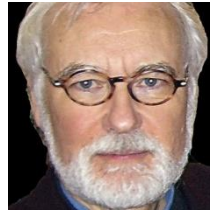


## Stephan Kempe

### Rückblick auf die Ergebnisse der hydrogeochemischen Forschungen der Arge für niedersächsische Höhlen im Hainholz Beierstein vor 50 Jahren



Stephan Kempe, Am Schloss Stockau 2,  
D-64807 Dieburg, kempe@geo.tu-darmstadt.de

## Abstract

With 350 km<sup>2</sup> of area, the South Harz is the largest gypsum karst in Germany and one of the most important in Europe. One of the core areas is the Natural Preserve “Gypsum Karst Landscape Hainholz”. In the 1960ies it became under threat of being quarried for gypsum. Several projects were initiated to show its international importance. One of them was a hydrogeochemical program conducted by the former ArGe für niedersächsische Höhlen 1974-1976, involving 933 samples and their main-ion analysis. CO<sub>2</sub>-pressure and saturation indices were calculated. Results were published and discussed 1982. Here additional statistical results are presented. After 50 years, the Hainholz merits another sampling to document climate and environmental changes.

## Zusammenfassung

Mit 350 km<sup>2</sup> Fläche ist der Südharz das größte Gipskarstgebiet in Deutschland und eines der wichtigsten in Europa. Eines der Kerngebiete ist das NSG „Gipskarstlandschaft Hainholz“. In den späten 1960igern sollte im zentralen Hainholz Gips abgebaut werden. Projekte wurden initiiert, um die Besonderheit und damit die Schutzwürdigkeit des Hainholzes zu belegen, darunter hydrogeochemische Untersuchungen. Von der damaligen Arge für niedersächsische Höhlen wurden 1974-1976 alle 14 Tage 33 Wasserstellen beprobt. 933 Proben wurden genommen, auf Hauptionenkonzentrationen

analysiert und deren CO<sub>2</sub>-Druck und Sättigungsindices berechnet. Die Ergebnisse wurden 1982 publiziert, hier werden aber weitere statistische Untersuchungen vorgestellt. Nach 50 Jahren sollten die Beprobungen wiederholt werden, um langjährige klimatische und ökologische Veränderungen zu dokumentieren.

## 1. Einführung: Der Zechstein des Südharzes und sein Gipskarst

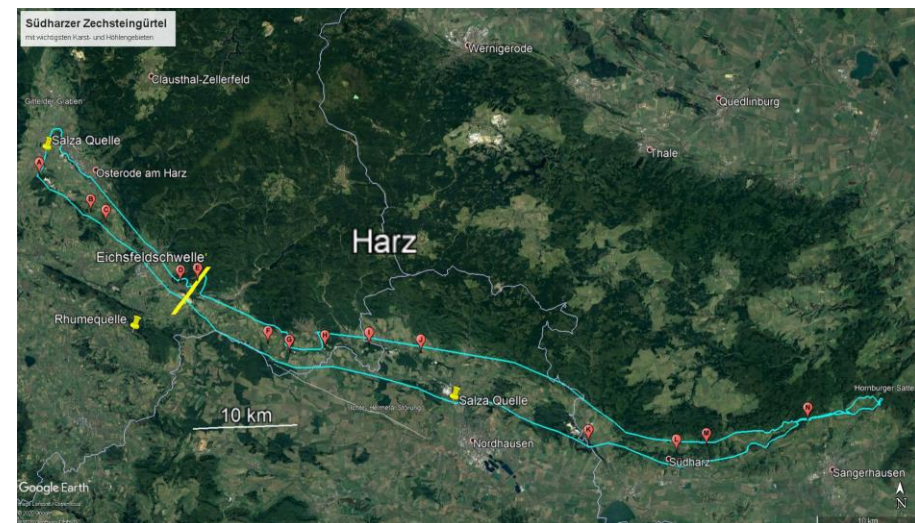


Abb. 1 : Der Zechstein Gürtel des Südharzes (dicke blaue Linie) mit den wichtigsten Höhlen, Karstgebieten und Karstquellen (Google Earth): A) Lichtenstein, B) Beierstein/Klinkerbrunnen, C) Hainholz/Martha- und Jettenhöhle, D) Steinberg, E) Einhornhöhle, F) Weingartenloch, G) Trogstein, H) Sachsenstein, I) Himmelreich, J) Kelle, K) Heimkehle, L) Bauerngraben, M) Questenberg, N) Schlotten. Dünne blaue Linien : Grenzen der Bundesländer.

Zu Beginn der 1970iger Jahre, wurde das Naturschutzgebiet Hainholz/Beierstein (heute Teil des größeren NSG Gipskarstlandschaft Hainholz) durch Gipsabbau bedroht (Geschichte des NSG : Tabelle 1).

- 1962 Provisorische Unterschutzstellung des Hainholz/ Beierstein Gebietes.
- 1963 RIGIPS erhält einen Abbauvertrag der Eigentümer (Schwiegershäuser Forstgenossenschaft) fürs 20 ha große Zentralgebiet (Bollerkopf) des Hainholzes.
- 1967 RIGIPS legt einen Probeschurf kurz vor endgültiger Unterschutzstellung an.
- 1968 Danach klagen die Eigentümer auf entgangenen Pachtzins. Der Streitwert wird auf 34 Mio DM festgelegt, mit den entsprechend hohen Anwaltsgebühren.
- 1969 Die Arge für niedersächsische Höhlen und andere Gruppen beginnen mit Öffentlichkeitsarbeit, Unterschriftenaktionen und der wissenschaftlichen Erforschung.
- Das Hainholz beschäftigt die Gerichte die nächsten 10 Jahre.
- 1981 Der Fall endet mit einer außergerichtlichen Einigung: RIGIPS und die Forstgenossenschaft erhalten hohe Entschädigungen aus Landesmitteln. Heute hat das NSG eine Fläche von 700 ha, und heißt "Gipskarst-landschaft Hainholz" (Landkreis Göttingen, Niedersachsen)

Tabelle 1: Kurze Geschichte des NSG Hainholz.

Es ist eines der am besten entwickelten Karstgebiete des Südharz-Gürtels, der insgesamt 90 km lang und 1 bis 5 km breit ist (Abb. 1). Mit fast 350 km<sup>2</sup> ist der Südharz der größte zusammenhängende Gipskarst in Deutschland. Er erstreckt sich vom Gittelder Graben bei Seesen im Nordwesten bis zum Hornburger Sattel im Osten und ist damit auch eines der wichtigsten in Europa (HERRMANN 1956, KEMPE 1996, HUBRICH 2020). Drei Bundesländer teilen sich das Gebiet: Niedersachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt (Abb. 1).

