

# Kaya Dayanımı

Kırıksız kayanın dayanımı kayayı oluşturan mineral dayanımlarına ve bunların bağlanma biçimine (kenetlenme ve çimentolanmaya) bağlıdır.

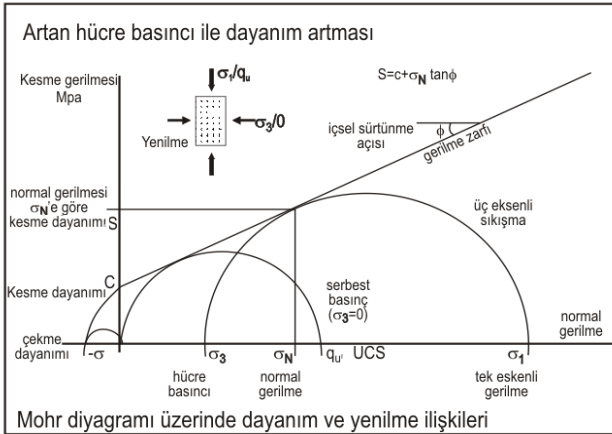
**Kaya kütlesi dayanımı** kırıklı kaya kütlesi için geçerli olup, önemli ölçüde kırık zayıflıkları ile ilgilidir.

Sertlik dayanım ile doğrudan ilişkili değildir; normalde sadece delme kolaylığı ile ilgilidir.

**Kaya yenilmesi** normalde makaslama şeklinde olur; laboratuvarında serbest basınç deneyi verev kesme yenilmeleri verir.

Çoğu kayaların basınç dayanımları uygulanan mühendislik gerilmelerinden büyüktür; zayıf kil ve aşırı bozmuş veya çok sık çatlaklı kayalar bunların dışındadır.

(UCS beton = 40 N/mm<sup>2</sup> = 40 MPa)



## Çekme Dayanımı (T<sub>0</sub>, S<sub>t</sub>)

Nadiren ölçülür veya doğrudan uygulanır.

Kayalar için yaklaşık UCS/20 ile UCS/8 arasındadır.

Fleksürel dayanım dış yüzeydeki çekme dayanımı ile ilişkili olup, ölçülmesi ve tanımlanması kolay değildir.

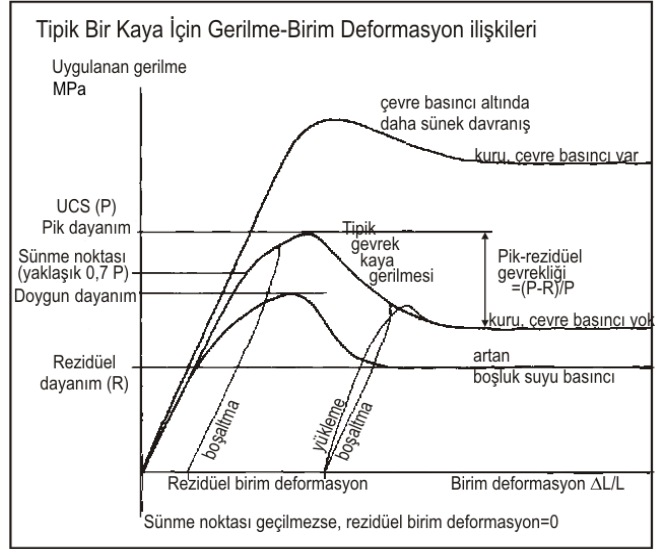
Elastik mika yaprakları sleyte yüksek fleksürel dayanım kazandırır.

