GEOLOGIJA *39*, 239–281 (1996), Ljubljana
https://doi.org/10.5474/geologija.1996.010

Rezente tektonische Aktivität des Krško-Einbruchstales (Slowenien)

Recentna tektonska aktivnost Krške udorine

Uroš Premru

Geologische Anstalt Ljubljana
Institut für Geologie, Geotechnik und Geophysik
Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slowenien

Schlüsselworte: rezente Tektonik; vertikale Bodenbewegungen (slip rate), Flusslaufverlegungen; aktive Störungszonen; Korrelation der geologischen, seismischen, seismotektonischen, arhäologischen, historischen und geomorphologischen Daten; Dauern der letzten neotektonischen Phase

Ključne besede: recentna tektonika; hitrosti vertikalnih premikov; spreminjanje rečnih tokov; aktivne prelomne cone; korelacija geoloških, seizmoloških, seizmotektonskih, arheoloških, zgodovinskih in geomorfoloških podatkov; trajanje zadnje neotektonske faze

Zusammenfassung

Die Arbeit umfasst die Korrelation von geologischen, seismologischen, archäologischen und geomorphologischen Daten im Gebiet der rezenten tektonischen Aktivität. Als ein Beispiel dafür wurde der Erdbeben-aktive Krško-Einbruchstal in Südost-Slowenien genommen. Es werden die morphotektonischen Merkmalen von aktiven Störungen und Beispiele von Flussbett-Verlegungen im Quartär und Holozän, sowie auch in der geschichtlichen Zeit abgehandelt. Die archäologischen Daten über die Katastrophen in dem mittelalterlichen Markt Gutenwerth wurden mit den Daten über die geschichtlichen Erdbeben und den seismischen Wirkungsfähigkeiten kompariert. Es wurden die rezenten vertikalen Bodenbewegungen in verschiedenen Gebieten des Krško-Einbruchstales und aus verschiedenen Zeitabschnitten ausgerechnet. Mit einer Regressionsfunktion wurde die Abhängigkeit der vertikalen Bodenbewegungen von der Zeit bewiesen. Aus der Regressionsfunktion wurden die Schlussfolgerungen über den Anfang der letzten neotektonischen Phase abgeleitet und es wurden die Möglichkeiten für Voraussagen der Dauer und der Höhepunkt-Zeit mit den möglichen grössten Magnituden der Erdbeben bei gleichzeitiger Vergrösserung der vertikalen Bodenbewegungen. Aus den Daten über die Höhen von Schotterterrassen und den festgestellten vertikalen Bodenbewegungen werden die zeitlichen Veränderungen des Sava-Flusslaufes wegen der tektonischen Bewegungen in der geschichtlichen Zeit angegeben. Damit aber wird ein quantitativer Beweis abgeleitet, dass für die Flussbett-Verlegungen die tektonischen Bewegungen an den Störungen die Ursache sind.

Kratka vsebina

Prispevek obravnava korelacijo geoloških, seizmoloških, arheoloških in geomorfoloških podatkov pri recentni tektonski aktivnosti. Kot primer je obdelana potresno aktivna Krška udorina v jugovzhodni Sloveniji. Obravnavani so morfotektonski kazalci aktivnih prelomov, primeri prestavitve rečnih strug v kvartarju in holocenu kakor tudi v zgodovinskem obdobju. Arheološki podatki o katastrofah v srednjeveškem trgu Gutenwerth so komparirani s podatki o zgodovinskih potresih in o seizmični zmogljivosti. Izračunane so hitrosti recentnih vertikalnih premikov (slip rate) z različnih delov Krške udorine in iz različnih časovnih obdobij. Z regresijsko funkcijo je dokazana odvisnost hitrosti vertikalnih premikov od časa. Iz regresijske funkcije so izpeljani sklepi o začetku zadnje neotektonske faze in podane možnosti za napovedovanje njenega trajanja in časa njenega vrha z največjimi možnimi magnitudami potresov ob istočasnem povečanju hitrosti vertikalnih premikov. Iz podatkov o višinah prodnih teras in o ugotovljenih hitrosti vertikalnih premikov je prikazano časovno spreminjanje rečnega toka Save zaradi tektonskih premikov v zgodovinskem obdobju. S tem pa je izpeljan tudi kvantitativni dokaz, da so vzroki za prestavitve rečne struge tektonski v premikih ob prelomih.

Einleitung

Bei der Korrelation von geologischen, seismotektonischen, seismologischen und archäologischen Daten in tektonisch aktiven Erdbeben-Gebieten bestehen gewisse Schwierigkeiten. Diese interdisziplinäre Synthesen meiden sowohl die Archäologen als auch die Geologen. Die bisherigen spärlichen Analysen haben gezeigt, dass viele Siedlungen in der geschichtlichen Zeit wegen natürlicher Katastrophen verfallen sind. Die Archäologen erklären die Katastrophen als menschliche Tätigkeiten, die Geologen und Geomorphologen aber untersuchen die geologischen Prozesse, Relief-Veränderungen und die Flussbett-Verlegungen in der geschichtlichen Zeit nicht im solchen Masse, wie es diese interessante Thematik verdient. Besonders wertvoll sind die archäologischen Daten mit einer genaueren Datierung der Kultur-Horizonte. Aber nur für seltene archäologische Fundstellen findet man entsprechende Daten über die Sedimentation oberhalb den Kultur-Schichten, die Sedimentmächtigkeit und andere Daten, aus welchen man auf die tektonischen Geschehnisse in der menschlichen Geschichte schliessen könnte.

Als ein Beispiel für die Synthese von geologischen, seismotektonischen, seismologischen, sowie von geschichtlichen und archäologischen Daten haben wir das neotektonische Krško-Einbruchstal in Südost-Slowenien ausgewählt, in welchem zahlreiche archäologische Fundstellen von der Urgeschichte bis zum Ende des Mittelalters bekannt sind. Gerade einige archäologische Daten aus den Fundstellen ermöglichen uns eine gute Korrelation der geologischen, geomorphologischen und seismologischen Daten. Am Beispiel des Krško-Einbruchstales ist es möglich eine Korrelation zu zeigen, welche auch mit Ausrechnungen gestützt ist.

Kurzbeschreibung des geologischen Aufbaues und der Tektogenese des Krško-Einbruchstales

Nach den bisherigen Daten wird die Entstehung des Krško-Einbruchstales in das obere Pliozän gestellt. Der Krško-Einbruchstal ist eine echte intramontane Senkung, welche in mehreren neotektonischen Phasen an der Berührung der Südalpen, der Dinariden und des Pannonischen Beckens in der Zone des mesozoischen Bündels der

Zagreb-Transform-Störung und zu der paralleler Störungen ausgebildet wurde. Die Gerstaltung des Krško-Einbruchstales ist noch nicht beendet, worauf die rezenten tektonischen Prozesse hinweisen.

Der Krško-Einbruchstal ist von plioquartären und holozänen See-, Moor- und Fluss-Sedimenten gefüllt. Die Grundlage dieser Sedimente bilden die Tertiär-Schichten, welche am Rand der Senkung zutage treten (Abb. 1). Die tertiäre Sedimentation hatte mit dem Helvet-Konglomerat, -Sand und -Ton angefangen und wurde mit dem tortonischen Konglomerat, Lithotamnien- und Mergelkalk, dem Mergelsandstein und dem Mergel fortgesetzt. Die Sarmat-Schichten bestehen aus Tonmergel, Mergelkalk, Sandstein und Schotter. Die Meot-Schichten bestehen aus Kalkmergel und untergeordnet aus Sand, Sandstein, Schotter und Konglomerat. Die Unterpliozän-Schichte bestehen aus Mergel, Ton, Alevrith, untergeordnet aus Sand und Konglomerat. Die Helvet- und Torton-Schichten sind in einem Flachmeer ent-

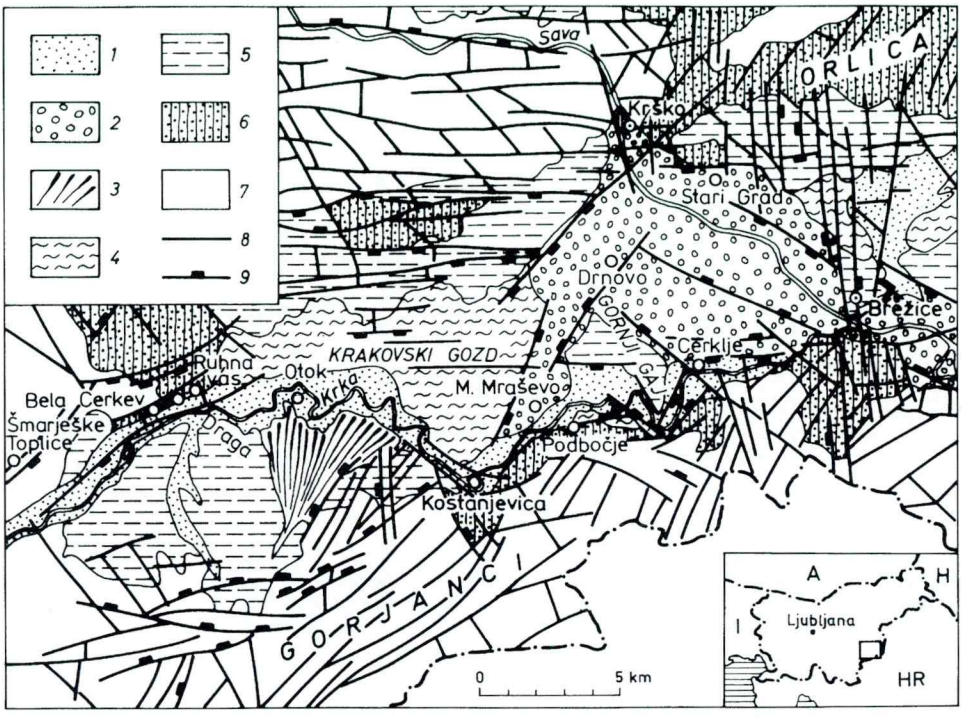


Abb. 1. Geologische Skizze des Krško-Einbruchstales

1- Alluvium allgemein (Holozän); *2*- Schotter (Holozän); *3*- Schwemmkegel von Šentjernej (Holozän); *4*- Quartär-Tone (Würm); *5*- plioquartäre Sedimente; *6*- Miozän-Sedimente; *7*- mesozoische Schichten; *8*- neotektonische Störung; *9*- neotektonische Störung mit abgesenktem Flügel

Sl. 1. Geološka skica Krške udorine

1- aluvij v splošnem (holocen); *2*- prod (holocen); *3*- šentjernejski vršaj (holocen); *4*- kvartarne gline (würm); *5*- pliokvartarni sedimenti; *6*- miocenski sedimenti; *7*- mezozojske plasti; *8*- neotektonski prelom; *9*- neotektonski prelom s spuščenim krilom

standen, die Sarmat-, Meot- und Unterpliozän-Schichten aber wurden in einem brackischen Becken abgelagert. Die beschriebenen Schichten bilden die Krško-Synklinale mit der Achsenrichtung SW-NO, welche nordöstlich von der Linie Krško-Brežice verhältnismässig gut erhalten ist, südwestlich davon aber von den neotektonischen Störungen schon deformiert ist (Šikić et al., 1972, 1978; Pleničar et al., 1976; Pleničar & Premru, 1977).

Die Bildung des Krško-Einbruchstales hatte mit dem neotektonischen Störungssystem W-O im oberen Pliozän angefangen. Das Gebiet wurde stufenförmig zu einem Graben abgesenkt, in welchem Tone mit Gehängeschutt und Geröllen von unlöslichen nichtkarbonatischen Gesteinen, überwiegend Hornstein aus den Trias- und Kreide-Schichten, abgelagert wurden. Auf der Anhöhe Gornji Gaj hatte A. Šercelj in dem Ton die Pollen aus dem ältesten Pleistozän bestimmt, welche wahrscheinlich noch in das Oberpliozän reichen (Pleničar & Premru, 1977). In dem Ton und Lehm findet man Zwischenlagen von marmorierten Tonen und sandigen Tonen, welche einen festländischen unkarbonatischen Löss mit einen Ursprung aus der Pannonischen Ebene vorstellen. Zwischen den tonigen Sedimenten werden Tone und Lehme gefunden, die gut abgerundete Gerölle enthalten, welche die Paläoströme von Flüssen markieren. Meistens verlaufen die Ströme rechtwinklig vom Rand zum Grund des tektonischen Grabens.

Ebenso im Oberen Pliozän folgte, in Form eines stufigen Horstes, an dem Störungssystem NO-SW die Hebung des Gorjanci-Gebirges südlich von dem Krško-Einbruchstal. Es folgte die Erosion von Gorjanci und die Sedimentation des tonigen und klastischen Materials in den Krško-Einbruchstal.

Am Ende des Günz-Glazials und im Günz-Mindel-Interglazial wurde an den NO-SW-Störungen ein tektonischer Graben im südwestlichen Teil des Krško-Einbruchstales stufenförmig abgesenkt. Die tonigen Schichten wurden umsedimentiert. In dem Mindel-Riss-Interglazial und danach noch im Riss-Würm-Interglazial wurde das W-O-Störungssystem wieder aktiviert, wobei der Krško-Einbruchstal wieder stufenförmig zu einem tektonischen Graben abgesenkt wurde. In den umsedimentierten tonigen Sedimenten hatte Šercelj (1970) beim Dorf Podbočje einen Pollen-Inhalt aus dem Riss-Würm-Interglazial festgestellt. In den älteren tonigen Sedimenten beim Dorf Zalog westlich von Novo mesto, unter einer sandigen Schicht, zementiert mit Limonit, aber wurden Knochen eines Nashornes Dicerorhinus und Pollen aus dem Riss-Würm-Interglazial gefunden.

Es folgte ein tektonisch relativ ruhiger Zeitabschnitt in dem älteren Würm, welcher auch von der Limonitschicht bei Zalog angezeigt ist.

Mit dem Interstadial Würm II/III hatte der letzte tektonische Zeitabschnitt angefangen (Premru, 1990a, b), in welchen die Störungen verschiedener Richtungen, überwiegend mit Senkungen und weniger mit Hebungen von tektonischen Blöcken, reaktiviert und neu entstanden sind. Ein Netz von aktiven Oberflächen-Störungen, welche aktive Störungszonen bilden, ist entstanden. Das Relief wurde wiederholt umgestaltet. In dem Nordostteil des Einbruchstales wurde, wahrscheinlich im Würm, der Sava-Schotter abgelagert, welcher heute in den Resten der höchsten Schotterterrasse mit Konglomerateinlagerungen erhalten ist. Der Schotter und das Konglomerat sind überwiegend aus Karbonatgeröllen zusammengesetzt. In dem Mittelteil des Einbruchstales wurden tonige Moor-Sedimente mit einer eolischen Komponente abgelagert. In den tonigen Sedimenten von Krakovski gozd hatte Šercelj (nicht veröffentlichte Daten) eine Pollen-Gesellschaft bestimmt, welche auf das Riss-Würm-Interglazial oder wahrscheinlicher auf das jüngste Würm-Interstadial deutet.

Im Holozän hatte der Sava-Fluss den grössten Teil der Würm-Schotterablagerungen erodiert und neue abgelagert. Der Krka-Fluss, dessen ursprünglicher Strom von den Schotterablagerungen in dem tektonischen Graben zwischen den Dörfern Malo Mraševo und Drnovo markiert ist, hatte wegen der tektonischen Verschiebungen im Südteil des Einbruchstales ein epigenetisches Flussbett eingeschnitten, in dem der Fluss noch heute fliesst (Premru, 1976, 1990b; Pleničar & Premru, 1977). Die Umgestaltung des Reliefs wurde in der geschichtlichen Zeit fortgesetzt. Darüber sprechen uns mittelbar die archäologischen und geschichtlichen Quellen, die alten Landkarten und eine alte Graphik, sowie die frischen morphotektonischen Merkmale der aktiven Oberflächen-Störungen und -Klüften, welche mit den seismotektonischen und archäologischen Daten kompariert werden können und derer gegenseitiger Zusammenhang mit Ausrechnungen bewiesen werden kann.

Erdbeben-Herkünfte (seismic sources)

Die Herkünfte der Erdbeben haben wir als aktive Tiefstörungen definiert, deren geographische Position und seismische Wirkungsfähigkeit nach der Methode bestimmt wurde, welche schon publiziert ist (Premru, 1990a).

Im Gebiet des mittelalterlichen Marktes Gutenwerth (slowenisch = Otok) befinden sich die aktiven Tiefstörungen nördlich von dem Markt (Abb. 3). Die aktiven Tiefstörungen haben eine seismische Wirkungsfähigkeit (seismic capability) M_{cap} von 4,8 (+0,4, -0,0) bis 5,6 (+0,1, -0,2) nach Richter. Die grösste seismische Wirkungsfähigkeit des Gebietes beträgt also M_{cap}=5,7. Bei Gutenwerth befindet sich ein Segment der Störungszone, welche in der Richtung WSW-NON von Novo mesto am nordwestlichen Rand des Krško-Einbruchstales zum Orlica-Berg verläuft (Abb. 2).

Im Gebiet des oberen Laufes der Bächer Pendirjevka und Beli potok in dem Gorjanci-Gebirge befinden sich in der Tiefe aktive Störungen mit einer seismischen Wirkungsfähigkeit M_{cap} von 4,8 bis 5,6. Das erwähnte Störungssegment gehört zu der Störungszone, welche von dem epigenetischen Bett des Krka-Flusses in der Richtung gegen SW nach Gorjanci verläuft (Abb. 2).

Im Gebiet des Drnovo-Dorfes befindet sich ein System von Tiefstörungen mit einer seismischen Wirkungsfähigkeit von 5,0 bis 6,2; zwei von den Störungen haben die seismische Wirkungsfähigkeit M_{cap}=6,0±0,2. Die Tiefstörungen sind auf der Oberfläche von einem Netz der Oberflächenstörungen begleitet. Sie bilden zusammen eine Störungszone in der Richtung W-O in dem Nordteil des Krško-Einbruchstales. Nordwestlich von Drnovo schneidet sich die erwähnte Störungszone mit einer NW-SO-Störungszone (Abb. 2).

Unter dem heutigen epigenetischen Bett des Krka-Flusses befindet sich eine Tiefstörung mit der seismischen Wirkungsfähigkeit M_{cap}=6,0±0,1, welche dem Netz von Tief- und Oberflächen-Störungen auf der Südseite des Krško-Einbruchstales zugehört. Die Störungszone verläuft gegen Osten bis nach Brežice, wo in der Tiefe wieder eine Störung mit einer Wirkungsfähigkeit M_{cap}=6,0±0,1 erscheint. In der Störungszone befinden sich auch Störungen mit Wirkungsfähigkeiten von 5,0 bis 5,9 (Abb. 2).