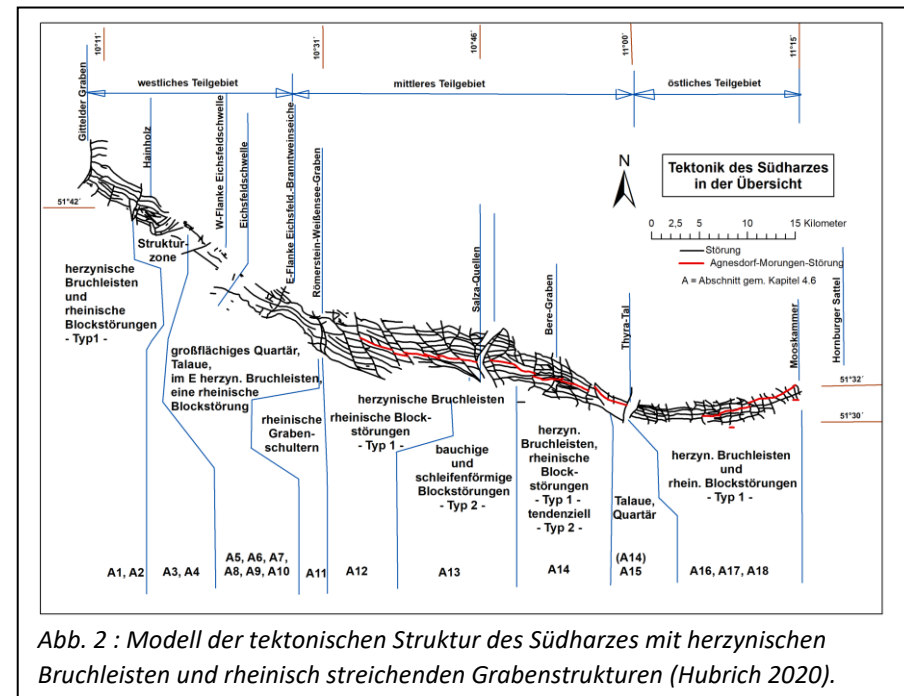


Abb. 2 : Modell der tektonischen Struktur des Südharzes mit herzynischen Bruchleisten und rheinisch streichenden Grabenstrukturen (Hubrich 2020).

Wichtige Teilbereiche werden durch drei Karstquellen entwässert (die 35, teils leicht salzigen Quellen der Salza bei Förste, die Rhume-Quelle bei Rhumspringe und der Salza-Spring bei Salza/Nordhausen) (e.g., HUBRICH & KEMPE 2020), die zu den größten in Deutschland zählen (Abb. 1). Ihre Lage wird durch die tektonische Struktur des Südharzes bestimmt, die -sensu lato- durch ältere, kompressive, "herzynische" (85-125°N) und jüngere, dilatationale, "rheinische" (0-10°N) Störungen bestimmt wird (Abb. 2) (HUBRICH 2020). Durch die Heraushebung des variskisch gefalteten Harzes in der Oberkreide wurden die überlagernden Deckschichten des Zechsteins und Buntsandsteins verstellt, sie fallen mit ca. 10° in südliche Richtungen ein (e.g., KLEY 2013).

Der Zechstein (oder Ober-Perm, 259,1 bis 251,9 Ma vor heute; COHEN et al. 2013/2018) besteht aus sieben Salinar-Zyklen, wobei die unteren drei für die Gesteine des Südharzes bestimmend sind (z1-z3: Werra-, Staßfurt-, und Leine-Zyklen). Der Aller-Zyklus (z4), steht nur lokal an. Alle Formationen zeigen vertikale und horizontale fazielle und petrographische Wechsel. So werden z.B. die Anhydrite des z1 und z2 in Richtung der Eichsfeld-Schwelle (Lage s. Abb. 1) allmählich durch Dolomite ersetzt, während beidseitig der Schwelle nur geringmächtige Karbonatlagen vorhanden sind (HERRMANN 1956, JORDAN 1979, PAUL 1987). In diesen Schwellendolomiten, meist Stromatolith-Riffe, liegen die Höhlen des Steinberges, die Einhornhöhle und der Steinbruch bei Scharzfeld. (Abb. 1). In den Becken beidseitig der Schwelle bestehen die Zyklen jeweils aus einer Ton- oder Mergel-, Karbonat-, Sulfat- und Chlorid-Formation. Die Chloridschichten sind fast vollständig innerhalb der Zechsteinausbisse subrodiert. Chlorid-Salze sind lediglich noch unterhalb der Buntsandsteindecke vorhanden, wo sie auch abgebaut werden. Die Auflösung der Salze und Sulfate hinterlässt meist unkonsolidierte Residualien. Diese und die Karbonat-Formationen bilden Aquifere, in denen Wasser auf Schichtflächen, Klüften und in der Porosität zirkulieren kann, während die mächtigen Anhydritlagen, praktisch wasserundurchlässig sind, zumal sich aufreißende Klüfte durch Vergipsung schnell wieder schließen. Nur wo der Anhydrit vollständig vergipst ist, können Klüfte Wasser leiten; Schichtflächen sind dagegen fast nie wasserleitend.

Sowohl Anhydrit als auch Gips sind hoch löslich (bis über 2 g/l, abhängig von Temperatur und Karbonatkonzentration, (WIGLEY 1973) und können schnell verkarsten. Die drei Karbonatformationen, der z1K (Zechsteinkalk), z2K Staßfurt-Karbonat/ Stinkschiefer) und z3K (Plattendolomit) und ihre jeweils unterlagernde Tone des Kupferschiefers (z1T), des Braunroten Salztons (z2T) und des Grauer Salztons (z3T), sind effektive Aquifere, die zur Bildung von drei Karstwasser-Stockwerken führen können. Die in den Karbonat- und Residuallagen zirkulierenden Wässer können von unten aufsteigen

und die darüberliegenden Sulfatlagen auflösen (hypogene Höhlenbildung; KEMPE 2014). Dies führt zur Bildung sehr großer Hohlräume unter dem Karstwasserspiegel, die den Bergleuten als Schloten bekannt sind, die sie bei der Suche nach dem unterlagernden Kupferschiefer antrafen (Überblick siehe KNOLLE 2021).

