

Chaos v hydrogeologii

Mgr. Petr Nakládal, petr-nakladal@email.cz

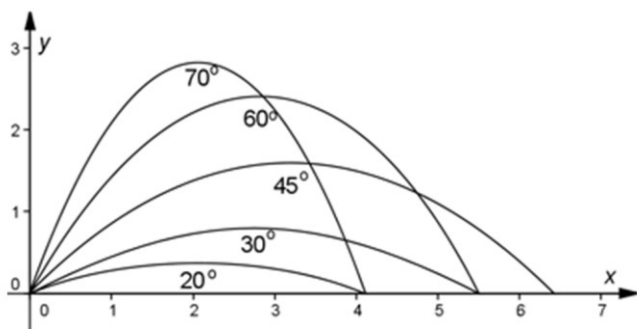
Souhrn.

Cílem přednášky je jednak pokusit se změnit pohled posluchačů z řad pracovníků státní správy na geologické obory kde se chaotické jevy velmi výrazně uplatňují a nastínit možnost využití teorie nelineárních systémů v hydrogeologii. V článku jsou prezentovány pojmy z teorie nelineárních dynamických systémů (teorie chaosu) jako například rozdíly mezi deterministickým, chaotickým a náhodným systémem. Vysvětlen je taky důvod proč se hmota a život vyvinuly na rozhraní chaosu a determinismu. Na prezentovaných ukázkách jsou navíc předvedeny příklady chaosu kolem nás.

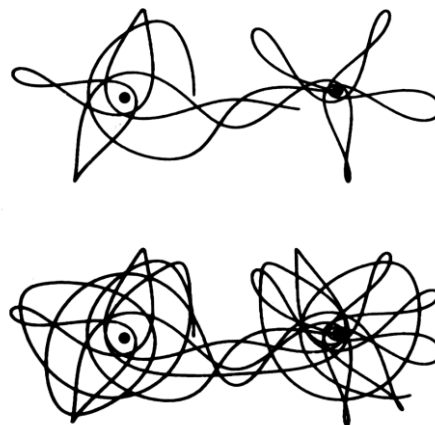
Úvod.

Většina úředníků státní správy už z podstaty svojí funkce naprosto pohrdá chaosem. Jako by chaos byl něco zlého ba téměř proti smyslu lidského bytí. Naopak, chaos je podstata existence hmoty a základ našeho života. Podstatou celého vesmíru tak i lidské společnosti jsou chaotické systémy. Bez chaosu bychom jako hmota nebo nakonec jako myslící tvorové vůbec neexistovali. V praxi se ale běžně zaměňuje termín chaos s termínem náhoda nebo zmatek. Termín chaos vychází z teorie nelineárních dynamických systémů s vnitřními parametry (jednodušeji chaotické systémy). V matematických teoriích se běžně používají základní pojmy jako deterministický, chaotický a nakonec stochastický (náhodný) systém. Tyto systémy existují kolem nás a neustále na nás působí. Proto považuji za vhodné je podrobněji vysvětlit.

Deterministický systém se většině lidí (včetně úředníků) nejvíce zamlouvá. Je to systém přesně definovaný nějakým zákonem ať už přírodním nebo lidským. Jako příklady mohu prezentovat $1 + 1 = 2$ (v desítkové soustavě), práci na páce, pohyb jednoho tělesa v gravitačním poli, Archimedův zákon, zákon zachování energie, $E = mc^2$, $u = \sin(\omega t + \phi)$ ap. Protože se tyto systémy dají vyjádřit slovy nebo fyzikálním vzorcem tak se staly předobrazem zákonů lidských ať už tištěných (Evropa) nebo zvykových (Anglosaské země). Jenže je tu zásadní problém. V přírodě na nás nepůsobí jen jeden zákon ale celá kupa různých přírodních zákonů naráz (to samé v zákonech lidských). Právě když potřebujeme, aby jablko spadlo po zvolené trajektorii na manželku (přítelkyni, sestru) stojící kousek vedle stromu tak se mu do cesty připlete větev a poničené jablko spadne jinam, než jsme chtěli (viz gravitační zákon a zákon schválnosti). Obdobné to je s pohybem těles v gravitačním poli. Pro hmotný bod je rovnice jednoduchá, která se učí už na základní škole. Upřímně - kdo někdy viděl hmotný bod? Výpočet pohybu pro dvě hmotná tělesa s gravitací ještě existují odvozené fyzikální vzorce ale fyzikálně a matematicky řešit problém vzájemného pohybu třech hmotných těles v prostoru je téměř nespílitelná úloha (viz obr. 1 a 2). A tady se dostáváme k termínu chaos, čili k nelineárním dynamickým systémům (taky se používá název deterministický chaos).



Obr. 1: Pohyb hmotného bodu v gravitačním poli



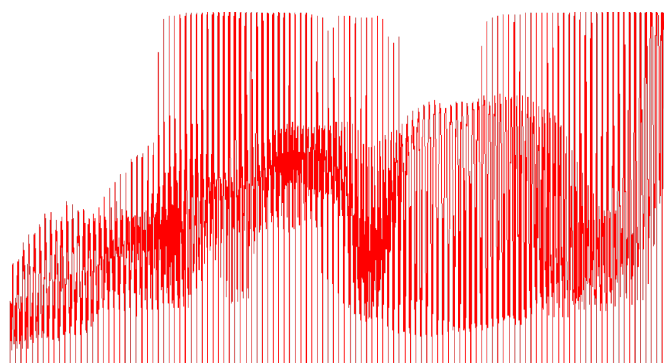
Obr. 2: Simulace pohybu družice mezi planetami

Nelineární dynamické systémy.

Nejprve co jsou to nelineární dynamické systémy. Jsou to systémy kde výsledný vývoj sledované veličiny je velmi citlivý na přesnosti určení vstupních parametrů (jeden nebo více) procesu. V případě výše uvedeného pohybu mezi dvěma planetami prochází těleso oblastí bez gravitačního působení obou planet. Drobná změna trajektorie tělesa v tomto místě může významně změnit jeho celkovou dráhu. Platí obecný princip, že pokud neznám vnitřní chování obecného systému (černé skříňky), tak nejsem schopen určit co je jeho podstatou (viz obr. 3 a 4). Poměrně malé změny vnitřních parametrů dynamických systémů ve výsledku dávají významně rozdílné výstupy. Už klasickým příkladem je pokus o modelový výpočet počasí provedený v roce 1961 Edwardem Lorenzem kdy jedna desetitisícina zaokrouhlení vygenerovala ve výsledku naprosto rozdílnou předpověď. Později tento efekt dostal název „mávnutí motýlích křídel“. Například právě efekt „motýlích křídel“ může za to, že předpovědi počasí Českého hydrometeorologického ústavu počítané modelem Aladin nebývají na delší dobu než cca 3 dny. „Motýlí křídla“ mohou i za to, že tyto předpovědi občas nevyjdou.



