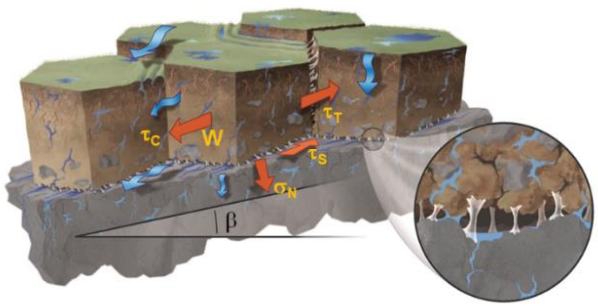
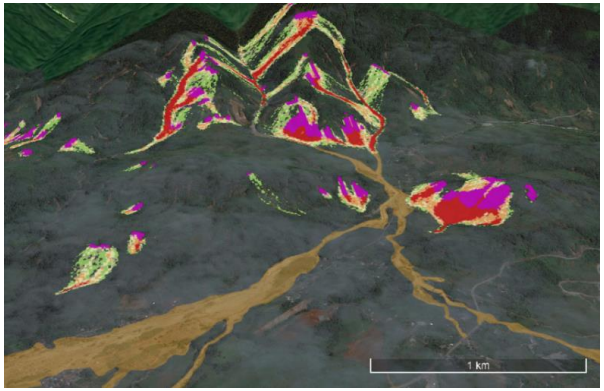
Einfluss bodenhydrologischer Prozesse auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen und Hangmuren

Peter Lehmann[1], Manfred Stähli[2], und Dani Or[1]

[1]Boden- und terrestrische Umweltphysik (Soil and Terrestrial Environmental Physics, STEP), ETH Zurich
[2]Gebirgshydrologie und Massenbewegungen, WSL



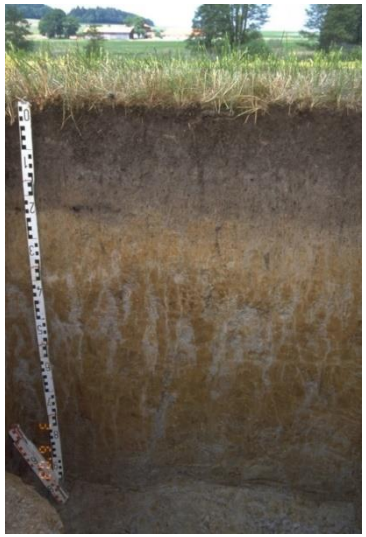


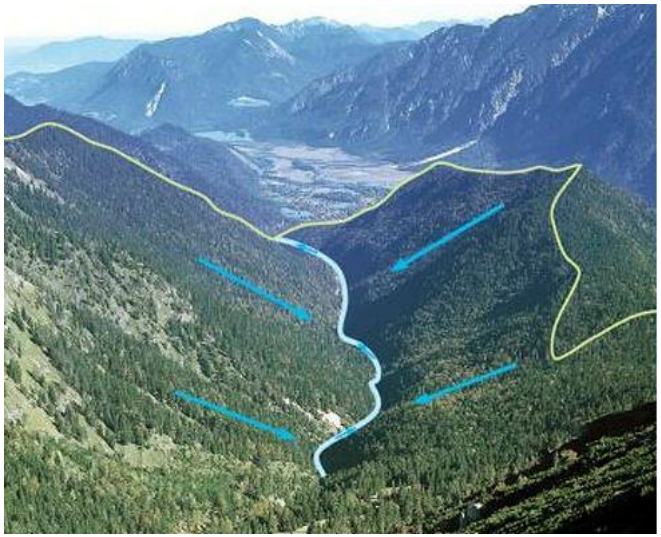
ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

FAN Herbstkurs 2019

Inhalte und Ziele

- Beschreibung bodenhydrologischer Prozesse auf drei verschiedenen Grössenskalen (Profil, Hang, Einzugsgebiet)
- Zusammenhang zwischen Bodenhydrologie und Auslösung von Hangrutschungen
- Welche Prozesse müssen wir kennen, um Rutschungsrisiko abzuschätzen?
- Wie können wir diese Prozesse beschreiben?

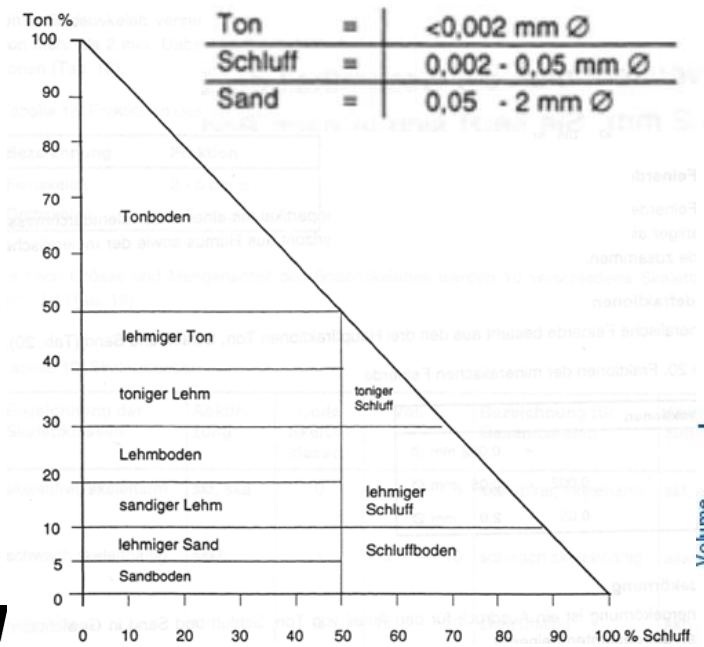




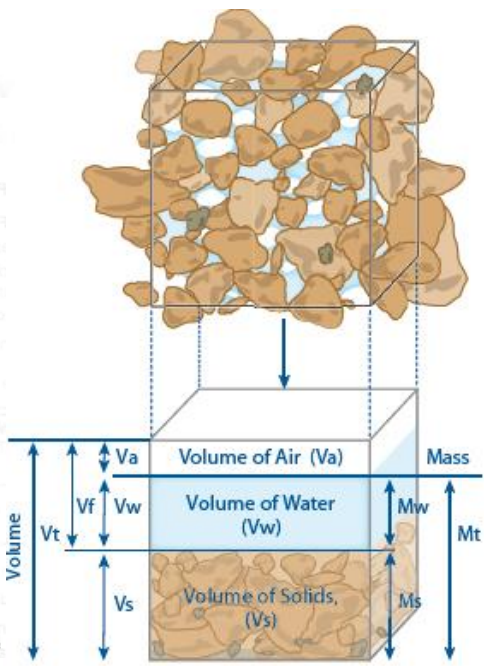
Wichtige Begriffe

- **Bodentextur:** Beschreibt Korngrössenverteilung aller Körner kleiner als 2 mm (Feinerde; im Gegensatz zum gröberen Bodenskelett); Sand-, Schluff- und Tonanteil
- **Wassergehalt:** Verhältnis zwischen Wasservolumen und totalem Bodenvolumen (Körner, Luft, Wasser); manchmal auch Verhältnis Wassermasse/Kornmasse
- **Saugspannung:** Das Wasser in engen Hohlräumen im Boden ist aufgrund der Benetzbarkeit der Körner und der Oberflächenspannung Wasser/Luft unter Spannung (geringere innere Energie verglichen mit 'freiem Wasser'); Mass für Kapillarkräfte