Im Hainholz/Beierstein Gebiet steht vor allem der Gips des Hauptanhydrits (z3A) an, wobei Erdfall-Streifen auch die Verbreitung von Staßfurt-Gipsen (z2A), vor allem um den Beierstein und im Heiligental anzeigen. Große landwirtschaftlich genutzte Flächen sind von Tonen und Karbonaten eingenommen (Abb. 3). Das Gebiet ist tektonisch stark zergliedert, am deutlichsten ist die Hainholz-N-Randstörung zu erkennen (Abb. 3 und 4). Vereinfachend kann gesagt werden, dass Hainholz und Beierstein Graben-Strukturen sind.

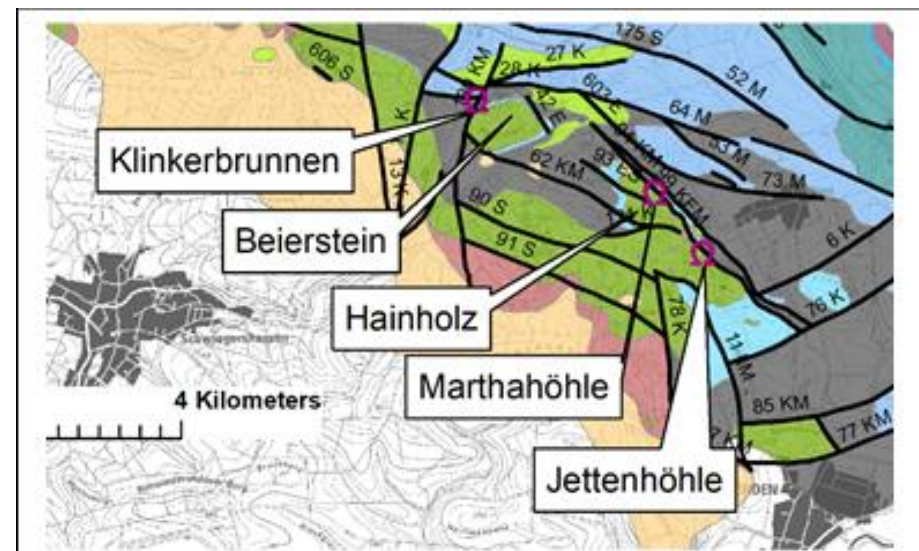


Abb. 3 : Ausschnitt aus der abgedeckten Geologischen Karte des Südharzes (HUBRICH 2020). Blaugrün: z1A ; hellgrün: z2A, dunkelgrün: z3A (Hauptanhydrit); blau: z2K (Stinkdolomit, -Schiefer) ; hellblau: z3K; grau: z2T (grauer Salztone); rotbraun: Aller-Serie; hell braun: su (unterer Buntsandstein).

## 2. Das Hainholz und die hydrogeochemische Beprobung

Das NSG Gipskarstlandschaft Hainholz ist hydrologisch und speläologisch sehr vielfältig, vermutlich das differenzierteste Gebiet des ganzen Südharzes (Abb. 1, 4). Als das Gebiet Ende der 1960iger Jahren durch Gipsabbau gefährdet war (Tabelle 1) begann die Arge für niedersächsische Höhlen durch Zeitungsartikel, Petitionen und Unterschriftensammlungen auf die Gefährdung des Gebietes aufmerksam zu machen. Auf dem Internationalen Kongress für Speläologie 1969 in Stuttgart unterschrieben ca. 160 Karstforscher eine Eingabe an die Behörden. Gleichzeitig sollten durch Forschungsprojekte Argumente für die Einmaligkeit des Gebietes vorgelegt werden. Während einer "Forschungswoche" im Mai 1973 nahmen wir Proben von 69 Wasserkörpern in den Höhlen und aus Quellen, Bächen und Teichen und maßen Abflüsse. Die Proben wurden auf die Hauptionen untersucht und die Resultate wurden 1976 publiziert (BRANDT et al.). Bei der Auswertung der Daten wurde aber klar, dass die jahreszeitlichen Änderungen mit einer einmaligen Beprobung nicht zu beurteilen waren. Daher begann eine Kernmannschaft (Andreas Brandt, Stephan Kempe, Martin Seeger und Firouz Vladi, assistiert von Freunden\*innen und Sympathisanten\*innen) 31 Wasserstellen unter- und oberirdisch von November 1974 bis April 1976 alle 14 Tage zu beproben (Abb. 4). Insgesamt wurden 933 Proben gesammelt und neben Temperatur, pH und Leitfähigkeit auf die Hauptionen untersucht. Die Arbeiten wurden durch eine Bewilligung von Lottomitteln des Landes Niedersachsen finanziert. Parallel wurde ein FORTRAN-IV Programm geschrieben, das die thermodynamische Berechnung wichtiger Kenngrößen ermöglichte, vor allem den CO<sub>2</sub>-Druck (PCO<sub>2</sub>) und die Sättigungsindices (SI) der Minerale Calcit (Cc), Dolomit (Dol) und Gips (KEMPE 1982). Obwohl der Sättigungsindex eines Minerals sich als Gleichung einfach darstellt (z.B.  $SI_{Gips} = \log [Ca^{2+}] * [SO_4^{2-}] / K_{Gips}$ ; oder in Worten: Der Sättigungsindex für Gips berechnet sich aus dem Logarithmus des Ionenaktivitätsproduktes der bei der Lösung beteiligten Ionen im Verhältnis zur Löslichkeitskonstante). Da der

Wert logarithmisch ist, ist der SI bei Sättigung 0, bei Untersättigung negativ und bei Übersättigung positiv. Allerdings ist die Berechnung sehr kompliziert, da nicht nur die Aktivitäten berechnet werden müssen, viele Gleichungen nicht-linear sind und auch alle vorkommenden Ionenpaare zu berücksichtigen sind (s. z.B. WIGLEY 1973, KEMPE 1982).

Da alle Arge-Beteiligten ihre Studien abschließen mussten, blieb die Auswertung dieses Datensatzes, auch wegen der schieren Menge der Einzelwerte, zunächst liegen. Erst bei der Habilitation des Autors über PCO<sub>2</sub> von Flüssen und Frischwässern (KEMPE 1982) konnten die Resultate zum großen Teil zusammengestellt, bewertet und veröffentlicht werden. Statistische Untersuchungen waren aber auch dann noch nicht möglich. Erst kürzlich (KEMPE 2022) wurde das 50-Jahre alte Datenfeld noch einmal statistisch bearbeitet und Regressions-, Faktor- und Cluster-Analysen durchgeführt, um weitere Aspekte der Geohydrochemie des Hainholzes herauszuarbeiten.