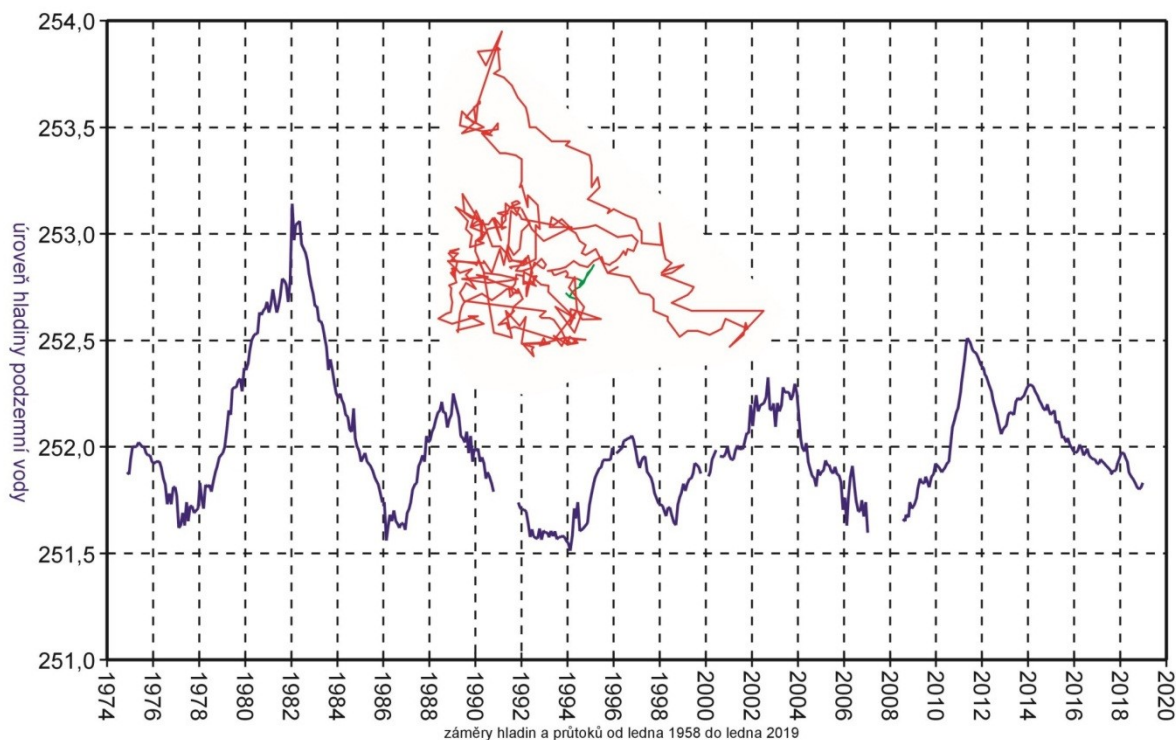
Obr. 3: Předloha



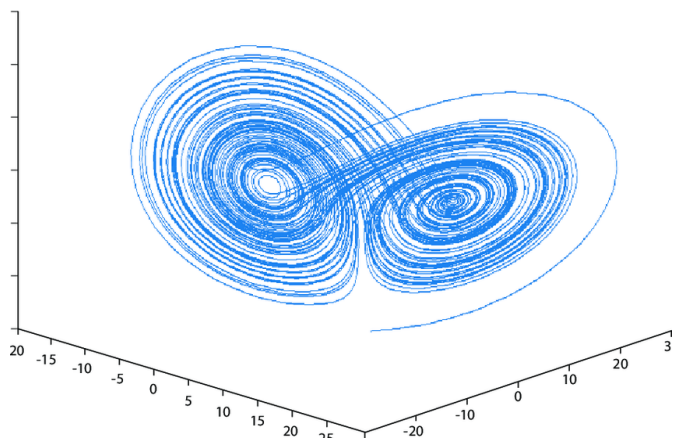
Obr. 4: Jiný pohled na předlohu (hodnoty v rastru formátu BMP)

Pokud chaotický systém sledujeme dlouhodobě tak zjistíme, že ze všech možných stavů nabývá sledovaná veličina pouze omezenou množinou hodnot a bývá zdánlivě periodická. Jak už v šedesátých letech odvodil z chování počasí Edward Lorenz, chaotické křivky (nebo objekty v 3D) bývají tzv. soběpodobné (obr. 5), na rozdíl od deterministických periodických

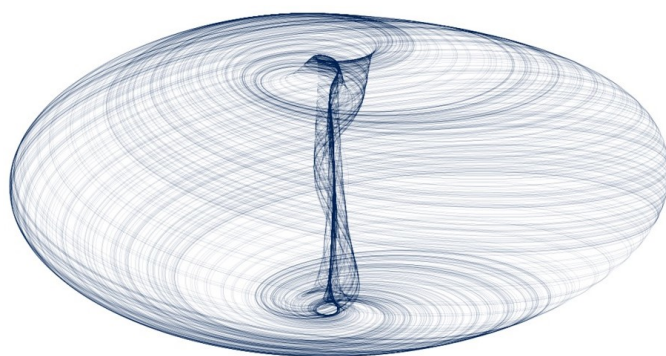
cyklů, kde výsledné křivky sledovaných veličin jsou po čase totožné. A právě soběpodobnost je další charakteristickou vlastností chaotických systémů. Soběpodobnost je například využívaná při dlouhodobých předpovědích počasí (Edward Lorenz byl nejen matematik ale i meteorolog). Pokud průběh aktuálně měřených hodnot počasí odpovídá křivkám známým z dřívějších dob, pak se dá předpokládat, že počasí bude mít obdobný vývoj jako v minulosti. I v našich zeměpisných šířkách předpokládáme, že v červenci nám neumrzou kytky na balkóně. Tak jako deterministické systémy můžeme popsat nějakou funkční závislostí tak i chaotické systémy mají svůj tzv. atraktor (obr. 5, 6 a 7).



Obr. 5: Hydrogram úrovně hladiny podzemní vody v oblasti obce Sosnová a jeho atraktor. Na průběhu hladin je pozorovatelná soběpodobnost (např. v maximech se opakuje zpožděný přítok z Lasvické kry).



Obr. 6: Lorenzův atraktor



Obr. 7: Jiný 3D atraktor

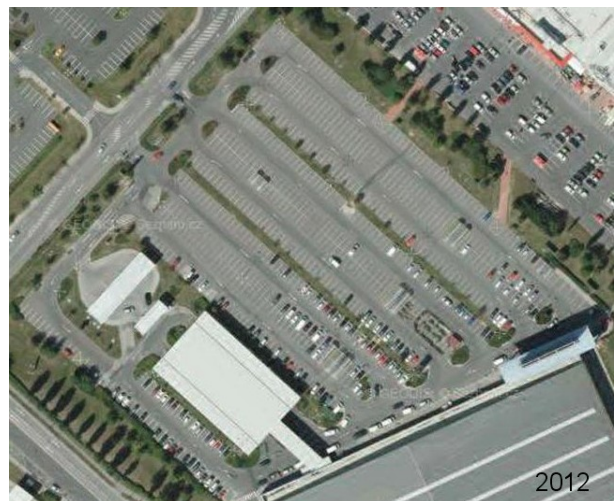
Najít atraktor systému, který vypadá jako chaotický, nemusí být úplně jednoduché. Zkoumané systémy mohou být i vícerozměrné a tak i atraktory jsou definovány nejenom jako křivky v ploše ale i jako vícerozměrné řezy vícerozměrným prostorem např. 3D povrchem 4D tělesa v 6D prostoru (pro běžnou populaci šílená představa ale pro matematiky všední záležitost). Pokud pro systém, který se chová zdánlivě náhodně, se nám podaří vytvořit atraktor, pak je

tento systém chaotický (deterministicky chaotický). Charakteristickou vlastností chaotických systému je, že probíhají částečně v cyklech. Na rozdíl od klasických cyklických systémů (pohyb pístu v motoru), kde atraktor tvoří jedna uzavřená křivka, tak křivka atraktoru chaotických systémů uzavřená nemusí být (obr. 6). Přesto pomocí vytvořeného atraktoru můžeme s určitou přesností predikovat vývoj chaotickému systému do budoucna.

Stochastické (náhodné) systémy.

Pokud dimenze prostoru, ve které hledáme atraktor, překročí číslo cca 7 tak zkoumaný jev zařazujeme do skupiny jevů stochastických (náhodných). V těchto případech není možné určit atraktor jen proto, že to není v možnostech našeho chápání. U stochastických jevů si zatím musíme vystačit se statistikou. Klasickým příkladem je ruleta nebo hod kostkou. Pokud bychom dokázali s dostatečnou přesností definovat všechny parametry rulety, vhození kuličky nebo hození kostky pak by nám mělo padat pořád stejné číslo. Z praxe ale každý víme, že tento požadavek je nespílitelný. Jak stochastické, tak nelineární dynamické systémy můžeme zkoumat statisticky. Například statistickým popisem částic se zabývá kvantová teorie. Statistickým popisem chaotických systémů však ztrácíme informace o jejich podstatě. Jako příklad mohu prezentovat náhled na parkoviště u Makra v Čestlicích v letech 2006 až 2017 na obr. 8.

