

Identifizierung relevanter Klimaparameter und Bestimmung von Schwellenwerten zu gravitativen Massenbewegungen in Deutschland einschließlich Erstellung eines Validierungskonzepts

FA 1.202

Forschungsstelle: Beak Consultants GmbH, Freiberg
Bearbeiter: Steffen, M. / Brendel, C.
Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn
Abschluss: Februar 2022

1 Ausgangslage und Zielstellung

Gravitative Massenbewegungen können den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur bereits heute in verschiedener Hinsicht beeinträchtigen. Im Rahmen der 1. Phase des BMVI-Experten-netzwerks wurde im Themenfeld 1 "Klimawandelfolgen und Anpassung" eine Klimawirkungsanalyse entwickelt, die einen methodischen Rahmen für die Analyse der Betroffenheit der Verkehrsinfrastruktur durch den Klimawandel und Extremwetterereignisse vorgibt. In einem bereits abgeschlossenen Forschungsprojekt wurden in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst erste Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf gravitative Massenbewegungen mithilfe eines generalisierten Ansatzes durchgeführt, der die Grundlage weiterer, gezielterer Analysen in der 2. Phase des BMVI-Experten-netzwerks bildet.

Ziel des Forschungsprojekts ist es daher, die bisherige Auswahl an Klimaparametern zu überprüfen und valide Schwellenwerte zu ermitteln, die zur Auslösung von gravitativen Massenbewegungen führen können. Um eine Aussage zum Einfluss des Klimawandels im Zusammenhang mit Massenbewegungen treffen zu können, müssen hierfür die Wirkmechanismen zwischen der Grunddisposition und dem Einfluss des Klimas beziehungsweise der Witterung, wie beispielsweise Dauer und Intensität von Niederschlägen oder Temperaturveränderungen, zum Beispiel repräsentiert durch Frost-Tau-Wechsel, untersucht und verstanden werden. In den bisherigen Arbeiten des BMVI-Experten-netzwerks wurden hauptsächlich die Änderungen von klimatischen Mittelwerten über einen Zeitraum von 30 Jahren untersucht.

Um eine Über- oder Unterschätzung zu verhindern, sollen auf Basis regional unterschiedlicher Gegebenheiten, wie zum Beispiel Geologie, Morphologie sowie den vorherrschenden klimatischen Verhältnissen, nach Möglichkeit auch regionale Schwellenwerte entwickelt werden, die anschließend die Grundlage zur Prognose der zukünftigen Entwicklung für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 bilden.

2 Aktueller Kenntnisstand

Eine Vielzahl der gesichteten Fachartikel, welche sich mit der Ermittlung relevanter meteorologischer Parameter und der Schwellenwertermittlung befassen, stammt aus den Vereinigten Staaten, China sowie insbesondere aus Italien. Publikationen mit Bezug auf den deutschen Raum sind weitaus weniger vertreten

und hauptsächlich in Form von Projektberichten oder Promotionsarbeiten verfügbar.

Bei der Ermittlung niederschlagsbezogener Grenzwerte wird häufig auf Grundlage der Herkunft verfügbarer Eingangsdaten in verschiedene Maßstäbe, wie beispielsweise global, national, regional oder lokal, unterschieden und die Gültigkeit der daraus abgeleiteten Schwellen auf diese Regionen beschränkt. Bezüglich einzelner Parameter (1D) sind vor allem die Tagesniederschlagssumme (R), die Ereignisniederschlagssumme (E) sowie die Niederschlagssumme zwischen der Massenbewegung und einem definierten Zeitpunkt in der Vergangenheit (A_i) zu nennen. Für Parameterkombinationen (2D) werden vorrangig Niederschlagsintensitäten (I) sowie -summen mit der Niederschlagsdauer (D) in Beziehung gesetzt (ID- und ED-Schwellenwerte). Den Grundstein für letztere Herangehensweise legte CAINE (1980) mit ersten globalen ID- und ED-Grenzwerten für Rutschprozesse. Obwohl die Vorgehensweise zur Schwellenwertermittlung prinzipiell einem vergleichbaren Schema folgt, existiert kein standardisiertes Vorgehen zur Definition der Schwellen.