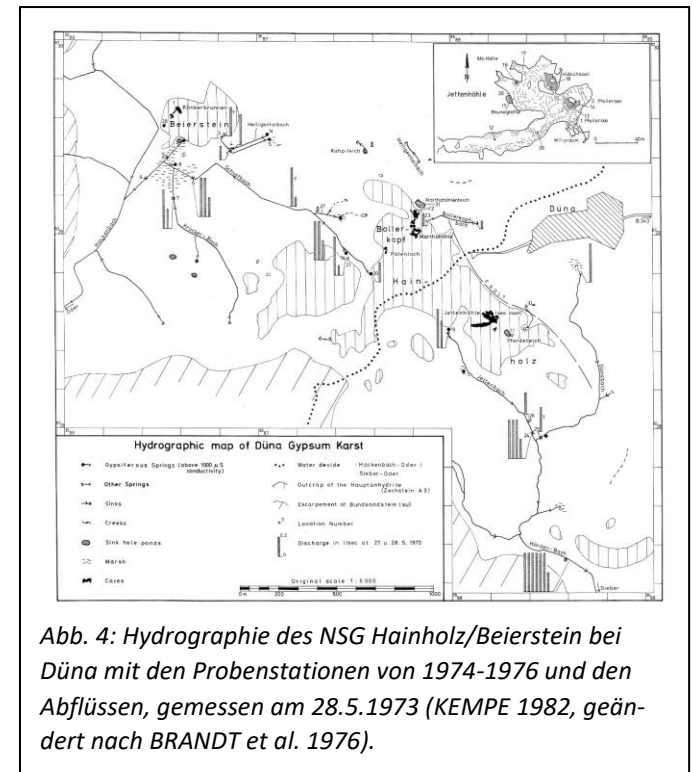


Abb. 4: Hydrographie des NSG Hainholz/Beierstein bei Duna mit den Probenstationen von 1974-1976 und den Abflüssen, gemessen am 28.5.1973 (KEMPE 1982, geändert nach BRANDT et al. 1976).



### 3. Resultate

		Temp.	pH	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	TDS	PCO <sub>2</sub>	SI <sub>cc</sub>	SI <sub>dol</sub>	SI <sub>gyp</sub>
Probenstelle 10	N	34	30	33	26	34	34	34	30	20	20	19
Arteser	M	7,89	7,07	4,96	2,20	5,71	0,88	519	20015	-0,26	-0,57	-1,83
	s	2,00	0,24	1,48	1,58	1,95	0,71	151	9926	0,41	0,43	0,59
	v%	25,31	3,42	29,82	71,72	34,24	81,08	29,19	49,59	-	-75,51	-32,47
Probenstelle 11	N	29	26	28	29	29	29	29	26	16	16	16
Pferdeteich	M	8,64	7,59	4,08	13,63	16,94	0,87	1264	6262	0,49	-0,04	-0,52
	s	6,65	0,31	1,04	7,07	7,05	0,80	511	7219	0,38	0,35	0,43
	v%	77,03	4,01	25,51	51,82	41,61	92,15	40,41	115,29	77,08	-	-84,09
Probenstelle 12	N	25	21	24	25	25	25	25	21	11	11	11
Jettenhöhle	M	4,44	8,07	1,92	28,83	28,94	1,98	2120	734	0,65	0,16	-0,02
	s	1,82	0,24	0,59	2,89	3,47	1,93	180	497	0,29	0,28	0,05
	v%	41,09	3,01	30,45	10,03	11,99	97,38	8,50	67,69	44,67	172,36	-
Probenstelle 13	N	34	30	32	34	34	34	34	30	21	21	21
Jettenhöhle	M	5,36	7,68	2,95	20,52	21,44	2,09	1629	3019	0,37	-0,06	-0,26
	s	0,95	0,28	0,30	5,32	5,68	1,51	353	2266	0,29	0,28	0,15
	v%	17,78	3,65	10,26	25,93	26,49	71,91	21,67	75,04	78,84	-	-58,60

Tabelle 2: Ausschnitt aus der Tabelle mit den Werten für vier Probenstellen der Beprobung von 1974-76 (KEMPE 2022). N: Anzahl der Proben; M: Mittelwert; s: Standardabweichung; v%: Variationskoeffizient. Blau und hellblau: niedrigster und zweit-niedrigster Wert aller Probenstellen. Rot und ocker: Höchster und zweit-höchster Wert aller Probenstellen. TDS = Total Dissolved Solids = Gesamtlösungsinhalt an Salzen in mg/l. Konzentrationen der Ionen in meq/l, PCO<sub>2</sub> in ppmv. SI = Sättigungsindex, negative Werte bedeuten Untersättigung, positive Übersättigung.

Tabelle 2 zeigt einen Ausschnitt der statistischen Werte der einzelnen Wasserstellen (die volle Liste mit allen Werten der 33 Stationen finden sich in KEMPE 2022).

Wasserstelle 10 ist der „Arteser“, einer brunnenartigen Quelle südlich von Düna und nahe der Hainholz-Störung (Abb. 4, 5). Dessen Wasser hat den niedrigsten pH-Wert, die niedrigsten TDS-, Ca- und SO<sub>4</sub>-Konzentrationen

und alle drei Minerale berechnet haben deutliche Untersättigungen. Aufgrund des niedrigen pH-Wertes ist der PCO<sub>2</sub> der höchste aller Proben (zum Vergleich: der PCO<sub>2</sub> der Atmosphäre lag bei 330 ppmv in den 1960iger Jahren; 2022 bereits 420 ppm!) und es ist die höchste Alkalinität (HCO<sub>3</sub>+2\*CO<sub>3</sub>- in meq/l) aller Wasserstellen. Der hohe PCO<sub>2</sub> ist somit für eine hohe Karbonatlösung verantwortlich, das Wasser hat aber fast keinen Gips gelöst. Es dürfte somit aus dem z2K (Stinkdolomit) des Dünaer Plateaus stammen. Sobald das Wasser ausläuft und mit der Luft in Kontakt kommt, entgast es CO<sub>2</sub>, Calcit wird übersättigt und fällt in der Umgebung als heller Calcit-Kristallschluff aus. Dadurch ist ein sichtbarer Quellkegel entstanden. Woher der ungewöhnlich hohe CO<sub>2</sub>-Druck stammt, der einem Mineralwasser aus vulkanischer Quelle entspricht, bleibt unbekannt. Die zweite Quelle mit hohem PCO<sub>2</sub> ist die Beiersteinquelle Nr. 8 (Lage s. Abb. 4).

