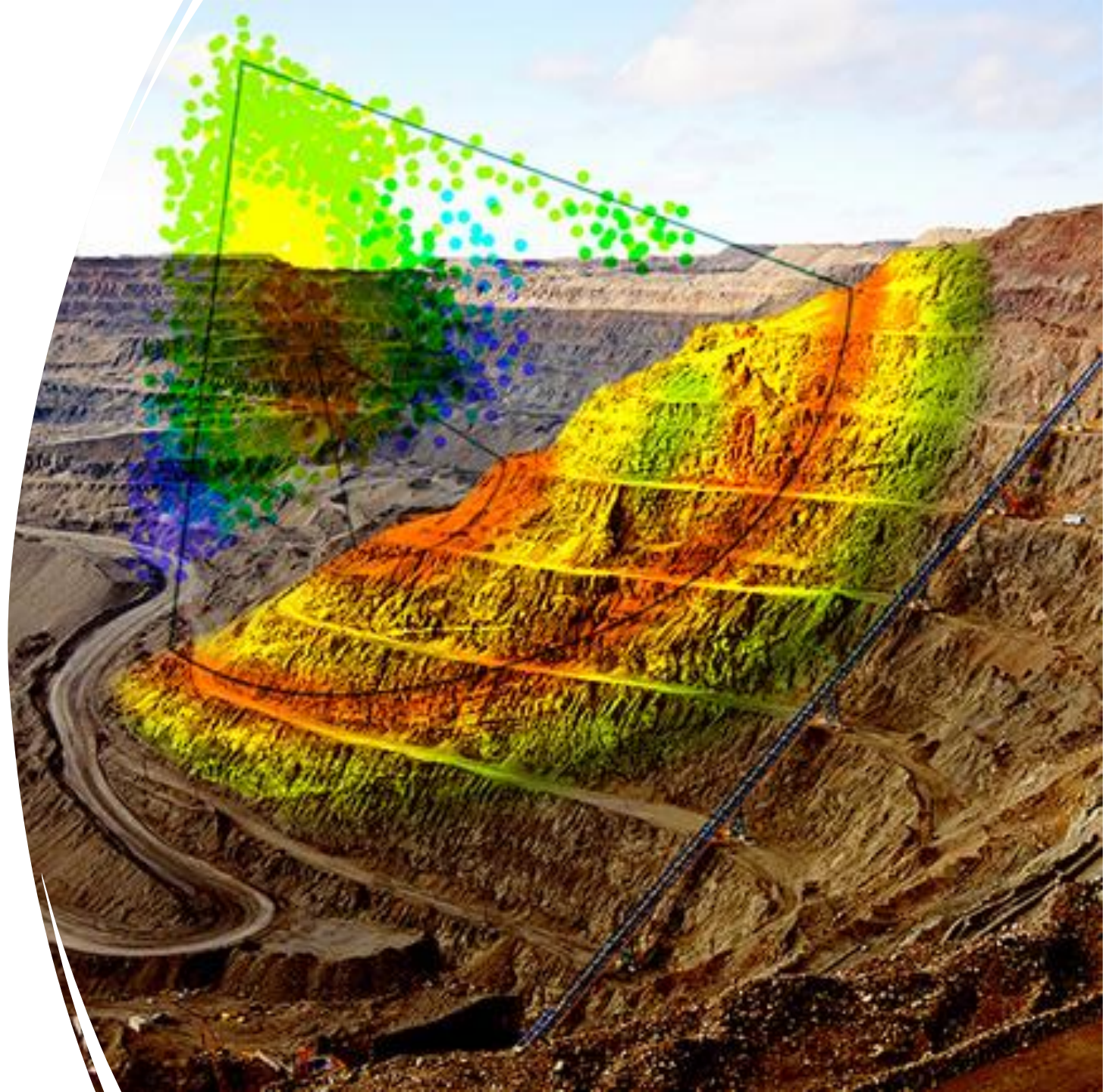
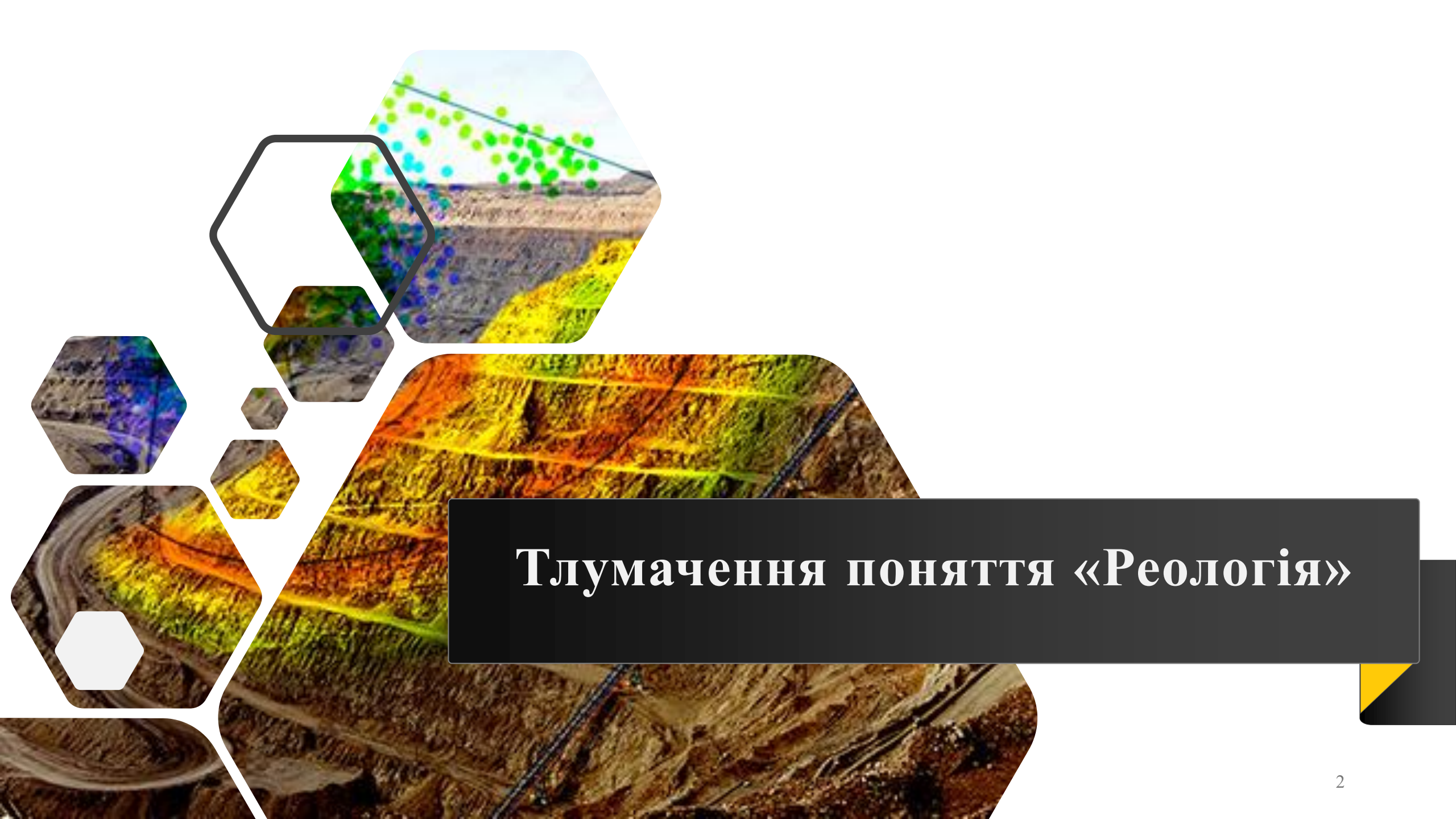


Лекція 2. Реологічні властивості гірських порід

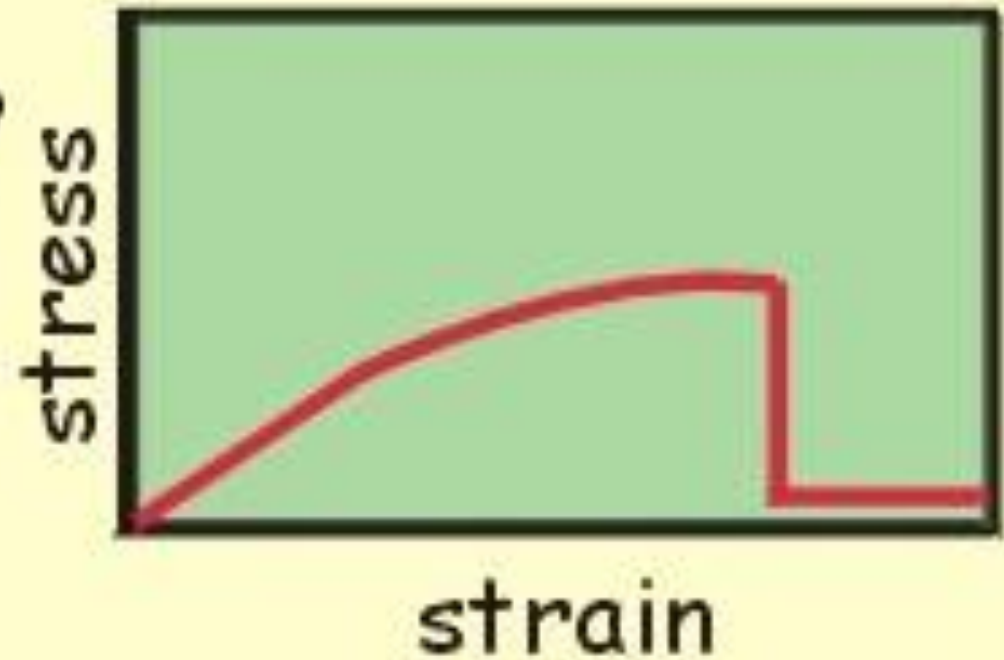
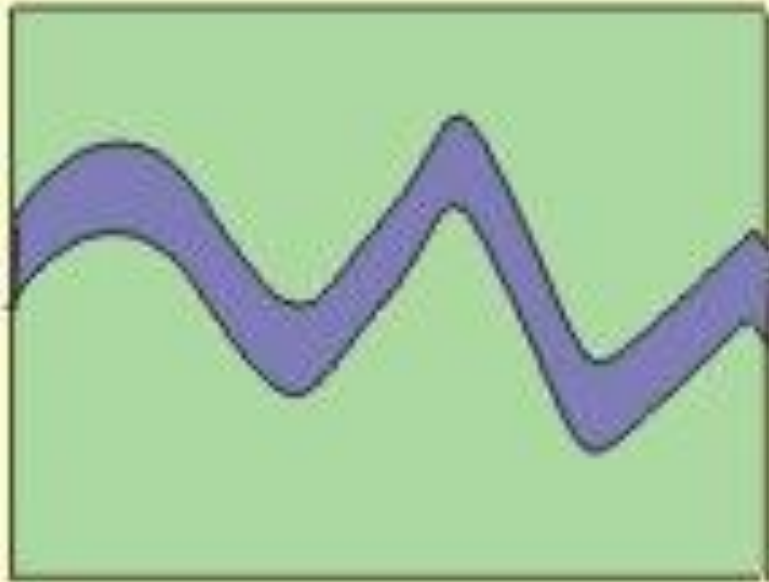
Механіка
гірських
порід



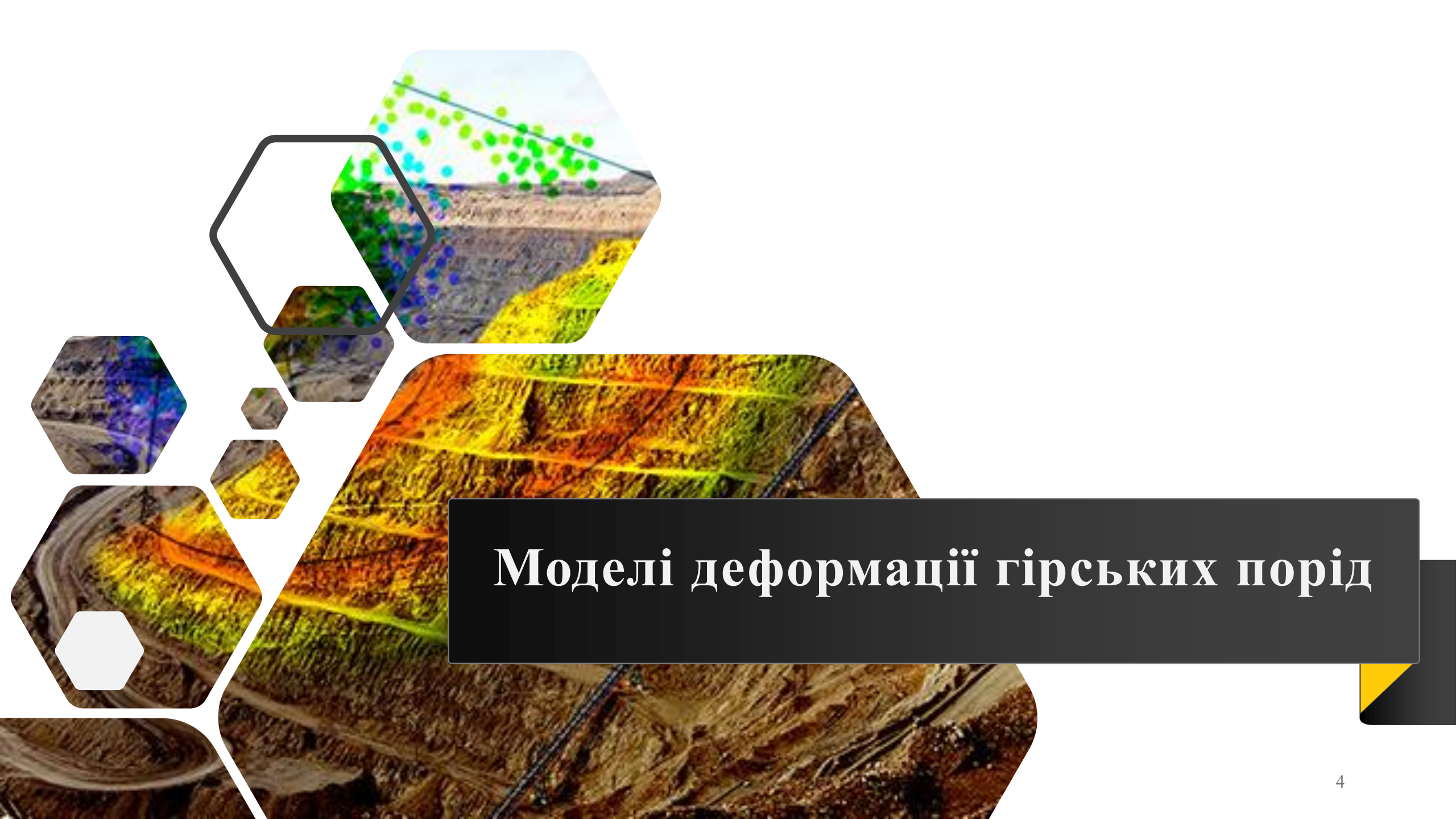


Тлумачення поняття «Реологія»