Die Auswahl an Publikationen bezüglich Sturzprozessen gestaltet sich erheblich übersichtlicher. Die verfügbare Literatur konzentriert sich im Wesentlichen auf die Ermittlung statistischer Zusammenhänge zwischen Sturzprozessen sowie kurz- und längerfristigen meteorologischen Parametern, zum Beispiel Niederschlag, insbesondere jedoch Frost-Tau-Wechsel-Perioden. Analog den niederschlagsbezogenen Schwellen können die Ergebnisse einzelner Studien aus unterschiedlichen Regionen aufgrund differenzierter geologischer sowie klimatologischer Bedingungen mitunter stark voneinander abweichen, weshalb auch in der Studie davon ausgegangen werden muss, dass eine Betrachtung in regionalem Maßstab zu besser angepassten Schwellenwerten – und somit zu belastbareren Ergebnissen führt als in einer nationalen Skala.

3 Schwellenwertanalyse

3.1 Methodik

Im Vorfeld der Schwellenwertanalyse wurden durch Kombination der Karte Naturräumlicher Einheiten Deutschlands (BKG (2014)) und der Hydrogeologischen Karte 1:250 000 (BGR (2021)) neun verschiedene Regionen definiert, um regionale Unterschiede bei der Analyse zu berücksichtigen. Zur Verbesserung der Geometrien wurde zusätzlich das Relief einbezogen. Insofern mit Geologie und Morphologie vereinbar, wurden die Regionen zusätzlich entsprechend der Lage dokumentierter Massenbewegungsereignisse angepasst, um einen möglichst hohen Anteil Ereignisdaten in die Schwellenwertanalyse einbeziehen zu können. Naturräumlichen Einheiten, die entweder keine oder nur eine unzureichende Anzahl Ereignisdaten enthielten, wurden zusammengefasst.

Weiterhin wurde ein alternativer Ansatz auf Basis des mittleren jährlichen Niederschlags verfolgt (MAP-Klassen). Dieser wurde auf Grundlage der DWD-HYRAS-Datensätze zwischen 1971-2000 berechnet und das Ergebnis anschließend in die vier Klassen < 800 mm, 800 – 1 200 mm, 1 200 – 1 600 mm sowie > 1 600 mm eingeteilt.

Zur Schwellenwertanalyse wurden die meteorologischen Daten des DWD-HYRAS-Datensatzes mit 5x5 km Gitterweite verwendet. Zunächst wurden die Parameter (Tabelle 1) für jeden Prozessstypen differenziert einer deskriptiven Analyse (1D) im gesamten Bearbeitungsgebiet, das heißt, ohne Beachtung der naturräumlichen Einheiten, sowie einzeln für die ausgewählten Regionen unterzogen. Entsprechend der Verteilung verfügbarer Massenbewegungsereignisse wurden für unterschiedliche Prozessstypen verschiedene Regionen untersucht. Die Auswertung wurde separat für die Datensätze mit exakt bekanntem Ereignisdatum sowie für jene mit schwächerer temporaler Auflösung (Monat, Jahr, Zeiträume mit 20 Jahren) durchgeführt. Potenzielle Schwellenwerte wurden jeweils an Veränderungen in den

jeweiligen Verteilungen geknüpft. Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche erfolgte anschließend ein Vergleich von potenziell geeigneten niederschlagsbezogenen Parametern mit der Ereignisniederschlagsdauer (2D).

Bei den Parameterkombinationen aus Vorfeuchteindex/Dauer und Ereignisniederschlag/Dauer wurden zusätzlich zur Ableitung von Schwellenwerten auf Basis der naturräumlichen Unterscheidung als Alternative die Grenzen auf Grundlage der Niederschlagsklassen (MAP-Klassen) bestimmt. Die Schätzung der Schwellen wurde durch Ermittlung entsprechender nicht-linearer Gleichungssysteme realisiert, wobei zunächst stets versucht wurde, Schwellen zu definieren, welche die möglichen Minimalbedingungen zur Auslösung von Massenbewegungen darstellen. Durch Verwendung der kumulativen Ereignisniederschlagssumme konnten zudem die Entwicklung vom Beginn des Niederschlags bis zum Zeitpunkt der Massenbewegung analysiert und Bereiche mit besonders hohen Niederschlägen innerhalb eines Niederschlagsereignisses identifiziert werden.

