

BAHAN AJAR

# HIDROGEOLOGI

TGS 7505



Disusun oleh:

Paramita Teja Trisnaning, S.T., M.T.

Dr. T. Listyani R.A., S.T., M.T.

Ir. Joko Sungkono

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOLOGI  
SEKOLAH TINGGI TEKNOLOGI NASIONAL  
YOGYAKARTA

2019

HALAMAN PENGESAHAN

BAHAN AJAR

# HIDROGEOLOGI

TGS 7505



Mengetahui/menyetujui  
Ketua Jurusan Teknik Geologi

(Ign. Adi Prabowo, S.T., M.Si.)  
NIK. 1973 0251

Yogyakarta, Juli 2019

Dosen Pengampu

(Dr. T. Listyani R.A., S.T., M.T.)  
NIK. 1973 0077

## **KATA PENGANTAR**

Terima kasih dan puji syukur kepada Tuhan YME yang telah memberikan berkat rahmatNya sehingga bahan ajar kuliah Hidrogeologi ini dapat selesai disusun. Mata kuliah Hidrogeologi ini merupakan mata kuliah wajib dengan kode TGS 7505, bobot 2 sks, yang diajarkan pada mahasiswa Teknik Geologi S1, STTNAS Yogyakarta pada semester 5.

Bahan ajar ini merupakan rangkuman materi berisi berbagai macam materi tentang airtanah, baik sifat fisik maupun kimianya. Hal-hal yang dibahas dalam bahan ajar ini segala sesuatu yang berkaitan dengan airtanah dalam hubungannya dengan ilmu geologi.

Dengan selesainya bahan ajar ini, penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Rektor Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
2. Ketua Program Studi Teknik Geologi, ITNY beserta staf.
3. Segenap rekan dosen, asisten maupun mahasiswa yang membantu penyusunan bahan ajar ini.

Semoga bahan ajar ini bisa menjadi pegangan mahasiswa dalam menempuh mata kuliah Hidrogeologi dengan baik.

Yogyakarta, Juli 2019

Penulis

## DAFTAR ISI

I.	Pendahuluan Hidrogeologi .....	1
II.	Siklus Hidrologi dan Keterdapatn Airtanah .....	33
III.	Pemunculan Airtanah .....	83
IV.	Jenis dan Pengujian Akuifer .....	107
V.	Aliran Airtanah .....	136
VI.	Hidrolika Sumur dan Pengujian Akifer .....	165
VII.	Kualitas Airtanah .....	207
VIII.	Penyelidikan Airtanah .....	238
IX.	Penurapan Airtanah .....	280
X.	Pengotoran dan Penyehatan Airtanah .....	312
XI.	Intrusi Air Laut .....	385
XII.	Pengisian Airtanah Buatan .....	403



# Apakah Hidrologi & Hidrogeologi ?

## Hidrologi

*hydrologia* : ilmu tentang air

cabang dari ilmu Geografi

Ilmu yang mempelajari mengenai pergerakan, persebaran, dan kualitas air permukaan di Bumi.

## Hidrogeologi

**geologi** : ilmu yang mempelajari mengenai batuan dan

**hidrologi** : ilmu yang mempelajari mengenai air.

# Pengertian Hidrogeologi

Ilmu yang mempelajari mengenai air yang berada di dalam tanah (airtanah/groundwater).

Ilmu yang mempelajari penyebaran dan pergerakan air, terutama air tanah yang terdapat di lapisan bawah permukaan.

Ilmu yang mempelajari mengenai hukum-hukum, pergerakan air tanah yang berada di bawah permukaan.

Studi terkait fenomena degradasi/erosi dan pengendapan oleh air. (Lemarc; 1802 dan Powel)

Studi geologi mengenai air bawah tanah/ permukaan (*underground water*). (Lucas; 1879)

Studi mengenai hukum-hukum terkait proses pembentukan dan pergerakan airtanah (*subteranian water*) dengan airtanah sebagai agen geologi. (Meed; 1919)