Die erwähnten *aktiven Störungszonen mit den aktivsten Segmenten betrachten wir als die Erdbeben-Herkrünfte, welche auf den tektonischen Zustand und die Relief-Veränderungen einwirken. Die Veränderungen aber geschehen nicht nur mit den Bewegungen wegen der Erdbeben (seismische Bewegungen), sondern auch als Folge von ständigen gleitenden Bewegungen (creeping) an den aktiven Störungen (aseismische Bewegungen).*

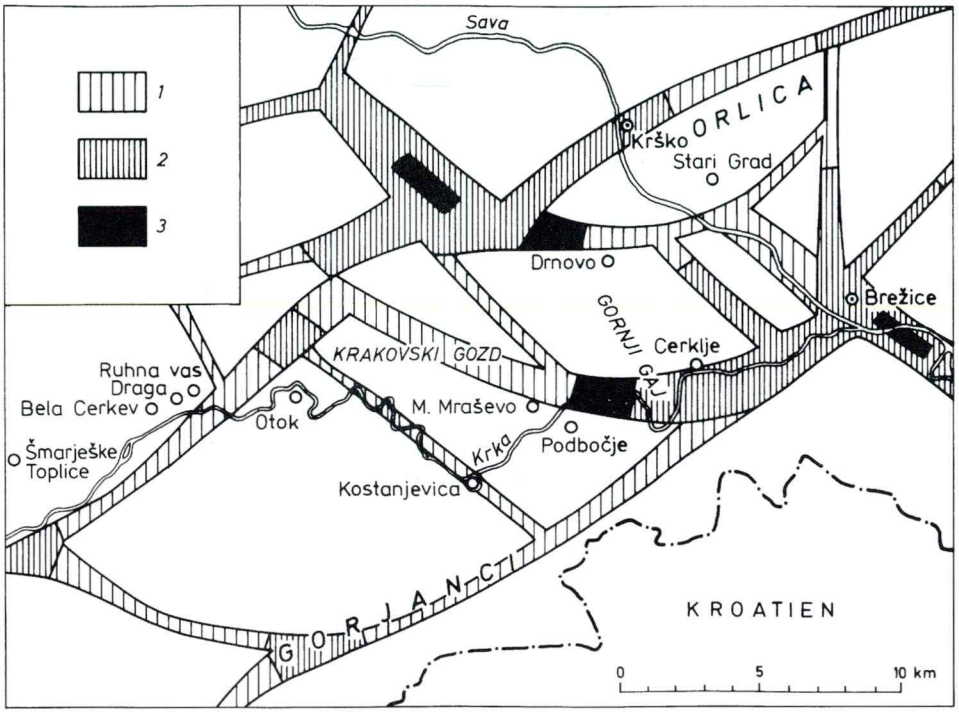


Abb. 2. Bedeutendere aktive Störungszonen im Krško-Einbruchstal mit den seismisch aktivsten Segmenten

1- aktive Störungszone mit seismischer Wirkungsfähigkeit $M_{cap} \leq 5,0$; *2*- Segment mit seismischer Wirkungsfähigkeit $5,0 \leq M_{cap} \leq 5,9$; *3*- Segment mit seismischer Wirkungsfähigkeit $6,0 \leq M_{cap} \leq 6,2$

Sl. 2. Pomembnejše aktivne prelomne cone v Krški udorini s seizmično najaktivnejšimi segmenti

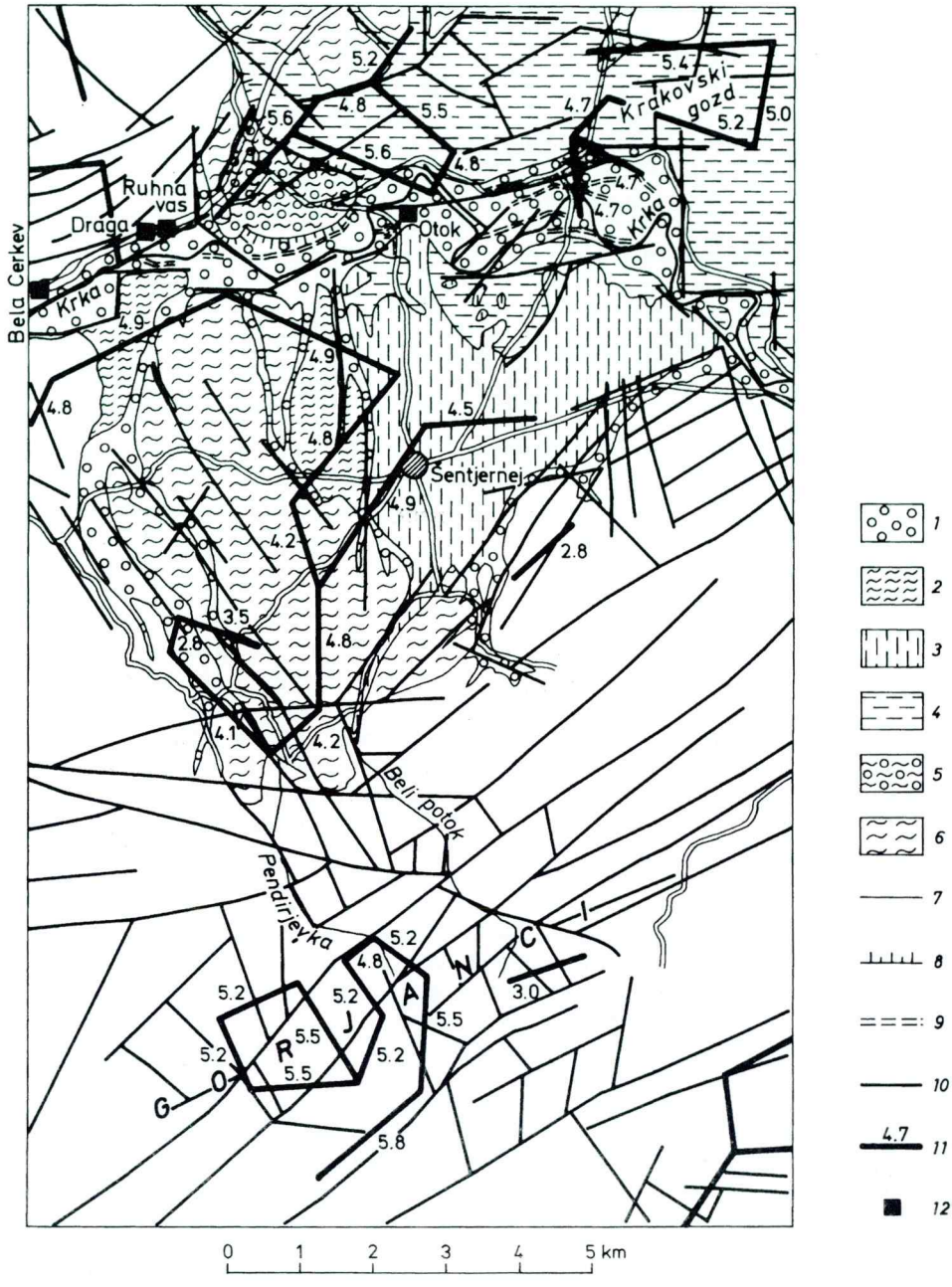
1- aktivna prelomna cona s seizmično zmogljivostjo $M_{cap} \leq 5,0$; *2*- segment s seizmično zmogljivostjo $5,0 \leq M_{cap} \leq 5,9$; *3*- segment s seizmično zmogljivostjo $6,0 \leq M_{cap} \leq 6,2$

Abb. 3. Geologische Skizze der weiteren Umgebung der archäologischen Fundstellen am Krka-Fluss

1- alluviale Sedimente (Holozän); *2*- tonige Sedimente (Holozän); *3*- Schwemmkegel von Šentjernej (Holozän); *4*- sandig-tonige Sedimente von Krakovski gozd (Würm); *5*- toniger Schotter (Pleistozän ?); *6*- Lehm und Ton, örtlich mit Zwischenlagen von tonigen Sand, Schotter und Gehängeschutt (Plioquartär); *7*- geologische Grenze; *8*- Flussterrasse; *9*- altes Flussbett; *10*- aktive Oberflächenstörung; *11*- aktive Tiefstörung mit Angabe von Mittelwerten der seismischen Wirkungsfähigkeit (M_{cap}); *12*- archäologische Fundstellen

Sl. 3. Geološka skica širše okolice arheoloških najdišč ob Krki

1- aluvialni sedimenti (holocen), *2*- glinasti sedimenti (holocen), *3*- šentjernejski vršaj (holocen), *4*- peščeno-glinasti sedimenti Krakovskega gozda (würm), *5*- glinasti prod (pleistocen ?), *6*- ilovica in glina, ponekod z vložki glinastega peska, proda in grušča (pliokvartar), *7*- geološka meja, *8*- rečna terasa, *9*- stare rečne struge, *10*- aktivni površinski prelom, *11*- aktivni globinski prelom z navedbo srednje vrednosti seizmične zmogljivosti (M_{cap}), *12*- arheološka najdišča


Bela Cerkev
Ruhna vas
Draga
Otok
Krka
Krakovski gozd
Sentjernej
Beli potok
Pendirjevka
5.2
5.4
5.6
4.8
5.5
4.7
5.0
4.9
4.5
2.8
3.5
4.2
4.1
3.0
5.8
R
O
G
J
A
N
C
I
0 1 2 3 4 5 km
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Aktive Oberflächen-Störungen bei dem Brežice-Erdbeben am 29. 1. 1917

Das letzte grössere Erdbeben in dem Krško-Einbruchstal ist am 17. Jänner 1917 geschehen und hatte nach den Daten des Ljubljana-Observatoriums eine Magnitude 5,6, bzw. 5,7 nach den Angaben des Observatoriums von Zagreb (Ribarič, 1982). Über das Erdbeben gab der Grazer Geologe Tornquist (1918) einen ausführlichen Bericht. Die aktiven Oberflächenstörungen hatte er nach den schlimmsten Beschädigungen verschiedener Objekte auf Grund der Gegenrichtung des Drehmomentes, welches vom Erdbeben ausgelöst wurde, und nach den geologischen Geländebesichtigungen bestimmt. Weil das Gelände damals von Schnee bedeckt war, konnte er die seismischen Klüfte und Störungen nicht unmittelbar registrieren. Er hatte die geologischen Verhältnisse nur für die entblössten Steinbrüche und die wenigen Einschnitte ohne Schnee eingehender beobachtet und beschrieben.

Tornquist hatte die folgenden aktiven Störungen, d.i. die Störungen, welche von dem Brežice-Erdbeben aktiviert wurden, festgestellt und wie folgt benannt:

1. Störung von Rann,
2. Störung von Prilipe und
3. Störung von Malenze.

Im folgenden Text werden die folgenden Benennungen für die gleichen Störungen verwendet:

1. Brežice-Störung,
2. Prilipe-Störung und
3. Malence-Störung.

Der östliche Block an der Brežice- und der Prilipe-Störung hatte ein linksseitiges, der westliche Block aber ein rechtseitiges Drehmoment. Die erwähnten Störungen hatte Tornquist als "aktive oder lebende Störungen" bezeichnet und dass es "erkannt worden ist, an der das Ranner Erdbeben vom 29. Jänner 1917 ausgelöst wurden". An diesen Störungen waren die schlimmsten Beschädigungen von Objekten in einem Gürtel von etwa 100 m zu beobachten. Die Störungen verlaufen durch die mesozoischen Gesteine am Rand des Einbruchstales, in den plioquartären tonigen Sedimenten und im Holozän-Schotter. Die Aktivität der Prilipe-Störung endete beim Dorf Prilipe mit einer Flexur-Verbiegung der Schichten. Tornquist fand die Fortsetzung dieser Störung noch weiter gegen Südosten.

Den Verlauf aller drei aktiven Störungen haben wir mit der Analyse von Luftaufnahmen überprüft. Auf den Luftaufnahmen konnten auf Grund von morphologischen Merkmalen die Trassen aller drei Störungen bestimmt werden. Nach den gleichen Kriterien wurde noch ein Netz von aktiven Störungen gefunden, welche in aktive Störungszonen verbunden werden können. Sie mussten bei den seismischen und aseismischen Bewegungen entstanden sein.

Auf der Luftaufnahme und der topographischen Karte ist ein Unterschied in der Form des Flussbettes und der Breite des Krka-Flusses westlich und östlich von der Stelle gut sichtbar, wo die Malence-Störung den Fluss schneidet (Abb. 4). Westlich von diese Stelle ist das Flussbett enger und tiefer. Die Abhänge steigen sofort über dem Wasserniveau – offensichtliche Merkmale, dass es sich um eine vertikale Flusserosion handelt. Östlich von der Störung wird das Flussbett breiter. Die Abhänge steigen in sanfter Neigung vom Wasserniveau. Das angeschwemmte Material bildet kleinere Flussinseln. Es ist offensichtlich, dass der Fluss hier das Material anschwemmt. Das Gebiet westlich von der Störung, wo der Fluss erodiert, zeigt eine klare tektonische Hebung, das Gebiet östlich von der Störung, wo der Fluss akku-

muliert, aber eine tektonische Senkung.

Die photogeologische Analyse zeigte, dass sich die Brežice-Störung nicht kontinuierlich in die Prilipe-Störung fortsetzt. Die beiden Störungen sind getrennt und gegenseitig verschoben. Das stimmt mit der Angabe von Tornquist überein, dass die beiden Brücken, eine über den Sava- und die andere über den Krka-Fluss, fast unbeschädigt geblieben sind. Die beiden Brücken liegen im Gebiet, wo die beiden Störungen unterbrochen sind. Die photogeologische Analyse zeigt auch, dass die Brežice-Störung aus einen System von N-S- und NW-SO-Störungen zusammengesetzt ist. Die Trasse beider Störungen zeigt nach Tornquist die Mittellinie des erwähnten Störungssystemes (Abb. 4), wogegen die Trasse der Malence-Störung mit der Tornquist-Trasse völlig übereinstimmt.

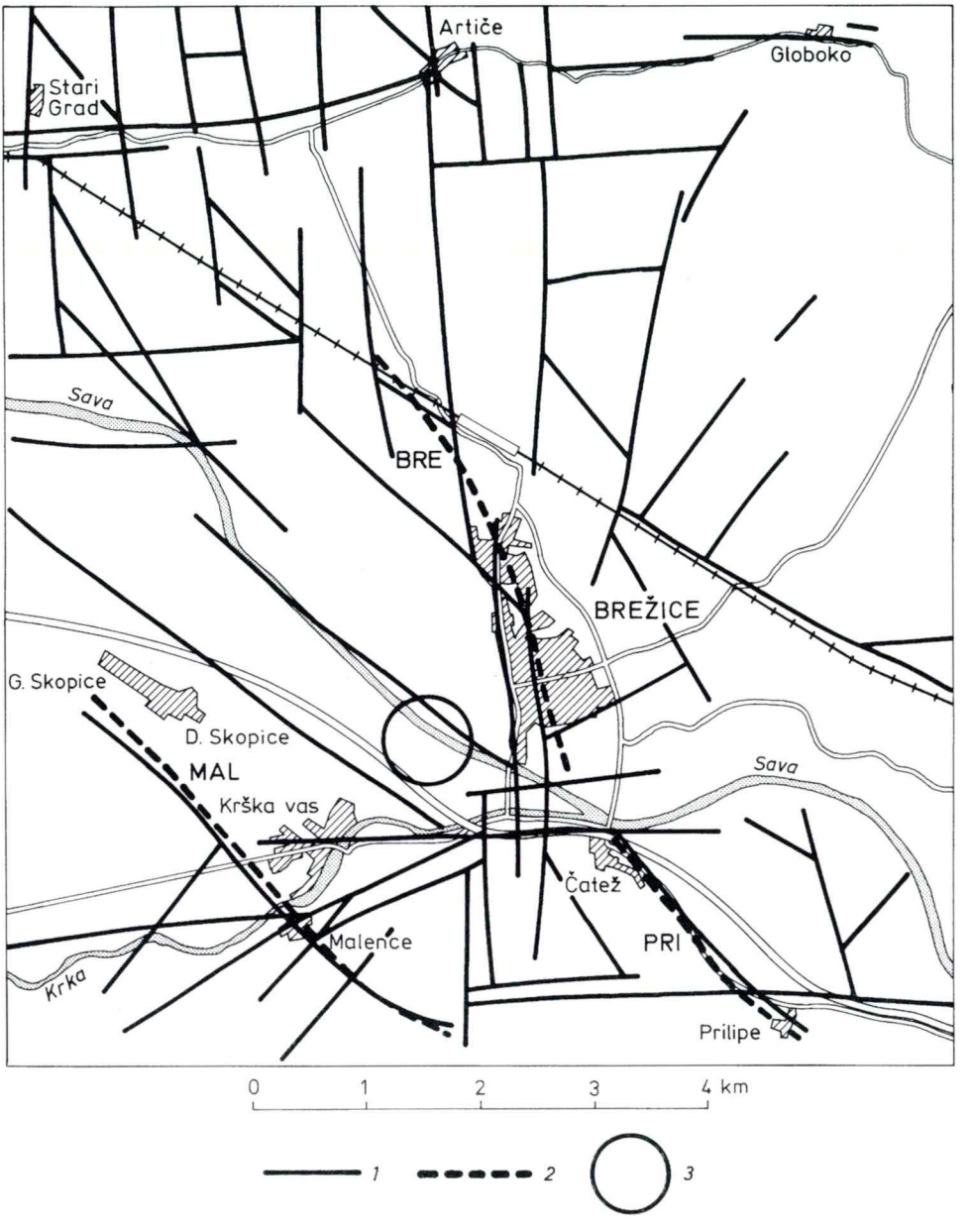
Morphotektonische Merkmale der aktiven Oberflächen-Störungen

Die aktiven Oberflächenstörungen zeigen sich im Relief mit morphotektonischen Merkmalen, welche mit der Analyse von Luft- und Satelliten-Aufnahmen identifiziert werden können (Cluf et al., 1982).

Im Gebiet des Krško-Einbruchstales und dessen Randes sind kennzeichnende morphotektonische Merkmale der aktiven Störungstektonik sichtbar. An den Störungen ist es zu vertikalen und horizontalen Bewegungen gekommen, sei es bei den Erdbeben (seismische Bewegungen), sei es durch Bewegungen mit ständigen Gleitungen (creeping) ohne Erdbeben (aseismische Bewegungen), so wie das in verschiedenen seismogenen Gebieten bewiesen wurde (Kasahara, 1981; Aki, 1992). Die seismischen Bewegungen können nicht von den aseismischen unterschieden werden (Swanson, 1992). Die aseismischen Bewegungen kommen auch in Gebieten vor, wo es keine Erdbeben gibt (Ellenberg, 1992).

Mit Bezug auf den Relieftyp, welcher von der geologischen Grundlage abhängig ist, wurden im Gebiet des Krško-Einbruchstales mit Umrandung verschiedene geomorphologische Merkmale von aktiven Oberflächenstörungen identifiziert. In dem Karstrelief und dem Fluvio-Denudationsrelief sind die aktiven Störungen markiert durch: steile und gerade Stufen und Escarpemente mit frischen Kanten, tektonische Terrassen, gut erhaltene Facetten, gerade verlaufende Abschnitte von V-Tälern, scharfe knieförmige Windungen von Wasserläufen und trockenen Gräben, Übernahmen des Flusslaufes des Hauptflusses von dem Nebenfluss, Epigenie und Piraterie. In dem fluvio-akkumulativen Relief, welches die grösste Oberfläche des Krško-Einbruchstales umfasst, sind die Trassen der aktiven Störungen markiert durch: unnormale Mäandrierungen und längere gerade Abschnitte von Flüssen, der Fluss-Paläoläufe und der trockenen Flussbette (die normalen Mäandrierungen sind sinusinuidal, d.s. die Mäandrierungen ohne tektonischer Einflüsse), sowie durch die Terrassen-Diskordanz, die niedrigen Antiformen und Synfomen in die Aluvialebene, Pseudoepigenie und Epigenie. In den tonigen Sedimenten sind die aktiven Störungen markiert durch: flache und gerade verlaufende Gräben, sowie gerade verlaufende niedere Terrassen, weniger häufig auch durch doppelt knieförmige Windungen der Wasserläufe, durch rechtwinklig verbogene parallele Wasserläufe in gleicher Linie und durch längere gerade verlaufende Wasserläufe, sowie deren plötzliche scharfe Biegungen. Eine aktive Störung kann auch durch Reihen von Mäandren alter Flussläufe markiert sein, welche in einer gleichen Linie abbiegen.

