krickel, B., Riecken, J. & Salamon, M. (2016): Eine interdisziplinäre Betrachtung der vertikalen Bodenbewegungen in der Eifel. – *zfv*, **141**(1): p. 8. DOI:10.12902/zfv-0103-2015.
- Kley, J. (2018): Timing and spatial patterns of Cretaceous and Cenozoic inversion in the Southern Permian Basin. – Special Publication, Geological Society of London, **469**(1): pp. 19-31. DOI:10.1144/SP469.12.
- König, W. (2008): Zeitliche und genetische Einordnung von tertiären Sedimentvorkommen im Mittelharz und im Harzvorland - Ein Beitrag zur Reliefentwicklung und zur Karstmorphogenese im Harz. – Dissertation.
- Krebetschek, M. (1995): Lumineszenz-Datierung quartärer Sedimente Mittel-, Ost- und Nordostdeutschlands. – Dissertation, TU Bergakademie Freiberg: 122 p.; Freiberg.
- Lague, D., Crave, A. & Davy, P. (2003): Laboratory experiments simulating the geomorphic response to tectonic uplift. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **108**(B1): pp. ETG 3-1-ETG 3-20. DOI:10.1029/2002jb001785.
- Lague, D., Davy, P. & Crave, A. (2000): Estimating uplift rate and erodibility from the area-slope relationship: Examples from Brittany (France) and numerical modelling. – *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, **25**(6): pp. 543-548. DOI:10.1016/S1464-1895(00)00083-1.
- Lange, J.-M. (2012): Die Elbe im östlichen Sachsen. – pp. 24–55. DOI:10.13140/RG.2.1.4798.6724.
- Lange, J.-M., Tonk, C. & Wagner, G.A. (2008): Apatitspaltspurdaten zur postvariszischen thermotektonischen Entwicklung des sächsischen Grundgebirges - erste Ergebnisse. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, **159**(1): pp. 123-132. DOI:10.1127/1860-1804/2008/0159-0123.
- Laubscher, H. (2003): Balanced sections and the propagation of décollement: A Jura perspective. – *Tectonics*, **22**(6). DOI:10.1029/2002tc001427.
- Ludwig, A.O. (2001a): Recent position of surfaces of Holsteinian interglacial marine and limnic sediments, and of Saalian glacial river terraces (Explanatory notes to map 3) - *Neogeodynamica Baltica IGCP-Project 346*. – *Brandenburgische Geowiss. Beiträge*, **8**(1): pp. 21 - 25.

- Ludwig, A.O. (2001b): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). – In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (Eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). – Brandenburgische Geowiss. Beitr. **8**: pp. 5-12; Kleinmachnow.
- Magara, K. (1980): Comparison of porosity-depth relationships of shale and sandstone. – Journal of Petroleum Geology, **3**(2): pp. 175-185. DOI:10.1111/j.1747-5457.1980.tb00981.x.
- Malz, A., Madritsch, H. & Kley, J. (2015): Improving 2D seismic interpretation in challenging settings by integration of restoration techniques: A case study from the Jura fold-and-thrust belt (Switzerland). – Interpretation, **3**(4): pp. SAA37-SAA58. DOI:10.1190/INT-2015-0012.1.
- Medina, C., Barnes, D. & Rupp, J. (2008): Depth Relationships in Porosity and Permeability in the Mount Simon Sandstone (Basal Sand) of the Midwest Region: Applications for Carbon Sequestration. – Poster.
- Menpes, R.J. (1997): Tertiary Uplift and its Implications for the Tectonic Evolution of Sedimentary Basins, Offshore South-West United Kingdom. – Adelaide (The University of Adelaide).
- Menpes, R.J. & Hillis, R.R. (1996): Determining apparent exhumation from Chalk outcrop samples, Cleveland Basin/East Midlands Shelf. – Geological Magazine, **133**(6): pp. 751-762.
- Menpes, R.J. & Hillis, R.R. (1995): Quantification of tertiary exhumation from sonic velocity data, Celtic Sea/South-Western Approaches. – In: Buchanan & Buchanan: Basin Inversion. – Geological Society special publication, **88**: pp. 191-210.
- Migoń, P. & Lidmar-Bergström, K. (2001): Weathering mantles and their significance for geomorphological evolution of central and northern Europe since the Mesozoic. – Earth Science Reviews, **56**(1): pp. 285-324. DOI:10.1016/S0012-8252(01)00068-X.
- Morel, P., Von Blanckenburg, F., Schaller, M., Kubik, P.W. & Hinderer, M. (2003): Lithology, landscape dissection and glaciation controls on catchment erosion as determined by cosmogenic nuclides in river sediment (the Wutach Gorge, Black Forest). – Terra Nova, **15**(6): pp. 398-404. DOI:10.1046/j.1365-3121.2003.00519.x.

- Muhs, D.R., Rockwell, T.K. & Kennedy, G.L. (1992): Late quaternary uplift rates of marine terraces on the Pacific coast of North America, southern Oregon to Baja California sur. – *Quaternary International*, **15-16**: pp. 121-133. DOI:10.1016/1040-6182(92)90041-Y.
- Mulch, A. (2016): Stable isotope paleoaltimetry and the evolution of landscapes and life. – *Earth and Planetary Science Letters*, **433**: pp. 180-191. DOI:10.1016/j.epsl.2015.10.034.
- Olsson, P.-A., Breili, K., Ophaug, V., Steffen, H., Bilker-Koivula, M., Nielsen, E., Oja, T. & Timmen, L. (2019): Postglacial gravity change in Fennoscandia - three decades of repeated absolute gravity observations. – *Geophysical Journal International*, **217**(2): pp. 1141-1156. DOI:10.1093/gji/ggz054.
- Pedoja, K., Jara-Muñoz, J., De Gelder, G., Robertson, J., Meschis, M., Fernandez-Blanco, D., Nexer, M., Poprawski, Y., Dugué, O., Delcaillau, B., Bessin, P., Benabdelouahed, M., Authemayou, C., Husson, L., Regard, V., Menier, D. & Pinel, B. (2018): Neogene-Quaternary slow coastal uplift of Western Europe through the perspective of sequences of strandlines from the Cotentin Peninsula (Normandy, France). – *Geomorphology*, **303**: pp. 338-356. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.11.021.
- Pedoja, K., Husson, L., Johnson, M.E., Melnick, D., Witt, C., Pochat, S., Nexer, M., Delcaillau, B., Pinegina, T., Poprawski, Y., Authemayou, C., Elliot, M., Regard, V. & Garestier, F. (2014): Coastal staircase sequences reflecting sea-level oscillations and tectonic uplift during the Quaternary and Neogene. – *Earth Science Reviews*, **132**: pp. 13-38. DOI:10.1016/j.earscirev.2014.01.007.
- Penck, W. (1953): *Morphological Analysis of Land Forms. A Contribution to Physical – Geology*, **90**: 441 p.; St. Martin's Street, London (Macmillan and Co., Limited).
- Peulvast, J.-P., Betard, F. & Lageat, Y. (2009): Long-term landscape evolution and denudation rates in shield and platform areas; a morphostratigraphic approach. – *Geomorphologie*, **2**: pp. 95-107.
- Preuss, J., Burger, D. & Siegler, F. (2019): Die Obere Terrassengruppe im Oberen Mittelrheintal - Orte neuer Beobachtungen und Interpretationen (Exkursion E am 25. April 2019). – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.*, **101**: p. 32. DOI:10.1127/jmogv/101/0005.
- Rennie, A. & Hansom, J. (2011): Sea level trend reversal: Land uplift outpaced by sea level rise on Scotland's coast. – *Geomorphology*, **125**(1): 193-202 p. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.09.015.