# Sejarah Perkembangan Hidrogeologi

Pemanfaatan Airtanah

Teori Airtanah  
Klasik

Teori Geohidrologi  
Modern

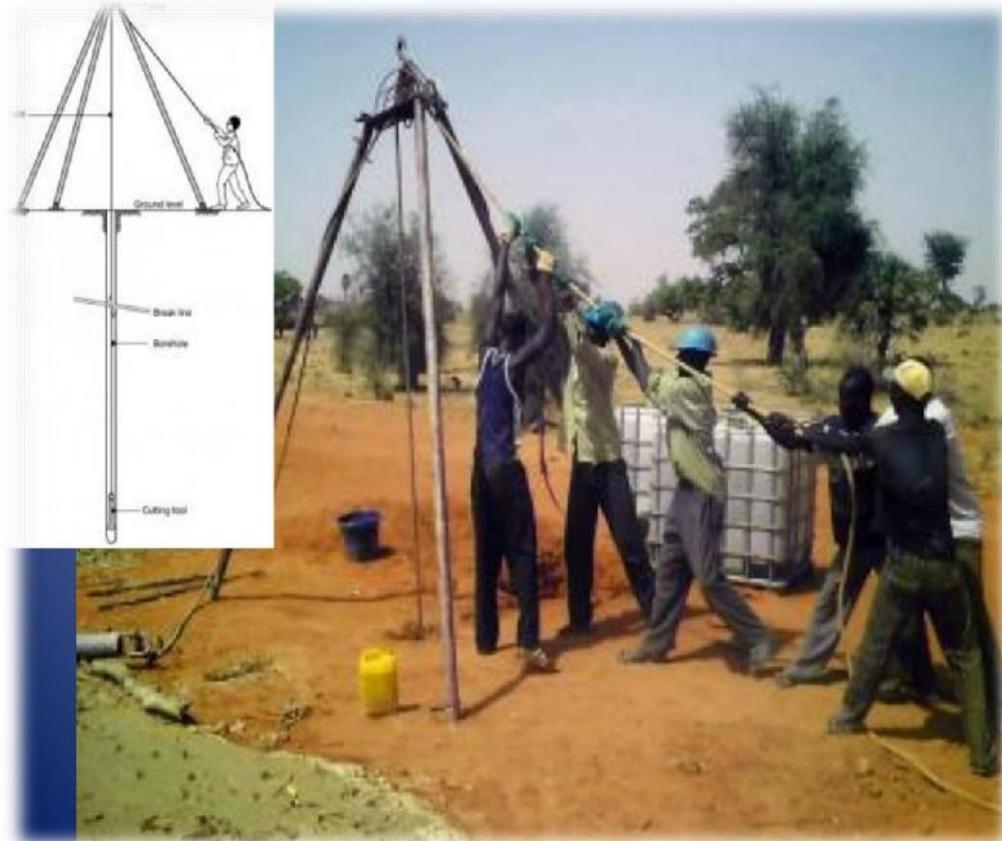
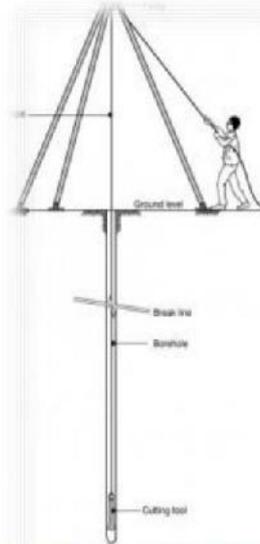
The slide features a light beige background with decorative geometric elements. In the top-left corner, there is a 3x3 grid of squares in shades of blue, red, and beige. In the bottom-right corner, there is a cluster of squares in shades of blue, red, and beige, arranged in a stepped pattern. A prominent dark red horizontal bar spans the width of the slide, containing the title text in white.