Rheology



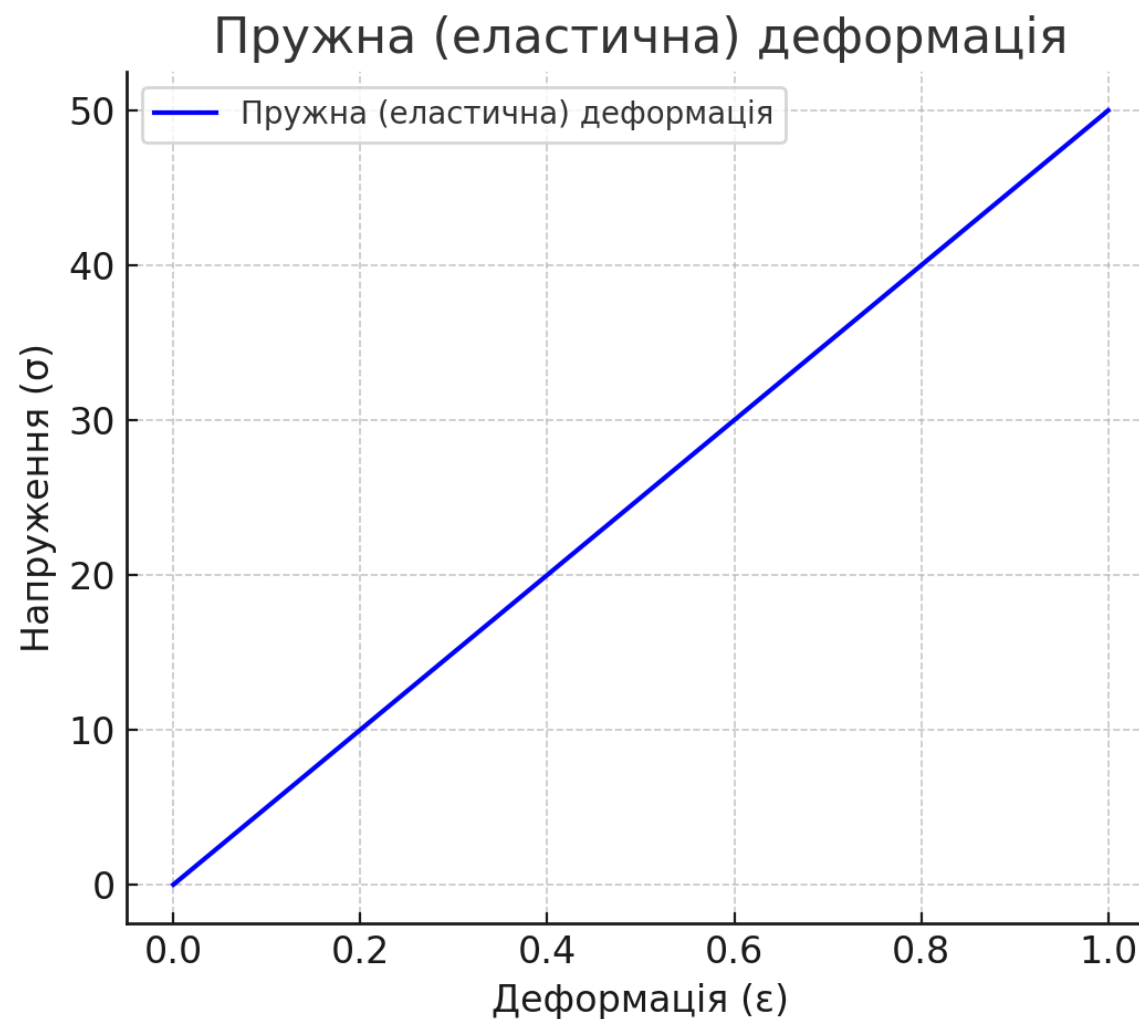
Реологія – це наука, яка вивчає **часозалежні деформації матеріалів**, у тому числі й гірських порід. Деякі породи, які в короткостроковому періоді здаються стабільними, можуть поступово змінювати свою форму, втрачаючи міцність і стійкість. Така повзучість порід може суттєво впливати на експлуатацію гірничих об'єктів, особливо у випадках тривалого функціонування шахт, кар'єрів і відвалів.



Моделі деформації гірських порід

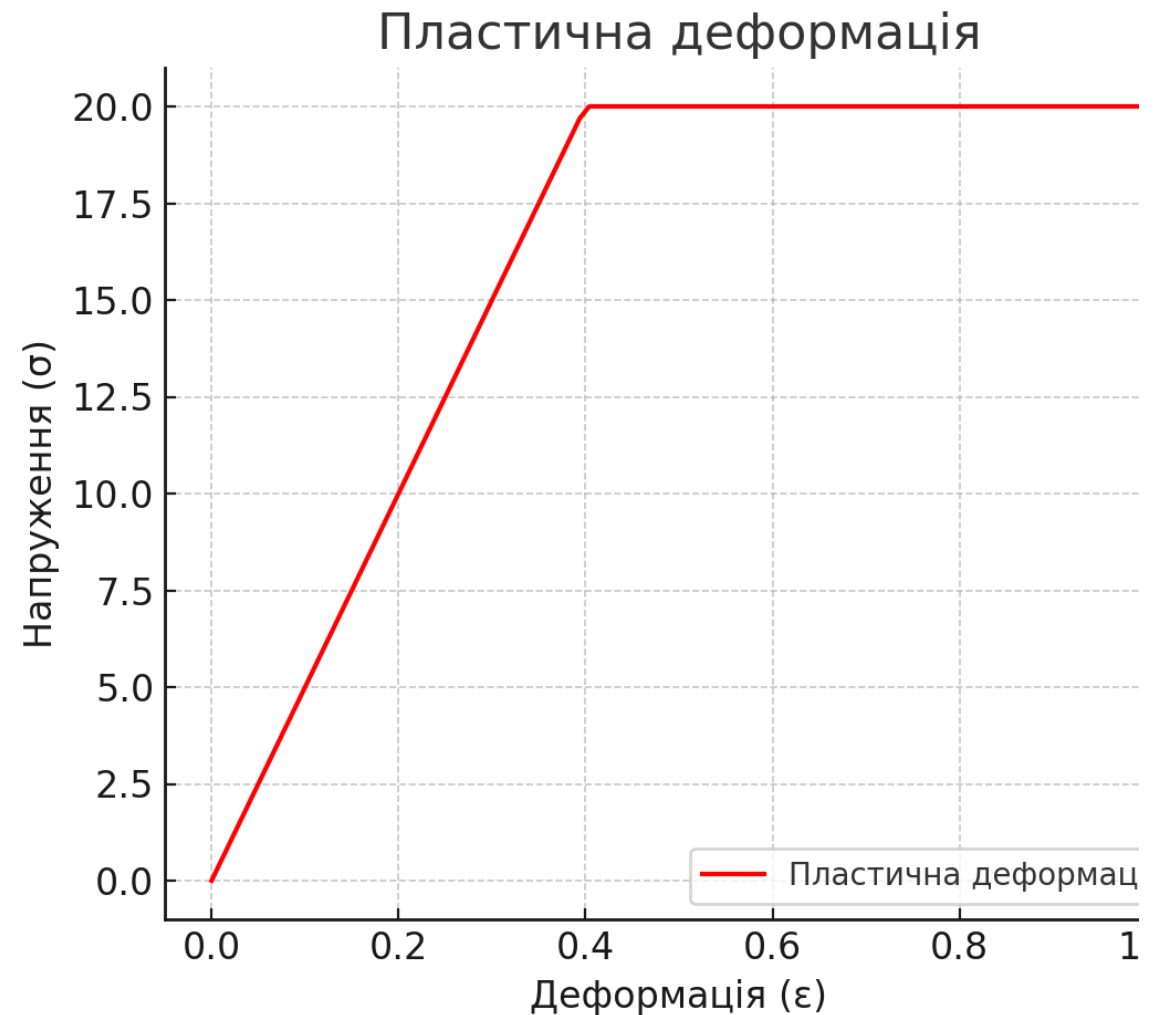
Пружна (еластична) деформація

Пружна деформація – це деформація, яка повністю зникає після зняття навантаження. Матеріал при цьому поводитьься пружно: напруження пропорційні деформаціям, а сама деформація є негайною і повністю оборотною.



Пластична деформація

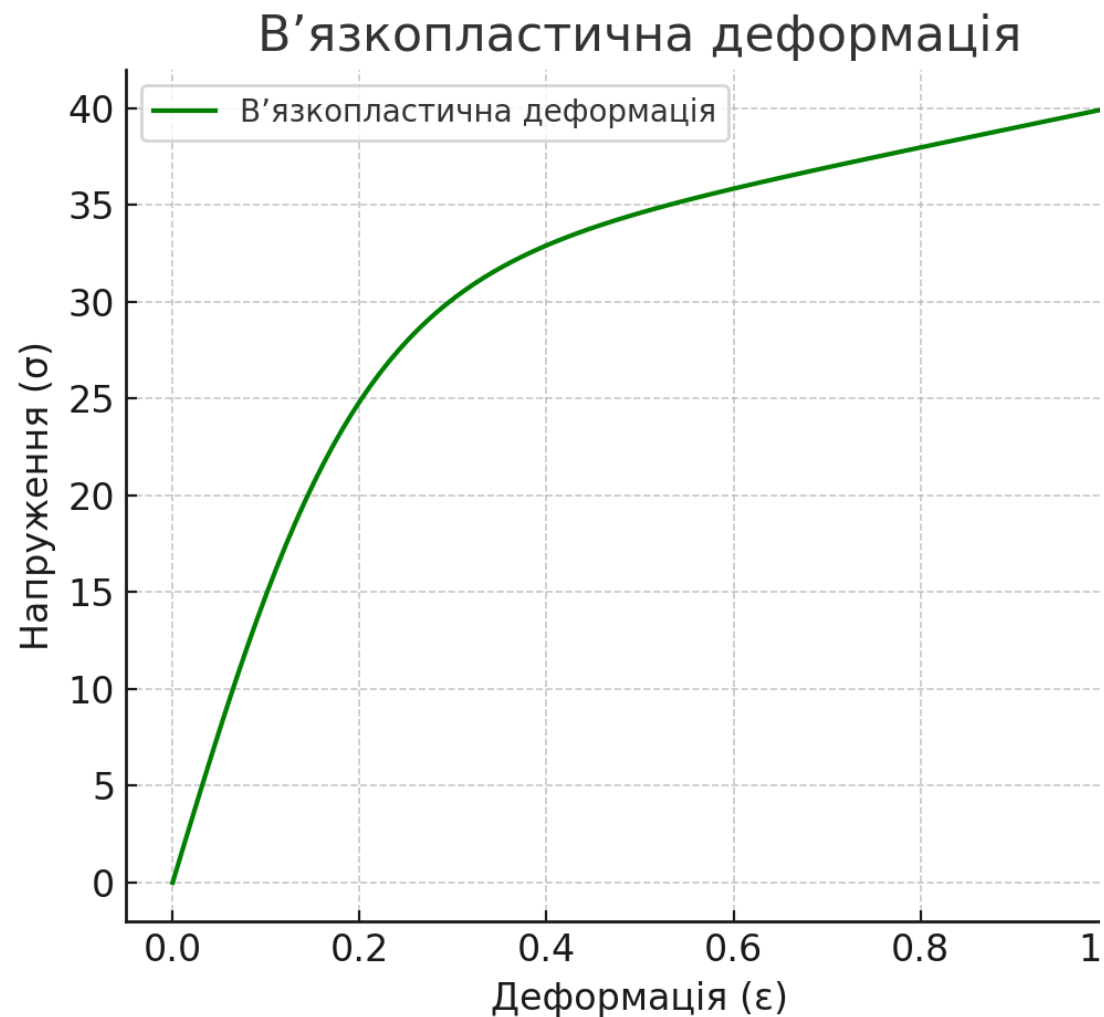
Пластична деформація – це необоротна (залишкова) деформація, яка виникає після перевищення пружної межі міцності породи. Якщо навантаження перевищує границю пружності (або текучості), у породі накопичуються незворотні зміни структури, і після зняття навантаження частина деформації залишається.



В'язкопластична деформація

В'язкопластична деформація – це деформація, що має властивості як *в'язкі* (часозалежні), так і *пластичні* компоненти.

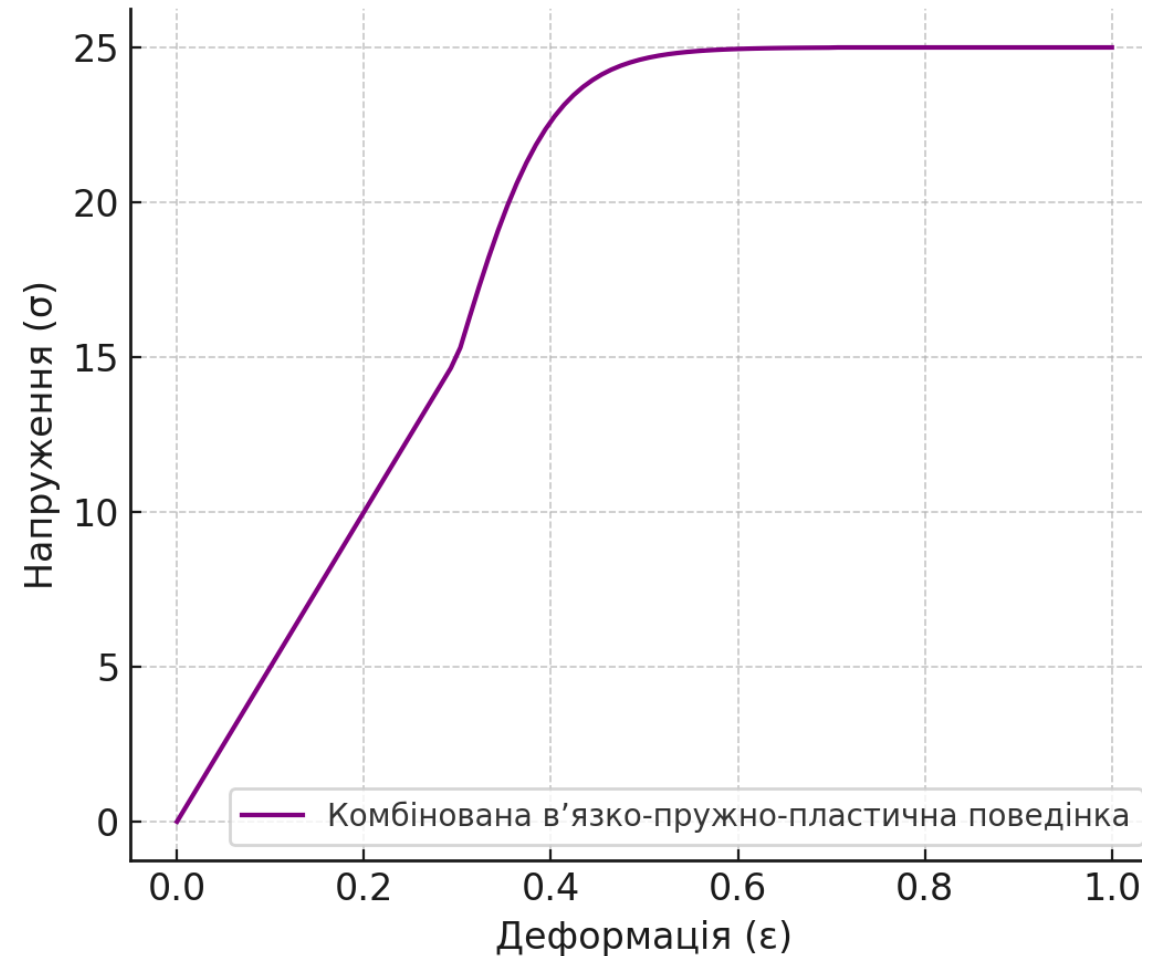
Вона характерна повзучістю – повільним накопиченням деформації з часом під сталим навантаженням – і при цьому може включати як відновлювану частку (пружну), так і невідновлювану (пластичну). В'язкопластична поведінка означає, що за достатньо тривалого навантаження порода деформується все більше, навіть якщо рівень напруження менший за миттєву границю міцності.