Gerade Abschnitte, gewöhnlich Escarpemente, an der Grenze des fluvio-akkumu-


Artiče
Globoko
Stari Grad
Sava
BRE
BREŽICE
G. Skopice
D. Skopice
MAL
Krška vas
Sava
Čatež
Malence
PRI
Krka
Prilipe
0 1 2 3 4 km
1
2
3

lativen Reliefs des Einbruchstales mit der Umrandung, sind ebenso gute geomorphologische Merkmale der rezenten tektonischen Aktivität.

Verlegungen des Sava-Flusslaufes

Die Flussströme in aluvialen Ebenen sind sehr empfindliche Merkmale der rezenten tektonischen Aktivität. Relativ abgesenkte oder gehobene Teile einer Ebene können schon bei einer verhältnismässig kleiner Bewegung verursachen: Verlegungen von Flussbetten, unnormale Mäandrierungen, plötzliche knieförmige Veränderungen der Flussströme, Anstauungen und Überflutungen, sowie lange gerade Abschnitte der Flussläufe. Die Vielzahl solcher Veränderungen zeigt uns die rezente tektonische Aktivität an. Alle diese Veränderungen können auf den Luftaufnahmen mit der Photointerpretation, in den syngenetischen Sedimenten aber mit geologischen Methoden, die jüngsten aber auf Grund der archäologischen Daten, der alten topographischen Karten und der alten Abbildungen identifiziert werden. An bestimmten Beispielen, wo eine Kombination mehrerer Methoden möglich ist, müssen die Daten miteinander übereinstimmen.

Die rezente Störungsaktivität, welche solche Veränderungen verursacht hatte, ist auf aseismische und seismische Bewegungen gebunden. Die beiden Bewegungsarten können mit den modernen genauen geodätischen Messungen überprüft werden. Für die seismischen Bewegungen an Störungen aus der geschichtlichen Zeit ist eine Korrelation mit den seismischen Parametern notwendig, welche aus den geschichtlichen Erdbeben und den Seismogrammen ausgerechnet wurden.

Beispiele von Verlegungen der Flussläufe wegen der tektonischen Aktivitäten sind auch in dem Krško-Einbruchstal evident. Zwischen Krško und dem Dorf Drnovo ist noch heute ein trockenes Sava-Flussbett sichtbar, welches von Krško gegen Süden und vor Drnovo mit einem Mäander gegen Nordosten abbiegt. Bei Drnovo sind *Überreste eines römischen Flusshafens Neviodunum aus dem 1. bis 4. Jahrh. nach Chr. erhalten* (SAZU, 1975). Das trockene Flussbett ist in der Natur und auf dem Luftbild gut sichtbar. Der Abhang der alten Schotterterrasse ist von 5 bis 6 m hoch.

Die Ausgrabungen von Neviodunum, das an der römischen Strasse Emona (Ljubljana) – Siscia (Sisak) gelegen war, haben gezeigt, dass die Siedlung schon in der Laten-Zeit (10. Jahrh. vor Chr.) bestanden hatte. Die Funde aus der Bronze-Zeit (SAZU, 1975; Valič, 1994) zeigen, dass die Siedlung noch älter ist (14. Jahrh. vor Chr.) (Valič, 1994). Die römischen Quellen benennen die Siedlung als das keltische Opidum Neviodunum, welche sich nach der römischen Besatzung zu dem Munizipium Flavium Latobicorum Neviodunum entwickelt hatte.

Auf Grund der archäologischen Daten wird geschlossen, dass zwischen dem

Abb. 4. Aktive Oberflächenstörungen im Gebiet von Brežice

1- aktive Oberflächenstörungen bestimmt nach den morphotektonischen Kriterien, teils mit geologischer Kartierung; *2*- aktive Oberflächenstörungen bei dem Erdbeben vom 29. 1. 1917 nach Tornquist (1918): BRE- Brežice-(Rann-) Störung; PRI- Prilipe-Störung; MAL- Malence-(Malenze-)Störung; *3*- Epizentrum des Erdbebens vom 29. 1. 1917 nach Tornqiust (1918)

Sl. 4. Površinski aktivni prelomi na področju Brežic

1- površinski aktivni prelomi določeni po morfotektonskih kriterijih, delno tudi z geološkim kartiranjem; *2*- površinski aktivni prelomi pri potresu 29. 1. 1917 po Tornquistu (1918): BRE- Brežiški prelom; PRI- Prilipski prelom; MAL- Malenški prelom; *3*- epicenter potresa 29. 1. 1917 po Tornquistu (1918)

älteren Holozän und der Bronze-Zeit das Gebiet zwischen Krško und Drnovo abgesenkt wurde, was eine Veränderung des Sava-Flusslaufes verursacht hatte. Am Ende des 19. Jahrhunderts und am Anfang des 20. Jahrh., als das künstliche Flussbett noch nicht ausgegraben wurde, floss der Sava-Fluss etwa 4 km weiter östlich (Abb. 5).

Abb. 5. Topographische Karte aus dem Jahr 1909
Sl. 5. Topografska karta iz leta 1909

Aus den Daten über die Grösse der vertikalen Bewegung (H) und des Zeitabschnittes, in welchem diese Bewegung entstanden ist (t), kann die Geschwindigkeit der vertikalen Bodenbewegungen ausgerechnet werden, nach der Formel:

$$S = H/t \quad (1)$$

Bei der Absenkung um etwa 5 bis 6 m, worauf die Höhe der erhaltenen alten Terrasse bei Drnovo hinweist, beträgt im Zeitabschnitt zwischen dem Anfang von Holozän (vor 10.000 Jahren, bzw. etwa 8.000 Jahre vor Chr.) und der mittleren Bronze-Zeit (14. Jahrh. vor Chr.) die vertikale Bodenbewegung von 0,000697 bis 0,000909 m/Jahr. Für die Ausrechnung der vertikalen Bodenbewegung wurden die Daten aus der Tabelle 1 berücksichtigt.

Tabelle 1. Vertikale Bodenbewegungen bei Drnovo im Zeitabschnit zwischen dem Anfang des Holozän und der Bronze-Zeit

Tabela 1. Hitrosti vertikalnih premikov pri Drnovem med začetkom holocena in bronasto dobo

Zeitabschnitt	t (Jahre)	H (m)	S (m/Jahr)
8.000–1.400 Jahre vor Chr.	6.600	5	$7,57\times10^{-4}$
		6	$9,09\times10^{-4}$
10.000–1.400 Jahre vor Chr.	8.600	5	$7,57\times10^{-4}$
		6	$6,97\times10^{-4}$

t- Zeit; H- vertikale Bewegung; S- vertikale Bodenbewegung (slip rate)

Eine Ausscheidung des Anteiles der vertikalen tektonischen Verschiebung von dem Anteil der Erosion in der Terrassenhöhe (H) ist nicht notwendig, weil der Unterschied der S-Werte minimal ist und ist im Bereich der Fehler, welche bei der Bestimmung des Zeitabschnittes (t) und der Terrassenhöhe (H) entstehen.

Im Gebiet östlich des Flusslaufes vor der Bronze-Zeit und dem jüngsten natürlichen Flusslauf sind mehrere alte Flussbetten und Mäandren erhalten. Das östlichst liegende alte Sava-Flussbett verläuft von Krško zuerst in der Richtung gegen SO, dann aber gegen O in der Länge von etwa 6 km, wonach es bei Stari Grad rechtwinklig gegen Süden abbiegt. Auch dieses Mäander ist tektonisch bedingt und musste nach der römischen Zeit entstanden sein. Aus alten Karten ist ersichtlich, dass der Sava-Fluss hier im 17. Jahrh. (Abb. 5) geflossen hatte. Die Terrasse ist etwa 1,5 m hoch; das bedeutet etwa 1,5 m Absenkung in dem Zeitabschnitt von 1.400 Jahren. Die vertikale Bodenbewegung, ausgerechnet nach der Formel (1) beträgt:

$$S = 1,07 \times 10^{-3} \text{m/Jahr}$$

Die alten Betten und Mäandren des Sava-Flusses sind auf den Luftbildern gut sichtbar. Bei Drnovo befinden sich in der Tiefe aktive Störungen mit einer seismischen Wirkungsfähigkeit $M_{cap}=6,0\pm0,2$ (Abb. 2). Die tektonischen Verschiebungen können überwiegend den seismischen, untergeordnet den aseismischen Bewegungen zugeschrieben werden.

Von Bedeutung ist auch *das Kupferstichbild von Brežice (deutsch: Rann, im 17. Jahrh.: Rhain) aus der Vischer'schen Topographiae ducatus Stiriae aus dem Jahr 1689* (Vischer, 1689). Auf dem Abbildung 6 ist klar zu ersehen, dass der Sava-Fluss damals unter der Terrasse geflossen hatte, auf welcher die Stadt Brežice liegt. Auch auf dem Luftbild ist das alte Flussbett gut sichtbar. Das letzte natürliche Flussbett des Sava-Flusses fliesst etwa 0,5 km weiter gegen Westen. Vor dem Jahr 1689 musste der Sava-Fluss, wegen der relativen Absenkung des Gebietes unter der Brežice-Terrasse an einer N-S-Störung, aus der ursprünglichen Richtung NW-SO in die Richtung W-O, und dann an einer Störung noch in die Richtung N-S umschwenken. Die morphotektonischen Merkmale zeigen eindeutig auf eine Störung. Dieses Gebiet ist nach der Lage des Epizentrums des Brežice-Erdbebens aus dem Jahr 1917 bekannt. In der Tiefe befinden sich aktive Störungen mit einer seismischen Wirkungsfähigkeit $M_{cap}=6,0\pm0,1$ (Abb. 2 und 4).

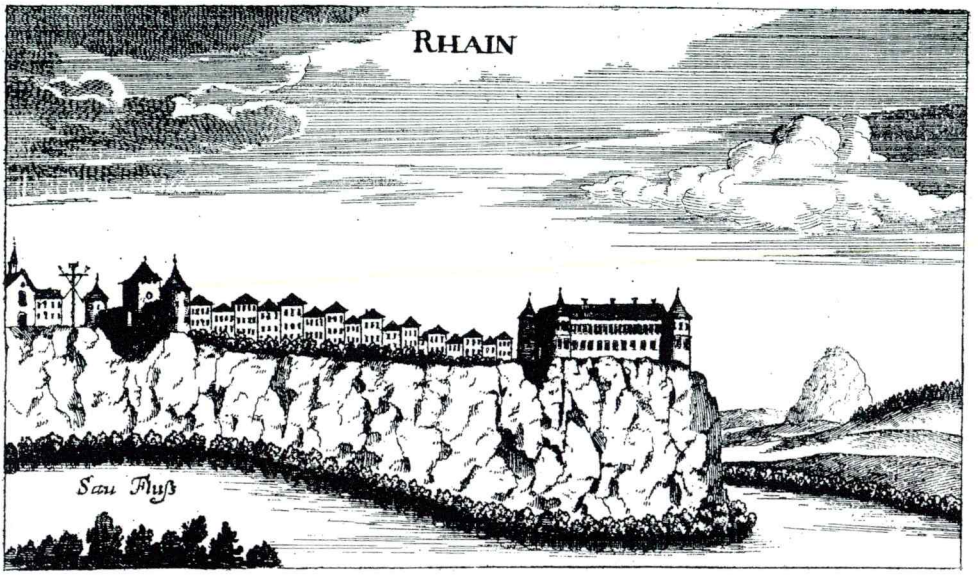


Abb. 6. Bild von Brežice (deutsch: Rann, im 17. Jahrh.: Rhain) nach Vischer aus dem Jahr 1689
Sl. 6. Vischerjeva slika Brežic (nemško Rhain v 17. st.) iz leta 1689

Beweise über die Verlegungen des Sava-Flusslaufes haben wir auch auf den topographischen Karten aus der Zeit der Österreichischen bzw. Österreichisch-Ungarischen Monarchie (Abb. 5 und 7). Aus den Karten ist ersichtlich, dass der Sava-Fluss sein Flussbett in dem weiteren Gebiet der holozänen Schotterablagerungen des Feldes von Krško und Brežice mehrfach verlagert hatte. Alle Flussbetten, welche auf den alten topographischen Karten dargestellt sind, wurden auf den Luftbilden identifiziert. Die Analyse von Luftbildern zeigt ein vollständigeres Bild über alle Phasen dieser Flussverlegungen. Die Daten aus den alten topographischen Karten können für die Datierung dieser Verlegungen dienen.

Die grossen Flusstrom-Verlegungen des Sava-Flusses sind also in der geschichtlichen Zeit entstanden und zeigen indirekt auf eine lebhafte tektonische Aktivität zwischen Krško und Brežice.

Verlegungen des Krka-Flusslaufes

Für die Verlegungen des Krka-Flusslaufes in der geschichtlichen Zeit bestehen geologische, geomorphologische und archäologische Beweise.

Zwischen den Dörfern Malo Mraševo und Drnovo verläuft ein etwa 1 km breiter Gürtel von Schotterablagerungen, welche auf einen tektonischen Graben zwischen zwei Störungen in der Richtung NO-SW gebunden sind (Abb. 1). Die Schotterablagerungen liegen auf den tonig-sandigen See- und Moor-Sedimenten des Gebietes von Krakovski gozd, welche nach den Analysendaten von Šercelj (unveröffentlichte Daten) in dem Riss-Würm-Interglazial oder wahrscheinlicher in dem jüngsten

Abb. 7. Josephinische Militärlandesaufnahme aus der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts
Sl. 7. Jožefinska vojaška karta iz 2. polovice 18. stoletja

Würm-Stadial entstanden sind. Die Schotterablagerungen, welche auf diesen Tonen liegen, haben also ein Post-Würm- d.h. ein Holozän-Alter. Dass diese Sedimente gleich alt als die Sava-Schotterablagerungen sind, bestätigen auch die häufigen Deltaschichten und der Verlauf der alten Schotterstromlinien (Abb. 11), welche auf die Luftbildern gut ersichtlich sind. Auch die sedimentologischen Analysen zeigen auf Unterschiede des Kornaufbaues und der Geröllzusammensetzung der beiden Schotter (Pleničar & Premru, 1977).

Die sedimentologischen Schotter-Analysen, das häufige Vorkommen von Deltaschichten an der Grenze beider Schotter, sowie die Analyse von neotektonischen Störungsystemen haben gezeigt, dass der Schotter zwischen Malo Mraševo und Drnovo wahrscheinlich einem alten fossilen Lauf des Krka-Flusses, weniger wahrscheinlich des Sava-Flusses zugehört, wegen des evidenten Unterschiedes in der Zusammensetzung und der Korngrösse, sowie der Abrundung der Gerölle. Ausserdem stellt der heutige Lauf des Krka-Flusses zwischen Malo Mraševo und Cerklje am Südrand des Krško-Einbruchstales eine Epigenie vor, der fossile Flusslauf aber stellt den ursprünglichen Lauf vor der Entstehung der Epigenie vor. Dass der heutige epigenetische Lauf des Krka-Flusses jünger ist, beweisen auch die Thermalquellen an den Störungen, welche eine Störungszone bilden, in welcher sich der Krka-Fluss die neue Flussrinne durchbrochen hatte.

Ohne Rücksicht, ob zu dem Sava- oder dem Krka-Fluss der Schotter zwischen

Malo Mraševo und Drnovo gehört, zeigt das Übergiessen des Flusses auf eine starke tektonische Aktivität in der Post-Würm-, bzw. der Holozän-Zeit; das aber ist der Zeitabschnitt der jüngsten Neotektonik, bzw. der aktiven Tektonik.

Auf Grund von recht zahlreichen archäologischen Funden an dem neuen epigenetischen Flussbett des Krka-Flusses (SAZU, 1975) kann geschlossen werden, dass der Krka-Fluss durch die heutige Rinne schon in der Halstatt-Zeit, d.i. etwa im 9. Jahrh. vor Chr. geflossen hatte. An dem alten Krka-Flussbett wurden keine Siedlungen aus der geschichtlichen Zeit gefunden, was die Feststellung verstärkt, dass das epigenetische Bett des Krka-Flusses vor dem 9. Jahrh. vor Chr. entstanden ist.

Auf Grund der bekannten Höhenunterschiede in dem tektonischen Graben und seinen Flügeln zwischen Malo Mraševo und Drnovo, sowie der Daten über die Mächtigkeit der Schotter-Aufschüttung und des Zeitabschnittes als der Graben entstanden ist, könnte man die vertikalen Bodenbewegungen ausrechnen. Der vertikale Unterschied zwischen den Blöcken auf beiden Seiten der Störung beträgt etwa 0,4 m; die Mächtigkeit der Schotterschüttung aber ist nicht bekannt. Der tektonische Graben ist im Zeitraum zwischen dem Anfang von Holozän (vor 10.000 Jahren) und dem Anfang der Urnen-Gräber-Zeit (12. Jahrh. vor Chr.) entstanden. Wegen der unbekannten Schottermächtigkeit ist es nicht möglich die vertikalen Bodenbewegung auszurechnen.

Das epigenetische Bett des Krka-Flusses ist in der Halstatt-Zeit (900 Jahre vor Chr.) entstanden. Die vertikale Bewegung zeigt uns die 4 m hohe Terrasse an. Aus diesen Angaben ausgerechnete vertikale Bodenbewegung beträgt:

$$S = 1{,}3\times10^{-3}\text{m/Jahr.}$$

Auf Grund der seismotektonischen Analyse kann geschlossen werden, dass sich in dem Gebiet des fossilen Krka-Flussbettes und im Gebiet der Epigenie aktive Tiefstörungen befinden, welche zu seismotektonischen Gebieten mit höchster seismischer Wirkungsfähigkeit gehören, mit einer grösst möglichen Magnitude $M_{cap}=6{,}0\pm0{,}1$, bzw. $M_{cap}=6{,}0\pm0{,}2$ in dem Krško-Einbruchstal.

Über die Verlegung des Krka-Flussbettes zwischen den Dörfern Bela Cerkev und Ruhna vas stehen ebenso archäologische Daten zur Verfügung. Von den Archäologen wurden die Reste eines römischen Hafens, einer Brücke und einer römischen Strasse ausgegraben. *Westlich von Bela Cerkev wurden Quadersteine und Steintreppen gefunden*, für welche der Archäologe V. Šribar meint, dass sie *Überreste eines Flusshafens aus der römischen Zeit vorstellen* (Abb. 3). Der Boden aus der Römerzeit befindet sich 2,5 m unter der heutigen Oberfläche. Aus den Angaben über das Alter (2. Jahrh. bis heute) und der Schichtenmächtigkeit, welche ungefähr der Mächtigkeit der Absenkung des Gebietes entspricht, können die vertikalen Bodenbewegungen ausgerechnet werden:

$$S = 1{,}3\times10^{-3}\text{m/Jahr.}$$

Bei Bela Cerkev befinden sich auch Überreste einer römischen Brücke aus dem 2. Jahrh. nach Chr. Heute fliesst der Krka-Fluss etwa 180 m weiter südlicher. Die beiden archäologischen Objekte, die Überreste der Brücke und des Hafens, wurden auf den damaligen Flussufern errichtet, worauf die Flussedimentation von Sand und Feinschluff hinweist. Das Pflaster des römischen Hafens liegt in der Tiefe bis 1 m unter der heutigen Oberfläche (SAZU, 1975; Šribar & Stare, 1977).

