

Göteborgs universitet  
Institutionen för idéhistoria och vetenskapsteori  
18 februari, 2002

# Geomorfologers teorival

*Ett fallstudium över införandet av fraktal geometri som teoretisk grund  
för studier av landytans geomorfometri*

C-uppsats av  
Gustaf Nelhans

Handledare:  
Aant Elzinga  
✉  
Margareta Hallberg



## INNEHÅLL

1. Inledning.....	5
1.1 Syfte.....	7
1.2 Metod.....	7
1.3 Vetenskapsteoretisk avgränsning.....	9
2. Teoriavsnitt.....	10
2.1 Vetenskapsfilosofi.....	10
2.1.1 Logisk empiricism .....	10
2.1.2 Poppers kritiska rationalism.....	11
2.1.3 Lakatos forskningsprogram.....	11
2.1.4. Kuhns Paradigmteori .....	12
2.1.5 Vetenskapsfilosofins problem.....	13
2.2 Kuhn om theory choice & Duhem-Quines underdetermineringstes.....	13
2.2.1 Kuhn: essential tension.....	13
2.2.2 Duhem-Quines underdetermineringstes .....	16
3. Bakgrund .....	18
3.1 Kort historik över geomorfologi.....	18
3.1.1 Tidiga vetenskapliga studier i geologi och geografi.....	18
3.1.2 Idiografisk geomorfologi.....	20
3.1.3 Processgeomorfologi.....	21
3.1.4 General system theory och geomorfologi.....	21
3.1.5 Aktuella teorier i geomorfologi.....	23
3.1.6 Sammanfattning: Vad är geomorfologi? .....	23
3.2 Fraktal geometri: Teori, modell eller metod?.....	24
3.2.1 Fraktaler: historisk och vetenskaplig bakgrund.....	24
3.2.2 Fraktaler och fraktal dimension .....	24
3.2.3 Fraktaler som beskrivning av landformer.....	27
3.2.4 Fraktal geometri: Teori, modell, eller metod?.....	28
4. Fallstudium.....	31
4.1 Fraktal geomorfometri.....	31
4.2 Hypoteser om forskares parad...skifte.....	34
5. Sammanfattning .....	36
6. Litteratur: .....	37
Övriga referenser: .....	38



## I. INLEDNING

Geomorfometri innefattar det matematiska eller statistiska studiet av landytans form och är ett verktyg för geovetaren, särskilt geomorfologen att utföra kvantitativa studier av landskapets sammansättning. Ämnesområdet geomorfologi, vilket belyses i avsnitt 3.1, är det geovetenskapliga ämne som studerar landskapets form och de processer som omdanar det, t ex vatten, vind, tektoniska processer i berggrunden eller människans påverkan. Geomorfologens verksamhetsområde är brett och kan omfatta såväl grundfrågor kring landskapets beskaffenhet som tillämpade och närmast tekniska studier av risk för skred i sluttningar, vattendrags vattenföring och andra naturliga processer som kan medföra problem i dagens samhälle.

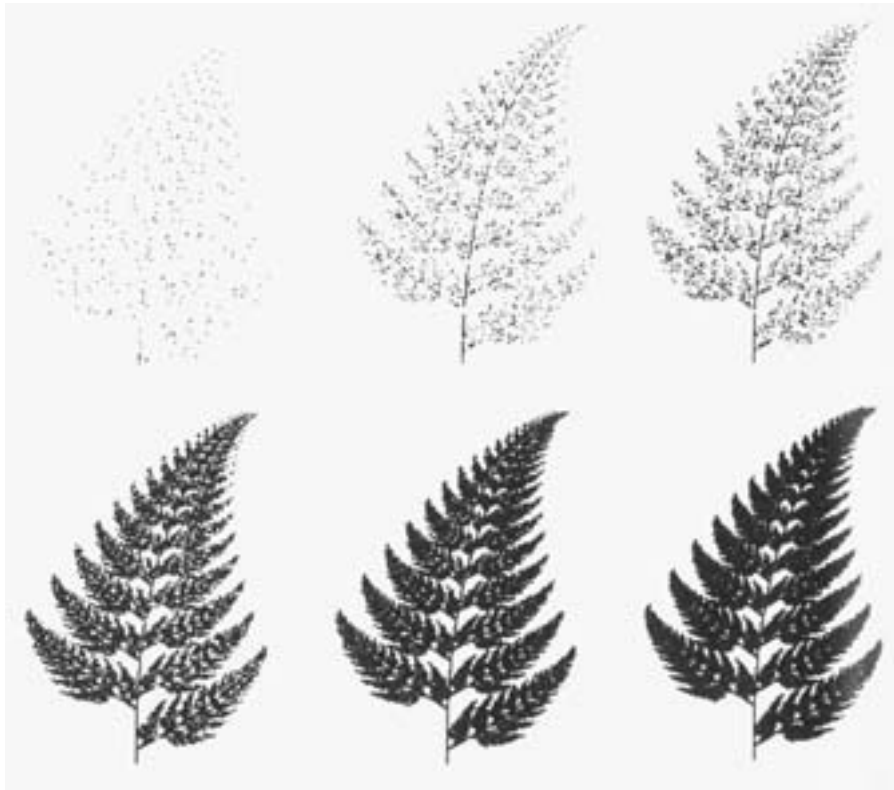
Studiet av landskapets form var vid förra sekelskiftet ett huvudsakligen kvalitativt arbete, att utifrån fältarbete rita kartor över landformer och topografi och försöka tolka landskapets utveckling i ett geologiskt perspektiv. Landformer beskrevs enligt ett schema som i viss utsträckning liknar biologins evolutionära system och bestod i att tolka dem utifrån de genetiska processer (t ex inlandsis, tropisk vittring eller isälvserosion av löst material) som bildat dem. Det slutgiltiga materialet som producerades vid dessa studier var kartor som avgränsade geomorfologiska regioner på basis av de processer de bildats genom, och de former landskapet uppvisade.

I dag finner geomorfologer ett mycket bredare spektrum av metoder för att tolka landskapet och att avgränsa geomorfologiska regioner. Fältarbete är även i dag ett viktigt medel för geomorfologen att förstå landskapets utveckling, men samtidigt har flygfotografier, satellitbilder, höjddatabasmodeller och andra tekniskt utvunna data blivit tillgängliga. Den snabba utvecklingen i datorkraft och tillgängligheten till data har lett till att forskare söker allt mer sofistikerade matematiska modeller att studera det komplexa landskapets beskaffenhet.

Geomorfometri har sedan 60-talet använt statistik för att beskriva landytan och variabler av typen medelvärde (av höjd), relief (förhållandet mellan högsta och lägsta punkt), lutning och konvexitet hos bestämda landformer eller större landskapsområden har studerats. Eftersom landytan är en komplex form som endast mycket sällan kan beskrivas i enkla geometriska figurer, och dessutom är bildat genom ett flertal samverkande processer så finns det inte någon enskild statistisk variabel som kan särskilja en form från en annan eller en landskapsregion (bildad genom en viss typ av processer) från en annan. Genom att slå ihop flera statistiska mått har forskare försökt utveckla så kallade "geometriska signaturer" för landformer för att möjliggöra en kvantitativ (och därmed förmodat objektiv) avgränsning av olika landskapstyper. Målet för denna typ av verksamhet är att kunna göra en automatiserad klassificering av landskap, helt skild från subjektiv tolkning. (Mark (1975) ger en teoretisk beskrivning av geomorfometriska parametrar och Brabyn (1998), en praktisk tillämpning av landskapsklassificering med hjälp av geomorfometriska metoder.)

På senare år har utvecklingen av tillämpad matematik och studier av icke-linjära dynamiska system, *Kaosteori*, inom andra naturvetenskapliga områden utövat en stark dragningskraft på de forskare som arbetar med geomorfometri. Ett fält som tilldragit sig ett extra stort intresse är fraktaler och dessa matematiska modellers stora förmåga att avbilda naturliga och komplicerade former. Deras visuella dragningskraft har varit stor under de senaste decennierna, både inom och utom forskarvärlden. Biologer har förbluffats över matematiska modeller av ormbunksblad (Figur 1.), astronomer har använt fraktaler för att modellera Jupiters röda fläck och inte minst konstnärer har attraherats av dessa komplicerade och till synes kaotiska bilder som samtidigt uppvisar en kolossal regelbundenhet. Trots fraktalernas oändliga komplexitet är de enkla att formulera och avbilda med endast några få rader programkod i en dator.

Det har till och med sagts att fraktaler och deras skaloberoende upprepning av identiska former på något sätt kan återskapa naturens former och man kan säga att denna lära har fått ett nästan magiskt skimmer. I avsnitt 3.2 skall jag konceptet fraktaler och dess teoretiska bakgrund beskrivas mer utförligt.



Figur 1: Ett ormbunksblad växer fram genom att ekvationen för en fraktal plottas i ett diagram. (Ur Gleick, 1987)

Inom geomorfologi har fraktaler tilldragit sig ett visst intresse sedan slutet av 1970-talet, då det förutspåddes att fraktal analys skulle ha en potential inom geomorfometri, just för "the measurement and analysis of those characteristics of landform applicable to any continuous rough surface." (Evans, 1979 i Outcalt et al, 1994, s 92). Det är just denna fråga som skall belysas i denna uppsats och jag återkommer till själva tillämpningen av fraktaler på geomorfometriska data, t ex topografi i min analys av textmaterialet som uppsatsen bygger på, men några allmänna punkter skall här nämnas:

- Man har i olika sammanhang kunnat visa att man med fraktaler kan skapa "naturliga" avbildningar av landskap, t ex kartor eller landskapsmodeller som vid blindtest inte kunnat skiljas från äkta kartor eller modeller. (Klinkenberg, 1992 s 9). Även Herzfeld och Overbeck (1999) noterar att:

It is heuristically clear that seafloor or landscape topography is best described by fractal geometry, because of the different and increasingly detailed features appearing at increasing resolution. (Herzfeld och Overbeck (1999, s 981)

- En del geomorfologer har i fraktalkonceptet ställt upp förhoppningar om omställningar i geomorfologin av paradigmskifteskaraktär:

Fractals may provide the entry to a new level of investigation for geomorphometrics and revolutionize geomorphology. (Meakin, 1991, i Klinkenberg, 1992)

Ett av skälen till detta är att det tycks finnas en koppling mellan den process som format ett landskap och de fraktala karakteristika som landskapet uppvisar (Goodchild och Mark, 1987), vilket skulle kunna visa att fraktaler faktiskt har något att säga om landskapets form.

- Den viktigaste parameter inom fraktal geomorfometri kallas fraktal dimension,  $D$ , vilken anger graden av oregelbundenhet för den yta som undersöks:

[t]he numerical value of  $D$  [fractal dimension] may be the most important single parameter of an irregular cartographic feature, just as the arithmetic mean and other measurements of central tendency are often used as the most characteristic parameters of a sample. And finally it appears that such seemingly chaotic features as coastlines may behave in certain ways with substantial regularity. (Klinkenberg och Goodchild, 1992, p 267)

- Fraktaler introducerades inom den tillämpade matematiken av Benoit Mandelbrot 1967. En reviewartikel med titeln *Fractals, fractal dimension and landscapes – a review* (Xu et al 1993), inleds med påståendet att:

It [Fractals] has since become the most successful mathematical model for describing real landscapes because the fractal dimension appears to capture the essence of the surface topography of the earth in a way that other geomorphological attributes do not. (Xu et al, 1993)

- Efter att författarna hade gått igenom det forskningsmaterial som då var tillgängligt blir de dock lite mer försiktiga och citerar följande passage, som också får stå som ledstjärna för min uppsats.

If the fractal dimension is to be a useful parameter, the measurement methods used to determine the dimensions must be robust, consistent, and have the capability of differentiating between visible dissimilar surfaces. (Klinkenberg och Goodchild, 1992, p 218, citerad i Xu et al, 1993)

## I . I S Y F T E

Syftet med denna uppsats är att studera hur forskarna inom geomorfologi anger sina bevekelsegrunder för att välja fraktal geometri som grund för det kvantitativa studiet av landytans form, *geomorfometri*, i stället för traditionell euklidisk geometri. Deras anförda motiv ställs i uppsatsen i förhållande till två vetenskapsteoretiska frågor, nämligen Kuhns diskussion om teorival, samt den sk Duhem-Quines underdetermineringstes, en utveckling av det sk induktionsproblemet, hur många observationer av enstaka vita svanar krävs det för att dra slutsatsen att ”alla svanar är vita”?

## I . 2 M E T O D

Metoden för denna uppsats är textanalys baserad på ett urval av artiklar inom geomorfologiska tidskrifter, publicerade mellan 1990 – 2000, som använder fraktal teori för att studera geomorfometri. Materialet har samlats ihop genom dels litteratursökning i databaser: Geobase/Georef och Science Citation Index (SCI), och dels genom att följa referenser i artiklar som befunnits vara intressanta för vetenskapsteoretisk analys.

Tabell 1: Urvalskriterier, antal förekommande artiklar och antalet referenser till de i uppsatsen analyserade artiklarna. (December 2001)

<i>SCI (1990-2001)</i>	<i>antal</i>
geomorph*	-
fractal*	-
geomorph* AND fractal*	80
topo* AND fractal*	633
topog* AND fractal*	287

<i>Geobase/Georef (Alla år)</i>	<i>Antal</i>
geomorph*	143025
fractal*	4418
geomorph* and fractal*	343
topo*	40461
fractal*	4418
topo* and fractal*	319
topog*	37069
fractal*	4418
topog* and fractal*	277

<i>Referenser till:</i>	<i>Antal</i>
Andrie & Abrahams (1988)	22
Herzfeld & Overbeck (1999)	0
Klinkenberg & Goodchild (1992)	36
Outcalt et. al. (1994)	2

Följande urvalskriterier har använts:

- Databaser, sökord: 'fractal', 'geomorphometry', alt 'topography' ('topo\*'), 'geomorphology' ('geomorph\*'). Antal artiklar som är relevanta: ca 300.
- Undersökning av vilka artiklar som är mest refererade (SCI)

Jag har sedan använt mig av några mer kvalitativa urvalskriterier, bl a

- Att artikeln behandlar kopplingen mellan fraktal teori – geomorfometri.
- Kända namn?
- Följer artiklarna på varandra eller är de kritiska? (eller säger att det inte går)
- Lyckade/misslyckade?
- Vilka resultat de kommit fram till.

