

Abschiedsvorlesung G. Gudehus 25.7.2008

DIE RAUE WELT DER BODENMECHANIK

Hoffentlich erwarten Sie keinen Exkurs über Raubeine und Softies; mein Thema ist die *mechanische Rauigkeit* des Bodens, der Kürze halber nur des Sandes. Zunächst werden Sie hören, worum es praktisch geht. Dann zeige ich, wie die Rauigkeit uns wissenschaftlich einen Strich durch die Rechnung machen kann. So werden Sie auch sehen, warum mein Buch solange gebraucht hat und so dick geworden ist. Die Sache ist damit nicht zu Ende, aus der Not der Rauigkeit könnte mit der Seismodynamik eine Tugend werden. Schließlich werde ich den Sand beiseite lassen und etwas über den Tellerrand schauen.

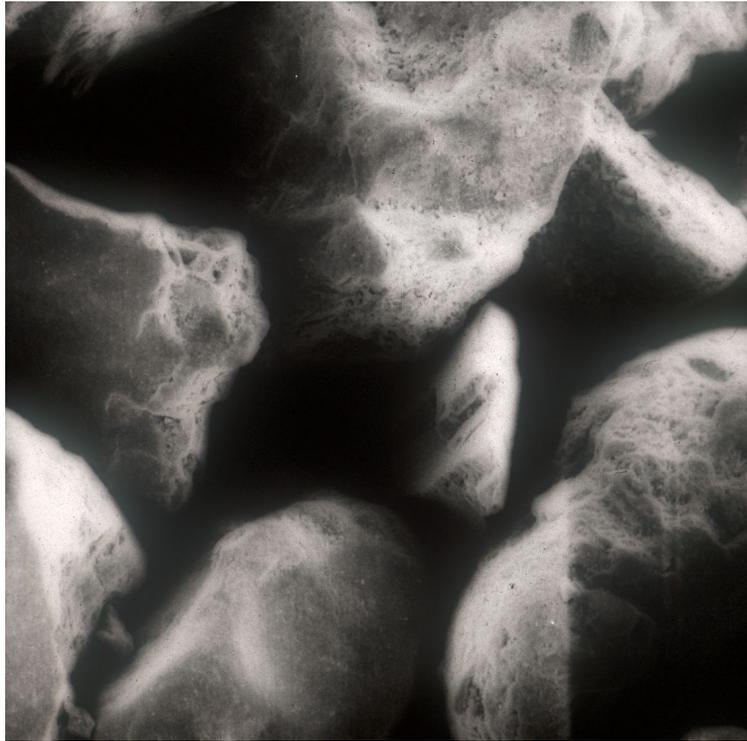
Vor über 30 Jahren wurde in der Nordsee eine Plattform mit einem Betonblock auf dichtem Sand gegründet. Nach dem ersten Orkan stellten Taucher eine Auflockerung des Sandes fest, im zweiten ging die Plattform unter. Die verwendeten geotechnischen Regeln für Entwurf und Ausführung waren zweifellos notwendig, in diesem Fall aber nicht ausreichend für die *Standfähigkeit*. Derartige Katastrophen sollte man physikalisch erklären, um das Stehenbleiben besser garantieren zu können.

Die Magnetbahn in Schanghai wurde auf Bohrpfählen in Sand gegründet. Die Züge fahren über 400, rumpeln aber beängstigend, weil die Gründung nachgibt - wer weiss wie lange man noch nachstellen kann. Die *Funktionsfähigkeit* kann nicht nur dort durch allmähliche Umlagerungen im Sand verloren gehen. Man sollte ein solches schleichendes Desaster eigentlich verhindern, kann dies aber mit gängigen Methoden der Bodenmechanik nicht.

Beim Bau der Südtangente wurde nahe dem Karlsruher Bahnhof ein Betonkasten unter die Gleise geschoben. Man hatte eine Sandschicht unter dem Schotterbett eingebaut, unerwartet entstanden beim Unterfahren Gleiswellen. Die langsame Scherung zwischen dem Kasten und der Sandschicht geriet ausser Kontrolle, das Debakel können Sie sich vorstellen. Die *Kontrollierbarkeit* des granularen Fließens ist nicht nur im Grundbau ein Hauptproblem, die gängige Bodenmechanik gibt dazu nichts her.

Warum versteht man ein so alltägliches Material wie Sand nicht besser? Schauen wir uns einige Körner im Mikroskop an (Foto); sie sind *rau* durch natürliches Mahlen. Deshalb sind keine zwei Körner einander gleich, und ihre mechanische Wechselwirkung ist *nicht konservativ*. Das heisst: Sie ändern sich bei Begegnungen, und ihre Kontaktkräfte ergeben sich nicht mit einer potentiellen Energie aus der gegenseitigen Lage. Methoden der Statistischen Mechanik und der Thermodynamik funktionieren daher für Kollektive von Sandkörnern nicht. Mit Wasser ist es ebenso, nur sind die Körner etwas weicher, Änderungen des Wasserdrucks machen ihnen aber nichts aus.

Hier ist trockener feiner Sand - wie kann man seine mechanischen Eigenschaften erfassen? Bauingenieure sind gewohnt, Proben zu belasten, Spannungs- Dehnungs- Linien aufzuzeichnen und daraus Steifigkeit und Festigkeit herzuleiten. Das mag für Festkörper angehen, ist aber für Sand ganz verkehrt. Ein kleines Experiment: Ich verteile Sand auf einer rauen Platte, drücke eine kleinere Platte ein, lege ein Gewicht auf und schiebe die obere Platte gegen



die untere. Der Schubwiderstand wird bei Verdoppelung des Gewichts doppelt so groß, die Breite der dünnen Schicht spielt keine Rolle, ihre Spreizung ist vernachlässigbar. In größeren derartigen Versuchen beobachtet man eine gleichmäßige Scherung (Bild), wenn der Sand anfangs locker war. Das *Porenzahl* genannte Verhältnis von Poren- und Kornvolumen ist bei fortgesetzter Scherung kleiner bei höherem Druck, weil dann die Körner an ihren Kontakten etwas platter sind. Das Zermahlen von Körnern dürfen wir ausser acht lassen.

Casagrande schlug vor, die so erreichten Zustände *kritisch* zu nennen. Das Verhältnis zwischen Schub- und Druckspannung wird durch einen Reibungswinkel beschrieben, die kritische Porenzahl ist bei größerem Druck kleiner. Casagrande hat seine Experimente nicht beschrieben und das Adjektiv 'kritisch' nicht begründet. Roscoe hat sorgfältiger experimentiert, seine Schüler Schofield und Wroth begründen in ihrem Buch *Critical State Soil Mechanics* das Attribut kritisch aber kaum. Roscoe sagte mir vor vierzig Jahren,

- gleichmäßige kritische Zustände seien ein Eldorado, ein goldenes Land in das niemand gelangen kann;
- das Buch seiner Schüler sei zu früh erschienen, und die darin verwendete Plastizitätstheorie sei für Boden nicht angemessen.