Die zweite Probe in Tabelle 2 ist die des Pferdeteiches (VLADI & KEMPE, 2022), in den u.a. auch der Arteser entwässert. Das Wasser im Teich hat bereits eine deutlich höhere Gipsmenge gelöst und Calcit ist durch die CO<sub>2</sub>-Entgasung bereits

stark übersättigt. Der PCO<sub>2</sub> ist mit über 6000 ppmv aber immer noch sehr hoch. Trotzdem zeigt das Pferdeteichwasser keine Extremwerte, lediglich der Variationskoeffizient der Temperatur ist der zweithöchste im Datenfeld, nicht verwunderlich für einen Teich, der im Winter einfriert und sich in der warmen Jahreszeit stark erhitzt.



Abb. 5 : Der „Arteser“ im trockenen Zustand im September 2022.

Die 3. Probenstelle in Tab. 2 (Wasserstelle 12; Abb. 4) ist eine Sickerwasserpflanze im Eingangsbereich (Joch) der Jettenhöhle. Die Probe hat fast gegenläufige Extremwerte zum Arteser: die niedrigste Alkalinität, den niedrigsten PCO<sub>2</sub> und die höchsten Ca-, SO<sub>4</sub>-, TDS- und Gipssättigungs-Werte (ganz nahe an der absoluten Sättigung). Gips kann nicht übersättigt werden, Calcit allerdings schon. Aus kinetischen Gründen fällt es erst bei sehr hohen Übersättigungen (SI > 0.6-0.8) aus. Im Joch-Wasser ist Calcit sehr hoch übersättigt, d.h. es kann bereits Calcit ausgefallen sein. Das sind die feinkörnigen Überzüge, die den Boden der Jettenhöhle so rutschig machen. Die Gipssättigung ist die höchste aller Proben, dies bedeutet, dass das Sickerwasser nach ca. 10 m Lauf durch die Decke der Höhle sich mit Gips sättigt.

Wenn wir uns daher die vierte Probe in der Tabelle 2 anschauen (Stelle 13, 1. Pfeilersee der Jettenhöhle), dann fällt auf, dass der See eine geringere Gipssättigung und Ca- und SO<sub>4</sub>-Werte hat als das Sickerwasser im Joch. Der Teich enthält also kein zusammengelaufenes Sickerwasser, es kann nur von unten aus dem unterlagernden Schichten aufgestiegen sein. Die Jettenhöhle ist also im Prinzip eine hypogene Höhle, denn der „cave-forming agent“ (sensu KLIMCHOUK 2012), bzw. das Gips-untersättigte Wasser kann nicht von der Oberfläche kommen, sondern muss von unten aufsteigen. Dies bedeutet aber, dass der Pfeiler in der Jettenhöhle weiter in Laugung steht und ständig geschwächt wird. Der nächste Erdfall ist vorprogrammiert.

Die Faktoranalyse, eine statistische Methode, dient dazu die Gesamtvarianz eines Datenfeldes zu untersuchen. Dabei werden neue Faktoren bestimmt, die für die wichtigsten Teil der Varianz bestimmend sind. In unserem Fall ließen sich vier signifikante Faktoren extrahieren (Tabelle 3).

Den ersten Faktor kann man als „Gips-Lösung“ betiteln, er enthält die Parameter SO<sub>4</sub>-, Ca-, Mg- und TDS-Konzentrationen und den Gips-Sättigungsindex (F1). Der F2 ist der „PCO<sub>2</sub>-Faktor“, der die Parameter pH, PCO<sub>2</sub> und die

Karbonatmineral-SIs enthält. Der F3 enthält lediglich die Varianz der Temperatur, und im F4 zeigt lediglich die Alkalinität eine erhöhte Korrelation.

Bei der Cluster-Analyse (Abb. 6) lassen sich die Probenstellen in Gruppen zusammenfassen. Gruppe 1 ist die größte, die in zwei Äste zerfällt: 1a umfasst die meisten Höhlengewässer und die Gipskarstquellen. 1B umfasst im Wesentlichen die Bäche mit Herkunft aus gemischter Petrographie (Gips, Karbonate und Tone). Die Gruppe 2 fasst drei Oberflächenwässer mit mittlerem PCO<sub>2</sub> zusammen und die Gruppe 3 fasst die Gewässer mit hohem PCO<sub>2</sub> zusammen (vor allem 3b mit Arteser und Beiersteinquelle).

Da der PCO<sub>2</sub> für die Kalklösung verantwortlich ist, besteht auch eine Korrelation zwischen dem PCO<sub>2</sub> und dem Sättigungsindex von Calcit (Abb. 7). Nur die beiden Quellen der Gruppe 3b sind auf Grund ihres hohen PCO<sub>2</sub> nicht Calcit-gesättigt

Alle anderen Gewässer sind übersättigt und vor allem die stark entgasen Bäche sind hoch übersättigt. Die Übersättigung ist teilweise hoch genug, um spontane Calcitfällung, bzw. die Bildung von Quelltuff zu ermöglichen.

Die parallele Darstellung des Calcit-Sättigungsindex im Vergleich mit dem PCO<sub>2</sub> (Abb. 8), lässt dagegen keinen

Rotierte Faktor Ladungen				
Variable	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
Temperatur	-0.276	0.103	0.93	0.138
pH	-0.041	0.967	-0.074	-0.176
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.55	-0.215	0.388	0.675
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.969	0.101	-0.193	-0.095
Ca <sup>2+</sup>	0.971	0.11	-0.186	0.002
Mg <sup>2+</sup>	0.86	-0.07	0.036	-0.306
TDS	0.98	0.089	-0.165	-0.011
PCO <sub>2</sub>	-0.178	-0.829	0.312	0.321
SI <sub>Cc</sub>	0.128	0.967	0.145	0.143
SI <sub>Dol</sub>	0.157	0.952	0.203	0.043
SI <sub>Gips</sub>	0.908	0.229	-0.122	-0.144

Tab. 3: Faktoranalyse der Mittelwerte der hydrogeochemischen Daten des Hainholzes Beierstein Gebietes von 1974-76 (Programm: WESSA 2017).

statistischen Zusammenhang erkennen. Das ist letztlich auch nicht zu erwarten, denn die Gipslösung ist nicht vom PCO<sub>2</sub> abhängig, sondern lediglich von der Verfügbarkeit von Gips für das durchlaufende Wasser. Keine der Proben überschreitet rechnerisch die Gipssättigung. Wie besprochen, erreicht das Sickerwasser aus der Jettenhöhle (Joch, Tabelle 2) fast die absolute Sättigung (Sättigung wäre 0.00; Stationsmittel = -0.08 SIGyp).