Tidskrifter: Någon av de fyra stora geomorfologiska tidskrifterna (Geomorphology, Earth Surface Processes and Landform, Zeitschrift für Geomorphologie, Transactions of the Japanese Geomorphological Union) samt två tidskrifter av relevans: Computers & Geosciences och Mathematical Geology.

Slutligen begränsades litteraturen till att innefatta artiklar i tidskrifter som är tillgängliga vid Göteborgs universitetsbibliotek eller Digitala Biblioteket.

Fyra artiklar av forskningskaraktär utvaldes för analys, samt två reviewartiklar, en från 1992 och en från 2000, för att undersöka om man kan se någon trend i förhållandet till fältet under dessa 10 år:



*Forskningsartiklar*

Klinkenberg & Goodchild (1992); Outcalt et. al. (1994); Andrie & Abrahams (1988); Herzfeld & Overbeck (1999)

*Reviewartiklar*

Xu et al (1993); Pike (2000)

### I.3 VETENSKAPSTEORETISK AVGRÄNSNING

Denna uppsats är skriven i vetenskapsteoretisk tradition, och behandlar två teoretiska koncept som formulerats i brytningstider till ett idag mer aktuellt vetenskapsteoretisk tradition, 'Science Studies'. Skälen till denna avgränsning anges nedan, men låt oss först titta på den litteratur jag har arbetat med.

Jag leddes in på frågan om forskares teorival genom Bernsteins bok, *Bortom objektivism & relativism* där skildringen 1900-talets vändning i vetenskapsteori (från en 'scientistisk' bild av vetenskapen i riktning mot en mer nyanserad bild av en kulturellt och socialt betingad verksamhet) tar sin utgångspunkt i Kuhns artikel "Objectivity, Value Judgement, and Theory Choice" (1977). Samtidigt föreslog min handledare att jag i anslutning till denna fråga kunde studera den sk Duhem-Quines underdetermineringstes, (som i korthet postulerar att det alltid finns möjlighet att försvara en given teori mot avvisning, genom att förändra ett bakgrundsantagande för teorin). Även här fick jag hjälp av Bernstein som hänvisar vidare till appendixet till Lakatos' (1970), med titeln *Popper, falsificationism and the 'Duhem-Quine thesis'*. Det stod nu klart att det var lämpligt att begränsa mina teoretiska ramar till tiden 1970-80, en tid då Kuhns "De vetenskapliga revolutionernas struktur" börjat smälta in, men som samtidigt också kom att bli slutet på en era, där man inom vetenskapsteori såg fysiken som en exemplarisk vetenskap. Objektivism, rationalism och essentialism förbyttes mot en forskningsinriktning som står närmare human- och samhällsvetenskaperna, med historia, psykologi och sociologi som förebilder för ett hermeneutiskt (tolkande) vetenskapsstudium.

Jag har dock valt att stanna kvar i den traditionella vetenskapsfilosofins/-teorins slutskede, som nämnts ovan, pga av följande skäl:

- Inom geomorfologin, i vilken denna uppsats tar sin empiriska utgångspunkt är den traditionella vetenskapsteorin starkt rotad. Man är 'realister' och har antingen logisk positivism eller kritisk rationalism som grund (Rhoads & Thorn, 1994, Richards, 1994).
- Mitt syfte är att studera vad forskarna inom geomorfologin själva anger som bevekelsegrunder för att tillämpa fraktalgeometri som teoretisk/metodologisk grund för sina kvantitativa analyser av landytan. (Jag anser att vetenskapsstudier av i dag har lämnat vetenskapsteorins tidigare roll som vägledare och analysator av inomvetenskapliga spörsmål för att i stället göra en bredare och djupare kritisk front mot hela tanken om objektivitet och vetenskapens särställning i västerlandets tänkande. Denna sociologiska, psykologiska och historiska form av vetenskapsstudier har ett (oförtjänt) dåligt rykte bland många naturvetenskapliga forskare att vara relativistisk och "antivetenskaplig". Samtidigt tycker jag att naturvetenskapliga forskare i sin kritik har missat att även vetenskapsteorin i traditionell form har försvagat sina pretentioner om möjligheten för forskning att nå absolut sanning och rationalism, vilket jag hoppas kunna visa i denna uppsats.

## 2. TEORIAVSNITT

### 2.1 VETENSKAPSFILOSOFI

I denna uppsats har jag valt ut två vetenskapsteoretiska tvistefrågor som har implikationer för hur man skall se på teorivalsfrågor av den typ som behandlas i denna uppsats. Duhem-Quines underdetermineringstes behandlar frågan om hur och i vilken utsträckning en bestämd teori kan verifieras eller falsifieras utifrån ett test av dess förklarande eller beskrivande förmåga. Kuhns diskussion om teorival syftar i sin tur till att försvaga de traditionella kriterierna för teorival som vetenskapsfilosofer har försökt ställa till att i stället betrakta dem som värderingar inom den vetenskapliga kulturen och därigenom kräva att en ny syn på rationalism (ej längre kopplad till sanning) formuleras. Jag skall först göra en kort tillbakablick över vetenskapsfilosofins utveckling under 1900-talet för att ge en bakgrund till dessa diskussioner.

#### 2.1.1 Logisk empiricism

Naturvetenskapen fram till den logiska empirismen handlar om gränsdragningar och sökandet av rationell, säker kunskap. Upplysningstänkandet var ett avståndstagande från religiösa föreställningar, som innebar en gränsdragningar mellan vårt kritiska och rationella förnuft och irrationell vidskepelse. Detta kan sägas vara grundpelaren till Wienskolan som grundades kring 1920 av Ernst Macht. De logiska empiristerna ansåg att filosofi var en vetenskapligt orienterad disciplin som arbetar med exakta metoder, formell logik. Vetenskaplig kunskap skall vara säker, därför är det som kan observeras säker kunskap, medan teorier är osäkra. På de logiska empiristernas program stod att verka för en vetenskaplig världsbild och en enhetsvetenskap utifrån matematikens och fysikens bild av verkligheten. Om vi vill införa ett teoretiskt begrepp i vetenskapen måste vi också ange en operation med vilken begreppet kan prövas empiriskt.

Den logiska empirismens prövning av vetenskapliga utsagor utgår från induktion. Chalmers ger följande beskrivning av L.E.:

”Enligt den naive induktivisten börjar vetenskapen med observation. Observationen skapar en säker grund att bygga vetenskapen på, och vetenskaplig kunskap härleds ur observationspåståenden genom induktion. (Chalmers, 1995, s 33)

Induktion innebär att man utifrån t ex att alla svanar man observerar är vita, drar slutsatsen att alla svanar är vita. Detta är en omskrivning av den deduktiva logiken där man utifrån kunskap om helheten kan avgöra om ett specifikt observerat objekt tillhör denna helhet. Skillnaden mellan de båda resonemangen är att om premisserna i det deduktiva sambandet är sanna, så måste slutsatsen vara sann, medan man i det induktivistiska resonemanget kan vederlägga sambandet så snart man observerat en svan som inte är vit.

För att rättfärdiga den induktivistiska metoden hänvisar man till erfarenheten i det att man anser att man med ett tillräckligt antal observationer av en företeelse kan utge denna för sann. Men problemet är: hur många singulära påståenden krävs för att man skall kunna hävda att verkligheten är så och så beskaffad?

Hess (1997) tar upp ett annat problem med den induktivistiska metoden: Hur skall man välja mellan två olika inducerade teorier om de beskriver samma förhållanden? Svaret är förstås att man skall välja den teori som korresponderar bäst med empiriska teorier eller observation. Men, om det finns fall där de båda teorierna har likvärdig precision blir nästa

urvalsprincip att man skall välja den teori som kan förutsäga nya lagar eller observationer. För att klara ut ett ännu starkare oskiljaktigt förhållande finns det inga vetenskapliga sätt att välja teori, valet måste bli metafysiskt. I detta läge införde Carnap 'enkelhet' som kriterium för valet mellan de båda teorierna, Ockhams rakkniv.

### 2.1.2 Poppers kritiska rationalism

En av grunderna till Poppers kritik av den logiska empirismen var just deras distinktion mellan teori och observation. Enligt Popper är empiriska data aldrig fria från teori. Vi behöver teorier för att göra observationer, det vi ser består av våra tolkningar av förhållanden mellan ljus och skugga, samt färger som vi sätter ihop till en verklighet. Vi kan aldrig nå säker kunskap om någonting, men enligt Popper kan vi dock nå kunskaper som vi *ännu* inte kan falsifiera. Kunskapen är alltid felbar, osäker och kan så småningom ersättas av en ny, mer sanningslik kunskap. Popper har, liksom de logiska empiristerna här en syn på kunskapen som en växande entitet.

Popper kräver också att vetenskapliga teorier skall formuleras så att de kan falsifieras. Detta är en helomvändning från empiristernas verifierbarhetsprincip där man skall nå sann säker kunskap.

Popper kallade sin syn för fallibilism. Hans modell för teoriutveckling kan beskrivas enligt följande schema:

$$(BK) P \rightarrow TT \rightarrow EE \rightarrow P'$$

Popper menar alltså att all forskning initieras genom problem. Utifrån bakgrundkunskapen, BK, formuleras ett problem, P. Vi ställer upp en hypotes, tentative theory, TT, som sedan prövas, error elimination, EE. Vad som blir kvar används som utgångspunkt för att formulera ett nytt problem, P'

Den kritiskt rationella Popperianen är alltså den som vågar släppa invanda mönster och öppna sig för nya möjligheter när hans teorier falsifieras. Men här kommer en svårighet in. När skall en djärv teori överges? Det visar sig att en teori aldrig slutgiltigt kan falsifieras eftersom vi aldrig kan nå den fullständigt säkra observationella grund som falsifieringen är beroende av. Falsifikationisten biter sig alltså i svansen när han säger att varje teori skall kunna falsifieras. Ytterligare ett problem att ta fasta på är att man vid genomförandet av ett experiment inte bara har en singular teori att pröva, utan en hel kedja av teorier, allt ifrån observationsinstrumentens placering, initialvillkor för objektet som studeras till andra hjälpantaganden som används i experimentsituationen. Om den förutsägelse vi ställt upp att studera inte infrias, är det enda vi kan säga att åtminstone någon av premisserna är falska. Men vi kan inte identifiera den falska premissen:

”En teori kan inte slutgiltigt falsifieras, då möjligheten alltid finns att något i den komplexa testsituationen, vid sidan av själva den testade teorin, leder till en felaktig förutsägelse.” (Chalmers, 1995, s 81)

### 2.1.3 Lakatos forskningsprogram

Efter den logiska empirismen och Poppers kritiska rationalism har nya system för vetenskapens framväxt presenterats inom vetenskapsfilosofin. Dessa har dock det gemensamt att de inte kan beskrivas i ett enda begrepp om objektiv sanning eller rationell prövbarhet. I stället beskrivs vetenskapen som ett tema - teorier som strukturerade helheter.

Två föreläsare för denna syn skall få en kort presentation: Lakatos som byggde på Popper i sina forskningsprogram och Kuhn som tog in sociala och kulturella faktorer i sin paradigmsyn.

Problemet med kritisk rationalism var alltså i första hand att bedöma när man skall förkasta en falsifierad teori. Poppers efterföljare, Imre Lakatos svar på frågan är: Vi måste se till hur en hel serie teorier i sammanhang utvecklas, först då kan vi avgöra om de är värda att följa.

Lakatos vetenskapliga system handlar om forskningsprogram och deras förmåga att tillföra ny kunskap. Här prövar man inte som i kritisk rationalism teorier mot enskilda observationspåståenden, utan ser i stället forskningsprogrammet som en strukturerad helhet. Lakatos skiljer mellan progressiva och degenererande forskningsprogram, där de förra utvecklas och tillför vetenskapen nya kunskaper, medan det senare stannat upp.

Lakatos forskningsprogram består av en hård kärna, med den vetenskapliga teorigrunden. Denna kan inte ifrågasättas, om så sker faller hela forskningsprogrammet. Den hårda kärnan omgärdas av ett skyddande bälte, av hjälphypoteser, initialvillkor och observationspåståenden som kan provas och falsifieras. Detta kallas forskningsprogrammets negativa heuristik, negativt därför att dessa kan sägas tjäna som motvärn mot allt för fri utveckling av programmet. Till forskningsprogrammet hör också den positiva heuristiken, som kan sammanfattas som grova riktlinjer som visar hur forskningsprogrammet skall utvecklas. Den negativa heuristiken görs också icke prövbar genom att man hänvisar varje bristande överensstämmelse mellan observation och forskningsprogrammet till att metodologin eller det skyddande bältet har brister.

Man kan ställa upp skillnaden mellan Lakatos forskningsprogram och Poppers kritiska rationalism som skillnaden mellan att studera universella och singulära påståenden. I Lakatos system kan man motstå problemet att identifiera den falska premissen i en lång kedja av teorier just genom att det är strukturerat runt den hårda kärnan. Svårigheten i Lakatos system är i stället: Hur lång tid skall man vänta på ett degenererande forskningsprogram innan man kan avfärda det? På denna fråga finns inget svar.

#### 2.1.4 Kuhns Paradigmatteori

En annan väg till strukturerade teorier är Thomas Kuhns studier av vetenskapliga revolutioner som föregick Lakatos forskningsprogram. Kuhns paradigmatteori är dock ett steg ut ur den traditionella vetenskapliga historien i det att han betonar sociologiska och kulturella faktorer som viktiga utvecklande modeller vid sidan av de strikt formulerade synerna på vetenskapens tillväxt. Det är inte endast teoriernas förmåga att avbilda verkligheten som utgör bevekelsegrunden för att de skall godtas, utan även kollegors godkännande eller forskningsrådets givmildhet. Kuhns bild av vetenskapens framåtskridande kan sammanfattas i följande schema:

P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
förvetenskap - normalvetenskap - kris-revolution - ny normalvetenskap - ny kris osv	

Vetenskapen kan beskrivas som en verksamhet som börjar i enskilda personers arbete, vilket byggs på av att allt fler ansluter sig till projektet, tills det utvecklar sig till ett formulerat paradigm, där de deltagande forskarna arbetar utifrån de teoretiska lagar och tekniker för deras tillämpning som formulerats. Denna verksamhet benämns normalvetenskap och kännetecknas av samstämmighet i forskarsamhällets verksamheter. Man arbetar med att befästa och utveckla paradigmerna genom att utföra experiment och tolka verkligheten genom dess teorier. Så småningom ställs man inför problem som visar sig falsifiera paradigmerna. Om dessa problem inte kan överkommas kommer en kris utveckla sig och ett nytt sökande

efter en ram att påbörjas. Så småningom fastläggs en eller flera nya ramar till vilka forskare övergår och det gamla paradigmet tynar bort. Ett paradigmskifte har skett.