## Kayaların Dayanım Özellikleri

Kaya	Kuru yoğunluk (t/m <sup>3</sup> )	Gözeneklilik (%)	Kuru UCS aralığı (MPa)	Kuru UCS ortalama (MPa)	Doygun UCS (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kesme dayanımı (MPa)	Sürtünme açısı (°)
Granit	2,7	1	50-350	200		75	15	35	55
Bazalt	2,9	2	100-350	250		90	15	40	50
Grovak	2,6	3	100-200	180	160	60	15	30	45
Kumtaşı-Karbonifer	2,2	12	30-100	70	50	30	5	15	45
Kumtaşı-Triyas	1,9	25	5-40	20	10	4	1	4	40
Kireçtaşı-Karbonifer	2,6	3	50-150	100	90	60	10	30	35
Kireçtaşı-Jura	2,3	15	15-70	25	15	15	2	5	35
Tebeşir	1,8	30	5-30	15	5	6	0,3	3	25
Çamurtaşı-Karbonifer	2,3	10	10-50	40	20	10	1		30
Şeyl-Karbonifer	2,3	15	5-30	20	5	2	0,5		25
Kil-Kretase	1,8	30	1-4	2		0,2	0,2	0,7	20
Kömür	1,4	10	2-100	30		10	2		
Jips	2,2	5	20-30	25		20	1		30
Tuz	2,1	5	5-20	12		5			
Hornfels	2,7	1	200-350	250		80			40
Mermer	2,6	1	60-200	100		60	10	32	35
Gnays	2,7	1	50-200	150		45	10	30	30
Şist	2,7	3	20-100	60		20	2		25
Sleyt	2,7	1	20-250	90		30	10		25

Bu değerler tipik veya ortalamalar olup, sadece yaklaşık kılavuz değerler olarak kullanılabilir.

Tüm değerler bozuşma ile zayıflamamış kırıksız kayaya işaret eder. Boş yerler yonelim vb. özelliklerle ilişkili aşırı değişime veya yeterli veri olmayışına işaret eder.



## Serbest Basınç Dayanımı

Hücre basıncının uygulanmadığı tek eksenli yükleme durumundaki dayanımdır. Kaya dayanımını tanımlamada kuru kayaların UCS değeri standart alınır. Geniş anlamda gözeneklilik ve dolayısıyla da yoğunlukla ilişkilidir. Çoğu magmatik kayalarda gözeneklilik %1'den az olup, UCS değerleri 200 MPa'nın üzerindedir. Sedimenter kayalarda yoğunluklar 2-3 t/m<sup>3</sup> arasında olup, UCS değerleri genellikle 70 MPa'nın altındadır. Sedimenter kayalarda artan taşlaşma ve azalan gözeneklilikten dolayı yaşla birlikte UCS değeri de artar.

## Elastisite Modülü (E)

Birim deformasyon artışı başına gerilme artışıdır; bu nedenle, dayanımla doğrudan ilişkilidir. Young modülü olarak da bilinir. Çevre basıncının UCS'yi aştığı yerde sünek yenilme başlar.

Modül oranı E/UCS şeklinde ifade edilir. Çoğu kayalarda değeri 300 civarında olup, bazı sağlam ve sert kireçtaşlarında 500'ün üzerinde ve şekil değiştirebilir kayalar, killer ve bazı şeylerde 100'ün altındadır.

Sedimenter kayalarda yaş ve tektonik gerilme arttıkça dayanım da artar. Bu değerler İngiltere ve doğu A.B.D. için tipiktir. Avrupa Alpleri ve batı Amerika gibi levha sınırı deformasyon alanlarında benzer yaştaki kayalar daha sağlamdır.

φ değerleri kırıksız kaya içindir.

## KAYALARIN KESME DAYANIMI

İki bileşen şeklinde değerlendirilebilir:

- Kenetlenmeden dolayı kohezyon (ve çekme dayanımı)
- Çevre basıncı altında artan sürtünme açısı.

### Üç Eksenli Dayanım

Kayaların yer içinde çevre basıncına maruz kalması dayanımı hayli artırır. Bu dayanım değerleri genellikle mühendislik yüklemesinin çok ötesindedir. Üç eksenli deney kesme dayanımını normal gerilme ile ilişkilendirir. Kayalarda nadiren ölçülür (zeminler için önemlidir).

### İçsel Sürtünme Açısı, $\phi$

Coulomb denklemi vasıtasıyla, basınçlı kesme dayanımını uygulanan normal yük ile ilişkilendirir:

$$s = c + \sigma_n \tan \phi$$

- kesme dayanımı = kohezyon + normal gerilme x tan  $\phi$ .

### Kesme Dayanımı ( $S_i$ , $S_s$ )

Serbest halde doğrudan kesmeye karşı dirençtir.

Uygulanan genel ilişki:  $UCS = 2S_s \tan(45 + \phi/2)$ .

$S_s$  sağlam kayada UCS/6'dan yumuşak kilde UCS/2 arasında değişir.

İlk makaslama pik dayanım makaslanan yüzey boyunca rezidüel dayanıma doğru düşer; kaya kırılma eğilimi (dayanımın pik sonrası azalımı) ile ilgili olarak kabul edilmiş bir ölçüt bulunmamaktadır.

