

Zur Landschaftsentwicklung und Verkarstung zwischen Saale und Ilm

- Ein Beitrag zur Hydrogeologie Thüringens von Klaus Götze -

1. Einleitung

Das mittlere Saaletal mit seinen Nebentälern zwischen Jena, Dornburg bis Camburg stellt das Ergebnis einer wechsellvollen Reliefentwicklung zwischen Tertiär und Holozän dar. Das Tal wird in seinem Erscheinungsbild geprägt von der Saale, die sich tief in die Schichten des Muschelkalks und Buntsandsteins eingeschnitten hat. Reste einer alten Fastebene in 200 bis 240 m Höhe über dem Saaletal bilden den geomorphologischen Kontrast zu dieser abwechslungsreichen Flußlandschaft mit alt- bis jungpleistozänen Schotterterrassen, naturnahen Mäandern und Altarmen, Prall- und Gleithängen, Felssabbrüchen, Runsen, Bergrutschen und Durchgangshöhlen und Karstquellen.

Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen vor die geomorphologischen Entwicklungen während der Kalt- und Warmzeiten des Pleistozäns und Holozäns, die zur Herausbildung der heutigen Landschaftsformen führten. Beschrieben werden die Verkarstungen des Muschelkalks und Oberen Buntsandsteins (Röt) und die an den Karst gebundenen Formen und Entwässerungssysteme. Die hohe Gefährdung durch Kontamination des Karstgrundwassers durch Wasserschadstoffe wird am Beispiel der Quelle Zwätzen dargelegt.

2. Paläogeographische Verhältnisse in der Kreide und im Tertiär

Seit der Oberkreide gehört Ostthüringen zum Festlandsbereich und die terrestrische Entwicklung führte zur Ausbildung eines Tiefenkarstes bis hinein in den Muschelkalk und in Karbonate des Grundgebirges (R. GRÄBE 1994). Erhaltene Reste intensiver karsthydrologischer Prozesse stellen die mit Oberkreidesedimenten gefüllten Karsthohlräume in einer Muschelkalkbruchscholle bei Greiz dar. Die schluffig-mergeligen Tonlagen weisen auf humide Klimaverhältnisse hin und belegen eine oberkreidische Landoberfläche im Thüringer Schiefergebirge, die wahrscheinlich über ganz Thüringen verbreitet war. Durch die Abtragung der Kreidesedimente wurden bis auf diese Reste alle Karstformen zerstört. Fossile alttertiäre Verwitterungsbildungen mit Rotlehmrelikten wurden auf der Muschelkalkhochfläche östlich der Saale bei Rockau, Wetzdorf und Mertendorf nachgewiesen. Die als „tropisch – subtropische sialitische Rotlehme“, bezeichneten Bodenbildungen sind an Lösungsdolinen im Muschelkalk gebunden und unterlagern diskordant eozäne bis oligozäne Kiese und Sande. (K.-P. UNGER und H. SCHRAMM 1966) und sind altersmäßig in die Oberkreide zu stellen.

Die präeozäne Einebnungsfläche (B. von FREYBERG 1923) bildete sich unter langer tektonischer Ruhe bei einem tropisch bis subtropischen Klima heraus und blieb auch im Tertiär das dominierende Landschaftselement in Thüringen. Lediglich die nördlichen Randgebiete Ostthüringens und das subsosive Weiße-Elsterbecken mit seinen Vorsenken gehören kurzzeitig während des Mittel- und Obereozäns zum marinen Einflussbereich am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärmeeres. Das Klima im Mittel- bis Obereozän war wechselnd semiarid bis vollarid und prädestiniert für die Subrosion des Untergrundes durch die Auslaugung

der Steinsalze, Gipse, Anhydrite des Werrazechsteins und die Bildung unterirdischer Karsthohlformen. Im Zyklus verschiedener Warmphasen bilden sich Blätter- und Braunkohlen. In den semiariden Zwischenphasen wurden fluviatile Kiese und Sande akkumuliert. Diese päläogeographischen Verhältnisse reichen bis ins Mittlere Eozän.

Unter- und mitteloligozäne Sedimente fehlen in Ostthüringen bzw. wurden abgetragen. Von der ehemaligen praeozänen Fastebene sind Reste bis heute erhalten und nehmen weite Flächen zwischen Eisenberg – Saasa - Tautenburger Forst – Wöllmisse –Dürrenleina – Milda – Hirschroda – Closewitz – Bucha ein.

Reste jüngerer tertiärer Überdeckung stellen die Hochflächensedimente zwischen Eisenberg- Saasa – Tautenhain und Bürgel auf den Muschelkalkhochflächen dar. Diese grobklastischen Sedimente werden ins Oberoligozän gestellt (A. STEINMÜLLER 1981) und lassen darauf schließen, dass warm - humide Klimaverhältnisse herrschten.

Die mit sandig – kiesigen bis tonigen Lockergesteinen gefüllten Dolinen in Schichten des Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalks zwischen Bürgel, Schöngleina, Jena , Maua bis Blankenhain sind Zeugen und Reste eines tiefgreifenden, fossilen Oberflächenkarstes vermutlich höher oberoligozänen Alters mit flächenhaften Abtragungsvorgängen unter voll -bis semihumiden Klimaperioden (A. STEINMÜLLER 1993).

Im Unteren Miozän werden südliche und nördliche Teile des Thüringer Beckens durch flächenhafte Schotterzüge überzogen (A. STEINMÜLLER & K.-P. UNGER 1978). Nur in Südthüringen und am Kyffhäuser sind obermiozäne Ablagerungen nachgewiesen . Im Zeitraum vom Oberoligozän bis zum älteren Miozän breitet sich der nordwestsächsische Schwemmfächer über Ostthüringen aus und überdeckte weitflächig damit auch die heutigen Buntsandstein-und Muschelkalkhochflächen sowie das gesamte ostthüringische Zechsteinge- biet.

Das Pliozän bildet den Höhepunkt der terrestrischen Entwicklung seit der Oberkreide. Oberpliozäne Sedimente finden sich nur in lokalen Kleinsenken und in Karsthohlräumen und in den rezenten Fußauen. Bei Rippersroda lagern in einer Auslaugungssenke im Mittleren Muschelkalk Braunkohlenflöze , die durch fossilführende Beckensedimente ausgefüllt werden (D. H.MAI et.al. 1963) und dem Oberpliozän zugerechnet werden. Dolinenartige Einsenkungen gleicher Alterstellung mit Auffüllung durch Zersatzkiese finden sich auch bei Neusiß und belegen damit den Beginn der Verkarstung im Oberpliozän , deren Reste durch die Überdeckung mit altpleistozänen Zersatzgroschotter konserviert sind. Die Abtragungsleistungen und Subrosion des Untergrundes sind nur im Zusammenhang mit den tektonischen Ereignissen und atektonischen Vorgängen im Untergrund erklärbar.

3. Tektonische Bewegungen

Nach den geologischen und tektonischen Befunden erfolgen die saxonischen Bewegungen, die zur Heraushebung des Thüringer Waldes und des Thüringer Schiefergebirges, des Harzes und des Erzgebirges zwischen Coniac – Santon (G.SEIDEL 2002). Modifiziert werden die tektonischen Prozesse durch die Anlage herzynisch streichender Störungszonen (Bruchzonen und tektonische Schollen). Das mittlere und untere Saaletal mit seinen Nebentälern liegt im Bereich der Jenaer Scholle mit der Finne – Eisenberger Störungszone , der Ilmtal – Magdala - Leutraer Störungszone , der Leuchtenburger Störungszone und der Erfurt – Blankenhain – Kleinbuchaer (Geunitzer) Störungszone. Bereits während des Aufstiegs der Mittelgebirge setzte die Abtragung der herausgehobenen Schichten ein, von denen Reste in grabenähnlichen Strukturen der alten Rumpfflächen erhalten geblieben sind. Gleichzeitig mit der Abtragung erfolgte die Anlaugung und Auslaugung der Salinarzyklen im Thüringer Becken und an dessen Rändern.