Die Verlegung des Krka-Flusses bei Bela Cerkev wird mit einer tektonischen Aktivität nach der Römerzeit erklärt. Auf den Luftbildern können im Gebiet von Bela Cerkev aktive Oberflächenstörungen identifiziert werden, welche von Escarpementen und tektonischen Terrassen im Raum zwischen der fluvio-akkumulativen Ebene und den Tertiärgesteinen der Umrandung des Krško-Einbruchstales markiert sind. Der gerade Abschnitt des Krka-Flusses, parallel zu den Störungen in der Tertiär-Umrandung, ist tektonisch bedingt. Mit Bezug auf die archäologischen Daten erfolgte die tektonische Aktivität nach dem 2. Jahrh. nach Chr.

Bei dem Dorf Draga *fanden die Archäologen unter 1 m mächtigen Sedimenten zwei Niveaus einer römischen Strasse, mit einer älteren und jüngeren Überschüttung aus der Hälfte des 2. Jahrh. nach Chr.* Das untere Strassenniveau gehört zu der Magistralstrasse von Antonius Pius und Septimus Severus, das obere Niveau aber der Strasse von Septimus Severus, welche Emona (Ljubljana) mit Siscia (Sisak) verbunden hatten. Beide Strassenniveaus sind von 1 m mächtigen Sedimenten überschüttet, welche in zwei plötztlichen katastrophalen Erdrutschen, wahrscheinlich im 2. und 3. Jahrh. entstanden sind. Das Material entspringt von den Abhängen das Hügelgebietes von Vinji vrh. Auf den Abhängen oberhalb der römischen Strasse wurden Gräber mit ungleich mächtigen Deckschichten gefunden. Das bedeutet, dass das Material, welches von den Abhängen des Vinji vrh in die Ebene versetzt wurde und die Römer-Strasse verschüttet hatte, aus diesem Gebiet herkommt. Diese Abhänge sind noch heute von Erdrutschen gekennzeichnet. Auch die Verlagerung des Krka-Flussbettes gegen Süden wegen der Aufschüttung mit diesem Material ist damit dokumentiert (Šribar & Stare, 1977).

Auch *beim Dorf Ruhna vas wurden zwei übereinander liegende Niveaus der gleichen römischen Strasse* ausgegraben. Zwischen den beiden Niveaus liegen 0,8 bis 1 m mächtige Sedimente. Obgleich die beiden Fundstellen bei Draga und Ruhna vas einander sehr nahe sind und die Fundstelle bei Draga einige Meter tiefer liegt, aber sind die Lehmschichten fast gleich mächtig (Šribar & Stare, 1977). Der Unterschied der geographischen Höhen des gleichen archäologischen Profils mit zwei Strassenniveaus bei Draga und Ruhna vas ist nach der Meinung der Archäologen nicht von einer Strassensteile verursacht. Der Höhenunterschied der verschobenen Strassenniveaus beweist starke plötzliche vertikale tektonische Bewegungen, welche bei einen Erdbeben nach der Römerzeit entstanden sind, in dem Zeitabschnitt als die Strasse nicht mehr erneuert wurde. Die Archäologen geben aber leider nicht an, wie gross der Höhenunterschied der Niveaus ist. Das wären wertvolle Daten für eine Ausrechnung der vertikalen Bewegungen an der Störung.

Die plötzlichen Abrutschungen von grossen Massen der Tertiärsedimente von Vinji vrh in einer Länge von etwa 3 km zwischen Bela Cerkev und Ruhna vas zeigen, dass die Hauptursache für diese Erscheinung eine Erdbebenaktivität und nicht nur der Regen gewesen sein musste.

Die Gebiete von Bela Cerkev, Draga und Ruhna vas liegen im Einflussbereich der selben Tiefstörungen mit der seismischen Wirkungsfähigkeit M_{cap} bis 5,7 als der mittelalterliche Markt Gutenwerth.

Katastrophen im Gebiet der archäologischen Fundstelle des mittelalterlichen Marktes Gutenwerth

Die archäologischen Ausgrabungen (Šribar & Stare, 1977) im Gebiet von Gutenwerth ergaben zahlreiche Daten über die Veränderungen des Krka-Flusslaufes und die Veränderungen der Reliefkonfiguration in der Antike und in der mittelalterlichen Zeit.

Der slowenische Name für die Siedlung Gutenwerth war Otok (=Insel), weil sie auf einer Insel in der Mitte des Krka-Flusses gelegen war. Der Name des umliegendes Brachlandes ist noch heute erhalten geblieben, obgleich die mittelalterliche Siedlung schon Ende des 15. Jahrhunderts verfallen ist und das Gebiet nicht mehr auf einer Insel liegt.

Nach den geschichtlichen Angaben (Enciklopedija Slovenije, 1994) wird die Siedlung nach den schriflichen Quellen als das Forum Gutenwerte erstmals im Jahr 1251 erwähnt. Der Markt hatte sich in dem 12. Jahrh. stärker entwickelt. Im 13. Jahrh. ist der Markt eines von den Verwaltunszentren der Besitze des Freisinger Klosters aus Bayern in dem Herzogtum Krain geworden, mit eigener Verwaltung und einem eigenen Richter. In dem Markt war auch eine Geldschmiede und ein Pfarresitz. Den Entwicklungshöhepunkt hatte der Markt im 14. Jahrh. erreicht als er ein regional bedeutendes Handelszentrum geworden ist, mit entwickelten Eisenhütten, Töpfereien, Pelzereien, Frachtfuhrwesen, Schiffrachtwesen, Fischerei und der Landwirtschaft. Der Markt wurde angeblich im Jahr 1473 von den Türken niedergebrannt.

In den Jahren 1967 bis 1984 wurden die archäologischen Ausgrabungen durchgeführt, welche auch interessante Daten über die Katastrophen im Gebiet von Gutenwerth, über die Reliefentwicklung und die Veränderungen des Krka-Flusslaufes von der römischen Zeit bis heute ergeben haben.

Nach den Angaben der archäologischen Ausgrabungen hatte in der Römerzeit der Krka-Fluss in Form von Mäandren von der heutigen Mündung des Baches Šentjernejski potok am Dorf Drama vorbei und weiter in der Richtung des Baches Mihovica geflossen. Im Gebiet von Gutenwerth hatte sich der rechtsseitige Lauf des Krka-Flusses nicht verändert (Abb. 8). Der linksseitige Flusslauf aber erlebte in der römischen und der mittelalterlichen Zeit mehrere Veränderungen. An dem linken Flussufer verbreiten sich drei bis vier Mal nacheinander Flussterrassen gegen Norden und gegen Westen. Das Flussbett war von 50 bis 80 m breit (Šribar & Stare, 1977). Im weiteren Gebiet von Otok sind noch heute Überreste von alten Flussbetten und Mäandren erhalten, welche man im Gelände, auf den topographischen Spezialkarten und auf den Luftbildern beobachten kann.

Im Mittelalter hatte sich der Krka-Fluss ein neues Strombett gegen Norden durchbrochen und das alte Mäander verlassen, welches in der Zeit des spätmittelalterlichen Marktes Gutenwerth als ein Flusshafen gedient hatte (Abb. 8). An der Stelle, wo der römische Flusshafen gewesen ist, das aber ist mehr östlich von dem Mittelalter-Hafen, ist eine Bodenfläche aus der Römerzeit in der Tiefe von 1,10 m erhalten. Zwischen der römischen und mittelalterlichen Bodenfläche aus dem 11. Jahrh. liegen 0,65 m mächtige Fluss-Ablagerungen.

Über die *Katastrophen im Gebiet des Gutenwerth-Marktes im Mittelalter* wurde festgestellt, dass am Übergang vom 11. zum 12. Jahrh. die hölzerne Siedlung abgebrannt wurde, worauf die Schicht eines braunrötlichen verbrannten Lehmes hinweist, und danach in einer einmaligen Katastrophe überflutet wurde. Der Überflutungslehm ist etwa 15 cm mächtig. Vom 11. Jahrh. bis zum Ende des Bestehens von

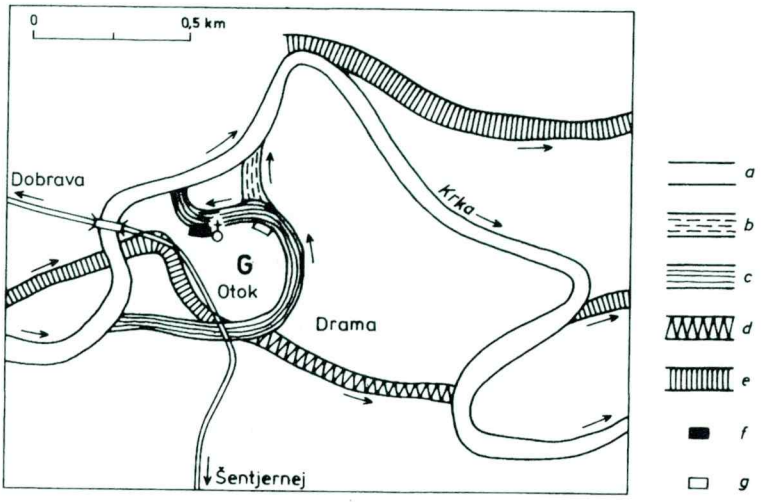


Abb. 8. Weiteres Gebiet des mittelalterlichen Marktes Gutenwerth

a- heutiges Bett des Krka-Flusses; *b*- Flussbett im Mittelalter; *c*- Flussbett in der Römer-Zeit; *d*- Flussbett in der Römer-Zeit (?); *e*- ältere Flussbetten; *f*- Flusshafen in der Römer-Zeit; *g*- Flusshafen im Mittelalter; **G**- Gebiet des mittelalterlichen Gutenwerth-Marktes

Sl. 8. Širše področje srednjeveškega trga Gutenwerth

a- današnja struga reke Krke; *b*- srednjeveška struga; *c*- rimskodobna struga; *d*- rimskodobna (?) struga; *e*- starejše struge; *f*- rimsko rečno pristanišče; *g*- srednjeveško rečno pristanišče; **G**- področje srednjeveškega trga Gutenwerth

Gutenwerth im 15. Jahrh. wurden drei oder vier Bau-Horizonte und 30 cm mächtige Anschwemmungen festgestellt. Vom Ende des 15. Jahrh. bis heute sind 70 bis 80 cm mächtige Anschwemmungen entstanden. Mindestens zwei katastrophale Überflutungen am Übergang vom 11. zum 12. Jahrh. und zwei Überflutungen im 15. Jahrh. wurden nachgewiesen (Šribar & Stare, 1977) (Abb. 9).

Das Gebiet von Otok war auch dem periodischen Einfluss des Šentjernej-Schwemmkegels ausgesetzt, mit einer Aufschwemmung von Dolomit-Schutt mit Lehm vermengt (Abb. 3 und 9). Der Šentjernej-Schwemmkegel bekam das Quellenmaterial aus den oberen Lauf der Bächer Pendirjevka und Beli potok in dem Gorjanci-Gebirge, das ein ausgesprochen tektonisches Relief aufweist, welches von aktiven Störungen bedingt ist. Deren Erdbebenaktivität hatte eine erhöhte Aufschüttung des Gehängeschuttes bis zum Ende des Schwemmkegels bei Otok verursacht. Die Aufschüttung bei Otok ist aus dem archäologischen Profil zwischen dem 2. und 10. Jahrh., dem 11. und 12. Jahrh. und im 15. Jahrh. ersichtlich, d.i. in den Zeitabschnitten der erhöhten Erdbebenaktivität. Es kann geschlossen werden, dass in diesen Zeitabschnitten die *Erdbeben im Flussgebiet der Bächer Pendirjevka und Beli potok in Gorjanci* erfolgt sind.

Die photogeologische Analyse von Luftbildern des weiteren Gebietes von Otok hat ein unnormales Mäandrieren des Krka-Flusses und eine mehrfache Verlegung des Flusslaufes gezeigt. Das ist wegen der Hebung des tektonischen Blockes flussabwärts

zwischen Šentjernej und Kostanjevica und/oder der Absenkung des Gebietes im weiteren Gebiet von Otok entstanden. Die Katastrophen erfolgten in kurzen Zeitabschnitten und sie können mit einer starken und lebhaften tektonischen und Erdbebenaktivität erklärt werden.

Korrelation der archäologischen, historischen, photogeologischen, seismologischen und seismotektonischen Daten für das Gutenwerth-Gebiet

Das archäologische Profil im Gebiet von Otok (Gutenwerth) zeigt auf mehrere Katastrophen. Das Vorkommen der Schicht mit angebranntem Lehm und mit Ascheresten, darüber aber immer eine Schicht von Lehmsedimenten aus Überschwemmungen kann nur auf eines hinweisen – auf ein Erdbeben. Bei dem Erdbeben ist es zum Brand gekommen, weil die Markthäuser aus Holz, mit offenen Mauerherden, waren. Aus den dokumentierten Beispielen der katastrophalen Erdbeben ist es bekannt, dass die Siedlungen mit Holzkonstruktionen die Erdbebenstösse relativ gut überstanden hatten, sie wurden aber durch Brände vernichtet, welche wegen der Zerstörungen von Brandherden entstanden sind, welche aus gegen Erdbeben nicht widerstandsfähigen Maurermaterialien gebaut waren. Bei dem Haupterdbeben und bei den nachfolgenden Erdbebenstössen ist es zu Absenkungen des Gebietes und zu Ablagerungen von Flussedimenten gekommen. Die Mächtigkeit der Überschwemmungssedimente gibt uns eine grobe Angabe über die Grösse der vertikalen Bodenbewegung während des Erdbebens. Die Überschwemmungen konnten nicht wegen der Travertin-Bildungen entstanden sein, welche den Krka-Fluss verstauen könnten, weil die Archäologen ausgesprochen angeben, dass es im Gebiet von Gutenwerth kein Travertin gibt (Šribar & Stare, 1977).

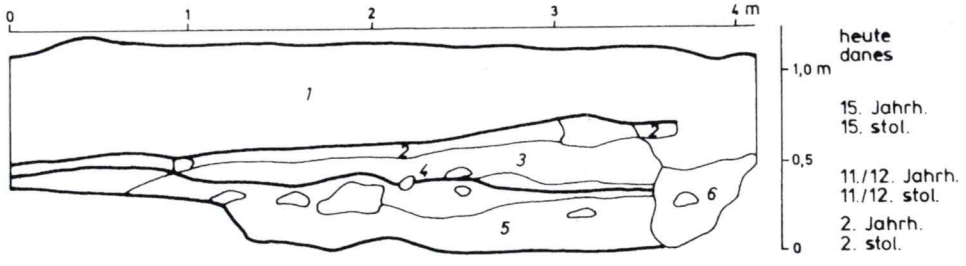


Abb. 9. Archäologisches Profil in Guthenwerth (nach Šribar & Stare, 1977)

1- brauner Subhumus, örtlich Bruchsteine und Keramik-Reste; *2*- kleinförmiger Schutt mit sandigem Humus; *3*- dunkelgrauer Subhumus, vermischt mit Bruchsteinen, Keramik-Fragmenten und Asche; *4*- bräunlich rote angebrannte Lehmschicht, darunter Brennspuren; *5*- gelbbrauner Lehm, vermischt mit Bruchsteinen; *6*- gelbbraune Schicht von Humus, vermischt mit einem gelben Ton, Bruchsteinen und Ziegel-Stückchen

Sl. 9. Arheološki profil v Gutenwerthu (po Šribar & Stare, 1977)

1- rjavi subhumus, tu in tam lomljenci in ostanki keramike; *2*- drobni grušč s peščenim humusom; *3*- temnosivi subhumus, pomešan z lomljenci, koščki keramike in pepelom; *4*- rjavordeča ožgana ilovnata plast, pod njo sled žganine; *5*- rumenorjava ilovica, pomešana z lomljenci; *6*- rumenorjava plast subhumusa, pomešana z rumenkasto glino, lomljenci in koščki opeke

Vertikale Bodenbewegungen im Gebiet von Gutenwerth

Die vertikalen Bodenbewegungen (slip rate) im Gebiet von Gutenwerth können aus den Daten von zwei archäologischen Profilen ausgerechnet werden, eines aus dem römischen Hafen und zweites aus dem Mittelteil der Siedlung. Zwischen dem Boden aus der Römerzeit (2. Jahrh. nach Chr.) und dem heutigen Boden liegen 1,10 m mächtige Anschwemmungen. Zwischen dem Römerzeit-Boden und dem aus dem 15. Jahrh. liegen 0,2 m mächtige Anschwemungen. Zwischen den Böden aus dem Übergang vom 11. zum 12. Jahrh. und vom Ende des 15. Jahrh. wurden 15 cm und noch 30 cm, das sind insgesamt 45 cm Anschwemmungen, abgelagert. Zwischen dem Boden vom Ende des 15. Jahrh. und dem heutigen Boden liegen 70 bis 80 cm mächtige Anschwemmungen. Auf den Zeitabschnitt zwischen dem Römer-Boden und dem Boden vom Ende des 11. Jahrh. entfallen also 65 cm mächtige Anschwemmungen. Auf die Zeit vom Anfang des 12. Jahrh. und dem Ende des 15. Jahrh. aber entfallen 45 cm mächtige Anschwemmungen. Die Mächtigkeiten der Anschwemmungen zeigen uns die ungefähre vertikale Komponente der Absenkung. Die vertikalen Bodenbewegungen nach der Formel (1) zeigt die Tabelle 2.

Tabelle 2. Vertikale Bodenbewegungen im Gebiet von Gutenwerth zwischen der Römer-Zeit und dem 15. Jahrhundert

Tabela 2. Hitrosti vertikalnih premikov na področju Gutenwertha med rimsko dobo in 15. stoletjem

Römer-Hafen:

Zeitabschnitt	t (Jahre)	H (m)	S (m/Jahr.)
Anf. 2. Jahrh.–Ende 15. Jahrh.	1.300	0,20	$1{,}5\times10^{-4}$
Mittelgebiet von Gutenwerth:			
Anf. 12. Jahrh. –Ende 15. Jahrh.	400	0,45	$1{,}2\times10^{-3}$
Ende 15. Jahrh.–20. Jahrh.	500	0,7	$1{,}4\times10^{-3}$
		0,8	$1{,}6\times10^{-3}$

t- Zeit; H- vertikale Bewegung; S- vertikale Bodenbewegung (slip rate)

Eine sichtbare Abweichung der vertikalen Bodenbewegungen zeigt sich im Gebiet des Römer-Hafens, wo der Wert ungewöhnlich niedrig ist. Die niedrigen Werte werden mit der Erosion erklärt, welche im Zeitabschnitt der grössten Erdbebenaktivität tätig war. Der römische Hafen lag am Ufer des alten Bettes des Krka-Flusses. Die Fluss-Erosion, verursacht von der Hebung des Gebietes, hatte die Terrassen eingeschnitten, welche von den Archäologen festgestellt wurden (Šribar & Stare, 1977). Auf Grund der Ausrechnungen zeigt sich, dass von 1,36 bis 1,88 m der Anschwemmungen erodiert wurden, das aber bedeutet die folgenden vertikalen Bodenbewegungen:

$$S = 1{,}4\times10^{-3}, \text{ bzw. } S = 1{,}0\times10^{-3} \text{ m/Jahr.}$$

Die Erosion ist entstanden entweder wegen der Hebungen in dem Gebiet von Gutenwerth oder der Senkungen des gehobenen Blockes zwischen Gutenwerth und Kostanjevica, oder aber wegen der kombinierten Tätigkeit beider tektonischen Blöcke. Wie immer schon, *aus den archäologischen Daten ist zu ersehen, dass bestimmte Gebiete des Krško-Einbruchstales gehoben und abgesenkt worden sind.* Die senkenden Bodenbewegungen im Gebiet von Gutenwerth betragen von $1{,}2\times10^{-3}$ bis $1{,}6\times10^{-3}$ m/Jahr, die hebenden Bodenbewegungen aber von $1{,}0\times10^{-3}$ bis $1{,}4\times10^{-3}$ m/Jahr. Die durchschnittliche senkende Bodenbewegung ist etwas grösser als die hebende Bodenbewegung. Weil aber die Senkungen auch länger gedauert hatten als die Hebungen, wurde das Gutenwerth-Gebiet im allgemeinen abgesenkt, worauf auch die archäologischen Ausgrabungen hinweisen.

