

Vergleichende geomorphologische Untersuchungen
an jungpleistozänen Verwerfungsstufen
(FAULT SCARPS) in SW – Utah im Hinblick
auf die seismische Aktivität in dieser Region

Von HORST STERR, Kiel

1. Einleitung

Untersuchungen von Verwerfungen und tektonischen Störungslinien werden meist von jenen Wissenschaftlern durchgeführt, welche die rezenten seismischen Prozesse in Zusammenhang mit einer potentiellen Gefährdung durch Erdbeben zu erforschen trachten. Dabei konzentrieren sich Geophysiker, Geodäten etc. vor allem auf solche seismisch aktiven Räume, welche in der jüngeren geschichtlichen Vergangenheit wiederholt von verheerenden Katastrophen betroffen waren, wie z.B. Kalifornien oder China.

Nicht selten fehlen jedoch historische Berichte und Beobachtungen an tektonisch aktiven Störungslinien, sei es aufgrund sehr spärlicher menschlicher Besiedlung, sehr kurzer Siedlungsgeschichte, mangelnder Aufzeichnung von Daten etc. Erst eine Analyse der längerzeitlichen seismischen Entwicklung in der Umgebung solcher Verwerfungen kann nähere Hinweise auf eventuell bestehende Risiken durch Erdbeben für einen definierten Raum erbringen. Da aber Messungen und Beobachtungen mit geophysikalischen Methoden nur über relativ kurze Zeiträume durchgeführt werden können, unternahm der Verfasser den Versuch, mit Hilfe quantitativer geomorphologischer und geologischer Geländestudien das seismische Verhalten langfristig aktiver Verwerfungssysteme zu analysieren und zu interpretieren.

Der ausgewählte Raum, Beaver Basin in SW-Utah, ist einmal durch ein recht hohes seismisches Energiepotential charakterisiert, ohne daß stärkere Erdbeben-tätigkeit in der 150-jährigen Besiedlungsgeschichte bekannt wurde (ANDERSON und BUCKNAM, 1978; WALLACE, 1978). Andererseits bietet diese Region durch die Anlage zahlreicher spätquartärer Verwerfungsstufen sowie aufgrund geeigneter quartär-geologischer Gegebenheiten für eine solche Aufgabe recht günstige Arbeitsbedingungen.

2. Allgemeine Voraussetzungen für geomorphologische Untersuchungen von fault scarps

Nur in einem Raum, wo tektonische, geologische, pedologische und geomorphologische Faktoren in günstiger Weise zusammenwirken, läßt sich die seismische Entwicklungsgeschichte einer Bruchzone über einen Zeitraum von mehreren 10^2 bis 10^4 Jahren erfolgreich rekonstruieren (WALLACE, 1977).

Als wesentliche bzw. günstige Voraussetzungen für die geomorphologische Analyse von Bruchstufen sind u.a. anzusehen:

1. Die Ausbildung einer Verwerfung in wenig verfestigten, d.h. leicht erodierbaren Lockersedimenten, wie z.B. fluviatilem Alluvium.
2. Die weiträumige, konkordante Ablagerung mehrerer Schichtpakete und somit deren stratigraphische und pedologische Korrelierbarkeit.
3. Eine vorherrschend vertikale Bewegungskomponente entlang der Verwerfung, welche zu meßbarem Schicht- und Oberflächenversatz, d.h. zur Ausbildung von fault scarps führt.
4. Die Möglichkeit der absoluten Alterskontrolle entweder der tektonischen Störung selbst oder der von ihr erfaßten Sedimentschichten.

3. Voraussetzungen für fault scarp - Studien in Beaver Basin, SW-Utah

3.1 Quartärgeologische Gegebenheiten dieses Raums

Beaver Basin liegt als kleines, ehemals abflußloses, weitgehend geschlossenes Becken an der Grenze zwischen den Großlandschaften des Colorado Plateau und der Basin-and-Range Region. (Abb. 1) Es wird seit seiner Öffnung im spät-Pliozän nach Westen hin vom Beaver River und vier größeren Nebenflüssen entwässert, welche in Abhängigkeit zu den wiederholten Phasen pleistozäner Vergletscherung der angrenzenden Tushar Mountains seither mächtige Sedimentpakete v.a. in der östlichen Hälfte des Beckens abgelagerten. Die pleistozänen Klimaschwankungen veränderten mehrmals im zyklischen Wechsel die Erosions- und Ablagerungsbedingungen der Gewässer, was zur Herausbildung einer gestuften Abfolge von Aufschüttungs- und Abtragungsflächen im Becken führte. Stratigraphische und geomorphologische Anordnung der Sedimentschichten bzw. ihrer Oberflächen deuten an, daß seit der Mitte des Pleistozäns Kaltzeiten mit der Aufschüttung von fluviatilen Sedimenten im Becken, Warmzeiten dagegen mit der Zerschneidung und Ausräumung dieses Materials verknüpft waren.

Insgesamt werden in Beaver Basin drei subsequent abgelagerte, spätpleistozäne Flußterrassen sowie drei mittelpleistozäne Einebnungs- bzw. Aufschüttungsflächen unterschieden (STERR, 1980; MACHETTE, 1980). Die holozäne Talauie erreicht nur im mittleren Bereich des Beaver River größere flächenhafte Ausdehnung.