Tabelle 1: Analytierte Parameter und Parameterkombinationen. Fettdruck: Nutzung in Anwendung auf Klimaprojektionsdaten. Spalte Prozess: F – Fließprozesse, R – Rutschprozesse, S – Sturzprozesse. Kursiv: Verwendung der MAP-Klassen.

Parameter	Einheit	Bedeutung	Prozess
1D: Ereignisdaten mit bekanntem Datum (tagesgenau)			
<i>PR-R</i>	[mm]	Tagesniederschlagssumme	FRS
<i>PR-RE_{MAX}</i>	[mm]	Maximaler Tagesniederschlag bezogen auf ein Niederschlagsereignis	FRS
<i>PR-E</i>	[mm]	Ereignisniederschlagssumme	FRS
<i>PR-E_{MAP}</i>	-	Normierte Ereignisniederschlagssumme (Basis: vorhergehende 20 Jahre)	R
<i>PR-A_d, PR-API</i>	[mm]	Niederschlagssumme vorhergehender Zeiträume sowie Vorfeuchteindex	FRS
<i>FT-A_w</i>	-	Anzahl Frost-Tau-Wechsel zwischen Massenbewegung und Zeitpunkt in Vergangenheit	S
<i>T_{TW}, T_S</i>	°C	Mittlere wöchentliche Tagestemperatur/mittlere Temperaturschwankung	S
1D: Ereignisdaten mit bekanntem Monat, Jahr oder Zeitraum (20 Jahre)			
<i>PR-P, PR-A</i>	[mm]	Mittlere Niederschlagssumme in einem (P) definierten/vorhergehenden (A) Zeitraum	R
<i>PRs-PN</i>	-	Anzahl von Starkregenereignissen in einem definierten Zeitraum	R
<i>FT-PN/FT-AN</i>	-	Anzahl Frost-Tau-Wechsel in einem (P) definierten/vorhergehenden (A) Zeitraum	S
2D: Kombination mit der Ereignisniederschlagsdauer für Ereignisdaten mit bekanntem Datum (tagesgenau)			
<i>PR-A_{API}, D</i>	[mm]/[d]	Vorfeuchteindex/Niederschlagsereignisdauer	R
<i>PR-E, D</i>	[mm]/[d]	Ereignisniederschlagssumme/Niederschlagsereignisdauer	FR
<i>PR-E_{MAP}, D</i>	-/[d]	Normierte Ereignisniederschlagssumme/Niederschlagsereignisdauer	R
<i>PR-E_{KUM}, D_f</i>	[mm]/[d]	Kumulative Ereignisniederschlagssumme/fortlaufende Niederschlagsereignisdauer	FR
<i>ST-N, FT-N</i>	[n]/[n]	Anzahl der Sturzereignisse pro Jahr/Anzahl der Frost-Tau-Wechsel pro Jahr	S

3.2 Ergebnisse

Bezüglich der 1D-Analyse für Rutsch- und Fließprozesse (tagesgenau) konnten auf Basis der niederschlagsbezogenen Parameter keine eindeutigen Schwellen ermittelt werden. Da in vielen Regionen der Großteil aller Ereignisse unplausibel geringe Niederschlagssummen aufweist, werden lediglich die Ergebnisse im Alpenraum als belastbar angesehen, welche jedoch auf lediglich zwei großen Niederschlagsereignissen beruhen. Hinsichtlich der zusätzlich untersuchten Verbindung zwischen Niederschlägen und Sturzprozessen konnten keine Zusammenhänge nachgewiesen werden. Die Betrachtung in verschiedenen Zeiträumen ergab sowohl für Rutsch- (Niederschlag) als auch für Sturzprozesse (Frost-Tau-Wechsel) plausible Ergebnisse in den untersuchten Regionen. Hierbei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Auswertungen über langjährige Mittelwerte möglicherweise nur die regionalen klimatischen Bedingungen nachzeichnen und weniger einen prozesstypischen Schwellenwert darstellen, sodass die abgeleiteten Schwellen gegebenenfalls auch geringere Werte aufweisen könnten. Die 2D-Analyse auf Grundlage der tagesgenauen Ereignisdaten erscheint als die geeignetste Methode zur Bestimmung der Schwellenwerte, wobei auch hier die teils sehr geringen Ereignisniederschläge zur Ableitung unplausibler (unterer) Schwellen führen. Für Regionen, in denen der beschriebene Effekt auftritt, wurde bei der anschließenden Anwendung auf die Klimaprojektionen anstelle einer minimalen Grenze jeweils die Grenzwertfunktion des initialen Regressionsergebnisses verwendet. Die Ergebnisse für Fließprozesse sind insgesamt als sehr unsicher einzustufen, da hier lediglich ein Bruchteil der Stichprobengröße der Rutsch- und Sturzprozessdatensätze verwendet werden konnte. Am plausibelsten erscheint die Auswertung auf Basis der Identifizierung von Abschnitten mit hohen bis sehr hohen täglichen Niederschlagsintensitäten auf Grundlage des kumulativen Ereignisniederschlags (ohne regionale Differenzierung).