Recht hatte er, das einzusehen brauchte ich einige Zeit. Auch wir haben uns bemüht, Bodenproben bis hin zu kritischen Zuständen gleichmäßig zu verformen. Mit dichtem Sand gelang dies nie, selbst mit die Probe umschließenden Platten bilden sich etwa 10 Körner dicke *Scherbänder* (Bild, links in einem Biaxialversuch, rechts nach unserer Theorie). Dort drehen sich Körner vermehrt gegeneinander, der Drehwiderstand begrenzt die Scherbanddicke. Sobald eine Probe dichter und das Verhältnis von Schub- und Druckspannung größer



als kritisch ist, entstehen Scherbänder und die mechanische Rauigkeit nimmt zu . Dies ist ein *kritisches Phänomen*, das Attribut kritisch ist daher gerechtfertigt.

Wir nehmen meistens gleichmäßige *Bodenelemente* an und beschreiben den Zusammenhang zwischen mittleren Form- und Zustandsänderungen mit Stoffgesetzen genannten Materialgleichungen. Die große Mehrheit arbeitet mit *elastoplastischen* Stoffgesetzen, von Karlsruhe aus setzen sich *hypoplastische* Gleichungen allmählich durch. Welche davon sind wann besser geeignet? Für mein Buch hatte ich mir vorgenommen, beide Theorien unter einen Hut zu bringen. Das misslang zunächst, denn unsere Fachliteratur ist ein Morast von Gleichungen und ein Dschungel von Daten.

Allmählich wurde mir bewusst, dass man mit *Attraktoren* in grafischer Darstellung besser zurecht kommt. Einen Attraktor kennen Sie schon: mit anfangs lockerer Lagerung gelangt man durch Scherung zu einem gleichmäßigen kritischen Zustand. In einem besseren Gerät kann man auch mit konstanter Schichtdicke scheren, dann stellt sich asymptotisch ein kritischer Zustand mit der Porenzahl entsprechendem Druck ein. Wenn allerdings die Probe sehr locker ist, zerfällt sie durch vulumentreue Scherung, und mit einer zu dichten Probe brechen die Körner durch hohen Druck.

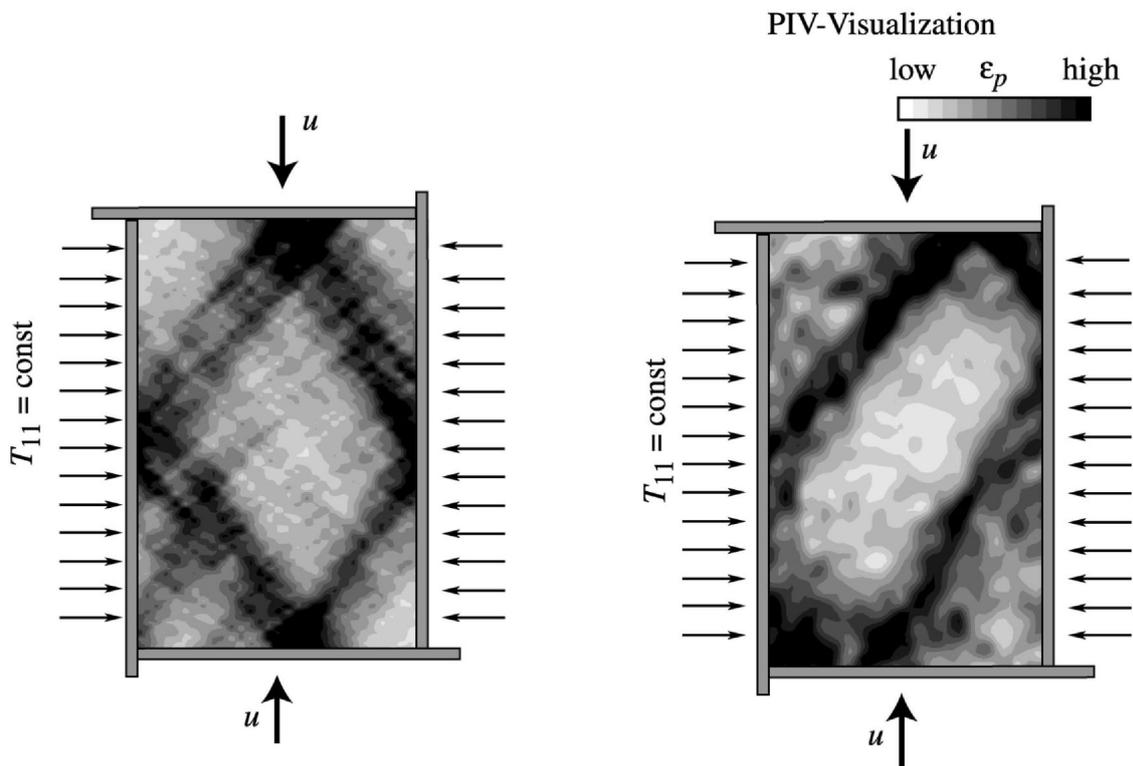
Das Wort Attraktor bezeichnet die asymptotische Lösung eines Systems von Entwicklungsgleichungen. Ich benutze es auch für asymptotische Vorgänge in der Realität. Gemeint ist nicht nur das *autogene* Zusammenziehen auf einen Punkt, wie z.B. dasjenige der Great Attractor genannten Galaxiengruppe. Abgesehen vom Ruhezustand sind die Attraktoren von Sand *exogen*, sie bedürfen der Energiezufuhr und Steuerung.

In meinem Buch schlage ich kritische Zustände als spezielle *Zustandsgrenzen* vor, ausserdem solche mit Aufweitung bis zum Zerfall und mit Verdichtung bis zum Kornbruch. Diese Attraktoren werden mit hypoplastischen Stoffgesetzen besser als mit elastoplastischen wiedergegeben, das zeigt sich beim Vergleich von Experimenten und Berechnungen. Grafische Darstellungen haben dabei den Vorteil, dass man ohne Algebra und Numerik sieht, wie gut

eine Materialtheorie ist.