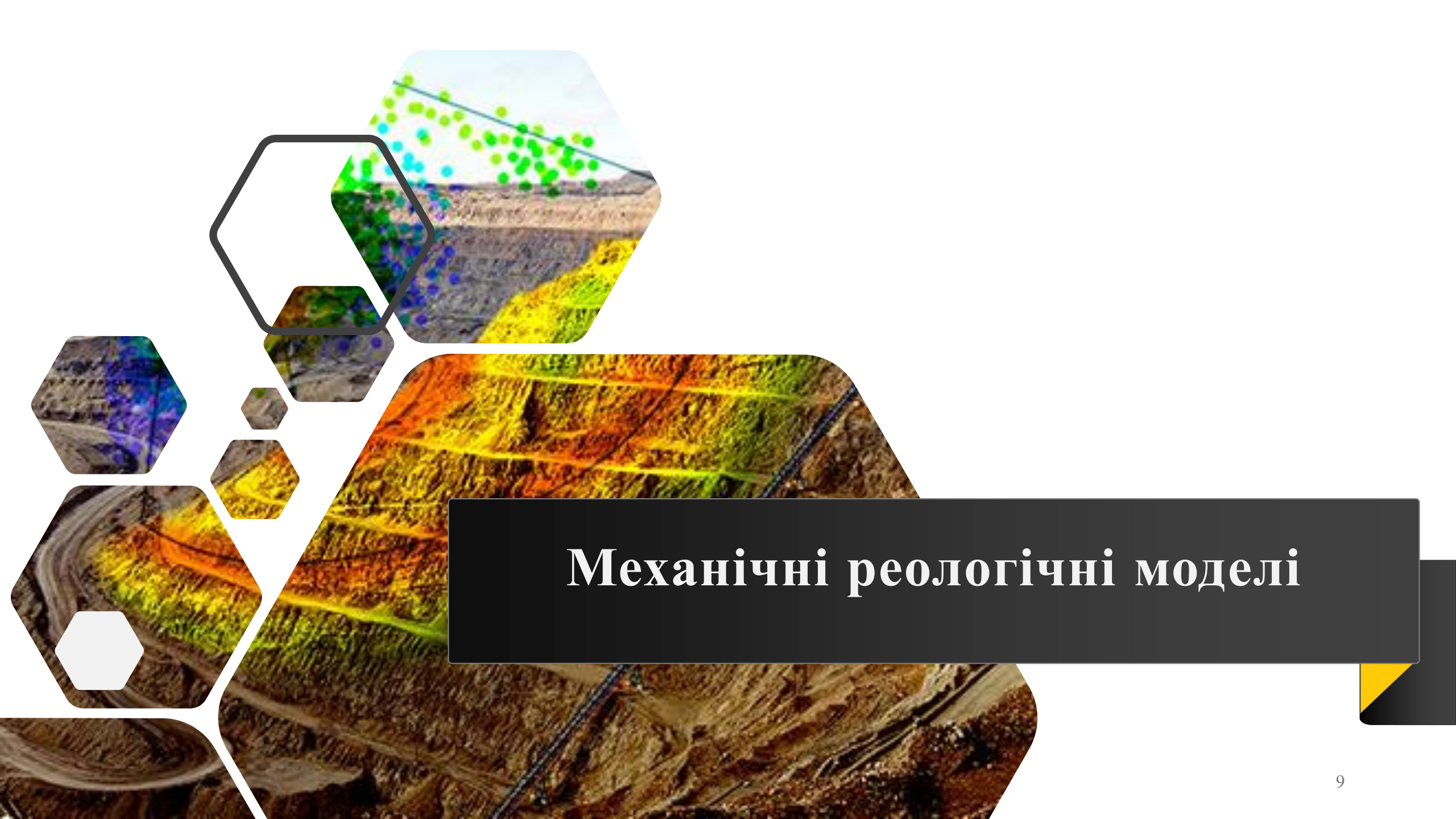


Комбінована в'язко-пружно-пластична поведінка

У реальних гірських породах деформація зазвичай має *комбінований характер*, тобто включає всі три описані механізми. При навантаженні порода спершу демонструє пружну реакцію. Якщо навантаження достатньо велике і діє тривалий час, починають проявлятися в'язкі ефекти – повільне збільшення деформації з часом (первинна повзучість). Зростання деформації може уповільнюватися і переходити в стаціонарну стадію повзучості (зі сталою швидкістю деформування), проте якщо напруження близькі до міцності, може настати прискорена, терційна повзучість, що завершується руйнуванням. Після перевищення певного порогу напружень матеріал входить у пластичний режим, де деформації вже не відновляться. Таким чином, довготривале навантаження навіть при помірних рівнях напруг поступово знижує ефективну пружність породи і проявляє її пластичні властивості.

Комбінована в'язко-пружно-пластична пове





Механічні реологічні моделі

Суть моделі Максвелла

Модель Максвелла використовується для опису поведінки в'язкопружних матеріалів, тобто таких, які поєднують пружні (оборотні) та в'язкі (необоротні) властивості. Вона складається з двох основних елементів:

Пружини, яка відповідає за пружну реакцію матеріалу (характеризується модулем пружності E_M).

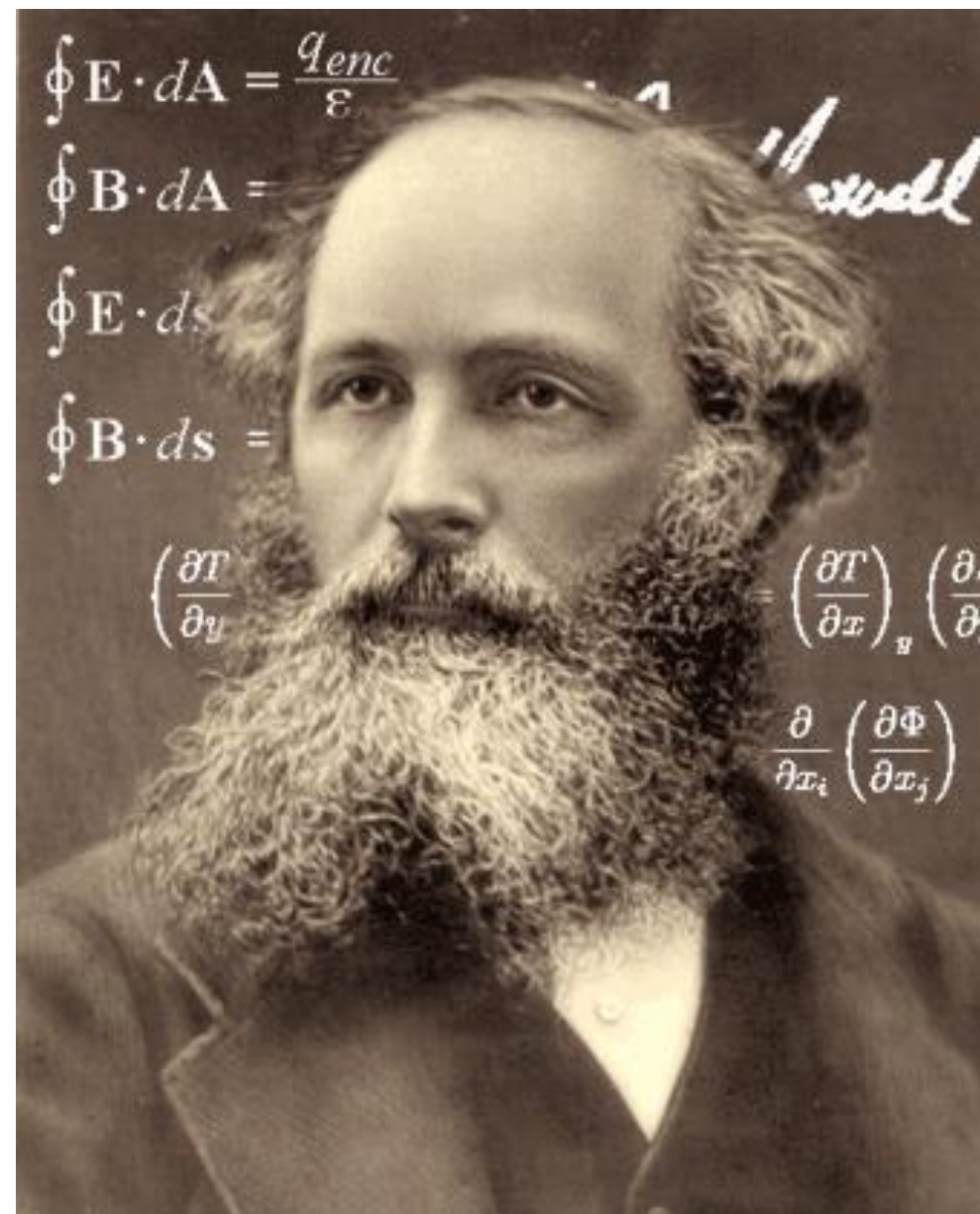
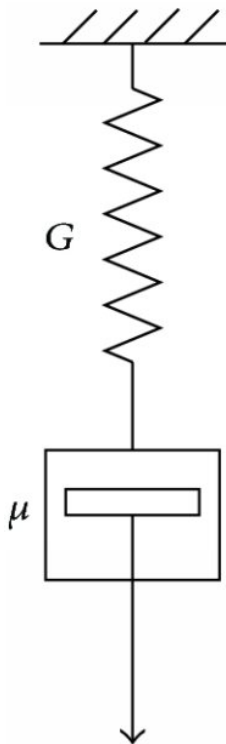
В'язкого поршня, що забезпечує незворотну деформацію матеріалу в часі (визначається коефіцієнтом в'язкості η_M).

Як працює модель Максвелла:

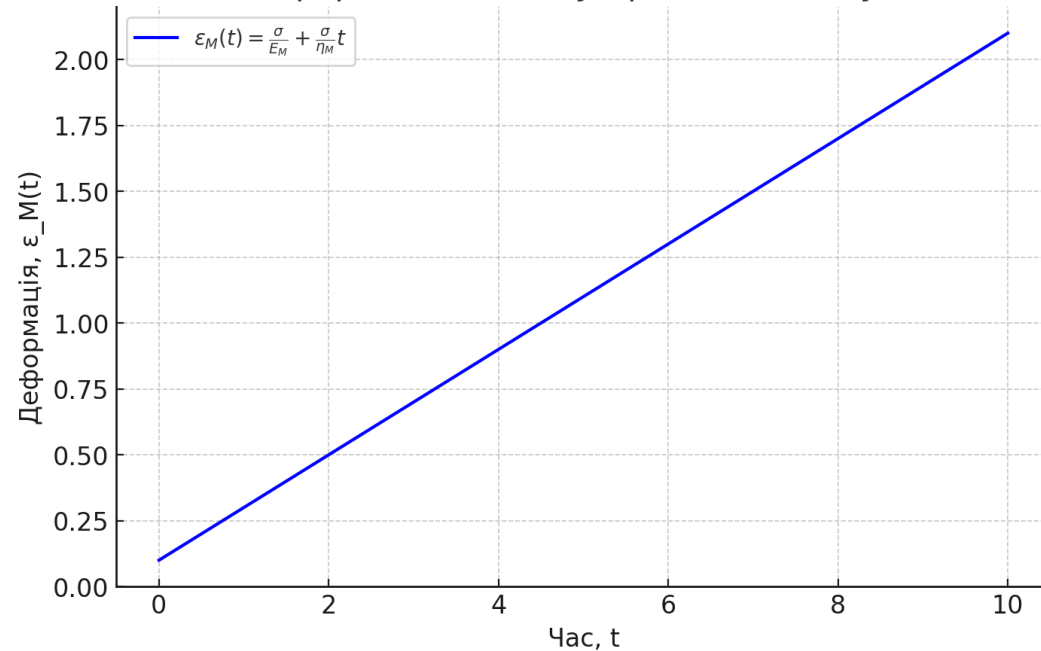
Ці два елементи з'єднані послідовно, що означає: напруження σ в обох елементах однакове; загальна деформація ϵ є сумою деформацій пружини і поршня.

Математично це записується як:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_M = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M}$$



Залежність деформації від часу при постійному навантаженні



Вплив постійного напруження (повзучість)

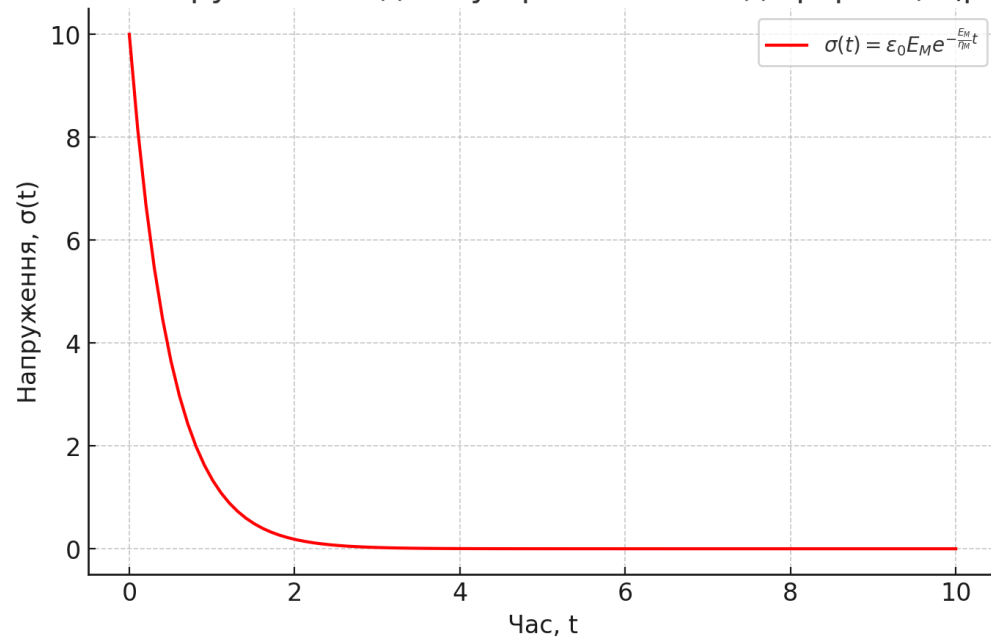
Якщо до матеріалу прикласти сталі навантаження ($\sigma = \text{const}$), то модель дає рівняння деформації:

$$\varepsilon_M(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M} t$$

Тут є дві складові:

- 1. Миттєва пружна деформація σ/E_M** , яка виникає одразу після навантаження.
- 2. Лінійно зростаюча в'язка деформація $(\sigma/\eta_M) \cdot t$** , що показує, що матеріал з часом повзе безмежно.

Залежність напруження від часу при постійній деформації (релаксація)



Вплив постійної деформації (релаксація напруги)

Якщо матеріал швидко розтягнути до деформації ϵ_0 і зафіксувати її, то:

- спочатку напруження буде високим (визначається пружиною);
- з часом напруження буде спадати, бо поршень поступово "розтікається", і вся напруга зникає.

Суть моделі Кельвіна-Фойгта

Модель Кельвіна-Фойгта використовується для опису повзучості матеріалів, які з часом поступово змінюють свою форму під навантаженням, але при цьому не розтягуються необмежено, як у моделі Максвелла.

Вона складається з пружини та в'язкого поршня, які з'єднані паралельно. Це означає, що: еформація ϵ є однаковою для обох елементів; напруження σ розподіляється між пружиною (σ_e) та поршнем (σ_v).