Im Pliozän ist von einer mehrfach verstärkten Hebung der Mittelgebirge auszugehen, mit der die

Abtragung und Akkumulation der präglazialen Zersatzgrobschotter an der Wende Pliozän/Pleistozän erklärbar ist und die sich im Pleistozän fortsetzt (B. v. FREYBERG 1923).

4. Pleistozäne Landschaftsentwicklungen und -formen

Während des Pliozäns führte eine zunehmende Aridisierung in Zentralasien und die Bildung eines zirkumpolaren Tundrengürtels vor etwa 2 Mio Jahren zur Abkühlung des Klimas mit Perioden kalt – arider und gemäßigt – humider Zustände (R.-D. KAHLKE 1994). Die Kaltzeiten waren Abschnitte mit intensiver Morphodynamik und geprägt durch periglaziäre Schotterablagerungen, flächenhafte Abtragungen, Abspülungen und Umverlagerung von Sedimenten.

Das erste nachweisbare Gewässernetz in Thüringen lässt sich an der Verbreitung der Zersatzgrobschotter- Jüngerer und Älterer Zersatzgrobschotter – rekonstruieren. Die Anlage dieses präglazialen Gewässernetzes muß noch im Pliozän erfolgt sein im Zusammenhang mit der Hebung der Mittelgebirge und der subrosiven Senkung des Thüringer Beckens. Der Einfluß des nordischen Inlandeises ist auszuschließen, da sich in den frühmittelpleistozänen Schottern keine nordischen Komponenten nachweisen lassen (K.- P. UNGER & R.- D. KAHLKE 1995). Erst in den Abfolgen des Jüngerer Zersatzgrobschotter finden sich glazilimnische Sedimente des frühen Elsterglazial. Eine präglaziale Schotterterrasse auf dem Plattenberg nördlich Jena liegt 140 m über der Saaleaue. Durch P. PUFF et.al. (2001) wurden an der oberen Saale drei unterpleistozäne Schotterterrassen ausgeschieden. Die Obere

Oberterrasse liegt 164 m über der Saale und wird ins Prätegelen gestellt. Die Mittlere Oberterrasse mit 144 – 147m über der Aue altersmäßig dem Eburon zugeordnet, während die

Untere Oberterrasse 99 – 130 m über dem Saaleniveau ins Menap eingeordnet wird. Die Obere Hochterrasse ,die zwischen 78 – 84 m vorkommt, ist mittelpleistozänen Alters.

Im mittleren Saaletal werden höhenmäßig zwei Terrassen des Zersatzgrobschotter ausgewiesen, die mit ihren Lagen den zwei Terrassen der unteren Saale in 150 – 156 m und 140 - 145 m über der rezenten Saale entsprechen (L. EISMANN 1995). Im Ilmtal sind präglaziale Schotter von Rippertsroda bis Dienststedt vorhanden und ab Mellingen floß die präglaziale Ilm geradlinig nach Norden bis an die Finnestörung und weicht damit deutlich vom heutigen Lauf ab. Die Reste der Zersatzgrobschotter lassen sich in 3 – 4 Kilometer Breite entlang der rezenten Täler finden (J. ELLENBERG 2002).

Die während des Eiszeitalters abdauernde und durch glaziklimatische Aufschotterungen rhythmisch unterbrochenen Eintiefung der Flüsse setzt erneut eine mehrfache Hebung der Mittelgebirgsschwelle gegenüber dem Senkungsgebiet der Halle-Leipziger Tieflandsbucht als wirksamer Gradient voraus.

Im Frümittelpleistozän stößt das skandinavische Inlandeis bis Thüringen und reicht bis weit in das Thüringer Becken hinein. Die Eisgrenze reichte über Weida – Jena – Erfurt – Mühlhausen – Bad Frankenhausen bis Nordhausen. Die Talbildung war lediglich während der Elster 1-Kaltzeit im Sinne von L. EISSMANN (1975) durch den Vorstoß des Inlandeises unterbrochen worden. Viele Täler werden durch glazigene Ablagerungen zugeschüttet , so dass es zu Laufverlegungen in der Saale wie zwischen Camburg und Wichmar kommt.

Die Elster 1– Kaltzeit hinterlässt in Thüringen eine Abfolge von Eisstauseen , die zu Veränderungen des alten präglazialen Flussgebietsnetzes führten. Nur wenige Reste von Ablagerungen des skandinavischen Inlandeises sind in Ostthüringen erhalten. Gründe sind die einsetzende hohe Erosion der Flüsse nach Abschmelzen des Eises und die periglaziale, solifluidal – denudative

Abtragung. Bei Jena – Zwätzen wurden über einer elsterzeitlichen Schotterterrasse Bändertone (Reste eines Eisstaussees) sedimentiert, die von Geschiebelehm als Rest einer Grundmoräne des Elstereises überlagert werden. Auch die Schotterterrasse am Heiligenberg , am Friedensberg und bei Winzerla sind Reste der Elsterglazials (G. SEIDEL 1993).

Zeitlich folgte die Cromer- Warmzeit, die in Thüringen durch die Lehmzone von Voigtstedt repräsentiert wird und Großsäugerarten warmzeitlicher Klimaverhältnisse zeigt. In den Ilmkiesen von Weimar – Süßenborn wurden Knochenreste von *Equus suesenbornensis*, *Megaloceras savini*, *Bison schoetenburgensis* u. a. gefunden (R.-D KAHLKE 1997). Im Saaletal und in Ostthüringen sind keine cromerzeitlichen Ablagerungen nachgewiesen. Subtropische Klimaverhältnisse führen zu intensiven und tiefgründigen Zersatzbildungen.

Die Maximalausdehnung der nachfolgenden Saale – Eiszeit bleibt weit hinter der Elster- vereisung zurück und lediglich bei Altenburg erreicht die Kaltzeit den Rand von Ostthüringen. Durch die weitere Heraushebung der Mittelgebirge gegenüber der Leipziger Tieflandsbucht tieft sich die Saale unter ihr frühelsterzeitliches Niveau ein und bildet in Kaltzeiten Schotterzüge aus (A. STEINMÜLLER 1993).

Die als Hauptmittelterrasse bezeichneten Schotterzüge bilden größere Terrassenflächen wie südlich Würchhausen , bei Tümping ,westlich Camburg, östlich Jägersdorf , nördlich Kahla und Orlamünde. Sie liegen 15 – 25 m über der Aue (A. STEINMÜLLER 1993). Während der Ablagerung der Hauptmittelterrassenschotter herrschen an der Saale periglaziale Verhältnisse, die sich durch syngenetische Eiskeilpseudomorphen bei Wichmar nachweisen lassen. Zwischen Camburg und Stöben wurde in den Schottern der Schädelrest von *Capra camburgensis* , eines Steinbockes, als Vertreter arktischer Klimata, gefunden. Die Oberen Mittelterrassenschotter lagern im mittleren Saaletal etwa 30 m über der rezenten Aue, die Unteren Mittelterrassenschotter 7 - 13 m über der Aue und waren

in der Baugrube des ehem. Uni- Hochhauses aufgeschlossen (A. STEINMÜLLER 2002). Die Terrassen werden einem Schotterzug zugeordnet (J. ELLENBERG 2002).

Nach der Saale – Kaltzeit folgt der wärmegeprägte Holstein – Komplex., von dem keine Ablagerungen an unterer und mittlerer und oberer Saale nachzuweisen sind (A. STEIN -MÜLLER 1993)..

Die letzte Eiszeit , das Weichsel – Glazial endete vor etwa 10 000 bis 13 000 Jahren und hinterließ in den Talauen die Niederterrassenschotter, die sich unter periglazialen Bedingungen akkumulieren .Weichselzeitliche Ablagerungen im mittlerem Saaletal werden einer älteren (oberen) und jüngeren (unteren) Niederterrasse zugeordnet. Die ältere Terrasse wird von periglazialen Deckschichten diskordant überlagert. Die jüngere Terrasse liegt 1 – 3 m unter den holozänen Auesedimenten und entsteht in einer Erosionsphase im Jungweichsel.