4 Anwendung auf Klimaprojektionsdaten

4.1 Methodik

Zur Beurteilung der zukünftigen Entwicklung wurden zunächst die Überschreitungen der Schwellenwerte ausgewählter Parameter (Tabelle 1) in den Referenzdaten zwischen 1971-2000 berechnet und gezählt. Die gleiche Verfahrensweise wurde auf die Klimaprojektionsdaten des DWD-Kernensembles (v2018, RCP8.5-Szenario) für die Zeiträume 2031-2060 und 2071-2100 angewandt. Da dieses insgesamt sechs Klimamodelle enthält, wurde die Auswertung auf Basis des Mittelwerts aller sechs Modelle durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden anschließend mit denen des Referenzzeitraums in Beziehung gesetzt. Auf diese Weise konnte direkt ein Änderungssignal abgeleitet werden.

Für die Kombination $E_{\text{kum},D}$ wurden die Niederschlagsereignisse im Vorfeld auf Grundlage der Niederschlagsentwicklung segmentiert und die erhaltenen Teilabschnitte in die vier Stufen <

30 mm/d (schwach), 30 – 50 mm/d (moderat), 50 – 80 mm/d (ergiebig), > 80 mm/d (extrem ergiebig) gegliedert. Statt Überschreitungen wurde anschließend deren Häufigkeit in den Referenz- und Klimadaten gezählt.

4.2 Ergebnisse

Bezüglich der auf den Schwellenwerten für Rutschprozesse basierenden Grenzwertüberschreitungen ist für beide Zukunftsszenarien damit zu rechnen, dass sich die bereits betroffenen Bereiche rund um die Hoch- und Mittelgebirge in Zukunft weiter ausbreiten werden. Dies betrifft vor allem die Schwäbische Alb sowie das Alpenvorland, den Bayerischen Wald, den Thüringer Wald, das Sauerland und den Bereich zwischen Eifel und Pfälzerwald. Eine starke Zunahme in den Kernzonen konnte hierbei jedoch nicht beobachtet werden. Das stärkste Änderungssignal (2031-2060 bis zu zweifach, 2071-2100 teilweise über dreifach) tritt jedoch generell im Norddeutschen Tiefland auf, besonders deutlich im Gebiet nordwestlich des Harzes sowie großflächig nördlich von Berlin.

Hinsichtlich der Fließprozesse ist der verwendete Schwellenwert so groß, dass auf ein Jahr normiert nur wenige Überschreitungen festzustellen sind. Diese befinden sich vorrangig in den Alpen und dem Schwarzwald. Für die Entwicklung ist hier analog den Rutschprozessen mit einer Verbreiterung dieser beiden Zonen zu rechnen, jedoch weniger mit einer Erhöhung der Amplitude in den Kernbereichen. Da die Schwelle für Fließprozesse auf lediglich 68 Beobachtungen beruht, erscheint für diese jedoch der allgemeinere Ansatz auf Grundlage der segmentierten Ereignisniederschläge die bessere Wahl.

