

## Сейсмический мониторинг процессов разрывных нарушений, вызванных движением оползня в Форарльбергских Альпах, Австрия. Seismic monitoring of fracture processes generated by a creeping landslide in the Vorarlberg Alps

Марко Вальтер (Marco Walter<sup>1</sup>\*) и Манфред Йосвиг (Manfred Joswig<sup>1</sup>) представили результаты применения наносейсмического мониторинга (смотрите отдельную статью М. Йосвига), в котором сейсмические мини-расстановки были размещены на оползневом массиве Neumoes в Форарльбергских Альпах, Австрия, в попытке установить сейсмическую активность, вызванную, вероятно, неустойчивой массой ледниковых отложений.

**Д**вижения масс в горных областях являются серьезной угрозой для местных поселений и, как известно, наносят большой экономический ущерб. В Альпах Форарльберга во время проливных дождей и наводнений в августе 2005 года 36 склоновых обрушений вызвали разрушения, ущерб от которых составил 3,6 миллиона евро (Kanonier et al., 2005). Установка оборудования на неустойчивых участках склонов и их непрерывный мониторинг в полевых условиях – все более и более популярный метод снизить влияние таких опасных бедствий. Используемые геофизические методы исследований стали надежным и незаменимым источником данных, являющихся существенными при оценке динамики склонов. Most slope instabilities are triggered by rainfalls and associated subsurface water dynamics (e.g. Lollino et al., 2006; Tsaparas et al., 2002).

Во многих случаях неустойчивость склонов вызвана ливнями и тесно связана с динамикой подземных вод (e.g. Lollino et al., 2006; Tsaparas et al., 2002).

Наблюдения во время сильных ливней ведутся, чтобы понять, как дожди влияют на состояние напряжения в приповерхностных зонах. О землетрясениях на глубинах в несколько километров, вызванных ливнями, сообщали из Швейцарских Альп (Husen et al., 2007) и из горных частей Германии (Hainzl et al., 2006). Тем не менее, никогда не было отмечено, что при быстром проникновении воды, сопровождающем сильные дожди, давление высвобождалось таким образом, что его можно было зарегистрировать на медленно движущихся оползнях в неустойчивых породах обычными сейсмическими методами и инструментами. Единственные наблюдения сейсмических сигналов, вызванных движениями масс, были зафиксированы или в связи со сходом снежных лавин (Surinach et al., 2005; Weichert et al., 1994), или в результате хрупкого разрушения горных пород (Brückl & Mertl, 2006; Spillmann et al., 2007; Roth et al., 2005; Wust-Bloch, 2008).