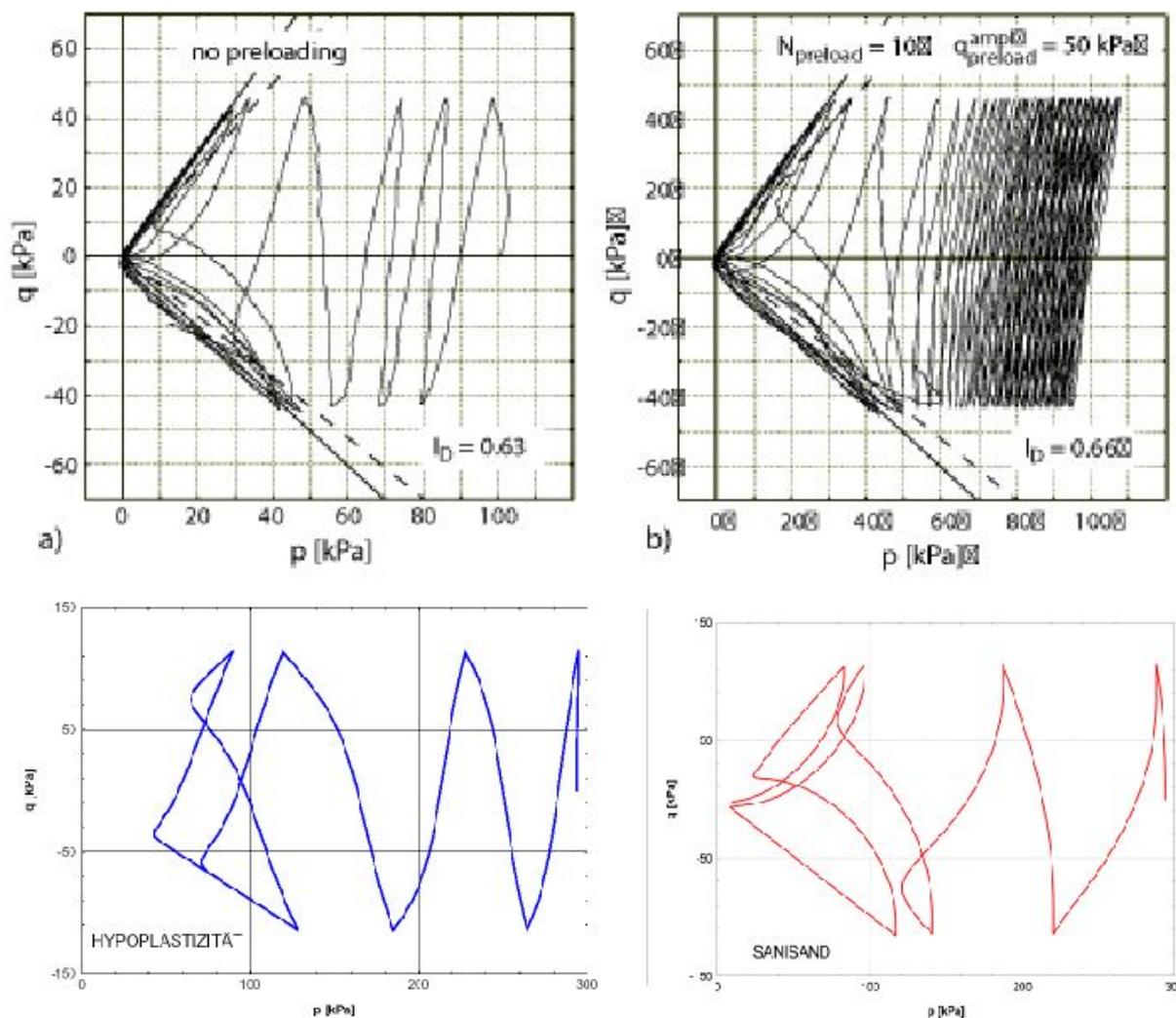
Im Labor führt man Versuche an Sandproben meistens mit *Porenwasser* durch. Da die Körner Änderungen des Wasserdrucks nicht spüren, ändert sich das Kornvolumen nicht, und nur die Differenz von Totaldruck und Wasserdruck ist wirksam. Wir sprechen vom Prinzip der wirksamen Spannungen. Weil die Dichte des Wassers von dessen Druck nicht abhängt, verformt sich gesättigter Sand in wasserdichter Hülle ohne Dichteänderung. So kann man kritische Zustände erreichen, sofern der Sand nicht zu locker oder dicht ist, so dass er nicht zerfällt oder Körner zerbrechen.

Nun zu Vorgängen mit *Umkehrungen*. Wenn ich meine Sandschicht unter Druck genügend oft hin und her schere (vorführen), werden die Änderungen der Porenzahl und der Schubspannung periodisch. Vernachlässigbar ist dabei die Spreizung durch eine genügend dünne Schicht, und der Kornabrieb durch nicht zu hohen Druck. Der erreichte *Zustandszyklus* ist ein Attraktor, denn der Anfangszustand spielt keine Rolle. Die Amplitude möge so klein bleiben, dass die Schubspannung nie überkritisch wird, dann bilden sich keine Scherbänder. Einen Zustandszyklus erhalte ich auch durch Scherung im Pilgerschritt, zum Beispiel drei vor und einen zurück. Bei diesem sog. *Ratcheting* überwiegt die entgegenwirkende Schubspannung.



Zustandszyklen mit Wassersättigung kann man auch in anderen Versuchen erreichen, z.B. mit zylindrischen Proben und konstantem Volumen. Hier ein Ergebnis aus Bochum (Bilder): Unabhängig vom Anfang strebt bei zyklischer Belastung ohne Entwässerung der von Schubspannung und Korndruck gebildete Pfad zu einer Art *Schmetterling*. Ähnliche Attraktoren

erhält man mit einer von Niemunis hier entwickelten Software (Bilder): Sowohl ein elastoplastisches Stoffgesetz mit Gegendruck als auch ein hypoplastisches mit intergranularer Dehnung führen zu einem Schmetterling. Das kann man den Gleichungen kaum ansehen, für diesen Zweck wurden sie überdies nachgebessert. Die Grafiken sind dagegen mit einem Blick klar. In diesem Bild aus Japan sehen Sie (Bild), dass bei Ratcheting (rechts) der Spannungspfad (links) zu einer Art *Linse* tendiert. Mit einem elastoplastischen Stoffgesetz gerät diese Linse etwas zu dick, mit einem hypoplastischen zu dünn (Bilder).