3.2 Der spätquartäre Tektonismus dieses Raumes

All diese Aufschüttungs- und Einebnungsflächen, mit Ausnahme der holozänen Talauie, wurden im Verlauf des Pleistozäns wiederholt von ausgedehnten bruchtektonischen Störungen in Form von Abschiebungen (normal faults) betroffen, was die

Abb. 1: Übersichtskarte zur Lage von Beaver Basin und Lake Bonneville

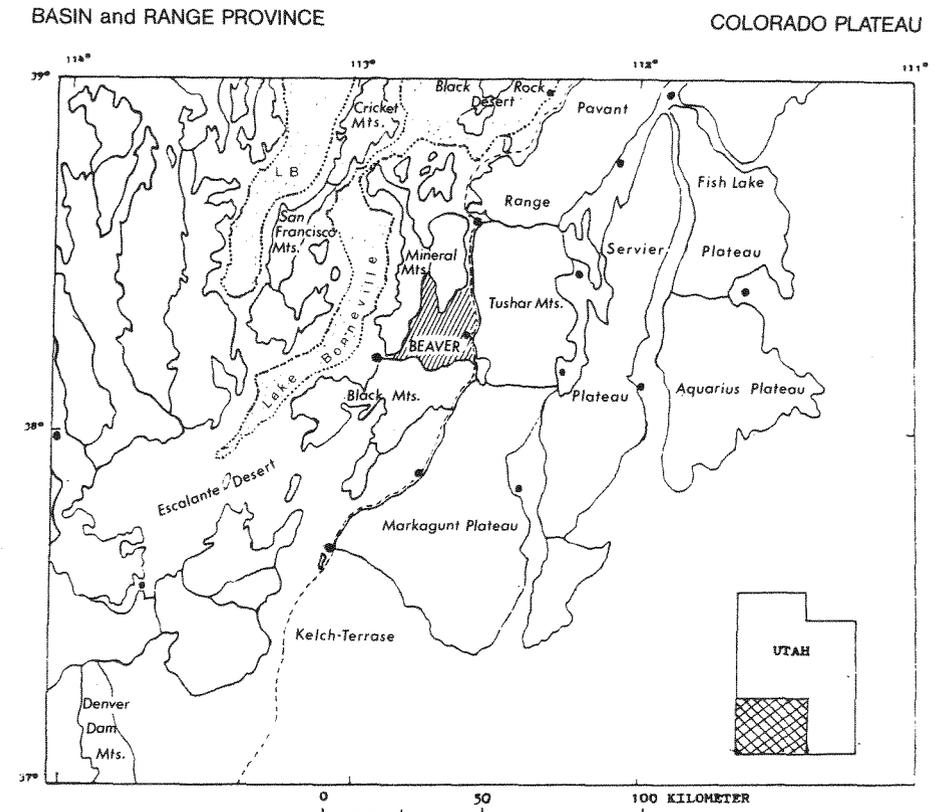
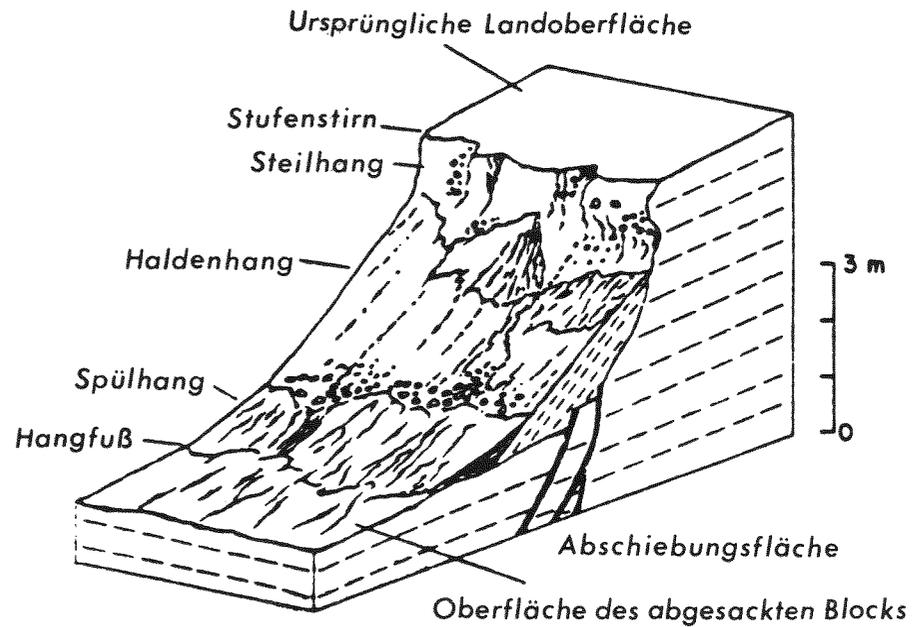


Abb. 2: Schematisierte Darstellung einer rezenten Verwerfungsstufe (nach Wallace)



Bildung zahlreicher fault scarps zur Folge hatte. Die Bewegungskomponente entlang der Verwerfungslinien verlief dabei überwiegend vertikal, wobei die Verschiebungsfläche im Winkel von 65° bis 90° einfällt (Abb. 2). Die Sprunghöhe an diesen Verwerfungen betrug im Durchschnitt etwa 1–2 m; der sich plötzlich und sprunghaft äußernde Oberflächenversatz muß deshalb wohl Erdbeben von großer bis sehr großer Magnitude hervorgebracht haben (STERR, 1980).

Entlang der Hauptverwerfungslinien in Beaver Basin (Abb. 3) ist eine mehrmalige Wiederbelebung ihrer seismischen Aktivität sehr eindrucksvoll dokumentiert durch die sprunghafte Zunahme der Höhe der Verwerfungsstufen, dort wo sie zunehmend ältere Flächenniveaus schneiden (Abb. 4). Der tektonische Versetzungsbetrag reicht in Beaver Basin von ca. 1,5 m an den zuletzt gebildeten scarps auf der untersten, d.h. spätpleistozänen Flußterrasse bis mehr als 30 m an der höchsten Stufe, welche die ältesten mittelpleistozänen Ablagerungen schneidet (Abb. 4).