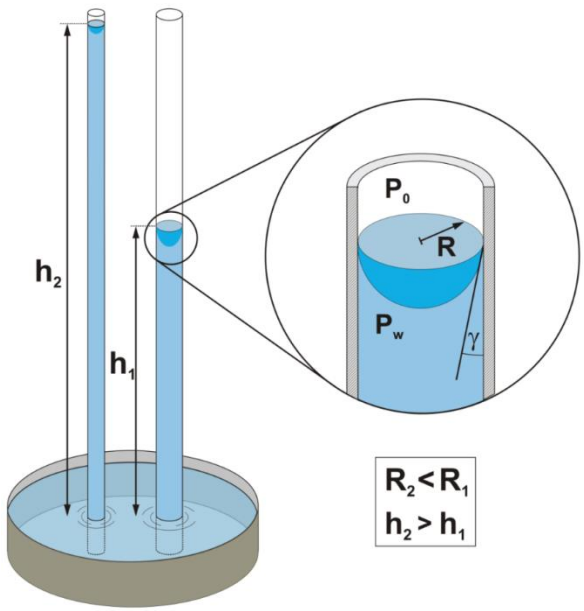
Bodentextur



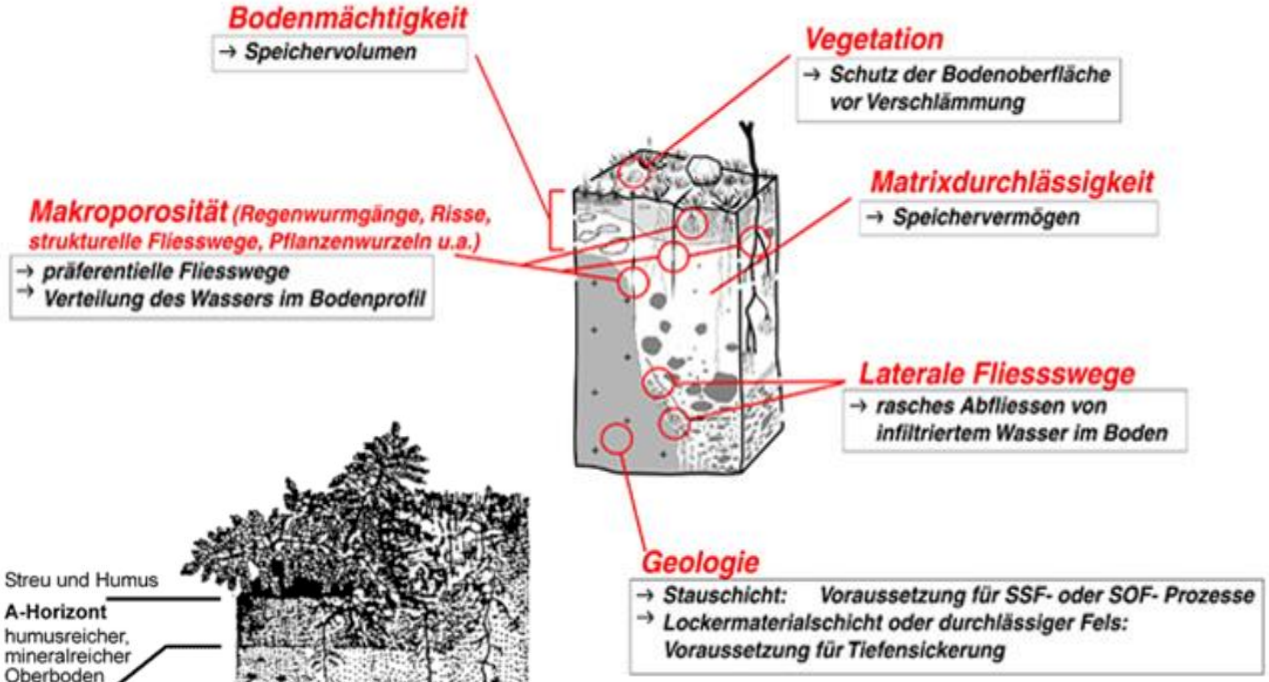
Wassergehalt

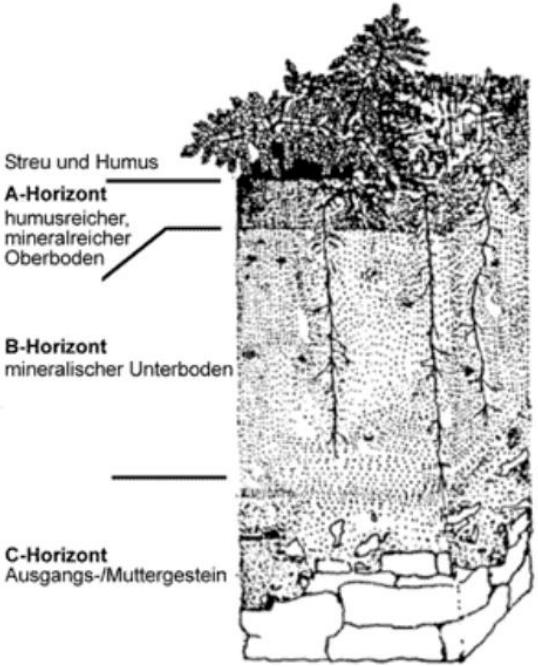


Saugspannung



Bodenprofilskala

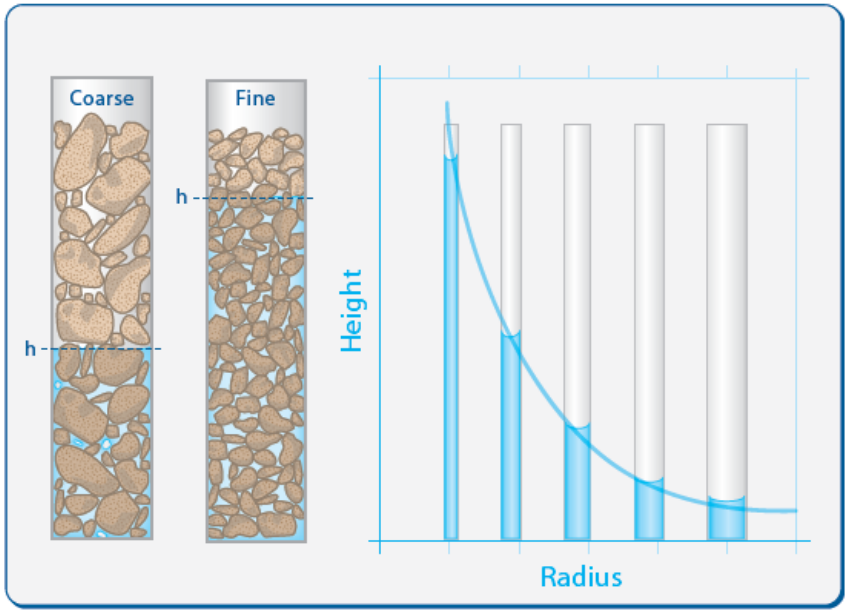


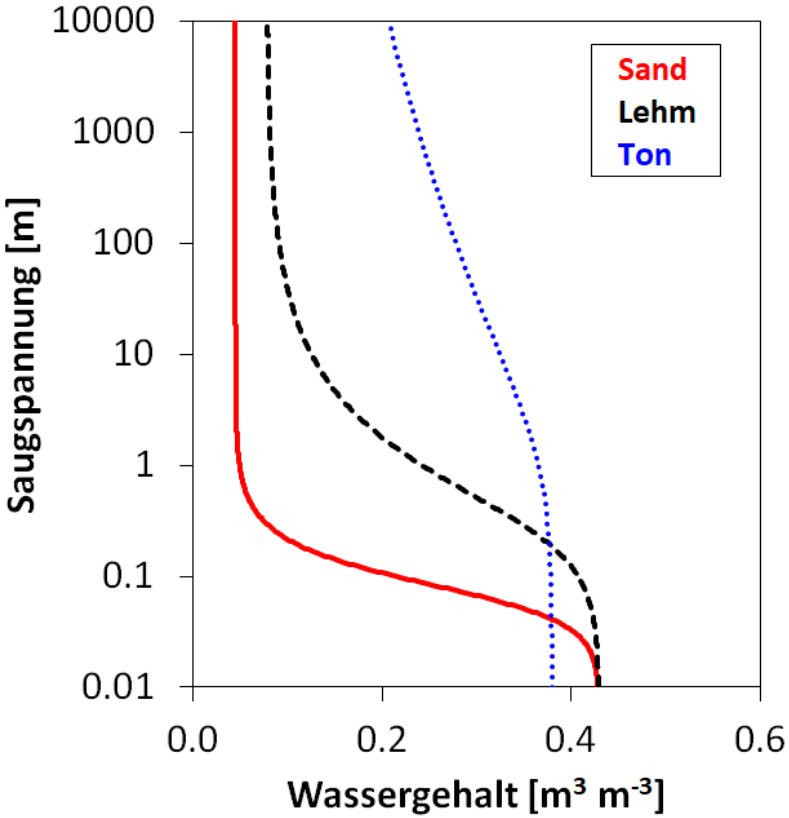


www.scherrer-hydrol.ch

Kapillarkräfte und Porengrössenverteilung

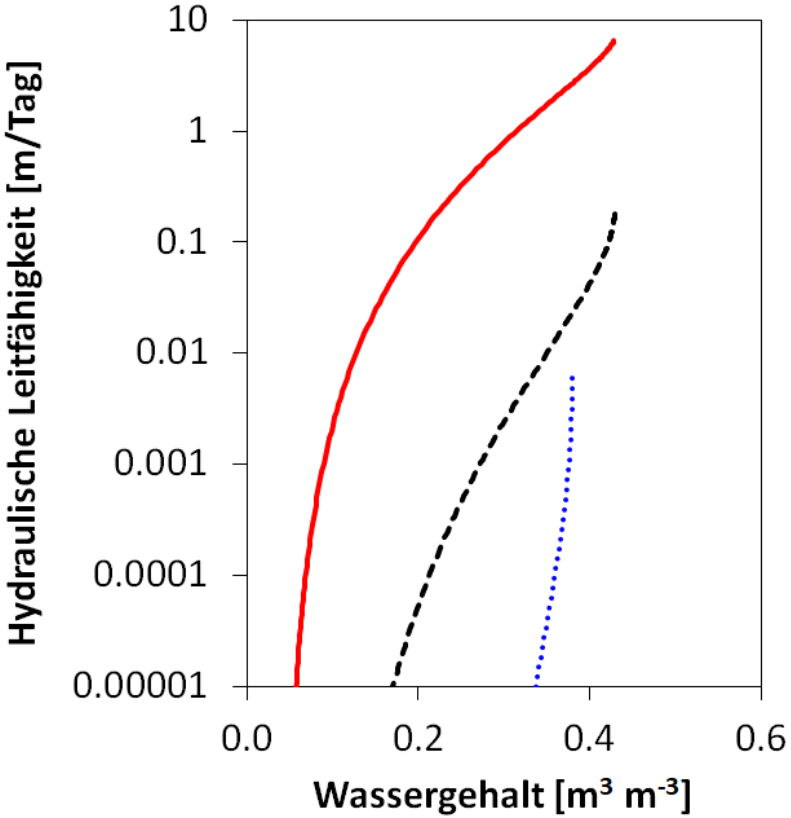
- Das Wasser im Boden ist durch Kapillarkräfte gebunden (Kräftegleichgewicht zwischen Kapillarkraft, Gravitation und Saugkraft der Wurzeln und der Atmosphäre)
- Unter trockenen Bedingungen ist Wasser unter sehr hoher Spannung (grosser Saugspannungswert), unter nassen Bedingungen ist Saugspannung gering
- Feine Böden mit starken engen Poren können Wasser viel besser zurückhalten
- Der Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt ist somit abhängig von der Bodenart