Die holozänen Sedimente der Flüsse sind stets linienförmig in die weichselzeitlichen Niederterrassenschotter eingesenkt und bestehen aus jüngsten Auelehm , einer Riethserie mit Schluffen, Torf, Mudde und anmoorigen Bildungen , die von geringmächtigen Kiesen und Sanden geringer Mächtigkeit unterlagert werden. Die am Rande der Täler und an den Hängen abgelagerten Löße sind Reste meist weichselzeitlicher äolischer Bildungen nivaler Klimaphasen.

5. Verkarstung und Klima

Höhlensysteme, Karstspalten – und Karsthöhlenquellen, Bachschwinden ,Erdfälle und Dolinen belegen eine Verkarstung im Muschelkalk und Röt zwischen Saale und Ilm seit dem Oberpliozän (W. ZIEGENHARDT 1968). Auslaugungsvorgänge im Zechsteinsalinär im Alt – und

Mittelpleistozän stehen im Zusammenhang mit der Hebung des gesamten Thüringer Raumes am Ende des Altpleistozäns, die den Gradienten für die in dieser Zeitspanne einsetzende quartäre Talentwicklung bildet. Gesteuert wird die Taleintiefung durch die klimatischen Verhältnisse.

In Warmzeiten dominieren Erosion und Eintiefen der Täler und in Kaltzeiten werden diese Vorgänge unterbrochen und Schotter akkumuliert. Mit den Talbildungen entwickelt sich über die klüftigen und wasserleitenden Gesteine des Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalkes ein karsthydrologisch wirksames unterirdisches Entwässerungssystem heraus. In Kaltzeiten stagniert die Verkarstung durch den Permafrost. Die periglaziale Überprägung und der Oberflächenabfluß herrschen vor. Mit der klimagesteuerten, stufenweisen Eintiefung der Täler erfolgt die Erweiterung der Karstgerinne über Kluft- und Störungszonen und die Niveauabsenkung der unterirdischen Entwässerungsbasis. Die Trockengrenze der Verkarstung liegt bei etwa sechs ariden Monaten, da ab diesem Zeitraum das Regenwasser nicht mehr einsickert, sondern oberirdisch abfließt und die authochtone Talbildung einsetzt (K. – H. PFEIFFER 2000).

Die Aufnahmefähigkeit des Wassers für freies Kohlendioxid nimmt bei steigender Temperatur ab und beträgt bei 20° C etwa nur noch die Hälfte. In gemäßigten Klimazonen sind jedoch der Kalkumsatz, d.h. der Wechsel der Kalkausfällung und die neue Lösungstätigkeit des Wassers wesentlich geringer als in wärmeren (subtropischen) Gebieten

der Erde. Deshalb sind rezente Sinterbildungen in den Tropen wesentlich häufiger und stärker. Deshalb sind auch die in den Warmzeiten des Pleistozäns die Travertinbildungen wesentlich mächtiger und großflächiger entwickelt (Travertin von Weimar-Ehringsdorf u.a.).

In den interglazialen Wärmeperioden war es wärmer als heute. Der Vergleich der Jahres-durchschnittstemperatur von 40 – 60° nördlicher Breite: Kaltzeit 2° C, Warmzeit 27° C, rezent 10° C. Aus den Strahlungskurven (MILANKOVIC – Kurven) lässt sich ableiten, dass während der Glaziale die Sommer kühl und die Winter relativ mild waren und in den Warmzeiten heiße Sommer das Gletschereis schmelzen ließen.

6. Karsthydrologische Verhältnisse

6.1. Karbonat – und Gipskarst

Die Verkarstung des Muschelkalkes auf der Ilm – Saale – Platte ist aus heutiger Sicht als weit fortgeschritten, aber bezogen auf die Ausstrichfläche des Muschelkalks, als gering einzustufen, da diese Schichten hauptsächlich aus dünn gebankten Mergelsteinen, Tonmergelsteinen, dolomitischen Kalken und geringmächtigen bioklastischen Kalkbänken zusammensetzen. Die tonigen Komponenten und die heterogene Klüftigkeit des Muschelkalks bieten dem Wasser nur lokal und begrenzt Angriffsflächen zur Lösung von Kalkgestein. Deshalb geht die Verkarstung vor allem von Störungen mit ihren Zerrüttungszonen aus. Daneben sind Abrissklüfte durch Wirkungen der Schwerkraft und die wesentlich offenkluftigeren, massiven Kalkbänke in den Muschelkalkschichten sowie die Auslaugung der Gipse im Mittleren Muschelkalk prädestiniert für die Entstehung eines unterirdischen Karstsystems, das an die örtliche Erosionsbasis gebunden ist. Diese wesentlich geringere Verkarstung bei mergeligen Kalken hat schon J.G. ZÖTL (1974) im Tal der Tarn in Südfrankreich beobachtet. Auch in den tropischen Karstgebieten Jamaicas und Puerto Ricos wurde festgestellt, dass bei Zunahme zwischenlagernder Tonbänder und unreiner bioklastischer Zwischenlagen sonst reiner Kalke, der dort dominierende Cockpitkarst vom Dolinenkarst abgelöst wird (K.-H. PFEIFFER 1993).

Die Karbonatgesteine werden im reinen Wasser fast nicht gelöst, deshalb kommt der Lösungsvorgang nur bei Anwesenheit von im Wasser gelösten Kohlendioxid in Gang. Das Regenwasser nimmt bereits mit der Luft CO₂ auf und bei der Bodenpassage wird weiter CO₂

aufgenommen, das aus der mikrobiellen Zersetzung von organischen Stoffen stammt. Mit zunehmender Tiefe nimmt der CO₂-Gehalt in der vadosen Zone weiter ab. Durch die Mischungskorrosion (A.BÖGLI 1964) im Gleichgewicht stehender Wässer verschiedener Kalkgehalte wird überschüssiges CO₂ frei, das kalkaggressiv ist und zur weiteren Verkarstung im Karbonatgestein und zur Bildung von Karstgerinnen und Höhlensystemen führt. Diese liegen im Grenzbereich zwischen phreatischer und vadoser Zone, in dem durch Mischungskorrosion die Höhlenbildung erfolgt (A. BÖGLI 1964). Die Karsthöhlen im Muschelkalk sind vor allem an Störungszonen gebunden oder als Abrißklufthöhlen einzuordnen. Die Lösung von Gips und Salz ist ein physikalischer Vorgang und auch hier gibt es die gleichen Karstphänomene wie im Karbonatkarst. Die Lösungsgeschwindigkeiten von Kalkstein zu Gips zu Steinsalz verhalten sich zueinander wie 1: 100 : 10 000. Ähnlich sind die Löslichkeiten im Wasser zu beurteilen. Über die Hydratation wird Anhydrit durch Aufnahme von Wasser zu Gips umgewandelt, das nahe der Erdoberfläche mit einer Volumenzunahme von bis zu 60 % verbunden ist und einen Druck von bis zu 11 kbar entwickelt . In der phreatischen Zone, wo eine Volumenzunahme nicht möglich ist, werden die überschüssigen Gipslösungen abgepresst und die Klüfte verschlossen. Die Verkarstung eines Anhydritstockes ist daher meist auf den Gipsmantel beschränkt und lässt dessen Kern unberührt. Im Gegensatz zum Kalkkarst , bei dem die Verkarstung unter günstigen Vorfluterverhältnissen den ganzen Gebirgskörper erfassen kann, sind im Gips die Karstbereiche kleinräumig und begrenzt. Das Frankenloch bei Jena – Löbnitz , die Höhlen am Erbkönig und die Teufelslöcher in Jena sind Zeugen örtlich begrenzter Verkarstungsprozesse in den Basisgipsen des Salinarröts.