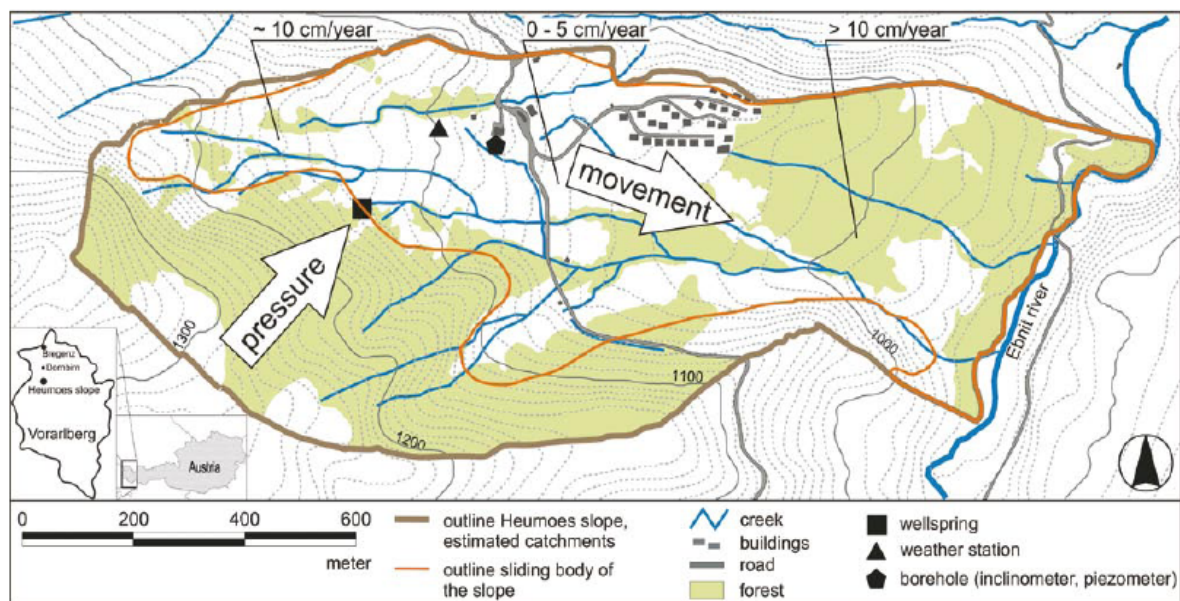


Один из участков мониторинга в срединной части оползневого массива Neumoes

<sup>1</sup> Институт Геофизики Университета Штутгарта, Штутгарт, 70174, Германия.

Вы можете связаться с автором по электронной почте [Marco.Walter@geophys.uni-stuttgart.de](mailto:Marco.Walter@geophys.uni-stuttgart.de).

## Методики увеличения эффективности



**Рис.1.** Положение оползня Heumoes, расстановка измерительного оборудования, скорости перемещения в различных частях оползня и замеренное простираание напорной системы подземных вод, обуславливающей основное направление перемещения оползня.

С другой стороны, оползень Heumoes в Форарльбергских Альпах состоит из намного более непрочного материала: глинистые осыпи и отложенная морена, скользящие по мергелям мелового периода. Предыдущие исследования на оползне Heumoes (Lindenmaier et al., 2005) показали, что прочная взаимосвязь между проливными дождями и динамикой подземных вод произвела эффект плавучести и понизила прочность пород, или увеличила гравитационные силы, что в конечном счете привело к неустойчивому состоянию оползня. Кроме как для постоянных, равномерных оползаний, периоды сильных дождей наблюдаются для изучения спонтанных обрушений на Heumoes (Lindenmaier et al., 2005). В сентябре 2005 года



Марко Вальтер определяет размещение малой сейсмической расстановки

две малые сейсмические расстановки были размещены на период наблюдения свыше двух недель, чтобы проверить, могут ли быть обнаружены сигналы от разрушения пород на оползне Heumoes. Наши наблюдения является первым сообщением о том, что разрушение, имеющее место в непрочных осадочных породах, способно издавать очень слабые по мощности

сигналы, которые могут быть обнаружены сейсмической аппаратурой на расстоянии в несколько метров.

#### Процесс идентификации/предыдущие исследования

Оползневой массив в Форарльбергских Альпах (Австрия) изучался свыше четырех лет (1998-2002) междисциплинарной группой исследователей (<http://www.grosshang.de>). Они провели ряд метеорологических, гидрогеологических и геотехнических исследований для развития всесторонней физической модели для данного активного оползня (Lindenmaier et al., 2005).