- Roberts, G.G. & White, N. (2010): Estimating uplift rate histories from river profiles using African examples. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**(B2). DOI:10.1029/2009jb006692.
- Sánchez, L., Völksen, C., Sokolov, A., Arenz, H. & Seitz, F. (2018): Present-day surface deformation of the Alpine Region inferred from geodetic techniques. – *Earth System Science Data Discussions*, pp. 1-29. DOI:10.5194/essd-2018-19.
- Schaller, M., Ehlers, T.A., Stor, T., Torrent, J., Lobato, L., Christl, M. & Vockenhuber, C. (2016): Spatial and temporal variations in denudation rates derived from cosmogenic nuclides in four European fluvial terrace sequences. – *Geomorphology*, **274**: pp. 180-192. DOI:10.1016/j.geomorph.2016.08.018.
- Schaller, M., von Blanckenburg, F., Hovius, N. & Kubik, P.W. (2001): Large-scale erosion rates from in situ-produced cosmogenic nuclides in European river sediments. – *Earth and Planetary Science Letters*, **188**(3): pp. 441-458. DOI:10.1016/S0012-821X(01)00320-X.
- Scheck, M. & Bayer, U. (1999): Evolution of the Northeast German Basin - inferences from a 3D structural model and subsidence analysis. – *Tectonophysics*, **313**(1-2): pp. 145-169. DOI:10.1016/S0040-1951(99)00194-8.
- Schleicher, H. & Geyh, M.A. (1990): Absolute age determination; physical and chemical dating methods and their application. – Germany (Springer-Verlag : Berlin, Federal Republic of Germany).
- Sissingh, W. (2006a): Kinematic sequence stratigraphy of the European Cenozoic Rift System and Alpine Foreland Basin: Correlation with Mediterranean and Atlantic plate-boundary events. – *Geologie en Mijnbouw*, **85**(2). DOI:10.1017/S0016774600077921.
- Sissingh, W. (2006b): Syn-kinematic palaeogeographic evolution of the West European Platform: correlation with Alpine plate collision and foreland deformation. – *Netherlands Journal of Geosciences*, **85**(2): pp. 131-180.
- Sissingh, W. (2003): Stratigraphic framework of the European Cenozoic Rift System: a visual overview. – *Geologica Ultraiectina Special Publication*; Utrecht.
- Steffen, H. & Wu, P. (2011): Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia - A review of data and modeling. – *Journal of Geodynamics*, **52**(3): pp. 169-204. DOI:10.1016/j.jog.2011.03.002.

- Steffen, H. (2006): Determination of a consistent viscosity distribution in the Earth's mantle beneath Northern and Central Europe. – Germany. DOI:10.23689/fidgeo-339.
- Steinmüller, A. (1992): Zur Frage der Reliefgenerationen im Bereich der Mittelgebirgsschwelle - dargestellt am Beispiel des Flußgebietes der Saale. – In: Billwitz, K., Janke, W. & Jäger, K.-D. (Eds.): Jungquartäre Landschaftsräume: Aktuelle Forschungen zwischen Atlantik und Tienschan. – pp. 127-135; Berlin, Heidelberg (Springer Berlin Heidelberg). DOI:10.1007/978-3-642-76745-6_14.
- Strasser, A., Strasser, M. & Seyfried, H. (2010): Quantifying erosion over timescales of one million years: A photogrammetric approach on the amount of Rhenish erosion in southwestern Germany. – *Geomorphology*, **122**(3): pp. 244-253. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.06.027.
- Strozzi, T., Delaloye, R., Poffet, D., Hansmann, J. & Loew, S. (2011): Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry. – *Remote Sensing of Environment*, **115**(6): pp. 1353-1360. DOI:10.1016/j.rse.2011.02.001.
- Tanner, D.C. & Krawczyk, C.M. (2017): Restoration of the Cretaceous uplift of the Harz Mountains, North Germany: evidence for the geometry of a thick-skinned thrust. – *International Journal of Earth Sciences*, **106**(8): pp. 2963-2972. DOI:10.1007/s00531-017-1475-8.
- Tesauro, M., Kaban, M.K., Cloetingh, S.A., Hardebol, N.J. & Beekman, F. (2007): 3D strength and gravity anomalies of the European lithosphere. – *Earth and Planetary Science Letters*, **263**(1): pp. 56-73.
- Tesauro, M., Hollenstein, C., Egli, R., Geiger, A. & Kahle, H.-G. (2006): Analysis of central Western Europe deformation using GPS and seismic data. – *Journal of Geodynamics*, **42**(4-5): pp. 194-209. DOI:10.1016/j.jog.2006.08.001.
- Turowski, J.M., Lague, D., Crave, A. & Hovius, N. (2006): Experimental channel response to tectonic uplift. – *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **111**(F3). DOI:10.1029/2005jf000306.
- Vernon, A.J., van der Beek, P.A., Sinclair, H.D. & Rahn, M.K. (2008): Increase in late Neogene denudation of the European Alps confirmed by analysis of a fission-track thermochronology database. – *Earth and Planetary Science Letters*, **270**(3): pp. 316-329. DOI:10.1016/j.epsl.2008.03.053.