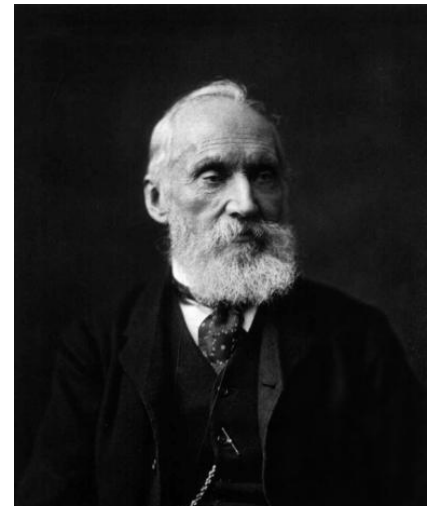
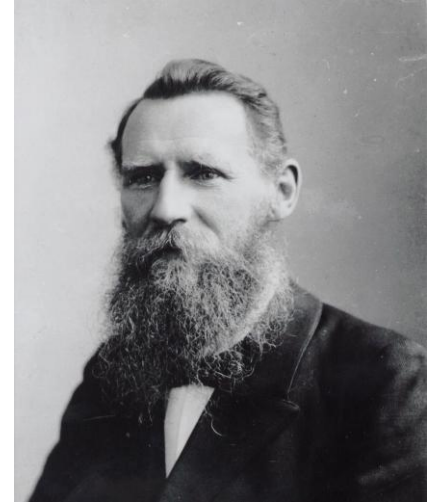
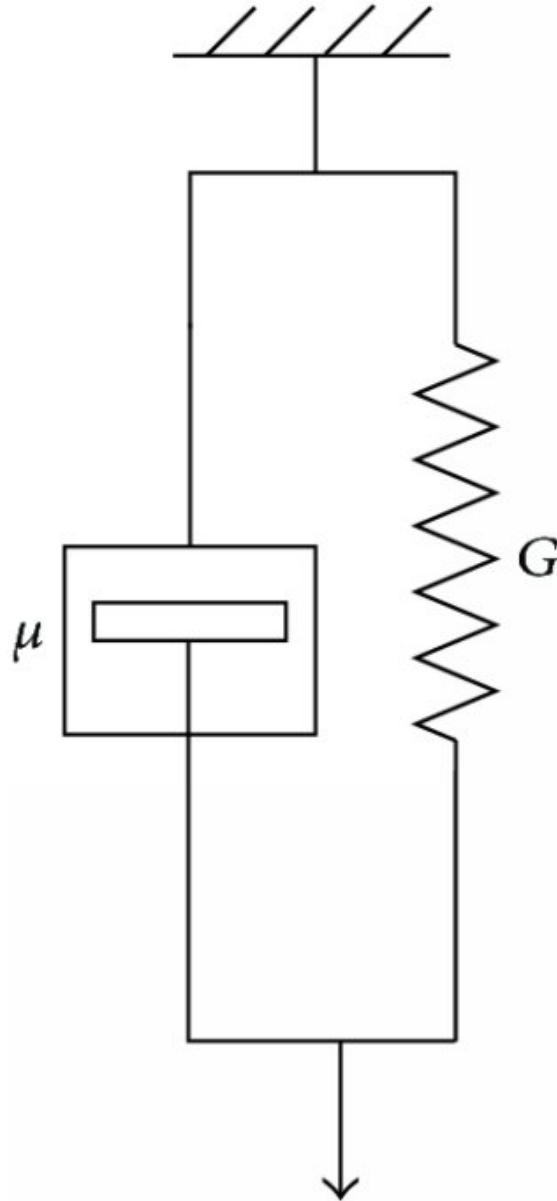
Рівняння моделі має вигляд:

$$\sigma = E_K \epsilon + \eta_K \epsilon'$$

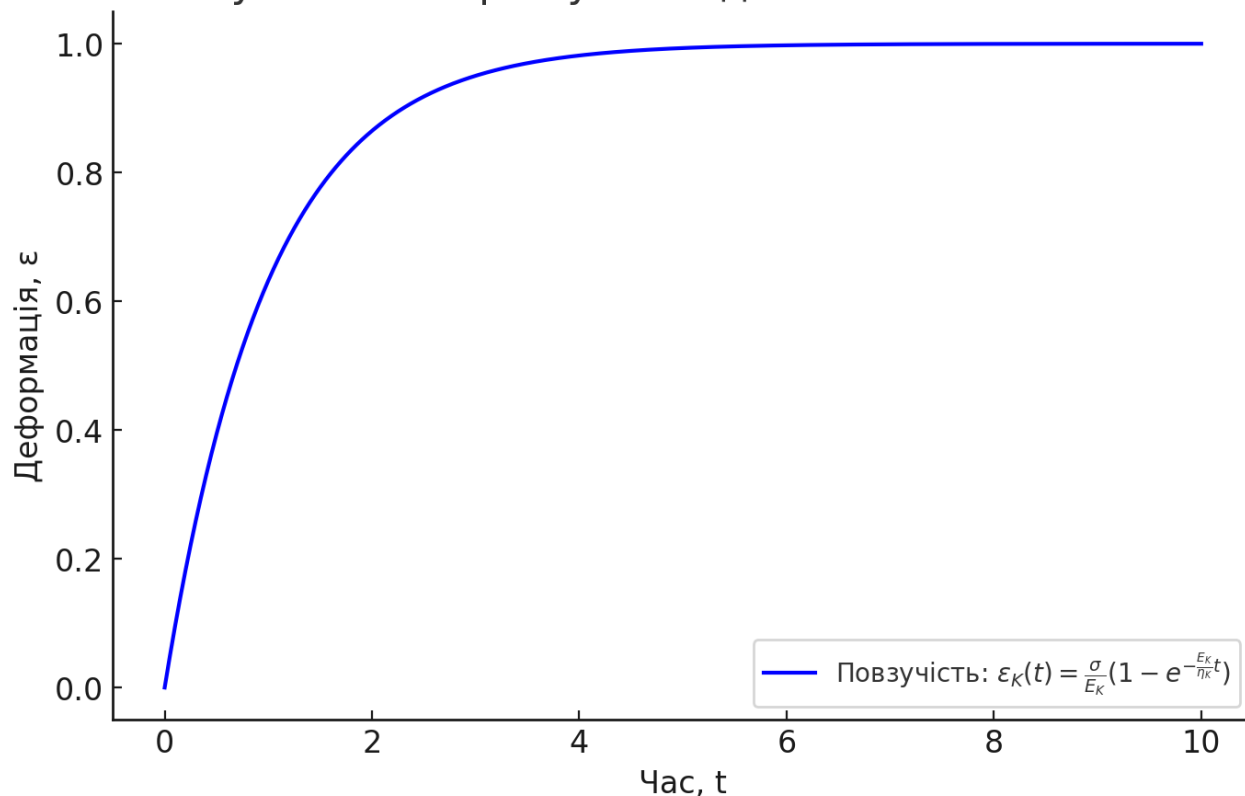
де: E_K – модуль пружності пружини,

η_K – коефіцієнт в'язкості поршня,

ϵ' – швидкість деформації.



Повзучість матеріалу за моделлю Кельвіна-Фойгта



Повзучість під сталим навантаженням

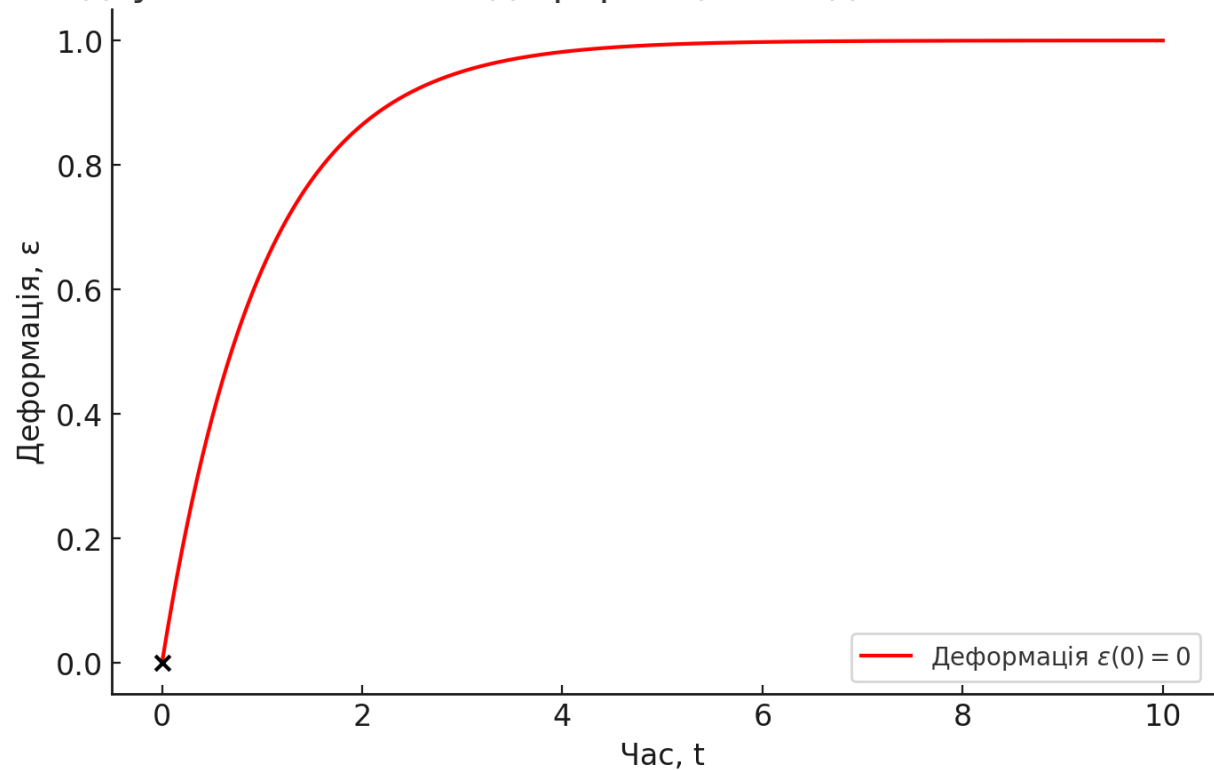
Якщо прикласти **постійне напруження** ($\sigma = \text{const}$), матеріал починає деформуватися за законом:

На початку швидкість деформації **максимальна**, тому що поршень чинить опір руху.

Згодом швидкість **зменшується** експоненційно.

Через деякий час деформація **досягає граничного значення** $\epsilon(\infty) = \sigma/E_K$, після чого подальша повзучість припиняється.

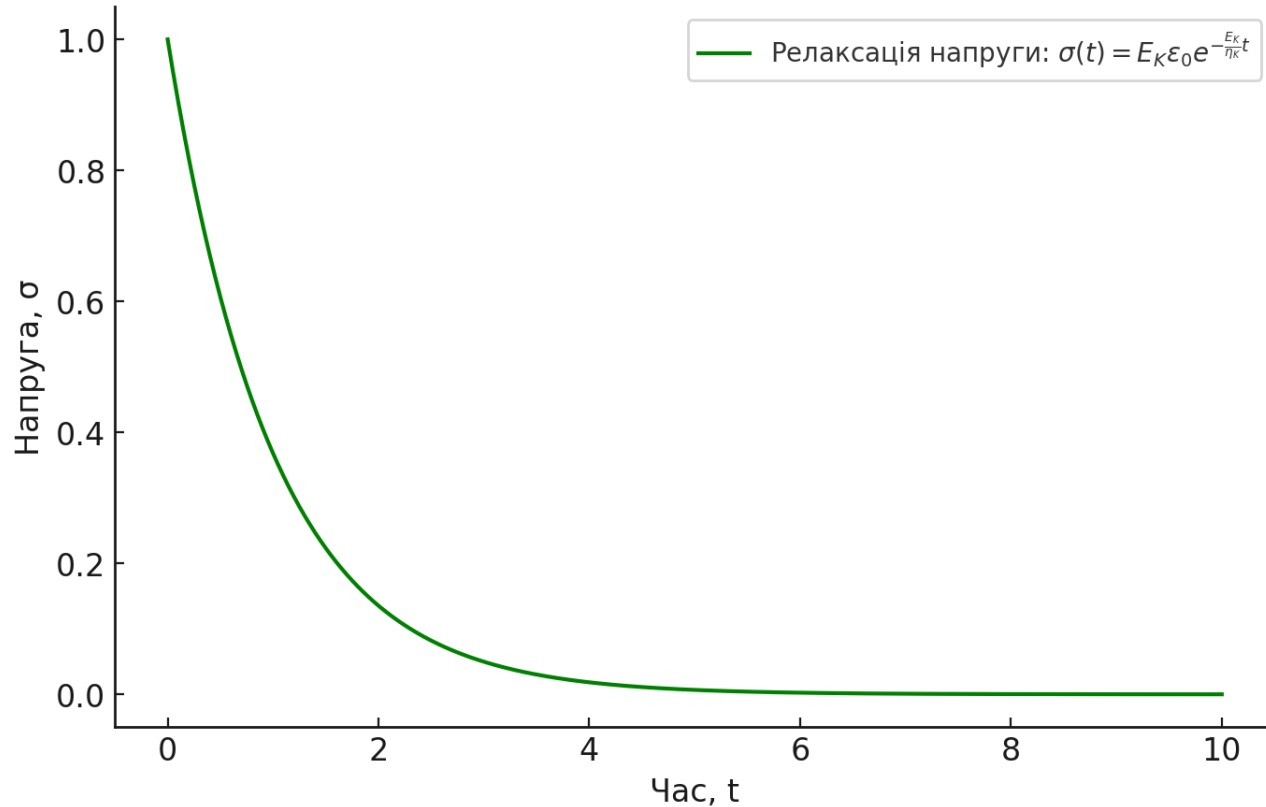
Відсутність миттєвої деформації в моделі Кельвіна-Фойгта



Відсутність миттєвої деформації

На відміну від моделі Максвелла, модель Кельвіна **не передбачає миттєвого стрибка деформації**. У момент прикладення навантаження ($t=0$) деформація **починається з нуля** ($\epsilon(0)=0$). Це пояснюється тим, що в'язкий елемент не дозволяє пружині одразу розтягнутися.