#### Общие сведения

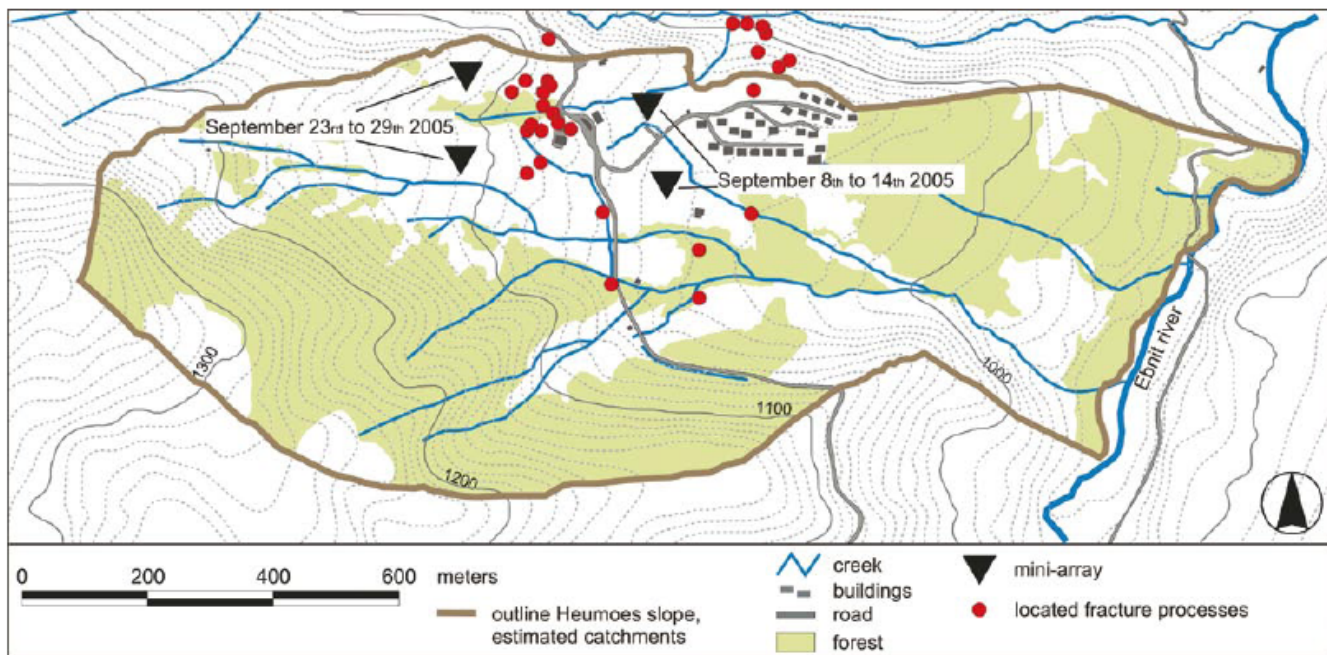
Оползневой массив Heumoes расположен на востоке Форарльбергских Альп, в 25 км к югу от Брегенца (Bregenz) и в 10 км к югу от Дорнбирна (Dornbirn) (Рис.1). Протяженность оползня составляет приблизительно 1800 м (с востока на запад), а ширина – 500 м (с севера на юг). Значения высоты колеблются в пределах примерно от 940 м на Востоке и до 1360 м на Западе. В 1970-х гг прямо на оползне Heumoes была построена небольшая курортная деревушка. Сегодня, на большинстве зданий образовались трещины шириной в см. Одна из построек была настолько повреждена, что ее пришлось уничтожить.

#### Геологическое строение

Оползневой массив Heumoes состоит из очень разнородной глинистой осыпи и ледниковой морены, которые были накоплены в ледниковый максимум Вюрма (Smit Sibinga-Lokker, 1965; Schneider, 1999). Отложенная морена включает в себя алевроитовый, глинистый и песчаный материал и компоненты большего размера. Река Ebnet размывает подножье оползня до коренных пород. Выходы коренных, более прочных пород, которые можно наблюдать в



## Методики увеличения эффективности



**Рис.2.** Положение сейсмической расстановки и локализация процессов разрывных нарушений на оползневом массиве Heumoes во время проведения первого мониторинга 8-14 сентября 2005 года.

Западных и Южных частях оползня, представлены толщей слоистых верхнемеловых мергелей (Oberhauser, 2000; Schneider, 1999). Природный источник воды на границе раздела между меловыми мергелями коренных пород и скользящими осадочными отложениями служит датчиком давления в пределах оползня Heumoes (Lindenmaier et al., 2005).