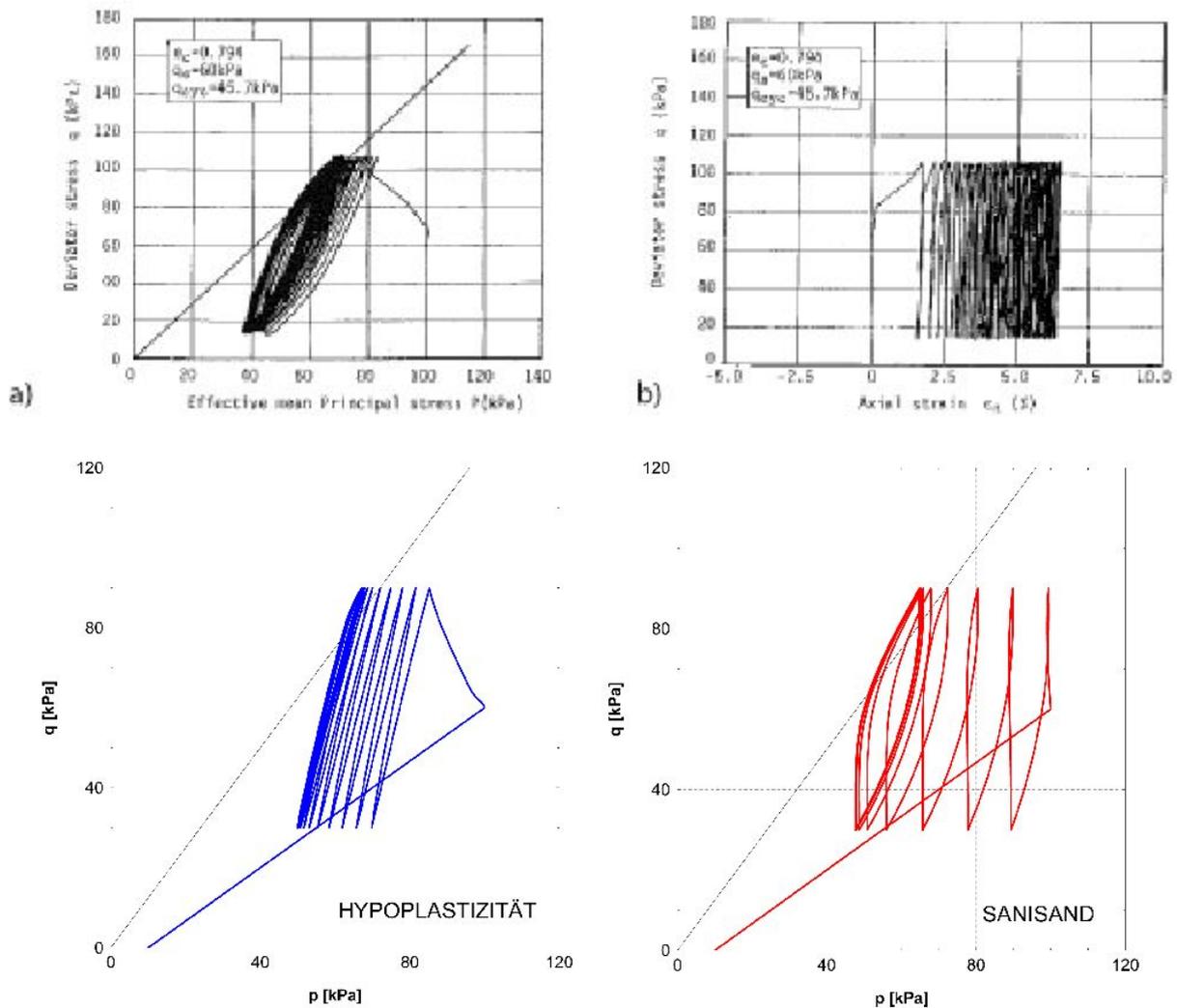


Was kann man mit solchen Zustandszyklen erreichen? Im Experiment wird die Erinnerung an unbestimmte Details am Versuchsbeginn durch wiederholte Umkehrungen ausgebügelt, so gewinnt man *Objektivität*. Wie immer geht das nur für einen gewissen Bereich; bei den gezeigten Versuchen darf die Porenzahl nicht zu groß oder klein sein. In diesem Rahmen kann man Stoffgesetze durch Vergleich numerischer und experimenteller Attraktoren in Grafiken rasch beurteilen. Dafür ist die von Niemunis entwickelte Methode ein starkes Werkzeug. Es hilft Anwendern bei der Auswahl und Studierenden beim Lernen, für Arithmetik und Algebra sind wir nicht geboren. Hinzu kommt, dass Stoffgesetze sich bald ändern und neue

Experimente aufkommen, Details aber nur Wenige interessieren.

Schmetterlings- oder linsenförmige Zustandszyklen erhält man auch für Scher- und Biaxialversuche mit zwei Komponenten, aber nicht für mehr als zwei. Bei den anfangs genannten Beispielen und überhaupt im Baugrund verformen sich Bodenelemente nicht wie in Laborversuchen, von deren Wahl können die Materialeigenschaften aber nicht abhängen. In meinem Buch zeige ich, wie allgemeinere Attraktoren aussehen, so werden Bodeneigenschaften für beliebige Verformungen objektiv definiert.

Der Gegendruck für elastoplastische Stoffgesetze und die intergranulare Dehnung für hypoplastische werden von ihren Erfindern physikalisch nicht erklärt. Was soll man sich unter solchen nicht beobachtbaren Zustandsgrößen vorstellen? Seit langem ist mir bewusst, dass sie die *Kraftrauigkeit* repräsentieren, d.h. die räumlich ungleichmäßige Verteilung von Kornkontaktkräften. Diese konzentrieren sich auf Korn- oder Kraftketten, weil die rauen Körner nicht zueinander passen. Bei gegebenen mittleren Porenzahlen und Spannungen kann die Kraftrauigkeit verschieden groß sein, bei Vorgängen mit Umkehrungen pulsiert sie.



Vor über 30 Jahren habe ich vorgeschlagen, für monotone Verformungen die Kraftraugigkeit als durch die mittlere Spannung bestimmt anzusehen. Dann braucht man sie explizit nicht, daraus entstand die Hypoplastizität und überholte die Elastoplastizität. Der Wettbewerb zwischen der Karlsruher Schule und dem Rest der Welt ist damit aber nicht zu Ende. Eben sahen Sie, dass beide Stofftheorien Schmetterlinge und Linsen etwa gleich gut wiedergeben können.

In Berechnungen ersetzen wir Sand durch ein *Kontinuum* und arbeiten mit Anfangs- und Randbedingungen - darf man das? Die Körner bewegen sich ruckartig gegeneinander, der Verlauf ihrer Lagen mit der Zeit ist also *rau*. Geschwindigkeiten erhalten wir nur nach einer Glättung - wir schauen nicht so genau hin oder denken uns Mittelwerte von oft wiederholten Umlagerungen. Die räumliche Verteilung von Geschwindigkeiten müssen wir nochmals glätten, um Gradienten bilden zu können. Wir wollen ja Formänderungen von Kornkollektiven erfassen, einzelne Körner interessieren uns nicht. Auch die Spannungen im Sand verlaufen zeitlich und räumlich nicht so glatt, wie wir es für Berechnungen annehmen. Die Kraftraugigkeit entgeht uns, wenn wir Spannungen als geglättete Kraftdichten auffassen. Schauen wir, wie weit man so kommen kann.