Detta schema över vetenskapliga revolutioner uppvisar ett cykliskt förlopp, där man inte kan tala om kunskapsstillväxt annat än inom varje paradigm.

Kuhn hävdar att ett paradigm aldrig kan formuleras exakt i form av uttalade regler och riktlinjer. Han använder begreppet spel (efter Wittgenstein: språkspel) för att visa att det innehåller mer än vad som kan beskrivas och kan därför alltid uppvisa egenskaper som strider mot beskrivningen. Kuhn hävdar att denna typ av spel kan liknas vid tyst kunskap eller förmågan att tillämpa teorier, åtgärds kunskap, ”alltså den kunskap man har när man vet *hur* man skall begå, i en mångfald av varierande omständigheter, för att nå ett *givet mål*.” (Pörn, 1990). Den enskilde forskaren har alltså lärt sig en verksamhet genom trial and error och handledning som finns i hans kultur.

### 2.1.5 Vetenskapsfilosofins problem

Vad jag har velat visa här är att man i varje vetenskapsfilosofisk beskrivning av vetenskapens utveckling stöter på samma problem: Hur kan man avgöra att en teori är mer riktig än den andra, eller att den teori man arbetar med är tillräckligt livskraftig för att förtjäna att fullföljas?

Kuhns lösning på problemet, att se paradigm som avbrott i den kontinuerliga utvecklingen av vetenskapen är en väg att försöka vederlägga det vetenskapsfilosofiska synsättet genom att betona de sociala och psykologiska faktorer som påverkar forskares val av teorier att arbeta med. Dock, vågar jag påstå att hans betoning av perioderna mellan revolutionerna gör att han står inför liknande problem som de andra inom den fas som han kallar normalvetenskap. Man kan säga att Kuhn i ”*De vetenskapliga revolutionernas struktur*” försöker gå förbi problemet genom att förlägga de subjektiva och idiosynkratiska perioderna i en teoris utveckling till den revolutionära fasen och ett mer traditionellt positivistiskt/rationalistiskt synsätt på den normalvetenskapliga fasen.

Senare forskning, inom vetenskapsteori och vetenskapsstudier har i än högre utsträckning betonat de sociala, psykologiska och kulturella faktorer som genomsyrar forskares hela verksamhet från problemgenerering till försvar av forskningsresultat (alltså på båda sidor om den traditionella distinktionen *context of discovery* och *context of justification*). Kuhn anges ofta som en viktig vattendelare mellan traditionell vetenskapsfilosofi/-teori och nu aktuella vetenskapsstudier trots att han själv (se text efterordet (1970) i hans 1997) aldrig ville legitimera de långtgående konsekvenser som hans *Structure* har fått för dagens syn på rationalitet inom vetenskaperna.

## 2.2 KUHN OM THEORY CHOICE & DUHEM - QUINES UNDERDETERMINERINGSTES

### 2.2.1 Kuhn: essential tension

Kuhns artikel, Objectivity, Value Judgment, and Theory Choice är skriven för att förtydliga en ståndpunkt som framhölls i hans välkända ’De vetenskapliga revolutionernas struktur’, att forskares val, och övergång från en teori till en annan, inte kan avgöras på klart sakliga grunder, eller genom bevisföring. I stället, menar Kuhn, ”att diskutera deras mekanismer handlar om att tala om övertalningstekniker, eller om argument och motargument i en situation där det inte kan finnas några bevis.” (Kuhn, 1977, s 320).

För denna åsikt har Kuhn drabbats av mycket kritik, bland annat att han skulle förespråka en 'pöbelspsykologi', och att han skulle mena att beslutet hos forskare att välja ett paradigm, eller att överge en teori inte skulle kunna vara baserat på några goda faktamässiga skäl och därmed inte vara ett rationellt beslut. Kuhn delar inte denna åsikt, och preciserar i denna artikel mer i detalj, vad han menar vara en motsägelsefull tro att man med enkla kriterier på absolut faktisk grund, en gång för alla avgöra om ett ställningstagande för eller emot en teori verkligen är korrekt. Mycket av Kuhns teoretiska arbete har behandlat viktiga episoder genom vetenskapens historia och det var dessa empiriska studier som låg till grund för hans bok. Gång på gång i 'Structure' visar Kuhn på hur de diskussioner och konfrontationer som föregått en ny teoris införande inom fysiken, vilka nu står ut som självklara och logiska beslut trots allt i ljuset av den tidens kunskaper i fysik hos de deltagande kontrahenterna, inte alls var så starka att man enkelt kunde avgöra frågorna med absolut säkerhet, utan att det ofta har funnits helt andra beslutsvägar för att nå fram till ett avgörande. Dock, menar Kuhn, är dessa beslutsvägar (bland annat sociala relationer, övertalning, psykologiska frågor, mm) inte alls irrationella, eller ologiska. I stället måste vi, i ljuset av de fallstudier han och många andra vetenskapshistoriker gjort, förändra vårt rationalitetsbegrepp och vår syn på sanning, så att det passar bättre hur forskare verkligen går till väga, och hur den sociala situation i vilken de arbetar ser ut.

För att klara ut hur den traditionella synen på hur vetenskapliga konflikter av paradigm- eller teorivalskaraktär löses är allt för förenklad och motsägelsefull, inleder Kuhn sin artikel med att välja ut fem olika kriterier på vad som allmänt anses vara karakteristiskt för god vetenskap:

1. en teori skall vara exakt: dess konsekvenser skall stämma överens med resultat från existerande experiment och observationer inom teorins domäner.
2. en teori skall vara konsekvent: inte bara internt eller med sig själv, utan också med andra för närvarande accepterade teorier som är tillämpbara på relaterade egenskaper hos naturen.
3. den måste ha stor räckvidd, så att dess konsekvenser skall kunna innefatta mer än endast de speciella observationer eller lagar som den ursprungligen var tänkt att förklara.
4. teorin skall vara enkel, så att den bringar ordning till annars isolerade och oordnade fenomen
5. Det sista kriteriet som Kuhn väljer ut är att en teori skall vara fruktbar för nya forskningsupptäckter, således skall den uppenbara nya fenomen, eller hittills okända kopplingar mellan redan kända fenomen.

Dessa fem kriterier, tillsammans med flera andra av samma typ, menar Kuhn vara *den* gemensamma basen för teorival (Kuhn, s 322).

Forskare stöter på två sorters problem vid tillämpningen av denna typ av kriterier vid teorival:

- Å ena sidan är kriterierna oprecisa, eller allt för ospecificerade för att klart tillräckligt kunna avgöra ett val mellan två konkurrerande teorier.
- Å andra sidan förekommer det inte sällan att två eller flera kriterier hamnar i konflikt med varandra och därmed inte kan fungera som underlag för ett klart ställningstagande för eller mot en specifik teori.

Jag skulle också vilja tillfoga två ytterligare problem som givna kriterier av denna typ kan medföra:

- Ett tredje problem vid tillämpning av teorivalskriterier skulle kunna vara att studera situationer inom vetenskaperna där ett specifikt teorival är en viktig komponent (t ex vid det som Kuhn kallar en vetenskaplig revolution). Man skulle då i Kuhns anda komma fram till att forskare inte uteslutande använder denna typ av kriterier som grund för beslut när de bygger upp sina paradig eller "disciplinary matrixes", som Kuhn kom att kalla den metafysiska världsbild som forskare delar. (Buschwald et. al., 1997)
- Som en fjärde punkt kan man, om man med Kuhn menar att inkommensurabilitet är ett utmärkande drag för forskare (-grupper) med sitt vetenskapliga ställningstagande på var sin sida om en vetenskaplig revolution (paradigmskifte), mena att det inte finns någon fast referensram att befästa teorivalskriterierna mot i en specifik teorivalssituation. Med inkommensurabilitet menar Kuhn (i efterordet, 1997) att forskare med bas i olika paradig inte har förmåga att tala med varandra, eftersom de talar olika språk, när deras världsbilder skiljer sig åt.

Vad är då Kuhns poäng med att ifrågasätta möjligheten att finna en uppsättning rationalistiska kriterier för teorival, kriterier som skulle vara helt inneslutande och samtidigt tillräckligt specificerade för att inte endast fungera som en normativ bild av hur teori val bör gå till, utan även som en deskriptiv bild av hur den vetenskapliga verksamheten faktiskt går till? En poäng är att han anser att man traditionellt drar en alltför skarp gräns mellan subjekt och objekt, alltså mellan forskaren och dennes studieobjekt. Denna gräns, som varit klart uttalad grundsten i det vetenskapliga bygget genom historien, har fått sådana konsekvenser att man betraktar varje subjektivt betingad påverkan (vare sig den är ett uttryck för ett personligt strävande eller tillkortakommanden, eller en socialt grundad influens/påverkan) som ett tecken på irrationalism eller mänsklig svaghet. (Kuhn, 1977, 325-26)

(Vi skall inte här ge oss in att utreda kontroversen mellan en traditionell logisk-empiristisk världsbild och en framväxande konstruktivistisk epistemologi, utan här endast redogöra för några punkter i Kuhns position, så som den framstår i hans (1977).)

Kuhns kritiska analys av en traditionell vetenskapsfilosofi handlar till stor del om att presentera exempel som tidigare tagits för givna av vetenskapsfilosofer och sedan visa hur de i vetenskapshistoriskt ljus, så som Kuhn uppfattar den, ej längre kan tas för självklara. Ett sådant exempel är det som i vetenskapliga textböcker brukar benämnas 'crucial experiments' [ibland även severe tests?], vilka där används för att demonstrera hur teorivalskriterier av den typ som tidigare presenterats är avgörande för forskares teorival. Kuhn nämner bl a Foucaults pendel, men frågar samtidigt om dessa experiment verkligen var så avgörande som görs gällande i textböckerna:

By the time they were performed no scientist still needed to be convinced of the validity of the theory their outcome was is now used to demonstrate. (Kuhn, 1977, s 327)

Dessa beslut har gjorts långt tidigare, och då på mycket mera tvetydiga grunder. Vidare, menar Kuhn (327-28), skulle dessa 'crucial experiments' endast ha ett historiskt värde för teorival om de hade genererat oväntade resultat. (Kuhns slutsats är att crucial experiments i allmänhet endast har ett pedagogiskt värde att befästa en enligt honom felaktig syn.)

Ett annat exempel från den traditionella vetenskapsfilosofin som Kuhn kritiserar är att man i traditionella analyser av teorival/skiften mellan teorier endast diskuterar de vetenskapliga val som varit till gagn för den teori som i slutändan visat sig gå segrande ur leken. (s 328) Att den alternativa (och förlorande) teorin vid tiden för avgörandet mycket väl kunde ha haft företräden framför den vinnande är något som ofta döljs i textboksbeskrivningen av specifika skeenden i historien.

Ovanstående beskrivningar är exempel på en av Kuhns huvudteser i hans vetenskapshistoriska verksamhet. Han understryker här problematiken kring att i analyser av historiska skeenden i vetenskapen använda dagens vetenskapliga världsbild eller dagens ackumulerade vetenskapliga kunskaper som referensram för den tidens vetenskapliga diskurs, en företeelse som brukar gå under beteckningen 'whig history'. Många analyser av tidigare skeden förenklas ofta så att den "vinnande" teorins fördelar framför den förlorandes presenteras som avgörande för utgången av striden, medan den förlorande teorins fördelar (framför den vinnandes) glöms bort. Men, invänder Kuhn,

these simplifications emasculate by making choice totally unproblematic. /.../ In those situations there are always at least some good reasons for each possible choice." (Kuhn, 1977, s 328)

Kuhns argument mot sökandet efter statistiska teorivalkriterier eller filosofiska regler för teorival har två poänger. För det första beror inte forskares val mellan två konkurrerande teorier endast på de av vetenskapssamhället delade kriterierna, utan även på idiosynkratiska faktorer, grundade i individens biografi och personlighet. Hans andra poäng gäller att ifrågasätta den traditionella bilden av att dessa senare sk idiosynkratiska faktorerna är subjektiva i dålig mening och därmed måste rensas ut ur den vetenskapliga verksamheten för att denna skall vara rationell och [V]etenskaplig.

Genom att låta "försvaga" teorivalkriterierna, från att ha ansett dem vara statistiska lagbundenheter eller fasta referenspunkter, till att istället beskriva vägledande värderingar, eller normer, menar sig Kuhn kunna rädda dessa teorivalkriterier undan den kritik vi redan låtit honom utsätta dem för:

Recognizing that criteria of choice can function as values when incomplete as rules has, I think, a number of striking advantages. First, as I have already at length, it accounts in detail for scientific behavior which the tradition has seen as anomalous or even irrational. More important, it allows the standard criteria to function fully in the earliest stages of theory choice, the period when they are mostly needed but when, on the traditional view, they function badly or not at all. (Kuhn, 1977, s 331)

När teorivalkriterier enligt Kuhn blir försvagade från att utgöra regler för hur teorival skall genomföras till att i stället förmedla mer allmänna vetenskapliga värderingar, blir de därmed applicerbara till de tidiga stadierna i en teorivalsprocess. Fraktal teori är ett koncept vars relevans för geomorfologisk forskning ej ännu har avgjorts och de postuleringar och målsättningar som forskare inom detta fält gör blir därför i mina ögon intressant att belysa i denna teoriska ram.

### 2.2.2 *Duhem-Quines underdetermineringstes*

Kuhns ande vilar också över en annan tes inom vetenskapsteorin som angriper den vetenskapliga rationalismen i dess naiva form, nämligen den sk Duhem-Quines underdetermineringstes.