Pokud se zaměříme na parkovací stání a pozorování popíšeme statisticky tak dospějeme k závěru, že jednotlivá parkovací stání mění barvu (statisticky lze například dopočítat nejčastější barvu aut v okolí Makra) a že těžiště chuchvalce s maximální změnou barev (asfalt bude pořád šedej) je blízko vchodu do obchodního domu (většina lidí je líná chodit). Z našeho pozorování vůbec nejsme schopni určit, že rodina např. Novákových vyrazila ten den na nákup, který plánovala už několik dní dopředu a zrovna zaparkovala svoje auto v místě, které sledujeme. Pokud bychom znali barvy aut lidí jezdících do nákupního centra, jejich plány a místa kde nejraději parkují apod., tak budeme mít možnost dopočítat do budoucna i tvar chuchvalce parkujících automobilů a barvy jednotlivých stání na parkovišti. Mít tyto znalosti je však nereálné. Obdobou uvedeného příkladu je i částicová fyzika. Slovo do pranice, nejsou náhodou elektronové orbitály vlastně jen taková parkoviště u vchodu do obchodního centra? Nemohou mít i částice svoje „zrození, život a smrt“?



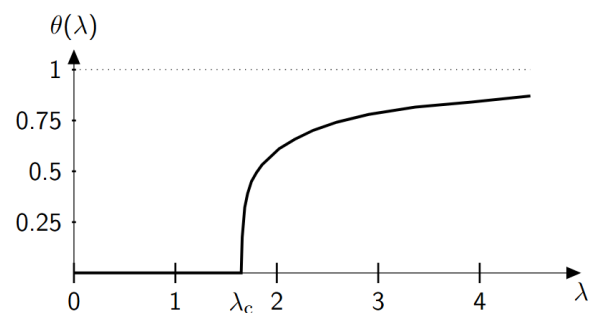


Obr. 8: Náhledy na parkoviště (mapy.cz)

V praxi ale máme daleko jednodušší stochastické systémy, než je parkoviště u obchodního domu. I tyto systémy lze podrobně matematicky popsat a definovat v nich například fázovou rovnováhu (obr. 9 a 10). V prezentovaném Voter modelu se každý bod přebarví podle toho, jaká barva převažuje v jeho okolí (model voleb, šíření chorob, rozmnožování rostlin apod.). Procento černě obarvených bodů je pak závislé na stanoveném limitním poměru černých a bílých v nejbližším okolí (\square) při kterém se přebarví každý bod na černo. V praxi (stejně jako v případě pohybu aut u nákupního střediska) však nikdy nemůžeme změřit parametry okolí pro všechny body (voliče, trsy rostlin).

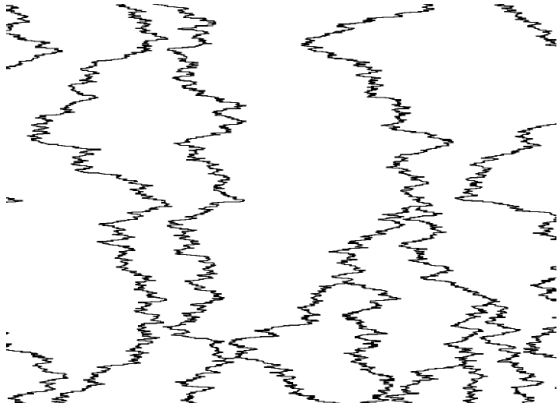


Obr. 9: Voter model (modelace stochastického dynamického systému)

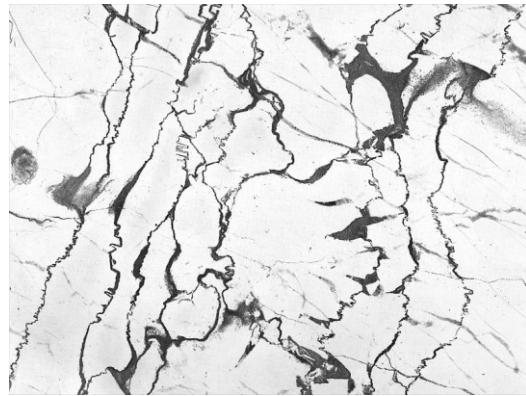


Obr. 10: Fázový diagram závislosti na nastavení vnitřních parametrů systému

Obdobné matematické modely zkoumající podstatu např. Braunova pohybu lze v přírodních vědách použít i k modelování tlakově metamorfovaných vápenců na mramory (obr. 11 a 12).



Obr. 11: Simulace Brownova pohybu

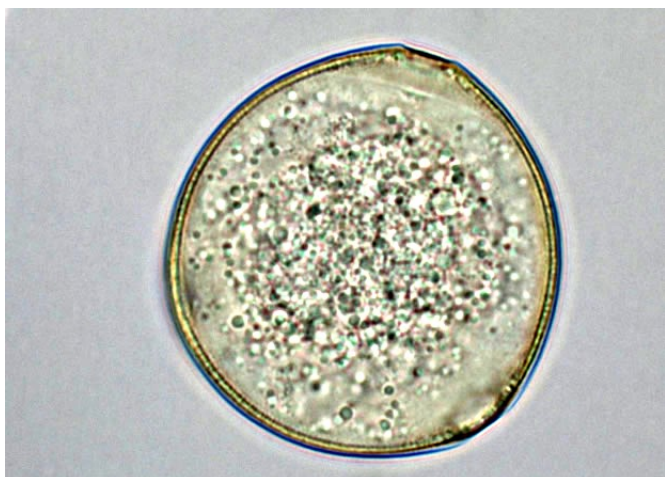


Obr. 12: Mramor

Příčiny vnímání chaosu.

My lidé vnímáme prostor ve třech rozměrech (3D). Definujeme-li si v něm souřadný systém. Polohu každého bodu vzhledem k počátku tohoto souřadného systému jednoznačně určují právě tři souřadnice. Hmota je v obecné teorii relativity to, čemu lze reálně přiřadit nenulovou hmotnost. Veškerá tato hmota, tj. veškeré objekty, které vidíme a které pro nás mohou představovat bariéru v pohybu a kterými nemůžeme bez povšimnutí prostoupit, musí být 3D a mít povrch tvořený 2D uzavřenou plochou. Objekty pouze dvourozměrné (2D neuzavřené plochy) nebo jednorozměrné (1D křivky), které vůči nám jsou v klidu nebo v pohybu, nevidíme a můžeme jimi bez povšimnutí prostoupit. Proto pohybovou bariéru pro nás nepředstavují (např. list papíru ale není 2D objekt, nemá nulovou tloušťku).

Objekty neživé či živé můžeme rozčlenit podle toho, jaké prostorové směry jsou z hlediska jejich pohybu odlišné od ostatních. U živých organismů je pak zásadní otázka kolika rozměrný podprostor skutečně vnímají a orientují se v něm. Organismy vnímající čtyři prostorové souřadnice neznáme a ani o nich nemůžeme vědět. Známe ale organismy vnímající méně rozměrů než my. Bakterie a primitivní buňky (obr. 14) vnímají pouze jeden směr prostoru (myšlena jejich vědomá orientace v prostoru, ne automatické reflexivní reakce těla), vzhledem k jejich tělu radiální (pozorováno chování nálevníka na katedře biologie PřF UK). Poznají, když je něco ovlivňuje, ale nedokáží určit směr odkud je na ně působeno. Podle přímých pozorování (obr. 15) vnímají rostliny pouze dva prostorové rozměry. Výšku (směr růstu) a směr ke směru jejich růstu kolmý. Nasvědčuje tomu i jejich stavba těla. Pak rostlina nijak netrpí tím, že se nemůže pohybovat v 3D prostoru, protože o něm neví (tak jako neví o drátu NN, i když se s ním musela prokazatelně několikrát setkat). Je tedy důležité si uvědomit, že je třeba rozlišovat dvě věci: jednak co je (co může být) a jednak co z toho a jsme schopni vnímat (a jak). Naše vnímání proto nelze brát jako jedinou možnou interpretaci okolí. Pokud něco nevnímáme, neznamená to, že to neexistuje. To samé ovšem platí nejenom ve fyzice ale i například pro státní správu (vliv šedé ekonomiky, kriminálního podsvětí apod.). Původ všech fyzikálních dějů také často nelze tedy odvodit pouze z našich vjemů v našem 3D prostoru. Proto nesmíme zapomínat na to, že my jsme pozorovatelem a naše vnímání může představovat určitou transformaci toho, co se skutečně děje.