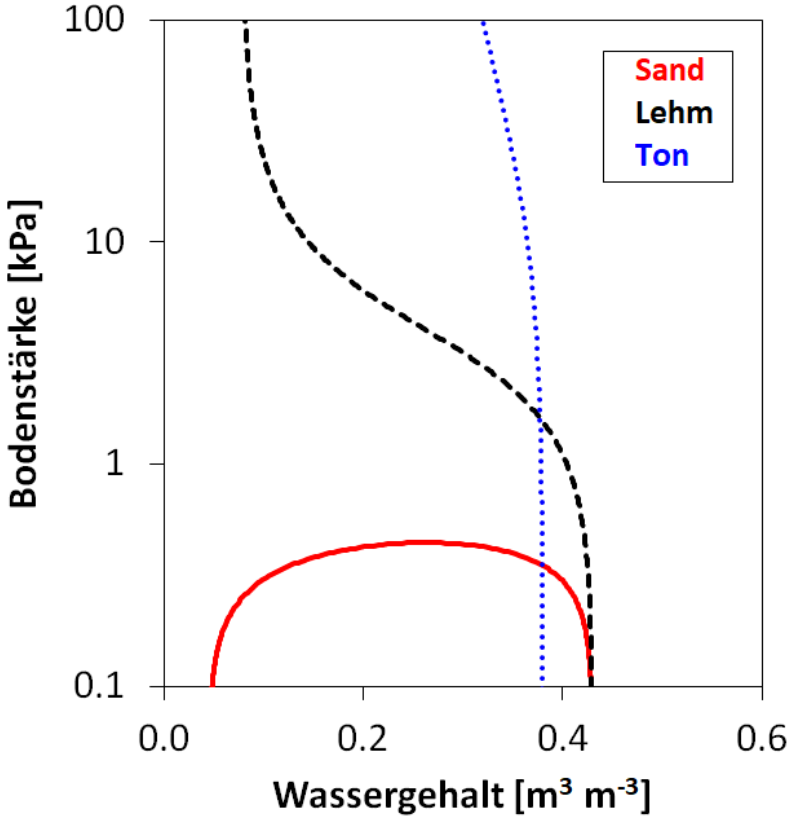




Hydraulische und mechanische Bodeneigenschaften

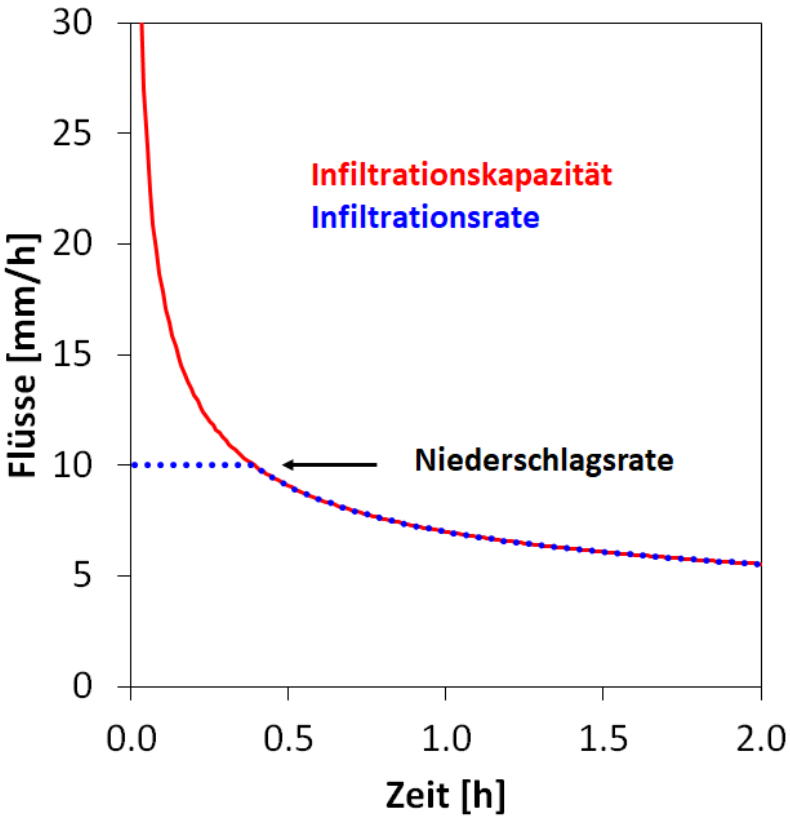
- In engen Poren fliesst Wasser viel langsamer als in grosser Poren (4te Potenz des Radius)
- Bei geringem Wassergehalt sind nur noch kleine Poren mit Wasser gefüllt (grosse Poren luft-gefüllt)
- Der Bereich der hydraulischen Leitfähigkeitswerte ist enorm weit (Verhältnis Licht/Schnecke)
- Die Kapillarkräfte bestimmen auch die Bodenstärke

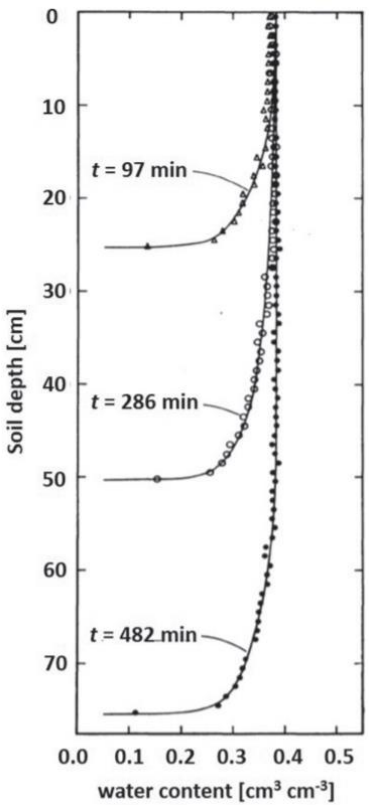




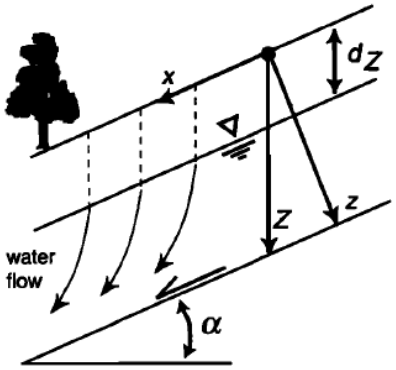
Wasserinfiltration

- Bei Niederschlag kann nicht immer alles Wasser infiltrieren
- Infiltrationsrate kann beschränkt sein durch (1) begrenztes Porenvolumen oder (2) beschränkte Infiltrationskapazität (Kombination von Saugkraft und hydraulischer Leitfähigkeit)
- Die Infiltrationsrate entscheidet, wie schwer und schwach ein Boden wird



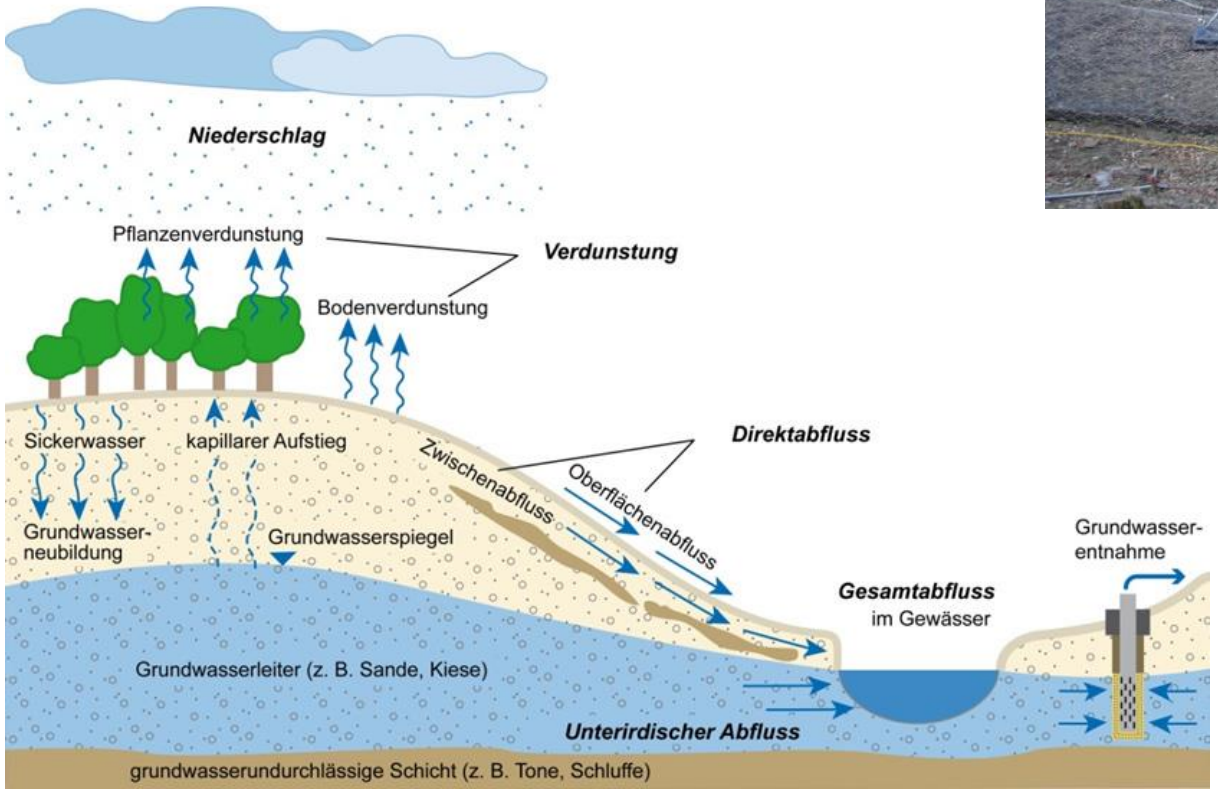


Infiltrierendes Wasser schwächt Boden durch (i) Abnahme der Kapillarkraft, (ii) Bildung eines Wasserspiegels und (iii) Überdruck, wenn die Infiltration höher als die Abflussrate ist



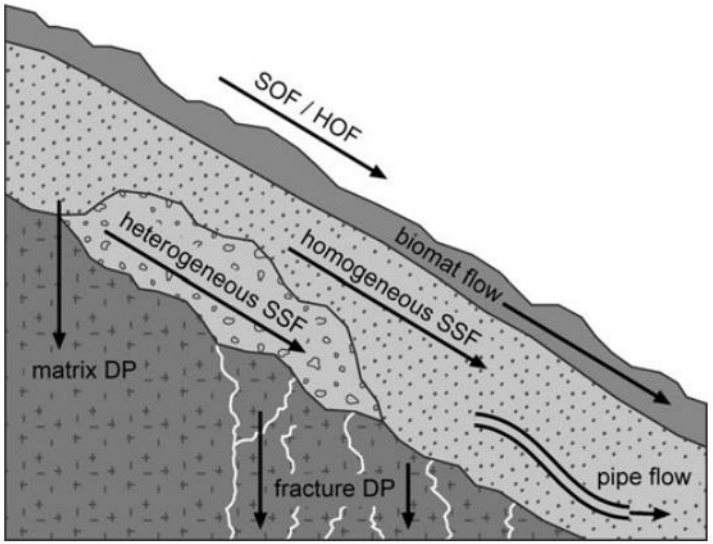
- **Wir können die Infiltration und Bodenstärke eigentlich gut abschätzen**

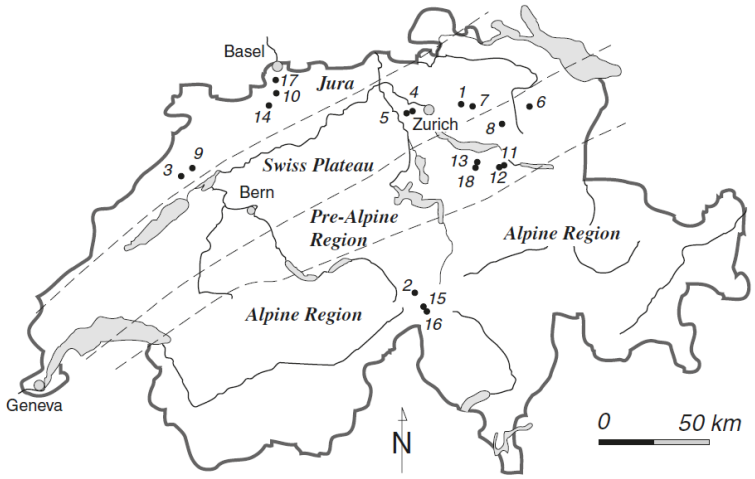
Hang-Skala (Hillslope scale)