- Vink, A., Steffen, H., Reinhart, L. & Kaufmann, L. (2007): Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). – *Quaternary Science Reviews*, **26**: pp. 3249-3275.
- von Eynatten, H., Voigt, T., Meier, A., Franzke, H.J. & Gaupp, R. (2008): Provenance of Cretaceous clastics in the Subhercynian Basin: constraints to exhumation of the Harz Mountains and timing of inversion tectonics in Central Europe. – *International Journal of Earth Sciences*, **97**(6): pp. 1315-1330. DOI:10.1007/s00531-007-0212-0.
- Wagenbreth, O. (1972): Kaolinlagerstätten, Tektonik und Paläomorphologie. – *Wissenschaftliche Zeitschrift // Hochschule für Architektur und Bauwesen* 19, **1**(1972): pp. 23-31.
- Warsitzka, M., Kley, J., Jähne-Klingberg, F. & Kukowski, N. (2016): Dynamics of prolonged salt movement in the Glückstadt Graben (NW Germany) driven by tectonic and sedimentary processes. – *International Journal of Earth Sciences*, **105**: pp. 1-25. DOI:10.1007/s00531-016-1306-3.
- Weltje, G.J. & von Eynatten, H. (2004): Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. – *Sedimentary Geology*, **171**(1): pp. 1-11. DOI:10.1016/j.sedgeo.2004.05.007.
- Winterberg, S. & Willett, S.D. (2019): Greater Alpine river network evolution, interpretations based on novel drainage analysis. – *Swiss Journal of Geosciences*, **112**(1): pp. 3-22. DOI:10.1007/s00015-018-0332-5.
- Wittmann, H., Niedermann, S. & Scherler, D. (2017): Wie schnell ändert sich eine Landschaft? Kosmogene Nuklide als Zeugen für Erosion und Oberflächenalter. – *System Erde*, **7**(1): pp. 20-25. DOI:10.2312/GFZ.syserde.07.01.3.
- Zeitler, P.K., (2014): U-Th/He Dating. – *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*, Springer Science+Business Media Dordrecht, DOI:10.1007/978-94-007-6326-5_131-1.

10.2 Zitate Tabelle 4-2: Tabellarische Auflistung von Prozessen die zu Vertikalbewegungen führen können, insb. zu Hebung.

- Andeweg, B. & Cloetingh, S. (1998): Flexure and 'unflexure' of the North Alpine German-Austrian Molasse Basin: constraints from forward tectonic modelling. – Geological Society, London, Special Publications, **134**(1): pp. 403-422. DOI:10.1144/gsl.Sp.1998.134.01.19.
- Barth, A., Jordan, M. & Ritter, J.R.R. (2007): Crustal and upper mantle structure of the French Massif Central plume. – Mantle Plumes, pp. 159-184.
- Bourgeois, O., Ford, M., Diraison, M., de Veslud, C.L.C., Gerbault, M., Pik, R., Ruby, N. & Bonnet, S. (2007): Separation of rifting and lithospheric folding signatures in the NW-Alpine foreland. – International Journal of Earth Sciences, **96**(6): pp. 1003-1031. DOI:10.1007/s00531-007-0202-2.
- Boyer, S.E. (1986): Styles of folding within thrust sheets: examples from the Appalachian and Rocky Mountains of the U.S.A. and Canada. – Journal of Structural Geology, **8**(3): pp. 325-339. DOI:10.1016/0191-8141(86)90053-2.
- Brandes, C. & Tanner, D.C. (2014): Fault-related folding; a review of kinematic models and their application. – Earth Science Reviews, **138**: pp. 352-370. DOI:10.1016/j.earscirev.2014.06.008.
- Braun, J., Robert, X. & Simon-Labric, T. (2013): Eroding dynamic topography. – Geophysical Research Letters, **40**(8): pp. 1494-1499. DOI:10.1002/grl.50310.
- Brewer, R.C. & Kenyon, P.M. (1996): Balancing salt dome uplift and withdrawal basin subsidence in cross-section. – Journal of Structural Geology, **18**(4): pp. 493-504.
- Buiter, S.J.H. (2000): Surface deformation resulting from subduction and slab detachment. – Geologica Ultraiectina, **191**.
- Buck, W.R. (1986): Small-scale convection induced by passive rifting: the cause for uplift of rift shoulders. – Earth and Planetary Science Letters, **77**(3): pp. 362-372. DOI:10.1016/0012-821X(86)90146-9.
- Caër, T., Souloumiac, P., Maillot, B., Leturmy, P. & Nussbaum, C. (2018): Propagation of a fold-and-thrust belt over a basement graben. – Journal of Structural Geology, **115**: pp. 121-131. DOI:10.1016/j.jsg.2018.07.007.

- Carminati, E., Cuffaro, M. & Doglioni, C. (2009): Cenozoic uplift of Europe. – *Tectonics*, **28**(4). DOI:10.1029/2009TC002472.
- Chalot-Prat, F. & Girbacea, R. (2000): Partial delamination of continental mantle lithosphere, uplift-related crust-mantle decoupling, volcanism and basin formation; a new model for the Pliocene-Quaternary evolution of the southern East-Carpathians, Romania. – *Tectonophysics*, **327**(1-2): pp. 83-107.
- Chéry, J., Lucazeau, F., Daignières, M. & Vilotte, J.P. (1992): Large uplift of rift flanks: A genetic link with lithospheric rigidity? – *Earth and Planetary Science Letters*, **112**(1): pp. 195-211. DOI:10.1016/0012-821X(92)90016-O.
- Clark, M.K., Bush, J.W.M. & Royden, L.H. (2005): Dynamic topography produced by lower crustal flow against rheological strength heterogeneities bordering the Tibetan Plateau. – *Geophysical Journal International*, **162**(2): pp. 575-590. DOI:10.1111/j.1365-246X.2005.02580.x.
- Cloetingh, S. & Van Wees, J.D. (2005): Strength reversal in Europe's intraplate lithosphere: Transition from basin inversion to lithospheric folding. – *Geology*, **33**(4): pp. 285-288.
- Cloetingh, S. (1999): Lithosphere folding; primary response to compression? (from Central Asia to Paris Basin). – In: Burov, E. & Poliakov, A. (Eds.): *Tectonics*. **18**: pp. 1064-1083; United States (American Geophysical Union: Washington, DC, United States).
- Contreras-Reyes, E. & Garay, J. (2017): Flexural modeling of the elastic lithosphere at an ocean trench: A parameter sensitivity analysis using analytical solutions. – *Journal of Geodesy*, **113**. DOI:10.1016/j.jog.2017.11.004.
- Cox, K.G., McKenzie, D.P. & White, R.S. (1993): Continental magmatic underplating. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – Series A: Physical and Engineering Sciences*, **342**(1663): pp. 155-166. DOI:10.1098/rsta.1993.0011.
- Dewey, J.F., Holdsworth, R.E. & Strachan, R.A. (1998): Transpression and transtension zones. – *Geological Society, London, Special Publications*, **135**(1): pp. 1-14. DOI:10.1144/GSL.SP.1998.135.01.01.
- DeVore, G.W. (1983): Relations between subduction, slab heating, slab dehydration and continental growth. – *Lithos*, **16**(4): pp. 255-263. DOI:10.1016/0024-4937(83)90014-2.