Stellen wir uns eine Windmühle vor, deren Mast offshore mit einem großen Pfahl in dichtem Sand gegründet ist. Um sie rechnerisch beurteilen zu können, ersetzen wir Baugrund und Pfahl durch ein Kontinuum mit Materialgleichungen, Anfangs- und Randbedingungen. Nehmen wir an, der Sand sei nach der Pfahleinbringung dicht und nicht verspannt. Er werde durch ein Stoffgesetz repräsentiert, dessen Kenngrößen im Labor bestimmt wurden. Für das Porenwasser brauchen wir überdies die Durchlässigkeit nach dem Gesetz von Darcy, denn der Porendruck ist nicht immer hydrostatisch. Eine Art Matratze liege auf dem Sand, damit dieser nicht zu Brei wird. Als Randbedingung haben wir damit einen Druck an der Sandoberfläche, dort ändert sich der Wasserdruck bei Seegang. Durch Wind und Wellen wird der Pfahl hin und herbewegt, das überträgt sich auf den Sand daneben.

Selbst mit so vereinfachten Bedingungen und einem Großrechner wird die Vorhersage von Lage- und Zustandsänderungen sehr aufwändig, fehlerträchtig und anfechtbar. Man braucht Zigtausende von finiten Elementen mit Hunderten von Zeitschritten und muss aufpassen, dass sich keine numerischen Fehler einschleichen. Nahe dem Pfahl lockert sich der Sand auf, danach nimmt dort der Porendruck zu, das Korngefüge kann dadurch zerfallen und zu Brei werden. Dann versinkt und zerbricht die Matratze, der Bodenwiderstand am Pfahl wird immer kleiner, bis die Mühle kentert.

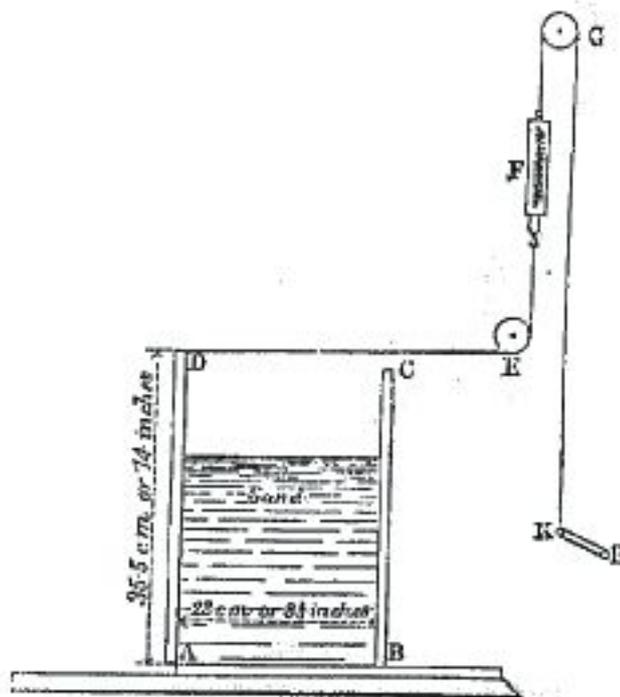
Der Zerfall ist wie die Scherlokalisierung ein granularer Phasenübergang ohne Übergangsenergie. In beiden Fällen kommt es zur Aufrauung, das sind *kritische Phänomene*. Unsere Berechnung endet beim Zerfall, für Sandbrei gibt es noch kein Rechenmodell. Deshalb können wir Lage und Zustand von Pfahl und Sand nach einem Sturm nur unter günstigen Voraussetzungen vorhersagen. Das deterministische Chaos nach dem Übergang zum Sandbrei kann man nicht verfolgen, wir können bestenfalls seinen Beginn ausschließen.

Nehmen wir an, dass unsere Mühle nach einem Sturm etwas schief steht, nur der obere Teil des Pfahls elastisch verbogen und der Sand daneben aufgelockert und verspannt ist. Das Zustandsfeld ist also rau. Im Normalbetrieb entspannt und verdichtet sich der Sand durch

Wind und Wellen, der Pfahl wird wieder gerade und entspannt sich auch. Diese Ertüchtigung für den nächsten Sturm bewirkt ein *Attraktor im Großen*, denn das so erreichte gleichmäßige Dichte- und Spannungsfeld hängt nicht ab vom gestörten Anfangsfeld, solange der Pfahl unten elastisch eingespannt ist. Mit unseren Gleichungen können wir zeigen, dass der Sand sich entspannt und verdichtet, aber eine solche Selbstheilung noch nicht gut quantifizieren.

Unsere Berechnungen ergeben auch, dass ein in aufgelockertem Sand schief eingebetteter Block sich durch viele kleine Wellen aufrichtet und mit Verdichtung etwas einsinkt. Dies entspricht Beobachtungen in der Nordsee, genauer berechnen kann das aber noch niemand. Berechnungen mit großen Wellen sind ebenso schwierig wie mit nur einem Pfahl, selbst wenn man die Bildung von Sandbrei vermeidet. Bei Gründungen mit Pfahlgruppen gibt es gegen den Sand horizontale und vertikale Verschiebungen. Zur Aufrichtung nach einem Sturm kann es nur kommen, wenn die Pfahlfüße am Platz bleiben. Berechnen kann man dies noch nicht - davon nachher mehr.

Man kann zur Selbstheilung führende Attraktoren in Modellversuchen beobachten, deshalb werden diese am Institut durchgeführt. Man kann so erkennen, wie sich der Übergang zum Attraktor vereinfachen lässt. Es wird aber dabei bleiben, dass Berechnungen mit sehr vielen Umkehrungen und verborgenen Variablen nicht ausreichen und zu aufwändig sind. Die Standfähigkeit bei einem Sturm können wir im allgemeinen noch nicht nachweisen, weil wir den Übergang zum Sandbrei ausschließen müssen. Man mag den Zerfall als *seltsamen Attraktor* bezeichnen, denn er führt zum deterministischen Chaos. Damit ist aber wenig gewonnen, solange keine Theorie für solche kritischen Phänomene vorliegt.