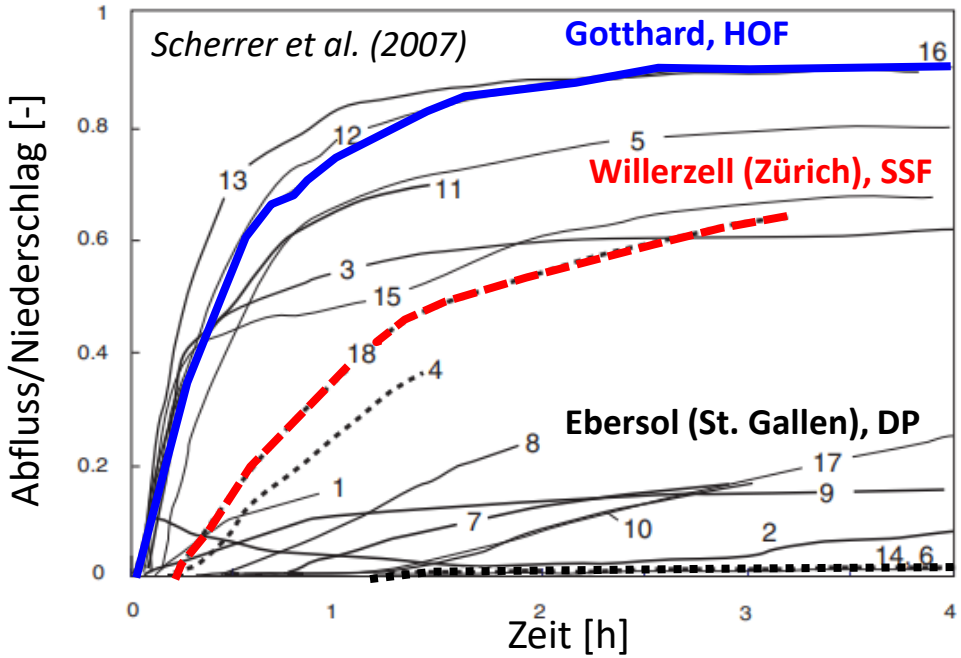


Bodenhydrologische Prozesse auf der Hangskala

- Oberflächenabfluss wegen “Übersättigung” (SOF) oder geringer Infiltrationskapazität (HOF)
- Hangparalleler Abfluss (SSF) entlang von Schichtgrenzen
- Versickerung in den felsigen Untergrund (DP)
- Dominanter Prozess bestimmt Abflussdynamik
- Wichtige Rolle von Makroporen





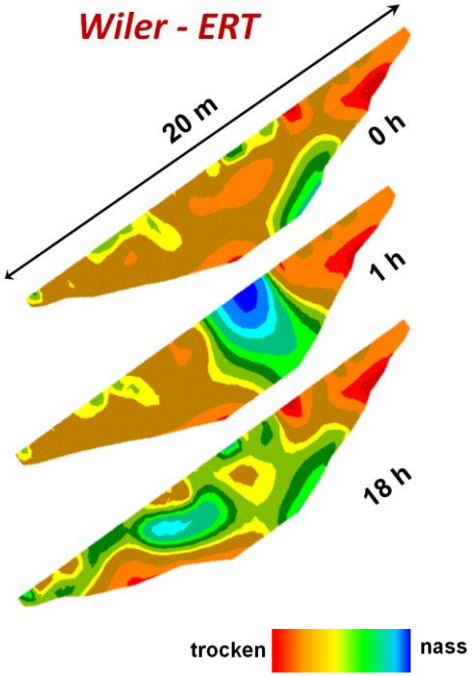


Einsichten aus Feldversuchen

- Forschungsprojekt TRAMM (2006-2012) mit verschiedenen Forschungsgruppen aus dem ETH Bereich (Projektleitung M. Stähli)
- In vier Feldversuchen (Wiler und Rüdlingen) wurde die Rutschungsauslösung durch Beregnung versucht
- Verschiedene bodenhydrologische und geophysikalische Messungen wurden während der Beregnung durchgeführt
- Nur ein Versuch war ‘erfolgreich’

Wiler: ‘Failing to fail a slope’

- Zwei Versuche (2007, 2008) zur Auslösung von Hangrutschung (Leitung Dani Or)
- Bewaldeter Standort (1800 m.ü.M), instrumentiert, Graben für Wasserzugabe, 40˚ Neigung
- 11 Tage Bewässerung; **8-facher Jahresniederschlag in einer Arbeitswoche**
- Schnelle Drainagepfade entlang verschiedener Strukturen (Wurzeln, Steine, Risse im Gestein) verunmöglichen ausgedehnte Sättigung des Hangs



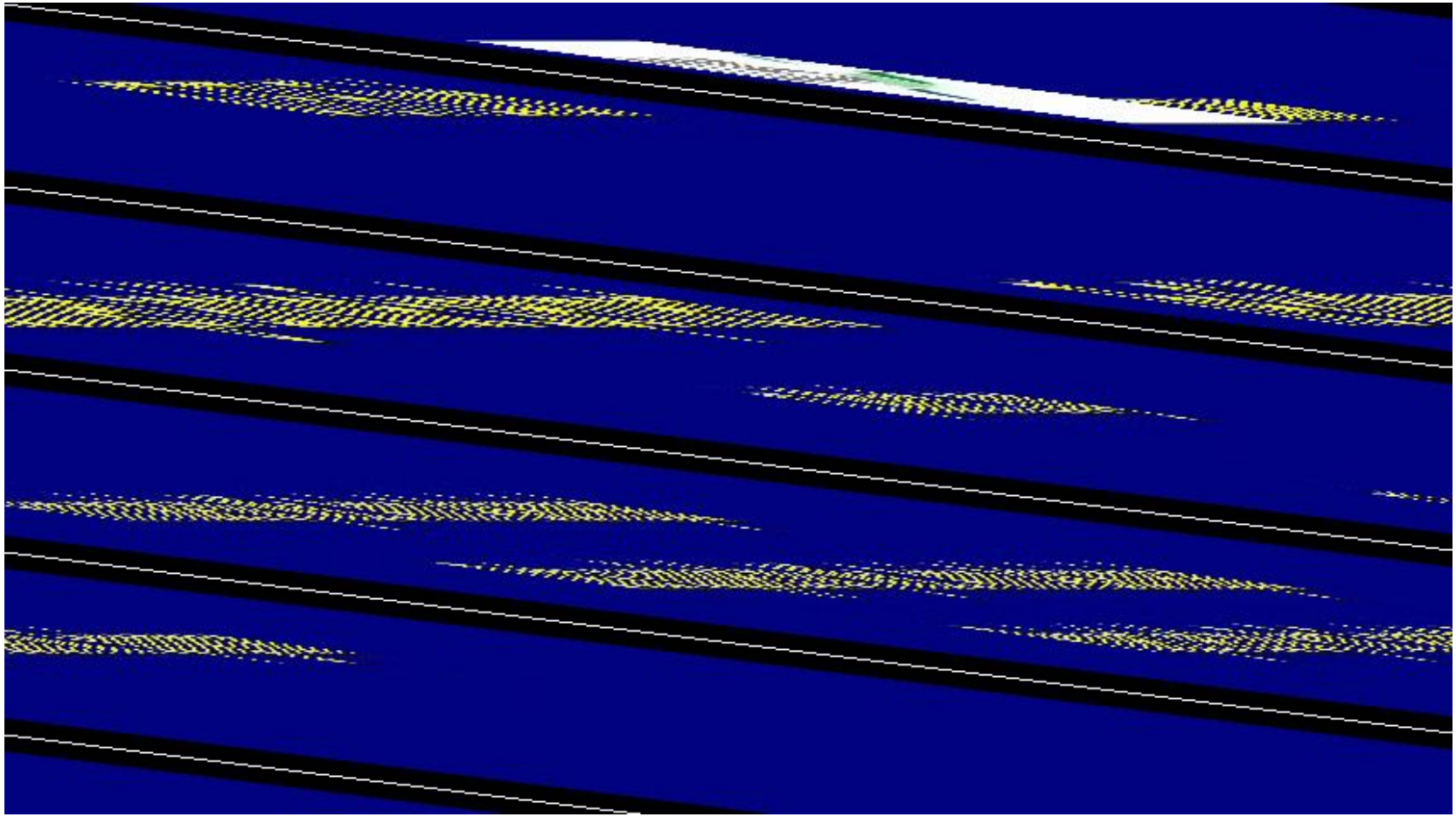
Rüdlingen: Rutschung unter extremen Bedingungen

- Zwei Feldversuche (2008, 2009), Leitung S. Springman (IGT, ETH)
- 40 natürliche Rutschungen 2002 als Hinweis auf Realisierbarkeit
- Nasser Winter, Zerschneiden grosser Baumwurzeln und Fokussierung der Beregnung auf empfindlichen Bereich führten zur Rutschung

- Sprinkler
- Regenmesser
- Geoelektrik
- Wassergehalt
- Wasserdruck
- ‘Akustik’
- Deformationen
- Photogrammetrie

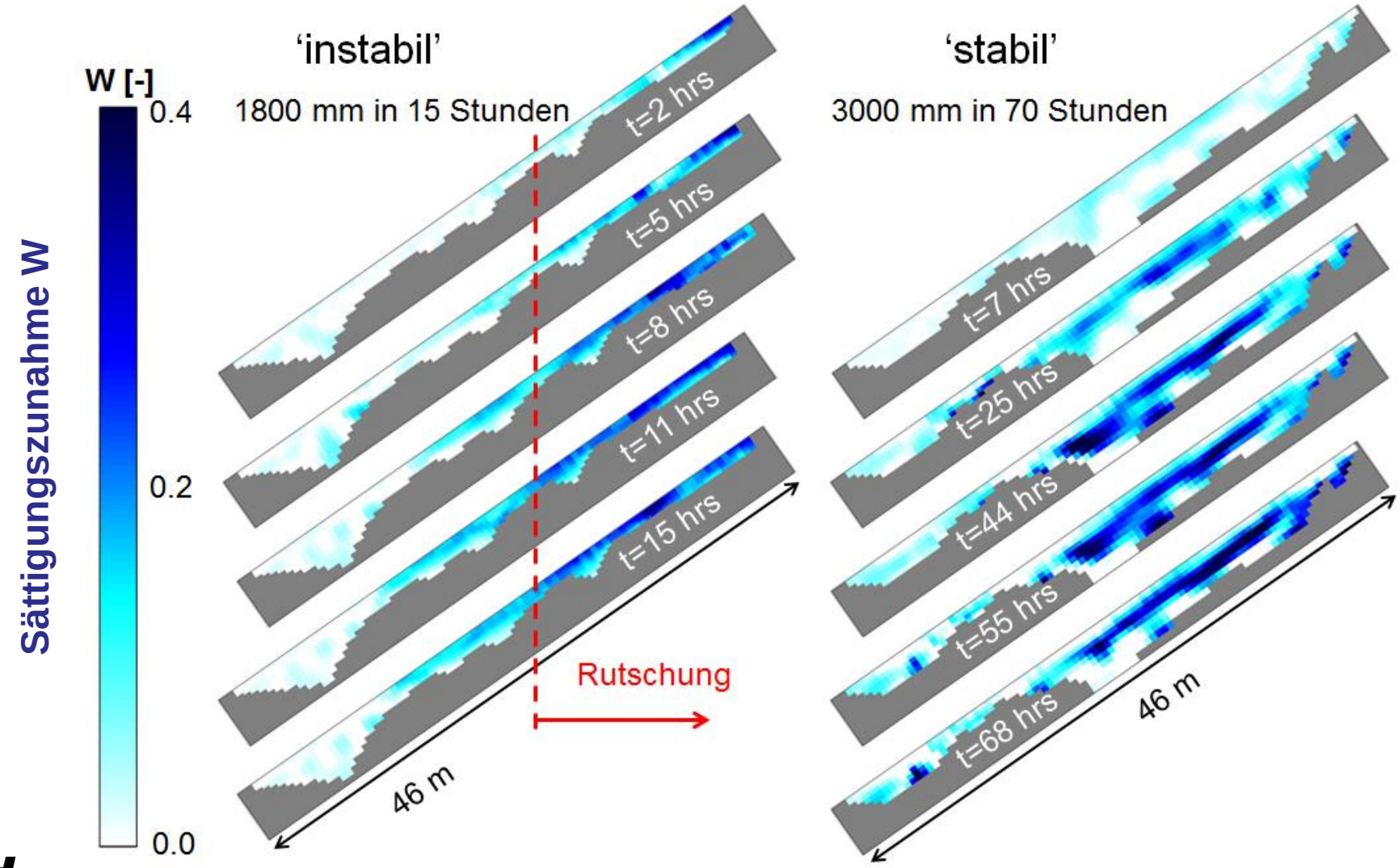
- **In beiden Versuchen positiver Wasserdruck – reicht nicht zur Auslösung**