Korrelation der geschichtlichen Erdbeben und der archäologisch festgestellten Katastrophen

Die archäologischen Daten über die Erdbeben in dem Gebiet von Gutenwerth können mit den geschichtlichen Erdbebendaten korreliert werden.

Aus dem Erdbeben-Katalog für Slowenien (Ribarič, 1982) kann ersehen werden, dass am Ende des 11. Jahrh. und am Anfang des 12. Jahrh. im Gebiet von Krain zwei Erdbeben geschehen sind. Im Jahr 1081 ist ein Brontid mit einer Magnitude 5,2, im Jahr 1118 aber ein Erdbeben mit unbekannter Magnitude bekannt. Beide Erdbeben wurden in Ljubljana wahrgenommen. Das Erdbeben aus dem Jahr 1081 reflektiert sich in dem archäologischen Profil mit der Brandschicht und der Überschwemmungschicht darüber, das Erdbeben im Jahr 1118 aber ist mit der Schicht eines dunkelgrauen Subhumus, vermengt mit Keramikstücken und Asche gekennzeichnet.

Im 15. Jahrh. wurden in Krain geschichtliche Erdbeben im Jahr 1431 und 1449 mit einer unbekannten Magnituden, sowie im Jahr 1491 mit einer Bezeichnung starkes Erdbeben verzeichnet. Von den Erdbeben im 15. Jahrh. müssen wir zwei berücksichtigen, weil aus diesem Zeitabschnitt zwei Bauhorizonte, d.i. zwei katastrophale Zerstörungen und Überflutungen von Gutenwerth bekannt sind.

In dem archäologischen Profil von Gutenwerth haben wir also zusammen vier Bauhorizonte, die auf vier mögliche Erdbeben hinweisen, am wahrscheinlichsten aus dem Jahr 1081 und 1118, sowie zwei von den Erdbeben aus den Jahren 1431, 1449 und 1491. Die archäologischen Daten stimmen mit den Angaben aus dem Erdbeben-Katalog überein.

Korrelation von Erdbeben und der historischen Daten

Beim Vergleich passen die geschichtlichen Daten über den Aufschwung und Untergang von Gutenwerth mit den Erdbebendaten im groben gut zusammen. Eine kräftigere Entwicklung des Marktes geschah im 12. Jahrh. und im 13. Jahrh. als er ein Verwaltungszentrum wurde, von der Mitte des 13. Jahrh. weiter aber auch eine Selbsverwaltung und einen eigenen Richter hatte. Den Höhepunkt erreichte der Markt im 14. Jahrh. als er ein regional bedeutendes Handwerks-, Verkehrs- und Handels-Zentrum geworden ist. Der Aufschwung des Marktes ist also in der Zwischenzeit, ohne stärkeren Erdbeben, geschehen.

Im Gebiet der mittelalterlichen Siedlung Gutenwerth waren am Anfang des 12.

Jahrh. zwei Erdbeben mit einer Magnitude 5,2. Die Einwohner hatten die Siedlung wieder neu aufgebaut. Nach den geschichtlichen Daten begann deren Aufschwung mit dem Höhepunkt im 14. Jahrh. Am Ende des 15. Jahrh. folgten sich im Zeitabschnitt von 18 bis 60 Jahren die zwei stärksten Erdbeben mit einer Magnitude 5,7. Die beiden Erdbeben sind wahrscheinlich die Ursache, dass die Siedlung nicht mehr neu aufgebaut wurde.

Alles zeigt darauf, dass den Untergang des Marktes am Ende des 15. Jahrh. nicht die Türken-Einfälle, wie es die Geschichtler annehmen, sondern zwei starke nachfolgende Erdbeben verursacht hatten. Im Gebiet des Herzogtums Krain und Steiermark ist kein Beispiel bekannt, wo die Einwohner nach der Vernichtung eines Marktes oder einer Stadt wegen der Türken-Einfälle diese nicht mehr wieder aufgebaut hätten. Die Vermutung ist wahrscheinlicher, dass Gutenwerth wegen der Furcht vor neuen Erdbeben und Überflutungen nicht neu aufgebaut wurde.

Korrelation der vertikalen Bewegungen und der Erdbeben-Magnituden

Die empirische Funktionsbeziehung zwischen der Magnitude und der grössten vertikalen Bewegung an einer Oberflächenstörung wird mit der Linearregression gewonnen. Die Funktionsbeziehung in allgemeiner Form lautet:

$$M = a + b \log U_m \tag{2}$$

M bedeutet Magnitude, $\mathbf{U_m}$ die grösste vertikale Bewegung, **a** und **b** aber sind Koeffiziente.

Von Bonilla und Bucknam (1970, in der Arbeit von Bowman & Gerson, 1968) wurden die Koeffiziente **a** und **b** auf Grund von Daten aus aller Welt wie folgt bestimmt:
$6{,}836 \leq a \leq 7{,}166 \quad 0{,}065 \leq b \leq 1{,}818$ (Bonilla & Bucknam, 1970; Slemmons, 1977)

Bei der Berechnung der grössten möglichen vertikalen Bewegungen (U_m) aus der Magnitude (M) ist es notwendig die obige Gleichung in die folgende Form umzubilden:

$$U_m = 10\text{Exp}(M/b - a/b) \tag{3}$$

Für die Berechnung der möglichen vertikalen Bewegungen wurden die grössten und kleinsten Werte der Koeffiziente **a** und **b** übernommen, um die Extremwerte U_m zu bekommen:

$$a_{max}=7{,}166,\ b_{max}=1{,}818,\ a_{min}=6{,}836,\ b_{min}=0{,}065$$

Mit dem Einsetzen von Kombinationen der Koeffiziente in die Gleichung (3) bekommt man die folgenden möglichen Gleichungen:

$$U_{m1} = 10\text{Exp}(M/0{,}065 - 110{,}246) \tag{4}$$
$$U_{m2} = 10\text{E xp}(M/0{,}065 - 105{,}169) \tag{5}$$
$$U_{m3} = 10\text{Exp}(M/1{,}818 - 3{,}941) \tag{6}$$
$$U_{m4} = 10\text{Exp}(M/1{,}818 - 3{,}760) \tag{7}$$

Von Prochazkova (1983) wird für die relative Bewegung an einer Störung die folgende Beziehung angegeben:

$$log\ U = -1{,}74 + 0{,}62M \text{ für } 4{,}5 \geq M \geq 7{,}4 \text{ und } 0{,}38 \geq deltaσ \geq 9{,}9 \quad (8)$$

$$log\ U = -2{,}48 + 0{,}65M \text{ für } 4{,}5 \geq M \geq 7 \text{ und } 0{,}01 \geq deltaσ \geq 0{,}4, \quad (9)$$

wobei ***deltaσ*** den Spannungsabfall (strain drop) bedeutet. Die Bewegungswerte werden in Millimeter ausgerechnet.

Mit der Umformung der Gleichungen (8) und (9) bekommt man:

$$U_{m5} = 10Exp(0{,}62M - 1{,}74) \quad (10)$$

$$U_{m6} = 10Exp(0{,}65M - 2{,}48) \quad (11)$$

Die Daten über den Spannungsabfall (*deltaσ*) aus dem Gebiet des Krško-Einbruchstales sind nicht bekannt, deshalb müssen die beiden Formeln (10) und (11) berücksichtigt werden.

Die ausgerechneten Werte der grössten vertikalen Bewegungen an den aktiven Oberflächenstörungen in Abhängigkeit von der Magnitude zeigt nach verschiedenen Formeln die Tabelle 3.

Tabelle 3. Vertikale Bewegungen bei verschiedenen Magnituden der Erdbeben nach verschiedenen Formeln

Tabela 3. Vertikalni premiki pri različnih magnitudah potresov po različnih formulah

M_{cap}	(4) U_{m1} (m)	(5) U_{m2} (m)	(6) U_{m3} (m)	(7) U_{m4} (m)	(10) U_{m6} (m)	(11) U_{m5} (m)
4,0	1,960E-49	2,341E-44	0,018	0,027	–	–
4,1	6,775E-48	8,089E-43	0,020	0,031	–	–
4,2	2,340E-43	2,795E-41	0,023	0,035	–	–
4,3	8,088E-45	9,657E-40	0,026	0,040	–	–
4,4	2,794E-43	3,336E-38	0,030	0,045	–	–
4,5	9,655E-42	1,152E-36	0,034	0,051	0,011	0,002
4,6	3,336E-40	3,983E-35	0,038	0,058	0,012	0,003
4,7	1,152E-38	1,376E-33	0,044	0,066	0,014	0,003
4,8	3,982E-37	4,755E-32	0,050	0,075	0,017	0,004
4,9	1,375E-35	1,642E-30	0,056	0,086	0,019	0,005
5,0	4,754E-35	5,676E-29	0,064	0,097	0,022	0,005
5,1	1,642E-32	1,961E-27	0,073	0,110	0,026	0,006
5,2	5,675E-31	6,776E-26	0,083	0,125	0,030	0,007
5,3	1,960E-29	2,341E-24	0,094	0,142	0,035	0,009
5,4	6,775E-28	8,089E-23	0,106	0,162	0,040	0,010
5,5	2,340E-26	2,795E-21	0,121	0,184	0,046	0,012
5,6	8,088E-25	9,657E-20	0,137	0,209	0,053	0,014
5,7	2,794E-23	3,336E-18	0,156	0,237	0,062	0,016
5,8	9,655E-22	1,152E-16	0,171	0,269	0,071	0,019
5,9	3,336E-20	3,983E-15	0,201	0,305	0,082	0,022
6,0	1,152E-18	1,379E-13	0,228	0,347	0,095	0,026
6,1	3,982E-17	4,755E-12	0,259	0,393	0,110	0,030
6,2	1,375E-15	1,642E-10	0,294	0,447	0,127	0,035

Aus der Tabelle 3 ist ersichtlich, dass ein breites Spektrum der Werte $\mathbf{U_m}$ bei einer gleichen Magnitude möglich ist. Die Gültigkeit der einen von den sechs möglichen Formeln kann aus den bestehenden Daten über die Magnitude der Erdbeben und aus den archäologischen Daten über die Mächtigkeit der Anschwemmungen nach jeden Erdbeben bestimmt werden.

In dem Gebiet von Gutenwerth ist nach den archäologischen Daten von der Oberfläche vom Ende des 11. Jahrh. und dem Anfang des 12. Jahrh. die Mächtigkeit von 15 cm der Anschwemmungen bekannt. Das bedeutet ungefähr 15 cm Absenkung bei zwei nachfolgenden Erdbeben. In dieser Zeit sind nach den seismologischen Daten zwei stärkere Erdbeben geschehen: im Jahr 1081 mit der Magnitude 5,2±0,3 und im Jahr 1118 mit einer unbekannten Magnitude. Nach den archäologischen Angaben hatten die zwei Erdbeben vom Ende des 11. und vom Anfang des 12. Jahrh. wegen der Absenkung des Gebietes 15 cm mächtige Anschwemmungen verursacht. Auf jedes der Erdbeben sind 7,5 cm mächtige Anschwemmungen, bzw. 7,5 cm Absenkung bezogen. Die 7,5 cm der Absenkung bei der Magnitude 5,2 entsprechen in der Tabelle 3 Formel (6) dem Wert 8,3 cm der Absenkung, welche bei gleicher Magnitude ausgerechnet wurde. Der Unterschied der Absenkungen nach den archäologischen Daten und der Ausrechnung ist minimal und ist im Rahmen der Fehler, welche bei der Bestimmung der Mächtigkeit der Anschwemmungen, bzw. der angenommenen adequaten Absenkung des Gebietes, den Fehlern bei der Magnitude-Ausrechnung und der richtig angenommenen Formel enthalten sind.

Auf dem Boden aus dem 15. Jahrh. liegen 30 cm mächtige Anschwemmungen. Aus diesem Zeitabschnitt sind zwei Bauhorizonte bekannt, was den zwei geschichtlichen Erdbeben mit unbestimmter Lokalität in Krain und mit unbekannter Magnitude entspricht; eines von den beiden ist als ein starkes Erdbeben bezeichnet. Auf jedes Erdbeben entfallen 15 cm mächtige Anschwemungen, was eine Absenkung des Gebietes um 15 cm bedeutet. Nach der Formel (6) aber ist die Absenkung von 15,6 cm bei einer Magnitude 5,7 entstanden. Diese Magnitude ist der grössten seismischen Wirkungsfähigkeit der aktiven Tiefenstörung im Gebiet von Gutenwerth gleich.

Aus Vergleichen der Daten kann geschlossen werden, dass für das Gutenwerth-Gebiet die Formel (6) gültig ist; wahrscheinlich aber geltet sie auch für das gesamte Gebiet des Krško-Einbruchstales.

Rezente Senkungen bei Kostanjevica

7,5 km südöstlich von Gutenwerth liegt dem Krka-Fluss abwärts der Markt Kostanjevica, welcher im Mittelalter entstanden ist. Die Ähnlichkeit mit Gutenwerth besteht darin, dass auch Kostanjevica auf einer Insel in der Mitte der Krka-Flusses liegt. Weiter von Kostanjevica biegt der Krka-Fluss in die Richtung gegen Nordosten um. Die heutige Insel ist mit einem Mäander entstanden (Abb. 1). Auf dem Luftbild sind trockene ältere Mäandre sichtbar. Zu dem starken Mäandrieren in einem verhältnismässig kleinem Raum ist es wegen eines an Störungen abgesenkten Gebietes und infolge dessen einer Anstauung des Krka-Flusses gekommen. Eine Bohrung aus dem Jahr 1992 zeigte eine ungewöhnliche Mächtigkeit von 38 m der Ablagerungen von Ton, Sandton, Sand, Ton mit Schutt und mit Torflinsen in einem engen Alluvialtal südlich von Kostanjevica, schon am Rand des Gebietes mit der grössten Absenkung (mündliche Daten von Dipl.-Ing. Franc Drobne).

Die Sedimente zeigen auf eine Moor- und See-Sedimentation, mit einen Schuttzu-

fluss aus dem Gorjanci-Gebirge. Beim Kostanjevica-Kloster südlich des Mittelalter-Kernes von Kostanjevica hatte im Jahr 1938 Brodar (1955) vier Sonden bis zur Tiefe von 3 m ausgegraben. In den Sedimenten hatte Šercelj (1963) nach den Pollen ein Würm-Alter bestimmt. Im unteren Teil der Sonde wurden Knochenreste der Gattung Mammonteus und anderer Säugetiere und zwei Artefakte, wahrscheinlich aus der Moustérien-Zeit ausgegraben (SAZU, 1975). Im Jahr 1834 wurde bei Kostanjevica in der Tiefe von 4,74 m ein vorhistorisches Boot gefunden, wonach auf eine Pfahlbaukultur geschlossen wird (SAZU, 1975; Grafenauer, 1979). Sie wird als gleichzeitig mit der bekannten Pfahlbaukultur im Moor von Ljubljansko Barje angesehen, welche zwischen dem Ende des Eneolitikums und den Anfang der Bronzezeit bestanden hatte, d.i. zwischen den Jahren 1700 und 900 vor Chr. Auf der Kostanjevica-Insel wurde in der Tiefe von 60 bis 70 cm eine alte Bodenfläche, wahrscheinlich aus dem 15. Jahrh. gefunden (Šribar & Stare, 1977).

Aus diesen Daten können die ungefähren vertikalen Bodenbewegungen in dem Senkungsgebiet von Kostanjevica ausgerechnet werden. Aus dem Fund der Mustérien-Artefakten (vor 65.000 bis 75.000 Jahren) in der Tiefe von etwa 3 m, des urgeschichtlichen Bootes aus dem Zeitabschnutt von 1.700 bis 900 Jahren vor Chr. in der Tiefe 4,74 m, sowie der Bodenfläche aus dem 15. Jahrh. in der Tiefe 0,6 bis 0,7 m ergeben sich die vertikalen senkenden Bodenbewegungen, welche aus der Tabelle 4 ersichtlich sind.

Ein Vergleich der vertikalen senkenden Bodenbewegungen im Gutenwerth-Gebiet und bei Kostanjevica in dem jüngeren Zeitabschnitt zeigt, dass die Werte ziemlich gut übereinstimmen. Freilich muss man eine gewisse Ungenauigkeit der Daten berücksichtigen. Beide Gebiete befinden sich in der gleichen aktiven Oberflächenstörungszone, welche am Südrand des Krško-Einbruchstales an der Grenze mit dem Gorjanci-Horst verläuft (Abb. 2).

Tabelle 4. Vertikale Bodenbewegungen bei Kostanjevica in dem ältern und dem jüngeren Zeitabschnitt

Tabela 4. Hitrosti vertikalnih premikov pri Kostanjevici v starejšem in mlajšem obdobju

Älterer Zeitabschnitt:

Zeitabschnitt	t (Jahre)	H (m)	S (m/Jahr)
Vor 65.000 Jahren–20. Jhrh.	67.000	3	$4{,}4\times10^{-5}$
Vor 70.000 Jahren–20. Jhrh.	72.000	3	$4{,}1\times10^{-5}$
Vor 75.000 Jahren–20. Jhrh.	77.000	3	$3{,}9\times10^{-5}$
Jüngerer Zeitabschnitt:			
1700 vor Chr.–20. Jahrh.	3.700	4,74	$1{,}2\times10^{-3}$
15. Jhrh.–20. Jhrh.	500	0,60	$1{,}2\times10^{-3}$
		0,70	$1{,}4\times10^{-3}$

t- Zeit; H- vertikale Bewegung; S- vertikale Bodenbewegung (slip rate)

Vertikale Bodenbewegungen als Funktion der Zeit auf Grund von archäologischen und geologischen Daten im Gebiet des Krško-Einbruchstales

Die vertikalen Bodenbewegungen in Abhängigkeit von der Zeit zeigen eine deutliche mathematische Korrelation, welche graphisch dargestellt ist (Abb. 10). Auf das semilogarithmisches Koordinatennetz sind die logarithmischen Werte der vertikalen Bodenbewegungen (S) und die absolute Zeit (T) aufgetragen. Für die vertikalen Bodenbewegungen wurden die bisher angeführten Daten aus verschiedenen Gebieten des Krško-Einbruchstales berücksichtigt: das Gebiet von Drnovo und Stari Grad, der epigenetische Lauf des Krka-Flusses, die Senkungen und Hebungen von Gutenwerth, sowie das Senkungsgebiet von Kostanjevica aus dem jüngeren Zeitabschnitt. Am wertvollsten sind die Daten, welche sich auf einen kürzesten Zeitabschnitt beziehen. Nur die Daten wurden berücksichtig, welche sich auf die letzte, rezente neotektonische Phase (seismotektonischen Zeitabschnitt) beziehen.

Ausser der angeführten Daten wurden noch die vertikalen Bodenbewegungen im Gebiet der See-Moor-Sedimente von Krakovski gozd, der höchsten Schotter-Konglomerat-Terrasse südwestlich von Krško und bei Cerklje, sowie der höchsten Schotterterrasse in den Feldern von Krško und Brežiško polje ausgerechnet.