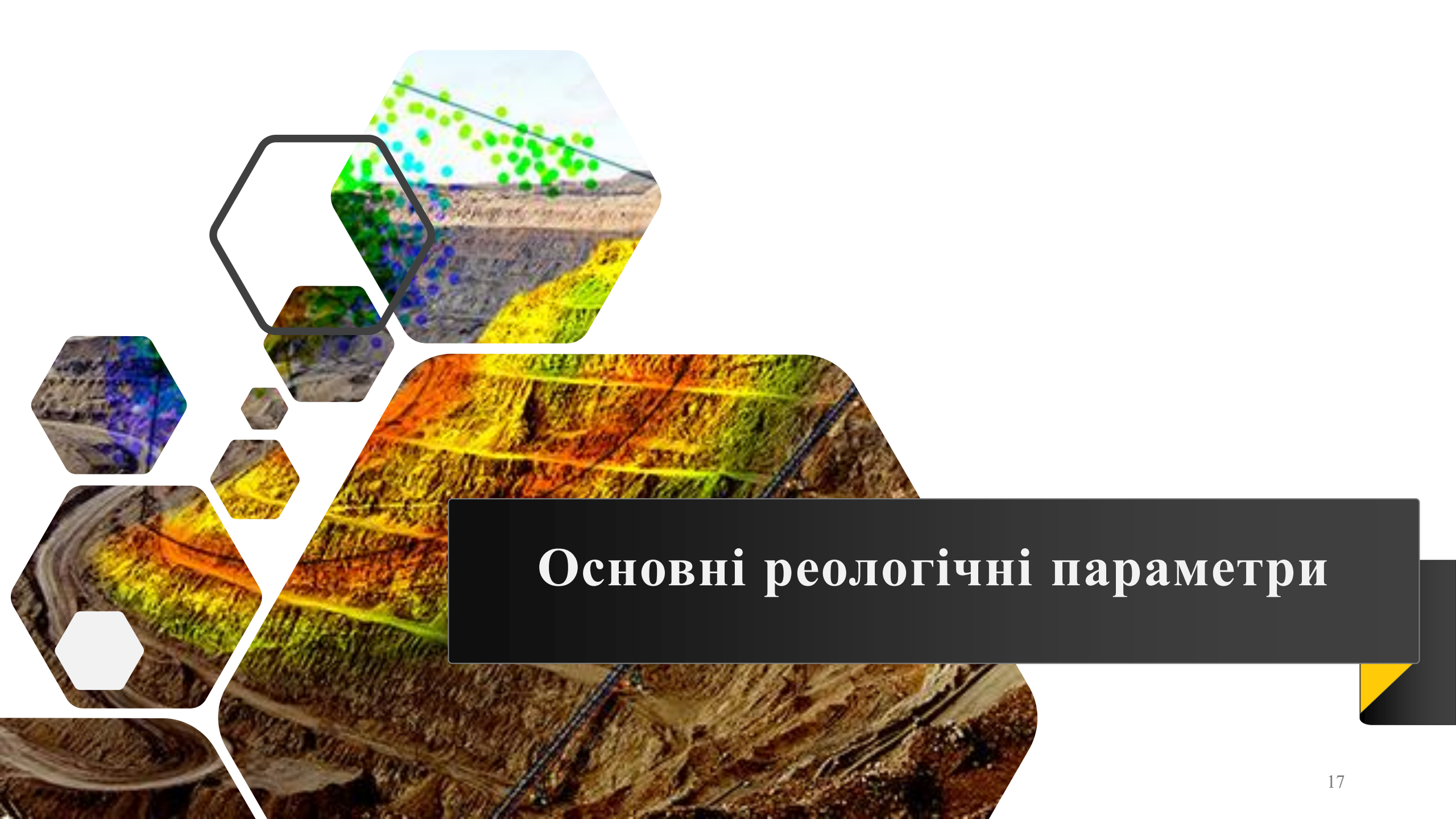
Релаксація напруги в моделі Кельвіна-Фойгта



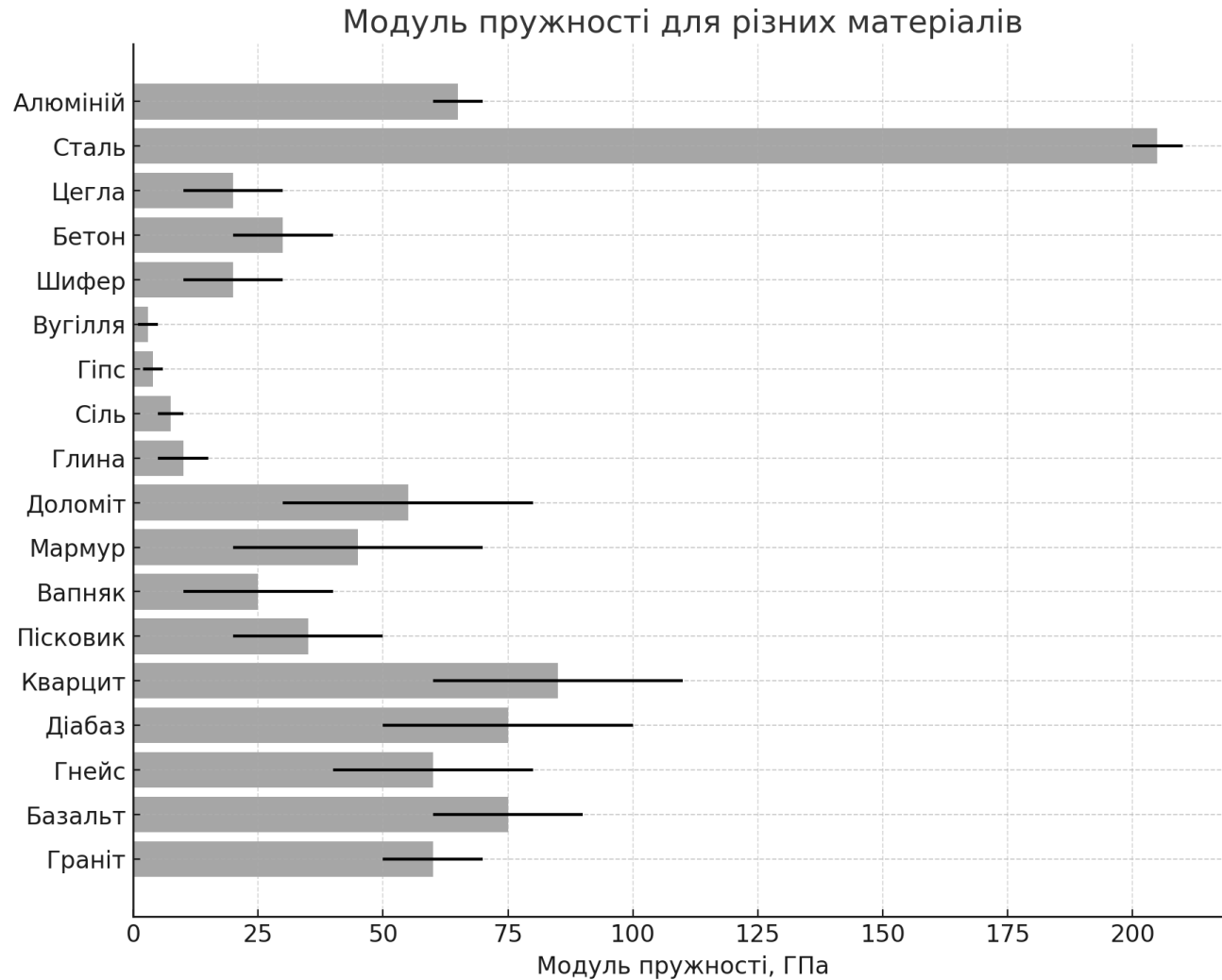
Релаксація напруги під постійною деформацією

Якщо матеріал розтягнути до деформації ϵ_0 і утримувати її сталою:

- спочатку **все напруження** несе пружина;
- згодом поршень поступово "перетікає" і бере частину навантаження на себе;
- у кінцевому стані деяке залишкове напруження все ж залишається ($\sigma = E_K \epsilon_0$), оскільки пружина завжди залишається розтягнутою.

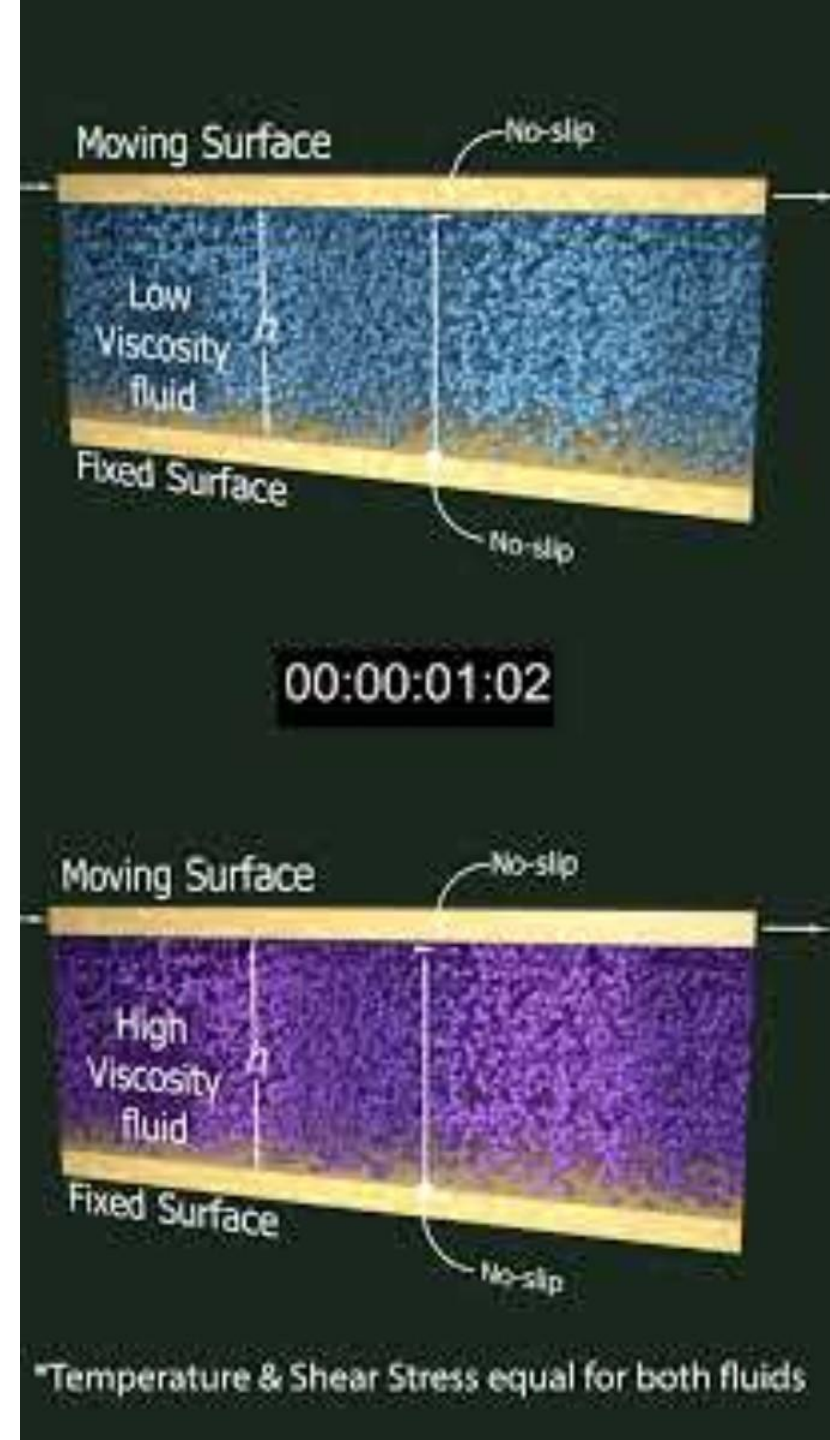


Основні реологічні параметри

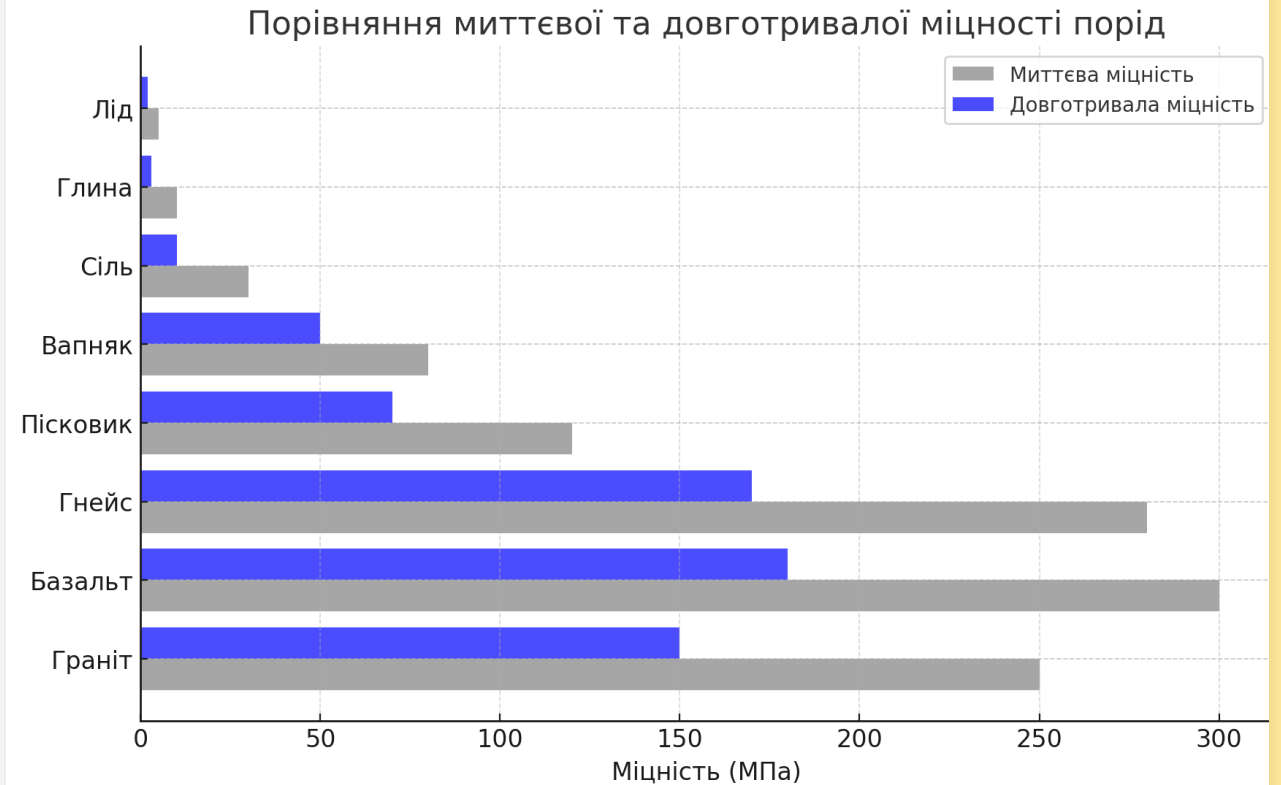


Модуль пружності (E) – коефіцієнт пружної жорсткості породи. Він визначає, яку напругу треба прикласти для виникнення одиничної пружної деформації. Вимірюється в Па (МПа, GPa). Високий модуль пружності означає “жорстку” породу (малі пружні деформації під навантаженням), низький – “м’яку” (більш піддатливу).

Коефіцієнт в'язкості (η) – параметр, що характеризує опір породи в'язкому течінню (повзучості). Він пов'язує напруження і швидкість деформації у в'язкому елементі. Одиниця виміру – Па·с. Чим більша η , тим повільніше матеріал деформується під сталим навантаженням (менша швидкість повзучості).