Kesme dayanımı zeminlerin kohezyonuna (c) eşdeğerdir.

## SUYUN ETKİLERİ

Suyun varlığı ve artan herhangi boşluk suyu basıncı kaya dayanımını hayli azaltır.

Su mineraller arasındaki bağı engellemek suretiyle bazı sedimenter kayalarda kil çimentonun bozulmasına neden olur.

**Boşluk suyu basıncı** çevre basıncına zıt yönde etkir; bu da üç eksenli durumda efektif normal gerilmeyi ve böylece basınç altındaki kesme dayanımını azaltır. Killerde ve zeminlerde önemlidir.

Doğunluk  $\phi$ 'yi hafifçe ve görünür kohezyonu da hayli azaltır.

Su zayıf ve gözenekli kayaların dayanımını önemli ölçüde azaltmakla birlikte, gözenekliliği düşük kayalardaki etkisi fazla değildir.

### Dayanımın Teşhisi ve Tanımı

Kaya/zemin tanımı	UCS (MPa)	Arazi özellikleri
Çok sağlam kaya	> 100	Sağlam çekiç darbesiyle kırılır
Sağlam kaya	50-100	Çekiçle kırılır
Orta sağlam kaya	12,5-50	Çekiç darbesiyle oyulur
Orta zayıf kaya	5,0-12,5	Elle kesilemez
Zayıf kaya	1,5-5,0	Çekiç darbesiyle dağılır
Çok zayıf kaya	0,6-1,5	Elle kırılır
Çok sert zemin	0,3-0,6	Tırmakla çizilir
Sert zemin	0,15-0,3	Parmakla yoğrulamaz
Sağlam zemin	0,08-0,15	Parmakla yoğrulur
Yumuşak zemin	0,04-0,08	Kolay yoğrulur
Çok yum. zemin	< 0,04	Parmaklar arasından kaçar

## DAYANIM DENEYİ

Laboratuvar kaya dayanım deneyleri (özellikle zayıf sedimenter kayalarda) kaya değişimlerinden dolayı sorunlu olabilmektedir. Bu nedenle, tüm değerlerde  $\pm 20$  gibi bir hata söz konusudur. Ayrıca, kıvrıksız kaya deneylerinde, kaya kütlesi dayanımında baskın olan çatlak etkisi dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle, pratikte kayayı tanımlamak ve dayanım değerlerini tablolardan belirleme amaç için yeterli olmaktadır.

### Serbest Basınç Deneyi

Küp veya alt ve üst yüzeyleri paralel kesilmiş silindirik şekilde kaya numunesi düz çelik balıklar arasında eksenel olarak yüklenir; numune çapı  $\geq 54$  mm'dir.

### Üç Eksenli Deney

Kaya numunesi, ışınal eksenleri boyunca eşit derecede çevre basıncı ( $\sigma_3$ ) uygulanarak uzun eksenli boyunca yüklenir ( $\sigma_1$ ). Sonuçlar Mohr diyagramına aktarılarak c ve  $\phi$  bulunur.

### Halka Kesme Deneyi

Silindirik kaya numunesinin iki çap düzleminde kesme uygulanır. Çevre basıncı altında  $\phi$  açısını bulmada da kullanılan çok sayıdaki kesme deneyinden biridir. Genellikle zayıf kayalar ve zeminler ile sınırlıdır.

### Brazilian Deneyi

Silindirik kaya numunesi iki düz çelik bağlık arasında çapsal olarak yüklenir.

Doğrudan çekme deneyinden daha kolaydır.

### Nokta Yükleme Deneyi

Silindirik kaya numunesi, çapı 5 mm ve koni açısı  $60^\circ$  olan iki çelik çene arasında yüklenir.

Standart seyirli düz zeminde kuyu karotları üzerinde doğrudan ve çabuk deneyler yapmak için idealdir.

Boyutları 1:1:2'ye yakın düzensiz kaya parçalarına da çoklu deneyler şeklinde uygulanabilir.

54 mm'lik karot kullanılır veya (büyük karotlar düşük değerler verdiğinden) düzeltme faktörü uygulanır ve çatlak yenilmelerinden dolayı küçük değerler ihmal edilir.