Im Gebiet von Krakovski gozd befinden sich 2,5 m mächtige tonige Moor- und See-Sedimente, welche nach den Pollenanalysen (Šercelj, nicht veröffentlichte Daten) ein Würm-Alter haben, welche wahrscheinlich in das jüngere Würm-Interstadial (vor 25.000 bis vor 15.000 Jahren) gehören.

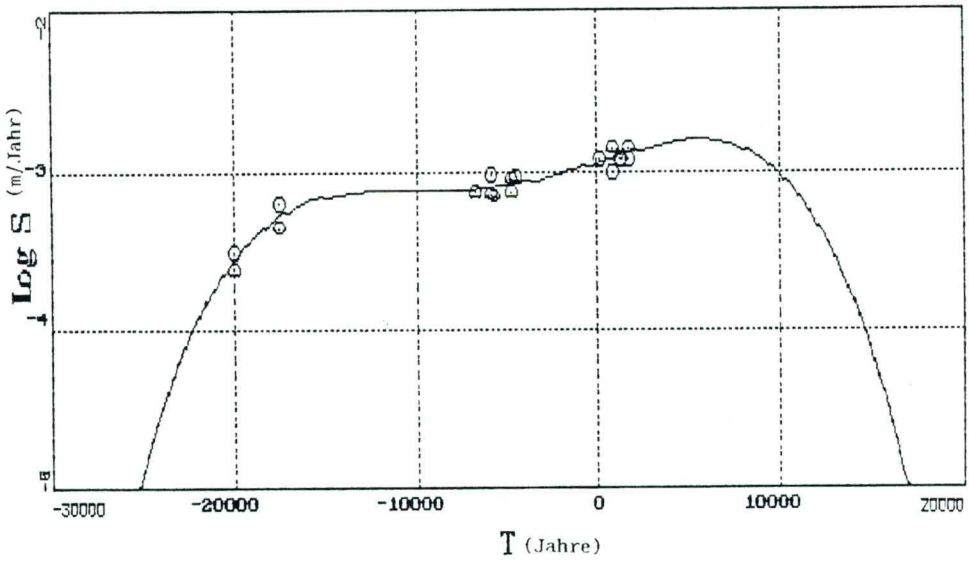


Abb. 10. Graph der Funktion-Beziehung zwischen den vertikalen Bodenbewegungen (S) und der absoluten Zeit (T)

Sl. 10. Graf funkcijskega odnosa med hitrostmi vertikalnih premikov (S) in absolutnim časom (T)

Die höchste Schotter-Konglomerat-Terrasse südwestlich von Krško ist 5 m hoch. Für die Bestimmung der Senkung ist auch die Mächtigkeit der tiefer liegenden Schotter-Terrasse von 6 m von Bedeutung. Die Summe beider Werte ergibt die gesamte Mächtigkeit der Schotter-Konglomerat-Terrasse, welche etwa 11 m beträgt. Die Terrasse ist ein Teil der umfassenden Akkumulation, welche wahrscheinlich in dem Würm-Glazial (vor 25.000 bis vor 10.000 Jahren) entstanden ist.

Ein gleiches Alter hat der Überrest der Schotterablagerung in der 2 m hohen höchsten Schotter-Konglomerat-Terrasse bei Cerklje. Die Schottermächtigkeit der tieferen Terrasse beträgt etwa 6 m. Die gesamte Mächtigkeit der Würmablagerungen beträgt also etwa 8 m.

In der Tongrube bei Brežice zeigt ein 3,5 m mächtiges Profil von tonigen Sedimenten nach den Pollenanalysen (Šercelj, 1970) auf eine Temperatur-Oszillation in der Jung-Würm-Zeit (vor 15.000 bis vor 15.000 Jahren).

Mit einer Bohrung bei Šmarješke Toplice wurde eine 6 m mächtige Tonschicht durchfahren, für welche nach den Pollen (Šercelj, 1970) ein Boreal-Alter angenommen wird. Es ist aber wahrscheinlicher, dass die Schicht ein Subboreal-Alter hat, welches die Zeit von 4.500 Jahren vor Chr. bis heute umfasst.

Die höchste Schotter-Terrasse der Felder Krško polje und Brežiško polje ist von 6 bis 8 m mächtig. Sie ist entstanden durch die Schotter-Akkumulation während der Senkung, für welche der Zeitabschnitt vom Anfang Holozän (vor 10.000 Jahren) bis zur Bronzezeit (1.700 vor Chr.) angenommen wird. Die Bronzezeit wird als Zeitgrenze deshalb angenommen, weil auf der Terrasse die ältesten archäologischen Gegenstände aus der Bronzezeit gefunden worden sind (SAZU, 1975).

Die vertikalen Bodenbewegungen für die Gebiete von Krakovski gozd, südwestlich von Krško, Cerklje, Brežice, Šmarješke Toplice und der Felder Krško polje und Brežiško polje sind in der Tabelle 5 dargestellt.

Aus das Graph (Abb. 10) ist zu ersehen, dass die Funktionsabhängigkeit zwischen den vertikalen Bodenbewegungen und der Zeit mit dem folgenden Polynom der 4. Stufe ausgedrückt werden kann:

$$log S = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4, \qquad (12)$$

wobei die Koeffiziente in der Gleichung sind:

a = -2,9413216157E+00
b = 3,5633035030E-05
c = 3,0909981298E-10
d = -3,0814899072E-13
e = -1,5492841438E-17
Standarddeviation: σ = 5,0439531042E-02

Jüngste neotektonische Phase im Gebiet des Krško-Einbruchstales

Das Graph (Abb. 10) ermöglicht uns die Bestimmung des Anfangs der letzten neotektonischen Phase. Als die Grenze des tektonischen Ruhestandes wurde der folgende Wert angenommen:

$log S = -5$; das ergibt $S = 1 \times 10^{-5} = 0{,}00001$m/Jahr = 0,01mm/Jahr.

Tabelle 5. Vertikale Bodenbewegungen aus verschiedenen Gebieten des Krško- Einbruchstales zwischen der Würm-Eiszeit und der Gegenwart

Tabela 5. Hitrosti vertikalnih premikov na različnih področjih Krške udorine med würmom in današnjim časom

Zeitabschnitt	t (Jahre)	H (m)	S (m/Jahr)
Krakovski gozd:			
Vor 25.000–vor 15.000 Jahren	10.000	2,5	$2,5\times10^{-4}$
Südwestlich von Krško:			
Vor 25.000–vor 10.000 Jahren	15.000	11	$6,2\times10^{-4}$
Cerklje:			
Vor 25.000–vor 10.000 Jahren	15.000	8	$4,5\times10^{-4}$
Brežice:			
Vor 25.000–vor 15.000 Jahren	10.000	3,5	$3,5\times10^{-4}$
Krško polje und Brežiško polje:			
Vor 10.000 Jahren–1.700 vor Chr.	8.300	6 8	$7,3\times10^{-4}$ $9,6\times10^{-4}$
Šmarješke Toplice:			
Vor 4.500 Jahren–heute	6.500	3,5	$3,5\times10^{-4}$

t- Zeit; H- vertikale Bewegung; S- vertikale Bodenbewegung (slip rate)

Die Kurve schneidet den Wert *log*S=-5 in dem Punkt T=-25.000 Jahre. Das bedeutet, dass die letzte neotektonische Phase in dem Krško-Einbruchstal vor etwa 25.000 Jahren vor Chr. angefangen hatte. Der Anfang der letzten neotektonischen Phase wurde auf Grund des Alters der syngenetischen Sedimente in das Interstadial Würm II/III (Premru, 1990a, b) gestellt. Nach verschiedenen Zeitskalen wird das erwähnte Interstadial von 20.000 bis 10.000 Jahren datiert, was auch zur Datierung des Anfanges der letzten neotektonischen Phase angewendet wurde. Šercelj (1970) stellt das jüngere Würm-Interstadial, das er mit dem Paudorf-Interstadial vergleicht, in den Zeitabschnitt von 28.000 bis 25.000 Jahren vor der Gegenwart, von Valič (1994) aber wird es in das Jahr 25.000 vor Chr. gestellt. Der aus dem Graph ermittelte Anfang der letzten neotektonischen Phase steht mit der Datierung von Šercelj und Valič, sowie mit dem geologisch bestimmten Alter Interstadial Würm II/III in Übereinstimmung.

Der auf dem Graph (Abb. 10) ermittelte Anfang der letzten neotektonischen Phase passt gut zusammen mit der geologisch bestimmten Zeit und bestätigt, trotzt relativ kleiner Anzahl von Daten, die Richtigkeit der aufgestellten mathematischen Korrelation der vertikalen Bodenbewegungen in Abhängigkeit von der Zeit.

Es stellt sich die Frage, ob diese Korrelation auch für andere seismogene Gebiete gültig ist und nicht nur für das Krško-Einbruchstal. Nach den bisherigen noch nicht endgültig bearbeiteten Daten geltet ein ähnliches Funktionsverhältnis auch für das Gebiet des Einbruchstales von Ljubljansko Barje im mittleren Slowenien. Diese Ähnlichkeiten erfordern, dass in Zukunft die geologischen und archäologischen Daten auch aus anderen seismogenen Gebieten zu bearbeiten sind.

Aus dem Graph (Abb. 10) kann gefolgert werden:

1. Die letzte neotektonische Phase hatte etwa 25.000 Jahre vor Chr. begonnen und wird 42.000 Jahre andauern und etwa um das Jahr 17.000 beendet sein.
2. Die vertikalen Bodenbewegungen (slip rate) sind mit den grössten Erdbeben-Magnituden in einer Funktionsabhängigkeit.
3. Von der Mitte des 2. Jahrh. weiter steigerte sich die Magnitude der stärksten Erdbeben von 5,2 bis 5,7 nach Richter. Mit dem Ansteigen der grössten Magnitude erhöhten sich auch die vertikalen Bodenbewegungen von $1{,}0\times10^{-3}$ bis $1{,}6\times10^{-3}$ m/Jahr.
4. Im Gebiet des Krško-Einbruchstales sind die grössten möglichen Magnituden mit der seismischen Wirkungsfähigkeit der aktiven Tiefstörungen bestimmt. Die höchst möglichen Magnituden betragen von 6,1 bis 6,2. Im Bezug auf die festgestellte Regel, dass die Magnituden mit der Zunahme der vertikalen Bodenbewegungen grösser werden, können die grössten Magnituden bei den grössten vertikalen Bodenbewegungen erwartet werden. Diese aber werden zwischen den Jahren 5.000 und 6.000 bei den vertikalen Bodenbewegungen von $1{,}7\times10^{-3}$ bis $2{,}2\times10^{-3}$ m/Jahr erreicht sein.
5. Die grösste mögliche Magnitude zwischen 6,1 und 6,2 hatte sich noch nicht ereignet.
6. Zwischen dem 2. Jahrh. und der heutigen Zeit, sowie weiter bis zum Jahr 5.500 werden die vertikalen Bodenbewegungen von $1{,}0\times10^{-3}$ bis zu dem erwarteten $1{,}7\times10^{-3}$, bzw. $2{,}2\times10^{-3}$ m/Jahr leicht ansteigen.

Vieleicht sind die Vorhersagen über die Dauer und das Ende der letzten neotektonischen Phase und das Erreichen des tektonischen Höhepunktes im Bezug auf die Anzahl der Daten etwas kühn, aber sie können als der Anfang von derartigen Untersuchungen angesehen werden. Das Beispiel des Krško-Einbruchstales zeigt, dass die vertikalen Bodenbewegungen mit 80% Wahrscheinlichkeit eine Funktion der Zeit sind und dass eine Funktionsbeziehung zwischen den vertikalen Bodenbewegungen und den Magnituden der grössten Erdbeben besteht.

Stromverlegungen des Sava-Flusses wegen der tektonischen Bewegungen

Die Verlegungen des Sava-Flusslaufes im Krško-Einbruchstal, welche als zahlreiche verlassene Fluss-Mäandren und -Terrassen im Gelände und auf den Luftbildern (Abb. 11) und den alten topographischen Karten (Abb. 5 und 7) sichtbar sind, konnten aus hydrodynamischen Ursachen oder wegen der tektonischen Bewegungen entstanden sein. Durch die Bestimmungen der vertikalen Bodenbewegungen, der Grösse der vertikalen Bewegungen und der zeitlichen Abfolge der Sava-Flussbettverlegungen ist es möglich, mit Ausrechnungen den Zeitbaschnitt der Entstehung eines neuen Flussbettes zu bestimmen, ausgehend von der Formel (1):

$$T = H/S, \tag{13}$$

woraus sich die zeitliche Rekonstruktion des Verlaufes des Sava-Flussbettes in der geschichtlichen Zeit ergibt (Abb. 12).

Als die zeitlichen Festpunkte dienen die archäologischen und kartographischen Daten. Vier Zeit-Festpunkte stehen uns zur Verfügung. Auf Grund der archäologischen Daten über die Aktivität des römischen Flusshafens aus dem 2. Jahrh. ist der damalige Sava-Flusslauf zwischen Krško und Drnovo bekannt. Nach der alten Topographischen Karte Blatt Rann und Samobor 1:75.000, gedruckt im Jahr 1909, bekommen wir Informationen über den Sava-Flusslauf zwischen dem Ende des 19. und dem Anfang des 20. Jahrh. (Abb. 5). Aus der gleichen Karte stammt auch die Information über den Flusslauf aus dem 17. Jahrh. Dieser Flusslauf ist mit der Ländergrenze zwischen Krain und Steiermark bezeichnet. Diesen Flusslauf aus dem 17. Jahrh. bestätigt auch die alte Bildgraphik der Stadt Brežice aus dem Jahr 1689 von V i s c h e r, auf welcher ersichtlich ist, dass der Sava-Fluss damals unter der Terrasse, auf welcher die Stadt steht, geflossen hatte (Abb. 6). Der Verlauf des Sava-Flusslaufes in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts ist auf der Josephinischen Militärlandeskarte, Sektion 220 Rann (Abb. 7) dargestellt.

Für die Ausrechnung der vertikalen Bodenbewegungen genügte für den längeren Zeitabschnitt die angenommene Angabe über die vertikale Bewegung unter der Voraussetzung, dass die Terrassenhöhe ungefähr gleich der vertikalen Bewegung ist. Bei der Ausrechnung der Verlegung eines Flusslaufes auf Grund von Terrassenhöhen aber ist es bei kürzeren Zeitabschnitten notwendig den Anteil der Erosion vom Anteil der vertikalen Bewegung zu unterscheiden. Die Daten dafür wurden im Gebiet von Žabjek südlich von Krško gewonnen. Aus der neuzeitigen topographischen Karte im Masstab 1:25.000 ist ersichtlich, dass das Žabjek-Gebiet und weiter gegen Westen um etwa 0,2 m gehoben worden ist. Das zeigt der Unterschied zwischen den geodätischen Punkten 163,8 und 164,0 m ü.M. auf der gleichen Terrassenebene, welche aus dem Holozän-Schotter besteht. Auf die Hebung zeigt auch die unnormale Neigung der Ebene um 0,25‰ gegen NON, was vollkommen entgegen der Normalneigung der Schotterebene ist. Es handelt sich um eine Hebung um etwa 0,2 m. Diese Hebung hatte verursacht, dass der Sava-Durchfluss in dem alten Mäander aus der Römerzeit nicht mehr möglich war. Der Sava-Fluss hatte sich ein neues Strombett mit einem neuen Mäander nördlich von dem gehobenen Gebiet durchbrochen und eine 1 m hohe Terrasse eingeschnitten. Scharf knieförmige Flussbögen zeigen auf den Bestand einer Störung.

Für die nachfolgenden Ausrechnungen ist die Feststellung bedeutsam, dass für eine 1 m hohe Terrasse eine Hebung des Gebietes um 0,2 m, d.i. 20% der Terrassenhöhe notwendig war. Die übrigen 80% der Terrassenhöhe entfallen wahrscheinlich auf den Anteil der Erosion, welche wegen der Einsenkung des Bereichs flussabwärts von dem Betrachtungsgebiet entstanden ist.

Mit der Analyse von Terrassen, welche mit Hilfe von Luftaufnahmen identifiziert wurden, und der Datierungsfestpunkte kann geschlossen werden, dass sich der Sava-Flusslauf in bestimmten Zeitabschnitten verändert hatte. Diese Zeitabschnitte können nach den bekannten Daten der vertikalen Bodenbewegungen (S) und der Höhe der Flussterrasse des neuen Flussbettes (V) ausgerechnet werden. Dabei muss die Feststellung berücksichtigt werden, dass V=20%H ist:

$$t = 0{,}20V/S \tag{14}$$

Krško
Stari
Sava
Drnovo
Neviodunum
GORNJI GAJ

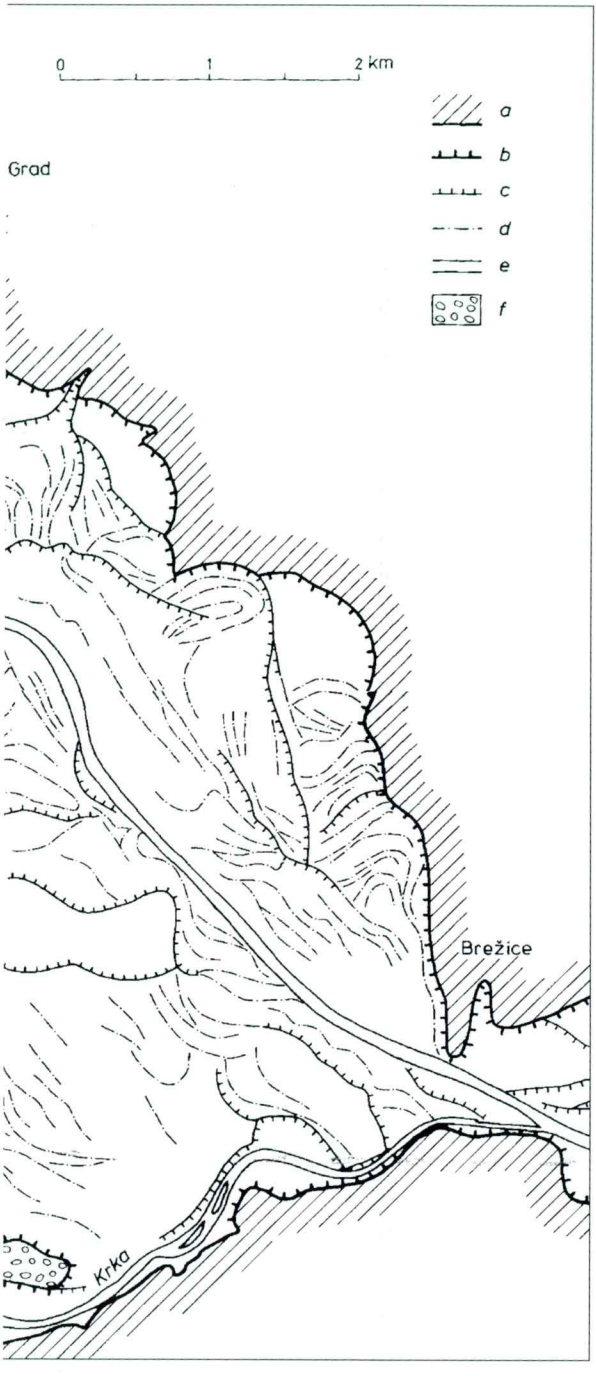
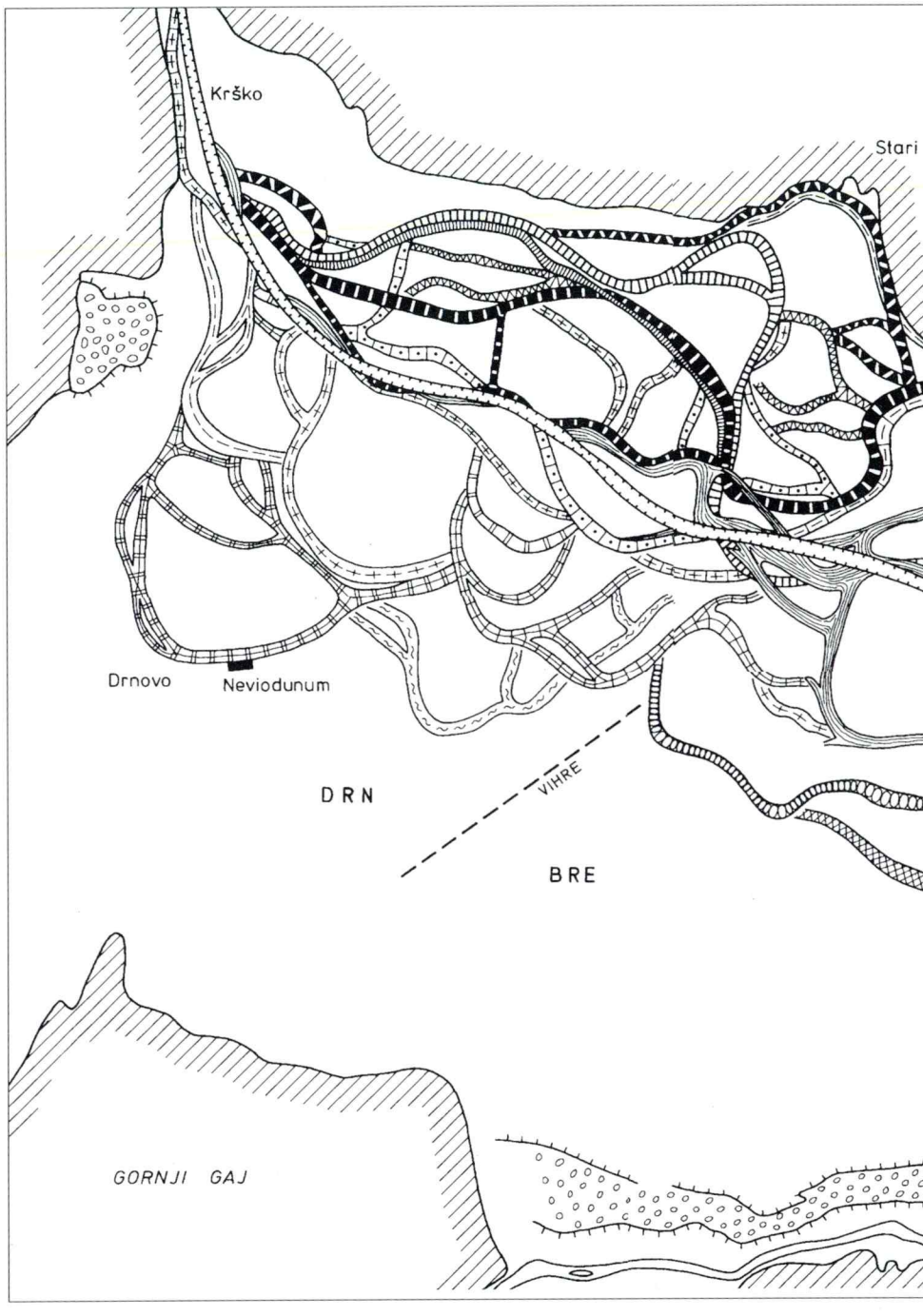


Abb. 11. Flussterrassen und Paläostromlinien des Sava-Flusses

a- Grenze der Schotterablagerungen; *b*- Abhang einer Würm-Terrasse; *c*- Abhang einer holozänen Flussterrasse; *d*- Paläostromlinien; *e*- heutiges künstkiches Sava-Flussbett; *f*- Würm-Konglomerat-Schotterterrasse

Sl. 11. Rečne terase in paleotokovnice Save

a- meja prodnih naplavin; *b*- ježa würmske terase; *c*- ježa holocenske rečne terase; *d*- paleotokovnice; *e*- današnja umetna struga Save; *f*- würmska konglomeratno-prodna terasa


Krško
Stari
Drnovo
Neviodunum
DRN
VIHRE
BRE
GORNJI GAJ

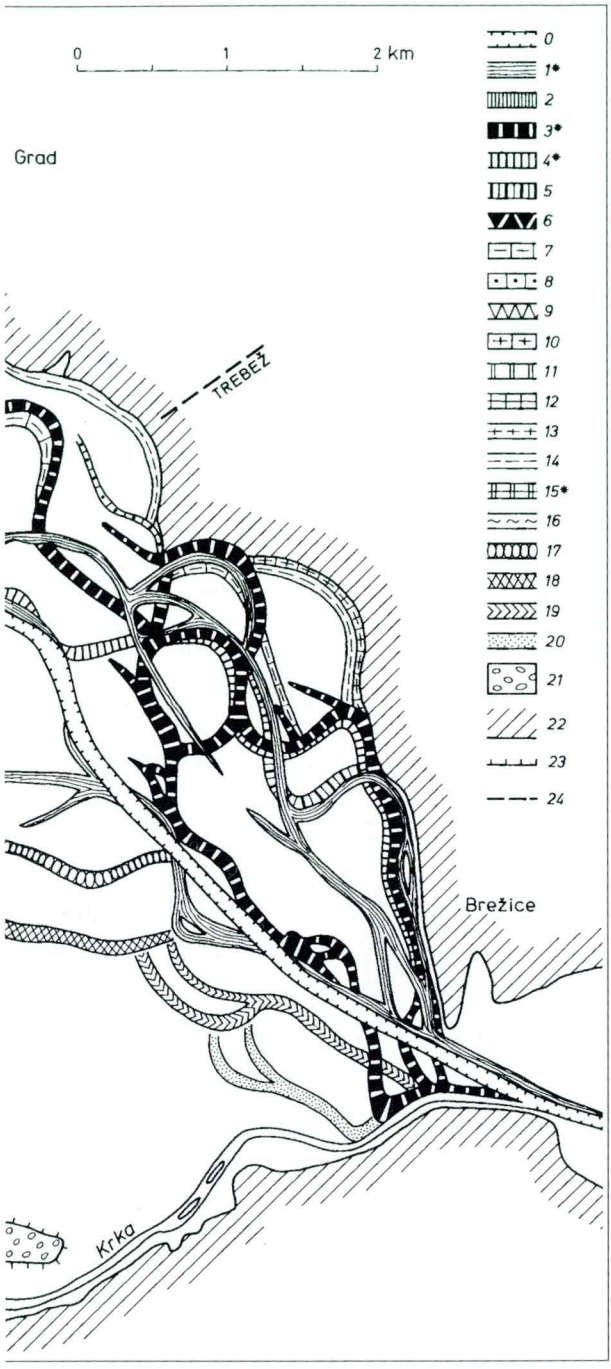


Abb. 12. Rekonstruktion des Ablaufes und der Verlegungen des Sava-Flussbettes in der geschichtlichen Zeit

0- heutiges künstlich errichtetes Sava-Flussbett; *1*- Flussbett vom Ende des 19. und Anfang des 20. Jhrh.; *2*- Flussbett aus der 1. Hälfte des 19. Jhrh.; *3*- Flussbett aus der 2. Hälfte des 18. Jhrh.; *4*- Flussbett aus der 2. Hälfte des 17. Jhrh.; *5*- Flussbett aus der 1. Hälfte des 16. Jhrh.; *6*- Flussbett aus der 1. Hälfte des 15. Jhrh.; *7*- Flussbett aus der 2. Hälfte des 14. Jhrh.; *8*- Flussbett vom Ende des 12. Jhrh. und Anfang des 13. Jhrh.; *9*- Flussbett Mitte des 11. Jhrh.; *10*- Flussbett vom Ende des 9. und Anfang des 10. Jhrh.; *11*- Flussbett Mitte des 8. Jhrh.; *12*- Flussbett vom Ende des 6. Jhrh. und Anfang des 7. Jhrh.; *13*- Flussbett Mitte des 5. Jhrh.; *14*- Flussbett vom Ende des 3. und Anfang des 4. Jhrh.; *15*- Flussbett zwischen dem 1. und dem 4. Jhrh.; *16*- Flussbett zwischen dem 2. Jhrh. vor Chr. und dem 1. Jhrh. vor Chr.; *17*- Flussbett zwischen der 2. Hälfte des 4. Jhrh. vor Chr. und Mitte des 3. Jhrh. vor Chr.; *18*- Flussbett aus der 2. Hälfte des 5. Jhrh. vor Chr.; *19*- Flussbett am Anfang des 5. Jhrh. vor Chr.; *20*- Flussbett Mitte des 6. Jhrh. vor Chr.; (siehe auch die Tabellen 6 und 7); *21*- Flussterrasse aus Würm; *22*- Grenze der Schotterablagerungen; *23*- Abhang einer Würm-Terrasse; *24*- Grenze der Gebiete von Drnovo (DRN) und von Brežice (BRE)

Sl. 12. Rekonstrukcija poteka in prestavitve rečne struge Save v zgodovinskem obdobju

0- današnja umetno napravljena struga Save; *1*- struga iz konca 19. in začetka 20. st.; *2*- struga iz 1. polovice 19. st.; *3*- struga iz 2. pol. 18. st.; *4*- struga iz 2. pol. 17. st.; *5*- struga iz 1. pol. 16. st.; *6*- struga iz 1. pol. 15. st.; *7*- struga iz 2. pol. 14. st.; *8*- struga iz konca 12. in zač. 13. st.; *9*- struga sredi 11. st.; *10*- struga iz konca 9. in zač. 10. st.; *11*- struga sredi 8. st.; *12*- struga iz konca 6. in zač. 7. st.; *13*- struga sredi 5. st.; *14*- struga iz konca 3. in zač. 4. st.; *15*- struga med 1. in 4. st.; *16*- struga med 2. st. pred Kr. in 1. st. pred Kr.; *17*- struga med 2. pol. 4. st. pred Kr. in sredino 3. st. pred Kr.; *18*- struga v 2. pol. 5. st. pred Kr.; *19*- struga v zač. 5. st. pred Kr.; *20*- struga sredi 6. st. pred Kr.; (glej tudi tabeli 6 in 7); *21*- würmska rečna terasa; *22*- meja prodnih naplavin; *23*- ježa würmske terase; *24*- meja med področjem Drnovega (DRN) in področjem Brežic (BRE)

Die absolute Zeit ($\underline{T}_1$) wird mit Hilfe der Zeitfestpunkte (T_r) ausgerechnet:

$$\underline{T}_1 = T_r \pm t_1 \tag{15}$$

Die + oder – Vorzeichen werden in Abhängigkeit davon angewendet, ob die Verlegung des Flusslaufes älter oder jünger ist von dem Flusslauf mit bekanntem Alter. Nach dem gleichen Prinzip wurden auch alle weiteren Flusslaufverlegungen ausgerechnet:

$$\underline{T}_2 = \underline{T}_1 \pm t_2 \text{ oder in allgemeiner Form } \underline{T}_n = \underline{T}_{n-1} \pm t_n \tag{16}$$

Die absolute Zeit ($\underline{T}$) bedeutet den mittleren Zeitverlauf des neuen Flussbettes. Dabei müssen auch die Fehler berücksichtigt werden, die nach den Daten der Regressionsfunktion 20% betragen. Die Ungewissheit bei der Bestimmung der Absolutzeit beträgt:

$$delta\mathbf{t} = t \pm 10\% \tag{17}$$

$$T = \underline{T} \pm delta\mathbf{t} \tag{18}$$

Die Verlegungen des Sava-Flusslaufes in der geschichtlichen Zeit sind in der Tabelle 6 und 7, sowie in der Abbildung 12 dargestellt. Die absolute Zeit ist in Jahrhunderten angeführt, weil es wegen der erreichbaren Genauigkeit unsinnig wäre Jahre zu verwenden. Es wurde dabei aus zwei Gebieten ausgegangen, dem Drnovo-Gebiet und dem Brežice-Gebiet, wo die alten Flussläufe mit Festpunkten datiert sind: dem Flussbett bei Drnovo aus der Römerzeit (Neviodunum) für das Drnovo-Gebiet (Tabelle 6) und dem alten Flussbett aus der 2. Hälfte des 17. Jahrhunderts für das Brežice-Gebiet (Tabelle 7).

Aus den Tabellen 6 und 7 sind die Unterschiede bei der Ausrechnung der absoluten Zeit der Flussverlegung ersichtlich, welche wegen der zwei verschiedenen Ausgangspunkte entstanden sind. Den Vergleich der Unterschiede zeigt die Tabelle 8. Der durchschnittliche Fehler beträgt ($delta\underline{T}$) 0,1(×100) Jahre, d.i. durchschnittlich 10 Jahre.

Die Ausrechnungen der Absolutzeit der Sava-Flusslaufverlegungen, welche aus der Tabelle 6 und 7 ersichtlich sind, übereinstimmen im Rahmen der annehmbaren Fehler (Tabelle 8) mit den bekannten Zeitabschnitten. Weil aber die Ausrechnungen auf Grund der vertikalen Bodenbewegungen durchgeführt sind, ist das ein Beweis für die tektonischen Ursachen der Flusslaufverlegungen. Somit haben wir ausser den morphologischen Merkmalen über die tektonischen Gründe für die Verlegung des Flusslaufes auch einen quantitativen Beweis.

Die Sava-Flusslaufverlegungen sind nicht plötzlich, sondern in längeren Zeitabschnitten entstanden. Der Fluss wurde allmählich verlegt, so dass noch eine Zeit das alte Flussbett verwendet wurde und zugleich ein neues Bett aufgebrochen wurde. Es sind grössere und kleinere Inseln enstanden, welche auch auf den alten topographischen Karten zu ersehen sind. In der Endphase der Flussverlegung wurde das alte Flussbett verlassen, der Sava-Fluss strömte in ein neues Flussbett um. Alte tote Flussbetten als Überreste des vorherigen Flusstromes sind übrig geblieben. Es sind auch Beispiele zu ersehen, wo ein jüngerer Flusslauf in einem bestimmten Abschnitt ein altes totes Flussbett benutzt hatte, welches vor mehreren Jahrhunderten enstanden ist.

Tabelle 6. Flussbette des Sava-Flusses und die vertikalen Bewegungen in verschiedenen geschichtlichen Zeitabschnitten in dem Drnovo-Gebiet (siehe auch die Abb. 12)

Tabela 6. Struge reke Save in vertikalni premiki v različnih zgodovinskih obdobjih na področju Drnovega (glej tudi sliko 12)

$S=1,3\times10^{-3}$ m/Jahr

No. des Fluss-laufes	H (m)	V 20%H (m)	t ×100 Jhr.	T ×100 Jahre	T ×100 Jahre	T Jahrhundert
20	0,5	0,1	0,6±0,1	-4,9-0,6=-5,5	-5,6 ÷ -5,4	Mitte. 6. Jhrh.v.Chr.
19	0,5	0,1	0,6±0,1	-4,3-0,6=-4,9	-5,0 ÷ -4,8	Anf. 5. Jhrh.v.Chr.
18	0,8	0,2	1,2±0,1	-3,1-1,2=-4,3	-4,4 ÷ -4,2	2. Hft.5. Jhrh.v.Chr.
17	1,5	0,3	2,3±0,2	-0,8-2,3=-3,1	-3,3 ÷ -2,5	2. Hft. 4.–Mtt. 3. Jhrh.v. C.
16	1,5	0,3	2,3±0,2	1,5-2,3=-0,8	-1,0 ÷ -0,6	2.–Mtt.1.Jhrh.v.Chr.
* 15	6	1,2	9,2±0,9	1,5 * 1,5	0,6 ÷ 2,4 * 0 ÷ 3	Mitte 1.–Mitte 3. Jhrh. * 1.-4. Jhrh.
14	1	0,2	1,5±0,1	1,5+1,5=3,0	2,9 ÷ 3,0	Ende 3.-Anf. 4. Jhrh.
13	1,5	0,3	0,3±0,2	3,0+1,5=4,5	4,3 ÷ 4,7	Mitte 5. Jhrh.
12	1	0,2	1,5±0,1	4,5+1,5=6,0	5,9 ÷ 6,1	Ende 6 –Anf. 7. Jhrh.
11	1	0,2	1,5±0,1	6,0+1,5=7,5	7,4 ÷ 7,6	Mitte. 8. Jhrh.
10	1	0,2	1,5±0,1	7,5+1,5=9,0	8,9 ÷ 9,1	Ende 9.–Anf. 10. Jhrh.
9	1	0,2	1,5±0,1	9,0+1,5=10,5	10,4 ÷ 10,6	Mitte 11. Jhrh.
8	1	0,2	1,5±0,1	10,5+1,5=12,0	11,9 ÷ 12,1	Ende 12.–Anf. 13. Jhrh.
6	1,5	0,3	2,3±0,2	12,0+2,3=14,3	14,1 ÷ 14,5	1. Hälfte 15. Jhrh.
* 4	1,5	0,3	2,3±0,2	14,3+2,3=16,6 * 16,8	16,4 ÷ 16,8	2. Hälfte 17. Jhrh. * Ende 17. Jhrh.
* 3	0,7	0,14	1,07±0,1	16,6+1,07=17,67	17,5 ÷ 17,7 *17,6 ÷ 17,8	* 2. Hälfte 18. Jhrh.
2	0,5	0,1	0,6±0,1	17,67+1,5=18,27	18,1 ÷ 18,3	1. Hälfte 19. Jhrh.
* 1	0,5	0,1	0,6±0,1	18,27+0,6=18,87	18,87 ÷ 18,97 *18,8 ÷ 19,0	Ende 19. Jhrh. * Ende 19.–Anf. 20. Jhrh.

Tabelle 7. Flussbette des Sava-Flusses und die vertikalen Bewegungen in verschiedenen geschichtlichen Zeitabschnitten in dem Brežice- Gebiet (siehe auch die Abb. 12)

Tabela 7. Struge reke Save in vertikalni premiki v različnih zgodovinskih obdobjih na področju Brežic (glej tudi sliko 12)

$S=1{,}3\times10^{-3}$ m/Jahr

No. des Fluss-laufes	H (m)	V 20%H (m)	t ×100 Jhr.	T ×100 Jahre	T ×100 Jahre	T Jahrhundert
14	7	1,4	10,7±2,1	13,8-10,7=3,1	1,0 ÷ 5,2	2.–6. Jhrh.
7	1	0,2	1,5±0,1	15,3-1,5=13,8	13,7 ÷ 13,9	2. Hälfte 14. Jhrh.
5	1	0,2	1,5±0,1	16,8-1,5=15,3	15,2 ÷ 15.4	1. Hälfte 16. Jhrh.
* 4	1,5	0,3	2,3±0,2	* 16,8	16,6 ÷ 17,0	* 2. Hälfte 17. Jhrh.
* 3	0,6	0,12	0,9±0,1	16,8+0,9=17,7	17,6 ÷ 17,8 * 17,6÷17,8	* 2. Hälfte 18. Jhrh.
* 1	0,7	0,14	1,07±0,1	17,7+1,07=18,77	18,7 ÷ 18,9 *18,8 ÷ 19,0	* Ende 19.–Anf.20.Jhrh.