3.3 Der zeitliche Rahmen

Neben der relativen chronologischen Einordnung tektonisch versetzter Sedimentschichten, wie sie in Beaver Basin mit Hilfe stratigraphischer und pedologischer Korrelationen recht gut gelang, mußte aber auch durch absolute Datie-

Abb. 3: Jungquartäre Verwerfungen (16 bis 74) und tektonisch versetzte Schichtoberflächen (N_0 bis N_6) im Entwässerungssystem des Beaver River, Sw – Utah

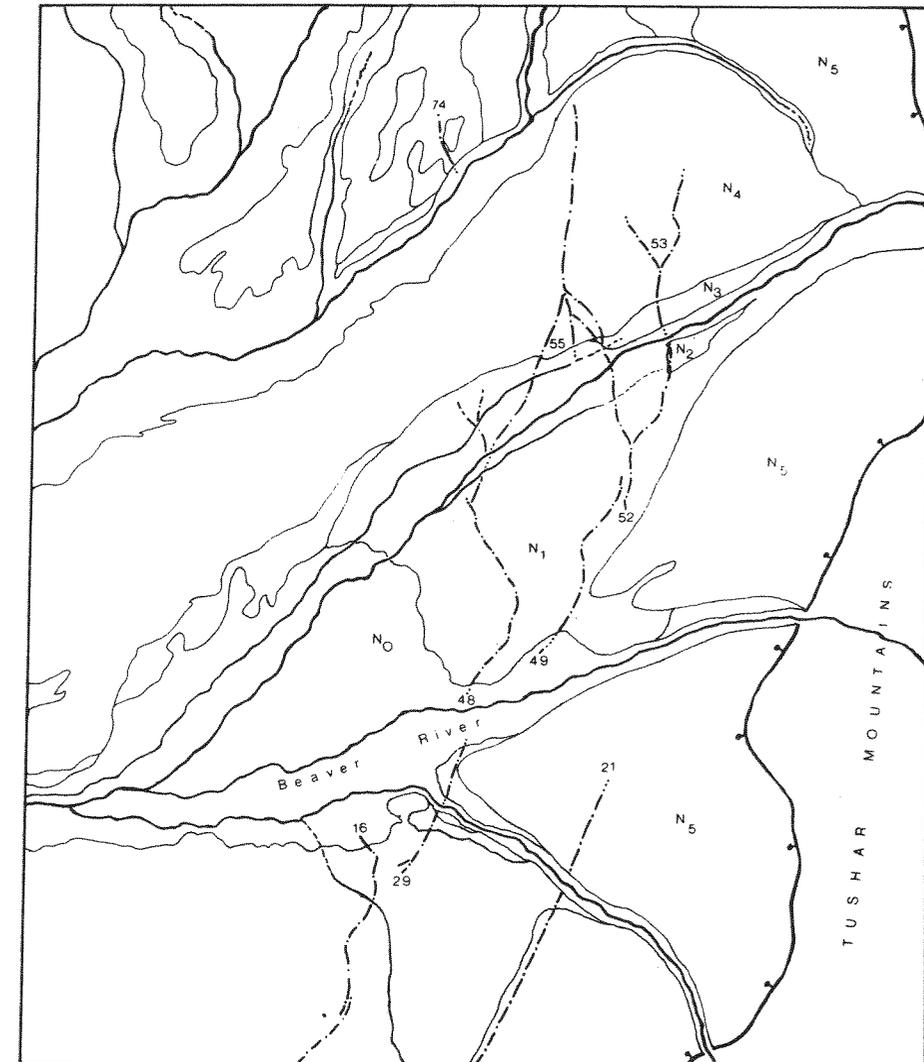
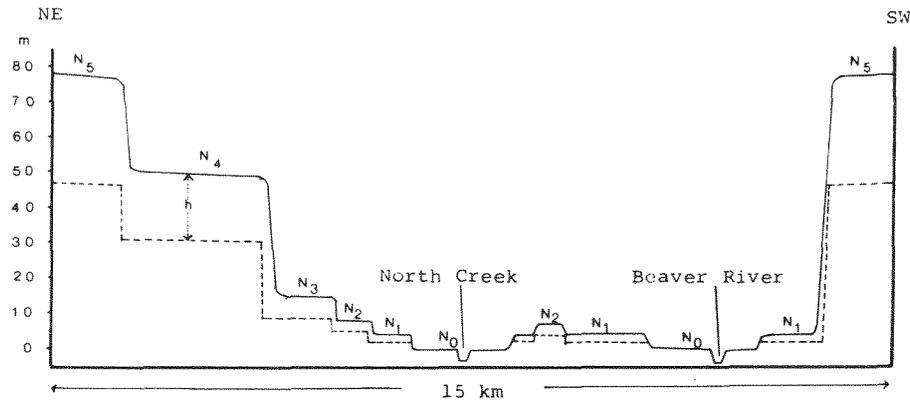
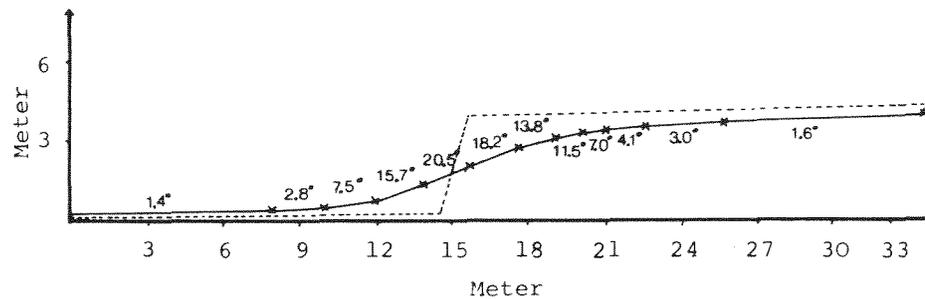


Abb. 4: Schematisiertes Querprofil durch die spätquartäre Stratigraphie und Topographie in Beaver Basin



N_0 bis N_5 : Oberflächen holozäner bis mittelpleistozäner Sedimentschichten
 - - - - - Basislinie der tektonischen Oberflächenversetzung auf dem jeweiligen Flächenniveau
 h: Abstand zwischen der Basislinie und der Oberfläche, entspricht der max. Höhe der Verwerfungsstufen auf dem jeweiligen Flächenniveau

Abb. 5: Typisches Hangprofil eines jungpleistozänen fault scarp in Beaver Basin im Vergleich mit der schematisierten Form einer rezenten Verwerfungsstufe



rungsmethoden ein zeitlicher Rahmen für die offensichtlich lang dauernde seismische Geschichte dieser Region festgelegt werden.

Dies geschah mittels einer neuartigen Datierungsmethode, der sog. Uran-Thorium-Trenddatierung, welche auf der allmählichen Anlagerung grundwassergebundener Isotopen der U^{238} Kette in einem geschichteten, wasserdurchlässigen Sedimentkörper basiert (ROSHOLT, 1966, 1981). Darüber hinaus konnten fossile Küstenlinien des spätpleistozänen Lake Bonneville sowie datierte vulkanische Aschenablagerungen für Altersvergleiche und -rückschlüsse herangezogen werden.