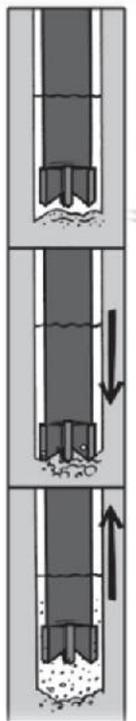
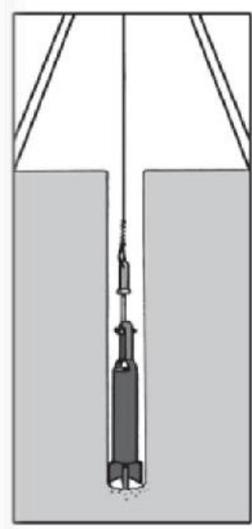
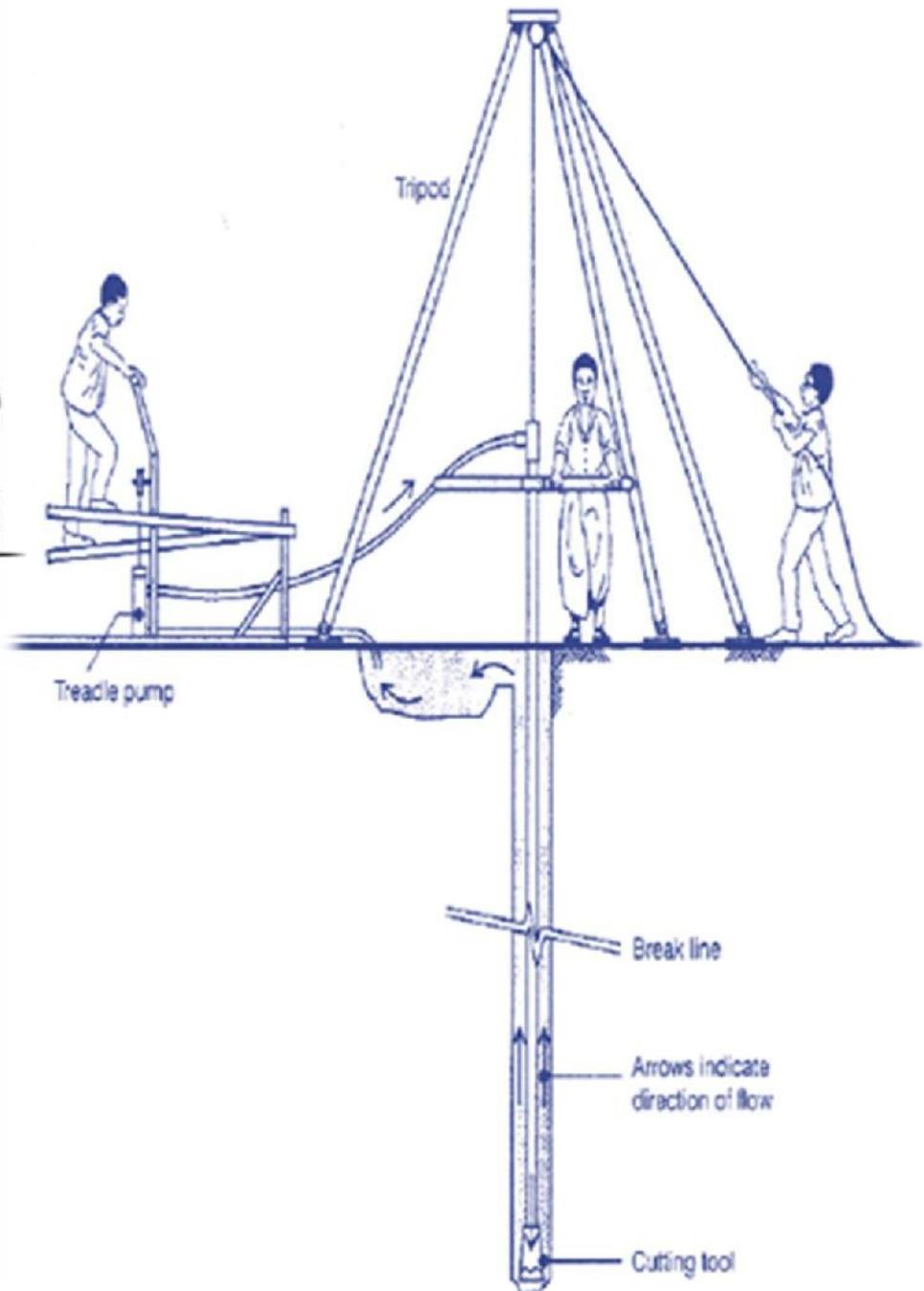
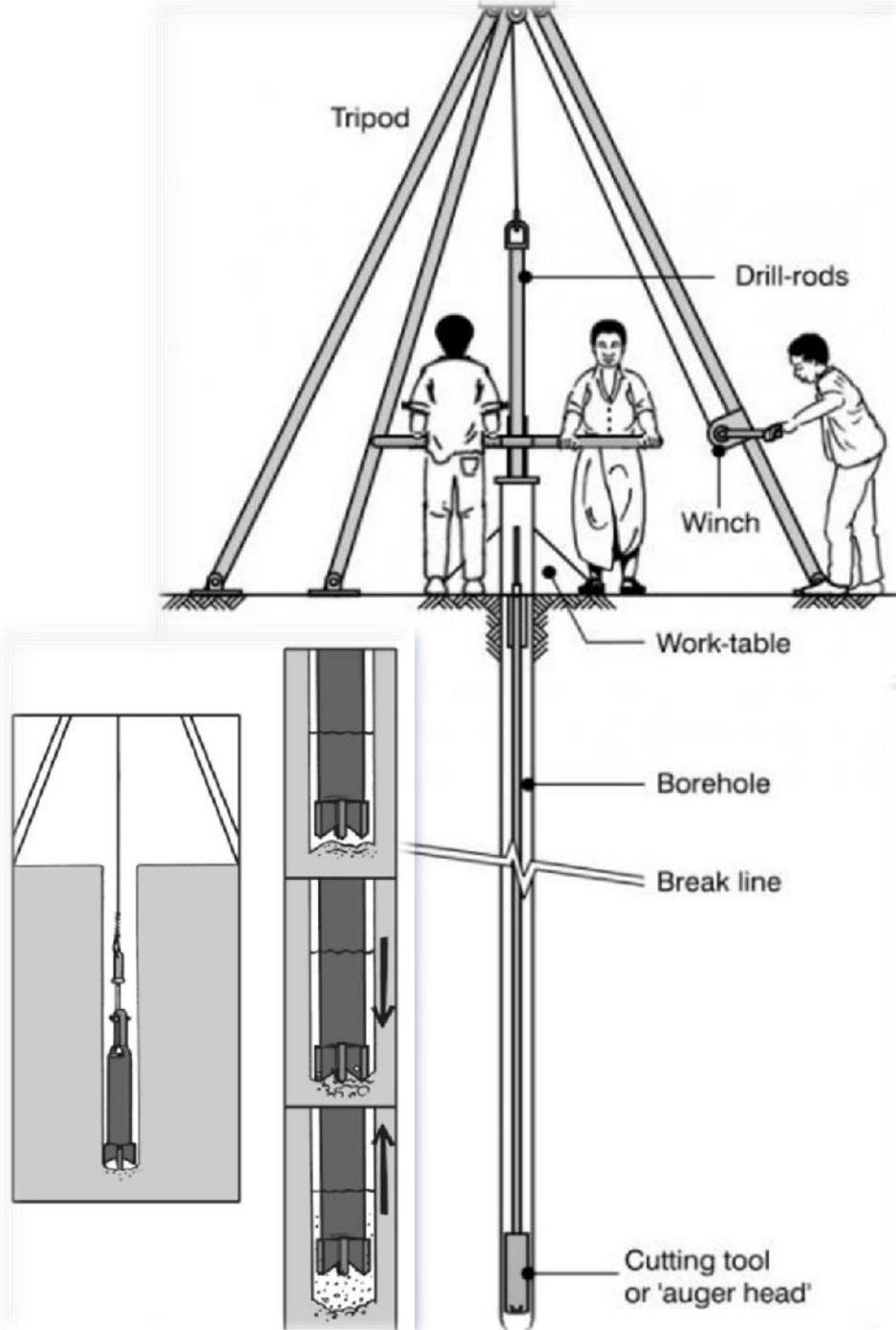
# Perkembangan Pemanfaatan Airtanah