Rüdlingen: Rutschung unter extremen Bedingungen



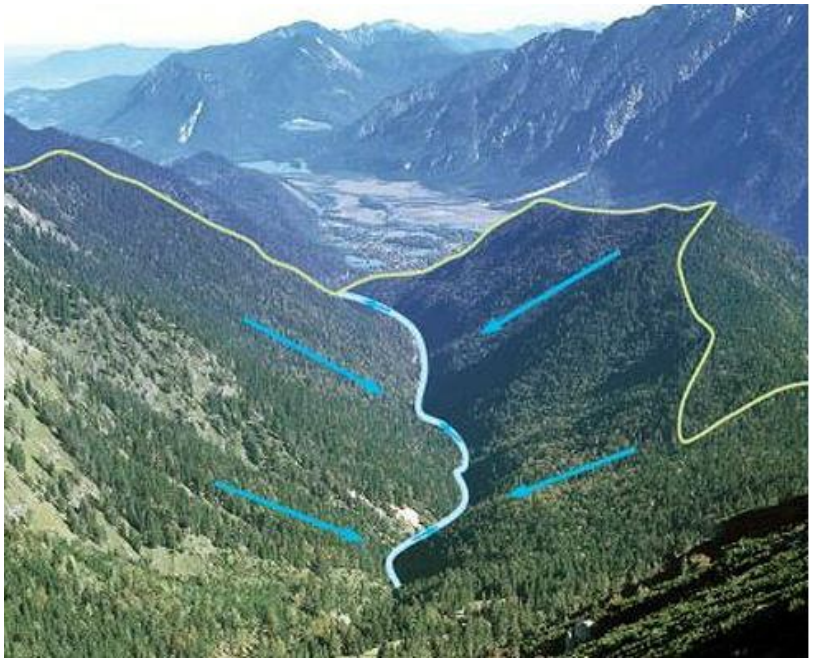
Benetzungsmuster erfasst mit geoelektrischen Methoden

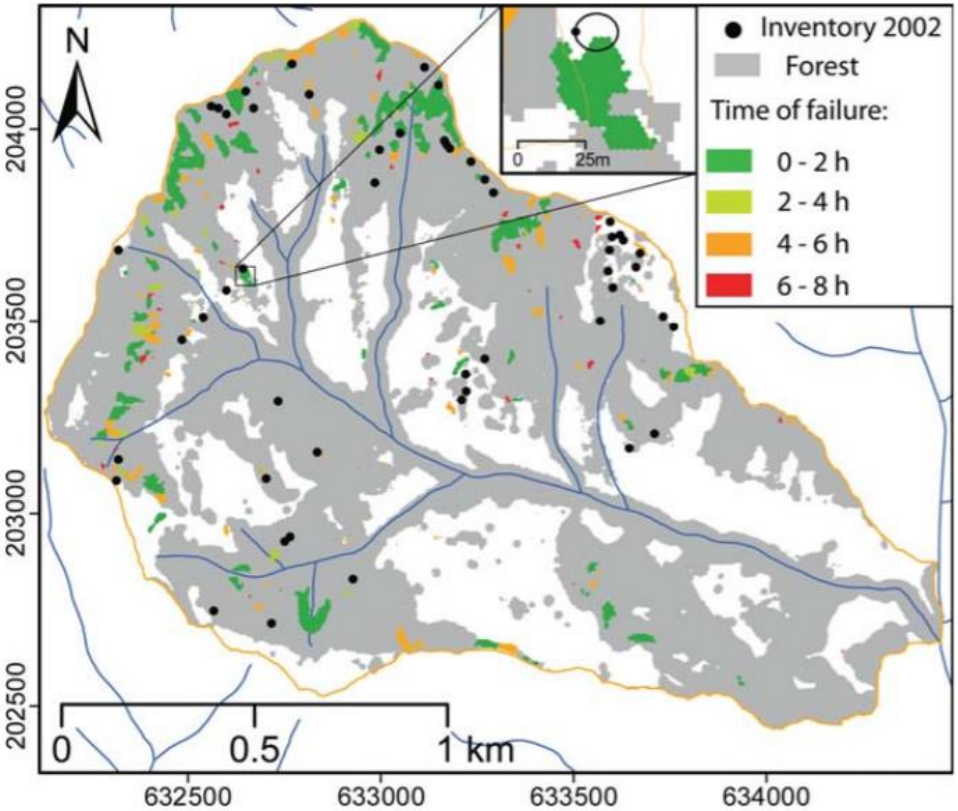
- Unterschiedliche Benetzungsmuster und -richtungen in beiden Versuchen



- **Dünnes, kontinuierliches Band mit homogener Sättigung vor Rutschung**

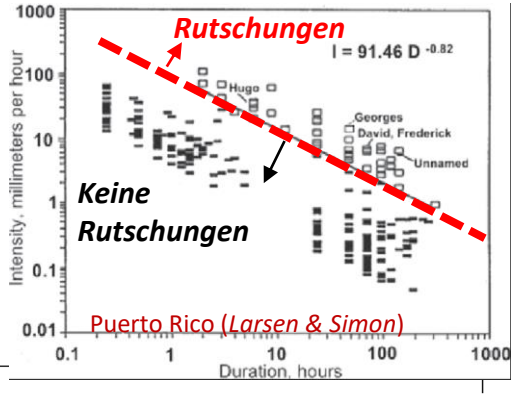
Einzugsgebiet-Skala ('Catchment scale')

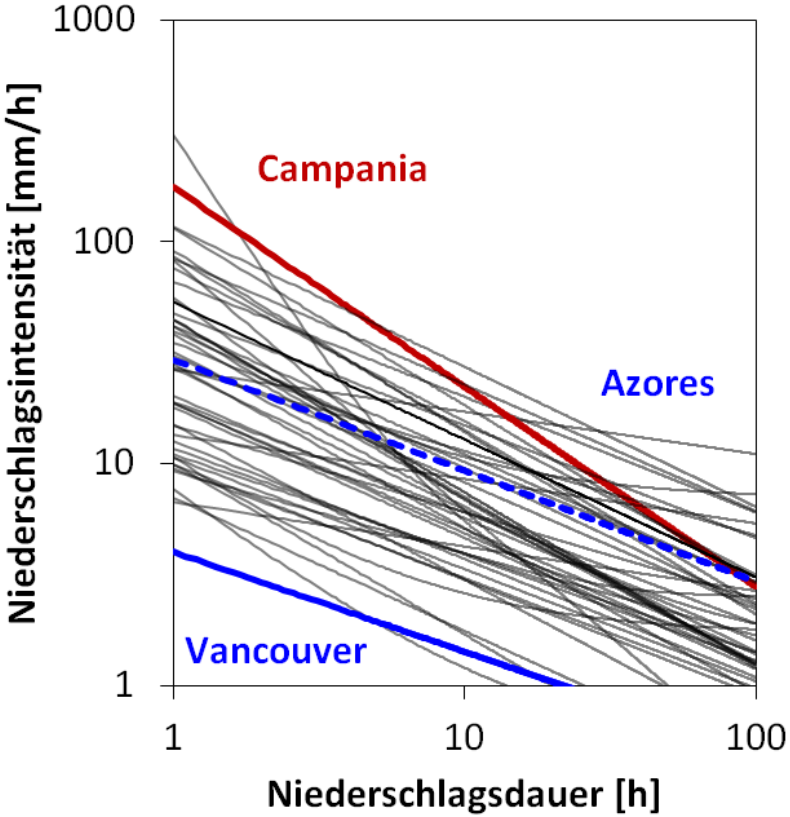


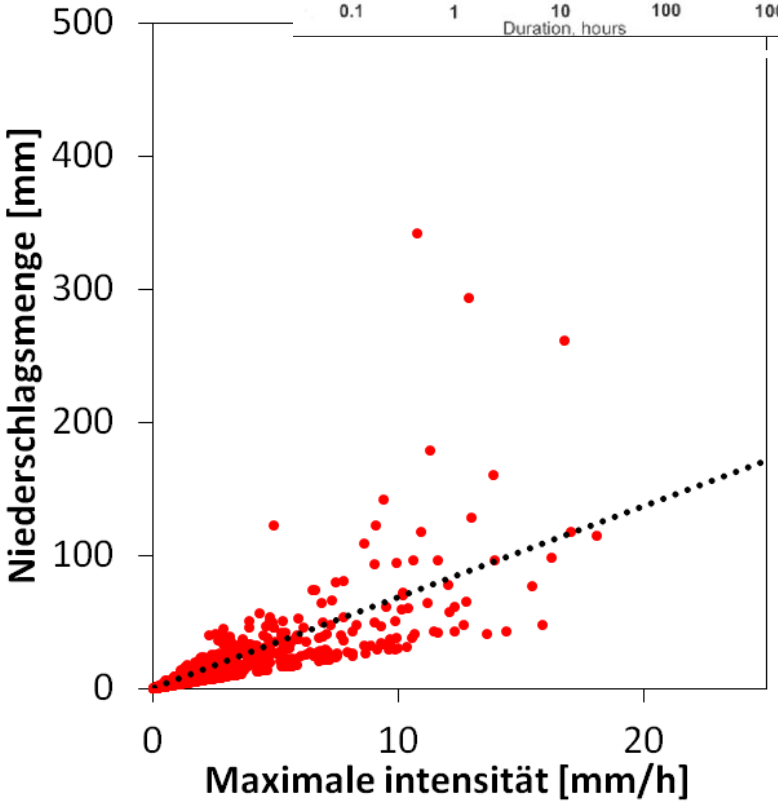


Vorhersagen von Rutschungen aufgrund von Regendaten

- Die Beziehung zwischen Niederschlagsdauer und Niederschlagsintensität kann als Grundlage für die Bestimmung eines Grenzwertes für Rutschungen verwendet werden (s. Präsentation E. Leonarduzzi)
- Diese Grenzwerte sind aber 'nicht übertragbar' und ignorieren die Vorgeschichte ⇨ **bodenhydrologischer Aspekt fehlt!**