"The underdetermination thesis of Duhem and W. V. Quine holds that a theory can be maintained in the face of contradictory observations provided that an adjustment is made to the auxiliary hypotheses derived from the theory. In this sense theories are underdetermined by evidence." (Hess, 1997, s 18)

Underdetermineringstesens anger (i varierande grad) att det aldrig går att avgöra huruvida en specifik teori är korrekt eller felaktig på basis av ett logiskt test av dess induktiva eller deduktiva förmåga. Detta beror på att en teori aldrig kan testas i sin enskildhet, utan måste granskas inom ett system av samverkande teorier (Lakatos, 1970, s 184). (Man kan kalla detta system för ett Kuhnskt paradigm, Lakatos forskningsprogram eller något annat).



Genom att göra en förändring i en del av detta komplex av samverkande teorier eller den modell av verkligheten vi vill pröva kan systemet av räddas från slutgiltigt avfärdande.

Det finns två tolkningar av underdetermineringstesen, en svag och en stark (Laudan 1990 s 55, Lakatos, 1970 s 184). Den svaga tesen hävdar att det ibland kan förhålla sig som så, att existerande bevis inte kan ligga till grund för ett val mellan rivaliserande teorier. (Laudan, 1990, s 55) eller att den förnekar möjligheten att avfärda en enskild komponent i ett teoretiskt system (Lakatos, 1970, s 184). Den starka tolkningen av tesen avfärdar realism helt och hållet, att bevis aldrig kan utgöra grund för att teorival (Laudan, s 56) och att underdeterminering av bevis utestänger varje rationell prövning av en teori (Lakatos, ibid.). Se också Tabell 1 som ger en något mer utförlig beskrivning av skillnaderna mellan den svaga och starka tolkningen av Duhem-Quines underdetermineringstes.

Tabell 2: Svag och stark underdeterminering enligt Klee (1999).

<i>Weak underdetermination</i>	<i>Strong underdetermination</i>
<b>descriptive</b>	<b>normative</b>
the simple claim that scientists are psychological inclined to hold onto a theory in the face of disconfirming evidence by adjusting other beliefs	such adjustments are justifiable, even rational, in the effort to "save" a theory
<b>deductive</b>	<b>ampliative</b>
"the evidence does not deductively entail a single correct theoretical account of the phenomena in question"	even if we include deductive/probabilistic inference - the evidence still fails to imply a single correct theoretical account
<b>compatibilist</b>	<b>entailing</b>
underdetermination = "any theory can be rendered logically consistent with any evidence that otherwise would seem to contradict it (by adjusting suitably elsewhere)."	in addition to achieving logical consistency - "evidence underdetermines theory in the sense that any theory can be made so as to entail logically any evidence that otherwise would seem to contradict it."
<b>nonunique</b>	<b>egalitarian</b>
given any theory and body of evidence - "there will be at least one other theory logically incompatible with the first theory which also is either compatible with or logically entails that evidence."	"...there will be an infinity of such competing theories....All theories are epistemologically equal."

## 3. BAKGRUND

### 3.1 KORT HISTORIK ÖVER GEOMORFOLOGI

Denna uppsats handlar om ett (möjligt) paradigmskifte inom geomorfologi, "...studiet av tidigare, nuvarande och framtida landformer, landskapets sammansättning, och ytprocesser på jorden och andra planeter." (Rhoads & Thorn, 1993, s 288). Liknande definitioner ges av Tinkler (1985), Clowes & Comfort (1987), m fl. Begreppet geomorfologi användes första gången i skrift 1891 av W. McGee, vid United States Geological Survey (USGS) under beteckningen 'geomorphic geology' (French, 2000). Jordytans former och de processer som förändrar dess form har intresserat människan i alla tider. Redan under Antiken och även tidigare i Egypten var studiet av vattnets rörelser och det praktiska arbetet att leda vatten genom kanaler i Nildeltat för bevattning och de antika Akvedukterna utvecklade.

Framväxten av en vetenskap i modern mening, vilken innefattar det som vi nu kallar geovetenskaper kan dock inte skönjas förrän under senrenässansen, "den vetenskapliga revolutionen". Namn som Lionardo och Bacon och begrepp som empirism, alltså ett förutsättande att naturen skall vara både källa till studium och mål för den vetenskapliga kunskapen, det mänskliga bemästrandet av naturen. Å andra sidan kommer inte begreppet 'vetenskapsman', vilket betecknar inledningen av en era där professionella forskare i ett forskarsamhälle, med bestämda normer och hierarkiska skalor som kan avskilja vetenskap från pseudovetenskap, i bruk förrän på 1860-talet och det är egentligen inte förrän då som den moderna vetenskapen föds. (Men det är en annan historia.)

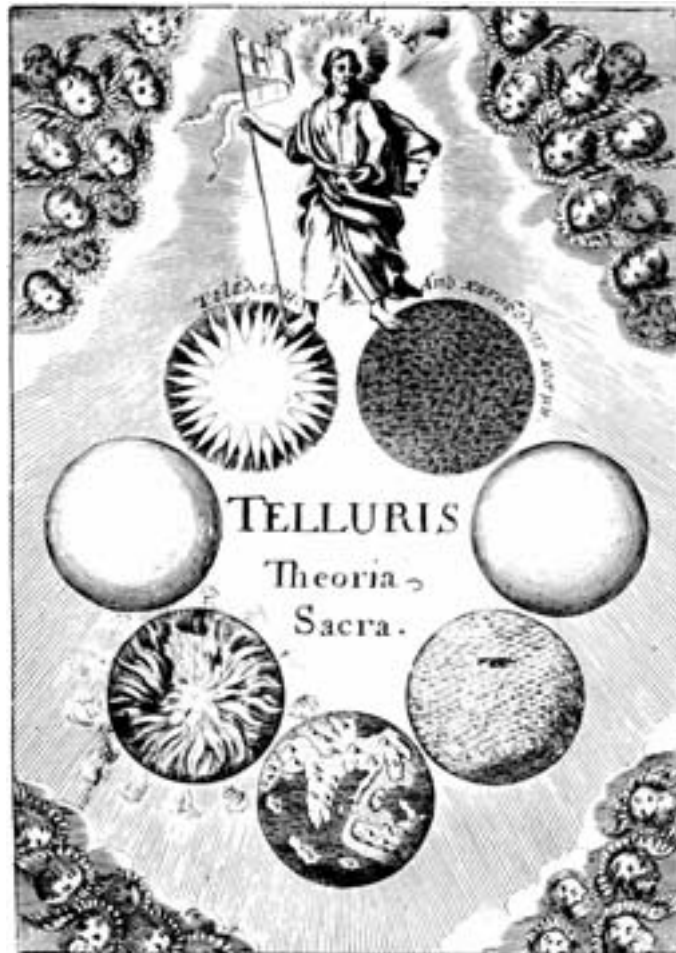
#### 3.1.1 Tidiga vetenskapliga studier i geologi och geografi

Fram till slutet av 1700-talet var de delar av geovetenskapen som nu hänförs till geomorfologi en betydande del av ämnet geologi, tillsammans med den växande gruvindustrins intresse för mineral och bergarter (Tinkler 1985, s 4).

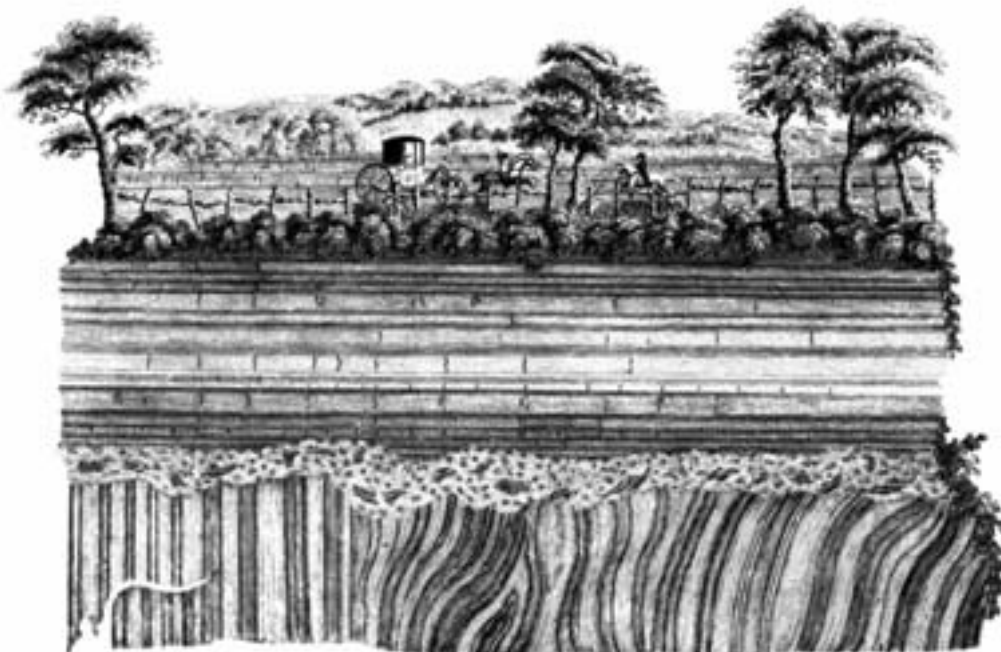
Den tidiga geologins företrädare stod enligt myten<sup>1</sup> under ett starkt påbud, att jordens historia finns nedtecknad i ett, och endast ett dokument: Bibeln. Goulds (1987) tolkning av titelsidan till Thomas Burnets *Telluris Theoria Sacra* (1680) får här stå till grund för denna syn. Burnets illustration till geologins historia (Figur 2.) läses medsols (bild 1-7), med början i Jesu vänstra fot. Gud skapade världen ur kaos på sex dagar, vilade på den sjunde (1) och hade därmed skapat Edens lustgård (2). På förekommen anledning befallde han syndafloden över jorden för människans brott mot hans lagar (3). Jordens nuvarande utseende är ett resultat av floden och består av ett sönderkrossat och förstört landskap (4), men på den yttersta dagen skall Gud befalla elden över jorden (5), som täcks av ett asklager (6) (ett nytt Eden, slätt och utan särdrag), innan den slutligen blir en stjärna (7) (kaos). De tidiga geologerna hade alltså att sammanlänka denna världsbild med den värld de empiriskt kunde förnimma i landskapet. Här stod landskapsutvecklingen i särskilt intresse för debatten genom frågan om den bibliska flodens påverkan på jorden, vilket gav upphov till två centrala problem. För det första var den tidsskala som Bibeln angav för de processer som skapat jordens yta för kort (År 1654 beräknade den anglosaxiske biskop Ussher att skapelsen skedde den 23 oktober 4004 f Kr och syndafloden mellan 7 december 2349 och 6 maj 2348 f Kr) (Tinkler, 1985). För det andra måste den bibliska floden och de krafter som måste verkat under denna för att kunna utveckla de storskaliga landformerna på jorden varit

<sup>1</sup> Huruvida denna beskrivning är korrekt eller inte är svårt att bedöma. Det är alltid den vinnande parten i en meningsskiljaktighet som skriver historien, och det ligger i retorikens natur att använda motståndarens svagaste argument tillbaka på denne, för att förkasta hela dennes teori.

exceptionellt stora. Detta är en bild av jordens historia som en vektor med en oundviklig början och ett lika oundvikligt slut, med en i stort sett ständigt pågående erosionsperiod. I takt med att kyrkan gradvis släppte sitt grepp om vetenskapen i form av den ovan nämnda katastrofism/'creationism'-synen på världsbilden kunde den moderna geologin växa fram.



Figur 2: Titelsidan till Thomas Burnets 'Telluris theoria sacra', 1680. Burnet är ett exempel på den tidiga geologins anknytning till bibelns ord (ur Gould, 1987).



Figur 3: Huttons unconformity i Jedburgh, Skottland (ur Gould, 1987).

Här står jordens enorma tidsspänn och synen på de uppbyggande och förstörande krafterna som hela tiden återkommande i fokus. Gould (1987) beskriver detta som en cyklisk syn på jordens utveckling, med en bild av jorden som en maskin.

James Hutton (i sin *'Theory of the Earth'*, 1795), och hans förste uttolkare John Playfair (*'Illustrations to the Huttonian Theory of the Earth'*, 1802) hade ett viktigt trumfkort för sina argument om återkommande uplift och erosion i jordens långa historia. De kunde påvisa sk 'unconformities', (Figur 3.) "...en fossil erosionsyta, ett hål i tiden som skiljer två bergartsbildande episoder. 'Unconformities' är ett direkt belägg för att jordens historia inkluderar ett flertal cykler av deposition och 'uplift'" (Gould, 1987).

Huttons teori om jorden var dock enligt Gould (1987, s 72) fortfarande ett resultat av rationalistiskt tänkande och inte ett resultat av observationer i naturen och empirisk kunskap. (Gould påpekar att Hutton vid skrivandet av den första upplagan av sin "teori" endast hade sett granit vid ett enda tillfälle och att denna blottning på inget sätt kunnat stödja hans teorier. Han hade dessutom aldrig sett en 'unconformity'.)

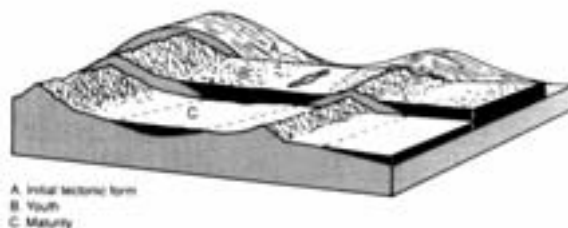
Lyell, känd som den moderna geologins förste uttolkare, kan enligt Gould (1987) inte heller riktigt leva upp till sin gloria som den förste empiristen, eftersom hans verk, *'Principles of Geology'* (1830) i första hand inte är en lärobok som summerar den tidens geologiska kunskap på ett systematiskt sätt, utan som ett långt argument för vad som senare kom att kallas 'uniformitarianism'. Med Lyells egna ord, underrubriken till 'Principles...': "ett försök att förklara de tidigare förändringarna i jordens yta med referens till nu förekommande orsaker." (Gould, 1987, s 105). I denna vision förvägrar Lyell all övernaturlig inverkan på jordens utveckling i det att han säger att alla processer som någon gång verkat på jorden fortfarande är verksamma. Denna idé gav också upphov till en ny utveckling inom geologin, där man på basis av kunskaper om lagbundenheten i nu pågående processer försökte beräkna ålder och hastighet för sedimentation eller andra geologiska processer: Om man känner till ackumulationshastigheten för sedimentation på havsbotten på ett visst ställe, kan man genom att mäta lagrets tjocklek bestämma dess ålder. (Detta exempel är lite för enkelt för att beskriva begreppet 'uniformitarianism'. Jag vill hänvisa till Gould (1987) och hans utförliga tolkning.) 'Uniformitarianism' är i dag en av grundstenarna i alla vetenskaper i betydelsen att alla egenskaper och processer som verkar idag och på denna punkt också har verkat i förgångna tider, och kommer att verka i framtiden, såväl här, som i andra delar av universum.