6. 2. Der Formenschatz des Karstes

Mit dem Trockenfallen der Muschelkalkschichten durch die Tiefenerosion der Saale und Ilm und deren Nebenbäche bildet sich ein unterirdisches Karstsystem heraus, das an die jeweilige Erosionsbasis der Gewässer gebunden ist. An der Erdoberfläche und im Inneren verkarstungsfähiger Gesteine – Karbonate, Dolomite, Gipse – führt der Verkarstungsprozeß zur Zerstörung der Gesteinsstruktur und es bilden sich primäre Karsterscheinungen an der Oberfläche und in der Tiefe. Das sind auf der Ilm – Saale – Platte Dolinen, Erdfälle, Höhlen und Schloten. Sekundäre Karstphänomene sind Karsthöhlen – und Karstspaltenquellen, Abrisshöhlen , Schichtfugenhöhlen, Bachschwinden, Höhlenseen, Stalagmiten und Stalagtiten sowie Kalksinter und Ablagerungen von Travertin.

Dolinen gehören zu den am weitesten verbreiteten Karstformen und sind vor allem im Ausstrichbereich des Salinarröts und im Muschelkalk entwickelt. Dabei handelt es sich vorwiegend um Lösungsdolinen, wo die Verkarstung von der Oberfläche ausgeht und in die Tiefe fortschreitet. Besonders weit geschwungene, wannenförmige und landschaftprägende Dolinen im Röt ausstrich lassen sich im Saaletal nordöstlich Kunitz, im Gleistal zwischen Beutnitz und Löberschütz und im Reinstädter Grund zwischen Zweifelbach und Geunitz beobachten. Fossile Dolinen als Zeugen eines ehemaligen Oberflächenkarstes in den Folgen des Muschelkalks liegen vor allem im östlichen Bereich der Saale – Platte . Die Dolinen erreichen Tiefen bis zu 20 m und sind mit tertiären Sedimenten aufgefüllt. Ein ausgedehntes, durch Bohrungen erschlossenes Dolinenfeld liegt südwestlich Mertendorf. Weitere Dolinen finden sich bei Graitschen und südlich Frauenprießnitz. Auf größere Dolinen zurückzuführen sind die Tonvorkommen östlich und nordöstlich Wetzdorf.

Erdfälle sind wesentlich seltener vorhanden und kommen fast ausschließlich dort vor, wo die Rötgipse als verkarstungsfähiges Gestein von Deckgebirge aus nicht löslichen Sedimenten überdeckt sind. Erdfallgefährdete Gebiete sind beispielsweise die Fuchslöcher in Jena – Ost und die Oberaue im Bereich der Ringwiese bis nach Altlobeda – Winzerla sowie die Unteraue zwischen

dem Talstein bis Zwätzen und Kunitz. Im Ausstrich des Oberen und Unteren Muschelkalks zwischen Orlamünde , Reinstädter Grund , Jena bis in den Tautenburger Forst sind kaum Erdfälle zu verzeichnen. Auf Blatt Camburg wird die Erdfallhäufigkeit als außer -ordentlich gering bewertet (G. SEIDEL & A. STEINMÜLLER 1993) . Kleine Erdfälle kommen sporadisch westlich von Jena bei Cospeda und Isserstedt im Oberen Muschelkalk vor, die auf die Auslaugung von Restgipsen im Mittleren Muschelkalk zurückzuführen sind.

Die Trockentäler sind lineare Hohlformen ehemals aktiver Oberflächengerinne und trocken gefallene, nicht durch Karstprozesse entstandene Formen im Pleistozän (Fluviokarst). Unter periglazialen Klimaverhältnissen verschließt der Permafrost die karsthydrologisch wirksamen Klüfte und das Wasser der Schneeschmelze muß daher oberirdisch abfließen, so dass diese charakteristischen Talformen entstanden. In den Warmzeiten fallen die Täler wieder trocken. Unter den heutigen gemäßigten Klimaverhältnissen führen die Trockentäler nur bei lang anhaltenden Starkregen und örtlichen Sturzregen episodisch Wasser. Markante und ausge- dehnte Trockentäler finden sich zwischen Zimmern und Altengönnä , südlich Altenberga / Plinz und westlich Bergern auf der Muschelkalkhochfläche . Kleinräumige Trockentaler sind im Muschelkalk recht häufig und kommen auch im Buntsandstein vor.

Die östliche Bereich der Ilm – Saale – Platte ist ein an Karsthöhlen armes Gebiet und die bisher bekannten Höhlen sind an die fossilfreien Gipse an der Basis des Salinarröts gebunden. In Jena ist ein großer Teil des Höhlensystem der Teufelslöcher erforscht und markscheiderisch vermessen (K. KASCH 1986). Das horizontale, insgesamt 130 m lange Höhlensystem ist genetisch an ein tektonisch vorgezeichnetes Kluftsystem gebunden. Die Höhlen sind im vorderen Teil begehbar und erreichen übermannshohe Korrosionsspalten, verengen sich zum Berg hin und sind hier als enge Karstschlotten ausgebildet und nicht zugänglich. Das Höhlenlabyrinth verfügt über zwei kleine Höhlenseen, die Quellen speisen ,welche im anstehenden Gipsgestein über Tage austreten und frei in einen städtischen Kanal ablaufen. Die längste Karsthöhle in den Salinarrötgipsen auf der Ilm – Saale – Platte ist das Bornloch bei Jena – Löbnitz mit 284 m . Die vertikale Tiefe der Höhle von 5 m ist auf die Längenausdehnung bezogen, sehr gering. Fast alle in den Basisgipsen entstandenen Höhlen zeichnen sich sehr geringe vertikale Tiefen aus wie das Frankenloch bei Jena – Löbnitz mit 40 m horizontaler Erstreckung, die Erbkönighöhle mit 52 m Gesamtlänge und die Bürgeler Quellschleife mit 40 m Längserstreckung Aus hydrologischer Sicht ist das Entstehen dieses Höhlentyps in erster Linie an das Vorhandensein von Fließgewässern und damit an die Vorflut gebunden, die mit dem löslichen Gipsgestein über einen gewissen Zeitraum in direkten Kontakt stehen, von da aus sich die Höhlen entwickeln und dem horizontalen Gipslagen –und bändern folgen. Ponore sind äußerst rar und nur bei Poxdorf und Löberschütz erhalten. Sehr selten kommt es an der Schichtgrenze Muschelkalk/Röt zu Höhlenbildungen wie bei Jenaprießnitz.

Durchgangshöhlen als Reste von Hangabrisshöhlen, die durch die Gravitation entstanden sind, kommen in der Umgebung von Jena im Unteren Muschelkalk vor. Durchgangshöhlen sind an der Lutherkanzel im Jenaer Mühlthal und an den Sonnenbergen erhalten. Die Diebeskrippe im Pennickental ist wohl die bekannteste und schon lange unter messtechnischer Kontrolle zur Sicherheit von Wanderer und Anwohner. Versturzhöhlen wie unter dem Dohlenstein südöstlich Kahla sind eher selten erhalten.

Flussversickerungen führen zur Bildung von Karsthöhlensystemen wie bei Dienststedt, das die pleistozäne Ilm geschaffen hat (G. MERZ 1982) Die rezente Ilm versinkt teilweise an der Hetschburg bei Buchart und speist die Überlaufquellen von Öttern . Die Leutra im Mühlthal unterhalb Isserstedt versinkt an mehreren Stellen und steht geohydraulisch mit den Mühlthalquellen in Verbindung. Bachschwinden wurden an der Leutra im Leutraltal an nachgewiesen, die nicht mit den im Tal entspringenden Geißlerquellen in Verbindung stehen (K. GÖTZE 2003). Weitere Bachschwinden im Muschelkalk kommen im Tal der Magdel am Kesselberg bei Keßlar, im Reinstädter Grund südlich Wittersroda, im Mordgraben bei Plinz, im Löschtal sowie in den Bächen zwischen Nennsdorf , Bucha und Coppanz, im Hirschrodaer Grund und im Frauenprießnitzer Bach zwischen Frauenprießnitz und Steudnitz vor. Vor allem im Herbst lassen sich die trocken gefallen

Bachabschnitte gut erfassen und auch deren Austrittsstellen.