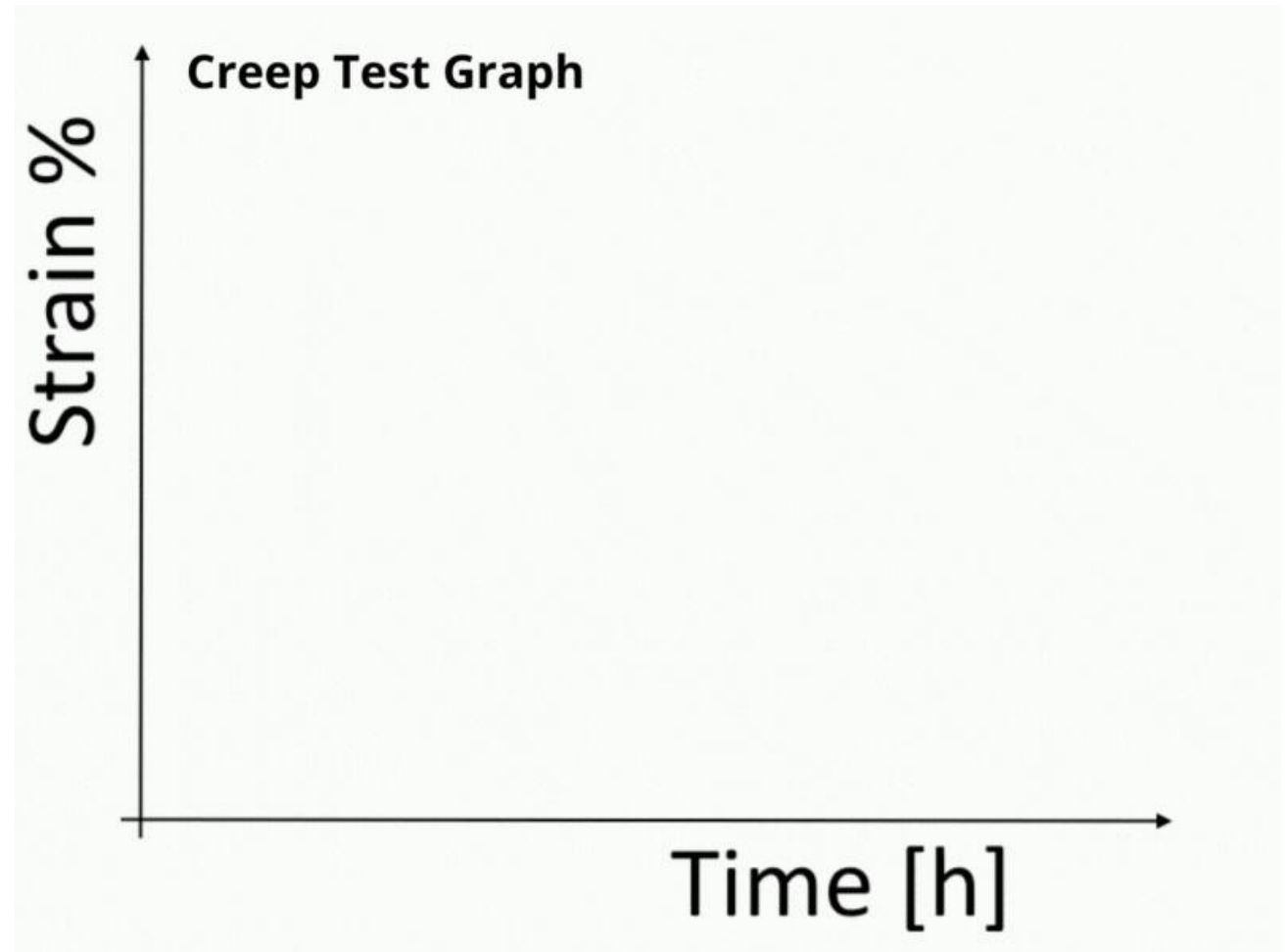
Довготривала міцність породи – це напруження, яке порода здатна витримувати *протягом тривалого часу* без руйнування. Іншими словами, якщо породу навантажити напруженням, що перевищує довготривалу (повзучу) міцність, то за достатньо великий час вона *неминуче зруйнується* внаслідок повзучості (навіть якщо це напруження менше за миттєву міцність).



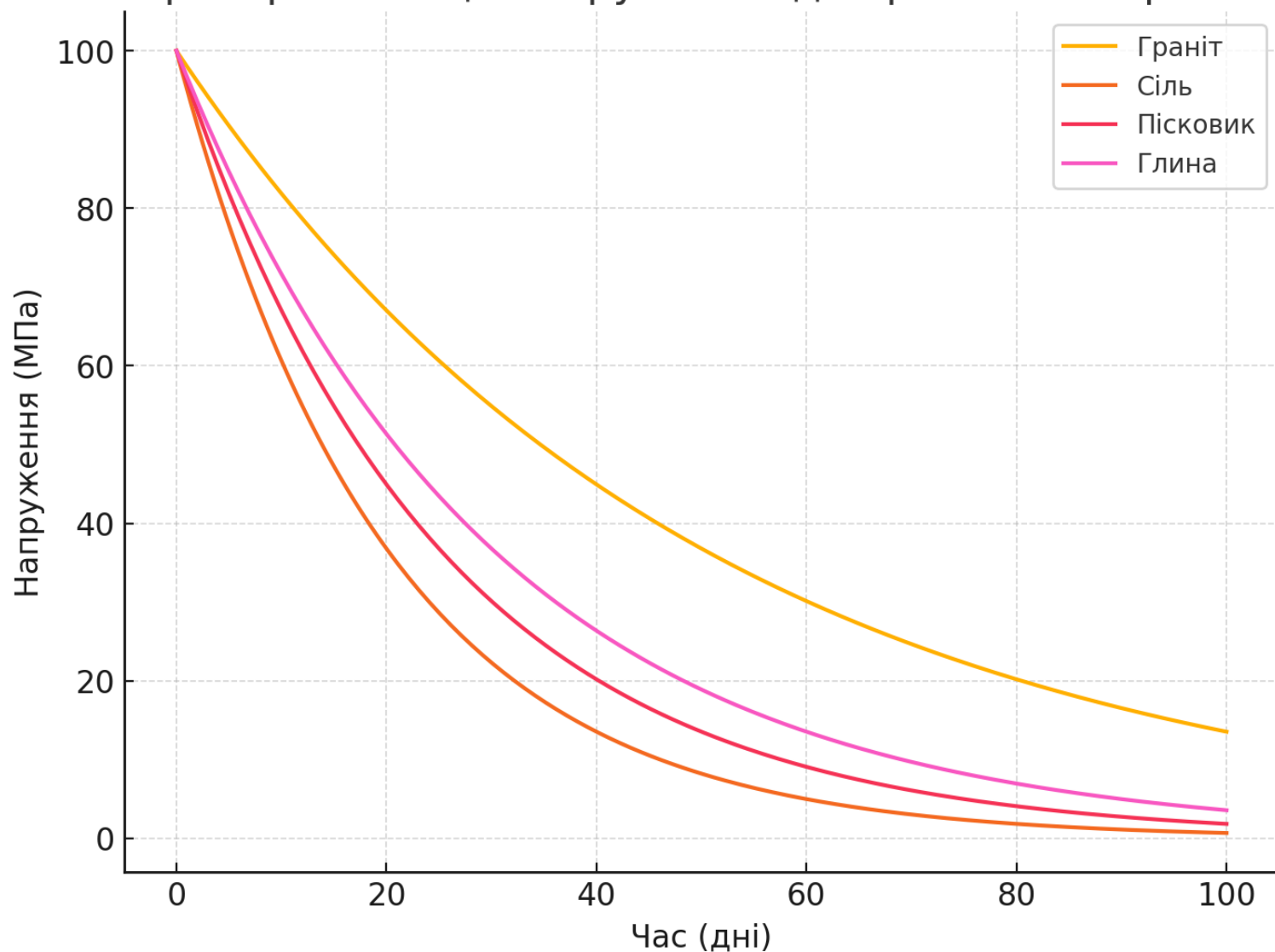
Повзучість – часозалежна деформація при сталому навантаженні. За сталого рівня напруження, деформація з часом зростає (або повзе). Спочатку швидкість деформування висока (первинна повзучість), поступово вона спадає до майже постійної (стаціонарна, або вторинна, повзучість), а при наближенні до руйнування може знову зрости. Повзучість є проявом в'язких властивостей породи.

Важливо, що повзучість може спостерігатися і при рівнях напружень *нижчих за межу текучості*, на відміну від пластичної деформації, що виникає тільки після перевищення цього порогу.

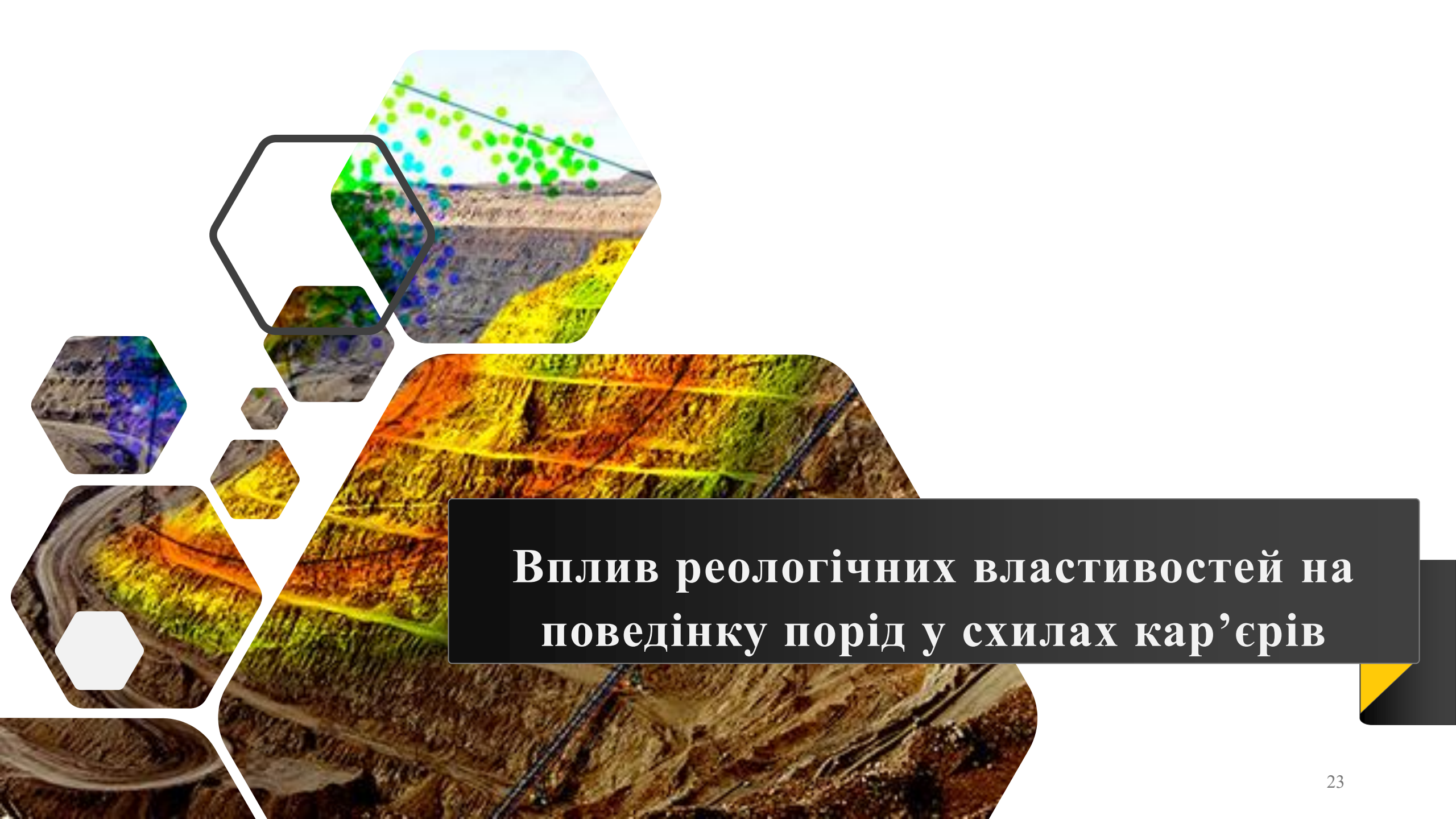
Крива повзучості є важливою характеристикою: з її аналізу визначають повзучі параметри матеріалу. Повзучість суттєво залежить від температури.



Криві релаксації напруження для різних матеріалів



Релаксація напруги – зменшення напруження з часом при підтримуваній сталій деформації. Це явище – обернене до повзучості: якщо матеріал деформовано до певного рівня і закріплений у такому стані, початкове напруження потрібне для утримання цієї деформації з часом буде спадати. В'язко-пружний матеріал поступово “розслаблюється”: частина пружного напруження переходить у пластичну деформацію, і щоб утримувати ту саму загальну деформацію, потрібно менше напруження. Зрештою, у ідеально в'язкому тілі напруження спаде до нуля. У реальних породах релаксація може привести до істотного зниження внутрішніх напружень з часом.



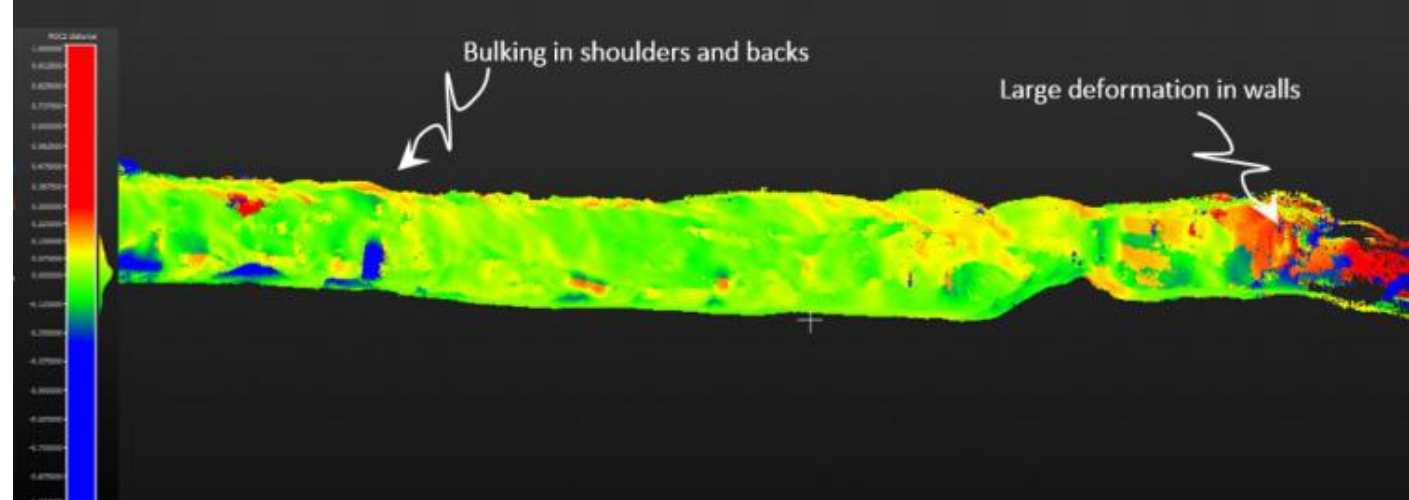
Вплив реологічних властивостей на поведінку порід у схилах кар'єрів





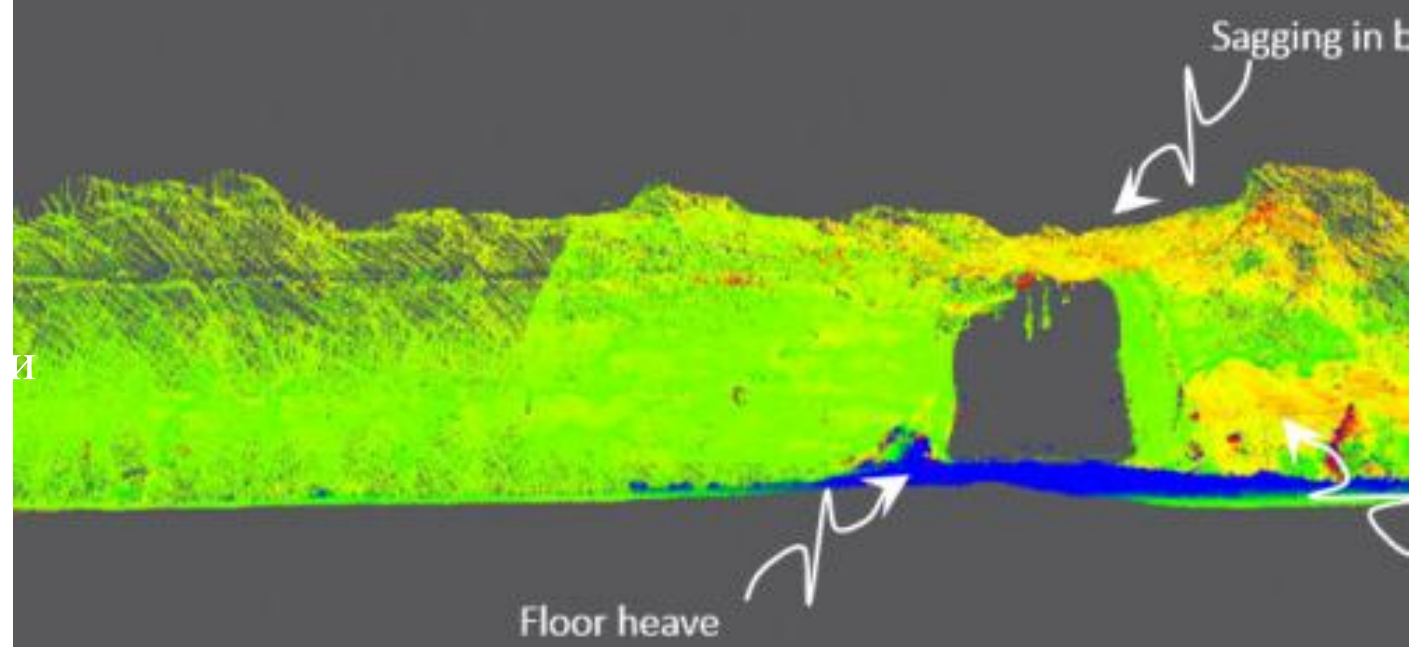
Тверді крихкі породи (граніти, базальти, кварцити тощо) зазвичай майже *не повзуть* при нормальних умовах – їх деформації під сталим навантаженням незначні. Такі породи довго зберігають форму укусу без помітних змін, поки напруження не досягнуть критичного рівня міцності. Однак їхня крихкість означає, що руйнування може статися раптово, без великої попередньої повзучої деформації.