### 3.1.2 Idiografisk geomorfologi

När ämnet geologi senare under 1800-talet utvecklades som vetenskap och delades upp i underavdelningar, medförde detta att geomorfologin med dess tonvikt på studiet av nu pågående processer förlorade kontakten med sitt ursprung (Tinkler, 1985). Utvecklingen av ämnet geomorfologi blev i stället starkt rotad i olika nationella skolor (Tinkler 1985, Beckinsdale & Chorley 1991). Beckinsdale & Chorley delar upp geomorfologin kring sekelskiftet fram till mitten av 1900-talet i fyra nationella skolor: USA, Tyskland, Frankrike och Storbritannien, samt en utveckling i andra delar av världen, som mer eller mindre skiljer sig från dessa. Under samma period skiljer sig t ex den skandinaviska geomorfologin från de huvudsakliga inriktningarna i det att den främst var inriktad på kvartära processer (Beckinsdale & Chorley 1991, s 181-182), vilka i högre grad påverkat vårt landskap än vad de påverkat övriga Europa och USA.

Den amerikanske geografen Davis' beskrivning av erosioncykeln 1899 och hans försök till förklaring av landskapsutveckling har haft oerhört stor betydelse som grundläggande koncept inom geomorfologin. Teorin som grundas på begreppen struktur, process och stadium och en evolutionär uppdelning av landskapets ålder, från ungt till moget till gammalt (Figur 4.), finner alltså sin plats i introduktionen i varje grundläggande

beskrivning av geomorfologi. Den har blivit föremål för mycket kritik sedan den formulerades, men Tinkler (1985) väljer dock att beskriva dess katalytiska effekt på geomorfologin och visar hur den alltså är en passande modell för beskrivning av sluttningens former och landskapsutveckling.



Figur 4: Davis erosionscykel i bergöken (ur Cooke et. al., 1987).

### 3.1.3 Processgeomorfologi

Den tidiga geomorfologiska forskningen fram till andra världskriget var idiografisk och kvalitativ till sin natur. Med detta menas här att studiet av landskapets form och utveckling i stort var en praktisk och inkännande verksamhet som till stor del byggde på forskarens (mer eller mindre reproducerbara) förmåga att tolka landskapets geomorfologiska utveckling. Thornes & Brunson (1979, s. 2) ger en enkel klassifikation av ämnets utveckling:

- i. Denudation chronologies and evolutionary studies.
- ii. Accurate description of the mechanism and rates of operation of geomorphic processes.
- iii. The adoption of systems-based attitude towards geomorphological investigations.

(Thornes & Brunson, 1979)

Kartor har alltid varit en viktig resurs i krig och under de båda världskrigen erbjöds därför många geografer arbete inom krigsmakten. Eftersom man i dessa sammanhang är mer intresserade av hur landskapet ser ut och inte så mycket av långsiktiga teorier över landskapsutveckling, är det inte förvånande att geografin och därmed geomorfologi fick en allt mer kvantitativ prägel, som efter andra världskriget ledde in geomorfologers intresse mot de processer som omdanar landskapet, i stället för på landskapets form.

Processgeomorfologi kännetecknas av en övergång från beskrivandet av de former landskapet uppvisar, till att studera de fysiska processer som ger upphov till formerna. De "nya" geograferna ansåg sig lämna det idiografiska studiet av särskilda landformer till att i stället studera de allmänna och grundläggande processerna som givit upphov till landskapets form. Matematik blir en viktig resurs för processgeomorfologin och närheten till fysik och kemi blir allt mer tydlig när forskare allt mer arbetar i laboratorier för att försöka återskapa naturliga fenomen. Geomorfologin övergår (eller anses övergå) därmed till att bli en naturvetenskap (Science), samtidigt som geografi delas upp i en natur- och en kulturgeografisk del.

### 3.1.4 General system theory och geomorfologi

Under 50- och 60-talen var det förutom fysiken, främst biologin<sup>2</sup> som fick stå värd för geomorfologernas intresse och då framför allt von Bertalanffys systemteori, som fick en av sina tidiga tillämpningar inom geomorfologi (von Bertalanffy, 1968). Engelsmannen Chorley tillhörde gruppen av "nya" geografer och med arbetet om '*Geomorphology and general systems theory*' (1962) skapades ett systemteoretiskt paradigm för geomorfologi som alltså är rådande. Chorleys studie utgår som så många andra geomorfologiska studier från Davis' geografiska erosionscykel. Chorley hävdar att Davis' teori är grundad på att erosionscykeln är ett statiskt slutet system i kontrast till ett öppet systemtänkande. Ett slutet system kan betecknas som ett system där alla transporter av energi mellan de ingående

<sup>2</sup> Geovetenskaperna har alltid haft stort utbyte med biologi. Darwin var t ex nära vän med Lyell och medförde dennes '*Principles of geology*' på sin resa med Beagle (Geikie s 246).

delarna är kända. Ett exempel på ett slutet system är t ex en kontrollerad fysisk laboratoriestudie av ett fenomen. Geomorfologiska förhållanden, som i allmänhet inte kan studeras i laboratoriet (pga deras stora rumsliga och tidsmässiga skala) betecknas ofta som 'öppna system'.

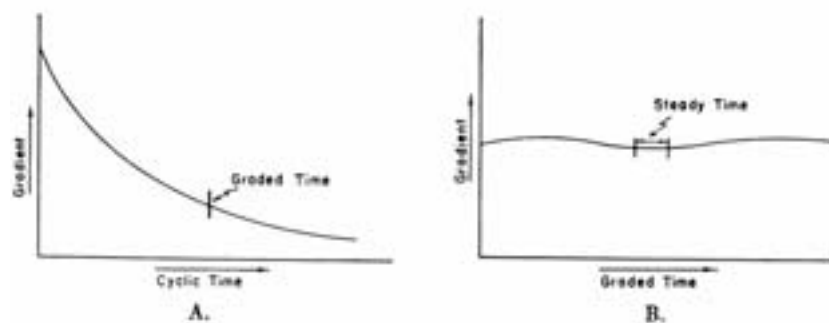
Så gott som varje textbok i geomorfologi börjar med att presentera landskapet som ett system av processer där boxar med energiflöden representerar t ex [avdunstning] -> [nederbörd] -> [avrinning]. Dessa modeller är en typ av kvantifiering av geomorfologin där de i systemet ingående delarna betecknas med t ex en procentsats av systemets totala energi. En annan typ av kvantifiering har varit (och är fortfarande) den allt överskuggande typen av rent fysikaliska mikrostudier, antingen i fält eller i laboratorium, där t ex vattnets eroderande verkan, regndroppens "splash effect" eller den upprepade vätning/torkning, frysning/töning eller saltets effekt som vittrande agent på olika typer av bergarter undersöks.

Den intressanta paradoxen, att man under ett paradigm som systemteori som betecknar helhet och dess "öppna natur" trots allt kan syssla med mikrostudier i laboratorium, ett system totalt slutet från omvärlden, finner jag mycket intressant. En enkel tolkning är att man lyder under två olika paradigm som verkar i olika skala. I regionala, storskaliga studier är det systemteoretiska paradigmet i aktion, medan man i mikroskala anser sig kunna avgränsa sitt studieobjekt så väl att man kan arbeta under positivistiska naturvetenskapliga premisser. Denna tolkning följer ganska nära Schumm & Lichtys (1965) diskussion om olika forskningsansatser baserade på kvalitativa resp kvantitativa analyser. De betonade både rums- och tidsskalans betydelse för valet av metoder i geovetenskaplig forskning:

I studiet av geomorfologiska processer angriper geovetare moderna problem, och det spatio-temporal omfånget i deras forskning är avsevärt beskuret. Detta är nödvändigt om kunskaper om processer skall utvecklas; emellertid får i detta arbete den historiska aspekten på landskapsutveckling eller tidsdimensionen inte försummas. (Schumm & Lichty, 1965).

De gör en uppdelning av det geovetenskapliga studiet i tre tidsskalor (Figur 5.):

- ⌘ 'Cyclic time', (tiden som innefattar en erosionscykel).
- ⌘ 'Graded time', (den tid som innefattar begreppet 'dynamic equilibrium')
- ⌘ 'Steady time', (en bråkdel av 'graded time' oberoende av tiden)



Figur 5: Diagram som illustrerar Schumm & Lichtys tre tidsskalor (ur Schumm & Lichty, 1965).

Man kan enkelt uttryckt säga att i den första tidsskalan, 'Cyclic time' studeras landskapsutvecklingen i ett historiskt perspektiv, medan den i den sista, 'Steady time' studeras ur processgeomorfologisk utgångspunkt. Den typ av tidsskala som tillämpas i de fraktalstudier som denna uppsats handlar om kan närmast beskrivas som steady time, eftersom de data man behandlar t ex en höjddatamodell (DEM) utgör en ögonblicksbild

över hur landskapet ser ut. Dock skulle man i vissa fall kunna arbeta i längre tidsskalor (graded time) genom att studera sekventiella data vid olika tillfällen, när man exempelvis undersöker ett område som riskerar att drabbas av skred eller förändringar i ett meandrande vattendrag.

### 3.1.5 Aktuella teorier i geomorfologi

Idag tycks utvecklingen inom geomorfologi gå i flera olika riktningar och det intressanta är att tidigare dispyter om kvalitativ/kvantitativ forskning eller öppna resp slutna system, inte längre är lika intressanta. Det står allt mer klart att det inte räcker med ett enda perspektiv för att kunna göra geomorfologiska studier. Snarare skulle man kunna säga att själva forskningsproblemet bestämmer perspektivet och att flera olika synsätt på landskap kan samsas inom ett forskningsproblem.

Ett modernt fält inom geomorfologi som försöker svara på dessa nya krav på forskningen går under beteckningen ickelinjära dynamiska system eller "kaosteori". Här arbetar man med relativt enkla<sup>3</sup> matematiska modeller av geomorfologiska (öppna) system enligt General System Theory, vilket innebär att man inte reducerar ett system genom att bryta ner det i sina beståndsdelar. För att ett system skall betecknas som kaotiskt krävs det att den matematik som används för att beskriva det är ickelinjär, samt att lösningarna av ekvationerna för de i systemet ingående parametrarna är exponentiellt beroende av initialförhållanden (Turcotte, s 219). Själva ekvationerna som används är deterministiska, alltså lösbara, men eftersom systemet utvecklar sig exponentiellt med de ursprungliga förhållandena kan de inte lösas utan måste behandlas statistiskt. Den typ av statistik som ofta lämpar sig för detta är fraktal statistik (Turcotte, s 3).

### 3.1.6 Sammanfattning: Vad är geomorfologi?

Sammanfattningsvis kan man säga att geomorfologi är ett forskningsfält med många bottnar:

1. Det är oklart om det kan beskrivas som ett *eget ämne* eller om det är en *underdisciplin* till någon annan geovetenskap eller geografi.
2. Det är ett ämne vars *institutionstillhörighet inte är klar* (geologi/geografi och i förlängningen naturvetenskap/samhällsvetenskap)
3. Dess specifika *metoder delas* med många andra forskningsfält (ex geoteknik, geologi, geografi, miljövetenskap och olika underdiscipliner, hydrologi, ...)
4. Dess *teori och praktik är nära sammanbundna*. Delar av geomorfologins verksamhet är direkt kopplad till samhällets "nyttofunktioner", t ex studier av släntstabilitet, översvämningsproblematik, "naturminnesvård". Yrket geomorfolog existerar egentligen inte, men skulle kunna vara yrket inom vilket många anställda vid våra länsstyrelser arbetar, t ex miljövetare, ekologer mfl, eller inom väg och vatten, ingenjörskonster.

Sammantaget leder det till att det är svårt att sätta fingret på vad geomorfologer arbetar med och det visar sig att olika forskare som kallar sig geomorfologer har mycket olika uppfattningar om vad geomorfologi är, baserat på ovanstående punkter.

---

<sup>3</sup> Enkla i betydelsen få ingående variabler.

## 3.2 FRAKTAL GEOMETRI: TEORI, MODELL ELLER METOD?

### 3.2.1 *Fraktaler: historisk och vetenskaplig bakgrund*

Avgörande för hur man skall se diskussionerna om fraktal teori inom geomorfologin är vilken status konceptet har inom forskningen. Som vi har sett ovan har den geomorfologiska forskningen sedan mitten av nittonhundratalet antagit ett allt mer matematiskt och fysikalistiskt synsätt. De tidigare historiska studierna av landskapsutveckling genom t ex sedimentkronologier har bytts ut mot ett processinriktat och ofta starkt reduktionistiskt synsätt. Samtidigt har det funnits en strävan att inkorporera systemteori för att kunna svara mot "de öppna system" som naturen uppvisar. I dag lockar "icke-linjära dynamiska system" som referensram för geomorfologisk forskning, men det är intressant att notera att detta inte har inneburit att de tidigare historiska och processgeomorfologiska forskningsansatserna har dött ut.