Die Karstquellen im Muschelkalk und Oberen Buntsandstein sind Zeugen karsthydrologisch bedeutender Prozesse im Innern der Gesteinsformationen. Weitständige und offene Klüfte sind häufig in den kompakten Kalksteinbänken der Oolith – Terebratel – und Schaumkalk- bänke des Unteren Muschelkalks und im Trochitenkalk, in der Cycloidesbank und in den Glaukonitbänken des Oberen Muschelkalks sowie weiterer Bankzonen mit hohem Kalkanteil entwickelt, von denen die Verkarstung ausgeht. Im Mittleren Muschelkalk werden mit Auslaugung der Gipse und der Verkarstung der Dolomite (Kastendolomite) Karsthohlräume geschaffen, die bei günstiger Lagerung in der phreatischen Zone enorme Wassermengen führen wie die Leutraquelle, Kipperquelle und Herzquelle im Ilmtalgraben bei Oberweimar. Wesentlich wichtiger im karsthydrologischen System der Ilm – Saale – Platte sind vor allem die herzynischen und untergeordnet rheinischen Störungen und die sie begleitenden Kluft- und Zerrüttungszonen, die von weitreichender hydrologischer Drainagewirkung sind und über Karstspalten – und Karsthöhlenquellen entwässern (K. NENNSTIEL 1933, G. HECHT 1993).Bedeutende Karstspaltenquellen zwischen Ilm und Saale sind die Mühlalquellen in Jena, der Grümpelborn bei Wichmar ,die Geißlerquellen bei Leutra , die Karstspaltenquellen an der Glücksmühle bei Plinz/ Altenberga, die Leutraquelle in Weimar , die Herzquelle und die Kipperquelle bei Oberweimar. Über die Geißlerquellen, die Kleinbuchaer Quellen, Geunitzer Quelle, die Trink – Was- Klar – Ist – Quelle sowie über die Saure Wiesenquelle an der Obermühle Geunitz liegen neue Untersuchungen zum Abflussregime der Quellen vor, die veröffentlicht sind (K. GÖTZE 2000, 2002, 2003, 2006).

6. 3. Karstentwässerung

Der Obere-, Mittlere und Untere Muschelkalk bilden auf der Ilm – Saale – Platte einen hydraulisch heterogenen Grundwasserleiterkomplex von etwa 220 bis 240 m Mächtigkeit. Der im Liegenden vorkommende Obere Buntsandstein (Röt) fungiert als wirksamer Grundwassernichtleiter von über 130 m Mächtigkeit. Die an der Basis des Röts entwickelten etwa 20 m mächtigen Basisgipse neigen bevorzugt zur Verkarstung beim erosiven Anschnitt der Gipse. Die Verkarstung der Anhydrit – Folge des Mittleren Muschelkalks ist bei vollständiger Abtragung des Oberen Muschelkalks weit fortgeschritten und im unterirdi-

schen Entwässerungssystem auf Grund seiner geringen Ausstrichfläche im östlichen Teil der Ilm – Saale – Platte von nur geringer Bedeutung .

Der hydrologisch wichtigste Quellhorizont liegt an der Schichtgrenze Unterer Muschel- kalk / Röt. Die Wasserwegsamkeit des Muschelkalks ist an Klüfte, Schicht - und Bankungs- fugen, Spalten, Störungs – und Zerüttungszonen gebunden. Vor allem durch die tektonische Beanspruchung entstand in dem Muschelkalkkomplex ein Netz von Dehnungs - und Scher- klüften, die hauptsächlich der Nordwest – Südost gerichteten herzynischen Richtung folgen. Das in Störungszonen ausgeprägte Kluftsystem bildet die gerichteten Hauptabflußbahnen der Karstentwässerung mit lateral begrenzter Ausdehnung.

In ungestörten Gebieten erfolgt die unterirdische Entwässerung über Schichtquellen und flächenhafte Quellaustritte, die hohen Schwankungen unterworfen und stark niederschlags- abhängig sind. Durch die quartäre Taleintiefung liegt ein Großteil der verkarstungsfähigen Gesteine vor allem im östlichen Teil der Ilm – Saale – Platte über Vorfluterniveau. Der sich hier entwickelte seichte Karst liegt in vadosen Zone und ist an die Muschelkalkgebiete gebunden, in denen bereits durch die Erosion der Grundwassernichtleiter als Basis der verkarstungsfähigen Gesteine erreicht ist und über Karstquellen entwässert. Typusgebiete des seichten Karstes sind die östlich der Saale gelegenen Muschelkalkgebiete zwischen Jena bis Bürgel und Dornburg sowie der Reinstädter Grund . Bereiche mit Tiefenkarst, der in die phreatische Zone reicht, sind an Störungszonen

gebunden, die unterhalb der Erosionsbasis liegen und über stark schüttende, gering von aktuellen Niederschlägen abhängige Karst -quellen erkennbar sind. Der nordwestlicher Ausläufer des Leuchtenburggraben an der Glücksmühle bei Plinz / Altenberga gehört zu einem örtlich begrenzten Tiefenkarstrest sowie auch die Karsthöhlenquellen im Ilmtalgraben.

In ungestörten Muschelkalkkomplexen erfolgt die Karstentwässerung hauptsächlich über die Schichtquellen an der Muschelkalk / Röt –Grenze. Typusgebiet für den seichten Karst mit der unterirschen Entwässerung über diesen Quellhorizont stellt der Gesteinsblock des Unteren Muschelkalks der Kernberge - Wöllmisse - Schöngleina östlich Jena dar. Mit seiner isolierten Lage durch die Erosion der Saale und ihrer Nebenbäche ist windrosenartig der Komplex in randlicher Lage zu den Tälern bis zum Rötsockel freigelegt und wird über Schichtquellen allseitig entwässert. Im Westen wird das Gebiet über die Quellen im Pennickental (Fürsten-brunnen), die Borntalquelle nördlich Neuwöllnitz, die Quelle in der Doberau, die Grundquelle am Friedhof Ziegenhain und die Quelle in Bröhms Garten in Ziegenhain entwässert, während über die Jenaprießitzer Quelle der Nordteil der Wöllmisse zusammen mit mehreren Quellen südlich Großlöbichau und bei Kleinlöbichau entwässert wird. Über die Steudnitzquellen westlich Zinna fließt das Schichtwasser des östlichsten Teils der Wöllmisse aus. Am Südabhang der Wöllmisse zwischen Schöngleina, Zötnitz , Schlöben, Rabis und Drakendorf tritt das Grundwasser über Schicht – und Hangschuttquellen sowie flächenhafte, quellige Bereiche aus. Darauf lassen örtlich sumpfige Bereiche und Hangquellmoore schließen. Durch hydrogeologische Untersuchungsarbeiten konnte nachgewiesen werden, dass der oberflächennahe Grundwasserleiter Kies der Saaleaue durch flächenhafte Zuflüsse aus Hangschuttquellen gespeist wird (K. GÖTZE 1985).

Die Schüttungen der Quellen sind gering und sind sehr stark niederschlagsabhängig bzw. versiegen im Frühsommer (Hungerquellen). Der Untere Muschelkalk im Kerngebiet der Wöllmisse führt sehr wenig Grundwasser. *Eine im Jahre 2000 abgeteufte Bohrung auf dem Luftschiff durchteufte den Muschelkalk und wurde an der Grenze zum Röt eingestellt. Mit etwa 80 Liter pro Stunde wurden nur sehr geringe Grundwassermengen ausgewiesen.* Aus karsthydrologischer Sicht ist zu postulieren, dass bei dem hohen Flurabstand des Karstgrundwassers bei einer GW- Mächtigkeit von 3-4 m in den zentralen Bereichen der ungestörten Muschelkalkschichten auf der Wöllmisse die Verkarstung wesentlich geringer fortgeschritten ist wie in randlichen Tallagen resp. in der Nähe von markanten Trockentälern. Ähnliche Verhältnisse sind durch Bohrungen in anderen ungestörten Bereichen auf der Muschelkalkhochfläche bei Hirschroda , Schmiedehausen, Dröbnitz, Jenaer Forst, Isserstedt und Zimmern bestätigt.