#### Предыдущие исследования

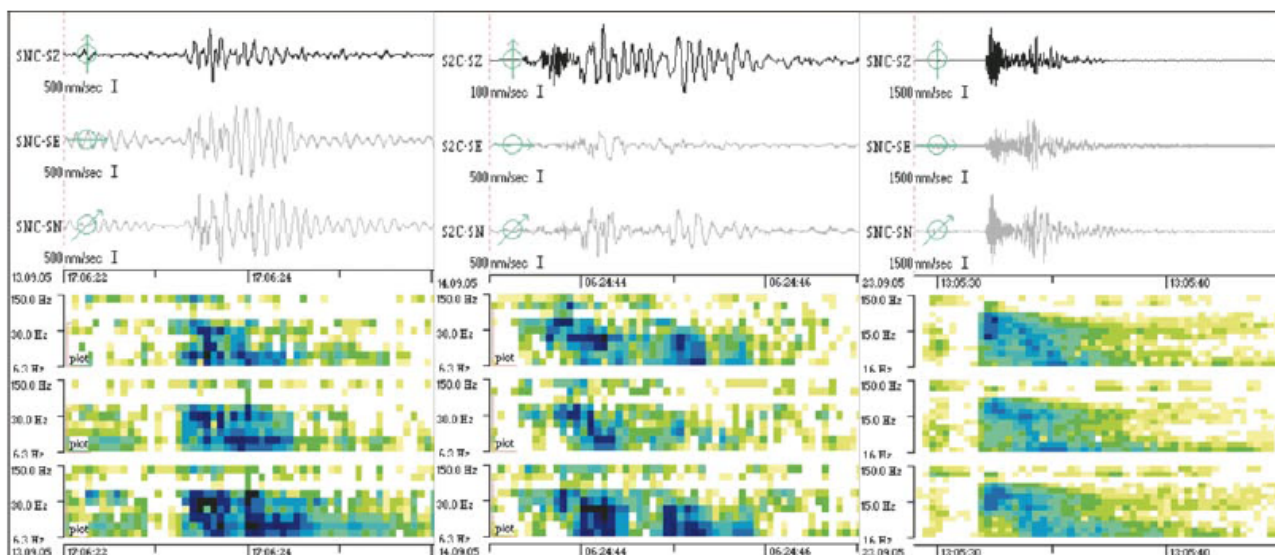
В последние годы оползневой массив Heumoes стал целью геологических, геотехнических и геодезических исследований нескольких институтов Университета Карлсруэ (University of Karlsruhe) в Германии. Была пробурена одна буровая скважина (Рис.1), но, к сожалению, бурение было остановлено на глубине 24 м, так и не достигнув коренных пород (Lindenmaier et al., 2005). Скважина была оборудована пьезометрическим манометром для измерения давления в поровых водах (в 5.5 м и 12 м) и инклинометром. Данные показывают, что давление поровых вод на глубине в 5.5 м значительно возрастает после проливных дождей (Lindenmaier et al., 2005). В августе 2001 года на Heumoes была установлена метеорологическая станция для измерения количества атмосферных осадков, температуры воздуха, скорости ветра, его направления и относительной влажности воздуха. Смещения поверхности оползня Heumoes были измерены количественно с помощью GPS и обычным наземным геодезическим оборудованием в период между 1998 и 2001 годами. На Heumoes обнаружены три зоны с разными скоростями смещения (Рис.1). Скорости смещения Западной и Восточной частей Heumoes превышают 10 см/год, в то время как в Центральной части оползня зафиксированы более низкие скорости в 5 см/год. Lindenmaier et al. (2005) заключили, что Heumoes испытывает непрерывное

криповое движение, которое может быть внезапно ускорено проливными дождями.

#### Сбор данных/обработка данных

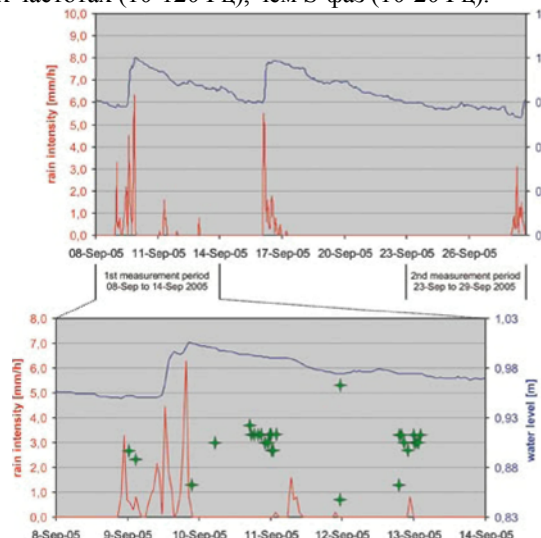
Сейсмические данные были получены за время двух последовательных периодов мониторинга в 2005 году (8-14 и 23-29 сентября) в результате размещения трехсторонней портативной малой сейсмической расстановки на Heumoes. Каждая Сейсмическая Навигационная Система (Seismic Navigating System [SNS]) состояла из одного Lennartz LE-3D и трех LE-1D короткопериодных сейсмометров с апертурой 25-30 м. Расположение SNS во время проведения исследований показано на рис.2. Данные были записаны в непрерывном режиме станцией Lennartz M24 с частотой записи 400 Гц.