### 3.2.2 *Fraktaler och fraktal dimension*

Det är inom fältet icke-linjära dynamiska system (vard: Kaosteori) som konceptet 'fraktal geometri' uppstått (Mandelbrot, 1983). Man kan enkelt beskriva den fraktala geometrin som "oregelbundenhetens geometri", till skillnad från den traditionella euklidiska geometrin, som talar om sträckor, ytor och volymer i 1, 2, resp 3 dimensioner. Med hjälp av den fraktala geometrin försöker man beskriva ett objekts form utifrån graden av dess oregelbundenhet. Begreppet 'fraktal dimension' ( $D$ ) kan således anta värden mellan euklidiska dimensionernas värden, så att t ex en rät linje har  $D=1.0$ , en något kurvig,  $D=1.3$ ; och en linje som är så kurvig att den nästan helt fyller den yta den upptar har  $D=1.999$ . (Figur 6.) På samma sätt kan man studera oregelbundenheten hos en yta (t ex en landyta) enl följande:

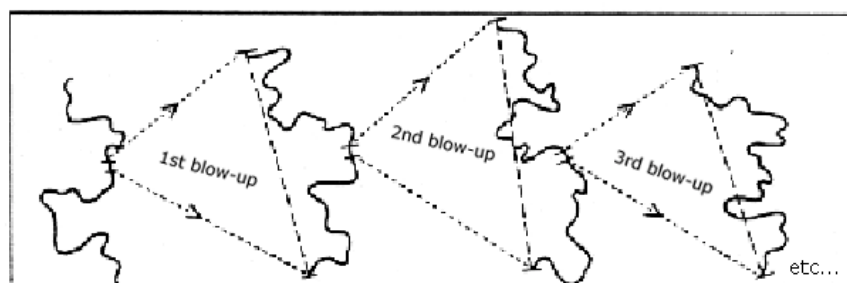
$$2 < D < 3.$$

Den mest utmärkande företeelsen hos fraktaler betecknas på engelska med termen "self-similarity", på svenska självrepresentation (min benämning). Självrepresentation innebär att någon aspekt hos ett fenomen eller process är oföränderligt vid förändring av skalan (Klinkenberg, 1997), (Figur 7.). Den enklaste metoden att bestämma om en företeelse är "självrepresenterande" är visuell. Om man genom att förstora ett bild av ett objekt kan se en ny form som är omöjlig att skilja från originalformen, kan objektet sägas vara självrepresenterande. Naturliga fenomen uppvisar i allmänhet inte self-similarity i dess mest strikta mening, utan det svagare 'self-affinity', eller när det gäller naturliga ytor: 'statistical self-similarity'. (Mandelbrot, 1983) För att en undersökt form skall kunna analyseras som en fraktal modell krävs att objektet uppvisar självrepresentation. Trots det är dessa svagare koncept inte särskilt väl definierade. Vad gäller statisk självrepresentation, så kan man fråga sig: Vilken korrelation mellan den fraktala modellen och den undersökta naturliga ytan (t ex en landform) är tillräcklig för att fraktaler skall vara tillämplig? Normalt anges  $r^2$ -värden i spännvidden 0.990-0.999, vilket är att anse som ett ganska högt ställt krav. En av de mest kända fraktalerna är den sk mandelbrotmängden (Figur 8.), som är ett av de mest komplexa objekten i matematiken. Samtidigt krävs det inte mer än ett par dussin teckens programkod för att skapa en komplett visualisering av den (Gleick, 1987).

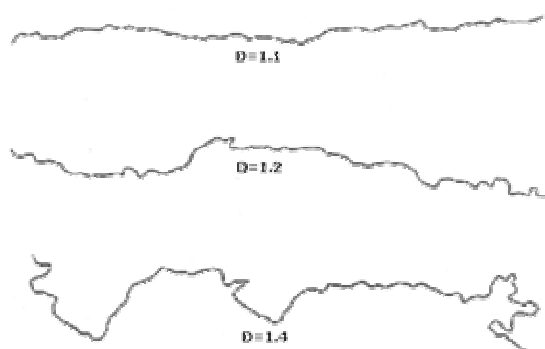




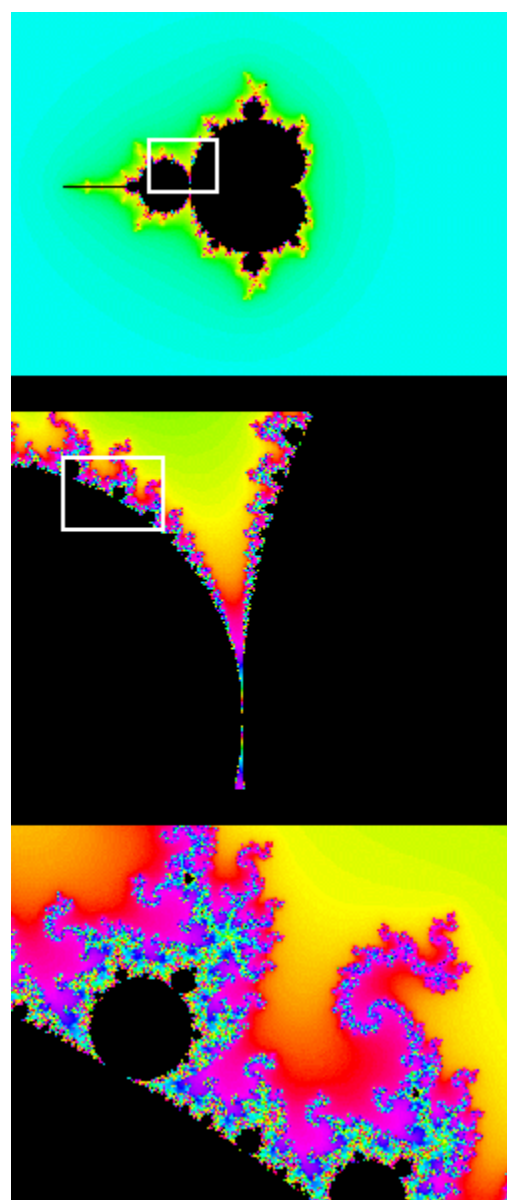
## Geometric Self-Similarity



Figur 7: Fraktalens självrepresentation i Kochkurvan(övre bilden). Fraktalens skaloberoende för en kartografisk linje (nedre bilden). Ur Klinkenberg (1997).



Figur 6: Fraktal dimension hos en linje med olika oregelbundenhet. Ur Klinkenberg (1997).



Figur 8: Mandelbrotmängden. Bild 2 och 3 är förstoraede enligt den vita ramen i bilden ovan. Bilderna är skapade med programmet Mandelzoom för Windows 95.

En av de första som studerade förhållandet mellan längden av en kartografisk linje och skalan var den brittiske forskaren L F Richardson som var intresserad av konflikter mellan länder rörande längden av deras gränser och det starkt skiljande uppmätta längder som gjordes. Richardsons arbeten i början av 60-talet visade att det fanns en koppling mellan kartans skala och den uppmätta längden av en oregelbunden gränslinje när den mättes med en passare. Han fann att beroende på i vilken kartskala han utförde sina mätningar och vilken steglängd han använde skulle den uppmätta längden förändras. Om man använder en steglängd på passaren som är lika lång som den totala längden av en kartografisk linje, från punkt x till y, så kommer den uppmätta längden vara mycket kortare än om man använder en steglängd som är kortare än den totala längden. Ju kortare steglängd, desto mer noggrant kan man följa den kartografiska linjens vindlingar. Till slut, kunde Richardson visa, att den uppmätta längden skulle röra sig mot oändligheten samtidigt som steglängden minskade till minimal längd. Vad han fann var alltså att längden hos en kartografisk linje plötsligt var en öppen fråga som bygger på det subjektiva beslutet om i vilken skala den skall uppmätas. Jämför detta med en mätning av längden på en strand, mellan två uddar. Genom att använda en finare och finare skala skulle man till slut försöka mäta varje sandkorn på gränsen mellan land och hav. Men det finns ingen anledning att sluta där. Genom att studera kristallstrukturen hos varje sandkorn och till slut atomstrukturen och beräkna längden utifrån dessa skulle strandens längd multipliceras tusentals gånger!

Vad Richardson fann var att den traditionella sättet att betrakta de euklidiska dimensionerna inte var tillämpligt på oregelbundna linjer. Men det var inte förrän ett par år senare som den polske matematikern Benoit Mandelbrot (1967) löste problemet genom att koppla Richardsons mätningar till den matematiska teori om icke heltalsdimensionalitet som framlagts kring 1920 av Hausdorff och Besicovitch. Mandelbrot kallade sin uppsats "How long is the coastline of Britain?" och visade att man kunde beräkna kustlinjens fraktala dimensionen genom att beskriva förhållandet mellan steglängden och antal steg som behövdes för att gå sträckan med en passare på en karta. Den fraktala dimension kan därmed sägas beskriva den typiska dimensionen hos en bestämd oregelbunden linje.

Denna uppsats syftar inte att studera metoder att beräkna fraktal dimension *per se*, utan endast för att ge en inblick i metodiken. Följande stycke innehåller därför endast några huvudpunkter för den praktiska gången för beräkning av fraktal dimension ( $D$ ):

1. stega upp sträckan mellan två punkter (steglängden  $s_1$ ) på en oregelbunden linje; resultatet blir  $n_1$  steg. Längden på sträckan  $= s_1 n_1$ .
2. Gör om processen, men ändra steglängden till  $s_2$ ; det krävs nu  $n_2$  steg att gå mellan de båda punkterna. Sträckans längd är nu  $s_2 n_2$ . Processen upprepas till dess ett adekvat antal värden har erhållits.
3. Den fraktala dimensionen beräknas nu enligt ekvationen:

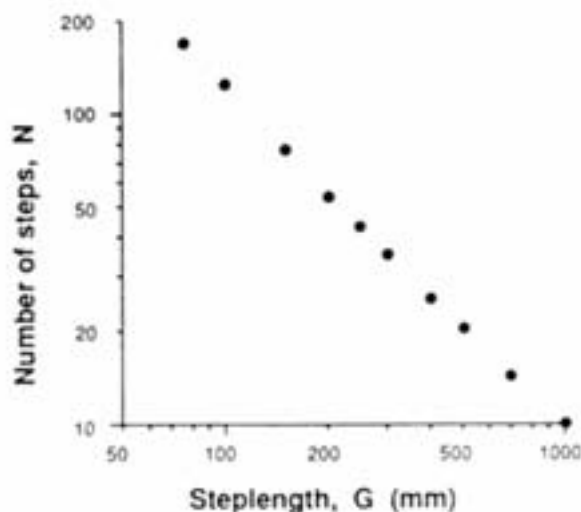
$$D = \frac{\log\left(\frac{n_2}{n_1}\right)}{\log\left(\frac{s_1}{s_2}\right)}$$

Ekvationen löses genom att man plottar steglängden mot antal steg i ett log-logdiagram (Figur 9). Lutningen på den bäst passande linjen för de markerade värdena relateras slutligen till värdet för den fraktala dimensionen och löses genom uttrycket:

$$\text{Lutning} = 1 - D$$

För att ett undersökningsområde skall kunna behandlas som en fraktal modell krävs att det uppvisar självrepresentation (se ovan) och testet för detta genomförs ofta med hjälp av traditionella statistiska test av korrelation och signifikanstest.

Det finns många olika metoder att beräkna den fraktala dimensionen. I fallet ovan har jag beskrivit den sk line-dividermetoden på en kartografisk linje (t ex en strandlinje, höjdkurva, eller alternativt på en höjdprofil). Analysen kan också göras på en tvådimensionell yta. Två metoder är 'box-count', där antalet kvadratiske rutor som täcker en yta omgärdad av en begränsningslinje räknas i olika skalor, eller 'variogrammetoden' där den statistiska parametern varians används.



Figur 9: Exempel på en log-logplot av steglängd mot antal.  $D$  beräknas genom att lutningen för den bäst passande linjära kurvan utläses. (Ur Andrieu och Abrahams, 1989)

### 3.2.3 Fraktaler som beskrivning av landformer

Möjligheten att beräkna den fraktala dimensionen hos en "ickegeometrisk" form har tilldragit sig mycket intresse inom alla naturvetenskapliga discipliner. Även inom de "mindre hårda" naturvetenskaperna, t ex biologi och geovetenskaperna har ett alldeles speciellt intresse rönts. Om man så att säga vänder på formeln för att beräkna fraktal dimension till att i stället skapa en modell med en bestämd fraktal dimension, sk fractional Brownian motion (se nedan), har man kunnat skapa modeller av naturliga fenomen som är oskiljaktiga från verkliga bilder. Denna process används idag särskilt i filmindustrin, där t ex "Marslandskap" helt är modellerade på detta sätt. Vi har alltså att göra med ett matematiskt fenomen som på något sätt kan fånga "...the essence of the surface topography of the earth..."

Mandelbrot (1983) noterar i sitt huvudverk *'The Fractal geometry of nature'* att man sedan lång tid har funnit naturliga exempel på det som nu benämns fraktala fenomen. Han hänvisar till en geografisk studie från mitten av 1800-talet, där en forskare funnit att fragment av sten som brutits från ett block eller från berget självt ofta uppvisar samma karakteristiska former som det ursprungliga berget. Förklaringen var då: Varför skulle det inte vara så, när samma influenser av frost och regn ger form såväl åt massan som dess delar. I sina studier skapade Mandelbrot modeller av bergskedjor med en metod som kallas fractal Brownian motion. (Figur 10.)



Figur 10: Exempel på en pseudo-3D bild av en bergskedja som Mandelbrot modellerade fram med fractional Brownian motion. Ur Mandelbrot (1983).

Då han fann att fraktaler just uppvisar denna egenskap av 'self-similarity' är det kanske inte så konstigt att Mandelbrot utropar:

”Even with my first simulations of fractional Brownian mountains /.../, “to see is to believe.” As the quality of graphics began to improve, so did the quality of belief.”

(Mandelbrot, 1983, s 256)

Men samtidigt är han lite försiktig:

“While our mind spontaneously analyzes geomorphological configurations into superpositions of features having sharply distinct scales, these features need not be real.”

(Ibid, s 262)

Slutligen väljer han dock att bli övertygad:

“... I coined *fractal* from the Latin *fractus*, which describes the appearance of a broken stone: irregular and fragmented. Etymology cannot force an actual stone’s surface to be fractal, but it is surely not a standard surface, and it should be fractal if it is scaling.”

(Ibid, s 262)

### 3.2.4 Fraktal geometri: Teori, modell eller metod?

Vi har här att göra med en typ av geometri som till skillnad från traditionell euklidisk geometri verkar kunna avbilda naturen på ett tidigare oöverträffat sätt. Mandelbrots uttalande väcker dock ett antal nya frågor om fraktalers förhållande till verkligheten. Innebär ”the fractal geometry of nature” att naturen är en fraktal, eller en uppsättning av fraktaler? Alltså, menar Mandelbrot (och de forskare som har tagit upp denna forskningsinriktning) att verkligheten på något sätt kan kvantifieras med fraktaler? Eller är fraktaler och fraktal dimension endast ett statistiskt mått och därmed en metod att beskriva landskap?

Jag ser två möjligheter att tolka konceptets ställning i geomorfologi.