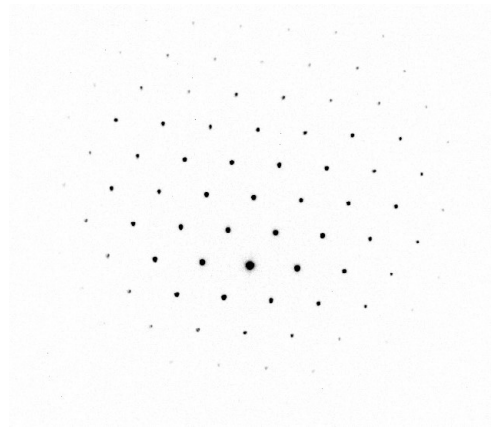


Obr. 14: Nálevník

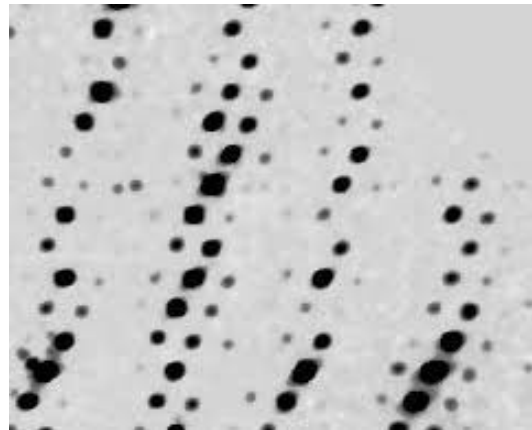


Obr. 15: Smrk zasahující do vedení NN

V dávných dobách lidé věřili, že Země je plochá. Dnes nám již připadá předkoperníkovská představa ploché a konečné Země zcela bláhová a nelogická. Ještě nedávno se učilo, že pohyb vesmírných těles lze popsat jako pohyb v euklidovském prostoru vesmíru. Pak koncept obecné teorie relativity Alberta Einsteina nevyhnutně dokázal zakřivenost 4D časoprostoru. Euklidovský 4D časoprostor v celém rozsahu se při rozlehlosti našeho vesmíru ukázal jako stejná bláhovost co byla představa ploché Země. I z tohoto pohledu náš 3D prostor je zakřivený a tedy uzavřený a uzavírá nějaký 4D prostor. Pokud je podle teorie relativity tento 4D prostor zakřivený pak opět uzavírá 5D prostor (Podle Riemanova postulátu, volně cituji „Pokud je prostor zakřivený tak není nekonečný a je tedy uzavřený“). Představa, že svět kolem nás má 4 rozměry a více, se mnoha lidem může zdát absurdní. Přece vidíme jen 3 rozměry, na které si můžeme sáhnout. Mnozí současní fyzikové si o teorii relativity doposud myslí, že to je jen matematická hříčka umožňující se vypořádat s anomáliemi v pohybu těles v gravitačním poli. Jenže například v krystalografii se vyskytují tzv. modulované struktury krystalů (obr. 16 a 17), řešitelné právě zavedením 4D nebo dokonce 5D prostoru. Modulace je vlastně odvozena z průmětu reciprokého prostoru (získaného RTG nebo elektronovou difrakcí) ve 4D nebo 5D do našeho 3D prostoru. Nejsou to struktury nějakých obskurních látek typu kryptonitu ale obyčejných oxidů železa nebo uhlíčitanu sodného. Obdobně si musíme v praktickém životě uvědomit, že na nás působí nejen podněty, které vnímáme přímo, ale i podněty působící přes pro nás neviditelné „vyšší dimenze“. Například už císař František Josef II si stěžoval, že lidi se nechtějí řídit jeho zákony, co vymyslel (už v té době se zákony běžně obcházely). Pokud vnucený lidský zákon nezohledňuje zákony přirozené, podmíněné místním prostředím, pak je obcházen jinými pro úředníky státního aparátu neviditelnými dimenzemi (politika, šedá ekonomika, kriminální podsvětí). Výsledkem nekvalitního systému zákonů umožňující nekvalitní práci úředníků je v současné době například i nedostatek vody v krajině nebo zaklesávání hladin podzemních vod.



Obr. 16: Klasická elektronová difrakce



Obr. 17: Modulovaná struktura (zvětšeno)

Navíc chování chaotických systému je ovlivněno entropií. Obecně platí zákon, že entropie systému se samovolně zvyšuje (nevím jak pro 5D systém ale pro 3D systémy se jedná o ověřený zákon). Proto stále více procesů ve vesmíru a tedy i na naší zemi má chaotické chování. Chaos ale nesmíme zaměňovat za rozpad (zmatek). Snižování entropie na straně jedné tj. vznikem vyšších organizovaných skupin se zvyšuje entropie ve zbytku prostoru. Působením chaosu a entropie došlo k vytváření prvků, vzniku slunečních soustav a nakonec země. Na ní téměř hned po jejím vzniku začal za pomoci chaotického chování (ne náhody) vznikat život. Živé organismy potřebují k životu stabilní prostředí i volnost pohybu a vývoje. Proto vznik života tak jak ho známe, neumožňuje pouze deterministické nebo stochastické chování ale pouze chaos. Počáteční koncepce fraktálu (viz další kapitola) jako chaotické struktury úspěšné u neživé hmoty byla nahrazena systémem mnohobuněčných geometricky neuspořádaných organismů (fraktální organismy viz fauna Ediakara, obr. 18 a 19). Vývojem mnohobuněčných organismů se sice organizovanost hmoty zvyšuje (snižuje entropie) ale na druhou stranu se zvyšuje entropie celého systému na Zemi způsobeného existencí rozvinutých živých tvorů.



Obr. 18: Fauna Ediakara (před 600 mil. let)



Obr. 19: Živočich Charnia

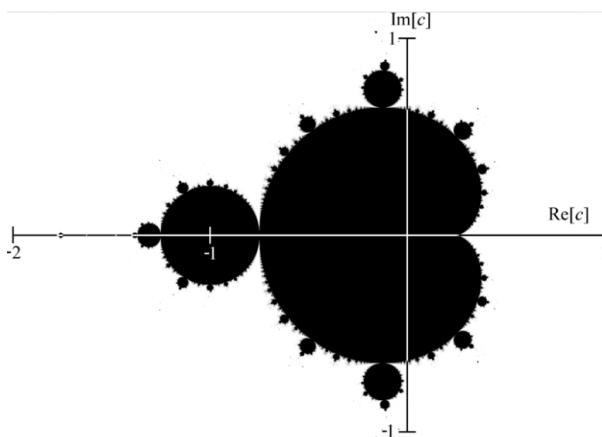
V současnosti v naší technické civilizaci snižujeme entropii na zemi budováním movitých a nemovitých objektů. To má za následek zvyšování chaosu v celém systému současné civilizace. Chaotický vývoj a zvyšování entropie je motorem naší společnosti. Důkaz je v každé učebnici dějepisu nebo v muzeu. Jaký majetek měli naši předkové a jak se jim tenkrát žilo? K vývoji jsme tlačeni tokem času. Proto není cesty zpět. Snaha měnit nebo usměřňovat vývoj civilizace opět naráží na problém chaosu a entropie. Snaha o řízení lidí umělými zásahy zvenčí, nerespektující přirozený stav, zvyšuje chaos v jiných oblastech lidské činnosti, které

nejsou tímto zásahem usměrňovány. Jedná se o dobu ledničky nebo klimatizačních zařízení. Pokud na jedné straně chaos (entropii) snižujeme (výparník nebo klimatizovaná místnost) pak musí existovat místo, kde je chaos zvyšován. Klasickým případem je zemědělství, modré zóny případně nucená inkluze ve školství. Popsaný jev je také patrný ve stavu České praktické geologie a hydrogeologie. Nadbytečným deterministickým svazováním praxe geologů a hydrogeologů na straně jedné byl vypuštěn džin z láhve v podobě divokých a všehoschopných vrtářů. Bude trvat hodně dlouho, než se stav způsobený prací MŽP v dřívějších letech (devadesátá léta až cca 2015) stabilizuje v nějakém rozumném atraktoru.