- Sumur dengan pemboran inti, menggunakan peralatan sederhana & tali. Diameter sumur besar & dangkal Mesir; 3000 SM.
- Sumur dengan bor tumbuk, dijumpai di:

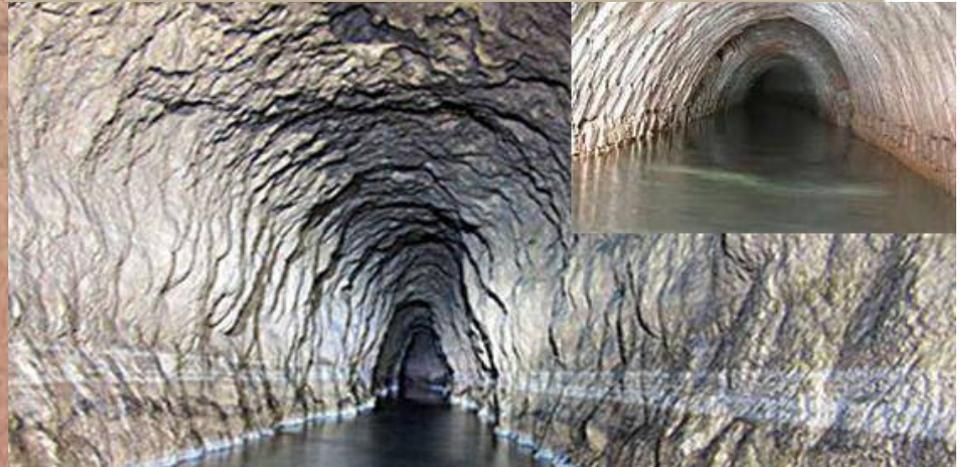
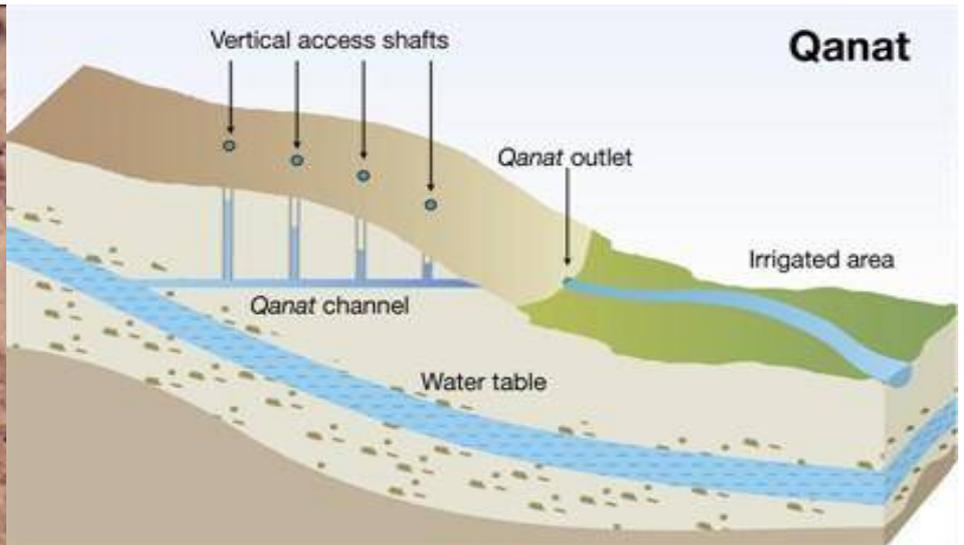
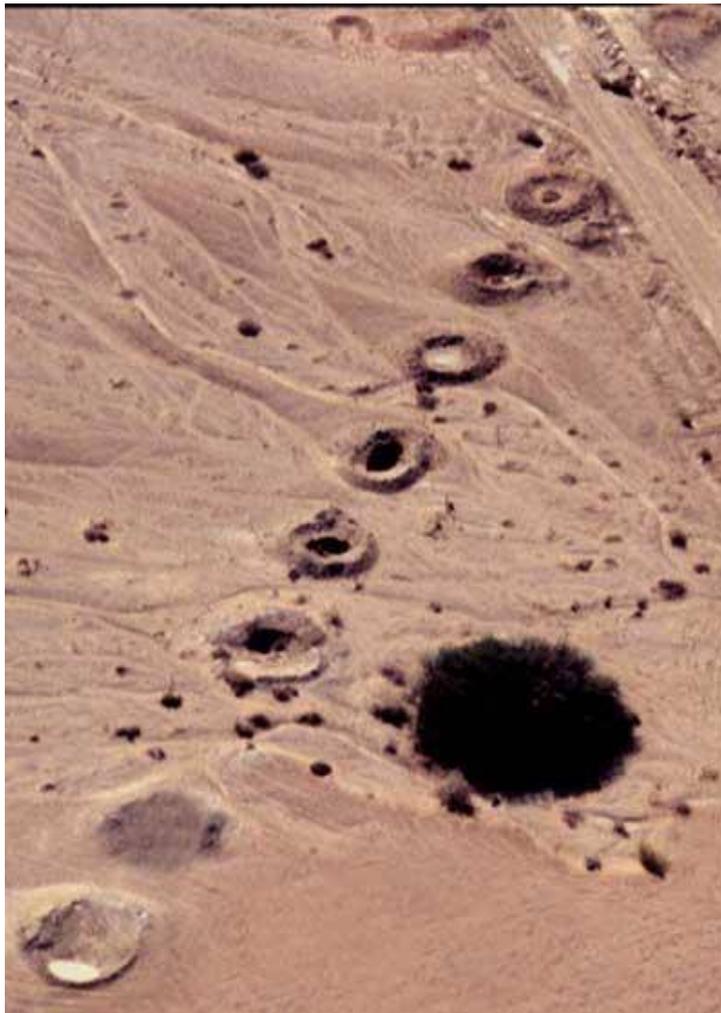
Cina, berlangsung hingga saat ini. Bor tumbuk terbuat dari kayu dengan tenaga penggerak : tenaga manusia/tangan.