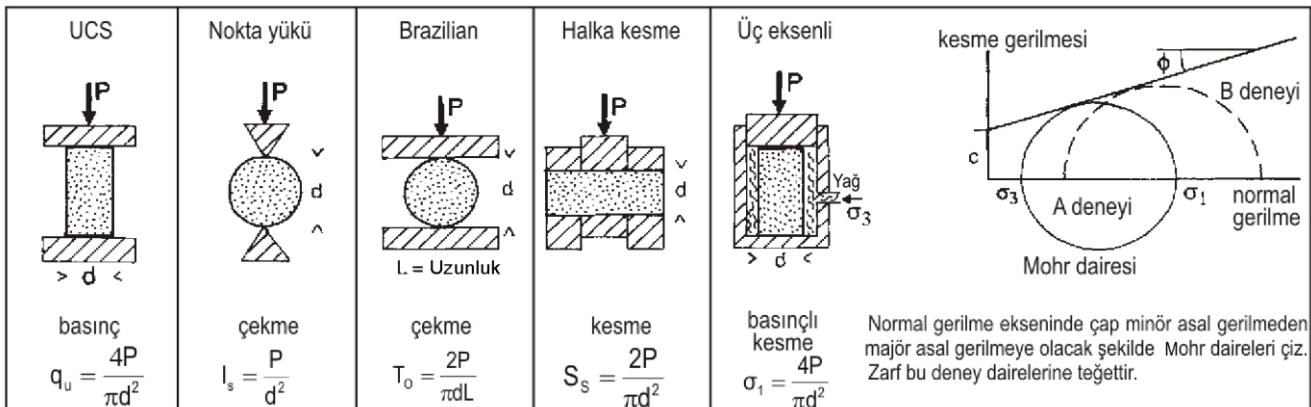
### Schmidt Çekici

Elle kullanılan ve yayla yüklenen çekiç, kaya yüzeyinden sekme ölçer; sekme değerleri UCS ile denestirilir. Çatlaklı kayada değerler azalır.

Schmidt sertliği 20 30 40 50 60

UCS (MPa) 12 25 50 100 200

Çok çabuk arazi deneyleriyle, mostra veren kaya yüzeyinde zayıf veya bozmuş ya da kırıklı gevşek bloklar tespit edilebilir.



# Kaya Kütlesi Dayanımı

Bir kaya kütlesinin dayanımı önemli ölçüde kaya kütlesi içindeki çatlakların sıklığı, doğası ve yayılımına bağlıdır. Kaya kütlesi dayanımı ayrıca kaya dayanımı, bozuşma ve su koşulları ile de ilişkilidir.

## ÇATLAK SIKLIKLARI

Kaya kırıkları mikro-fisürleri (açıklıkları çoğunlukla 1 mm – 1 cm), eklemeleri (1 cm – 1 m) ve fayları (> 1 m) kapsar. Tabakalanma, klivaj ve şistozite de bu türdendir. Kırıklar inelastik deformasyona olanak verir ve kaya kütlesi dayanımını kıriksiz kaya dayanımının 1/5'i ile 1/10'una düşürür.

Bu kesire Kaya Kütlesi Faktörü denir.

RQD hariç, kırık yoğunluğu değerlendirmesi öznelidir.

**Kaya Kalite Göstergesi (RQD)** çapı 50 mm'den büyük kuyu karotları üzerinde yapılan nicel bir kırık değerlendirmedir; karotlar kuyudan geldikçe uzunlukları ölçülür ve RQD değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

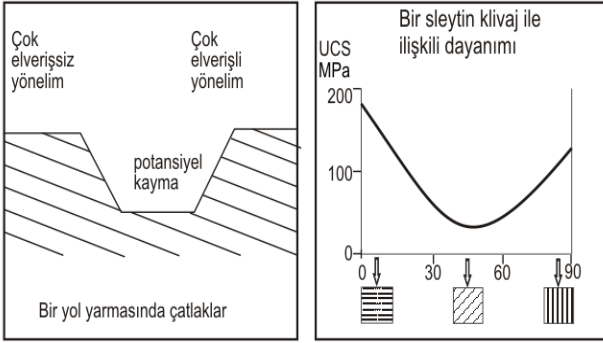
- $RQD = \sum(\text{uzunluk} > 10 \text{ cm karotlar}) \times 100 / \text{kuyu derinliği}$ .

RQD > 70 değerleri genellikle sağlam kayaya işaret eder.