- Dogliani, C., Carminati, E. & Bonatti, E. (2003): Rift asymmetry and continental uplift. – *Tectonics*, **22**(3). DOI:10.1029/2002TC001459.
- Dogliani, C., Mongelli, F. & Pieri, P. (1994): The Puglia uplift (SE Italy): An anomaly in the foreland of the Apenninic subduction due to buckling of a thick continental lithosphere. – *Tectonics*, **13**(5): pp. 1309-1321. DOI:10.1029/94tc01501.
- Ekman, M. & Mäkinen, J. (1996): Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia. – *Geophysical Journal International*, **126**(1): pp. 229-234. DOI:10.1111/j.1365-246X.1996.tb05281.x.
- Fitzgerald, P.G., Sandiford, M., Barrett, P.J. & Gleadow, A.J.W. (1986): Asymmetric extension associated with uplift and subsidence in the Transantarctic Mountains and Ross Embayment. – *Earth and Planetary Science Letters*, **81**(1): pp. 67-78. DOI:10.1016/0012-821X(86)90101-9.
- Flament, N., Gurnis, M. & Müller, D. (2013): A review of observations and models of dynamic topography. – *Lithosphere*, **5**(2): pp. 189-210. DOI:10.1130/L245.1.
- Flórez-Rodríguez, A.G., Schellart, W.P. & Strak, V. (2019): Impact of Aseismic Ridges on Subduction Systems: Insights From Analog Modeling. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **124**(6): pp. 5951-5969. DOI:10.1029/2019jb017488.
- Flowers, R.M., Ault, A.K., Kelley, S.A., Zhang, N. & Zhong, S. (2012): Epeirogeny or eustasy? Paleozoic–Mesozoic vertical motion of the North American continental interior from thermochronometry and implications for mantle dynamics. – *Earth and Planetary Science Letters*, **317-318**: pp. 436-445. DOI:10.1016/j.epsl.2011.11.015.
- Fossen, H. (2010): *Structural geology*. – Cambridge University Press.
- Gerya, T.V. & Yuen, D.A. (2003): Rayleigh–Taylor instabilities from hydration and melting propel ‘cold plumes’ at subduction zones. – *Earth and Planetary Science Letters*, **212**(1): pp. 47-62. DOI:10.1016/S0012-821X(03)00265-6.
- Giambiagi, L., Ghiglione, M., Cristallini, E. & Bottesi, G. (2009): Kinematic models of basement/cover interaction: Insights from the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. – *Journal of Structural Geology*, **31**(12): pp. 1443-1457.
- Giese, P., Scheuber, E., Schilling, F., Schmitz, M. & Wigger, P. (1999): Crustal thickening processes in the Central Andes and the different natures of the Moho-discontinuity. – *Journal of South American Earth Sciences*, **12**(2): pp. 201-220. DOI:10.1016/S0895-9811(99)00014-0.

- Granet, M., Wilson, M. & Achauer, U. (1995): Imaging a mantle plume beneath the French Massif Central. – *Earth and Planetary Science Letters*, **136**(3): pp. 281-296. DOI:10.1016/0012-821X(95)00174-B.
- Graversen, O. (2006): The Jurassic-Cretaceous North Sea Rift Dome and Associated Basin Evolution. – Search and Discovery Article for presentation at AAPG Annual Convention, pp. 1-5.
- Guex, J., Pilet, S., Müntener, O., Bartolini, A., Spangenberg, J., Schoene, B., Sell, B. & Schaltegger, U. (2016): Thermal erosion of cratonic lithosphere as a potential trigger for mass-extinction. – *Scientific Reports*, **6**: p. 23168. DOI: 10.1038/srep23168.
- Guillou-Frottier, L., Burov, E., Nehlig, P. & Wyns, R. (2007): Deciphering plume-lithosphere interactions beneath Europe from topographic signatures. – *Global and Planetary Change*, **58**(1): pp. 119-140. DOI:10.1016/j.gloplacha.2006.10.003.
- Harding, R. & Huuse, M. (2015): Salt on the move: Multi stage evolution of salt diapirs in the Netherlands North Sea. – *Marine and Petroleum Geology*, **61**: pp. 39-55. DOI:10.1016/j.marpetgeo.2014.12.003.
- Heine, C., Müller, D., Steinberger, B. & Torsvik, T. (2008): Subsidence in intracratonic basins due to dynamic topography. – *Physics of the earth and planetary interiors*, **171**: pp. 252-264. DOI:10.1016/j.pepi.2008.05.008.
- Husson, L., Guillaume, B., Funicello, F., Faccenna, C. & H. Royden, L. (2012): Unraveling topography around subduction zones from laboratory models. – *Tectonophysics*, **526**: pp. 5-15. DOI:10.1016/j.tecto.2011.09.001.
- Jackson, M.P. & Hudec, M.R. (2017): *Salt tectonics: Principles and practice*. – Cambridge University Press.
- Judson May, S., Kelley, S. & R. Russell, L. (1994): Footwall unloading and rift shoulder uplifts in the Albuquerque Basin: Their relation to syn-rift fanglomerates and apatite fission-track ages. – *Geological Society of America, Special Paper* **291**: pp. 125-134. DOI:10.1130/SPE291-p125.
- Karlstrom, L., Lee, C.-T.A. & Manga, M. (2014): The role of magmatically driven lithospheric thickening on arc front migration. – *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **15**(6): pp. 2655-2675. DOI:10.1002/2014gc005355.

- Kästle, E.D., Rosenberg, C., Boschi, L., Bellahsen, N., Meier, T. & El-Sharkawy, A. (2019): Slab Break-offs in the Alpine Subduction Zone. – *Solid Earth Discuss*: pp. 1-16. DOI:10.5194/se-2019-10.
- Kay, R.W. & Mahlburg Kay, S. (1993): Delamination and delamination magmatism. – *Tectonophysics*, **219**(1): pp. 177-189. DOI:10.1016/0040-1951(93)90295-U.
- Kazmin, V.G. & Byakov, A.F. (2000): Magmatism and crustal accretion in continental rifts. – *Journal of African Earth Sciences*, **30**(3): pp. 555-568. DOI: 10.1016/S0899-5362(00)00038-5.
- Kimura, G., Ludden, J.N., Desrochers, J.P. & Hori, R. (1993): A model of ocean-crust accretion for the Superior province, Canada. – *Lithos*, **30**(3): pp. 337-355. DOI:10.1016/0024-4937(93)90044-D.
- Krystopowicz, N.J. & Currie, C.A. (2013): Crustal eclogitization and lithosphere delamination in orogens. – *Earth and Planetary Science Letters*, **361**: pp. 195-207. DOI:10.1016/j.epsl.2012.09.056.
- Li, C., Jiang, X., Gong, W., Li, D. & Li, C. (2018): Surface uplift of the central Yunnan Plateau since the Pliocene. – *Geological Journal*, **53**(1): pp. 386-396. DOI:10.1002/GJ.2904.
- Linzer, H.-G., Ratschbacher, L. & Frisch, W. (1995): Transpressional collision structures in the upper crust: the fold-thrust belt of the Northern Calcareous Alps. – *Tectonophysics*, **242**(1): pp. 41-61. DOI:10.1016/0040-1951(94)00152-Y.
- Lorenzo, J.M. & Vera, E.E. (1992): Thermal uplift and erosion across the continent-ocean transform boundary of the southern Exmouth Plateau. – *Earth and Planetary Science Letters*, **108**(1): pp. 79-92. DOI:10.1016/0012-821X(92)90061-Y.
- Malz, A., Madritsch, H. & Kley, J. (2015): Improving 2D seismic interpretation in challenging settings by integration of restoration techniques: A case study from the Jura fold-and-thrust belt (Switzerland). – *Interpretation*, **3**(4): pp. SAA37-SAA58. DOI:10.1190/INT-2015-0012.1.
- Mareschal, J.-C. (1983): Mechanisms of uplift preceding rifting. – *Tectonophysics*, **94**(1): pp. 51-66. DOI:10.1016/0040-1951(83)90009-4.
- Marotta, A.M., Bayer, U. & Thybo, H. (2000): The legacy of the NE German Basin - reactivation by compressional buckling. – *Terra Nova*, **12**(3): pp. 132-140. DOI:10.1046/j.1365-3121.2000.123296.x.