Auf Basis von deren Änderungssignalen kann abgeleitet werden, dass die potenziell größten Änderungen in der Klasse zwischen 30 – 50 mm/d stattfinden, was bei zwei Tagen bereits einer minimalen Ereignisniederschlagshöhe von 60 bis 100 mm entspricht. Besonders zum Vorschein kommen hier größere Bereiche nördlich des Erzgebirges, der Eifel sowie das Saar-Nahe-Bergland mit einem Faktor größer als dem Fünffachen gegenüber den Referenzdaten. Weniger stark, aber deutlich ausgeprägt, verhält es sich in der Stufe zwischen 50 – 80 mm/d, bei der für Teile Sachsens und Südbrandenburgs sowie des Schwarzwalds und des Nordalpenrands im Zeitraum 2031-2060 Änderungssignale zwischen 2- und 3-mal auftreten. Im Zeitraum 2071-2100 wird dieser Effekt in den genannten Regionen verstärkt, zudem kommen die Bereiche der Schwäbischen Alb, des Thüringer Beckens sowie der Bereich um das Saar-Nahe-Bergland hinzu. Zum Vergleich: bei den intensiven Niederschlägen des Tiefs *Bernd* im Juli 2021 fielen innerhalb von zwei bis drei Tagen teils mehr als 150 mm (Gesamtniederschlag). Die Klasse < 30 mm/d zeigt kaum nennenswerte Veränderungen an. Die höchste Stufe mit > 80 mm/d zeigt lediglich geringe Zunahmen in den südlichsten Bereichen der Nordalpen an.

Für Sturzprozesse bildet sich eine vollständig gegenteilige zukünftige Entwicklung ab. Während im Referenzzeitraum, abgesehen vom Norddeutschen Tiefland, noch bis zu 30

Überschreitungen der jährlichen Anzahl von Frost-Tau-Wechseln festzustellen sind, schrumpfen diese Regionen bereits für 2031-2060 auf den Bayerischen Wald sowie den südlichen Schwarzwald und das Allgäu. Dieser Trend nimmt auch für den Zeitraum 2071-2100 nochmals zu, sodass nur noch wenige Regionen überhaupt mehr als zehn Jahre mit Überschreitungen der jährlichen Frost-Tau-Wechselanzahl aufweisen. Lediglich in den genannten drei Gebieten werden noch bis zu 20 Überschreitungen erreicht. Zukünftig ist somit bundesweit mit einer erheblichen Abnahme Frost-Tau-Wechsel induzierter Sturzprozesse zu rechnen.

5 Betrachtung möglicher Validierungsoption

Bezüglich der Validierung sind zwei prinzipielle Ansätze denkbar. Zum einen kann eine Validierung sowie Präzisierung der ermittelten Schwellenwerte erfolgen. Zum anderen eine Validierung der prognostizierten Änderungssignale beziehungsweise der quantitativen Auswirkungen klimainduzierter Veränderungen auf gravitative Massenbewegungen. Der letzte Punkt ist dabei sehr langfristig ausgelegt, deshalb eher theoretischer Natur und zum jetzigen Zeitpunkt nicht relevant, da zunächst die reale Entwicklung innerhalb der beiden zukünftigen Betrachtungszeiträume gemessen und anschließend mit den Modellergebnissen verglichen werden müsste. Eine Überprüfung und Verbesserung der abgeleiteten Schwellenwerte ist hingegen bereits heute durch Feldstudien möglich, bei denen verschiedene Risikogebiete ausgewählt und dauerhaft beobachtet werden. Da jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Massenbewegungen nicht bekannt sind, besteht hier vermutlich nur eine geringe Chance, die bisherige Datenbasis entscheidend zu verbessern. Insbesondere für niederschlagsbezogene Prozesse könnten alternativ jedoch Fernerkundungsmethoden dienen, bei denen im Vorfeld die zu untersuchenden Großräume ausgewählt und diese nach entsprechenden Unwetterereignissen auf mögliche Massenbewegungen hin untersucht werden, womit bei entsprechender Methodik und Technologie eine erkennbare Verbesserung der Datenbasis und Anpassung der regionalen Schwellenwerte denkbar wäre. Für Sturzprozesse besteht aktuell nur die Möglichkeit durch Fallstudien an entsprechend exponierten Hängen oder durch Simulation verschiedener Witterungsbedingungen im Labor, die abgeleiteten Werte zu überprüfen oder anzupassen.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Schwellenwertanalyse auf Grundlage der eindimensionalen Analyse erwies sich lediglich für die langjährigen Mittelwerte bei Rutsch- und Sturzprozessen als geeignet, wobei für diese Auswertungen nicht abschließend geklärt werden kann, inwieweit es sich um reale Schwellen oder um die Abbildung der regionalen klimatischen Rahmenbedingungen handelt. Bezüglich der auf tagesgenauen Daten basierenden 1D-Analysen konnten weder für Rutsch- noch für Fließprozesse belastbare Grenzen ermittelt werden. Ein Zusammenhang von Sturzprozessen und