Анализ сигналов был выполнен с применением наносейсмического мониторинга, причем метод был предусмотрен для анализа чрезвычайно слабых исходных сигналов (Joswig, 2008). Данные были обработаны с использованием программного обеспечения Hypoline, интерактивной графической методики по типу «ножниц», которое показывает наиболее вероятные сигналы с низким отношением сигнал-помеха, при этом одновременно продемонстрировано влияние нескольких параметров (скоростная модель, фазовые пики и определение глубины) на расположение гипоцентра в реальном времени. Исходные данные были пропущены через фильтр верхних частот со значением выше 5 Гц, чтобы устранить антропогенные шумы и повысить отношение сигнал-помеха. Поскольку предполагалось, что хрупкое разрушение имело место в пределах неустойчивого осадочного покрова, для определения местоположения сейсмособытия использовалась модель однородного полупространства со скоростями Р-волн 450 м/с.



**Рис.3.** Форма волн и сонограммы трех сейсмособытий, записанные станцией 3с. Слева: процесс образования трещин  $M_L = -2.0$  на расстоянии 160 м, зарегистрированный 13 сентября 2005, 17:06:23 (GMT). Посередине: процесс образования трещин  $M_L = -1.4$  на расстоянии 350 м, зарегистрированный 14 сентября 2005, 06:24:44 (GMT). Справа: локальное землетрясение  $M_L = 1.3$  на расстоянии 10 км, зарегистрированное 23 сентября 2005, 13:05:32 (GMT).

Критерии эксперимента должны были строго выполняться для того, чтобы однозначно установить связь между зарегистрированными сигналами и вероятными процессами в оползневом массиве Neumoes. В первую очередь, полезные сигналы должны были быть зафиксированы четырьмя датчиками на всех расстановках, для того чтобы исключить ненужные, незначительные и ложные шумы. Кроме того, была установлена минимальная длительность сигнала в 0.5 секунд. Затем, были протестированы на корректность лучевые скорости, хотя и высокая неоднородность материала сделала процедуру достаточно проблематичной. Наконец, определение частоты сигналов по анализу сонограмм позволило достоверно определить форму волны. На рисунке 3 показаны стандартные формы волны и сонограммы таких волн. Энергия сигналов Р-фаз концентрируется в более высоких частотах (10-120 Гц), чем S-фаз (10-20 Гц).



**Рис.4.** Интенсивность дождя (красная кривая), уровень грунтовых вод (синяя кривая) на 8-29 сентября 2005 (сверху) и 8-14 сентября 2005 (снизу), а также временная последовательность сейсмособытий с указанием их магнитуды  $M_L$  (отмечены зеленым).

Внезапное вступление волнового сигнала может происходить по причине интенсивного рассеивания энергии сигнала вследствие высокой неоднородности среды оползневого массива Neumoes. Изучение частотного спектра этих сигналов, которые очень похожи на сигналы от слабых ( $M_L = 1.3$ ) местных землетрясений, наводит на мысль, что эффект затухания в непрочных отложениях Neumoes оказался менее важным, чем предполагалось, при том, что порог обнаружения и приемлемые результаты определения местоположения лежат в пределах крутизны  $M_L = -1.4$  для наклонной дальности 350 м.