Wie steht es mit der Stand- und Funktionsfähigkeit bei alltäglichen Bauwerken auf und in Sand? Da genügen doch die gängigen Rechenverfahren - oder? George Darwin führte vor 120 Jahren Modellversuche mit einer Stützwand durch (Bild). Es zeigte sich, dass der

Erddruck mit bis heute gebräuchlichen Verfahren nicht richtig erfasst wird und von der Reihenfolge des Sandeinbaus abhängt. Darwin fragte den Physiker Maxwell um Rat, dieser meinte „that sand when put together in different ways would exercise different thrusts, although presenting the same appearance“. Nach Darwins Meinung wird die mathematische Erfassung durch dieses *historische Element* unmöglich. In heutigen Standardverfahren wird das historische Element ignoriert; das geht nicht immer gut, darüber wird aber ungerne berichtet. Oft genügen bewährte Fundamentbreiten und Stützwanddicken, für Innovationen bedarf es aber einer an der Realität validierten Bodenmechanik.

Wie könnte man eine Fahrbahnaufrauung wie in Shanghai vorhersagen und vermeiden? Mit Hunderttausenden von Zugüberfahrten sacken die Bohrpfähle allmählich und ungleichmäßig ein. Der Sand neben und unter ihnen wird kaum verdichtet, nahe dem Pfahl pulsiert das Spannungsfeld, der Porendruck bleibt annähernd hydrostatisch. Das Zustandsfeld ändert sich somit nahezu zyklisch, dies ist wieder ein *Attraktor*. Mit unserem Rechenmodell könnte man solch einen Zyklus schon mit wenigen Überfahrten erreichen, denn die Kraftrauigkeit passt sich nach einigen Umkehrungen an. Man wird aber die Sackung durch Überfahrten so nur ungefähr vorhersagen können.

Damit schlage ich nicht etwa vor, solche Berechnungen in jedem Fall durchzuführen. Sandiger Baugrund ist von Natur aus ungleichmäßig, daran ändert sich durch die Pfahleinbringung nichts. Mit Attraktoren könnte man immerhin erkennen, wie sich die Dichte im Nahfeld nach der Pfahleinbringung auf die Sackung bei vielen Überfahrten auswirkt. Selbstverständlich gibt es mit kleineren Porenzahlen weniger Sackung, deshalb sind eingerüttelte Pfähle günstiger als gebohrte. Da das Nahfeld der Spannungen sich schon nach wenigen Überfahrten anpasst, ist eine Verspannung durch den Einbau nutzlos.

Ein verwandtes Problem ist das allmähliche Herauskommen von *Ankerstäben*. Vor Jahren entdeckte man, dass mit Zement verpresste Anker in dichtem Sand sehr gut halten. Bei uns konnte dies mit der Verklemmung des zur Aufweitung neigenden Sandes erklärt werden. Mazurkiewicz erkannte, dass die Verklemmung durch axiale Vor- und Rückverschiebung abnimmt. Das merkt man schon beim Herausziehen eines Zaunpfostens, aber die Quantifizierung ist schwierig. Mit unserem mechanischen Modell können wir bis jetzt Beobachtungen nur mit nachträglicher Anpassung von Kenngrößen nachbilden. Für Prognosen müsste man die *Grenzzone* zwischen Pfahl und Boden besser verstehen. Dort macht die gegenseitige Drehung der Körner mehr aus als im Bodeninnern, ausserdem wandern feinere Körner dorthin.

Damit bin ich bei der *Kontrollierbarkeit* des langsamen granularen Fließens. Eine Sanduhr entleert sich mit von der Füllhöhe unabhängiger Geschwindigkeit. Ein Honigspender entleert sich dagegen rascher, wenn er voller ist - Sand ist also eine seltsame Flüssigkeit. Beim Entleeren von Silos fließt Schüttgut oft ruckartig, dann können Druckstöße den Behälter beschädigen. Diese Rauigkeit von Bewegungen und Kräften geht einher mit hässlichen Geräuschen - man kann von *Klangrauigkeit* sprechen. Mit Rütteln oder Schlagen fließt das Schüttgut rascher heraus, dadurch nehmen die Drücke aber so zu, dass ein Silo platzen kann. Die Methoden der Strömungsmechanik versagen, mit bodenmechanischen Modellen konnten wir nur den Beginn der mechanischen Aufrauung erfassen. Man mag wieder von kritischen Phänomenen und seltsamen Attraktoren sprechen, damit ist aber wenig

gewonnen.

Beim Eindringen eines Pfahls in Sand fließt dieser an Pfahlfuß und Pfahlschaft vorbei. Von der Grenzzone am Schaft war schon die Rede, hinzu kommt nun der Fußbereich. Wie bei Silos wird der Sand durch Rütteln beweglicher, damit verringern sich die Kräfte im Pfahl. Mit großem Aufwand können wir solche Vorgänge rechnerisch nachempfinden, physikalisch überzeugend ist das aber nicht. Ich schlage vor, sich auf Grenzzustände und Zustandszyklen zu konzentrieren, die sich asymptotisch einstellen können. Solche Attraktoren hängen vor allem von der Porenzahl im Nahfeld des Pfahls ab. Schon dafür ist der Rechenaufwand groß, und Grenzzonen mit polaren Effekten und Entmischung kommen wir noch nicht bei.

Dass Sand eine seltsame Flüssigkeit ist, wird mit *Porenwasser* noch deutlicher, erst recht wenn Luft eingeschlossen ist. Lockere Sandmassen können nach einer kleinen Erschütterung lawinenartig wegfließen, dadurch sind wiederholt Menschen umgekommen. Wir konnten den Beginn dieses Fließens aufklären: Das Korngefüge zerfällt durch Scherung mit konstanter Dichte, dadurch wird an Böschungen kinetische Energie freigesetzt. Wann genau Erschütterungen Sandlawinen auslösen, kann man aber bis heute nicht sagen. Daher ist auch nicht klar, wie man gemessene Erschütterungen und Porendrücke deuten soll. Noch weniger versteht man den weiteren Verlauf; anscheinend bilden sich reibungsfreie Luftkissen, und nach deren Ausbrechen erstarrt die Masse plötzlich. Einem solchen deterministischen Chaos kommt man mit Methoden der Kontinuumsmechanik nicht bei.

Wie angekündigt komme ich nun zur *Seismodynamik*, und lasse wieder das Wasser zunächst weg. Die freie Oberfläche von Sand wird durch Schütteln waagrecht (Vorführung), dabei wird der Druck hydrostatisch. Barkan beobachtete, dass so vorübergehend eine viskose Flüssigkeit entsteht. Strömungsmechaniker schlugen dies auch für rasches Fließen ohne Schütteln vor, dabei ist die Porenzahl größer als bei lockerster Lagerung. Die kinetische Energie der regellosen Kornbewegung wurde als *granulare Temperatur* bezeichnet, deren Entstehung blieb aber offen. Später schlug man auch eine *granulare Entropie* vor, also ein Maß für die innere Unordnung. Beide Größen wurden einander wie in der Thermodynamik zugeordnet, für Sandboden funktionierte das aber nicht.