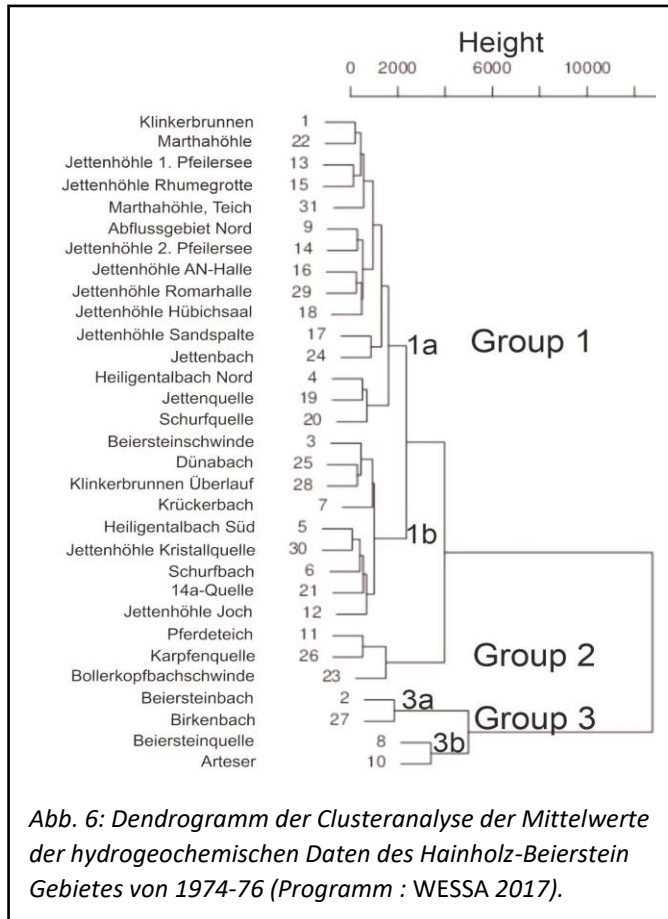


Abb. 6: Dendrogramm der Clusteranalyse der Mittelwerte der hydrogeochemischen Daten des Hainholz-Beierstein Gebietes von 1974-76 (Programm : WESSA 2017).

absolute Sättigung (Sättigung wäre 0.00; Stationsmittel = -0.08 SIGyp).

Für die klimatische Entwicklung sind auch die Temperaturmessungen von vor 50 Jahren von Interesse. Abb. 9 vergleicht die Mittelwerte mit deren Variationskoeffizienten (Standardabweichung in % vom Mittel).

Dabei zeigen sich zwei Gruppen von Werten, die Oberflächengewässer mit relativ hohen Temperaturen und hohen Variationen. Bei den Mittelwerten ist zu beachten, dass sie

sich auf zwei Winter und einen Sommer beziehen, also für Jahresmittelwerte zu niedrig und nicht repräsentativ sind. Die zweite Gruppe Werte zeigt aber eine signifikante Korrelation und insgesamt niedrige Werte. Die beiden niedrigsten sind die Werte vom Joch (Nr.12, Tabelle 2) und aus der Romarhalle (Nr. 29.). Dies zeigt, dass die Kaltluft im Winter in die Jettenhöhle fließt und sie erheblich abkühlt. Auch die hohen Variationskoeffizienten sind leicht zu verstehen, denn die Stationen sind am exponiertesten für die einfließende Luft und ihre Temperaturänderungen. Entlang der Regression sind die weiteren Stationen in der Jettenhöhle und die der Karstquellen, die zunehmend geringere Variationen ihrer Messwerte zeigen je weiter die Stationen vom Eingang der Höhle entfernen liegen.

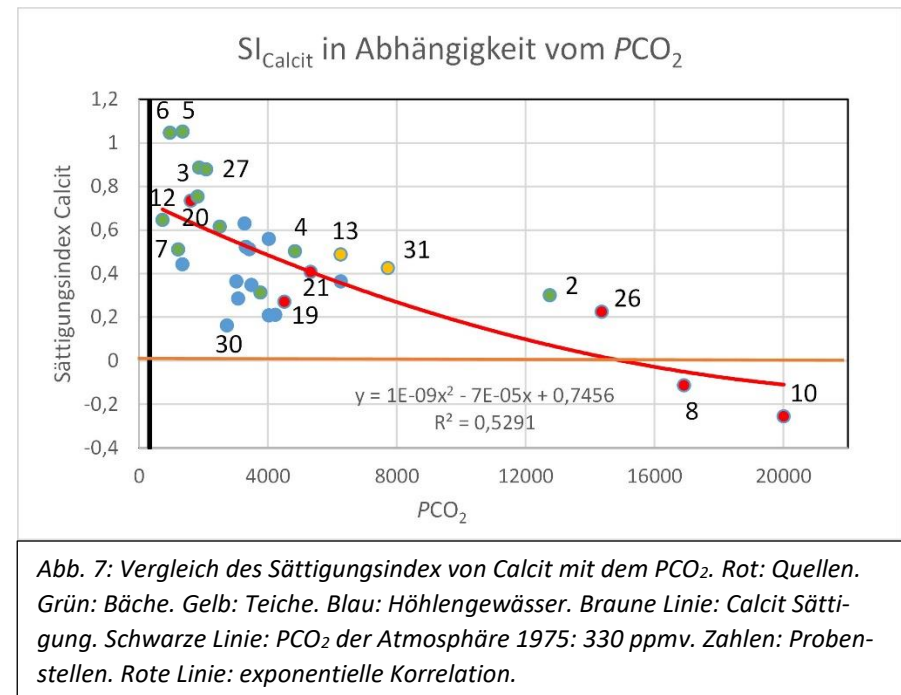


Abb. 7: Vergleich des Sättigungsindex von Calcit mit dem PCO<sub>2</sub>. Rot: Quellen. Grün: Bäche. Gelb: Teiche. Blau: Höhlengewässer. Braune Linie: Calcit Sättigung. Schwarze Linie: PCO<sub>2</sub> der Atmosphäre 1975: 330 ppmv. Zahlen: Probenstellen. Rote Linie: exponentielle Korrelation.