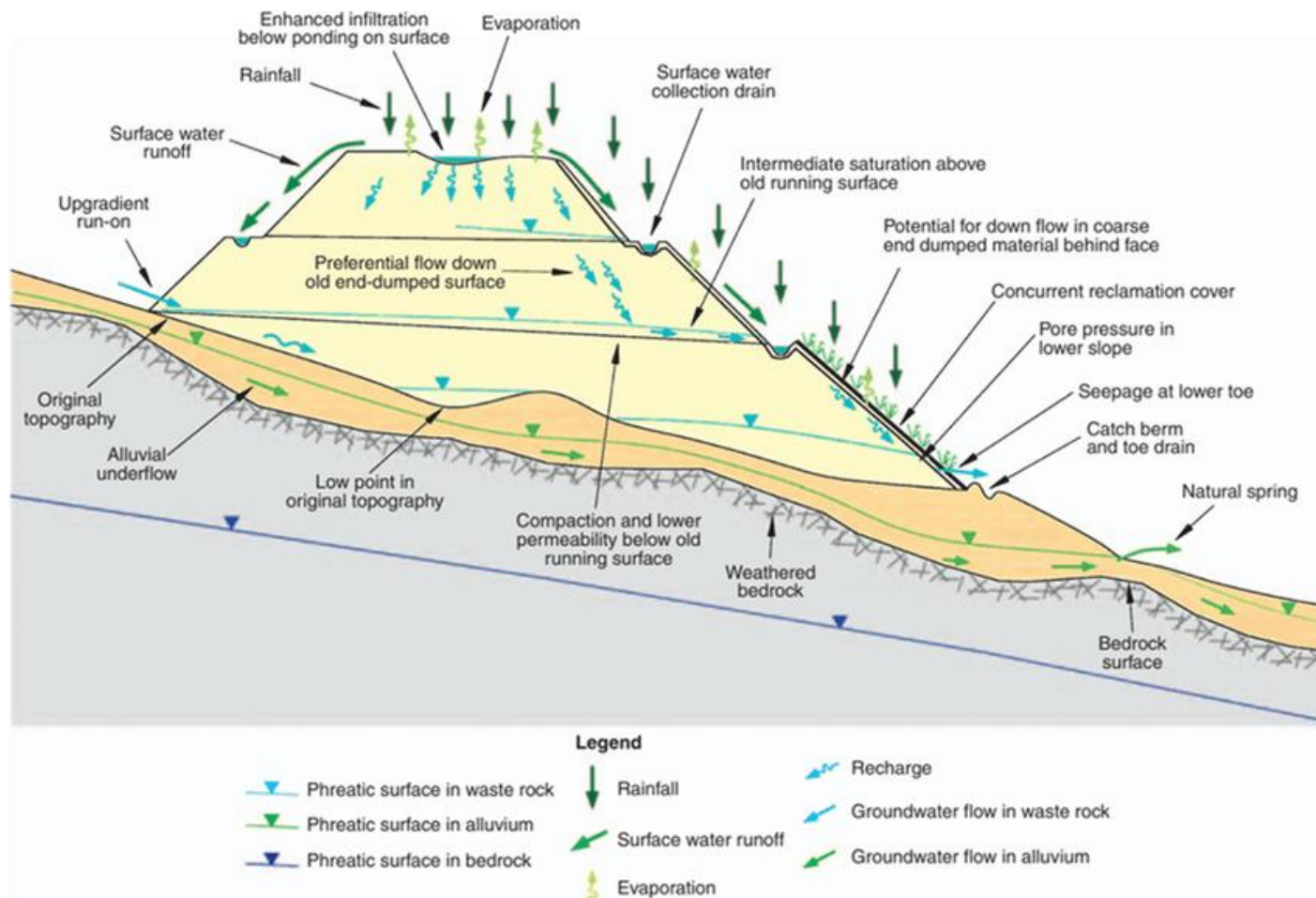




ax

z

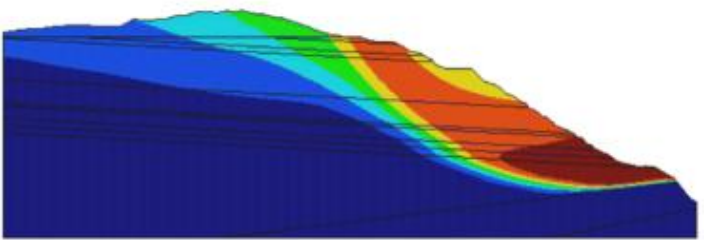




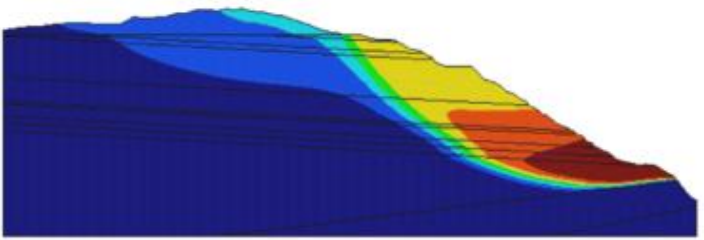
Реологічні властивості масиву важливі не тільки для схилів, але й для основи кар'єру та майданчиків, що несуть вантажі. Під дією постійного статичного навантаження – наприклад, ваги відвалу породи або великогабаритного обладнання (бурової установки, екскаватора, автосамоскидів) – ґрунти і породи основи зазнають повільного стиску та зрушень. Явище повзучості проявляється тут як повільне просідання поверхні під навантаженням.

Наслідком тривалих деформацій основи може бути погіршення геометрії та стійкості всього кар'єру. Наприклад, якщо внутрішній відвал просідає нерівномірно, його схили можуть вторинно зрушуватися або обвалюватися. Просідання підшви кар'єру (дна) може призвести до утворення западин, нерівностей, що небезпечно для руху техніки і порушує проектні позначки горизонту.

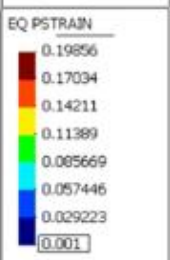
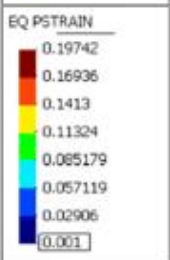
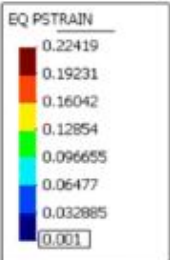
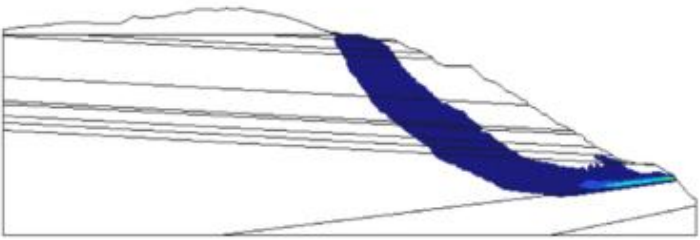
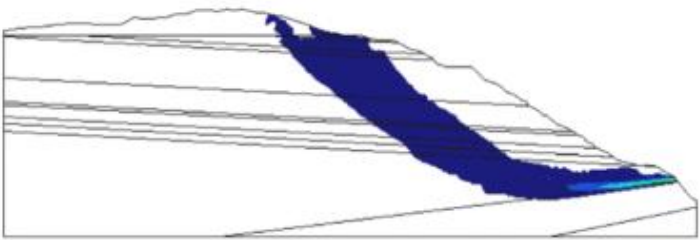
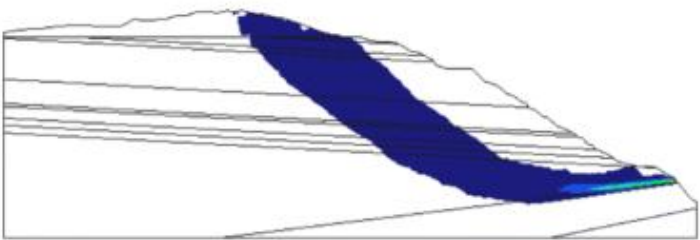
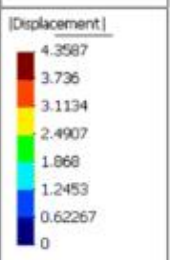
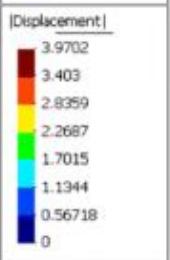
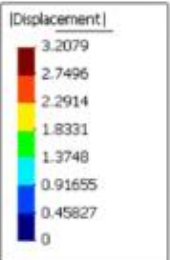
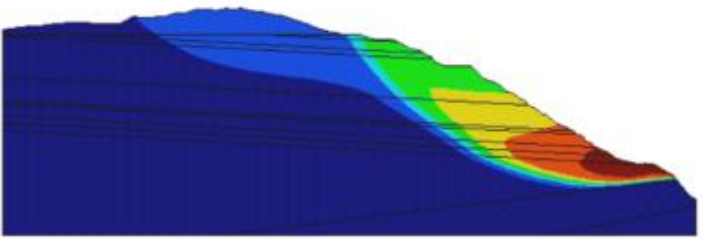
$SF = 1.28$
(300 kPa suction)

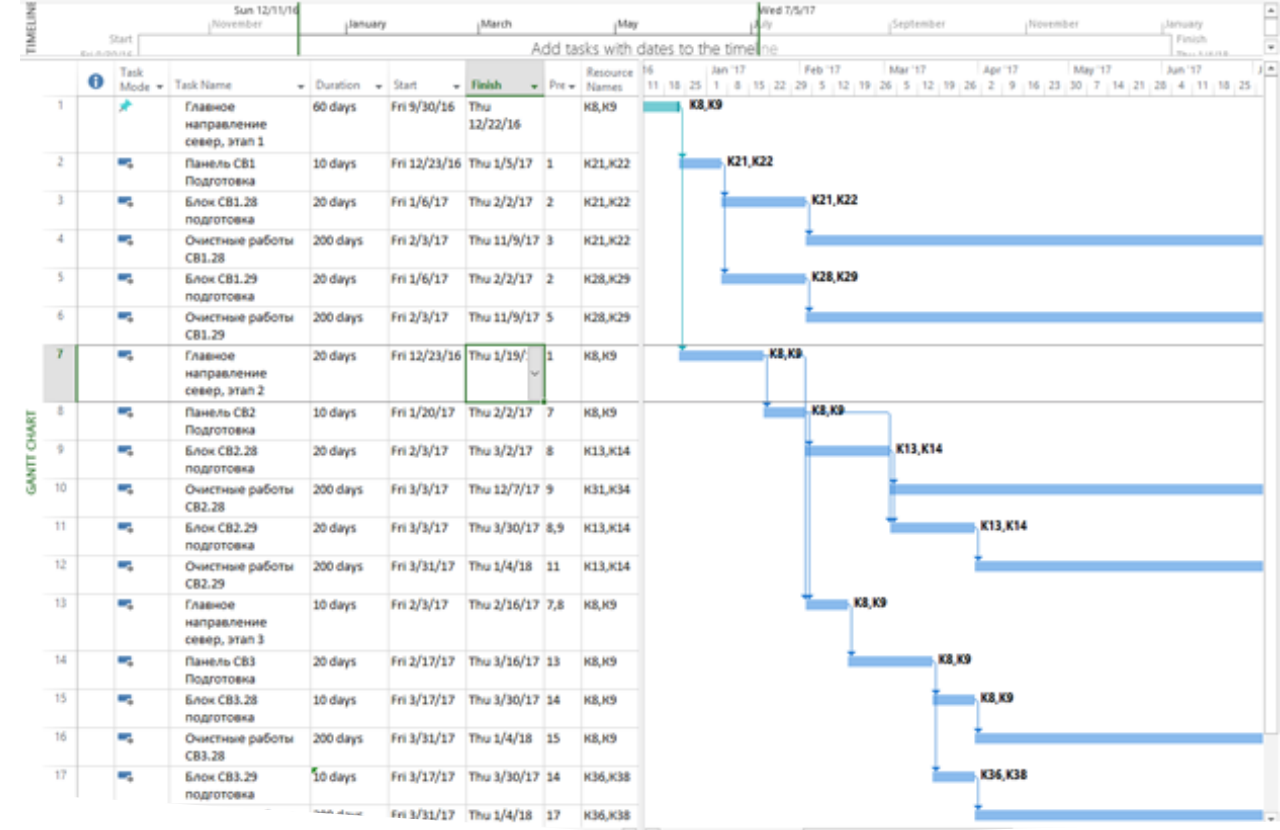
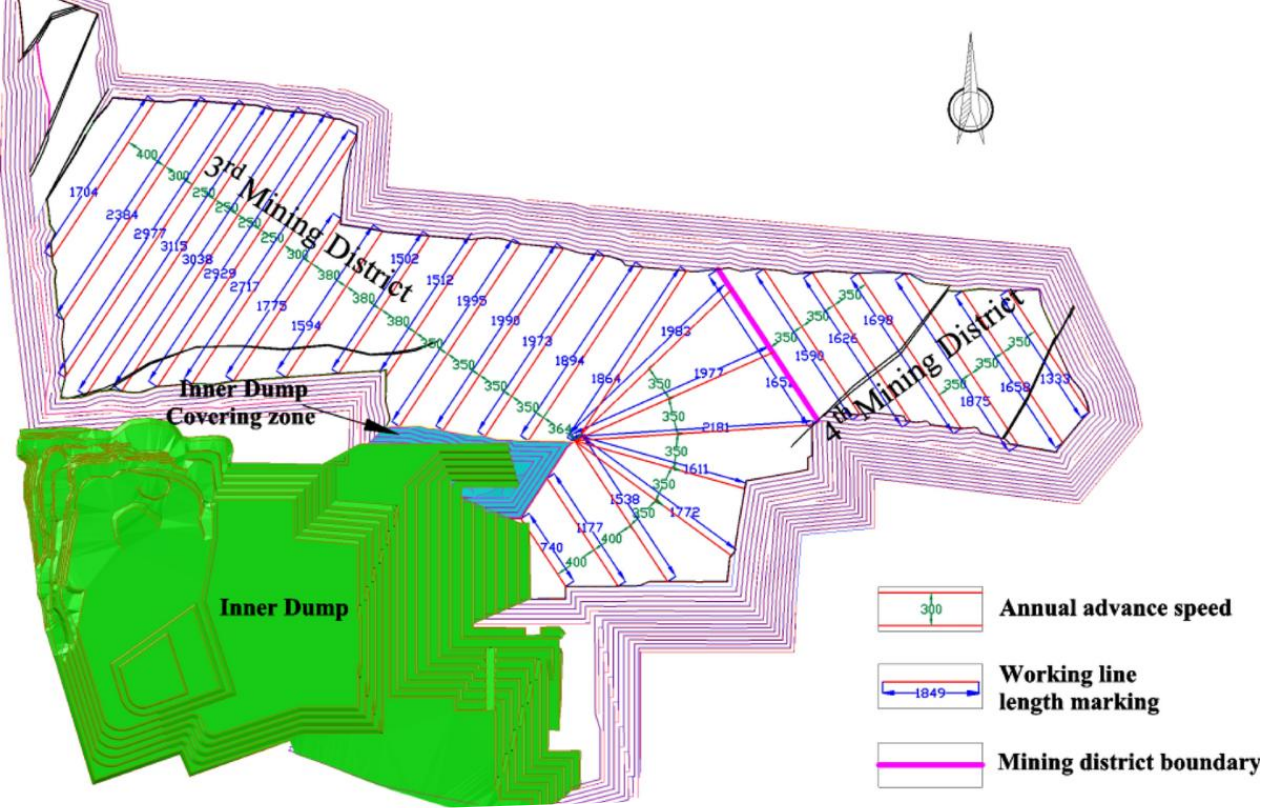