Daraus resultiert folgende absolute Altersabfolge für die verschiedenen Schicht- bzw. Flächenniveaus in Beaver Basin (Abb. 3, 4):

- rezente Flußauflage (N_0) \leq 12 000 Jahre
- unterste Flußterrasse (N_1) = 25 000 Jahre
- mittlere Flußterrasse (N_2) = 120 000 – 160 000 Jahre
- höchste Flußterrasse (N_3) = 270 000 Jahre
- alte Einebnungsfläche (N_4) = 450 000 Jahre
- älteste Ablagerungsfläche (N_5) \approx 650 000 Jahre

Somit ergibt sich für die jüngsten fault scarps in Beaver Basin ein Mindestalter von 12 000 Jahren, während der Beginn der seismotektonischen Aktivität in diesem Raum vor etwa 600 000 Jahre anzusetzen ist. Das absolute Alter einer individuellen Sedimentschicht stellt gleichzeitig eine zeitliche Obergrenze dar für alle tektonischen Störungen, welche diese Schicht seither erfahren hat.

4. Morphologische und morphometrische Studien an fault scarps in Beaver Basin

Erste detaillierte Untersuchungen jungquartärer Verwerfungsstufen, die in unverfestigten Lockersedimenten angelegt wurden (Abb. 2), zeigten eindeutige Zusammenhänge zwischen dem Alter einer Stufe und ihrer morphologischen Ausprägung (WALLACE, 1977).

Als wichtigster Hangparameter weist der maximale Böschungswinkel eine linear-inverse Relation zum Alter der Stufe auf, d.h. er nimmt mit zunehmendem Alter kontinuierlich ab, wobei auch eine direkte Abhängigkeit von der Höhe des fault scarp postuliert wird (BUCKNAM und ANDERSON, 1979).

Um diese an holozänen fault scarps, z.B. in Scipio, Utah sowie an spätpleistozänen fossilen Seekliffs des Lake Bonneville beobachteten morphologischen Gesetzmäßigkeiten auch für die Verwerfungsstufen in Beaver Basin zu überprüfen, wurden entlang ausgewählter scarps eine maximale Reihe von Hangprofilen im Gelände vermessen. Die durch direkte Messung des Hangwinkels in kurzen Abständen (1–2m) gewonnenen Daten dienten nach ihrer zeichnerischen Darstellung durch einen Computer-Plotter einmal als Grundlage für die Definition weiterer signifikanter Hangparameter als auch zu direkten morphologischen Vergleichen mit den Ergebnissen von WALLACE, BUCKNAM und ANDERSON etc. (Abb. 5).

Tab. 1: Vergleich zwischen scarps verschiedenen Alters von SW-Utah auf der Grundlage linearer Regressionsgleichungen mit den Parametern Θ und h

| Ort | Hangtyp | Gleichung | R_2 | Zahl der Profile | Hangwinkel bei Standardhöhe von 3 m |
|---------|---------------|-----------------------------|-------|------------------|-------------------------------------|
| Scipio | junger scarp | $\Theta=15,26+20,63/\log h$ | 0,86 | 15 | 25,0° |
| Lake B. | Seekliff | $\Theta=5,61+19,40/\log h$ | 0,90 | 16 | 14,8° |
| Beaver | ältere scarps | | | | |
| | scarp 48 | $\Theta=7,30+17,81/\log h$ | 0,95 | 9 | 15,6° |
| | scarp 49 | $\Theta=7,16+16,79/\log h$ | 0,91 | 9 | 15,2° |
| | scarp 52 | $\Theta=8,23+14,82/\log h$ | 0,93 | 3 | 15,3° |

Da entlang verschiedener jungquartärer fault scarps in Utah nur eine beschränkte Zahl von Profilmessungen durchgeführt werden konnte, die Signifikanz von Regressionsberechnungen aber weitgehend von der Menge der Einzeldaten abhängt, wurden auf mathematisch-empirischen Weg einige Korrelationsindizes erarbeitet, welche zusätzlich zu Θ und h die morphometrischen Parameter r und w in die quantitative Analyse miteinbeziehen.

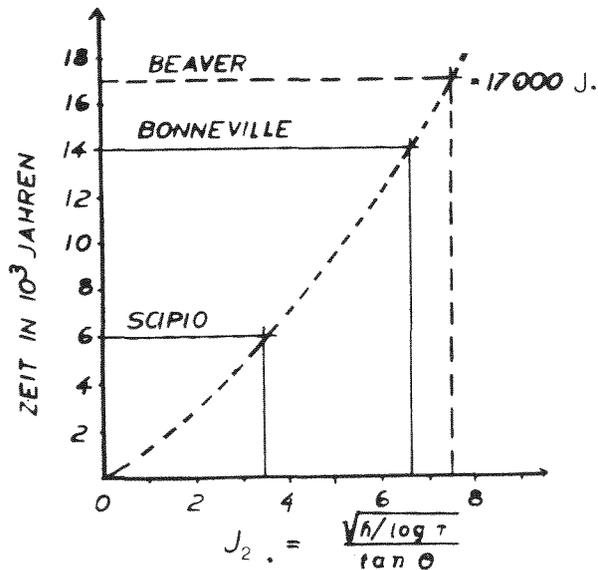
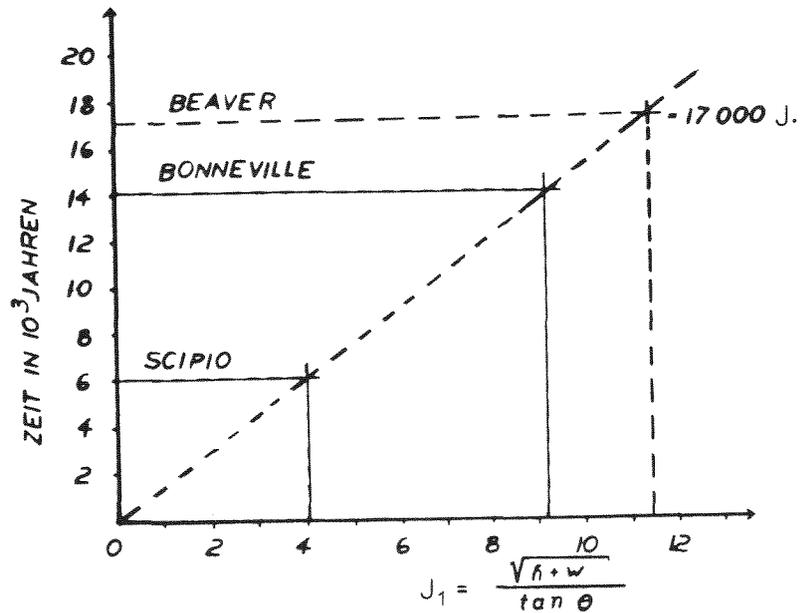
Ein besonders enger Bezug zwischen der sich entwickelnden Abtragungsform einer Verwerfungs- oder Erosionsstufe und deren Alter wird ausgedrückt durch $\text{Index}_1 = \frac{\sqrt{h+w}}{\tan \Theta}$ bzw. $\text{Index}_2 = \frac{\sqrt{h/\log r}}{\tan \Theta}$; unter Berücksichtigung ihrer morphographischen Qualität können diese Indizes auch als Rundungsindex (I_1) bzw. Rückverlagerungsindex (I_2) der Stufenstirn bezeichnet werden. Die Werte von Index_1 und Index_2 , welche für alle Verwerfungsstufen in Beaver Basin sowie für die Lake Bonneville und Scipio scarps errechnet wurden (Tab. 2), erlauben folgende Aussagen:

- Entlang einer bestimmten Stufe ergeben sich an nahezu allen Profilpunkten für I_1 und I_2 einheitliche Werte, deren Standardabweichung im Normalfall unter 10 % des Gesamtmittelwertes liegt.
- Hangprofile, deren Indexwerte um mehr als 20 % vom mittleren Indexwert abweichen, finden sich nur in solchen Stufenbereichen, welche nachträglich physiogeographisch oder anthropogen modifiziert wurden, z.B. durch hangparallele Unterschneidung, Hangabflachung durch Pflügen etc. (Tab. 2 Werte in Klammern).
- Individuelle scarps, deren Mittelwerte für I_1 und I_2 im direkten Vergleich weniger als 10 % Standardabweichung aufweisen, sind zur gleichen Zeit entstanden und durchliefen seither annähernd die gleiche morphologische Entwicklung, z.B. Beaver 48 und 49 (Tab. 3).

Tab. 2: Vergleich der morphometrischen Indizes für Stufenstirn-Rundung (I_1) und Stufenstirn-Rückverlagerung (I_2) an scarps von Beaver, Lake Bonneville und Scipio, Utah

| scarp Bezeichnung | Profil Bez. | $I_1 = \frac{\sqrt{h+w}}{\tan \Theta}$ | $I_2 = \frac{\sqrt{h/\log r}}{\tan \Theta}$ | | |
|-------------------|-------------|--|---|--------|-------|
| Beaver 48 | 48 - A | 10,31 | 6,71 | | |
| | 48 - TI | 12,53 | 6,41 | | |
| | 48 - F | 12,25 | 8,26 | | |
| | 48 - J | 10,72 | 7,54 | | |
| | 48 - K | 11,01 | 8,41 | | |
| | 48 - M | 11,84 | 6,77 | | |
| | 48 - N | 12,06 | 7,34 | | |
| | 48 - O | 11,21 | 7,22 | | |
| | 48 - P | 10,29 | 6,81 | | |
| | (48 - G) | (13,85) | (8,44) | | |
| | ----- | ----- | ----- | ----- | |
| Mittelwert | 11,47 | 7,34 | | | |
| St.Abw. | 0,99 | 0,71 | | | |
| Lake Bonneville | 20 - 15 | 10,57 | 7,53 | | |
| | 24 - 02 | 9,05 | 6,09 | | |
| | Drum Mtns. | 20 - 12 | 10,25 | 6,75 | |
| | | 20 - 13 | 8,55 | 6,68 | |
| | | 20 - 14 | 9,10 | 6,47 | |
| | | 21 - 03 | 8,18 | 6,21 | |
| | | 21 - 05 | 9,51 | 6,66 | |
| | | 21 - 01 | 8,51 | 6,52 | |
| | | (24 - 03) | (7,49) | (6,91) | |
| | | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | | Mittelwert | 9,22 | 6,64 | |
| St.Abw. | | 0,85 | 0,45 | | |
| Scipio 2 | | Sc2 - A | 4,38 | 3,16 | |
| | Sc2 - B | 4,05 | 3,65 | | |
| | Sc2 - C | 3,89 | 3,46 | | |
| | ----- | ----- | ----- | ----- | |
| | Mittelwert | 4,10 | 3,42 | | |
| St.Abw. | 0,24 | 0,25 | | | |

Abb. 7: Alterstrendkurven, berechnet auf der Grundlage der morphometrischen Indizes I_1 und I_2 für Scipio, Lake Bonneville und Beaver scarps



- Individuelle scarps, deren Mittelwerte für I_1 und I_2 im gegenseitigen Vergleich eine Standardabweichung von 20 % oder mehr aufweisen, sind zu verschiedenen Zeiten gebildet worden, vorausgesetzt sie unterlagen seit ihrer Entstehung annähernd den gleichen Abtragungsbedingungen, z.B. Beaver und Scipio scarps.
- Scarps mit vergleichsweise niedrigen Werten für I_1 und I_2 , wie z.B. der Scipio fault scarp, sind jünger als solche, für welche höhere Werte errechnet wurden, wie die Lake Bonneville bzw. Beaver scarps (vgl. Tab. 3).