## Результаты

Во время первого периода наблюдения (8-14 сентября 2005 г.) было записано 28 сейсмособытий ( $-0.7 > M_L > -2.2$ ), произошедших в оползне Neumoes, и ни одного во время второго периода (23-29 сентября 2005 г.). На рисунке 2 показаны эпицентры этих двадцати восьми событий. В основном сейсмичность проявлена в центральной части оползневого массива Neumoes, в зоне, где отмечены наибольшие скорости смещения поверхности.

28 явлений было записано в период спустя пять и 26 часов после интенсивного ливня. На рисунке 4 показаны график интенсивность дождя (красная кривая) и уровень грунтовых вод (синяя кривая) в течение сентября 2005 г. Увеличенная диаграмма, изображенная ниже, показывает распределение во времени и мощность этих событий. Нужно отметить, что эти события произошли во временном интервале между временем отклика потока (несколько минут спустя после интенсивного ливня) и временем отклика пьезодатчиков (в период спустя пять часов и один день после интенсивного ливня) (Lindenmaier et al., 2005).

Это наблюдение укрепляет предположение о том, что сигналы могут возникать в результате воздействия атмосферных осадков, которое вызывает обрушения пород оползня Neumoes.



## Методики увеличения эффективности

То, что ни одного сейсмособытия не было зарегистрировано в течение ливневых дождей 23-29 сентября 2005, может объясняться двумя причинами. Во-первых, малое количество атмосферных осадков и низкий расход источника подземных вод не смогли привести оползень Немоес в неустойчивое состояние. И, во-вторых, высокий уровень посторонних шумов (примерно на порядок выше сигналов) во время сильного дождя значительно уменьшает возможность обнаружения проявления сейсмичности.

### Обсуждение и выводы

Применение наносейсмического мониторинга к оползневому массиву Немоес подтвердило возможность обнаружения и определения очень низких сигналов, вызванных разрушением пород в непрочных отложениях. Пространственное и временное распределение этих событий хорошо коррелируется с участками наибольшего смещения поверхности и максимумом интенсивности дождей. Точное определение сигналов вместе с устранением неоднозначных решений на программном обеспечении Hypoline помогли понять, что эти проявления сейсмичности вызваны разрушением пород внутри оползня Немоес. Отчетливая временная корреляция ливней с микросейсмическими событиями и пространственное соответствие скоростей смещения поверхности и тех же событий дополнительно привели к выводу, что источник сигналов локализован в осадочной толще оползневой массива Немоес.

Поскольку такой осадочной породе несвойственно хрупкое разрушение, можно предположить, что обнаруженные сигналы вызваны либо повышенной скоростью деформации, либо другими дополнительными процессами, например, дроблением более крупных угловатых компонентов в толще ледниковых отложений. Это также может объяснять спонтанную природу сигналов на Немоес, которые отличны от пиковых выделений энергии, вызванных хрупким разрушением, изучаемых в полевых условиях и обнаруженных теми же самыми техническими средствами в неустойчивых береговых обрывах (Wust-Bloch, 2008).

Поскольку глубина проявления сейсмичности не может быть оценена из-за редкой сети станций, то на данном этапе невозможно точно определить, на какой глубине и вдоль какой границы раздела она проявляется. Тем не менее, высокий частотный спектр сигналов, вероятно, исключает наличие источника во флюидонасыщенной обстановке (Wust-Bloch and Joswig, 2006). Расширение возможностей наносейсмического мониторинга оползневой массива Немоес является нашей очередной задачей. Наши усилия будут направлены, главным образом, на создание точных 3D-моделей локализации сейсмособытий и на подтверждение корреляции между наносейсмическими сигналами и гидродинамикой в течение длительных периодов времени и в меняющихся климатических условиях.

### Благодарности

Мы благодарим М. Hage и G. H. Wust-Bloch, а также членов междисциплинарной исследовательской группы «Объединение Текучих и Деформационных Процессов Для Моделирования Движения Природных Склонов» (<http://www.grosshang.de>) за их крайне полезные обсуждения.

Данная работа финансирована Немецким Фондом Исследований (German Research Foundation (DFG)).