Am temperaturstabilsten ist Probenstelle 17, es ist die am weitesten vom Eingang entfernte Probenstelle in der Jettenhöhle, die sogenannte Sandspalte. Hier wurde im Mittel eine Temperatur von 8°C gemessen. Der Variationskoeffizient betrug nur 3,4% vom Mittel. Die Temperatur ist sehr nahe am Mittel vom Arteser (Probe 10, Tabelle 2) von 7,89°C. Die Jahresmittel im Untergrund Hainholz betragen somit nahe 8°C Mitte der 1970iger Jahre.

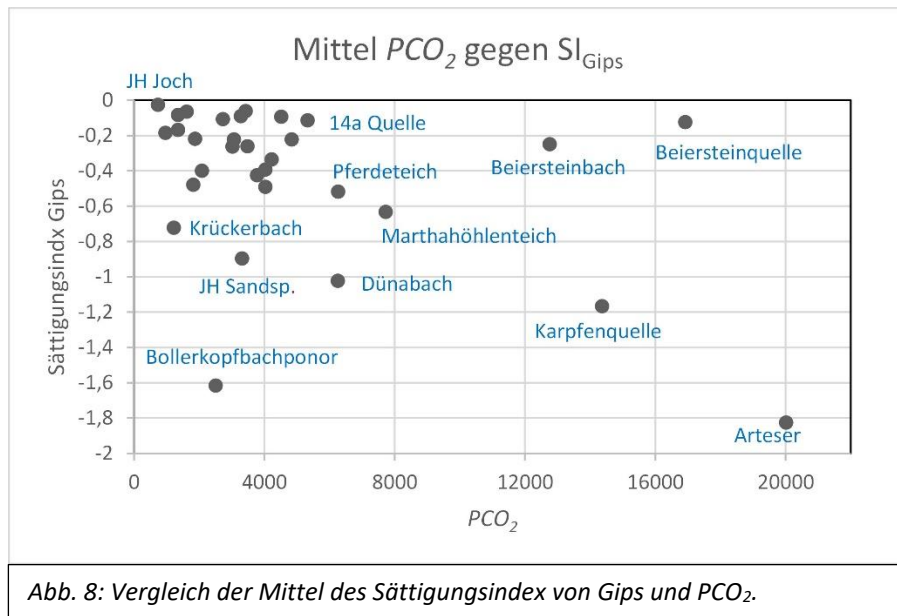


Abb. 8: Vergleich der Mittel des Sättigungsindex von Gips und  $PCO_2$ .

Weiter Ergebnisse und das gesamte Datenfeld der Messungen vor 50 Jahren sind bei KEMPE (1982) und die Zusammenfassung der Werte bei KEMPE (2022) zu finden.

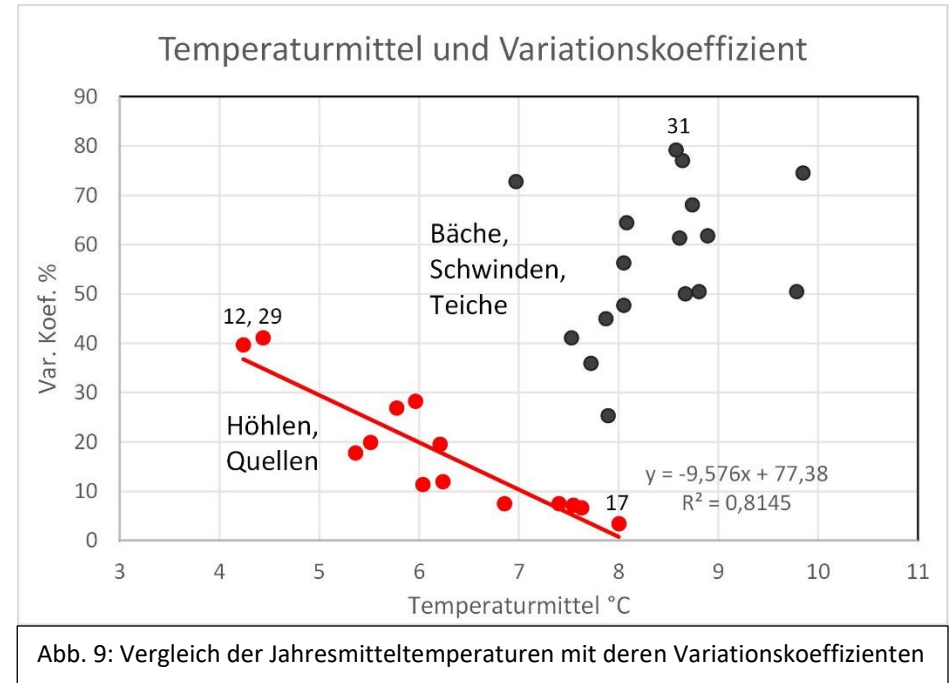


Abb. 9: Vergleich der Jahresmitteltemperaturen mit deren Variationskoeffizienten

#### 4. Ausblick

Das heutige Naturschutzgebiet "Gipskarstlandschaft Hainholz" ist erheblich größer als das 1962 provisorisch unter Schutz gestellte Kerngebiet Hainholz/Beierstein. Die vor 50 Jahren gemachten Untersuchungen bilden einen Datenschatz, der für kein anderes Gebiet des Südharnes existiert. Es wäre sinnvoll, die Beprobungen und Messungen zu wiederholen, um so Klima- und Umweltveränderungen abzubilden. Die bezieht sich nicht nur auf Temperatur- und Abflussveränderungen, sondern auch auf Änderungen im  $PCO_2$  der Grund- und Oberflächenwässer auf Grund von ökologischen Änderungen oder Änderungen in der Länge der Vegetationsperioden. Das Gebiet eignet sich als "Benchmark Area", da es nicht nur unter Naturschutz



steht, sondern auch nur extensiv als Viehweide genutzt und der Wald gar nicht mehr bewirtschaftet wird. Darüber hinaus läuft durch das Hainholz eine lokale Wasserscheide (Abb. 4), sodass weder Oberflächen- noch Grundwässer dem Gebiet von außerhalb zufließen können. Damit können z.B. nicht nur die Änderung der Karstgeochemie verfolgt werden, sondern auch die der Stickstoffzufuhr aus der Luft, unabhängig vom Einfluss der Düngung. Leider wurden vor 50 Jahren auf Grund der fehlenden Finanzierung Nährstoffe (NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>) nicht gemessen da ihre Konzentrationen zu gering sind, um die Sättigungsberechnungen zu beeinflussen. Heute wären diese Werte sehr wertvoll für die Beurteilung der Umweltänderungen.