- Å ena sidan kan man hävda att fraktaler är en strikt matematisk teori utan anknytning till verkligheten. När den tillämpas i geomorfologi blir den till ett statistiskt mått för beskrivningen av oregelbundna former som kan användas som metod för att beskriva de likaledes oregelbundna landformer av olika slag som påträffas inom geomorfologi.
- Å andra sidan står Mandelbrots (1983) "Seeing is believing" och Xu et al (1993) påstående att fraktaler "captures the essence of the surface topography" som garant för att fraktaler skulle innefatta något av naturens inneboende egenskaper. I detta fall kan fraktal geomorfometri anges som en geomorfologisk teori.

Denna fråga kan inte få något entydigt svar av den forskningslitteratur som undersökts i denna uppsats. Forskarna anger konceptet fraktaler som en teknik eller ett verktyg vid kvantifiering av landskapets form, eller fraktal dimension som en viktig parameter för att beskriva landskap.

Firstly, the concepts of a fractional dimension and dependence of measure on scale are quite foreign to much of mathematics and may therefore offer the first effective tools for understanding the irregularity widely observed in the geometry of real phenomena. Second, the numerical value of  $D$  may be the most important single parameter of an irregular cartographic feature, just as the arithmetic mean and other measurements of central tendency are often used as the most characteristic parameters of a sample. And finally it appears that such seemingly chaotic features as coastlines may behave in certain ways with substantially regularity. (Goodchild & Mark, 1987, s 267)

A landscape is therefore a complex surface and no single or simple linear combinations of these morphometric variables can describe it comprehensibly. /.../ New parameters that better characterize the variability of landscapes are continually being sought. The fractal dimension may be one of them. (Xu, et al, 1993, s 246)

Det finns också ett annat användningsområde för begreppet fraktaler, nämligen som modell, vilket syftar till "the self-similar fractal model". Detta är den matematiska modell som beskrivits ovan, vilken ligger till grund för beräkningen fraktal dimension.

The self-similar fractal model tested in this analysis was found to provide a very good fit for some land surfaces but an imperfect fit for some others. (Klinkenberg & Goodchild, 1982, s 232)

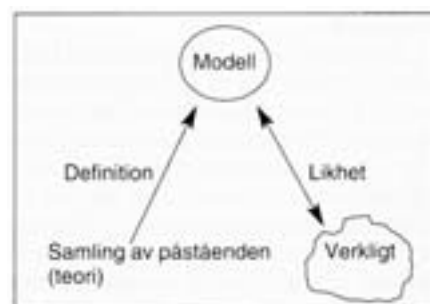
Som synes finns det i litteraturen en stor oklarhet i hur konceptet fraktaler skall förstås i förhållande till geomorfologi.

---

Elzinga (1999), ger en kort presentation av relationerna mellan teori, modell och verkligheten. (Figur 11) I denna bild framstår forskningsverksamheten som en "aktiv process där forskaren ofta styr sin uppmärksamhet i enlighet med en viss problemställning, förhandsantaganden om verklighetens beskaffenhet (världsbild) och hur en bra förklaring ser ut (vetenskapsideal)" (s 3654).

Utifrån dessa förhandsantaganden formulerar forskaren en modell av verkligheten genom att abstrahera och systematisera karakteristiska drag hos det fenomen som skall studeras. Modellen anger sålunda hur systemet avgränsas och vilka dess karakteristiska egenskaper är.

Själva teoribildningen genomförs sedan genom att man med hjälp av begrepp laborerar med modellen



Figur 10: Relationer teori-modell-  
verklighet (Ur Elzinga, 1999)

för att göra utsagor om dess struktur, funktion, dynamiska egenskaper mm. Elzinga menar därmed att modellen kan "sägas vara ställföreträdande för verkligheten." och att "Avbildningstrogenheten eller sanningslikheten gäller för modellen, inte teorin i sig." (ibid).

Om vi översätter denna bild till de förhållanden som studeras i denna uppsats får vi följande uppställning:

1. Forskarnas problem: Är landskapets yta en self-similar fraktal, och i så fall, vad kan man med hjälp av fraktaler säga om landskapets yta? Geomorfologers världsbild är (i allmänhet) realism och (åtminstone dessa forskare) har en naturvetenskaplig världsbild.
2. Den modell som formuleras består av två delar: Först skapas en modell av verkligheten genom att landskapets topografi abstraheras till en höjddatamodell, DEM (Digital Elevation Model), vilken sedan analyseras med hjälp av en matematisk modell som behandlar oregelbunden geometri, 'the self-similar fractal model' (SSFM).
3. Teoribildningen som genomförs (vilket är denna uppsats fokus) behandlar frågor om hur väl den fraktala modellen överensstämmer med DEM-modellen.

Den teori som forskarna har att ta ställning till vid sitt teorival, är sålunda inte den fraktala modellen i sig, eller fraktaler i allmänhet, utan en ny teori, vilken kan benämnas fraktal geomorfometri. Denna teori var ännu inte klart formulerad när de artiklar som studerats i denna uppsats publicerades och är fortfarande under fortsatt utveckling och formulering. För att kunna genomföra ett teorival måste forskare i allmänhet ha alternativa teorier att välja mellan. Den mest aktuella teorin i detta fall har tidigare i denna uppsats benämnts "traditionell geomorfometri", baserad på allmänna statistiska parametrar och geomorfologiska mått.

## 4. FALLSTUDIUM

### 4.1 FRAKTAL GEOMORFOMETRI

De fyra forskningsartiklar som utvalts för studium uppvisar skillnader i författarnas förståelse till konceptet fraktaler, och samtidigt i deras angreppssätt och syn på vad fraktaler har att erbjuda geomorfologi i allmänhet och studiet av geomorfometri i synnerhet. Gemensamt för alla artiklarna är dock att de genom rigorösa kvantitativa studier av landskapsmodeller försöker utröna om fraktala koncept kan leda till en ökad förmåga att geometriskt beskriva landskap. De frågor som artiklarna ställer upp att analysera är av typen "is the land surface a self-similar fractal?" (Klinkenberg och Goodchild, 1992) och om det är det, om användningen av fraktal dimension kan användas som ett index över landskapsytans råhet (oregelbundenhet) (Outcalt et al, 1994). Flera av artiklarna tar också upp rent metodinriktade frågor om olika matematiska metoder att beräkna fraktal dimension, som inte är intressanta för denna analys. Nedan ges en kort presentation av mitt material.

Klinkenberg & Goodchild (1992) ger i sin artikel en introduktion till "The fractal properties of landscape" och genomför en jämförelse av metoder att beräkna fraktal dimension på ett representativt urval av olika landskapstyper, för att slutligen diskutera teorivalsfrågor i ljuset av sina resultat. Materialet de analyserar är sk DEM-modeller, *digital elevation models*, alltså höjddatamodeller av rastertyp, där varje ruta representerar en yta av 30\*30 m. Skalan på dessa kartmodeller är 1:24 000

Deras arbete kan beskrivas som traditionellt vetenskapligt, och de bygger sina konklusioner på ett vetenskapligt tänkande som bygger på teorivalskriterier (konsistens, robusthet, precision, mm) av den typ som Kuhn diskuterar.

Outcalt et al (1994) undersöker om fraktala parametrar, t ex fraktal dimension kan användas för att geomorfologiska landskapsregioner från varandra, på basis av deras råhet/oregelbundenhet (roughness). I sin studie använder endast en modell att beräkna fraktal dimension på DEM-modeller som representerar olika geomorfometriska regioner. Undersökningen utförs i två skalnivåer, både på DEM-modeller i skalan 1:24 000 och 1:500 000, för att testa landskapets självrepresentation. Outcalt et al har ett något mer specifikt geomorfologisk angreppssätt, där undersökningen av de landskapets fraktala egenskaper inordnas i den traditionella geomorfologiska metoden att avgränsa geomorfometriska regioner. Själva analysen av undersökningsmaterialet håller dock en traditionell vetenskaplig stil.

Andrle och Abrahams (1989) genomför egna topografiska mätningar av en sk talussluttning<sup>4</sup> och använder dessa för att pröva om denna geomorfologiska landform uppvisar självrepresentation och andra fraktala egenskaper. De prövar också själva metodiken för beräkning av fraktal dimension. Deras tillvägagångssätt är något mer kritiskt än de övriga vilket framgår av att de lägger större vikt vid att göra strikta analyser av de metodologiska bristerna i konceptet.

Den sista artikeln som utvalts för granskning är skriven av Herzfeld och Overbeck (1999). Den har inte någon traditionell geomorfologisk inriktning i sig, utan tillämpar studiet av

<sup>4</sup> En talussluttning är en kon av nedrasat material som bildas mot en brant bergssida av vittringsmaterial från högre nivåer genom erosion.

fraktaler på havsbottnens morfologi men med en mer teknisk-matematisk tonvikt på att studera form. Artikeln är mer avancerad utifrån matematisk synvinkel än de andra, men ger samtidigt en inblick i hur studier av fraktaler och landformer har utvecklats på tio år.

Hur går då forskarna till väga för att motivera sina bevekelsegrunder för att intressera sig för fraktal geometri som teoretisk ram för geomorfometri? Mandelbrot, 1983 hävdade att "to see is to believe", när han såg sina fraktala berg vecklas upp på datorskärmen. Men forskare kräver nog i allmänhet mer av en matematisk teori än att den kan användas för att avbilda komplexa landformer på en datorskärm.

Jag skall därför försöka visa hur forskarna i mitt material har tillämpat teorivalskriterier av den typ som Kuhn (1977) presenterat, men också att dessa kriterier inte tillämpas i en strikt form för att bedöma om en teori skall fullföljas eller avfärdas, utan att de i stället fungerar som norm i forskningsarbetet.

Klinkenberg och Goodchild (1992) hänvisar till traditionella vetenskapliga kriterier av den typ som Kuhn presenterat:

However, if the fractal dimension is to be a useful parameter, the measurement methods used to determine the dimension must be robust, consistent, and have the capability of differentiating between visibly dissimilar surfaces.

Thus, one (1) aim of this study was to observe how the fractal dimension varied statistically between physiographic provinces.

Another (2) aim of this study was to observe the consistency of the different methods used to determine the fractal dimension of land surfaces. (Klinkenberg och Goodchild, 1992, s218)

De ställer också en fråga (3) om själva grunden för studier av fraktal dimension av landskapsytor: Eftersom olika metoder för beräkning av  $D$  på en och samma yta kan skilja sig åt från varandra: beror detta på att vissa metoder är bättre än andra, eller beror det på teoretiska brister hos den fraktala modellen?

För att pröva dessa frågor genomför forskarna analyser av sitt material enligt de metoder som tidigare beskrivits för att beräkna fraktal dimension.

Det första testet ställer frågan om landskapet är 'self-similar' och testar detta genom att undersöka om de plottade punkterna i log-log diagrammet uppvisar linearitet. Ett kurvilineärt resultat indikerar att värdet på den fraktala dimensionen  $D$  varierar med mätskalan och därmed att profilen ej är 'self-similar' (Andrle och Abrams, 1989).

Klinkenberg och Goodchild (1992) finner att de plottade punkterna för många områden uppvisar kurvighet eller möjligen flera linjära segment. Även Outcalt et al (1994) uppmärksammar att deras data ej är 'self-similar' över alla skalor. Andrle och Abrahams (1989) finner att de konventionella statistiska testen för korrelation anger linearitet, men att man med mer avancerade statistiska test kan ifrågasätta dessa resultat. Herzfeld och Overbeck (1999), noterar också de vad de kallar 'scale-breaks' i log-log ploten.

Men, undrar då den frågvis, om landytor som analyseras inte uppfyller de krav som ställs för att de skall uppvisa self-similarity och därmed vara modellerbara med fraktaler, måste man inte då förkasta konceptet?

Klinkenberg och Goodchild (1992) tar sig ut så här:

"The self-similar fractal model tested in this analysis was found to provide a very good fit for some land surfaces but an imperfect fit for some others. It is not possible to provide blanket statements about the overall fit of the fractal model. Outright rejection of the self-similar fractal model does not appear to be warranted, but neither does a blind application. Thus, although it cannot be considered a universal model it does provide a fairly complete descriptor for some landscapes. It would appear to be a unique model and, given that two parameters are needed to fully de-



scribe it (the fractal dimension and some measure of the relative magnitude such as gamma), it is a relatively simple one. (p 232)”

Outcalt et al (1994) uppmärksammar problemet med att geografiska data inte är self-similar över alla skalor utan endast inom vissa skalor, men drar inte slutsatsen att fraktaler skall förkastas, utan i stället att man måste vara uppmärksam på i vilket skalområde man utför sina analyser. (detaljerade data kan inte användas för att avgränsa morfometriska regioner i regional skala och omvänt). (s 95). Dessutom kan vissa landskap uppvisa förändringar i fraktal dimension som är beroende av samplingsintervall (noggrannhet), ”oregelbundenhetsskala”, areal utsträckning och beräkningsmetod: ”*Multiple sampling in within the physiographic province /.../ may or may not produce a converging representative value.*” (s 95)

Andrle och Abrahams (1989) menar att deras mätningar på en modell av en talusslutning tyder på att talusslutningens oregelbundna yta inte är self-similar över någon större skalvidd. D varierar i stället på ett kontinuerlig och systematiskt sätt med mätskalan. På basis av denna variation anser de att den fraktala modellen är av begränsat värde vid kvantifieringen av oregelbundenheten i talusslutningars yta. Författarna föreslår att detta förhållande kan generaliseras till andra geomorfologiska fenomen [utan att specificera vilka eller inom vilka skalor].

Herzfeld och Overbeck (1999), vilka även de förkastade i sitt fall bottentopografins ’self-similar’ karakteristika löser problemet med att införa en utvecklad variant av den fraktala modellen vilken kallas ’multifraktal’ (i vilken log-log-ploten just uppvisar flera linjära segment): ”and so it is possible to use a simple log-log plotting technique again” (s 981).

Detta sistnämnda sätt att tackla problemet kan ställas i relation till Duhem-Quines underdetermineringstes som presenterades tidigare, att forskare kan hålla fast vid en teori i ljuset av motsägelsefulla observationer av dess utkomst, genom att man gör en förändring i de bihypoteser som håller ihop teorin.

Vi måste notera att det endast var en av de här studerade artiklarna som efter ett test av teorins applikation kom till slutsatsen att konceptet fraktal dimension var av litet värde för geomorfologin (Andrle och Abrahams, 1989).