Für stärker tektonisch beanspruchte Gebiete, die zum seichten Karst gehören, sind die Karstspaltenquellen typisch, die stets an der örtlichen Erosionsbasis austreten und auf der Ilm – Saale – Platte gehäuft im basisnahen Teil des Unteren Muschelkalks anzutreffen sind.

Die Karstspaltenquellen der Erfurt - Blankenhain – Kleinbuchaer (Geunitzer) Störungszone, der Leutraer Störungszone und der Finne – Eisenberger Störungszone spiegeln in ihrem Abflussregime die hydrologischen Verhältnisse des seichten Karstes wieder. Bedingt durch die Lage der wasserführenden Spalten und Klüfte im seichten Karst ist das Retentionsver- mögen der Karstspaltenquellen mäßig bis gering und daher der mittlere Abfluß geht bei lang anhaltenden Trockenperioden auf etwa 40 % bis 85 % zurück. Es lassen sich für die einzelnen Karstspaltenquellen die speziellen Quellschüttungsquotienten ermitteln, die Hinweise auf das karsthydrologisch wirksame Rückhaltevermögen der einzelnen Störungs - und Zerrüttungszonen geben. Auf MQ- Abflüsse und die Basisabflüsse bezogen ergeben sich folgende spezifische Quellschüttungsquotienten für die durch langzeitliche Abflussmessungen erfassten Karstspaltenquellen.

Karstspaltenquelle	Mittlerer Abfluß	Basisabfluß	spez Quellschüttungsquotient
Geißlerquellen	50 l/s	24 l/s	0,58
Geunitzer Quelle	8	2	0,25
Kleinbuchaer Quelle	6	1	0,16
Trink-Was-Klar-Ist-Quelle	6,9	2,7	0,39
Saure Wiesenquelle	5,6	4	0,70

Tabelle 1: Spezifische Quellschüttungsquotienten von Karstquellen

Die an der Leutraer Störungszone austretenden Geißlerquellen besitzen ein ausgedehntes unterirdisches Karstsystem und sind durch einen ausgeglichenen Abflussgang charakterisiert. Ähnlich ist auch das karsthydrologische System der Sauren Wiesenquelle an der Geunitzer Grabenzone einzuordnen, allerdings mit einem geringeren Karstspeichervolumen als das der Geißlerquellen.

Zum seichten Karst gehören auch die Jenaer Mühlthalquellen, die Quelle Göttern, der Grümpelborn bei Wichmar und die Quelle Zwätzen. Die Überlaufquellen von Öttern liegen sowohl in der Übergangszone des seichten zum tiefen Karst mit Merkmalen beider Karstsysteme.

7. Karstgenerationen

Zu den ältesten in Thüringen erhaltenen Reste eines Tiefenkarstes stellen die mit Oberkreide-sedimenten gefülltem Karsthohlräume einer 65 bis 80 m tiefen Doline in einer Muschelkalk-restscholle bei Greiz dar und belegen eine oberkretazische Karstgeneration., die unter humi- den Klima entstanden ist (D. KLAUA 1993).

In Ostthüringen lässt sich die nächst jüngere Karstgeneration eines tiefgreifenden Oberflächen karstes im höheren Oberoligozän in Form von Dolinen auf der praeozänen Fastebene zwischen Bürgel und Jena belegen. Die Bildung erfolgte unter vollhumiden bis semihumiden

Klimaverhältnissen (A. STEINMÜLLER 1981)

Im Oberpliozän folgt eine weitere Karstgeneration mit lokalen Kleinsenken und Dolinen im Mittleren Muschelkalk bei Neusiß und bei Rippertsroda .

Im Pleistozän sind im Jonastal Karsthöhlen erhalten, die 2 bis 30 m über dem heutigen Talbereich liegen.

Höhe über Talniveau	Schotterterrasse	Stadium	Alter	Höhlensysteme im Unterer Muschelkalk	Lage
30 m	Obere Mittelterrasse	Endphase Elsterkaltzeit	320 000 a	Obere Biensteinhöhle, Böhlersloch	

20 m	Hauptmittelterrasse	Drenthe-Phase	170 000 a	Korrosionsröhrenhöhle
2-8 m	Untere Mittelterrasse	Warthe-Phase	120 000 a	Untere Biensteinhöhle

Tabelle 2 : Mindestalter von Höhlen im Jonastal (nach G. MALCH & U. PETER 1997)

Durch U. HÖHNE (1997) werden die Höhlen im Geratal bei Liebenstein ebenfalls in die Drenthe- Phase gestellt und die Quellgruppe des Springs von Plaue ins Warthestadium. Nachweisen lassen sich auch eine Reaktivierung bereits trocken gelegener Karstgerinne durch die Aufschotterung von Niederterassenschottern und ehemalige Druckgerinne an den Felsen westlich des Burggrabens der Burg Liebenstein, die eine ehemalige Erosionsbasis darstellen.

Nach U. HÖHNE (1997) weist die Kleinhöhle oberhalb des Friedhofes ein gut erhaltenes Flusstunnelprofil auf, das höchstwahrscheinlich einer vorgezeichneten Kluft folgt. Insgesamt sind sechs Höhlengenerationen nachgewiesen, die ein Alter von 120 000 und 450 000 Jahren aufweisen (G. MALCHER & U. PETER 1997).

Die erosive Taleintiefung während der Warmzeiten wurde durch die Kaltzeiten unterbrochen, in denen Travertine abgelagert wurden, die Verkarstungszeugen darstellen. Eemzeitliche Travertine sind die Vorkommen von Weimar, Weimar- Ehringsdorf und Taubach. Holozäne

Vorkommen sind bei Ammerbach, im Pennickental bei Wöllnitz und Jenaprießnitz ,unterhalb der Glücksmühle bei Plinz/ Altenberga sowie im Jägertal bei Löberschütz u.a.erhalten. Die karsthydrographischen Zeugen der Talerweiterungen im Muschelkalk sind an den rezenten und fossilen Bergstürzen im Pennickental, am Dohlenstein bei Kahla ,am Schönberg im Reinstädter Grund bei Röttelmisch, an der Zietschkuppe bei Löberschütz gut zu beobachten und haben das heutige reizende Landschaftsbild entscheidend mit geprägt.

8. Anthropogene Gefährdungen von Karstquellen

Karstwasseraquifere gehören auf Grund der guten Durchlässigkeiten und hohen Abstandsgeschwindigkeiten zu den durch Eintrag von Wasserschadstoffen gefährdesten hydrogeologischen Grundwasserleitern in Thüringen. Vor allem die anthropogen verursachten Einträge von leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen in den Karstwasseraquifer sind von äußerst nachhaltiger Beeinträchtigung des Grundwassers.

8.1. LHKW – Belastung der Quelle Zwätzen

Die gefasste Quelle Zwätzen, eine Karstspaltenquelle im Unteren Muschelkalk im nördlichen Stadtteil Jenas, musste Ende der neunziger Jahre auf Grund des Nachweises von leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen aus der Nutzung herausgenommen werden.

Die Quellfassung liegt an der Schichtgrenze Muschelkalk / Röt und entwässert über eine durch die örtliche Erosionsbasis angeschnittene herzynische Störungszone das Einzugsgebiet Jägerberges. Mit Schüttungen der Quelle zwischen 8 bis 20 l/s (nach Angaben der Stadtwerke Jena) ist davon auszugehen, dass das unterirdische Einzugsgebiet möglicherweise bis zum

Einzugsgebiet des Steinbaches reicht.