Eropa Barat, berkembang hingga akhir abad 18. Kedalaman sumur: 300 m. Salah satunya dijumpai di Flander, tahun 1100, sumur yang dapat mengalirkan airnya sendiri disebut Sumur Artesis.





- Qanat/terowongan air, berfungsi : mengumpulkan airtanah. Umumnya dibangun melalui endapan kipas aluvial maupun batuan lunak. Pertama kali dibangun di Iran  $\pm$  2500 tahun lalu. Qanat di Mesir, terletak di Lembah Sungai Nil, dibangun pada 500 SM mampu mengairi seluas 3.500 km<sup>2</sup>.





# Perkembangan Teori Airtanah Klasik

- Thales (640 - 546 SM) Air keluar melalui batuan dan oleh kekuatan dari dalam batuan, air keluar sebagai mata air.
- Plato (427 - 347 SM) Gua airtanah yang sangat luas merupakan asal dari Sungai. Air akan kembali ke dalam gua melalui bawah tanah dengan mekanismenya berupa siklus.
- Aristoteles (384 - 322 SM) Airtanah terjadi pada sistem spon dan air dapat keluar sebagai mataair. Airtanah pada beberapa gua berasal dari air hujan yang masuk ke dalam tanah.
- Marcus Vitruvius (15 SM) Air berasal dari salju yang terdapat di puncak-puncak gunung, selanjutnya munsul sebagai mataair di daerah yang rendah.
- Lucius Annaeus Seneca (4 SM - th 65) Gunung menerima hujan dengan sebagian air hujan masuk ke dalam tanah melalui pori-pori batuan dan terakumulasi, selanjutnya muncul sebagai mataair di suatu tempat.
- Johannes Kepler, astronom Jerman (1571 - 1630) Mengumpamakan bumi sebagai binatang yang sangat besar yang menghisap dan mencerna air laut, selanjutnya dikeluarkan melalui mataair sebagai airtawar.
- Athanasius Kircher, ahli matematika Jerman (1602 - 1680) Air berasal dari gua-gua besar yang terdapat dalam gunung. Mataair dihubungkan dengan laut melalui saluran-saluran bawah tanah.