Niederschlagsereignissen kann aufgrund der Verteilungsmuster weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Plausibilität von Rutsch- und Fließereignissen in Verbindung mit sehr geringen Niederschlägen muss in Frage gestellt werden. Die Ursachen hierfür sind nicht abschließend aufzuklären, wobei der Gitterabstand von 5x5 km in den HYRAS-Daten als Grund ausgeschlossen werden kann, da ein Vergleich mit den besser aufgelösten 1x1 km Datensätzen keine signifikanten Unterschiede ergab. Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung führen bei den niederschlagsbezogenen Prozessen nur (2D) Grenzwertfunktionen beziehungsweise die auf Basis der Niederschlagshöhe segmentierten Niederschlagsereignisse zu plausiblen Ergebnissen. Bei Sturzprozessen konnten die Schwellen auf Grundlage der mittleren jährlichen Überschreitung von Frost-Tau-Wechseln abgeleitet werden.

Mithilfe der Ergebnisse des allgemeineren Ansatzes auf Basis der segmentierten Niederschlagsereignisse konnten großräumig Bereiche ausgehalten werden, welche in Zukunft potenziell von besonders intensiven Niederschlägen betroffen sein werden. Ab der zweiten Stufe (moderat) kann dies sowohl ein erhöhtes Risiko für Rutsch- als auch für Fließprozesse bedeuten. Die entsprechende Datenbasis vorausgesetzt, ließen sich darauf aufbauend zudem durch den Abgleich mit vorhandenen Dokumentationen Einschätzungen für das zukünftige Schadenspotenzial prognostizieren. Bezüglich der spezifischeren Anwendung auf Rutschprozesse wurde deutlich, dass vor allem mit einer Ausdehnung der betroffenen Flächen um die bisher bereits bekannten Gebiete der Hoch- und Mittelgebirge, jedoch nicht mit einer Erhöhung der Schwellenwertüberschreitungen in den jeweiligen Kernzonen zu rechnen ist. Hinsichtlich der Entwicklung von Sturzprozessen ist im Gegensatz zu den Niederschlägen ein deutlich entgegengesetzter Trend erkennbar, sodass zukünftig von einer Reduzierung der durch Frost-Tau-Wechsel induzierten Sturzereignisse ausgegangen werden kann.

Keiner der berechneten Ansätze lässt jedoch eine direkte Aussage darüber zu, um welchen Betrag sich die Anzahl von Massenbewegungen eines Typs zukünftig verändert. Das Änderungssignal bezieht sich stets auf die minimalen Rahmenbedingungen, die zur Auslösung einer gravitativen Massenbewegung notwendig sind und nicht darauf, wieviel Massenbewegungen zukünftig auftreten werden.

Aufgrund der inhomogenen Ausgangsdatenlage sowie der vielen Rutschungen mit sehr geringen Niederschlägen, ist darüber hinaus anzumerken, dass vor allem für bundesweite Fragestellungen eine von Bund und Ländern standardisierte Herangehensweise zur Aufnahme, Meldung und Dokumentation von Massenbewegungen, deren Eigenschaften (zum Beispiel flach- oder tiefgreifende Rutschung) und Auslösern hilfreich sein würde. Eine Verbesserung der Datenlage könnte langfristig zudem durch entsprechende großflächige Dauerbeobachtungen, zum Beispiel unter Einsatz von Fernerkundungsmethoden, erreicht werden.

7 Quellen

BGR [2021]: Hydrogeologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. <http://www.bgr.bund.de>.

BKG [2014]: Naturräumliche Einheiten Deutschlands. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. <http://www.bkg.bund.de>.

CAINE, N. [1980]: The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler* 62. (Heft 1/2). S. 23–27.