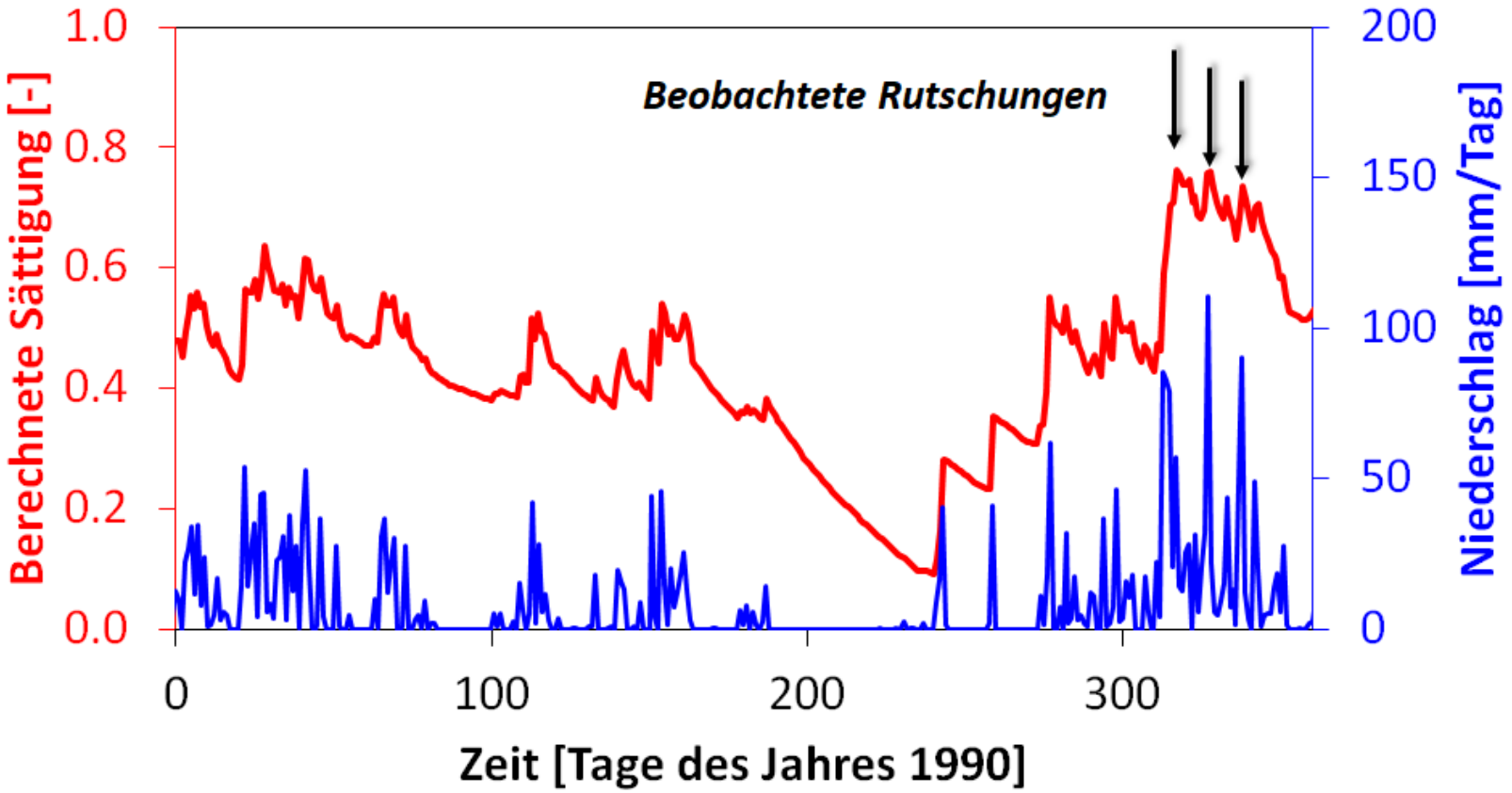






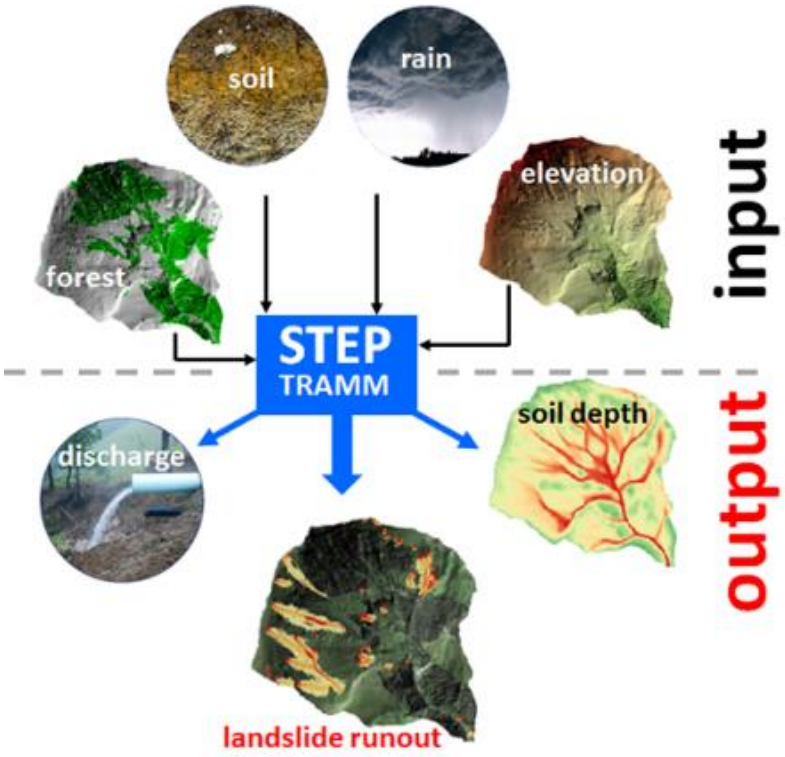
Bodenhydrologische Betrachtungen

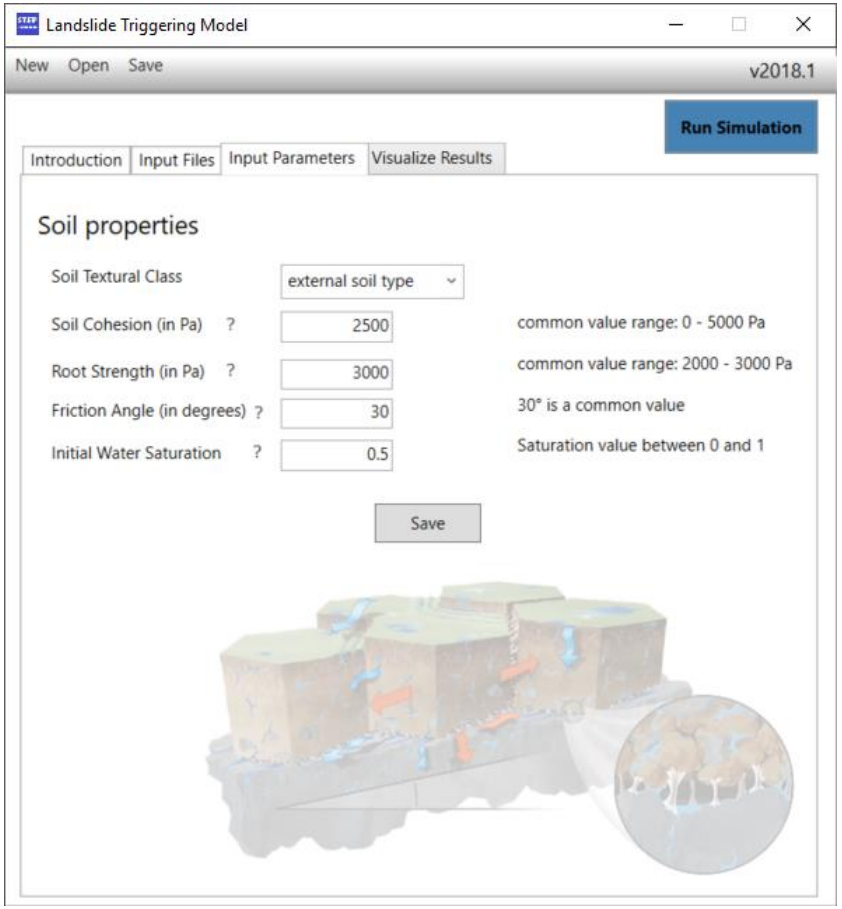
- Bodenhydrologische Prozesse bestimmen die Wasserverteilung im Einzugsgebiet am Anfang eines Niederschlagsereignisses
- Um die resultierende Wassersättigung und damit die Belastung und Stärke des Bodens zu kennen, müssen diese Prozesse simuliert werden



Die Rolle der Modellierung – STEP-TRAMM

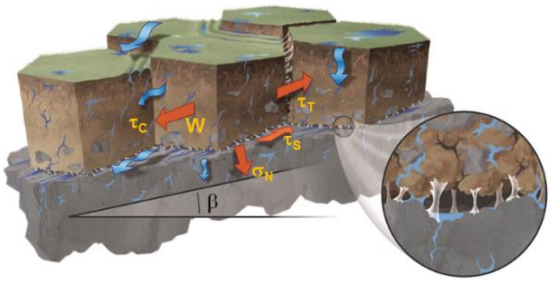
- Einzugsgebiete bilden gewissermassen ein Mosaik aus starken und schwachen Bodensäulen (aufgrund räumlicher und auch zeitlicher Heterogenitäten)
- Die Interaktion dieser Gebiete muss in der Simulation einbezogen werden
- Das frei verfügbare Modell STEP-TRAMM kombiniert Berechnung der Bodentiefe, Rutschungsauslösung und Rutschungsbewegung (https://step.ethz.ch/step-tramm.html)