Genutzt wurde der Jägerberg bis 1992 als Militärstandort durch Panzer- und SS 20-Raketeneinheiten der Roten Armee. Geländebegehungen zeigten, dass am Standort Wasserschadstoffe wie Fette, Öle, Benzin und Lösungsmittel gelagert, verwendet und illegal entsorgt wurden. Über Probenahmestellen in verschiedenen Bereichen im Kasernengelände, am Steinbach und am Heiligenberg sowie am Zu- und Ablauf des Behälters der Quelle wurden Wasserproben entnommen und auf polycyclische Kohlenwasserstoffe (PAK) und leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) untersucht und ausgewertet.

8.2. Untersuchungsergebnisse

Nach Auswertung der Untersuchungen, die bereits seit 1996 durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass im Quellwasser der zulässige Grenzwert der TVO für die Summenparameter von 10 myg/l für LHKW deutlich überschritten wird und im Beprobungszeitraum von Mitte 1997 bis Mitte 1998 weiter deutlich im Anstieg begriffen sind. Die PAK-Konzentrationen liegen sämtlich im Grenzwertbereich von 0,2 myg/l. Auch in der Quelle am Heiligenberg und im Oberflächenwasser eines Grabens an der Jägerbergkaserne wurden Überschreitungen des LHKW-Grenzwertes festgestellt.

Im Wasser der Quelle Zwätzen steigt im Zeitraum vom Mai 1997 bis Mai 1998 die LHKW-Konzentration von 12,7 myg/l auf max. 48,71 myg/l an und belegt den Trend zur verstärkten Kontamination des Karstgrundwassers. Im Zusammenhang mit den karsthydrologischen Verhältnissen und den Untersuchungsergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Der Nachweis von LHKW in der Quelle Zwätzen und im erweiterten oberirdischen Einzugsgebiet der Quelle lässt darauf schließen, dass ein flächenhafter Eintrag der LHKW erfolgt. *Bereits 1988 wurden in zwei Flachbrunnen der damaligen Jenaer Molkerei in Zwätzen vom Verfasser als damaliger Mitarbeiter in der Kommunalhygiene der Stadtverwaltung Jena organoleptisch und analytisch „Phenole“ im Wasser und Butter festgestellt, die nach heutigen Kenntnissen auch auf die Schadstofffrachten aus dem Militärstützpunkt Jägerberg zurückzuführen sind. Das Wasser der Flachbrunnen wurde seit Bestehen der Molkerei in den vierziger Jahren zur hygienischen Reinigung der Molkereitechnik verwendet und erst durch die Vielzahl an Nachweisen hoher Konzentrationen von „Phenolen“ wurden die Brunnen still gelegt, provisorisch über Feuerwehrschräuche und ein halbes Jahr später an das öffentliche Trinkwassernetz angeschlossen.*

Die etwas geringeren Konzentrationen von LHKW an möglichen Kontaminationsherden lassen postulieren, dass die Wasserschadstoffe bereits schon teilweise über die Sickerwasserpassage in das tiefer liegende Grundwasser gelangt sind. Der kontinuierliche Anstieg der LHKW-Konzentrationen in der Quelle Zwätzen in den Jahren 1996 bis 1998 nach Räumung des Militärstützpunktes 1992 belegt die stetige Anreicherung des Karstgrundwassers mit diesen Schadstoffen. Es ist anzunehmen, dass infolge der größeren Dichte der LHKW gegenüber Wasser (z.B. Tetrachlorethan 1,62 g/cm³) diese Kohlenwasserstoffe zur Grundwassersohle absinken und auf Grund ihrer mäßigen bis guten Wasserlöslichkeit mobil bleiben und schubartig bei hoher Grundwasserneubildung die Quelle kontaminieren.

Die PAK entstehen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe, von Müll und anderen Rückständen und sind auch im Abwasser enthalten, die wie auch der Müll durch die Rote Armee nach eigenen Beobachtungen ziemlich unkonventionell und besorgniserregend entsorgt wurden.

8.3. Nachgewiesene LHKW und ihre Toxizität

Nachgewiesen wurden Trichlormethan, Chlodbrommethan mit Grenzwertüberschreitung als Einzelverbindung $> 10 \text{ mg/l}$. Daneben wurden Bromdichlormethan, Tribrommethan, Tetrachlormethan, trans-1,2-Dichlorethen, Trichlorethen und Tetrachlorethen nachgewiesen.

Alle Verbindungen gehören in die Kategorie organischer Lösungsmittel. Vor allem der Nachweis hoher Gehalte an Trichlormethan und Dichlorbrommethan ist Beweis für die Kontamination des Grundwassers durch Lösungsmittel. Auch Abbauprodukte von LHKW wurden mit Dichlormethan und cis-1,2-Dichlorethen nachgewiesen. Diese Zwischenprodukte belegen, daß der Eintrag der Lösungsmittel bereits vor Jahren bzw. Jahrzehnten begonnen hat. Gemäß den Erläuterungen der TVO sind eine Reihe von der nachgewiesenen Verbindungen von toxiologischer Bedeutung und als krebserregende Stoffe einzustufen. Dazu gehören Dichlormethan und Tetrachlormethan.

Auf Grund der in der Summe hohen Toxizität der LHKW ist das Quellwasser nicht mehr als Trinkwasser für den menschlichen Gebrauch geeignet. Die Nutzung der Quelle Zwätzen wurde bereits 1997 eingestellt.

8.4. Abbauverhalten der LHKW und PAK

Über das Abbauverhalten von LHKW und PAK im Boden existieren nur sehr wenige Informationen. Von B.HÖLTING (2003) werden über den biotischen Abbau Halbwertszeiten von 1 bis 10 Jahre angegeben. Der Abbau verläuft bei hochchlorierten Verbindungen bevorzugt unter Luftabschluß im anaeroben Milieu und bei niederchlorierten Verbindungen

und den PAK im aeroben Milieu. In dem luftgesättigten Karstaquifer des Muschelkalks werden daher diese Verbindungen bevorzugt abgebaut. Die nachgewiesenen PAK – Konzentrationen im Quellwasser und an den Probestellen um den Grenzwert lassen darauf schließen, dass dieser Abbauprozess im Gang ist. Die langlebigen LHKW dagegen werden auf Grund der ungünstigen Milieuverhältnisse noch Jahrzehnte zum völligen Abbau benötigen.

9. Zusammenfassung

Die heutigen Landschaftsformen zwischen Ilm und Saale verdanken ihre Existenz vor allem den pleistozänen Kalt – und Warmzeiten. Zeugen tertiärer Karstgenerationen sind nur selten erhalten und stellen dolinenartige mit oberoligozänen Sedimenten gefüllte Einsenkungen auf der praeeozänen Festebene zwischen Bürgel und Blankenhain dar. Seit dem oberen Pliozän sind Verkarstungen im Muschelkalk nachgewiesen. Der Grad der Verkarstung ist auf den Ausstrich des Muschelkalks und Röt bezogen weit fortgeschritten, aber gering und hauptsächlich an bruchtektonische Zonen gebunden.

Die tonig-mergeligen und bioklastischen Gesteine des Muschelkalks werden als nicht verkarstungsfreundlich eingestuft und neigen ausschließlich zum Dolinenkarst sowohl unter semiariden bis subtropischen als auch humiden bis semihumiden Klimabedingungen. Die herzynischen, unterordnet rheinischen Störungen mit ihren Zerrüttungszonen bilden bevorzugte karsthydrologische Drainsysteme.

Seichter Karst ist an die Lage der Erosionsbasis an der Schichtgrenze zum Röt als Grundwasser-nichtleiter gebunden und wird bei ungestörten Lagerungsverhältnissen durch Schicht-quellen an

der Grenze Muschelkalk / Röt entwässert und in tektonisch gestörten Gebieten über Karstspaltenquellen.

Der tiefe Karst ist auf tektonische Grabenstrukturen des Leuchtenburggrabens und des Ilmtalgabens beschränkt und liegt unter Vorfluterniveau in der phreatischen Zone und entwässert über Karstspalten – und Karsthöhlenquellen.