- McClay, K.R. (1992): Thrust tectonics. – 447-447 p.; Chapman & Hall: London, United Kingdom.
- McPhee, P.J., Altner, D. & van Hinsbergen, D.J.J. (2018): First Balanced Cross Section Across the Taurides Fold-Thrust Belt: Geological Constraints on the Subduction History of the Antalya Slab in Southern Anatolia. – *Tectonics*, **37**(10): pp. 3738-3759. DOI:10.1029/2017tc004893.
- Medvedev, S., Hartz, E.H. & Podladchikov, Y.Y. (2008): Vertical motions of the fjord regions of central East Greenland: Impact of glacial erosion, deposition, and isostasy. – *Geology*, **36**(7): pp. 539-542. DOI:10.1130/g24638a.1.
- Meyer, R. & Foulger, G.R. (2007): The European Cenozoic Volcanic Province is not caused by mantle plumes. – www.mantleplumes.org/Europe.html. 22.07.2019.
- Müller, J., Naeimi, M., Gitlein, O., Timmen, L. & Denker, H. (2012): A land uplift model in Fennoscandia combining GRACE and absolute gravimetry data. – *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **53-54**: pp. 54-60. DOI:10.1016/j.pce.2010.12.006.
- Müller, R.D., Sdrolias, M., Gaina, C., Steinberger, B. & Heine, C. (2008): Long-Term Sea-Level Fluctuations Driven by Ocean Basin Dynamics. – *Science*, **319**(5868): pp. 1357-1362. DOI:10.1126/science.1151540.
- Osei Tutu, A., Steinberger, B., Sobolev, S., Rogozhina, I. & A. Popov, A. (2018): Effects of upper mantle heterogeneities on the lithospheric stress field and dynamic topography. – *Solid Earth*, **9**: pp. 649-668. DOI:10.5194/se-9-649-2018.
- Pascal, C. & Olesen, O. (2009): Are the Norwegian mountains compensated by a mantle thermal anomaly at depth? – *Tectonophysics*, **475**: 160-168 p. DOI:10.1016/j.tecto.2009.01.015.
- Peacock, S.M. (1993): Large-scale hydration of the lithosphere above subducting slabs. – *Chemical Geology*, **108**(1): pp. 49-59. DOI:10.1016/0009-2541(93)90317-C.
- Pedoja, K., Husson, L., Johnson, M.E., Melnick, D., Witt, C., Pochat, S., Nexer, M., Delcaillau, B., Pinegina, T., Poprawski, Y., Authemayou, C., Elliot, M., Regard, V. & Garestier, F. (2014): Coastal staircase sequences reflecting sea-level oscillations and tectonic uplift during the Quaternary and Neogene. – *Earth Science Reviews*, **132**: pp. 13-38. DOI:10.1016/j.earscirev.2014.01.007.

- Rennie, A. & Hansom, J. (2011): Sea level trend reversal: Land uplift outpaced by sea level rise on Scotland's coast. – *Geomorphology*, **125**(1): 193-202 p. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.09.015.
- Ritter, J.R.R., Jordan, M., Christensen, U.R. & Achauer, U. (2001): A mantle plume below the Eifel volcanic fields, Germany. – *Earth and Planetary Science Letters*, **186**(1): pp. 7-14. DOI:10.1016/S0012-821X(01)00226-6.
- Roberts, D.G. & Bally, A.W. (2012): Regional geology and tectonics; Phanerozoic rift systems and sedimentary basins. – Elsevier: Amsterdam, Netherlands. DOI:10.1016/C2010-0-67671-1.
- Rohrman, M. & van der Beek, P. (1996): Cenozoic postrift domal uplift of North Atlantic margins: An asthenospheric diapirism model. – *Geology*, **24**(10): pp. 901-904. DOI:10.1130/0091-7613(1996)024<0901:Cpduon>2.3.Co;2.
- Rotstein, Y. & Schaming, M. (2011): The Upper Rhine Graben (URG) revisited: Miocene transtension and transpression account for the observed first-order structures. – *Tectonics*, **30**(3). DOI:10.1029/2010tc002767.
- Schildgen, T.F., Cosentino, D., Bookhagen, B., Niedermann, S., Yıldırım, C., Echtler, H., Wittmann, H. & Strecker, M.R. (2012): Multi-phased uplift of the southern margin of the Central Anatolian plateau, Turkey: A record of tectonic and upper mantle processes. – *Earth and Planetary Science Letters*, **317-318**: pp. 85-95. DOI:10.1016/j.epsl.2011.12.003.
- Schott, B. & Schmeling, H. (1998): Delamination and detachment of a lithospheric root. – *Tectonophysics*, **296**(3): pp. 225-247. DOI:10.1016/S0040-1951(98)00154-1.
- Seibold, E. & Seibold, I. (2012): Zum Auf und Ab des Meeresspiegels in Skandinavien: Langer Streit um Eustasie oder Isostasie. – *International Journal of Earth Sciences*, **101**(2): pp. 595-602. DOI:10.1007/s00531-011-0692-9.
- Steffen, H. & Wu, P. (2011): Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia - A review of data and modeling. – *Journal of Geodynamics*, **52**(3): pp. 169-204. DOI:10.1016/j.jog.2011.03.002.
- Stern, C.R. (2011): Subduction erosion: Rates, mechanisms, and its role in arc magmatism and the evolution of the continental crust and mantle. – *Gondwana Research*, **20**(2): pp. 284-308. DOI:10.1016/j.gr.2011.03.006.