- Piere Perault (1608 - 1680)

Mengukur curah hujan di cekungan S. Seine, tahun 1668 - 1669 & 1670 curah hujan rata-rata 520 mm/tahun. Diperkirakan aliran sungai pada daerah tersebut, sebesar  $1/6$  total hujan.

Studi mengenai evaporasi/penguapan & kenaikan kapiler  
kenaikan kapiler pada pasir  $< 1$  meter.

- Marriote

Mengukur infiltrasi hujan di Observatory Prancis. Memperkirakan aliran S. Saine di Pont Royal Paris 200.000 ft<sup>3</sup>/menit dengan  $< 1/6$  total curah hujan sebagai aliran permukaan,  $1/3$  terevaporasi dan  $1/3$  lagi tinggal di dalam tanah.

- Edmund Halley, astronom inggris (1656 - 1742)

Mempelajari evaporasi di Laut Tengah evaporasi yang terjadi sama besarnya dengan aliran sungai yang masuk ke Laut Tengah.

- Henry Darcy (1803-1858)

Orang pertama yang menyatakan hukum matematika pada aliran airtanah berdasarkan percobaan penyaringan pada pasir.



# Perkembangan Teori Hidrogeologi Modern

# Studi geologi terkait pembentukan airtanah

- Geologis Rusia terjadinya airtanah di daerah es.
- Geologis Belanda penyebaran airtanah di daerah gumuk pasir.
- Geologis & geofisis Jepang tentang mataair panas.
- William Smith (1827), Inggris  
Cadangan airtanah dapat ditambah dengan pembuatan dam pada mataair.
- H.T. Stearns, Hawai  
Gua batugamping sebagai contoh yang baik untuk airtanah.
- O.C. Meinzer (1920-1940)  
Mengembangkan metode dalam menginventaris airtanah dan teori aliran artesis.

# Perkembangan persamaan matematika dalam menentukan gerakan air pada batuan maupun endapan lepas.

- J. Dupuit, Perancis  
Mengembangkan formula sederhana menghitung aliran airtanah melalui sumur dengan asumsi muka air relatif datar dan aliran airtanah bersifat hidrostatik.
- Adolph Theim, Jerman (1870)  
Memodifikasi Formula Dupuit sehingga dapat digunakan dalam uji pompa (*pumping test*).
- Philip Forchheimer, Austria (1886)  
Mengembangkan konsep jaring-jaring aliran airtanah.
- C.V. Theis (1935)  
Mengembangkan persamaan aliran air *non steady* pada sumur untuk uji pompa.

# Perkembangan sifat-sifat kimia airtanah

- B.M. Lersch (1864), Jerman  
pertamakali mengembangkan ilmu hidro-geokimia.
- F.W. Clarke, Amerika Utara  
analisa kimia air dan interpretasi geokimia, publikasinya  
antara th 1910 -1925.

# Hidrogeologi

```
graph TD; A[Hidrogeologi] --- B[Geologi]; A --- C[Matematika]; A --- D[Kimia];
```

## Geologi

Studi mengenai proses pembentukan dan persebaran airtanah dalam kaitannya dengan jenis litologi maupun kehadiran struktur geologi, serta sifat kimia airtanah terkait komposisi mineral pada litologi.

## Matematika

Studi mengenai pergerakan airtanah, hidrolika sumur dan studi terkait pengujian kapasitas airtanah.

## Kimia

Studi mengenai penentuan sifat kimia pada airtanah maupun interpretasinya, dan studi terkait penanganan kontaminasi dan penjernihan airtanah

The background features a solid blue color with decorative geometric patterns in the corners. The top-left corner consists of a grid of squares in various shades of blue, light blue, and a reddish-brown. The bottom-right corner features a similar grid of squares in dark blue, light blue, and reddish-brown. A horizontal red bar spans the width of the slide, containing the title text.

# Perkembangan Hidrogeologi di Indonesia

## Pemanfaatan airtanah dengan sumur gali



Pemboran airtanah pada zaman penjajahan Belanda, terutama untuk keperluan militer/VOC.

Pemboran pertama, berupa sumur artesis Jakarta, tahun 1872. Penyebaran sumur dengan pemboran, dijumpai di sepanjang pantai utara Pulau Jawa.

- Awal Pelita, tahun 1969 oleh Direktorat Geologi ± 1.940 sumur bor ± 0.43 juta m<sup>3</sup> air per hari.
- Tahun 1980, penambahan sumur bor oleh perusahaan pemboran ± 1.000 sumur bor 0.74 juta m<sup>3</sup> airtanah per hari.