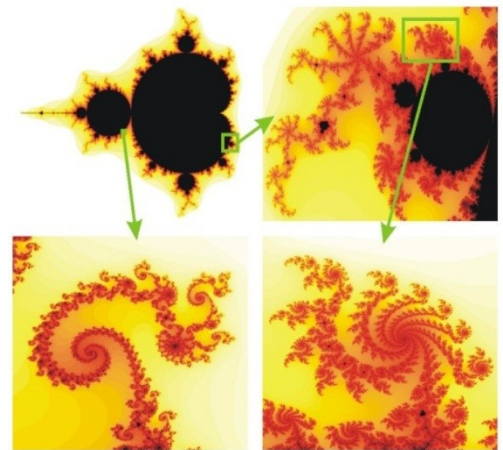
Využití chaosu v praxi.

Klasickou ukázkou nelineárního dynamického systému je Mandelbrotova množina. Základním matematickým vztahem v oboru komplexních čísel je: $z_{n+1} = z_n^2 + c$

Body v ploše jsou obarvovány černě, bíle nebo barevně na základě specifických vlastností při iteraci podle výše uvedeného vztahu. Výsledný obrazec, který dostaneme aplikací uvedeného předpisu je na obr. 20. Poměrně jednoduchý předpis vytváří složité struktury (obr. 21). Pokud si strukturu dobře prohlédnete, tak je na ní možné pozorovat základní charakteristiky chaotických systémů. Jednotlivé motivy struktury se opakují a jsou soběpodobné. Na podkladě matematického zkoumání těchto struktur vznikla disciplína zabývající se technikou vytváření fraktálů (obr. 22). Fraktálové objekty se využívají například ve filmovém a herním průmyslu a mají velmi blízko k chování reálných přírodních systémů (obr. 23).



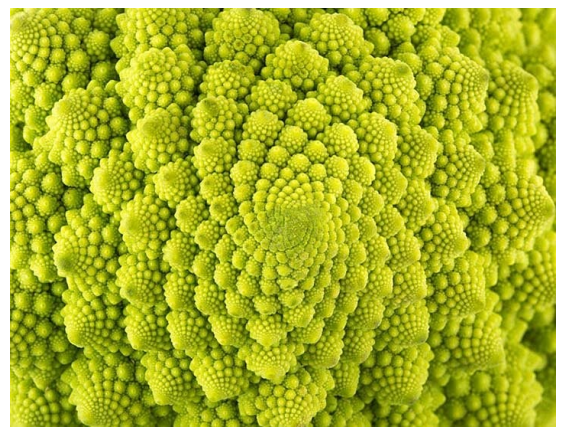
Obr. 20: Mandelbrotova množina



Obr. 21: Mandelbrotova množina a její výřezy

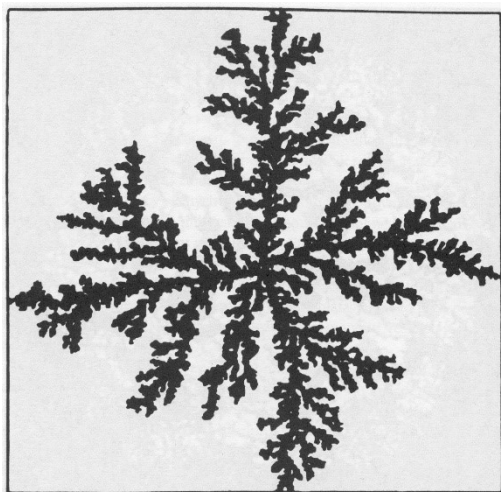


Obr. 22: Klasická fraktálová krajina



Obr. 23: Je to fraktál nebo jídlo? (Brokolice)

Chaos není jenom hříčka matematiků nebo služebníkem k vytváření filmových efektů vysoko nákladových Hollywoodských filmů ale taky základ našeho světa. Právě v geologii a hlavně v mineralogii a geochemii má teorie nelineárních dynamických systémů svoje zastoupení. Mnohé struktury hornin a minerálů jsou strukturami fraktálními (obr 24 až 27). Pomocí fraktálu a chaosu můžeme studovat i chování bakterií a virů nebo systémů dravec a kořist.



Obr. 24: Fraktálový model



Obr. 25: Realita (minerál manganu)

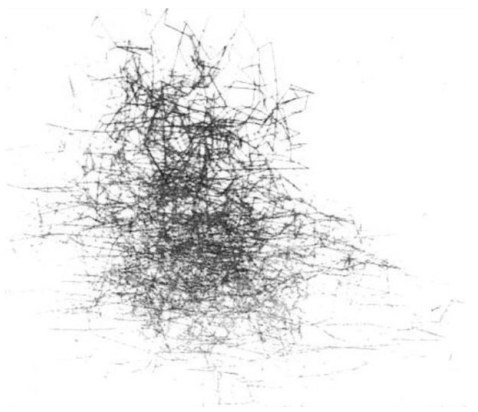


Obr. 26: Fraktálový model

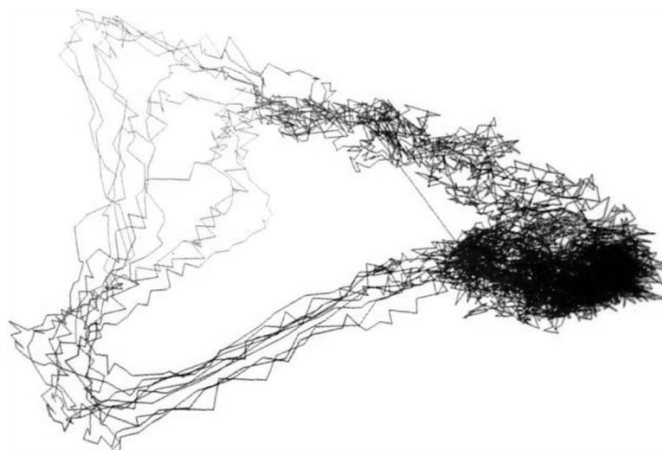


Obr. 27: Realita (ametyst)

Už od narození vlastníme základní regulátor chaosu kolem nás, který také pracuje na chaotickém principu. Je jím náš mozek. Chaos je nám proto přirozený, jen si to v rozvinuté technickoprůmyslové civilizaci přestáváme uvědomovat. Změna chaosu v části mozku na deterministický cyklus je příčinou nemoci známou jako epileptický záchvat (obr. 28 a 29). Obdobou lidského mozku je počítač. Pokud jste někdy někdo monitoroval hlavní datovou sběrnici počítače (já s tím skončil u procesorů 386), tak víte, že ten chaos čísel (ne zmatek, čísla mají svůj vnitřní řád) je na ní nepředstavitelný. Ve svém prvním zaměstnání (Mikrotechna Modřany) jsme testovali generátory náhodných čísel. V počítači co jsme používali (v té době na bázi procesoru Intel 8080) byl instalován software generující náhodná čísla z počtu bytů v operacích za jednotku času. Pokud generátor náhodných čísel generuje čísla opravdu náhodně, pak počet sudých a lichých čísel musí být za dostatečný čas v poměru 1:1. No u počítačových generátorů náhodných čísel to rozhodně poměr 1:1 není (optimálního poměru se nedalo dosáhnout ani na generátorech založených na tepelném šumu, a pak že se na pozadí naší existence nic neděje). I když to z dat na sběrnici není poznat tak přesto počítač reaguje deterministicky a jen vykonává instrukce, co jsme mu zadali. Pokud dojde na sběrnici k zacyklení (obdoba epilepsie), pak proces přestane fungovat a počítač (systém) „spadne“.