- Sternai, P., Sue, C., Husson, L., Serpelloni, E., Becker, T.W., Willett, S.D., Faccenna, C., Di Giulio, A., Spada, G., Jolivet, L., Valla, P., Petit, C., Nocquet, J.-M., Walpersdorf, A. & Castelltort, S. (2019): Present-day uplift of the European Alps: Evaluating mechanisms and models of their relative contributions. – *Earth Science Reviews*, **190**: pp. 589-604. DOI:10.1016/j.earscirev.2019.01.005.
- Tan, P., Sippel, J., Breivik, A.J., Meeßen, C. & Scheck-Wenderoth, M. (2018): Lithospheric Control on Asthenospheric Flow From the Iceland Plume: 3-D Density Modeling of the Jan Mayen-East Greenland Region, NE Atlantic. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**(10): pp. 9223-9248. DOI:10.1029/2018jb015634.
- Theissen-Krah, S., Rüpke, L.H. & Hasenclever, J. (2016): Modes of crustal accretion and their implications for hydrothermal circulation. – *Geophysical Research Letters*, **43**(3): pp. 1124-1131. DOI:10.1002/2015gl067335.
- Thybo, H. & Artemieva, I.M. (2013): Moho and magmatic underplating in continental lithosphere. – *Tectonophysics*, **609**: pp. 605-619. DOI:10.1016/j.tecto.2013.05.032.
- van Balen, R.T., van der Beek, P.A. & Cloetingh, S.A.P.L. (1995): The effect of rift shoulder erosion on stratal patterns at passive margins: Implications for sequence stratigraphy. – *Earth and Planetary Science Letters*, **134**(3): pp. 527-544. DOI:10.1016/0012-821X(95)98955-L.
- Vissers, R.L.M., van Hinsbergen, D.J.J., van der Meer, D.G. & Spakman, W. (2016): Cretaceous slab break-off in the Pyrenees: Iberian plate kinematics in paleomagnetic and mantle reference frames. – *Gondwana Research*, **34**: pp. 49-59. DOI:10.1016/j.gr.2016.03.006.
- von Huene, R., Ranero, C.s.R. & Vannucchi, P. (2004): Generic model of subduction erosion. – *Geology*, **32**(10): pp. 913-916. DOI:10.1130/g20563.1.
- Warsitzka, M., Jähne-Klingberg, F., Kley, J. & Kukowski, N. (2019): The timing of salt structure growth in the Southern Permian Basin (Central Europe) and implications for basin dynamics. – *Basin Research*, **31**(2): pp. 337-360. DOI:10.1111/bre.12323.
- Warsitzka, M., Kley, J., Jähne-Klingberg, F. & Kukowski, N. (2016): Dynamics of prolonged salt movement in the Glückstadt Graben (NW Germany) driven by tectonic and sedimentary processes. – *International Journal of Earth Sciences*, **105**: pp. 1-25. DOI:10.1007/s00531-016-1306-3.

- Watts, A., Koppers, A. & David, R. (2010): Seamount Subduction and Earthquakes. – Oceanography (Washington D.C.), **23**(01). DOI:10.5670/oceanog.2010.68.
- Weissel, J.K. & Karner, G.D. (1989): Flexural uplift of rift flanks due to mechanical unloading of the lithosphere during extension. – Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **94**(B10): pp. 13919-13950. DOI:10.1029/JB094iB10p13919.
- Westaway, R. (2017): Isostatic compensation of Quaternary vertical crustal motions: coupling between uplift of Britain and subsidence beneath the North Sea. – Journal of Quaternary Science, **32**(2): pp. 169-182. DOI:10.1002/jqs.2832.
- Wittmann, H., von Blanckenburg, F., Kruesmann, T., Norton, K.P. & Kubik, P.W. (2007): Relation between rock uplift and denudation from cosmogenic nuclides in river sediment in the Central Alps of Switzerland. – Journal of Geophysical Research: Earth Surface, **112**(F4). DOI:10.1029/2006jf000729.

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 2-1: Auflistung von Methoden zur Ermittlung von Vertikalbewegungen und Abtragung, differenziert nach Art der Ergebnisse in Oberflächenhebung (OH), Gesteinshebung (GH) und Exhumation oder Bedeckung (E) / (pot. - potentiell / rel. - relativ / (?) – unsichere Zuordnung). Neben der Nennung der Grundprinzipien der Methoden sind Referenzen mit grundlegenden Beschreibungen der Methoden sowie mit Anwendungsbeispielen für Deutschland und umgebende Gebiete aufgeführt. Die Methoden sind übergeordnet unterteilt nach Fachdisziplinen und werden grob nach qualitativen und quantitativen Verfahren unterschieden.	14
Tab. 2-2: Übersicht der kosmogenen Isotope, ihrer Halbwertszeiten und typischer Wirtsmminerale (aus Gallagher 2012).	16
Tab. 4-1: Tabellarische Zusammenfassung von Prozessen die zu Vertikalbewegungen führen können, insb. zu Hebung. Mögliche maximale Hebungsamplituden (Spalte a), Ausdehnungen von Strukturen (Spalte b) und mögliche Prozessgeschwindigkeiten (Spalte c) sind aus einer Kompilation von Publikationen entnommen/ abgeschätzt. Weiterhin ist basierend auf einer Literaturrecherche das Potenzial des jeweiligen Prozesses abgeschätzt, Hebungsbeiträge entsprechend des Ausschlusskriteriums zu erreichen (Spalte d & e). Spalte „f“ zeigt ob dieser Prozess Relevanz für die Hebung in Deutschland seit dem Neogen besitzt. Eine Legende zur Tabelle ist folgend über die Gesamtdauer der Hebung beigefügt. Mit „Hebung“ (uplift) wird in dieser Tabelle, wie auch in den meisten Prozessbeschreibungen die Gesteinshebung gemeint.	33
Tab. 4-2: Ausgewählte Literaturzitate zu den in Tab. 4-1 aufgelisteten Prozessen. Tabellarische Auflistung von Prozessen die zu Vertikalbewegungen führen können, insb. zu Hebung. Die jeweiligen Prozesse sind nach ihrem Wirken in bestimmten tektonischen Regimen oder bezogen auf verschiedene tektonische Stockwerke (Mantel, Asthenosphäre, Lithosphäre, Kruste, Oberkruste/Sedimenthülle) gruppiert. Die Benennung der Prozesse in Englisch sprachiger Fachliteratur und ausgewählte Literaturzitate sind ebenfalls mit aufgeführt.	34
Tab. 7-1: Beschreibung der in Abbildung 7-1 gemachten Aussagen (verschiedene Detailgrade der Ausweisung) zur flächendeckenden Ausweisung von Vertikalbewegungen. Die hier vorgestellte Unterteilung soll einen fließenden Übergang von einer eher qualitativen Aussage (A) zu einer quantitativen (F) abbilden. Die Verwendung der Begriffe vermutlich und wahrscheinlich soll in diesem Fall die Zunahme der Güte einer Aussage verdeutlichen.	68