Legt man den für die Hangprofile von Scipio und Lake Bonneville errechneten Indexwerten das Alter dieser Stufen zugrunde (Tab. 3), welches mit ca. 6 000 bzw. 14 000 Jahren hinreichend gut bekannt ist, so läßt sich aus der lineären Verbindung dieser beiden Datenpunkte mit dem Ausgangspunkt eine sog. Alterstrendkurve graphisch konstruieren; die Schnittpunkte der Indexwerte für die Beaver fault scarps 48 und 49 mit dieser Kurve ergibt dann für beide Verwerfungsstufen von Beaver ein fast identisches Alter von annähernd 17 000 Jahren (Abb. 7A/7B). Dies dokumentiert in überzeugender Weise die gleichermaßen hohe Korrelation der morphologischen Hangabtragungsindizes I_1 und I_2 zueinander sowie ihre unmittelbare Abhängigkeit vom Alter der zugrunde liegenden Stufenform.

Tab. 3: Vergleich der beiden morphologischen Indizes I_1 und I_2 für scarps von Beaver, Lake Bonneville und Scipio, unter Berücksichtigung des Alters der Stufen

| scarp Bezeichnung | $I_1 = \frac{\sqrt{h+w}}{\tan \Theta}$ | $I_2 = \frac{\sqrt{h/\log r}}{\tan \Theta}$ | Alter (in 10^3 Jahren) |
|-------------------|--|---|-----------------------------|
| Beaver 48 | 11,47 | 7,34 | ? (12 - 25 J.) |
| Beaver 49 | 11,58 | 7,69 | ? (12 - 25 J.) |
| Lake Bonneville | 9,22 | 6,64 | 14 |
| Scipio 2 | 4,10 | 3,42 | 6 |

Die Indizes I_1 und I_2 für Hangabtragung und -abflachung sind somit für das Studium von Verwerfungsstufen in 3facher Hinsicht bedeutsam:

- sie ermöglichen eine Kontrolle der statistischen Signifikanz morphometrischer Messungen von Hangprofilen auch für eine relativ kleine Datenmenge
- sie gestatten die Korrelation zwischen gleichaltrigen bzw. die Differenzierung zwischen verschiedenaltrigen fault scarps; dies gilt sowohl für Stufen, die durch eine einmalige tektonische Verschiebung gebildet wurden (mono-genetische oder single-event scarps), wie auch für komplex gebildete Stufen (multi-genetische scarps)
- sie ermöglichen eine Extrapolierung auf das absolute Alter von scarps mit Hilfe von quantitativ ermittelten Alterstrendkurven, vorausgesetzt mindestens zwei Datenpunkte (Stufen) sind eindeutig definiert.

5. Untersuchungen zur morpho-tektonischen Entwicklung ausgewählter fault scarps in Beaver Basin

Wie die morphologischen Analysen der Hangprofile aller Verwerfungsstufen in Beaver Basin zeigten, verändern sich Stufenform und, mit zunehmendem Alter, auch Stufenhöhe unter dem Einfluß der fortschreitenden Abtragung. Da somit bei älteren scarps eine progressive Diskrepanz zwischen gemessener Stufenhöhe h und dem tatsächlichen Nettobetrag der Oberflächen- bzw. Schichtversetzung (fault displacement) d zu erwarten ist, wurden an ausgewählten Punkten quer zum Verlauf bestimmter Verwerfungen Gräben angelegt, in welchen die tektonische Entwicklung entlang der Verschiebungsebene untersucht werden konnte. Bei der Auswahl geeigneter Lagepunkte für die Freilegung einzelner faults konnte man sich wiederum morphologischer Messungen und Überlegungen bedienen, wenn man die Annahme zugrunde legte, daß signifikant höhere und „frischer“ erscheinende Stufen oder Stufenabschnitte eine längere, komplexere tektonische Genese erfahren haben als niedrigere und flachere.

Für die Bestimmung von Stärke und Häufigkeit der Verschiebungseignisse, d.h. der seismischen Aktivität, an den untersuchten Verwerfungen war die Identifizierung und Vermessung der ehemaligen Landoberfläche im abgesackten Block von entscheidender Bedeutung. Anhand von stratigraphischen und pedologischen Korrelationen konnte die morpho-tektonische Vorgeschichte von fünf Verwerfungen in Beaver Basin wie folgt rekonstruiert werden:

1. Der absolute Verschiebungsbetrag an den zuletzt, d.h. vor etwa 17 000 Jahren, gebildeten Verwerfungsstufen beträgt einheitlich 1,5 bis 2 m. Dies entspricht in etwa einem Erdbeben mit der Magnitude $6\frac{1}{2}$ bis $7\frac{1}{2}$ (SLEMMONS, 1977).
2. Die Höhe dieser mono-genetischen fault scarps beträgt nur ca. 75 % bis 80 % des gemessenen absoluten Versetzungsbetrags (total displacement).
3. Die signifikant höheren Stufen sind demzufolge das Ergebnis akkumulativer seismo-tektonischer Verschiebungsbeträge, wobei die relative Gesamthöhe einer Stufe proportional mit der Zahl der Verschiebungseignisse abnimmt (Abb. 8).
4. Daraus errechnet sich ein durchschnittlicher absoluter Verschiebungsbetrag von 1,5 m für die letzten drei seismischen Aktivitätsphasen (Abb. 9). Dieser Betrag wurde durch direkte Messungen an zwei ausgegrabenen komplexen fault scarps bestätigt.

In der Annahme, daß die in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellten morphologisch-tektonischen Entwicklungstendenzen der jüngeren Stufen auch für die älteren, multi-genetischen scarps in Beaver Basin Gültigkeit besitzen, können Annäherungswerte für die Zahl der seismischen Ereignisse aller Stufengruppen errechnet werden (Tab. 4). Ordnet man diese nun in den in Kap. 3.3 vorgeschlagenen zeitlichen Rahmen ein, so ergeben sich daraus die zeitlichen Größenordnungen für seismische Wiederkehrperioden (recurrence intervals) für diese Region (Tab. 4).

Aus diesen Werten lassen sich auch seismische Trendkurven für einzelne Verwerfungen konstruieren (Abb. 10), die umso zuverlässiger sind, je mehr quantitative Daten zur tektonischen und morphologischen Genese einer Stufe bzw. differenzierter Stufenabschnitte zur Verfügung stehen. Die in Abb. 10 dargestellten Trendkurven repräsentieren deshalb noch eine vorläufige, relativ grobe Einschätzung der tatsächlichen Seismizität dieses Raumes.