$SF = 1.14$
(150 kPa suction)



$SF = 1.00$
(0 kPa suction)



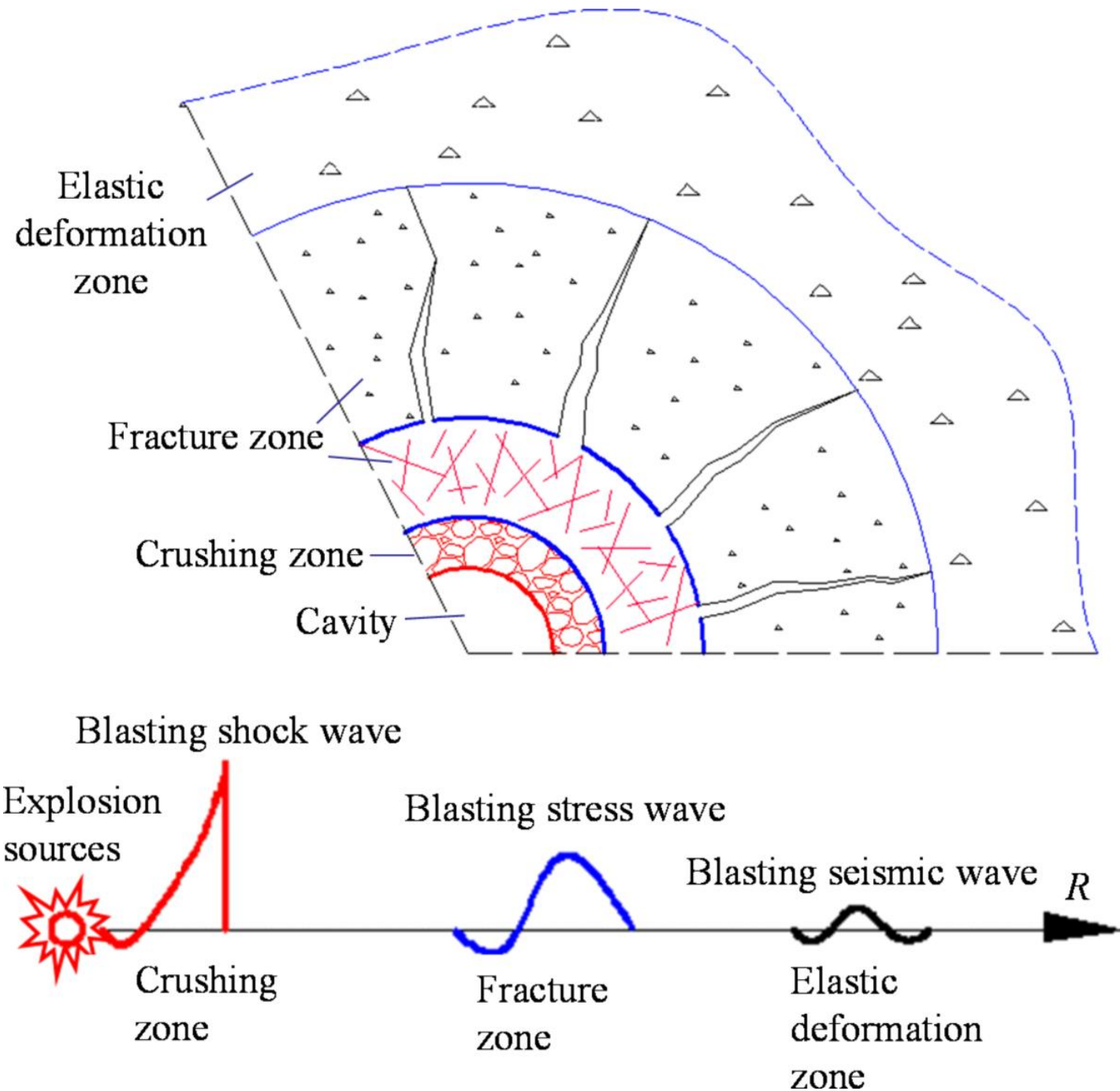


**Вплив реологічних властивостей на
технологію видобування**



Вплив реологічних властивостей на ефективність вибухового дроблення

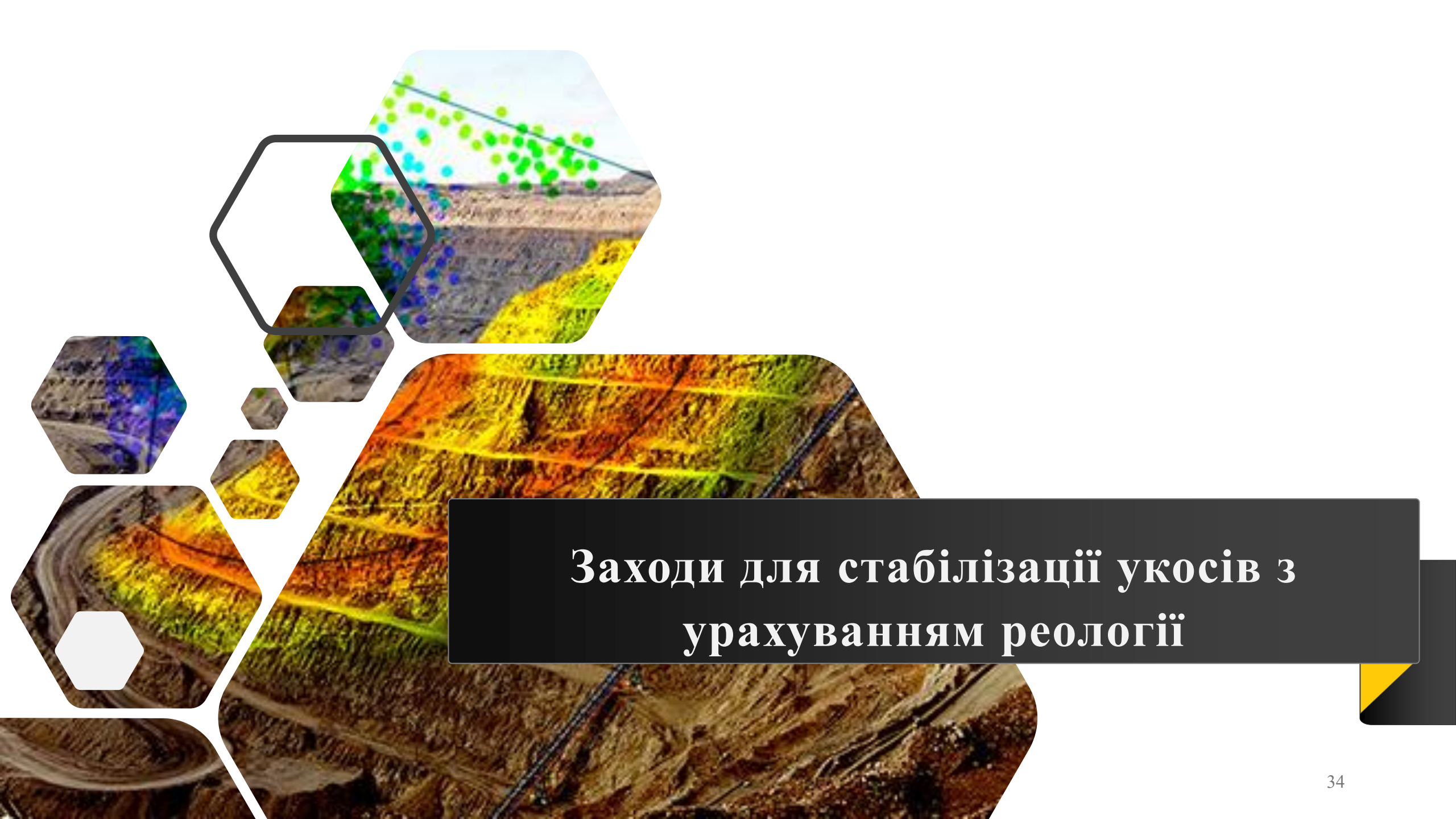
Для порід з пружною, пружно-крихкою поведінкою (напр. граніти, пісковики, міцні вапняки) вибухові методи руйнування є найбільш продуктивними. Пояснюється це тим, що вибух створює **швидке імпульсне навантаження** – ударну хвилю і високий тиск – яке пружна порода не встигає повільно поглинути, тому в ній утворюється мережа тріщин. Швидке накопичення напружень перевищує межу міцності крихкого матеріалу, і він раптово руйнується на уламки.



Ефективність механічного руйнування пластичних порід



Для розробки потужних пластичних порід доцільніше застосовувати механічні методи руйнування – різання, рихлення, фрезерування тощо – замість традиційних вибухів. Механічне виймання означає, що енергія прикладається повільніше і поступово (наприклад, різець екскаватора зрізає тонкий шар породи), що у випадку пластичних масивів ефективніше породжує деформацію та відокремлення шматків.



Заходи для стабілізації укосів з урахуванням реології

Керування формою укоосу

Укоси роблять східчастими – залишають *берми* через певну висоту. Берми не тільки служать робочими майданчиками, а й сприяють стабільності: вони зменшують висоту окремих уступів, тим самим знижуючи напруження в нижніх шарах, і перехоплюють можливі осипи чи обвали.

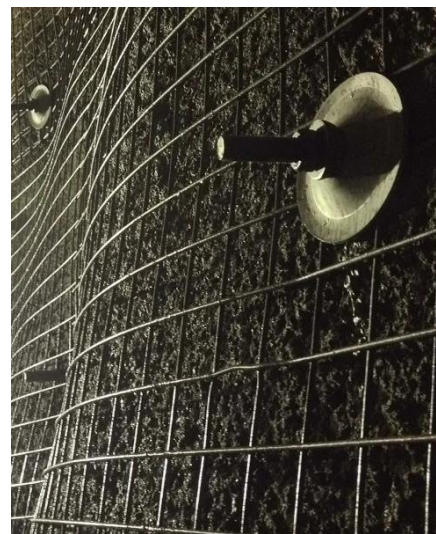


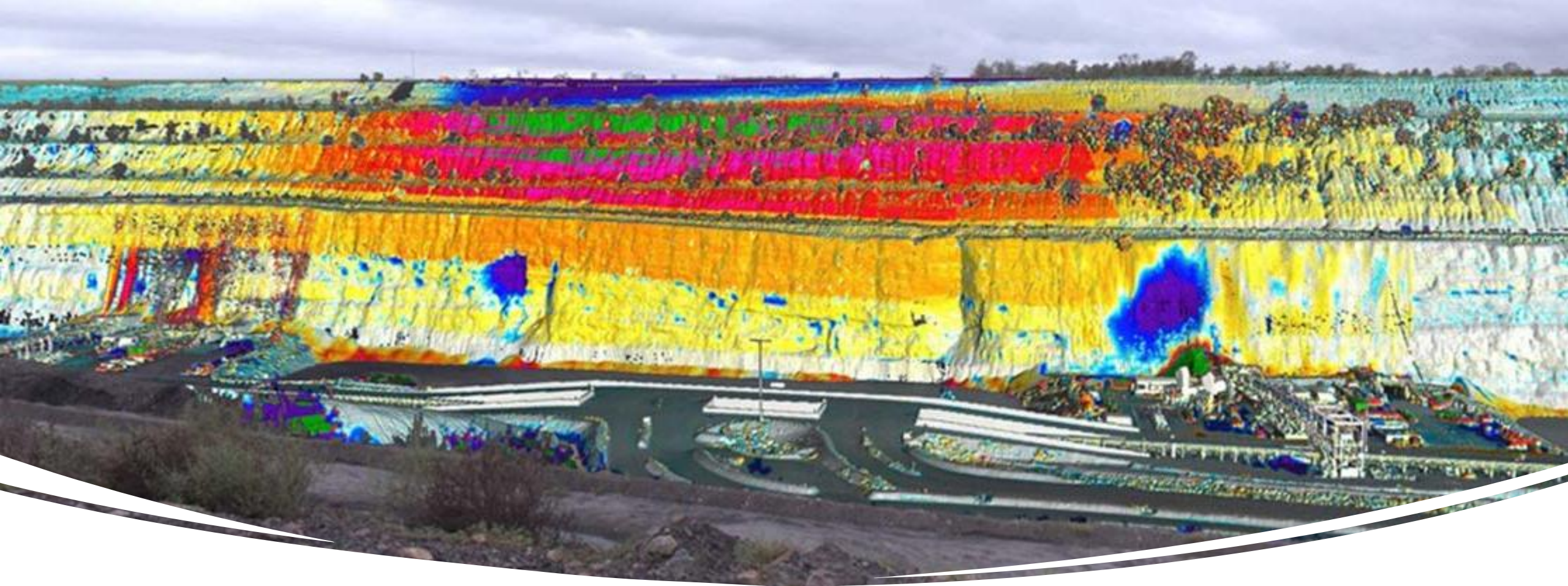




Анкерування та кріплення

У міру необхідності, укosi зміцнюють інженерними конструкціями. Для відносно невеликих або локально нестійких ділянок застосовують *анкери* (стрижні або троси, закріплені в масиві), які утримують блоки породи від зрушення. Також використовують торкрет-бетонне покриття на схилах, сітки, підпірні стінки в нижній частині укосу.





Моніторинг і управління навантаженням

Оскільки повзучість – процес повільний, ефективним є геодезичний моніторинг рухів схилу. Сучасні системи (лазерні далекоміри, радар) відстежують міліметрові зміщення. За їх сигналами можна завчасно виявити прискорення повзучості, що передусь обвалу.