Tab. 8-1: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische Szenario I (<i>ausgehend von heute, keine bis geringe Dynamik endogener und exogener Prozesse im Betrachtungszeitraum (Holozän)</i>). Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die in der Tabelle dargestellte Einschätzung gilt unter der Annahme einer konsistenten sich nicht widersprechenden Datenbasis (derzeit nicht der Fall). Die Einschätzung ob, eine Prognose erstellt werden kann, wird durch die Verwendung der Begriffe <i>möglich, höchst wahrscheinlich möglich, wahrscheinlich, vermutlich, vielleicht möglich</i> vorgenommen. Die Reihung der Begrifflichkeiten spiegelt die Zunahme einer negativen Einschätzung wider.	80
Tab. 8-2: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische Szenario II (<i>endogene und exogene Prozesse schwanken im Rahmen der jungtertiären (neogenen) bis rezenten Überlieferung</i>). Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die Verwendung der absteigenden Folge der Begrifflichkeiten <i>möglich, wahrscheinlich möglich, vermutlich möglich, vermutlich nicht möglich</i> und <i>nicht möglich</i> verdeutlicht die zunehmende Verschlechterung der Einschätzung für die Erstellung von Prognosen.	82
Tab. 8-3: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische Szenario III. Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die Verwendung der absteigenden Folge der Begrifflichkeiten <i>wahrscheinlich möglich, vermutlich möglich, möglicherweise zu spekulativ, zu spekulativ</i> verdeutlicht die zunehmende Verschlechterung der Einschätzung für die Erstellung von Prognosen.	84
Tab. 8-4: Abschätzung der Aussagekraft der Prognosen für verschiedene Detaillierungsgrade bezogen auf das geodynamische/klimatische Szenario IV. Die in der ersten Spalte aufgelisteten Aussagen/Detaillierungsgrade der Prognose sind im Detail in Tabelle 7-1 erläutert. Die Verwendung der absteigenden Folge der Begrifflichkeiten <i>vermutlich möglich, vielleicht möglich, möglicherweise zu spekulativ, zu spekulativ</i> verdeutlicht die zunehmende Verschlechterung der Einschätzung für die Erstellung von Prognosen.	86

Abbildungsverzeichnis	Seite
<p>Abb. 1-1: Gleichungen und schematische Illustration des Zusammenhangs zwischen Oberflächenhebung, Gesteinshebung und Denudation (Lisker et al. 2009). Zur Veranschaulichung sind die Geoidoberfläche (h_G), die Tiefe einer Gesteinsprobe (h_R) sowie die vertikale Position der Erdoberfläche (h_S) relativ zu dieser in Form von Linien dargestellt. Aus den Differenzen der Bezugspunkte ergibt sich jeweils die Oberflächenhebung (U_S) und Gesteinshebung (U_R), sowie aus der Differenz dieser beiden die Denudation ($U_R - U_S$). Diese vereinfachte Gleichung gilt nur uneingeschränkt wenn es über den Betrachtungszeitraum nicht zur Ablagerung von Sedimenten (oder stetigen Umlagerung, wie in der Wüste durch Windtransport), Bedeckung mit Wasser/Eis oder Vulkaniten kommt.</p>	10
<p>Abb. 1-2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Exhumationsarten, übergeordnet differenziert in erosionale und tektonische Exhumation (van der Beek 2014). In der oberen Reihe mit Abbildungen ist jeweils die Ausgangssituation illustriert. In der Unteren dagegen die Szenarien nach der Exhumation eines Gesteinspartikels (schwarzer Punkt). Die schwarzen Pfeile zeigen die Tiefe eines Gesteinspartikels unterhalb der Oberfläche vor und nach der Exhumation.</p>	11
<p>Abb. 2-1: Bildung kosmogener Nuklide (am Beispiel des ^{10}Be) und typische Landschaftselemente, die mittels kosmogener Nuklide untersucht werden: 1) Datierung von Ablagerungen, 2) Erosion im Gebirge 3) Sedimenttransport (aus Wittmann et al. 2017).</p>	15
<p>Abb. 2-2: a) Produktion von ^{10}Be als Funktion der Tiefe für 3 Zeiträume. Die Akkumulationsrate der Isotope ist abhängig von der Intensität kosmischer Strahlung. $t=\infty$ repräsentiert Gleichgewichtsbedingungen zwischen Zerfall und Entstehung; b) Konzentration von ^{10}Be als Funktion der Zeit für verschiedene Erosionsraten (E). Höhere Erosionsraten führen zu einer früheren Äquilibration von Entstehung und Zerfall des radiogenen Isotops (aus Gallagher 2012).</p>	16
<p>Abb. 2-3: Prinzip der OSL-Datierung (nach Aitken 1998, aus Fuchs 2008).</p>	17
<p>Abb. 2-4: a) Vereinfachte Temperaturbereiche für die Partielle Helium Retentionszone (PRZ) von Apatit und Zirkon, sowie der Partial Annealing Zone (PAZ) für Apatit Spaltspuren. b) effektive Schließungstemperatur verschiedener thermochronologischer Systeme. Die effektive Schließungstemperatur ist dabei eine Funktion der Abkühlungsgeschwindigkeit. AHe = Apatit, Helium, AFT = Apatit Spaltspuren, ZHe = Zirkon, Helium, KFsp = Kalifeldspat, Ar = Argon, Bi = Biotit, Musc. = Muskovit, Hbl. = Hornblende (nach Reiners & Brandon 2006).</p>	19
<p>Abb. 2-5: Idealisierte Abkühlungspfade in Abhängigkeit des tektonischen Settings und der Verweildauer im Bereich der partiellen Retentionszone (Braun 2002).</p>	20

Abb. 2-6: Prinzip der Abschätzung von Denudation/Exhumationsbeträgen basierend auf Porositätsmessungen. Die offenen Kreise repräsentieren eine von Denudation beeinflusste Probe und zeigen ungewöhnlich geringe Porosität für die beobachtete Tiefe. Der Denudationsbetrag (D) kann durch den Vergleich zu gemessenen Porositätswerten einer nicht von Denudation betroffenen Referenzprobe (schwarze Linie) ermittelt werden (aus Gallagher 2012).	22
Abb. 3-1: Übersicht der Hebungs- und Senkungsgebiete in Mittel- und Westeuropa während des frühen Känozoikum (Paläogen) nach Doornenbal & Stevenson (2010).	29
Abb. 3-2: Übersicht der Hebungs- und Senkungsgebiete in Mittel- und Westeuropa während des Neogen und entsprechende Strukturelemente aus Doornenbal & Stevenson (2010).	30
Abb. 5-1: Geologische Themenkarten mit hervorgehobenen Gebieten, in denen folgend genannte Ursachen potentiell zu Vertikalbewegungen führen können: Bergbau & Bergbaufolgen (A), Kompaktion von Torfen und Marschböden (B), Massenbewegungen in Gebieten mit hohen Hangneigungen (> 20°) (C) und Subrosion in Gebieten mit Karbonat- und Salzgesteinen (D) nach Kalia et al. (2017).	47
Abb. 7-1: Vorschlag für ein Kategorisierungsschema für eine Ausweisung großräumiger Vertikalbewegungen. Die zu treffenden Aussagen (verschiedene Detailgrade der Ausweisung) und die darauf basierende flächenhafte Darstellung beziehen sich auf eine zugrundeliegende geodynamische Modellannahme. Die Konfidenz der folgenden flächendeckenden Ausweisung der Prognose von Vertikalbewegungen für 1 Million Jahre hängt letztlich vom Detaillierungsgrad der Aussage, der gewählten Darstellungsform (Kapitel 7.4) und den Unschärfen der zuvor getroffenen geodynamischen Modellannahme selbst ab. Eine umfassendere Beschreibung der hier vorgenommenen Unterteilung in verschiedene Aussagen erfolgt in Tabelle 7-1. Die Verwendung der Begriffe vermutlich und wahrscheinlich soll in diesem Fall die Zunahme der Güte einer Aussage verdeutlichen.	67
Abb. 7-2: Ausdehnung und Sedimentmächtigkeit spät-paläozoischer bis känozoischer Becken in Deutschland einschließlich der deutschen Sektoren der Nord- und Ostsee. Mittel- und Süddeutschland ist durch großflächige Abtragung mesozoischer Abfolgen gekennzeichnet. In Mittelgebirgsregionen ist an der Oberfläche großflächig das paläozoische und teils das präkambrische Grundgebirge anstehend.	70