## KIRIK YÖNELİMİ

Yönelim etkisi sadece belirli bir sahada veya sahanın bir kısmında kayma veya dönme şeklinde bir potansiyel yenilmeye göre elverişlilik cinsinden öznel olarak değerlendirilir.

Yönelimin önemi, iyi tanımlanmış klivaj içeren sleyt bloklarında UCS değişimi şeklinde gösterilmiştir.



## KIRIK ÇEŞİTLERİ

Kırık pürüzlülüğü kırığın kesme dayanımını etkiler.

Çok pürüzlü yüzeylerin makaslanması, düzensizliklerin birbiri üzerine aşması sırasında kaya kütlesinde hacimsel genişlemeye neden olur. Pürüzlülüğün değerlendirilmesi ve nicelleştirilmesi zordur.

**Kırık dolguları** kil dolgu, bozuşmadan dolayı oluşan kil, breş ve kayma çizikli dolgu şeklindedir.

Tipik sürtünme açıları ( $\phi$ ):	temiz kaya	20-50°
	kil dolgu	10-20°
	breş	25-40°

Kırıkların kohezyon değeri 0-500 kPa arasında değişir.

## KAYA KÜTLESİ SINIFLAMASI

Kaya kütlesi dayanımının değerlendirilmesinde farklı jeolojik özelliklerin kümülatif etkileri ortaya konur.

Sınıflama bu nedenle, seçilmiş parametrelere verilen değerlerin bir ağırlıklı ortalamasıdır.

En yaygın olarak kullanılan sistemler, puanlama değerlerini toplayan Jeomekanik RMR sistemi (aşağıda) ve puanlama değerlerini çarpan Norveç Q sistemidir. Bu sistemlerin ikisinde de kırık özellikleri baskındır.

Kaya kütlesi sınıfının yer parametreleri için uygun kılavuz değerler verdiği spesifik mühendislik problemlerine uygulamalar aşağıda alt tabloda verilmiştir.

Kaya Kütlesi Puanlaması (RMR) **jeomekanik sınıflaması** aşağıdaki tabloda verilen parametreleri ve puanlama değerlerini kullanır.

**Norveç Q sisteminde** kaya kütlesi kalitesini (Q) belirlemek için puanlama değerleri şu şekilde çarpılır:

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

Puanlamada kullanılan faktörlerin iyiden kötüye doğru değişen değerleri şöyledir:

RQD = Kaya kalite göstergesi	100-10
$J_n$ = Eklem takım sayısı	1-20
$J_r$ = Eklem pürüzlülük faktörü	4-1
$J_a$ = Eklem ayrışması ve kil dolguları	1-20
$J_w$ = Eklemde su akışı veya basıncı	1-0,1
SRF = Kazıdan dolayı gerilme azalım faktörü	1-20

Q değerleri < 0,001 ile > 100 arasında değişir.

Q sistemi eklerde (s. 82) tablo halinde verilmiştir.

## Kaya Kütlesi Puanlaması İçin Jeomekanik Sistem

Parametre	Sayıların değerlendirilmesi ve puanlama					
Kıriksiz kaya UCS, MPa	> 250	100-250	50-100	25-50	1-25	
Puanlama	15	12	7	4	1	
RQD %	> 90	75-90	50-75	25-50	< 25	
Puanlama	20	17	13	8	3	
Ortalama çatlak açıklığı	> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm	
Puanlama	20	15	10	8	5	
Çatlak koşulları	pürüzlü sıkı	açık < 1 mm	bozuşmuş	dolgu < 5 mm	dolgu > 5 mm	
Puanlama	30	25	20	10	0	
Yeraltı suyu durumu	kuru	nemli	ıslak	damlama	akma	
Puanlama	15	10	7	4	0	
Çatlak yönelimi	çok elverişli	elverişli	orta	elverişsiz	çok elverişsiz	
Puanlama	0	-2	-7	-15	-25	
Kaya Kütlesi Puanlaması (RMR) değeri, altı grubun toplamıdır.						Yönelim değerlerinin negatif olduğuna dikkat ediniz.