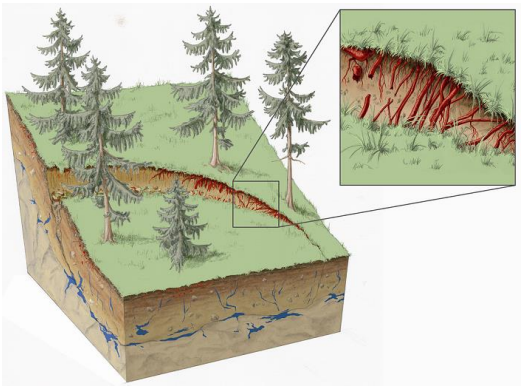
Eigenschaften von STEP-TRAMM

- Berechnung der Bodentiefe, Wasserabfluss, lokale Rutschungsauslösung und Murgang entlang der Oberfläche
- Zur Berechnung wird das Höhenmodell, die räumliche Verteilung des Waldes und der Bodentypen und das Niederschlagsmuster benötigt (wir benutzen öffentlich zugängliche globale Daten – ‘big data’)
- Bodentiefe und bodenhydrologische Prozesse bestimmen den Wassergehalt, die Belastung und Stärke jeder Bodensäule
- Die Bodensäulen sind durch sogenannte Faserbündel mechanisch verbunden
- Reissende Verbindungen können eine Kettenreaktion auslösen, die zu einer Hangrutschung führen



Lehmann and Or, 2012

Von Ruette et al., 2016

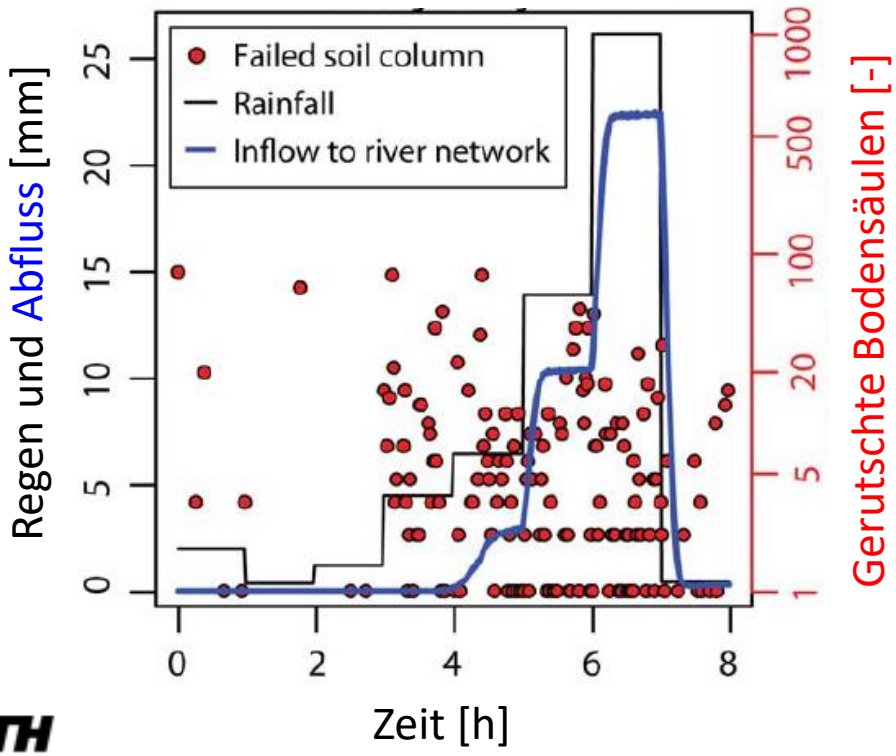


Schwarz et al., 2010

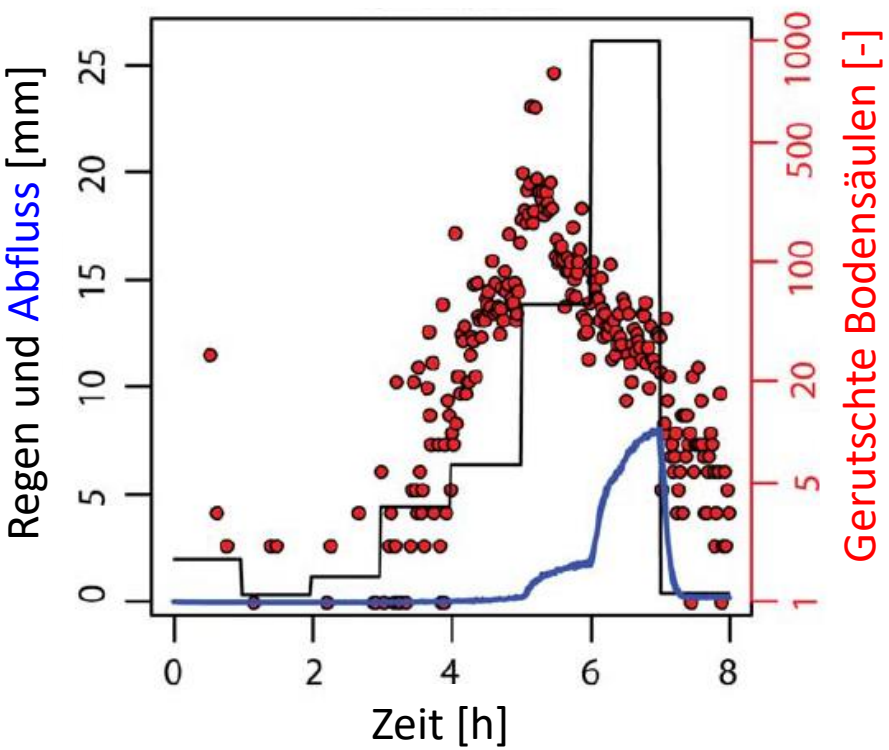
Zusammenhang zwischen Hydrologie und Rutschung

- Beispiel von Napf 2002; Sommergewitter mit hohen Niederschlagsintensitäten (15–25 mm/h) die im Napfgebiet 51 Rutschungen auslösten (Rickli et al., 2003)
- Gemäss Korngrössenverteilungen besteht der Boden aus unterschiedlichen Lehmarten
- Unterschiedliche hydraulische Eigenschaften des Bodens bestimmen die infiltrierte Wassermenge und damit die Belastung

Toniger Lehm

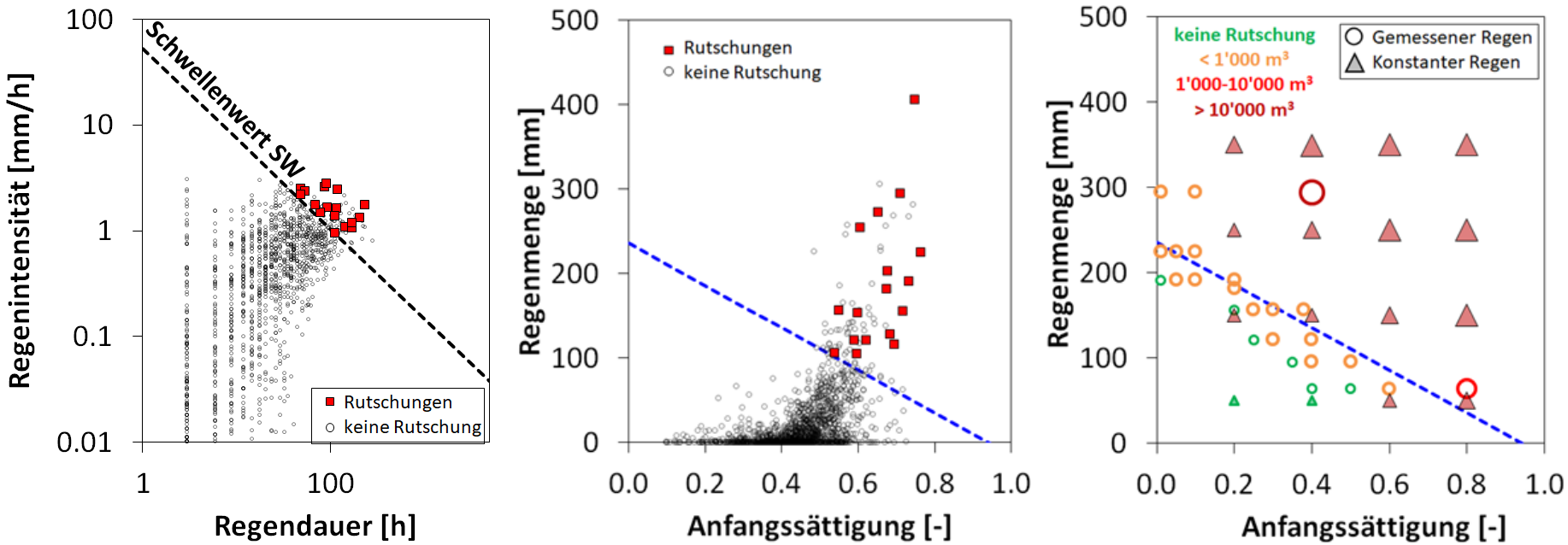


Schluffiger Lehm



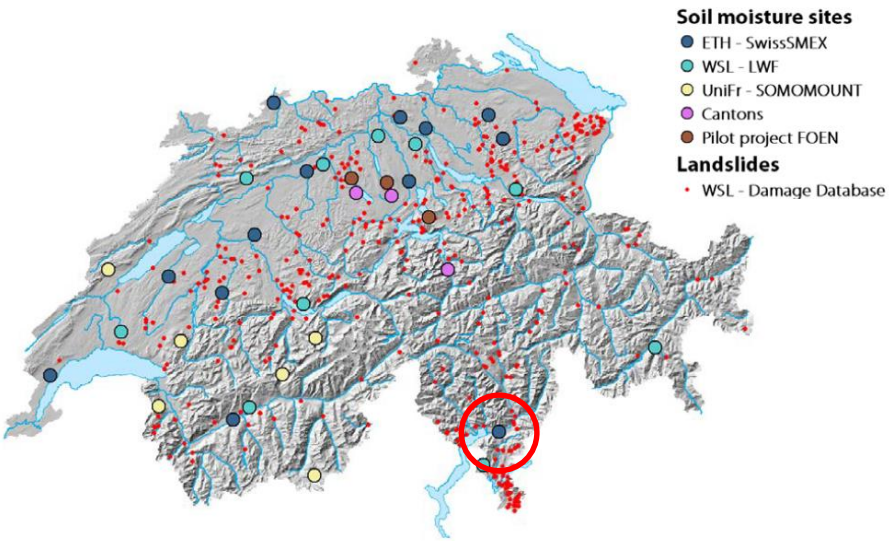
Modellierung von Niederschlagsschwellenwerten

- Können Modellierungen, die Bodenhydrologie berücksichtigen, empirische Niederschlagsschwellenwerte ergänzen oder ersetzen?
- Diskussion anhand von Beispielen aus der Literatur (Vancouver)
- Der Übergang von Simulationen ohne Rutschungen zu grösseren Rutschungen entspricht den Beobachtungen