### Литература

Briickl, E. and Mertil, S. [2006] Seismic Monitoring of Deep-Seated Mass Movements. *Proceedings of INTERPRAEVENT International Symposium on Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*. Universal Academy Press, Tokyo, Japan, 571-580.

- Briickl, E. and Parotidis, M. [2005] Prediction of slope instabilities due to deep-seated gravitational creep. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 155-172.
- Green, A. G., Maurer, H., Spillmann, X., Heincke, B. and Willenberg, H. [2006] High resolution geophysical techniques for improving hazard assessments of unstable rock slopes. *The Leading Edge*, 25, 311-316.
- Hainzl, S., Kraft, X., Wassermann, J., Igel, H. and Schmedes, E. [2006] Evidence for rainfall-triggered earthquake activity. *Geophys. J. Int.*, 33, L19303.
- Husen, S., Bachmann, C. and Giardini, D. [2007] Locally triggered seismicity in the central Swiss Alps following the large rainfall event of August 2005. *Geophys. J. Int.*, 171, 1126-1134.
- Joswig, M. [1990] Pattern recognition for earthquake detection. *Bull. seism. Soc. Am.*, 80, 170-186.
- Joswig, M. [2008] Nanoseismic monitoring fills the gap between microseismic networks and passive seismic. *First Break*, 26(6), 121-128.
- Kanonier et al. [2005] Das Starkregen- und Hochwassereignis des August 2005 in Vorarlberg. *Ein Bericht des Amtes der Vorarlberger Landesregierung*.
- Lindenmaier, E., Zehe, E., Dittfurth, A. and Ihringer, J. [2005] Process identification at a slow-moving landslide in the Vorarlberg Alps. *Hydrological Processes*, 19, 1635-1651.
- Lollino, G., Arattano, P., Allasia, P. and Giordan, D. [2006] Xime response of a landslide to meteorological events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 179-184.
- Roth, M., Dietrich, M., Blikra, L.H. and Lecomte, I. [2005] Seismic monitoring of the unstable rock slope at Aknes, Norway. *Report for the International Centre for Geohazards, NORSAR*.
- Roth, M. and Blikra, L.H. [2005] Seismic Monitoring of the unstable rock slope at Akernes, Norway. *Annual meeting of the German Geophysical Society*, Graz, Austria.
- Schneider, U. [1999] Untersuchungen zur Kinematik von Massenbewegungen im Modellgebiet Ebnit (Vorarlberger Helvetikum). Ph.D thesis in: *Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, University of Karlsruhe (XH)*. ISSN 0933-2510, 57, 149.
- Smit Sibinga-Lokker, C. [1965] Beitrage zur Geomorphologie und Glazialologie des Einzugsgebietes der Dornbirner Ache (Vorarlberg, Osterreich). *Ph.D Thesis. University of Leiden*, 123.
- Spillmann, X., Maurer, H., Green, A. G., Heincke, B., Willenberg, H. and Husen, S. [2007] Microseismic investigations of an unstable mountain slope in the Swiss Alps. *J. Geophys. Res.*, 112, B07301.
- Surinach, E., Vilajosana, L., Khazaradze, G., Biescas, B., Furdada, G. and Vilaplana, J.M. [2005] Seismic detection and characterization of landslides and other mass movements. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 791-798.
- Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G. and Leong, E.C. [2002] Controlling parameters for rainfall-induced landslides. *Computer and Geotechnics*, 29, 1-27.
- Weichert, D., Horner, R.B. and Evans, S.G. [1994] Seismic signatures of landslides; the 1990 Brenda Mine collapse and the 1965 Hope rock-slides. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 1523-1532.
- Wust-Bloch, H. and Joswig, M. [2006] Pre-collapse identification of sinkholes in unconsolidated media at Dead Sea area by "nanoseismic monitoring" (graphical jackknife location of weak sources by few, low-SNR records). *Geophys. J. Int.*, 167, 1220-1232.
- Wust-Bloch, G. H. [2008] Detecting pre-collapse failure signals in unstable landslides, cliffs and cavities by nanoseismic monitoring. *Israel Geological Society Annual Meeting*, Nazareth, Israel, 115.