## Kaya Kütlesi Sınıfları İçin Kılavuz Özellikler

Sınıf	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Kötü kaya	Çok kötü kaya
RMR	80-100	60-80	40-60	20-40	< 20
Q değeri	> 40	10-40	4-10	1-4	< 1
Sürtünme açısı, $\phi$ (°)	> 45	35-45	25-35	15-25	< 15
Kohezyon (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
SBP (MPa)	10	4-6	1-2	0,5	< 0,2
Güvenli şev açısı (°)	> 70	65	55	45	< 40
Tünel desteği	yok	nokta bulonlar	paternli bulon	bulon + püskürtme b.	çelik kafes
T. çapı için kemerlenme süresi	15 m için 20 yıl	10 m için 1 yıl	5 m için 1 hafta	2 m için 12 saat	1 m için 30 dak

## Kaya Üzerindeki Temeller

### EMNİYETLİ TEMAS BASINÇLARI

Örselenmemiş yerde güvenle uygulanabilen maksimum yükler için kılavuz değerlerdir. Çok değişik şekillerde hesaplanabilirler. Hepsisi de geçmiş deneyimlere dayalı olup, değişik yer koşullarını dikkate almak için oldukça geniş bir aralıktaki emniyet katsayılarını kullanırlar.

Kırıklı kaya kütleleri üzerinde arazi deneyleri yapmak ekonomik olmadığından, kesin olmayan tasarım kılavuzları olarak faydalı değerlerdir. Kaya türüne bağlı olabilirler:

Emniyetli Temas Basıncı – tipik değerler		
Kaya çeşitleri	Bozuşmamış ve masif	Aşırı çatlaklı veya ince tabakalı
Sağlam mağmatik kaya, gnays	10 MPa	6 MPa
Sağlam kireçtaşı ve kumtaşı	4 MPa	3 MPa
Şist ve sleyt	3 MPa	2 MPa
Sağlam çamurtaşı, yumuşak kumtaşı	2 MPa	1 MPa
Şeyl, sağlam tebeşir, yum. çamurt.	0,75 MPa	0,4 MPa

Ya da, kaya dayanımına ve kırılmaya dayalıdır:

Güvenli temas basıncı – kılavuz değerler					
UCS (MPa)	100	4	8	12	SBP (MPa)
25		1	3	5	
10		0,2	1	2	
RQD	25	70	90		
Kırık açıklığı	60	200	600 mm		

Geliştirilmiş SBP hesaplamalarında kaya modül oranı (E/UCS) dikkate alınabilir; aynı UCS ve RQD değerleri için kireçtaşı ve granit gibi modül oranı yüksek ve daha az deforme olabilir; kayalara şeyl gibi daha yumuşak kayalara kıyasla daha yüksek SBP değerleri tayin edilebilir.

SBP değerleri ayrıca temel şekline bağlı geleneksel faktörlerle göre de ayarlanabilir. Geniş, sıg veya tekrarlı yüklenmiş temellerdeki dayanım azalmaları kayaların (zeminlerden farklı olarak) yüksek taşıma gücünden dolayı genellikle önemsizdir.

**Oturmalar** kayalarda genellikle küçük olup, taşıma gücü ölçütleri belirlendikten sonra çok ender olarak kısıtlayıcı etkileri söz konusudur (normalde bunlar il zeminler üzerindeki kısıtlayıcı faktörlerdir).

**UBP** = Nihai temas basıncı = yenilmedeki yük  
**SBP** = Emniyetli temas basıncı = UBP / emniyet katsayısı; genellikle 3 olarak alınır. Zeminler için uygulanan emniyetli taşıma değerine benzer.  
**ABP** = Kabul edilebilir temas basıncı = Oturma gibi spesifik yapısal şartları sağlamak üzere SBP daha da azaltılır. Azaltma faktörü zeminlerde önemli olabilir. Kayalarda 1 civarındadır.

### TORONTO CN KULESİNİN TEMELLERİ

550 m yüksekliğinde, 110.000 ton ağırlığında desteksiz duran dünyanın en yüksek yapısıdır.

Bazı zayıf bantlar da içeren ve haritalama yoluyla kaçınılan, UCS = 10-25 MPa, E = 3,7 GPa, RQD = 50-80 olan şeyl üzerine inşa edilmiştir.

Radye temelin derinliği yüzeyden 10 m aşağıda olup, temel kaya seviyesinin 7 m altında yer alır. Şeyl üzerindeki ortalama yük 580 kPa'dır. Şiddetli rüzgarlardaki pik yük 2,89 MPa'ya kadar çıkmaktadır (aynı kayadaki derin kesonlarda 7,2 MPa'lık tasarım SBP değerine göre düşük bir değerdir).