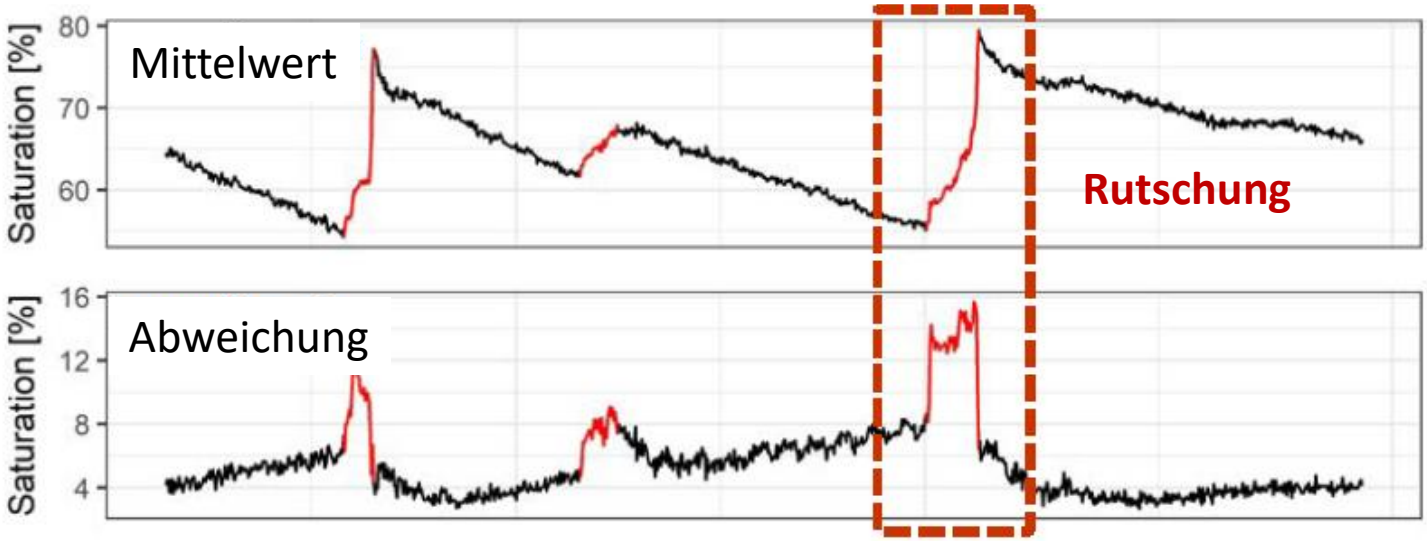
Ausblick (1): Verknüpfung der Rutschungsauslösung mit Bodenfeuchtemessungen

- Projekt 'Assessing the potential of soil wetness data for landslide early warning (Leitung M. Stähli, Dokorand A. Wicki)
- Wassergehaltsmessung an 34 Standorten durch 300 Sensoren, seit 2-10 Jahren (<1.5m Tiefe)
- Ziel: Dynamik der gemessen Wassergehaltssättigung mit dem Risiko einer Rutschungsauslösung verknüpfen
- Zusätzliche Feldexperimente zur Erkennung auslösungsreleventer Benetzungsmuster



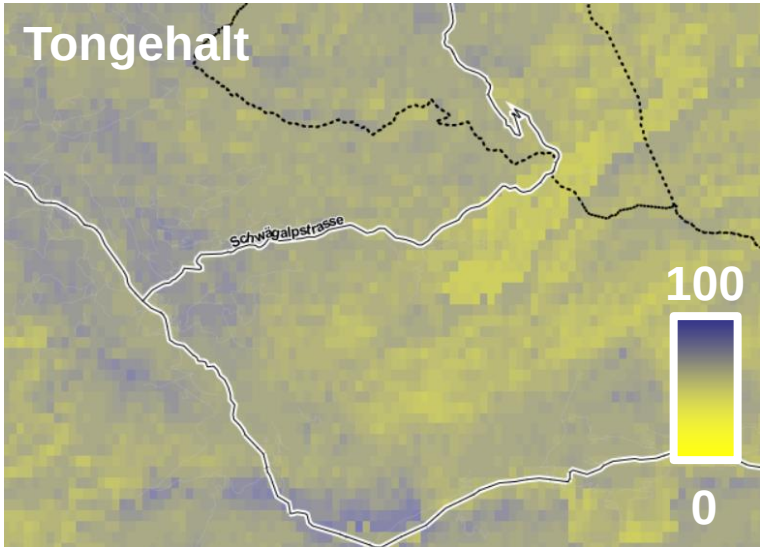
Cadenazzo (September 2009)

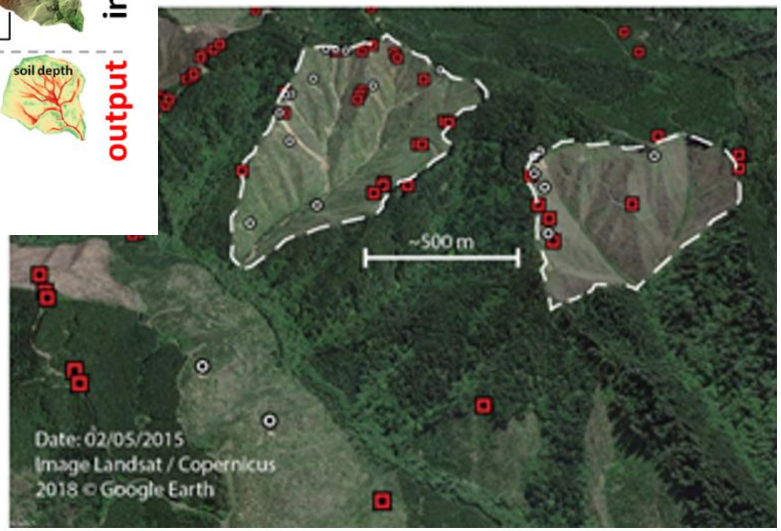
Erkennung von 'Benetzungs-ereignissen' in Wassergehalts-daten

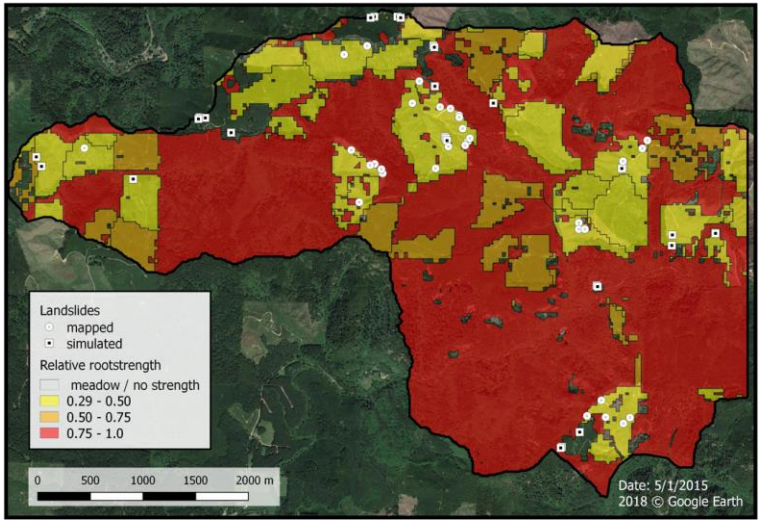


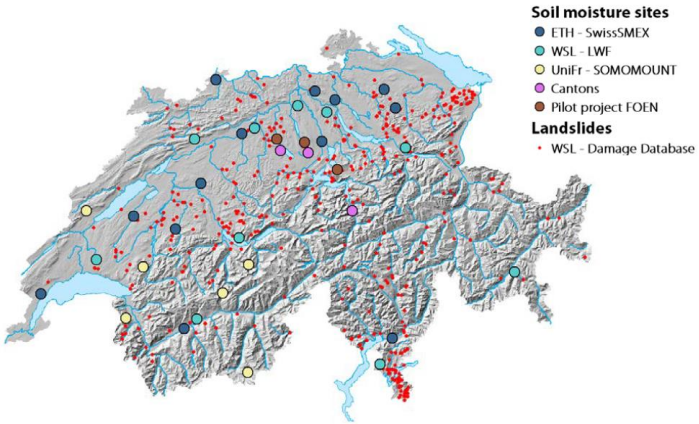
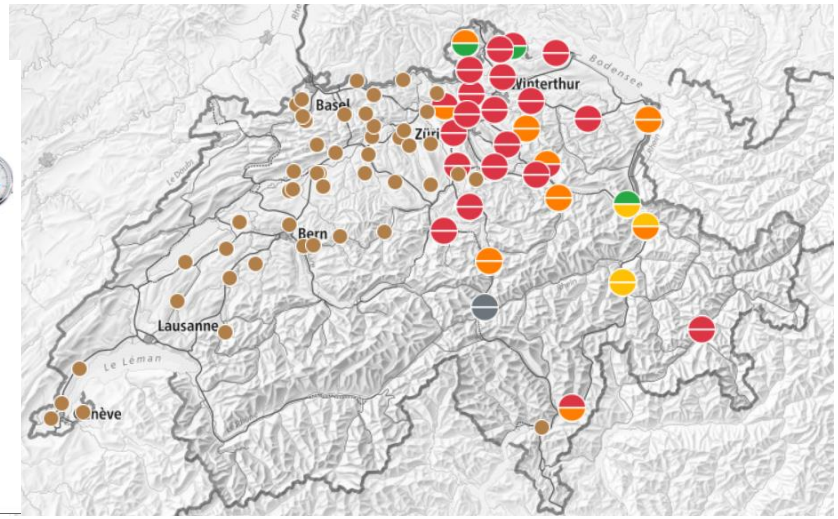
Ausblick (2): (globale) Kartierung von hydro-mechanischen Eigenschaften

- Verschiedene Boden- und hydrologische Eigenschaften sind global verfügbar (bald 100 m Auflösung)
- Auch Karten der Bewaldung und Abholzung sind verfügbar (Anwendungsbeispiel)
- Andere mechanische Parameter sind oft unbekannt
- In kommenden Projekten sollen diese Eigenschaften besser kartiert und verstanden werden







Zusammenfassung

- Bodenhydrologische Prozesse spielen sich auf verschiedenen Skalen ab
- Bodenhydrologische Prozesse bestimmen die Verteilung des Bodenwassers und damit lokal die Stärke des Bodenmaterials
- Die räumliche Verteilung starker und schwacher Bodensäulen beeinflusst die Verteilung der Lasten und die Fortpflanzung von Störungen, die zu Hangrutschungen führen können
- Modelle (wie STEP-TRAMM) können die bodenhydrologischen Prozesse und Kettenreaktionen von Störungen beschreiben
- Wir brauchen mehr räumliche Informationen über die Bodenfeuchteverteilung