Man weiss, dass trockener Sand auch in dichter Lagerung mit Erschütterungen leichter fließt. Offenbar vermindert sich der Reibungswiderstand im Korngefüge. Meine dünne Schicht fließt mit einer kleineren als der statisch möglichen Neigung, wenn sie gerüttelt wird. Das erinnert an das Erweichen eines Festkörpers durch Erwärmen. Die regellos verteilte seismische Energie wird in Wärme umgewandelt, ohne deren Ableitung würde der Sand sich erhitzen. Für die Energiebilanz habe ich mir eine Feldgleichung überlegt, auf die mein Nachfolger auf anderem Wege auch gekommen ist. Die Begründung mithilfe einer granularen Entropie ist uns aber nicht so recht gelungen.

Die *seismische Aktivierung* habe ich in meinem Buch heuristisch eingeführt, weil es Analogien zur thermischen gibt. Man kann eine erschütterungsbedingte Umlagerung oder Entspannung als seismisch aktiviertes Kriechen oder Relaxation deuten. Standfähigkeit bedeutet damit, dass nach einer kleinen Erschütterung die seismische Aktivität von selbst verschwindet. Wenn umgekehrt die Seismik von selbst zunimmt, geht Sand vom Gleichgewicht zum Fließen über. Diese Definitionen sind aber für Anwendungen nicht allgemein genug. Mir war

auch lange nicht klar, wie man die Seismodynamik mit der Thermodynamik kombinieren kann, auch wenn Porenwasser mitwirkt.

Durch einen Hinweis von Kolymbas stieß ich im letzten Herbst auf Arbeiten des Tübinger Physikers Liu und seiner Doktoranden. Inzwischen heisst deren Theorie *Granular Solid Hydrodynamics*, das klingt fremdartig und provokativ. In einem monatelangen Dialog konnte ich mich mit Liu verständigen. Er geht von einer Theorie Landaus aus, die er auf flüssiges Helium, Flüssigkristalle und Polymere anwenden konnte. Die Erweiterung auf Sand mit granularer Temperatur und Entropie nennt er *einzigartig verwickelt*, Kadanoff hielt dieses Vorgehen vor zehn Jahren noch für undurchführbar. Die Theorie stellt Liu mit 80 Gleichungen vor, die mir überwiegend neu waren. Man kann nur einige von ihnen separat beurteilen, die Sache ist eben komplex. Ich möchte Ihnen zeigen, warum ich diese Theorie begrüße.

Bei Vorgängen mit geringer Seismik ergibt sie Gleichungen, die denen der Hypoplastizität nahe kommen; das hat mich gefreut und herausgefordert. Dann ist die granulare Temperatur proportional zur Verformungsgeschwindigkeit und unabhängig vom Druck. Um das zu prüfen, habe ich beim Scheren dünner Sandschichten mit einem Stethoskop gehorcht (Vorführung). Das *Knirschen* ist lauter bei rascherer Scherung, aber kaum anders bei höherem Druck. Das könnte man mit dem Entstehen und Vergehen von Kraftketten und mit größeren Plattstellen bei höherem Druck erklären. Man hört aber nur einen Teil der seismischen Aktivität: Kürzere Wellen werden stärker gedämpft, und die höchsten Frequenzen entgehen unserem Ohr.

Das Knirschen kommt in *seismischen Einheiten* in umso rascherer Folge, je schneller man schert. Ähnlich ist es beim Gehen über einen Kiesweg. Beim Knicken von Kraftketten wird elastische Energie in kinetische umgewandelt, so wird aus Krautrauigkeit Klangrauigkeit. Daraus glaubte ich schließen zu können, dass die als granulare Temperatur aufgefasste seismische Energie proportional zur Verformungsgeschwindigkeit ist. Ausserdem hielt ich den regellosen Anteil der elastischen Energie der Kraftketten für proportional zur granularen Entropie, Krautrauigkeit bedeutet ja Unordnung. In Lius Theorie ist aber die kinetische Energie proportional zum Quadrat der granularen Temperatur, und die granulare Entropie verschwindet ohne Seismik. Das habe ich schließlich akzeptiert, weil nur so Gleichgewichte am seismischen Nullpunkt stabil sein können. Damit lässt sich meine vorhin genannte Stabilitätsbedingung präzisieren und die Standfähigkeit objektiv garantieren.

In Lius Theorie werden Temperatur und Entropie in thermische und seismische Anteile aufgeteilt und über die Gesamtenergie miteinander verknüpft. Dies ist ein sinnvolles und offenbar nützliches Postulat, das man allerdings direkt kaum beweisen kann. Ich habe es versucht mit einer Theorie von Caratheodory, dabei hat mir Herr Kunle, unser Altrektor und Emeritus für Geometrie, in dankenswerter Weise geholfen. So konnte ich bestätigen, dass der Kehrwert der granularen Temperatur ein integrierender Faktor ist, und dass nahe dem seismischen Nullpunkt die granulare Temperatur proportional zur Verformungsgeschwindigkeit sein muss. Caratheodorys Beweis der drei Hauptsätze lässt sich aber nicht übertragen. Vorerst lauten die *Hauptsätze der Seismodynamik*

- erstens: Die seismische Energie entsteht aus potentieller Energie und vergeht zu Wärme;
- zweitens: Die regellose Kornbewegung kann nicht von selbst in geordnete übergehen;

- drittens: Am seismischen Nullpunkt verschwindet auch die seismische Entropie.

Anders als Wärme kann seismische Energie nicht gespeichert werden, die Interaktion von Körnern ist eben nicht konservativ wie die von Molekülen. Deshalb kann Sand nur relaxieren, solange seine Körner in seismischer Bewegung sind. In Lius Theorie wird angenommen, dass geschüttelter Sand sich bis zum hydrostatischen Druck entspannt; das entspricht der Beobachtung. Darüber hinaus nimmt er an, dass sich Sand durch gleichmäßige Scherung entspannt und *linear viskos* wird. Das wollte ich lange nicht akzeptieren.