Abb. 8: Veränderung der Stufenhöhe mit zunehmender Anzahl der Erdbeben und des absoluten Versetzungsbetrags

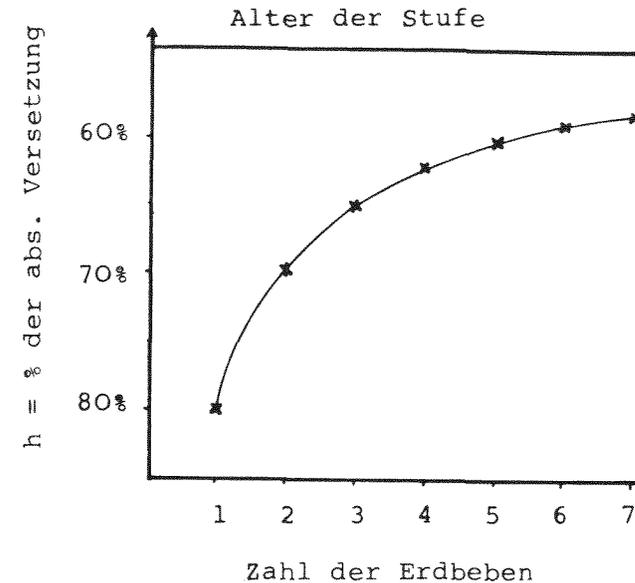


Abb. 9: Durchschnittlicher Versetzungsbetrag in Beaver Basin, errechnet an fünf ausgewählten fault scarps

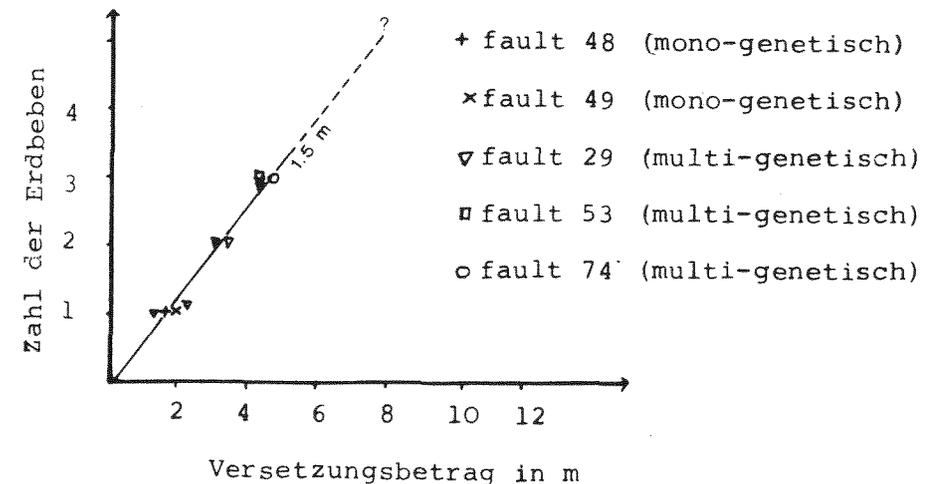
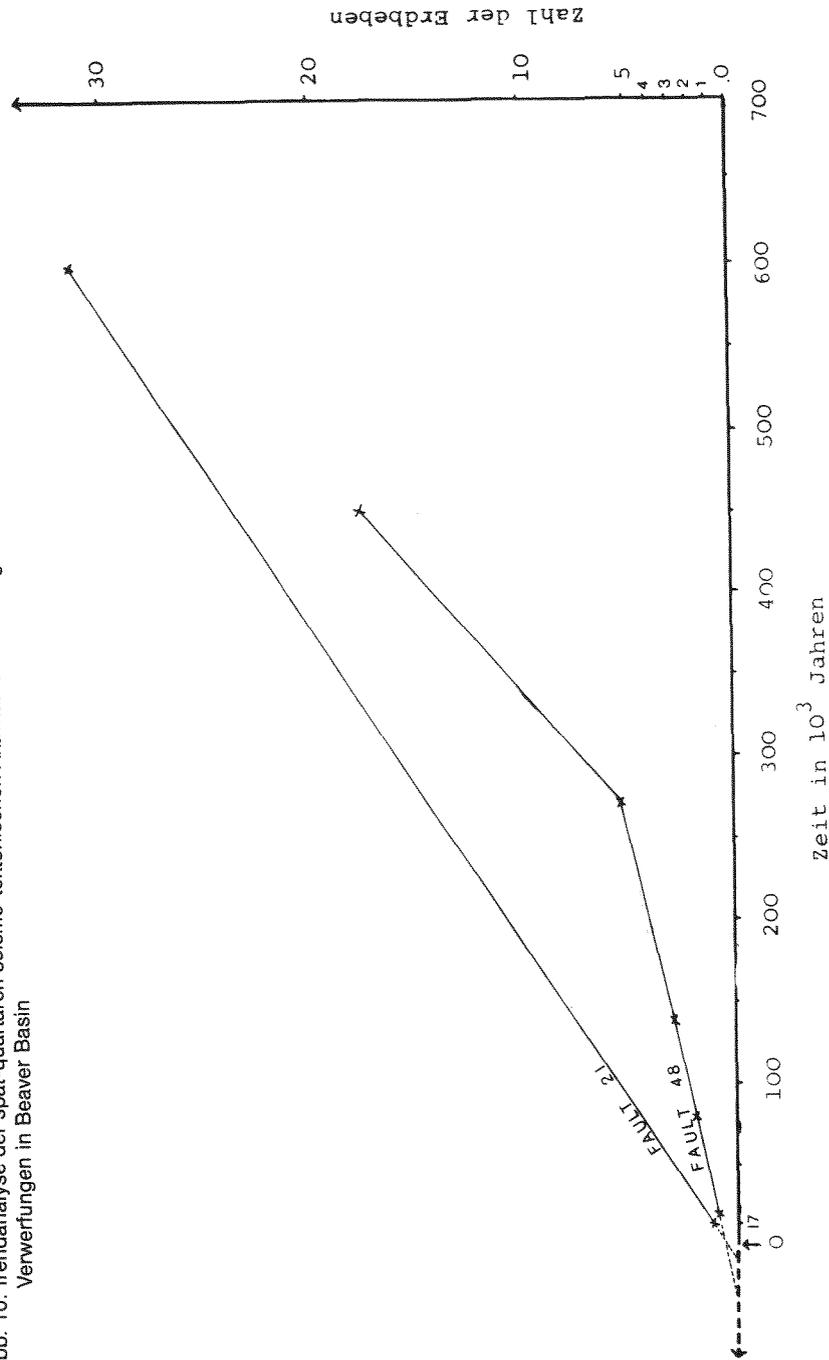