V- Terrassenhöhe; H- vertikale Bewegung; S- vertikale Bodenbewegung; t- relativer Zeitabschnitt; T- mittlere absolute Zeit; T- Zeitabschnitt ausgedrückt in absoluter Zeit, mit Fehler-Berücksichtigung; * Zeit- und Raum-Festpunkt des Flusslaufes

Tabelle 8. Unterschiede in der Datierung der Zeitfestpunkte der Flussläufe nach den historischen Daten und nach der Ausrechnungen

Tabela 8. Razlike v datiranju repernih rečnih strug med zgodovinskimi podatki in izračuni

No. des Fluss-laufes	T (×100 Jahre)		*deltaT* (×100 Jahre)
	Tab. 6	Tab. 7	
1	18,7	18,7	0,0
2	17,7	17,6	0,1
4	16,6	16,8	0,2
15	3,0	3,1	0,1

Tektonische Aktivität zwischen Krško und Brežice in der geschichtlichen Zeit

Aus dem Netz der alten Sava-Flussläufe sind zwei Gebiete zu ersehen, welche sich nach dem Typ des Mäandrierens, der Dichte von alten Flussbetten und deren Richtungen unterscheiden (Abb. 12). Nordwestlich von der Linie Vihre – Trebež liegt das Gebiet von Drnovo, südöstlich aber das Brežice-Gebiet. Im Drnovo-Gebiet zeigen die alten Flussbetten auf die überwiegenden aktiven Oberflächen-Störungen in der Richtung NO-SW und W-O, das Gebiet von Brežice auf die aktiven Oberflächenstörungen überwiegend in der Richtung NW-SO und N-S. Beide Gebiete sind unter dem Einfluss der Segmente von zwei Störungszonen, eine bei Drnovo und die zweite bei Brežice, welche die grösste seismische Wirkungsfähigkeit haben (Abb. 2).

Als Masstab der tektonischen Aktivität wurden die Daten über die Grösse der vertikalen Bewegung (V) und die absolute Zeit (T) aus den Tabellen 6 und 7 berücksichtigt. Die graphische Darstellung zeigt die Abbildung 13. Die Grösse der vertikalen Bewegungen (V) bedeutet die seismischen Bewegungen, welche bei den Erdbeben entstanden sind, zusammen mit den aseismischen Bewegungen, entstanden mit den ständigen Gleitungen (creeping). Beide Bewegungsarten aber wurden als die tektonische Aktivität bezeichnet.

Aus dem Graph (Abb. 13) ist zu ersehen, dass die beiden Gebiete, von Drnovo und Brežice, mehr oder weniger unabhängig tätig sind. Eine gemeinsame Aktivität ist erst in dem 17. Jahr. ersichtlich. Das Drnovo-Gebiet zeigt im Zeitabschnitt zwischen dem 6. Jahrh. vor Chr. und dem Anfang des 20. Jahrh, die grösste tektonische Aktivität zwischen der zweiten Hälfte des 1. Jahrh. und der Mitte des 6. Jahrh. n. Chr. (V=1,4 m). Das ist auch in dem dichteren Netz der alten Flussbetten und Mäandren ausgeprägt (Abb. 12). Eine deutlich schwächere tektonische Aktivität zeigt das Ge-

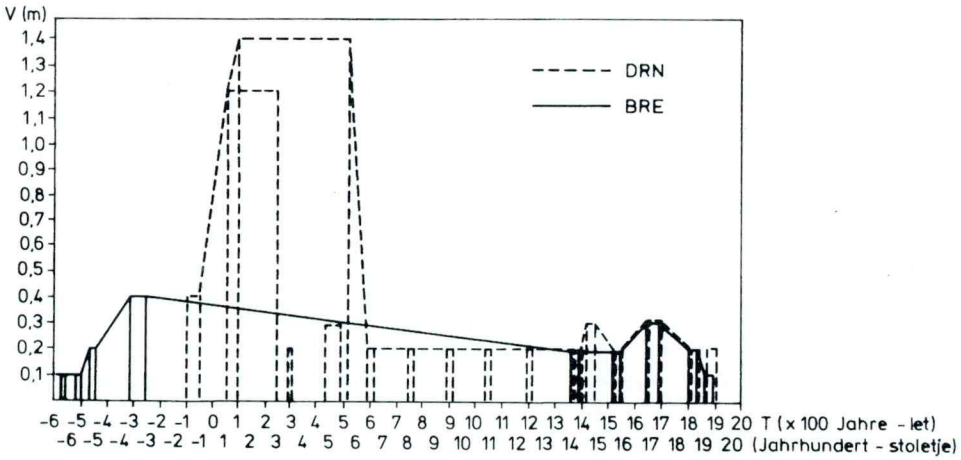


Abb. 13. Graph der tektonischen Aktivität zwischen Krško und Brežice

T- absolute Zeit; **V**- vertikale Bewegung; **DRN**- Gebiet von Drnovo; **BRE**- Gebiet von Brežice

Sl. 13. Graf tektonske aktivnosti med Krškim in Brežicami

T- absolutni čas; **V**- vertikalni premik; **DRN**- področje Drnovega; **BRE**- področje Brežic

biet von Drnovo in der ersten Hälfte des 15. Jahrh. (V=0,3 m) und wieder im 17. Jahrh. (V=0,3 m) mit einem weniger dichten und verzweigten Netz der alten Flussläufe.

Das Brežice-Gebiet war in dem historischen Zeitabschnitt tektonisch weniger aktiv als das Drnovo-Gebiet. Das Brežice-Gebiet erreichte in dem abgehandelten Zeitabschnitt zwei Höhepunkte: zwischen der zweiten Hälfte des 4. Jahrh. vor Chr. und der Mitte des 3. Jahrh. vor Chr. (V=0,4 m) und in dem 17. Jahrh. (V=0,3 m). Am Ende des 19. Jahrh. und am Anfang des 20. Jahrh. zeigt das Drnovo-Gebiet eine Tendenz des Anhaltens der Werte aus dem 19. Jahrh. (V=0,2 m), das Gebiet von Brežice aber zeigt eine abfallende Tendenz (V=0,1 m).

Die vorgestellten Ausführungen zeigen eine hohe Stufe der Korrelation zwischen den aktiven Tiefstörungen, den aktiven Oberflächen-Störungssystemen, den Flusslauf-Verlegungen und den vertikalen Bewegungen in der geschichtlichen Zeit.

Schlussfolgerungen

Der Krško-Einbruchstal, welcher sich in Südost-Slowenien befindet, ist eine intramontane tektonische Senkung, welche allmählich vom oberen Pliozän bis heute entstanden ist. Dessen Ausbildung ist noch nicht beendet, worüber die tektonischen Vorgänge und Erdbeben zeugen. Die rezente tektonische Aktivität ist in den morphotektonischen Merkmalen, in den unnormalen Flussverlegungen und in den archäologischen Fundstellen sichtbar.

Die Korrelation von geomorphologischen, archäologischen, geschichtlichen, seismotektonischen und seismologischen Daten, sowie deren Bearbeitung mit statistischen Methoden hat eine hohe Stufe der Wahrscheinlichkeit gezeigt. Im Gebiet der archäologischen Ausgrabungen des Mittelalter-Marktes Gutenwerth zeigen die Katastrophen auf Erdbeben und auf Überschwemungen bei den Erdbeben wegen der Absenkung des Gebietes. Die Mächtigkeit der Anschwemmungen übereinstimmt im Rahmen der Fehler mit der Grösse der vertikalen Einsenkung, diese aber mit den Erdbeben-Magnituden. Die Erdbeben, bestimmt aus den archäologischen Daten, stimmen einerseits mit den geschichtlichen Erdbebendaten, andererseits aber mit der seismischen Wirkungsfähigkeit der aktiven Tiefstörungen als den Erdben-Ursprüngen überein, welche mit den geologischen Methoden festgestellt wurden.

Auf Grund der archäologischen, geomorphologischen und geologischen Daten wurden die vertikalen Bodenbewegungen in verschiedenen Zeitabschnitten ausgerechnet und eine Funktionsabhängigkeit der vertikalen Bewegungen mit der Zeit wurde, in Form eines Polynoms der 4. Stufe mit 80% Wahrscheinlichkeit, aufgestellt. Die Fuktionsabhängigkeit zeigte den Anfang der jüngsten neotektonischen Phase 25.000 Jahre vor Chr. an, was mit dem geologisch festgestellten Anfang in dem Interstadial Würm II/III übereinstimmt. Nach der Funktionsabhängigkeit zeigt sich die Möglichkeit einer Prognose des Höhepunktes der jüngsten neotektonischen Phase mit maximalen Magnituden von 6,1 bis 6,2 nach Richter und der Phase-Endezeit.

Die morphotektonischen Merkmale zeigen, dass die Ursache für die Sava-Flussverlegungen in der alluvialen Schotterebene die seismischen und aseismischen Bewegungen an aktiven Oberflächen-Störungen sind. Ein quantitativer Beweis dafür wurde auf Grund der Höhen von Flussterrassen und der festgestellten vertikalen Bodenbewegungen abgeleitet. Für verschiedene alte Flussläufe, die noch heute in Form von Flussterrassen und trockenen Flussbetten erhalten sind, wurde die

Entstehungszeit ausgerechnet. Die erhaltenen Ergebnisse übereinstimmen mit den bekannten Flusslauf-Datierungen aus der Römerzeit (nach den archäologischen Angaben), aus dem 17. Jahrhundert (nach der alten topographischen Karte aus dem Jahr 1909 und der alten Bildgraphik aus dem Jahr 1689), aus der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts (nach der Josephinischen Militärlandeskarte aus Jahren 1763-1787) und dem Ende des 19. bis Anfang des 20. Jahrhunderts (nach der alten topographischen Karte aus dem Jahr 1909).

Alle bisherigen Ausführungen sprechen auch über die relativ schnellen Relief-Veränderungen wegen der Flusslaufverlegungen in der Alluvialebene des Krško-Einbruchstales – nicht nur in der geologischen, sondern auch in der menschlichen Geschichte. Solche Veränderungen und Katastrophen, deren Ursache die tektonischen und Erdbeben-Erscheinungen gewesen sind, hatten auch die Veränderungen der Zivilisation beeinflusst.

Danksagung

Der Verfasser ist Herrn Dr. Gerhard Schäffer von der Geologischen Bundesanstalt Wien und Prof. Dr. Stanko Buser von der Universität in Ljubljana für ihre Anregungen zur Ausarbeitung dieses Beitrags zum aufrichtigen Dank verpflichtet. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. S. Buser und Herrn Prof. Dr. Eduard Prelogović von der Universität in Zagreb für deren nützliche Rezensionbemerkungen. Der Verfasser dankt auch Herrn Dipl.-Ing. Janez Štern für die deutsche Übersetzung der Arbeit aus der slowenischen Sprache und Herrn Mag. Vladimir Žumer, Direktor des Archivs von Slowenien, für das Vermitteln der alten topographischen Karten.

Recentna tektonska aktivnost Krške udorine

Krška udorina v jugovzhodni Sloveniji je neotektonska udorina, ki nastaja postopoma vse od zgornjega pliocena do danes. Njeno oblikovanje še ni končano, kar pričajo tektonski in potresni pojavi. Recentna tektonska aktivnost je vidna v morfotektonskih pojavih, v nenormalnih pretočitvah rek in v arheoloških najdiščih.

Komparacija geomorfoloških, arheoloških, zgodovinskih, seizmotektonskih in seizmoloških podatkov in njihova obdelava s statističnimi metodami je pokazala visoko stopnjo verjetnosti. Arheološka izkopavanja srednjeveškega trga Gutenwerth kažejo ob potresih na katastrofe in poplavljanje zaradi ugrezanja ozemlja. Debelina naplavin se v okviru napak ujema z velikostjo vertikalnega ugrezanja, ta pa z magnitudami potresov. Potresi, ki so ugotovljeni iz arheoloških podatkov, se po eni strani ujemajo s podatki o zgodovinskih potresih, po drugi strani pa s seizmično zmogljivostjo aktivnih globinskih prelomov kot seizmičnih izvorov, ki so bili določeni po geoloških metodah.

Na podlagi arheoloških, geomorfoloških in geoloških podatkov je izračunana hitrost vertikalnih premikov v različnih časovnih obdobjih in postavljena funkcijska odvisnost vertikalnih premikov od časa v obliki polinoma 4. stopnje z 80-odstotno verjetnostjo. Funkcijska odvisnost je pokazala začetek najmlajše neotektonske faze 25.000 let pred Kr., kar se ujema z geološko določenim začetkom v interstadialu würm II/III. Funkcijska odvisnost nam nakazuje možnost prognoziranja vrhunca najmlajše neotektonske faze z maksimalnimi magnitudani 6,1 in 6,2 po Richterju in čas njenega konca.

Morfotektonski znaki kažejo, da so prestavitvam reke Save v aluvialni prodni ravnici vzrok seizmični in aseizmični premiki ob aktivnih površinskih prelomih. Kvantitativni dokaz za to smo ugotovili na podlagi višine rečnih teras in ugotovljene hitrosti vertikalnih premikov. Posameznim starim rečnim tokovom, ki so še danes ohranjeni v obliki rečnih teras in suhih strug, smo izračunali čas nastanka. Dobljeni rezultati se ujemajo z znanimi datacijami rečnih tokov iz rimskega obdobja (po arheoloških podatkih), iz 17. st. (po stari topografski karti iz leta 1909 in stari grafiki iz leta 1689), iz 2. polovice 18. st. (iz jožefinske vojaške karte iz let 1763–1787) in iz konca 19. do začetka 20. stol. (po stari topografski karti iz leta 1909).

Vsa dosedanja izvajanja tudi govore o relativno hitrih spremembah reliefa zaradi sprememb rečnega toka v aluvialni ravnici Krške udorine ne samo v geološki, ampak tudi v človeški zgodovini. Take spremembe in katastrofe, katerih vzrok so tektonski in potresni pojavi, so vplivale tudi na civilizacijske spremembe.

Schriftum

Aki, K. 1992: Hight-order interrelations between seismogenic structures and earthquake process. – Tectonophysics *211*, No. 1–4, 1–12. Elsevier, Amsterdam.

Bonilla, M. G. & Bucknam, R. C. 1970: Interim report on world wide historical surface faulting. Open File Rep. – U.S. Geol. Surv., Washington, D.C.

Bowman, D. & Gerson, R. 1968: Morphology of the Latest Quaternary surface faulting in the Gulf of Elat region, Eastern Sinai. – Tectonophysics *128*, 1/2, 97–119, Elsevier, Amsterdam.

Brodar, S. 1955: Kostanjevica ob Krki, paleolitska postaja na planem (Résumé: Kostanjevica sur Krka, station paléolithique en plein aire). – Razprave 4. razr. SAZU *3*, 433–462, Ljubljana.

Cluf, L. S., Hansen, W. C., Taylor, C. L., Weawer, K. D., Brogan, G. E., McClure, F. E., Idriss, I. M. & Bayney, J. A. 1982: Site evaluation in seismically active regions – an interdisciplinary team aproach. – Site selection considering tectonic and seismic data, Lecture 21.6.1, San Francisco.

Ellenberg, J. 1992: Recent fault tectonics and thier relations to the seismicity of East Germany. – Tectonophysics *202*, No. 2–4, 117–121, Elsevier, Amsterdam.

Enciklopedija Slovenije 1994: 8. Heft, S. 207. – Mladinska knjiga Ljubljana.

Grafenauer, B. (ed.), 1979: Zgodovina Slovencev. – Cankarjeva založba, Ljubljana.

Josephinische Landesaufnahme, Militarische Sektion Rann, 1:28.800, 1763–1787. Reprint aus Buch: Josephinische Landesaufnahme 1763–1787 für das Gebiet der Republik Slowenien – Karten. ZC SAZU und Arhiv Slovenije, Ljubljana 1969.

Kasahara, K. 1981: Earthquake mechanics. – Cambridge University Press.

Pleničar, M., Premru, U. & Herak, M. 1976: Osnovna geološka karta SFRJ, list Novo mesto, 1:100.000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.

Pleničar, M. & Premru, U. 1977: Tolmač za list Novo mesto, (Abstract: Geology of the sheet Novo mesto), Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.

Premru, U. 1976: Neotektonika vzhodne Slovenije (Abstract: Neotectonic Evolution of Eastern Slovenia). – Geologija *19*, 211–249, Ljubljana.

Premru, U. 1990 a: Seizmična zmogljivost aktivnih globinskih prelomov, nova metoda (Abstract: Seismic capability of the active deep faults – a new technique). – XII. kongr. na geol. na Jugosl., knj. 5, 114–162, Ohrid.

Premru, U. 1990 b: Uporabnost geomorfologije v tektoniki s pomočjo daljinske zaznave (Abstract: Application of geomorphology in tectonics by using remote sensing data). – 5. znanstveno posvetovanje geomorfologov Jugoslavije, Krško 1990, zbornik referatov, 173–180, Ljubljana.

Prochazkova, D. 1983: Relationship among the source parameters of earthquake in Europe. – Tectonophysics, *93*, 3/4, 307–311, Elsevier, Amsterdam.

Ribarič, V. 1982: Seizmičnost Slovenije, katalog potresov (792 n.e. – 1981). – Publikacije Seizmološkega zavoda SR Slovenije, Serija A, št. 1–1 Ljubljana. Seismicity of Slovenia, Catalogue of earthquakes (792 A.D. – 1981). – Publications of the Seismological Survey of the SR Slovenia, Series A, No. 1–1, Ljubljana.

SAZU, 1975: Arheološka najdišča Slovenije. – Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Inštitut za arheologijo, Državna založba Slovenije, Ljubljana.

Slemmons, D. B. 1977: State of the art for assesing earthquake hazards in the United States. Rep. 6: Faults and earthquake magnitude. – U.S. Army Corps Eng. Misc. Pap., S–73–1.

Spezialkarte Kfeld. Rann und Samobor, 1:75.000. – R. Lechner (Wilhelm Müller), k.u.k Hof- und Universitätsbuchhandlung in Wien, 1909.

Swanson, M. T. 1992: Fault structure, wear mechanics and rupture processes in Pseudotachylyte generation. – Tectonophysics, *204*, No. 3/4, 223–242, Elsevier, Amsterdam.

Šercelj, A. 1963: Razvoj würmske in holocenske gozdne vegetacije v Sloveniji (Zusammenfassung: Die Entwicklung der Würm- und der Holozän-Waldvegetation in Slowenien). – Razprave VII, SAZU razr. IV, 361–418, Ljubljana.

Šercelj, A. 1970: Würmska vegetacija in klima v Sloveniji (Zusammenfassung: Würmzeitliche Vegetation und Klima in Slowenien). – Razprave XIII, SAZU razr. IV, 209–249, Ljubljana.

Šikić, K., Basch, O. & Šimunić, A. 1972: Tumač za list Zagreb (Abstract: Geology of the sheet Zagreb), Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.

Šikić, K., Basch, O. & Šimunić, A. 1978: Osnovne geološka karta SFRJ, list Zagreb. – Zvezni geološki zavod, Beograd.

Šribar, V. & Stare, V. 1977: Spremembe rečnega korita v srednjem toku Krke. – Krško skozi čas, 617–625, Krško.

Tornquist, A. 1918: Erdbeben von Rann an der Save vom 29. Jänner 1917. – Mitteilungen der Erdbeben-Kommission, Neue Folge, Nr.52, Akad.d.Wiss. in Wien, Math.-naturwiss. Klasse, Wien.

Valič, A. 1994: Časovna in kulturna preglednica arheoloških najdišč Slovenije. – Gorenjski tisk, Kranj.

Vischer, G. M. 1689: Topographia ducatus Stiriae, Graz. Reproduzierte Ausgabe, Abbildung 91 und 92. – Cankarjeva založba, Ljubljana, 1971.