Hur går då de övriga artiklarna vidare, efter att ha noterat att deras fraktala teori inte är tillämplig på naturliga landskap? Vi har redan sett att ett par av författarna uppmanar till ökad försiktighet vid tillämpningen av konceptet, eller att endast vissa landskapstyper går att analysera med fraktala modeller, medan författarna till en av artiklarna avfärdar konceptet.

En lösning som Klinkenberg och Goodchild använder, är att lämna den övergripande teoretiska nivån och gå ner på metodnivå. De undersöker hur väl olika matematiska metoder att analysera landytans fraktala karakteristiska fungerar. Återigen använder de teorivalskriterier enligt Kuhn:

“Some of the methods produced parameters which appear to discriminate between physiographic provinces, and even within physiographic provinces some differentiation is possible. In particular this applies to the majority of the variogram results. This implies that those methods produce robust and consistent results.”

It would appear that the variability in the fractal dimension is more a function of the methods used to obtain the fractal dimension than it is a reflection of any theoretical inadequacy of the self-similar fractal model. (Klinkenberg och Goodchild, 1992, 232)

Även Herzfeld och Overbeck (1999) gjorde detta hopp till metodnivå, genom att presentera ett nytt matematiskt koncept för att lösa problemet med self-similarity. De drar också nytta av det faktum att topografiska data inte längre kan betraktas som self-similar eller scale-independent på ett annat sätt, när de noterar att detta kan förklaras med att de kan attribuera skalberoendet till geologiska processer som ger upphov till ett specifikt landskap.

All methods for estimation of dimension serve to demonstrate that the dimension does depend on scale for the studied areas, which is attributed to different geologic processes acting at different scales. In particular, the topography is not self-affine. In general, dimension decreases with scale (smoother surfaces for higher resolution). (Herzfeld och Overbeck, 1999, 998-1003)

I början av denna uppsats återgavs ett citat ur en reviewartikel från 1993 som demonstrerade stora förväntningar på fraktalers framtid för geomorfologisk forskning:

It [Fractals] has since become the most successful mathematical model for describing real landscapes because the fractal dimension appears to capture the essence of the surface topography of the earth in a way that other geomorphological attributes do not. (Xu et al, 1993)

Med tiden har dock en reaktion mot denna entusiasm över tron om att en enskild geomorfometrisk parameter, som skulle kunna inkorporera landskapets komplexitet kunnat skönjas. I en senare reviewartikel, kan Pike (2000) konstatera att:

Qualification of claims initially made for terrain fractality mark a healthy step towards a more measured incorporation of the concept into geomorphology. (Pike, 2000)

## 4.2 HYPOTESER OM FORSKARES PARAD...SKIFTEN

Det finns ytterligare ett tema kring dessa forskares teorival och intresse för att formulera en fraktal geomorfometri som skulle vara intressant att studera närmare. Detta gäller vad forskarna "egentligen" har för motiv att intressera sig för fraktaler som grund för det geomorfometriska studiet av landskapets form. Här har vi att göra med forskarnas världsbild och vetenskapsideal, (paradigm), vilka alltid är mer eller mindre uttalade i litteraturen och därför måste uttolkas som "mellan raderna". Det är förstås vanskligt att göra sig till uttolkare av enskilda individers bevekelsegrunder eller en hel grupp forskares kollektiva paradigm, men samtidigt har några allmänna hypoteser kring dessa forskares teorival utvecklats och formulerats under arbetet med denna uppsats. Dessa hypoteser är inte uteslutande och flera kan samverka med varandra.

- 1) De *nya typer av data och analysmetoder* som geomorfologen arbetar med kräver nya angreppssätt. Datorns kraftfulla förmåga till att automatisera beräkningar har sedan 60-talet gett upphov till nya tekniker/metoder att analysera tidigare oövervinnliga datamängder. Exempel på nya typer av analysmetoder och data som levereras av dessa är fjärranalys (remote sensing), där satelliter, rymdsonder och flygplan levererar data från en mängd olika digitala mätinstrument. t ex sensorer för vanligt ljus, ultraviolett ljus, magnetism och gravitation, samt radar. Dessa data behandlas i allt mer användarvänliga databassystem, så kallade geografiska informationssystem (GIS) och digital kartografi.

Dessa nya typer av data och metoder att analysera dessa har lett till flera olika angreppssätt:

- a) Forskarna förväntar sig att den nya ramen/paradigmet skall leda till *bättre förklaringar på redan etablerade problemställningar*. Fraktal geomorfometri skulle här kunna vara ett viktigt verktyg för att förbättra beskrivningen av specifika landformer, eller att avgränsa landskapsregioner på basis av deras tillkomstprocesser (med grundantagandet att varje landformande process ger upphov till sin specifika fraktala signatur).

- b) En ny ram eller ett nytt paradigm skapar också *nya problemområden* för forskarna. Detta skulle kunna innebära att de geomorfologiska forskarna fick fler och eventuellt allt mer sofistikerade verktyg att analysera landskapets form och de processer som verkar på landytan. Alternativt skulle forskningen allt mer skiljas från det geomorfologiska moderämnet. Det finns i dag ett stort intresse för att skapa en ny vetenskap: Geographic Information Science (jämför geografiska informationsystem).
- c) Många forskare har ett *intresse för nya tekniker* (ett mer pragmatiskt intresse - "tekniknördar").
- 2) Slutligen kan man ta upp frågor om *geomorfologins självbild* och förhållandet mellan kvantitativ och kvalitativ forskning. Det finns en intressant paradox<sup>5</sup> i geomorfologins historia: nämligen att geomorfologin har haft en mer kvantitativ prägel under geografi och kvalitativt under geologi. Geomorfologin som tvärvetenskap utan bestämd institutionstillhörighet medför ett sökande efter en fast grund och andra ämnens erkännande. Fraktal geomorfometri som ett väl utvecklat forskningsområde inom geomorfologi skulle då bidra till att höja ämnets status.

---

<sup>5</sup> "It is interesting to note that claims to specific geomorphological heritages within geography or geology have invariably led to contradictory or paradoxical associations in the historical evolution of geomorphic thought. Geomorphological research by geographers is often characterized as being quantitative and process-oriented (e.g. Baker 1988; Baker and Twidale 1991). Yet, the roots of the process paradigm are claimed to be geological and are usually traced along a branch that comprises the activities of various United States Geological Survey employees such as Wolman, Langbein, and Leopold, and ultimately Gilbert using a 50-year graft. In contrast, the strong claim that many Quaternary geologists often make to a historical-genetic perspective or method in their geomorphological research (e.g. Baker and Twidale 1991) 'found its most eloquent expression in the writings of a geographer, William Morris Davis' (Baker 1988, p. 1158). These are somewhat inaccurate and inconsistent portrayals of contemporary thought in these disciplines." (Bauer, 1996). "Jag ser det som en paradox att geomorfologin studerades kvalitativt inom geologins paradigm medan den under den "geografiska eran" (under processgeomorfologin) framförallt kännetecknas av kvantitativa studier i sann logisk positivistisk anda." (Nelhans, 1997)

## 5. SAMMANFATTNING

Syftet med denna uppsats har varit att undersöka hur forskare går till väga när de testar applikationen av en ny teori (fraktal geomorfometri) till sitt studieområde. Med Kuhn (1977) presenterades ett ramverk över kriterier för teorival, som anses vara allmänt vedertagna. Kuhn ifrågasätter dock dessa kriteriers absoluta roll som regler genom att notera att de är inbördes vaga och att de är inkonsekventa när de tas tillsammans. I min analys av de geomorfologiska forskarnas ställningstagande finner man liknande inkonsekvenser. Forskare anger t ex att metoden att beräkna fraktal dimension för att beskriva landskapets form är knuten till teorivalskriteriet enkelhet, givet att endast en parameter skall beskriva landskapets komplexitet, men samtidigt finns det brist i överensstämmelse med teorivalskriteriet exakthet, eftersom endast vissa typer av landskap uppvisar fraktala karakteristika.

Kuhn (1977) försöker senare visa att teorivalskriterierna kan fungera som värderingar hos forskarsamhället, när de befins vara bristfälliga som regler för teorival. Det syns mig som om de geomorfologiska forskarna tänker på ett liknande sätt, eftersom de endast i ett fall väljer att avfärda fraktala koncept som relevanta för geomorfologiskt studium, när modellen inte överensstämmer med verkligheten.

Duhem-Quines underdetermineringstes kan också den sägas uppvisa exempel på hur forskare låter sina värderingar gå före exakta kriterier för hur prövning av teorier skall gå till. I ljuset av det misslyckade testet på topografiska datas skaloberoende går en av artiklarna vidare genom att hävda att teorin kring multifraktaler kan tillämpas, där den tidigare teorin om fraktaler har misslyckats. Man kanske kan säga att forskarna i detta fall, när de ökar sin teoris exakthet, förlorar något i dess enkelhet.

## 6. LITTERATUR:

- Andrle, R. & Abrahams, A. D. (1989): Fractal techniques and the surface roughness of talus slopes. *Earth Surface processes and landforms*, 14, 197-209.
- Bauer, B. O. (1996): Geomorphology, Geography and Science, in *The Scientific Nature of Geomorphology*, edited by Rhoads & Thorn, John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- Beckinsdale, R. P. & Chorley, R. J. (1991): *The history of the study of landforms or the development of landforms, Vol. 3: Historical and regional geomorphology 1890-1950*, Routledge, London.
- Bernstein, R. J. (1987): *Bortom Objektivism och Relativism. Vetenskap, hermeneutik och praxis*, Röda Bokförlaget, Göteborg.
- Brabyn, L. (1998): GIS analysis of macro landform. 10<sup>th</sup> *Colloquium of the Spatial Information Centre*, University of Otago, New Zealand.
- Buschwald, J. Z. & Smith, G. E. (1997): Thomas S. Kuhn 1922-1996. *Philosophy of Science*, 64, 361-376.
- Chalmers, A. F. (1995): *Vad är vetenskap egentligen?*, Nya Doxa, Nora.
- Clowes, A. & Comfort, P. (1987): *Process and landform: An outline of contemporary Geomorphology*, Oliver and Boyd, Essex.
- Elzinga, A. (1999): Medicinens vetenskapsideal – reduktionismen får mothugg. *Läkartidningen*, 96, 3654-3656
- Geikie, Sir A. (1905): *Landscape in history*. Macmillan, London.
- Gleick, J. (1987): *Chaos. Making a new science*, Abacus, London
- Goodchild, M. & Mark, D. (1987): The fractal nature of geographic phenomena. *Annals of the Association of American Geographers*, 77, 265-278.
- Gould, S. J. (1987): *Time's arrow, time's cycle. Myth and metaphor in the discovery of Geologic time*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England.
- Herzfeld, U. C. & Overbeck, C. (1999): Analysis and simulation of scale-dependent fractal surfaces with application to seafloor morphology. *Computers and Geosciences*. 25, 979-1007.
- Hess, D. J. (1997): *Science studies. An advanced introduction*, New York University Press, New York and London.
- Klinkenberg, B. (1992): Fractals and morphometric measures: is there a relationship? *Geomorphology*, 5, 5-20.
- Klinkenberg, B. & Goodchild, M. (1992): The fractal properties of topography: A comparison of methods. *Earth Surface processes and landforms*, 17, 217-234.
- Kuhn, T. S. (1977): Objectivity, Value Judgement, and Theory Choice, i *The essential tension*, University of Chicago Press, Chicago.
- Kuhn, T. S. (1997): *De vetenskapliga revolutionernas struktur*, Thales, Stockholm. [Ursprungligen 1962, andra upplagan, 1970].
- Lakatos, I. (1970): Popper falsificationism and the 'Duhem-Quine thesis'. I Lakatos, I. & Musgrave, A. (red): *Criticism and the growth of knowledge*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Laudan, L. (1990): *Science and relativism*, University of Chicago Press, Chicago.
- Mandelbrot, B. (1967): How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156, 636-8.
- Mandelbrot, B. (1983): *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman and Company, New York 468 p.
- Mark, D. (1975): Geomorphometric parameters: A review and evaluation. *Geografiska Annaler*, 57A, 165-177.
- Outcalt, S., Hinkel, K. & Nelson, F. (1994): Fractal physiography? *Geomorphology*, 11, 91-106.
- Phillips, J. D. (1992): Qualitative chaos in Geomorphic systems, with an example from wetland response to sea level rise, *Journal of geology*, 100: 365-374.
- Phillips, J. (1995): Nonlinear dynamics and the evolution of relief, *Geomorphology*, 14, 57-64.
- Pike, R. J. (2000): Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 24: 1-20.
- Pörn, I. (1990): *Filosofi - visdom för vår tid?* I Venkula, J. ed.: Ajatuksen Voima, Jyväskylän.
- Richards, K. J. (1994): 'Real' Geomorphology revisited, *Earth surface processes and landforms*, 19: 277-281.
- Rhoads, B. L. & Thorn, C. E. (1994): Contemporary philosophical perspectives on Physical Geography with emphasis on Geomorphology, *The geographical review*, 84: 90-101.
- Schumm, S. A. & Lichty, R. W. (1965): Time, space and causality in Geomorphology. *American Journal of Science*, 269: 110-119.
- Taylor, P. (1975): An interpretation of the quantification debate in British geography, *Transactions, Institute of British geographers*, 1:2, 129-142.
- Thornes, J. B. & Brunsden, D. (1977): *Geomorphology & Time* Methuen & Co, London.
- Tinkler, K. J. (1985): *A short history of Geomorphology*, Croom Helm Ltd, Sydney.
- Turcotte, D. L. (1997): *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Xu, T., Moore, I. & Gallant, J. (1993): Fractals, fractal dimensions and landscapes – a review. *Geomorphology*, 8, 245-262.

*Övriga referenser:*

- French, J. (2000): Föreläsninganteckningar, kursen ‘\*\*\*’, Y University. *Internet*: [<http://www.geog.ucl.ac.uk/~jffrench/ugrad/B2005.html>].
- Klinkenberg, B. (1997): Unit 47 - Fractals, *Internet*: [[www.geog.ubc.ca/courses/klink/gisnotes/ngial/toc.html](http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gisnotes/ngial/toc.html)].
- Referat av ett kapitel i [Klee, R (1999): *Scientific inquiry: readings in the philosophy of science*, Oxford University press, New York], *Internet*: n/a