Obr. 28: Atraktor EEG v klidovém stavu

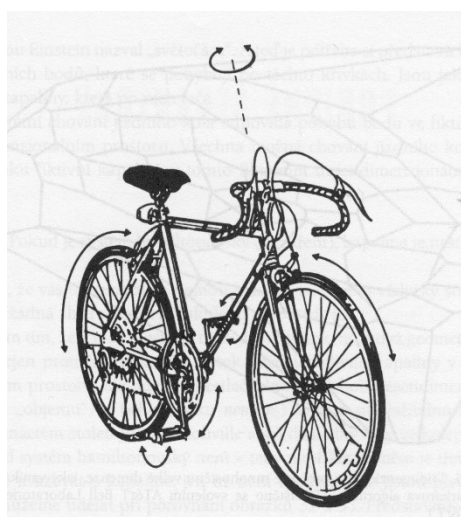


Obr. 29: Atraktor EEG epileptického záchvatu

V životě se už od narození (prakticky od prenatálního stavu) podvědomě učíme reagovat na chaos kolem nás, do té míry, že nám život tak chaotický ani nepřipadá. Tím podstatným pro život v chaosu je učení a naše schopnost improvizace. Jako příklad uvedu jízdu zatáčkou na kole nebo motorce (obr. 30 a 31). Z vlastní zkušenosti každý ví, že kolo nebo motorku je potřeba pro bezpečné projetí zatáčky dobře naklopit. Každá zatáčka a rychlost pohybu potřebuje trochu jiné naklopení stroje. K tomu se přiřazuje kvalita povrchu a další překážky v zatáčce. Systém se tak stává chaotický a je citlivější na změny čím rychleji jedeme. Zkuste si představit situaci, kdyby vyhláška o silničním provozu deterministicky předpisovala naklopení stroje vzhledem k poloměru zatáčky a rychlosti pohybu. Jakou by asi měl cyklista nebo motorkář pravděpodobnost, že zatáčkou projede? Při učení jízdy na kole se v zatáčkách každý musel několikrát vysekat, než se je naučil projet. V hlavě jsme si tak vytvořili cit (atraktor) pro projetí zatáčky.



Obr. 30: Průjezd zatáčkou

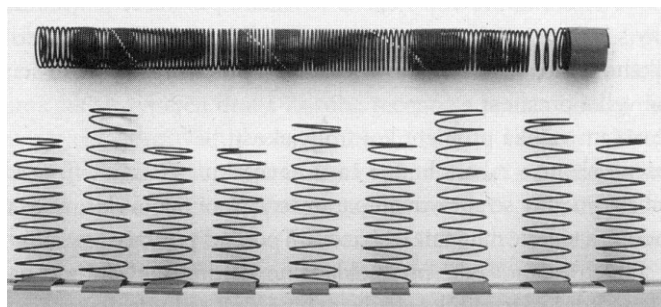


Obr. 31: Volnosti pohybu řízeného kola

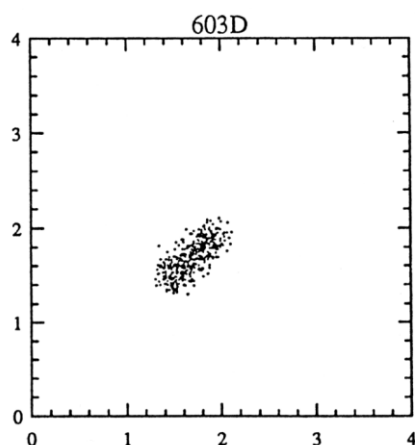
Znalosti řízení chaotických systémů se ve světě využívá i průmyslově. Učebnicovým příkladem je zařízení na měření kvality drátů určených k navíjení pružin. Zařízení Fracmat (obr. 32, rok 1995) na podkladě analýzy chaosu dokáže stanovit vhodnost měřeného drátu k navíjení pružin (obr. 33, 34 a 35). Podle publikace ušetří zařízení výrobcům pružin 50 milionů EU ročně.



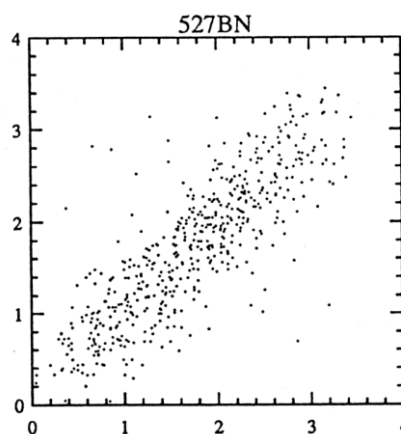
Obr. 32: Zařízení Fracmat



Obr. 33: Navinutá zkušební pružina



Obr. 34: Atraktor kvalitního drátu

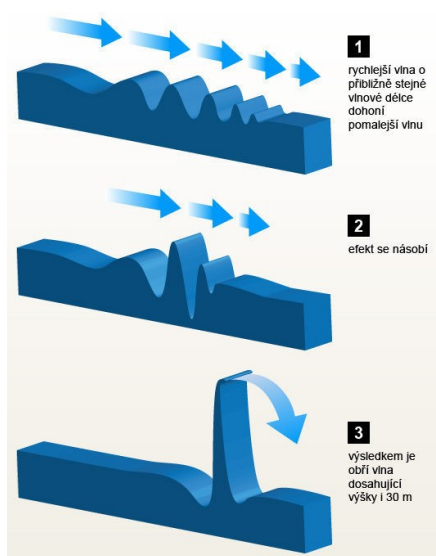


Obr. 35: Atraktor nekvalitního drátu

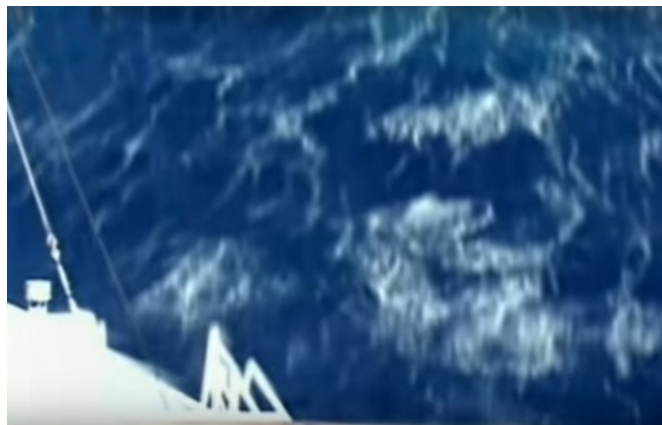
Dalšími učebnicovými příklady jsou využití atraktorů srdečního tepu pro řízení kardiostimulátorů nebo systém generování elektrických pulzů pro potlačení projevů epilepsie. Principy chaosu v řízení procesů se hojně využívá i v kosmonautice. Jako první se tyto principy používaly pro sledování stability dráhy letu družic na oběžné dráze. Nebylo možné, aby v počátcích kosmonautiky Rusové nebo Američané sledovali družici po celé dráze letu. Pokud ale družice prolétala nad jedním místem v totožné výšce při stejné rychlosti, pak měla uzavřený atraktor a její let byl tím pádem cyklický. Jak se pohybovala na jiných místech trajektorie, bylo v té době úplně jedno. V roce 1985 bylo chaotické řízení použito k navedení „mrtvé“ sondy ISEE3/ICE z oblasti oběžné dráhy kolem země k blízkosti komety Giacobini - Zinner. Korekce dráhy fungovala na principu pohybu tří těles v gravitačním poli, který je v principu chaotický (obr. 2). Dráha procházející blízko „neutrálního bodu“ mezi Zemí a Měsícem je citlivá na malé změny (obdoba kdy stojíte na kopci a spletete si směr sestupu a pak musíte několik hodin šlapat, než se dostanete k cíli cesty). Několika malými korekcemi dráhy sondy pomocí zbytků paliva se lidem z NASA podařilo sondu řízeně přesunout o 80 milionů kilometrů mimo její původní oběžnou dráhu. Obdobným způsobem (chaos spojený s prakovým efektem gravitace) jsou v současnosti posílány sondy do vzdálených oblastí naší sluneční soustavy.