Abb. 7-3: Erstellung einer schematischen Kartendarstellung zu jungtertiären bis quartären Hebungs- und Senkungsbereichen Deutschlands (qualitative Klasseneinteilung ohne Beträge) auf Basis geometrischer Grundformen zur Verbildlichung des Abstraktionsgrades. (A) In einem ersten Erstellungsschritt werden Bereiche die sich im Jungtertiär bis Quartär gehoben und gesenkt haben mit Kreisen oder Ellipsen umrahmt. Dabei können sich die Ausweisungsellipsen überschneiden und Bereiche hervorheben, die über den gesamten Betrachtungszeitraum geringere Vertikalbewegungen zeigten (deutlich kleiner 500 m Hebung/Senkung). (B) In einem zweiten Schritt werden die Ausweisungsellipsen miteinander verschnitten.	71
Abb. 7-4: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte qualitative Übersichtsbetrachtung von Hebungen und Senkungen; Aussage A (Detaillierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Die Ausweisungsellipsen (in diesem Fall Kreise) für Hebung und Senkung können sich überschneiden und Bereiche hervorheben, die über den gesamten Betrachtungszeitraum geringere Vertikalbewegungen zeigten.	72
Abb. 7-5: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte qualitative Übersichtsausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage B (Detaillierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Der qualitative Eindruck der Ausweisung wird durch fehlende Isolinien und unscharfe Übergänge zwischen den Ausweisungsklassen verstärkt. Die Ausweisungsellipsen für Hebung & Senkung aus Abb. 7-4 sind der Ausweisung nach Aussage B farblich hinterlegt (beige & blau).	73
Abb. 7-6: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte qualitative Übersichtsausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage C (Detaillierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Der Detailgrad der Ausweisung ist im Vergleich zur Abbildung 7-5 gestiegen. Zusätzlich werden Regionen mit Vertikalbewegungen > 500 m extra ausgewiesen. Die Ausweisungsellipsen für Hebung (beige) & Senkung (blau) aus Abb. 7-4 sind der Ausweisung nach Aussage C farblich hinterlegt.	73
Abb. 7-7: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte quantitative Übersichtsausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage D (Detaillierungsgrad) aus Tabelle 7-1. Diese Darstellung soll sowohl der großen definierten Unschärfe (500 m) dieses Detaillierungsgrad und der qualitativen Inhalte als auch den zugrundeliegenden quantitativen Auswertungen gerecht werden.	74
Abb. 7-8: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte quantitative Detailausweisung des Ausschlusskriteriums; Aussage F aus Tabelle 7-1. Es wird ein Darstellungsvorschlag für eine höchst mögliche Auflösung einer Zukunftsprognose dargestellt. Aufgrund des hohen Detailgrads werden die Ausweisungsbereiche und Isolinien nicht mehr generalisiert als Kreis oder Ellipse dargestellt.	75
Abb. 7-9: Anhand eines fiktivem Beispiels dargestellte exemplarische quantitative Übersichtsausweisung von großräumigen Hebungen anstatt von Vertikalbewegungen (Abb. 7-7).	76

- Abb. 8-1: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische *Szenario I*: endogene und exogene Prozesse zeigen eine Dynamik wie im Holozän. Prognosen in den Detaillierungsgraden *A* bis *C* (siehe auch Tab. 8-1) sind mit vertretbaren Unschärfen über Gesamtdeutschland auszuweisen. Quantitative Ausweisungen sind nur mit Einschränkungen möglich. Das Schema skizziert die Annahme unter der Voraussetzung eines widerspruchsfreien Basisdatensatz der momentan für Deutschland nicht vorliegt. 79
- Abb. 8-2: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische *Szenario II*: endogene und exogene Prozesse schwanken im Rahmen der jungtertiären (neogenen) bis rezenten Überlieferung. Prognosen in den Detaillierungsgraden *A* bis *B* (siehe auch Tab. 8-2) sind wahrscheinlich über Gesamtdeutschland auszuweisen. Die Detaillierungsgrade *C* & *D* sind vermutlich mit Einschränkungen für einige Regionen für Gesamtdeutschland ausweisbar. Die Detaillierungsgrade *E* & *F* sind vermutlich derzeit nicht mit vertretbaren Unschärfen flächig ausweisbar. 82
- Abb. 8-3: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische *Szenario III*: fließender, stetiger geodynamischer Wandel. Klima schwankt im Rahmen der känozoischen Überlieferung. Eine Prognose für den Detaillierungsgrad *A* (siehe auch Tab. 8-3) ist wahrscheinlich über Gesamtdeutschland möglich, vermutlich auch für Detaillierungsgrad *B*. Mit größeren Unschärfen ist möglicherweise auch der Detaillierungsgrad *C* ausweisbar. Die Detaillierungsgrade *E* und *F* sollten aufgrund des spekulativen Charakter nicht für dieses Szenario ausgewiesen werden. 84
- Abb. 8-4: Kategorisierungsschema für das geodynamische/klimatische *Szenario IV*: sprunghafter Wechsel im tektonischen Regime. Klima schwankt im Rahmen der känozoischen Überlieferung. Eine Prognose für den Detaillierungsgrad *A* (siehe auch Tab. 8-4) ist vermutlich über Gesamtdeutschland möglich, möglicherweise auch für Detaillierungsgrad *B*. Alle anderen in Tabelle 7-1 vorgestellten Detaillierungsgrade sollten aufgrund des spekulativen Charakter nicht für dieses Szenario ausgewiesen werden. 86