Kazılarda rastlanan 6 mm kabarma meydana gelmiş; yapının tamamlanmasından sonra 6 mm oturma gözlenmiştir.

### KAYA YENİLMESİ

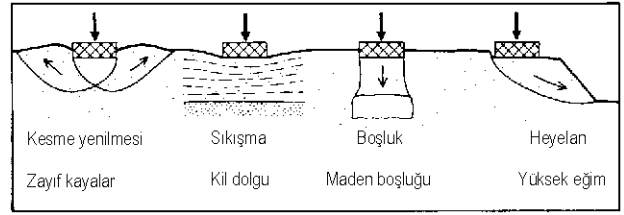
Sağlam kaya normal mühendislik yüklerinin çoğunu taşıyabilir; aynı şey zeminler için söylenemez.

Kaya özelliklerindeki normal değişimler mühendislik tasarımında emniyet katsayısını yüksek almak suretiyle hesaba katılır.

Yeraltı boşlukları da dahil olmak üzere, önemli ana zayıflık zonları yenilmelere neden olabilir; yeterli saha incelemeleri ile bunlardan kaçınılmalıdır.

Belli başlı dört yenilme şekli vardır:

- Uygulanan yükün kaya dayanımından büyük olmasından dolayı kesme yenilmesi ve kayanın yukarı doğru yerdeğiştirilmesi.
- Uygulanan yükün kaya dayanımından büyük olmasından dolayı gözenekli kayaların kompaksiyonu (aşırı oturma)
- Yeraltı boşluklarında tavanının kesme veya fleksürel çekme ile yenildiği kaya yenilmesi.
- Yamaç profilinin çok eğimli olduğu yerlere kütle kayması ve yanal yerdeğiştirme.



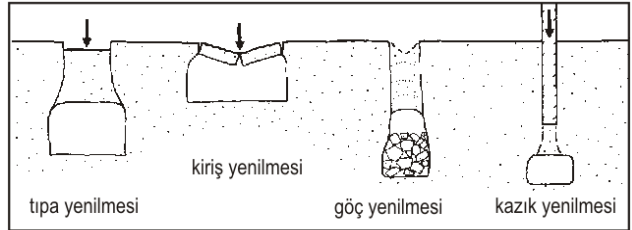
### GÖMÜLÜ BOŞLUKLARIN ETKİSİ

Yeraltı boşlukları üstündeki kayanın yapısal yükler altında tıpa veya kiriş şeklinde yenilmesi kaya dayanımı ve çatlaklanmaya, boşluk boyutu ve derinliği ile uygulanan yüklere ve gerilmelere bağlıdır.

Doğal veya işletilmiş maden boşlukları boyut, şekil ve duraylılık açısından çok değişken olabilir; mühendislik çalışmaları ile ilgili olmaları halinde her biri bireysel değerlendirme gerektirebilir.

Aşağıdaki kılavuz ölçütlerden birinin sağlanması durumunda yenilme riski artar:

- Örtü kalınlığı < boşluk genişliği
- Uç taşıma kazıkları altında örtü kalınlığı < kazık çapının 5 katı
- 3 m'den ince sağlam kaya üzerinde SBP değerinde yükleme
- Boşluk yüksekliğinin 10 katından küçük zayıf kaya veya zeminin (ilerlemeli yenilme ve boşluk göçü şeklinde) yüklenmesi.



### YERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Yapı temellerindeki kırıklı kayalar nadiren iyileştirilir.

Yüzeye yakın zayıf kayalar sıyrılır veya kazıkla geçilir.

Enjeksiyonun başarısı, kayanın geçirgenliğine bağlıdır.

**Enjeksiyon** fisürlü kayada kütle dayanımını ikiye katlayabilir. 10 cm çaplı deliklerden verilen çimento ile boşluklar doldurulabilir. Erime boşluklarının kısmen bloke olması halinde 3-4 m aralıklı delikler ağı kullanılabilir; 1:10'luk çimento:sıvı oranı kullanılır; kum ve çakılda fazla kayıpları önlemek için, sert enjeksiyon maddesi ile çevre bariyeri oluşturulur. Çimento enjeksiyonuna alternatifler (sadece ilerlemeli tavan göçmelerini önleme durumunda) köpüklü beton veya çimentosuz kaya macunu olabilir.