Protože chaos je charakteristickým chováním podobným cyklickému průběhu, lze u něho očekávat jev zvaný interference. Jedná se o součet účinků jednotlivých „vln“ měřené chaotické veličiny. Klasickým příkladem je interference vln mořských (obr. 36) způsobující tzv. obří vlnu (vlna zabiják, obr. 37). Ještě do nedávna byly obří vlny o výšce až 30 m považovány za nepodložené historky námořníků. Až koncem devadesátých let se tyto vlny podařilo matematicky vysvětlit a na moři detekovat. Obdobně jako mořské vlny se chová i chaos v naší civilizaci. Největší a nejméně známou proměnnou je chování lidí. Každý máme lepší a horší

dny ve svém životě. Někdy naše pozornost je ovlivněna nemocí, nevyspáním nebo prožitým stresem z minulých dní. Někteří lidé navíc bývají pohromáři už od narození. Nehody a kritické situace nebývají způsobené jednou příčinou, ale bývají vyvrcholením souhry drobných pochybení neboli interferencí příčin, která se jinak běžně nazývá souhra okolností.

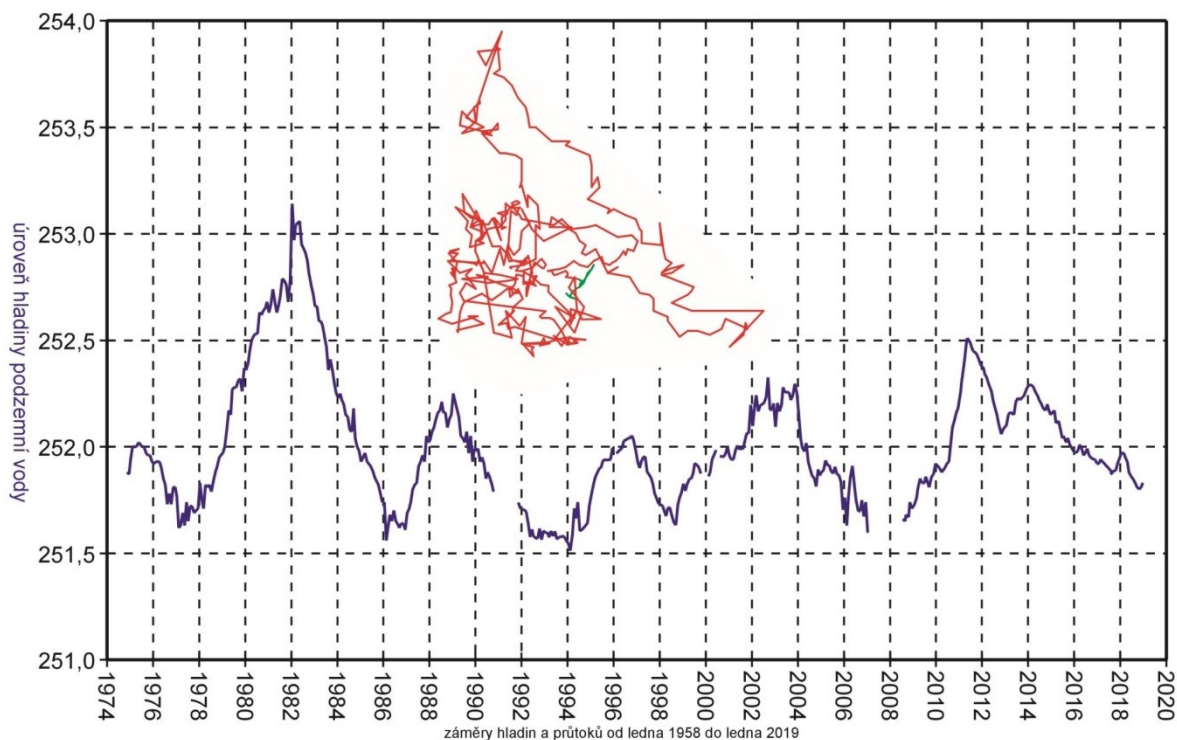


Obr. 36: Vznik obří vlny



Obr. 37: Obří vlna, pohled z můstku trajektu

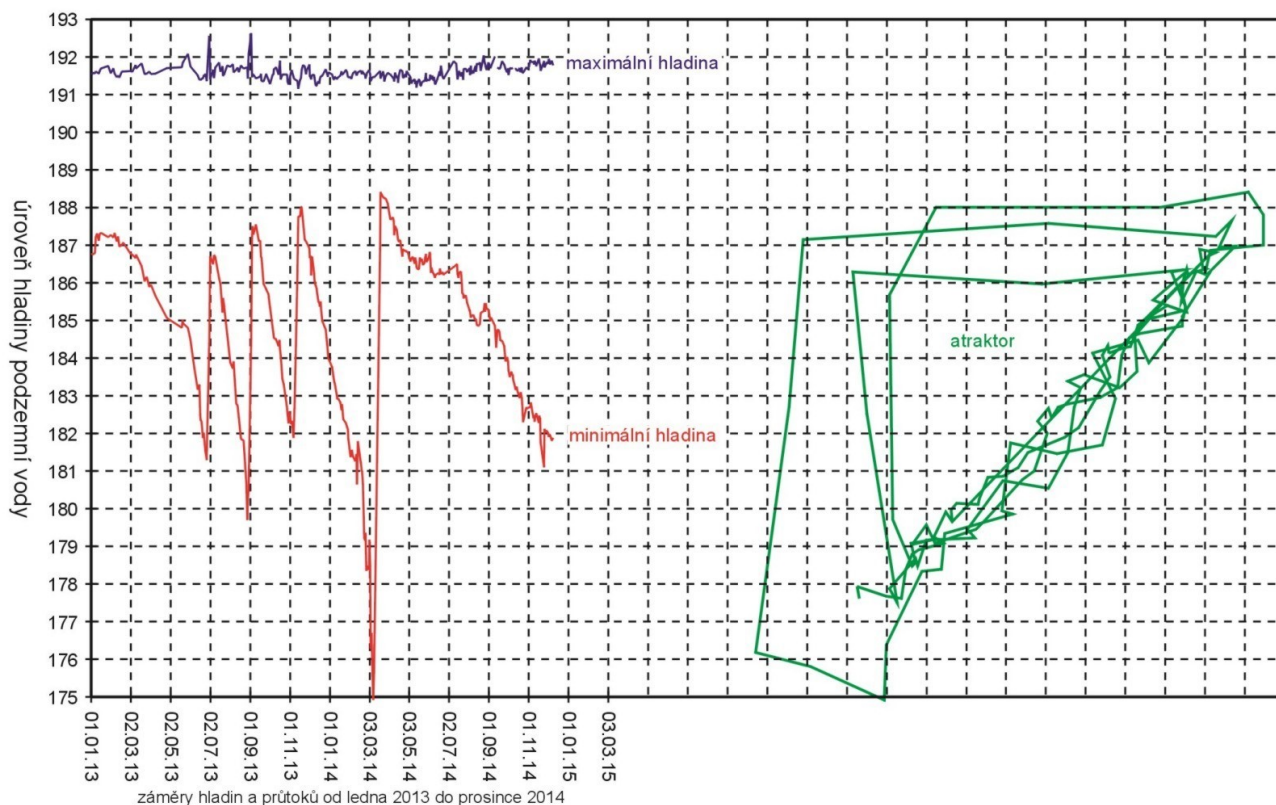
Řízení procesů v hydrogeologické praxi podle zákonitostí chaosu vysvětlím na jednoduchém příkladu. Lomy a pískovny bývají často cílem obvinění, že se lidem ztratila ve studnách nebo v pramenech voda. Co je na tom, že těžba v lomu je na míle vzdálená od vesnice. Všichni přece vědí, že voda se ztratila toho dne, co se v lomu střílelo. Občanům je úplně jedno, že se v lomu střílí každý den (Smrčí u Semil). Všichni obviňují těžbu, ale nikdo si nevšimne, že se voda ztratila, když si ve vesnici jiný občan nechal prohlubovat studnu vrtem, případně si vybudoval systém vrtů pro tepelná čerpadla nebo (případ ve Smrčí) se vydatnost studny snižuje už řadu let. Jen pro úplnost dodám, že jsem i občas dostal nabídky na významnou finanční odměnu za posudek, který určí jako viníka těžebnu (argument – „mohli by nám ve vesnici postavit vodovod, protože na to mají peníze“ – takové lidi okamžitě posílám do ... pííp). Obviňování ze ztráty vody bývá časté v klimaticky suchém období, kdy zdroje podzemní vody jsou vysoce náchylné na zásahy do hydrogeologického kolektoru. Proto těžbařům doporučuji kritické úseky rozšiřování těžby (otevření nového dobývacího prostoru, těžba z vody) nechat na období kdy poroste infiltrace atmosférických srážek do podzemních vod. Vlastně tak využívám soběpodobnost. Jedná se o období dlouhodobých předpovědí počasí ČHMÚ. Když vesnici budou téct povodně a lidé budou mít podmáčené domy tak je absurdní si stěžovat na nedostatek vody. Jak ale takové období zjistím? Na predikci období se zvýšenou infiltrací v oblasti severních Čech dlouhodobě požívám měřené hladiny podzemní vody v oblasti obce Sosnová (obr. 5, ale pro přehlednost ho přenesu do textu v této kapitole jako obr. 38).