In Torsionsversuchen kann man Sand stationär scheren, er zeigt dabei keineswegs lineare Viskosität. Die Scherung ist auch nicht überall gleich - Roscoe hatte schon recht. Mit Gradienten der Scherung passt Lius Theorie zu den Beobachtungen, ein räumlich gleichmäßiges granulares Fließen wäre nicht stabil. Die gleichmäßige Scherung ist eben ein Eldorado, das man nicht erreichen kann, auch granulardynamische Simulationen können dies nicht leisten. Man mag sich vorstellen, dass die Körner schließlich keine Kraftketten mehr bilden und nur noch regellose elastische Formänderungen erfahren. Dieses hochfrequente Zittern dürfte so temperaturähnlich sein, dass Fluktuation und Dissipation wie bei molekularen Interaktionen zusammenhängen. Von dort bis zum Kontrollieren des granularen Fließens ist sicher noch ein weiter Weg.

Für Vorgänge mit *Umkehrungen* wird man die Theorie von Liu wohl erweitern müssen. Seine Gruppe prüft jetzt, wie gut sich Zustandsgrenzen und Zustandszyklen reproduzieren lassen. Meine Attraktoren sind also weiter im Rennen, nun mit einer granularen Relaxationszeit. Vor Jahren hatte ich wie erwähnt vorgeschlagen, dass sich die verborgene Kraftrauigkeit von Sand durch monotone Verformung der mittleren Spannung anpasst und dann explizit entbehrlich ist. Dies wird in der einfachen Hypoplastizität und auch in Lius Theorie stillschweigend vorausgesetzt.

Im allgemeinen braucht man für nicht monotone langsame Verformungen eine die Kraftrauigkeit repräsentierende innere Variable. Bis jetzt musste man diese als Gegenspannung oder intergranulare Dehnung erraten, vermutlich sind beide über die Energie der Kraftrauigkeit miteinander verbunden. Das dürfte der Entwicklung von Stoffgesetzen dienen, Anwender können sich dann mit Attraktoren in grafischer Darstellung ein Urteil bilden. Von da bis zur Funktionsfähigkeit bei Wechselbeanspruchung - zum Beispiel bei Fahrbahnen - bedarf es aber jahrelanger Forschung.

Die Einbeziehung des *Porenwassers* in Lius Theorie ist nicht schwierig. Das Prinzip der wirksamen Spannung und das Gesetz von Darcy lassen sich thermodynamisch korrekt formulieren. Hinzu kommt eine Dämpfung der Seismik, die bei kleineren Körnern stärker ist - unter Wasser knirscht Kies hörbar, Sand nicht. Spannender wird es an *kritischen Punkten*, also wenn sich Scherbänder bilden oder das Korngefüge zerfällt. Wie Kadanoff meine ich, dass man die Theorie kritischer Phänomene von thermodynamischen Systemen auf Sand übertragen kann. So könnte man den seltsamen Attraktoren beikommen, von denen vorhin die Rede war und auf die ich in meinem Buch immer wieder hinweise.

Noch ein Wort zu *Rauigkeit und Symmetrie*. Dass beide sich vertragen, hat Mandelbrot in seiner Fraktalen Geometrie gezeigt, zu Mechanismen sagt er aber nichts. Im unterkritischen Bereich wird die große Rauigkeit des Sandes durch den Übergang zu Zustandsgren-

zen und Zustandszyklen oder durch Erschütterungen ausgebügelt. Diesen Symmetriegewinn wird man eines Tages besser beweisen, als ich es vermag, vielleicht auch mit Fraktalen. Im überkritischen Bereich geht Symmetrie durch Aufrauen verloren, nur allmählich wird man dies verstehen. Für die raue Materie steht die Mathematik noch am Anfang, sonst ging sie der Physik voraus - gerade in Hinblick auf Symmetrie.

Die Seismodynamik ist *nicht auf Sand beschränkt*. Tonige Böden haben weichere Partikel, thermisch aktivierte Versetzungen kommen ins Spiel. Auch bei ihnen ist die Mikroseismik wirksam, man kann sie nur kaum hören. Bei Felsproben ist die Seismik im unterkritischen Bereich am Knacken hörbar, im überkritischen am Knallen. Mit seiner aussergewöhnlichen Intuition konnte Leopold Müller hören, ob das Gebirge sich stabilisiert. Kraftrauigkeit und Klangrauigkeit gibt es auch bei anderen Festkörpern, und mit längeren Wellen in der Erdrinde. Das Verstehen der Klangrauigkeit könnte zu einer besseren Frühwarnung führen. Mit der Seismodynamik wird man auch die Verfahrenstechnik nicht nur bei Sand verbessern können.

Bei elektromagnetischen Festkörpern gibt es ähnliche Rauigkeiten wie beim Sand, das Knirschen kommt in fraktalen Kollektiven daher. Mit Seismodynamik und Attraktoren kann man vielleicht sogar in der Ökonomie etwas anfangen. Wer nun was tun könnte, möchte ich nur für meinesgleichen sagen. Das Wort Professor kommt von *profiteri*, das heisst bekennen und nicht profitieren. Noll schreibt dazu

'The professor's focus is on his subject. He "lives" his subject and cannot easily switch it off, even while lying in bed or on vacation. He recreates the subject everytime he lectures on it'. Und weiter

'He is disturbed by the pile-up of undigested and ill-understood new results. He is not happy until he has been able to fit these results into a larger context.'

Zu dieser Art "Bekennen" kam ich an der Uni über Jahrzehnte nur gelegentlich. Als Emeritus finde ich mehr Zeit für die Wissenschaft, aber mir sind wie Jedem natürliche Grenzen gesetzt. Der Seismodynamik kann ich wohl noch den Weg bereiten, die Hauptarbeit werden aber Jüngere leisten. Attraktoren werden helfen, die mit der Rauigkeit verbundene Komplexität zu bewältigen - hin und wieder finde ich weitere. Wenn man von der Realität ausgeht und grafische Darstellungen verwendet, geht die unentbehrliche Anschauung nicht verloren - Algebra und Numerik kommen danach. So kann man auch Nachwuchs gewinnen - mit der rauen Materie gibt es genug zu tun.

Nun ein paar Dankesworte. Ich möchte die Namen einiger verstorbener Kollegen nennen, denen ich viel verdanke; es sind in alphabetischer Folge die Herren Günther, Kühn, Krebs, Leussink, Müller und Rumpf. Weitere Kollegen, denen ich Anregung und Hilfe verdanke, kann ich nicht alle nennen. Ich danke all denen, die in meiner Amtszeit am Institut der Wissenschaft treu gedient haben. Ich danke den jetzt am Institut Tätigen für vielfältige Unterstützung, ohne diese stünde ich nicht hier und könnte kein Buch vorlegen. Meinen Freunden und Angehörigen und vor allem meiner Frau danke ich für Zuwendung und Nachsicht. Dem Herrgott danke für seinen Segen, an dem alles gelegen ist. Ihnen allen danke ich fürs Kommen und die Aufmerksamkeit.