Abb. 10: Trendanalyse der spät-quartären seismo-tektonischen Aktivität für zwei ausgewählte Verwerfungen in Beaver Basin



Tab. 4: Trendanalyse der spätquartären seismo-tektonischen Aktivität in Beaver Basin

| Verwerfungsgruppe in BB | Zahl der seismischen Ereignisse | Höchstalter der Verwerfungen | Wiederholungsintervall |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Gruppe I | 1 (gemessen) | 17 000 J. | ? |
| Gruppe II | 2 (gemessen) | 70 – 90 000 J.(?) | 35 – 45 000 J. |
| Gruppe III | 3 (gemessen) | 140 000 J.(?) | 45 000 J. |
| Gruppe IV | 5– 6 (berechnet) | 270 000 J. | 45 – 54 000 J. |
| Gruppe V | 17–19 (berechnet) | 4500 000 J. | 24 – 26 000 J. |
| Gruppe VI | 30–40 (berechnet) | ≥650 000 J. | 16 – 22 000 J. |

6. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Die in Beaver Basin durch spätquartären Bruchtektonismus herausgebildeten Verwerfungsstufen sind für vergleichende morphologische Untersuchungen sehr gut geeignet, da die postulierten Rahmenbedingungen hier im wesentlichen erfüllt sind. An diesen, durch rasch wirkende Hangabtragungsprozesse gekennzeichneten Stufenhängen zeigt sich mit fortschreitendem Alter vor allem eine generelle Abflachung des Steilhangsegments sowie eine kontinuierliche Rückverlegung und Abrundung der Stufenstirn.

Mit der in dieser Studie beschriebenen quantitativen Bestimmung der Hangparameter Θ , h , r und w scheint die Möglichkeit gegeben

- Verwerfungsstufen (und gegebenenfalls auch andere, stufenförmige Steilhänge) gleicher genetischer Entwicklung zuverlässig zu korrelieren
- absolute Altersbestimmungen an einzelnen Stufen mittels sog. Trendkurven vorzunehmen
- in Abhängigkeit vom absoluten Verschiebungsbetrag die Gesamtzahl der seismischen Ereignisse an einer Verwerfung (annähernd) zu kalkulieren.

Unter Berücksichtigung der für Beaver Basin recht zuverlässig datierten Chronosequenz verworfener Schichtflächen zeigt das tektonische Bild dieses Raumes somit für die letzten 600 000 bis 700 000 Jahre eine Kumulation starker seismischer Aktivitätsphasen, welche durch wechselnd lange Ruhephasen getrennt sind. Obwohl die Länge dieser seismischen Pausen zum Teil beträchtlich ist (>40 000 Jahre), erscheint zumindest für eine Gruppe von Verwerfungen eine Reaktivierung in näherer geologischer Zukunft möglich, wenn man in Betracht zieht, daß die letzte starke Verwerfungs- d.h. Erdbebenbetätigung bereits vor 17 000 Jahren stattfand.

Schriften

- ANDERSON, R. E. (1979): The Status of Seismo-Tectonic Studies of Southwestern Utah. – U.S.G.S. Open-file Report 80–801, S. 519–547.
- ANDERSON, R. E. & BUCKAM, R. C. (1978): Two Areas of Probable Holocene Deformation in Southwestern Utah. – Tectonophysics, 52, S. 417–430.

- BUCKNAM, R.C. & ANDERSON, R.E. (1979): Estimation of Fault Scarp Ages from a Scarp Height - Slope Angle Relationship. - *Geology*, **7**, S. 11-14.
- CAINE, N. (1976): A Uniform Measure of Subaerial Erosion. - *Geol. Soc. Am. Bull.*, **87**, S. 137-140.
- CARSON, M. & KIRKBY, M. (1972): *Hillslope Form and Process*. - Cambridge University Press, 475 S.
- MACHETTE, M.N. (1978): Dating Quaternary Faults in the Southwestern U.S. by Using Buried Calcic Paleosoils. - *U.S.G.S. J. Res.*, **6**, S. 369-381.
- MACHETTE, M.N. (1980): Preliminary Geologic Map of the Beaver Quadrangle, Beaver County, SW - Utah. - *U.S.G.S. Open-file Report 80-1269*.
- NASH, D.B. (1977): The Evolution of Abandoned Wave-cut Bluffs in Emmett County, Michigan. - Ph. D. Thesis, Univ. Michigan, 225 S.
- ROSHOLT, J.N. (1980): Uranium-Trend Dating of Quaternary Sediments. - *U.S.G.S. Open-file Report 80-1087*, 45 S.
- SCOTT, W.E. (1979): Stratigraphic Problems in the Usage of Alpine and Bonneville Formations in the Bonneville Basin, Utah. - *G.S.A. Rocky Mtn. Sec. Abs.*, **11**, S. 301-302.
- SLEMMONS, D. (1977): State-of-the-art for Assessing Earthquake hazards in the U.S. - Rep. 6: Faults and Earthquake Magnitude. U.S. Army Waterways Exp. Stations, Misc. Paper **5-53-1**, 129 S.
- STERR, H. (1980): The Seismo-Tectonic History and Morphological Evolution of Late-Quaternary Fault Scarps in Southwestern Utah. - Ph. D. Thesis, Univ. of Colorado, 253 S.
- WALLACE, R.E. (1977): Profiles and Ages of Young Fault Scarps, North-Central Nevada. - *Geol. Soc. Am. Bull.*, **88**, S. 1267-1281.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Horst Sterr
Geographisches Institut der Universität Kiel
Olshausenstraße 40
D - 2300 Kiel