Obr. 38: Hydrogram úrovně hladiny podzemní vody v oblasti obce Sosnová a jeho atraktor. Vrchol klimaticky vlhkého období v roce 1982 velmi připomíná interferenční jev z obr. 36.

Tamní hydrologické a geologické podmínky znemožňují negativní vliv lidských zásahů na hladiny podzemní vody (200 m pískovce, mimo vlivu vodárenských odběrů). Z hydrogramu úrovní hladin je zřejmé, že hladiny podzemní vody nabývají omezených hodnot a kolísají v cyklech odpovídajících klimaticky suchým a vlhkým období. Nad hydrogramem (měl by být vedle hydrogramu, ale pak se nevejde na list papíru) je červeně zobrazen jejich atraktor sestavený metodou zmnožení řad. Jedná se o nejjednodušší metodu vytvoření atraktoru. Není sice tak hezký jako složitěji vypočítané atraktory z obr. 6 a 7 a je navíc pouze dvourozměrný (podle zkušeností mnozí lidé mají problémy bez pomocných čar si ve 2D ploše představit 3D objekt) ale pro základní orientaci v problematice stačí. Z vytvořeného atraktoru ve tvaru pavoukovce štírka obecného (*Chelifer cancroides*) je vidět, že se jedná o chaotický systém s vnitřním řádem. Existence „klepet“ dává tušit, že atraktor může být minimálně třírozměrný. Z pozice současného vývoje atraktoru (zeleně) odhaduji, že se nacházíme v oblasti s kritickým vývojem. Proto předpokládám, že v severních Čechách může v nadcházejících letech dojít k povodním (čára atraktoru se blíží do oblasti klepet). To znamená optimální podmínky pro zahájení kritických úseků těžby. Jen malá připomínka. Kdyby si kolegové z ČHMÚ a VÚV TGM udělali z hladin podzemních vod a průtoků z pramenišť získaných z pozorovací sítě atraktory místo analýzy trendů, pak by možná s jejich teoriemi o suchu nebyly tak radikální.

Dalším možným použitím nelineární dynamické analýzy, mimo různé separace klimatických vlivů, je optimalizace regenerací vrtů využívaných jako zdroje podzemní vody. Vodárenské firmy často regenerují vrty deterministicky (jednou za ... roky) bez ohledu na reálný vývoj kolmatační vrstvy. Problémem vodárenských vrtů je, že na hladinách vody ve vrtu se projevuje více vlivů. Jedná se o přirozené klimatické výkyvy hladin podzemních vod, omezení přítoku vody do vrtu vlivem kolmatace jeho pláště a hlavně vliv vodárenských odběrů. Všechny tyto vlivy jsou cyklické (ne periodické) a nabývají omezených hodnot. Výsledný průběh hladin vody ve vrtu daný součtem jednotlivých cyklických vlivů tak musí být chaotický. Pokud máme dostatečnou řadu měřených hodnot, tak vytvořením vícerozměrného atraktoru ze změřených hladin vody ve vrtu je možné separovat jednotlivé vlivy. Ukázka charakteristického průběhu atraktoru na kolmatovaném vrtu je na obr. 39.



Obr. 39: Hydrogram úrovní hladin podzemní vody ve vrtu CJ1A v DP Černuc a jejich atraktor

Bohužel na separování jednotlivých vlivů je potřeba dlouhých časových řad a ty vodárenské organizace většinou nemají k dispozici. Podrobná elektronická měření jsou realizována vzhledem ke klimatickým výkyvům poměrně krátkou dobu a u mnoha vrtů také nebývá kolatační cyklus otázkou několika měsíců. Využití metod nelineární dynamiky je obdobou znalostí „starých provozáků“ z vodárenských společností, kteří už na podkladě dlouholetých zkušeností poznají, kdy je potřeba konkrétní vrt regenerovat. Jenže staří a zkušení lidé odcházejí (důchod apod. další nebudou rozebírat, všechny nás to čeká) a mladí nastupující právě ty dlouholeté zkušenosti nemají. Lze si vypomoci například měřením prezentovaným v minulých letech panem Pastuškem, kde kolmatace vrtu se stanoví výpočtem z hodnot hladin získaných v počátečním průběhu hydrodynamického testu. Ale každý uzná, že získat míru kolmatace horninového pláště z provozních hladin vody ve vrtu, bez nutnosti jeho odstávky a specializovaných měření je z provozního hlediska určitě přívětivější.

Použitá literatura:

ALICE Collaboration: Precision measurement of the mass difference between light nuclei and anti-nuclei. Nature Physics. Vol 11. p 811-814. 2015

Brabec J., Hruža B.: Matematická analýza II. SNTL/ALFA. Praha. 1986

Dvořák L.: Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru. Státní pedagogické nakladatelství Praha. 1984

Einstein A.: The Meaning of Relativity. 5th edition, Princeton. 1955

Einstein A.: The Theory of Relativity and Other Essays. Philosophical Library, Inc. 1950

*Norton J. D.: What is a four dimensional space like? 2014
[www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters_2015_J...Four dimensions.](http://www.pitt.edu/~jdnorton/teaching/HPS_0410/chapters_2015_J...Four_dimensions)*

Rucker R.: The Fourth Dimension. Toward a Geometry of Higher Reality. Dover Publications, Inc. Mineola, New York. 2014

Stewart, I.: Hraje Bůh kostky? Nová matematika chaosu. Argo. Praha. 2009

*Tichánek B.: Ve čtyřrozměrném prostoru. 2015
www.tichanek.cz/kniha/Ve-cytrrozmerem-prostoru-Tichanek.pdf*