Über mehrjährige Quellschüttungsmessungen von Karstspaltenquellen an der Erfurt-Blankenhainer- Kleinbuchaer (Geunitzer) Störungszone wurde das Abflussregime der Geunitzer, Kleinbuchaer, der Trink- was – klar ist Quelle und der Sauren Wiesenquelle untersucht und ihre Quellschüttungsquotienten ermittelt, die eine Einschätzung der hydrologischen Speicherfähigkeit von einzelnen Störungsbereichen ermöglichen und von wichtiger Bedeutung für die Bewirtschaftung der Quellen sind.

Am Beispiel der Karstspaltenquelle Zwätzen in Jena – Nord wird dargelegt, welche nachhaltigen negativen Folgen sich durch die Kontamination des Karstwassers mit PAK und LHKW ergeben.

Die Landschaft der mittleren Saale wurde durch etwa 2 Mio Jahre anhaltende fluviatile Erosionprozesse in Warmzeiten sowie mit periglazialen Überprägungen in Kaltzeiten geschaffen, deren Reste sich in den kaltzeitlichen Schotterterrassen im Saaletal den Bergrutschen und der Eintiefung der Saale mit bis zu 240 m in den Muschelkalk und Röt dokumentieren. Die Höhlen in den Rötgipsen und im Muschelkalk sowie die Schicht- und Karstquellen sind ein Teil dieser großartigen Landschaft, die es zu bewahren gilt.

Literaturverzeichnis

BLUMENSTENGEL, H. (2002): Probleme der Paläogen – Stratigraphie in Thüringen.-
Beitr. Geol. Thüringen, N. F. 9 , 27 – 40,,2 Abb., 2 Tab. Jena

BÖGLI, A. (1964): Mischungskorrosion, ein Beitrag zum Verkarstungsproblem.- Erdkunde
8, 2, Bonn

EISMANN, L. (1975) : Das Quartär der Leipziger Tieflandsbucht und angrenzender Gebiete
um Saale und Elbe.-Schriftenr. Geol. Wiss. 2, 263 S, Berlin

ELLENBERG, J. (2002): Der thüringische Zersatzgroschotter des Unterpleistozäns.-
Beitr. Geol. Thüringen, N. F. 9, 233 – 246 , 2 Tab., Jena

FREYBERG, B.v. (1923) :Die tertiären Landoberflächen in Thüringen – Fortschr. Geol.
Paläont. 6, Berlin

GÖTZE, K.(1985) : Hydrogeologischer Bericht Jena.-Unveröff., VEB Hydrogeologie, Jena

GÖTZE, K. (2000): Die Spaltenquellen an der Glücksmühle bei Plinz.-Schriftenreihe
angew. Umwelt-und Naturschutz in Thüringen, 2 , 92 S.,Kahla

GÖTZE, K. (2002) : Die Geißlerquellen bei Leutra und die Dehnamühlenquellen bei Eichenberg.- Schriftenreihe angew. Umwelt –und Naturschutz in Thüringen, 3 , 59 S.,Kahla

GÖTZE, K. (2003) : Der Burgbrunnen der Leuchtenburg und die Trink-was-klar-ist Quelle bei Geunitz.-Schriftenreihe angew. Umwelt – und Naturschutz in Thüringen, 4, 53 S., Kahla

GÖTZE,K. (2006) : Die Karstspaltenquellen Geunitz und Kleinbucha.- Schriftenreihe angew. Umwelt-und Naturschutz in Thüringen, 5, 12 S.. Kahla

GRÄBE, R.. (1974) : Proterozoikum und gefaltetes Paläozoikum. In : HOPPE,W. u. SEIDEL, G. (Hrsg.) : Geologie von Thüringen, 793- 810, Gotha / Leipzig

HECHT, G. (1993) : Grundwässer, In: Geologie von Thüringen, S. 486 – 529

HÖLTING, B. (2002) : Hydrogeologie – Enke Verlag Stuttgart

HÖHNE, U. (1997) : Erdfälle,Höhlen und Karstquellen im Ilm- Kreis.- Heimathefte Ilm – Kreis, Arnstadt

KAHLKE, R. D. (1994) : Die Entstehungs -, Entwicklungs- und Verbreitungsgeschichte des Oberpliozän Mammuts – Coelodonta - Fanenkomplexes in Eurasien (Großsäuger .-Abh. Senkenb. Naturforsch. Ges., 546; 1- 164; Frankfurt/ M.

KASCH,K. (1986) : Die Teufelslöcher bei Jena.- jena- information., 52 S., Jena

KLAUA, D. (2003) : Kreide. In: Geologie von Thüringen. S. 399 – 409, Weimar

MALCHER, G. & U. PETER (1997) : Der Höhlenkomplex am Bielstein- ein Beispiel der Verkarstung des Unteren Muschelkalkes im Bereich des Jonastales.- Höhlenforschung in Thüringen. (10);S.6-13, Eisenach

MAUL, L. (2002) : Bedeutende Fossilvorkommen des Quartärs in Thüringen.-Beitr. Geol. Thüringen, N. F., 187 – 205 , 4 Abb.,1 Tab., 1 Beil. Jena

- MERZ, G. (1982): Zur Karsthydrogeologie im Thüringer Becken,- Veröff. Naturkunde-Museum Erfurt, S. 43-52, Erfurt
- NENNSTIEL, K. (1933): Springquellen und andere starke Quellen Thüringens.- Beitr. Geol. v. Thür., 3, 33 – 66, Jena
- PFEFFER, K.-H. (1993): Zur Genese tropischer Karstgebiete auf den Westindischen Inseln. Z.Geomorph. N.F. „Suppl.- Bd. 93.-137 – 158, Berlin- Stuttgart
- PFEFFER, K.-H. (2000): Zur Entstehung der Oberflächenformen der nördlichen Frankenalb Bamberger Geographische Schriften, Sonderfolge Nr. 6,S. 109 – 125 Bamberg
- PUFF,P., STEINMÜLLER,A. & WUCHER,K. (2001):Geologische Karte von Thüringen 1: 25 000, 5334 Saalfeld (Saale).- Thür. Landesanst. Für Umwelt u. Geol.; Jena
- SEIDEL, G. (1993):Geologie von Thüringen, 2. überarb. Aufl., 138 Abb., 34 Tab.5 Taf., E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- SEIDEL, G & A. STEINMÜLLER (1993): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1 : 25000 von Thüringen, 2. Aufl.Bl. Camburg, Weimar
- SEIDEL, G. (1993): Geologie von Jena.- Hrsg. Prof.Dr.Gerd Seidel, Thüringer Geologischer Verein,Weimar
- SCHRÖDER, E. (1929): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen, Bl. Kahla, 2. Aufl., Berlin
- SCHWARZBACH, M. (1974): Das Klima der Vorzeit. 3. Auflage, Stuttgart
- STEINMÜLLER,A. (1981):Tertiär. In: Erläuterungen zur Geol.Spezialkarte der DDR, Bl. Eisenberg und Langenberg, 58 – 68 , Berlin
- STEINMÜLLER, A. (2002): Stratigraphische Gliederung weichselzeitlicher fluviatiler Sedimente und periglazialer Deckschichten im unteren Ilmtal und in einem Abschnitt des nördlichen mittleren Saaletales.- Beitr. Geol. Thüringen, N.F. 9, 273 – 299, 9 Abb. Anh. Jena

UNGER, K.-P. & H. SCHRAMM (1966): Alttertiäre Rotlehme auf Muschelkalk in NE-Thüringen.-Jb.Geol. 2, S. 251 – 535, Berlin

UNGER, K.-P. & R.-D. KAHLKE (1995):Thüringen.- In: BENDA, L. (Hrsg): Das Quartär Deutschlands: 199 – 219; Berlin- Stuttgart (Borntraeger)

ZIEGENHARDT, W. (1968): Art und Ausmaß altpleisozäner Bewegungsvorgänge im nördlichen Vorland des Thüringer Waldes zwischen Ohra und Ilm.- Geologie,17 ,(10); S.1154 – 1177; Berlin

ZÖTL, J.G. (1974) :Karsthydrogeologie.- Springer- Verlag Wien New York