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Forschungsfragen, wie z.B. woher die hohen CO<sub>2</sub>-Gehalte von Arteser und Beiersteinquelle stammen oder wie lange das Wasser von der Versickerung bis zu den Karstquellen zum Durchfluss benötigt. Diese Fragen lassen sich durch die Messung von Isotopenverhältnissen von H, C und O möglicherweise lösen lassen. Ferner wären Messungen der Schwermetall- und der Seltenen Erden (REE) -Konzentrationen hilfreich, um die Herkunft der Wässer aus den einzelnen Schichten zu ergründen. Auch die Frage, wie und wo Dolomit gelöst wird und wie die hohe Korrelation zwischen Ca- und Mg- mit der Strontium-Konzentration (hier nicht behandelt) zusammenhängt ließe sich durch Messungen ihrer stabilen Isotope untersuchen. All dies dient auch dem besseren Verständnis der Geschwindigkeit und der Lokalisierung (über- gegenüber untertägige Lösung) von Verkarstung per se. Autonome Messgeräte der Temperatur, der Konduktivität oder der Pegel stehen heute zur Verfügung, um kurzfristige Änderungen zu verfolgen.

Alles dies sind zukünftige Forschungsfragen, die weit über die Erforschung eines einzelnen Karstgebietes hinausgehen und für die das Hainholz sehr geeignet erscheint.

## Danksagungen

Die Gelände- und Laborarbeiten wurden vor 50 Jahren durch Mittel des niedersächsischen Zahlenlotos unterstützt. Laborkapazitäten wurden durch Prof. J. Schneider, Universität Göttingen, und Prof. I. Valetton, Universität Hamburg, bereitgestellt. Team-Führer bei den Beprobungen waren Andreas Brand, Rainer Hartmann, Martin Seeger, Firouz Vladi und der Autor. Sie wurden durch zahlreiche weitere Helfer\*innen im Gelände und bei den nächtlichen Titrationsunterstützt. Ohne diese Hilfen wären die Untersuchungen nicht möglich gewesen.

## Zitierte Literatur

BRANDT A., KEMPE S., SEEGER M. & VLADI F. (1976) Geochemie, Hydrographie und Morphogenese des Gipskarstgebietes von Düna/Südharz. – Geol. Jb. C 15: 3-55.

COHEN K.M., FINNEY S.C. GIBBARD P.L. & FAN J.-X. (2013) The ICS International Chronostratigraphic Chart, updated 2018/8. – Episodes 36: 199-204.

HERRMANN A. (1956) Der Zechstein am südwestlichen Harzrand (seine Stratigraphie, Fazies, Paläogeographie und Tektonik). – Geol. Jb. 72: 1-72.

HUBRICH H.-P. (2020) Aufklärung der tektonischen Struktur des Harz-Südrandes und dessen Genese seit dem Perm nach Erfassung der Geologie des Südharzer Zechsteins im Maßstab 1:10,000. – Dissertation, TU-Darmstadt, 150 S., 17 Anl. u. Karten.

HUBRICH H.-P. & KEMPE S. (2020) The Permian gypsum karst belt along the southern margin of the Harz-Mountains (Germany), tectonic control of regional geology and karst-hydrogeology. – Acta Carsologica 49 (1): 99-121.

JORDAN H. (1979) Der Zechstein zwischen Osterode und Duderstadt (südliches Harzvorland). – Z. dt. geol. Ges. 130: 145-163.

KEMPE S. (1982) Long-term records of CO<sub>2</sub> pressure fluctuations in fresh waters, Habilitationsschrift. In: Degens E.T. (Ed.): Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Pt. 1, SCOPE/UNEP Sonderbd., Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg 52: 91-332 [Hainholz: 104-120 u. Appendix 265-297 p.].

KEMPE S. (1996) Gypsum karst of Germany. In: Klimchouk, A., Lowe, D., Cooper, A. & Sauro, U. (Eds.): Gypsum Karst of the World, Intern. J. Speleol. Spec. Issue Vol. 25 (3-4): 209-224.

KEMPE S. (2014) How deep is hypogene? Gypsum caves in the South Harz. In: Klimchouk, A., Sasowsky, I.D., Mylroie, J., Engel, S.A., & Engel, A.S. (eds): Hypogene Cave Morphologies, Karst Waters Inst. Spec. Publ. 18: 57-64. (Proc. San Salvador, Bahamas Feb. 2-7, 2014).

KEMPE S. (2022) Übersicht der hydrogeochemischen Daten des Forschungsjahres 1974-1976 der Arge für niedersächsische Höhlen im NSG Gipskarstlandschaft Hainholz (Düna, Landkreis Göttingen, Südharz). In: Kempe S. & Vladi F. (Hrsg.): Karst und Höhlen des Südharzes. Neue und alte Forschungen in Erinnerung an Reinhard Völker (12.11.1944 – 19.8.2020), Abhandlungen zur Karst- und Höhlenkunde 40: 135-152.

KLEY J. (2013) Saxonische Tektonik im 21. Jahrhundert. Z. Dt. Ges. Geowiss. 164 (2): 295-311.

KLIMCHOUK A.B. (2012) Speleogenesis, hypogenic. In: White W., Culver D.C. (eds). Encyclopedia of Caves, 2nd edn. Academic Press/Elsevier, Amsterdam: 748–765.

KNOLLE F. (Hrsg.) (2021) Die Mansfelder Schloten. Karst- u. Höhle 2018-2021, 463 p.

PAUL J. (1987) Der Zechstein am Harzrand: Querprofil über eine permische Schwelle, Stop 1-23. In: Kulick, J. & J. Paul (Hrsg.), International Symposium Zechstein 1989, Kassel, Hannover, 2. Bd. Exkursionsführer, Wiesbaden: 193-276.

VLADI F. & KEMPE S. (2022) Der Pferdeteich – ein Erdfallteich im NSG Gipskarstlandschaft Hainholz. In: Kempe S. & Vladi F. (Hrsg.): Karst und Höhlen des Südharzes. Neue und alte Forschungen in Erinnerung an Reinhard Völker (12.11.1944 – 19.8.2020), Abh. zur Karst- und Höhlenkunde. 40: 111-118.

WESSA P. (2017) Factor Analysis (v1.0.4) in Free Statistics Software (v1.2.1). Office for Research Development and Education, URL [https://www.wessa.net/rwasp\\_factor\\_analysis.wasp/](https://www.wessa.net/rwasp_factor_analysis.wasp/).

WIGLEY T.M.L. (1973) Chemical solution of the system calcite-gypsum-water. Canad. Journ. Earth Sci. 10: 306-315.