# Pemanfaatan Airtanah di Indonesia

Pemanfaatan air minum pada:	Kebutuhan air (liter/orang/hari)
Daerah pedesaan	50 – 60
Kota kecil	80 – 90
Kota sedang	110
Kota besar	130
Kota metropolitan	150

- Perlu dilakukan inventarisasi jumlah, ukuran, keperluan dari sumur bor sulit dilakukan, karena banyak sumur bor yang tidak terdaftar.
- Setiap pembuatan sumur bor harus mendapatkan ijin dari Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Pemerintah Daerah/Provinsi).

The background features a light blue gradient. In the top-left and bottom-right corners, there are decorative clusters of squares in various shades of blue, red, and orange. A prominent horizontal red bar spans the width of the slide, containing the title text.

# Keterdapatn Airtanah

Berdasarkan sifat material penyusun lapisan pembawa air, letak/keterdapatannya di alam dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

- Material lepas (*unconsolidated materials*)
- Material kompak (*consolidated materials*)

Kira-kira 90 % airtanah dijumpai pada material lepas berupa pasir, kerikil, campuran pasir dan kerikil, dsb.

# Pembagian jenis batuan & jenis porositas terkait ketersediaan airtanah

(Dept. of Economic and Social affairs, menurut Todd,dk 1980)

Tipe porositas/ kesarangan	Batuan Sedimen			Batuan Beku & Batuan Metamorf	Batuan Vulkanik	
	Kompak	Lepas	Karbonat		Kompak	Lepas
Antar butiran	---	Pasir kerikilan, Pasir lempungan, Lempung pasiran	---	Zona pelapukan dari Granit ataupun Gneis	Zona pelapukan Basal	Batuan vulkanik lepas, berupa blok hingga debu vulkanik
Antar butiran & retakan	Breksi, Konglomerat, Batupasir	---	Batugamping oolitik	---	Breksi vulkanik, Tuf, Batuapung	---
Retakan	---	---	Batugamping dolomit	Granit, Gabro, Diorit, Kuarsit, Gneis, Sekis	Basal, Andesit, Riolit	---

# Keterdapatannya airtanah pada material kompak, dijumpai pada :

- Batugamping

Batugamping dapat bertindak sebagai akuifer, apabila terbentuk banyak retakan lubang pelarutan porositas sekunder.

- Batuan beku gang (dalam)

Batugamping dapat bertindak sebagai akuifer, apabila terbentuk banyak retakan kekar.

- Batuan vulkanik

Batuan vulkanik primer berupa lava basal dapat bersifat sangat lulus air, apabila banyak lubang-lubang bekas gas maupun retakan. Endapan vulkanik, dapat bertindak sebagai akuifer yang baik terutama yang berumur muda.

Berdasarkan daerah pembentukannya, letak/ ketersediaan airtanah pada material lepas dapat dibedakan menjadi empat wilayah, yaitu:

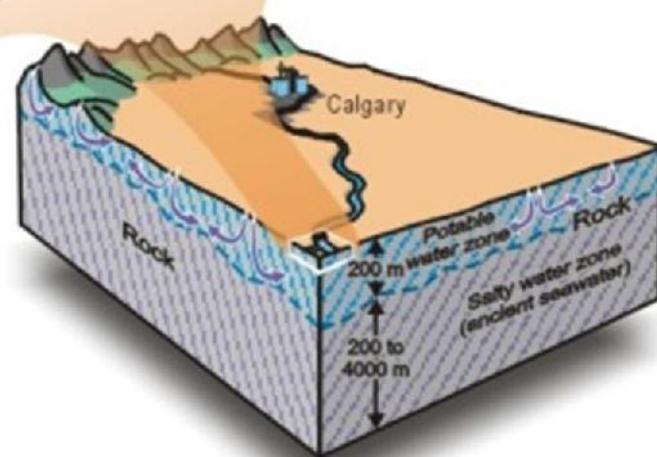
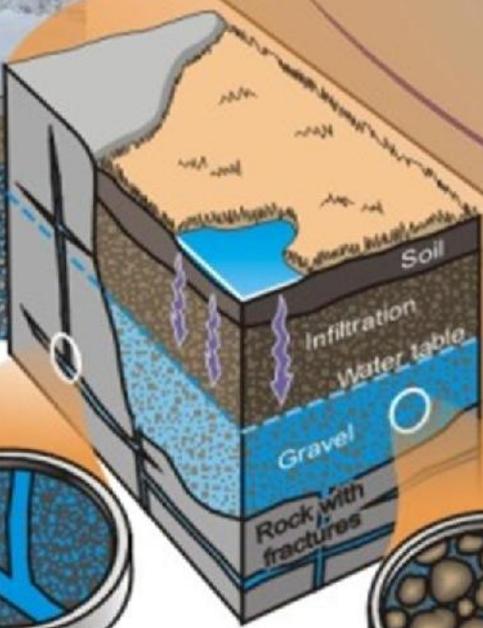
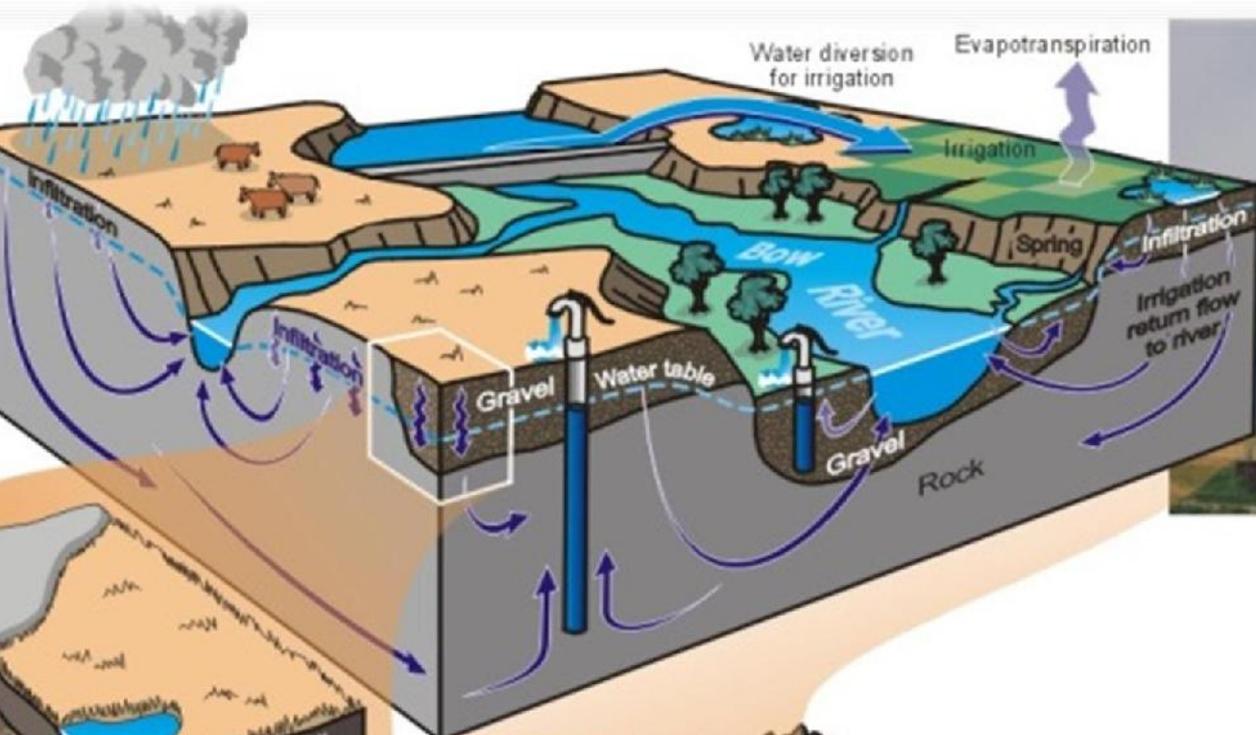
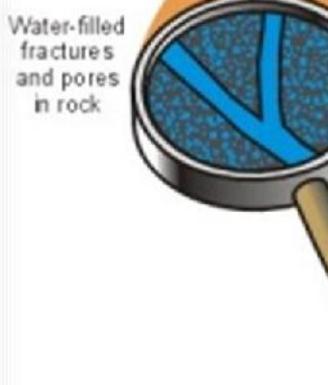
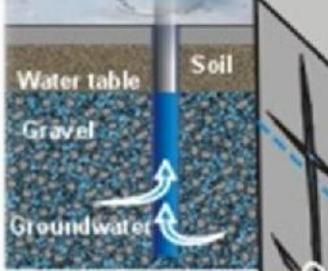
- Daerah aliran air (*water courses*)

Berupa dataran/endapan aluvial yang terletak di kanan kiri sungai yang mengalir. Apabila muka air sungainya lebih tinggi dari muka airtanah, maka potensi airtanah cukup besar.

Daerah ini sangat potensial tersusun oleh material bersifat lepas dan air sungai berperan mensuplai airtanah.

Contoh : Dataran lembah Sungai Citandui, Serayu, Bengawan Solo. Dataran di sini cukup lebar terutama di daerah hilir, hanya sayangnya materialnya sangat halus dan tidak begitu tebal.

A hand pump provides groundwater for drinking at Big Hill Springs Provincial Park, near Cochrane.



A windmill pumps groundwater for cattle southeast of Calgary.

- Daerah lembah mati (*abandoned buried valleys*)

Lembah yang sudah tidak dilewati sungai.

Potensi airtanah cukup besar, namun suplai air yang diterima tidak sebesar daerah aliran air.

Contoh : Sungai-sungai di Sangiran

- Daerah dataran (*extensive plains*)

Dataran luas dengan endapan yang belum mengeras berupa pasir atau kerikil. Pengisian pada umumnya diperoleh dari perkolasi air hujan/sungai.

Contoh :

Dataran pantai, kondisinya ditentukan oleh keadaan geologi daerah pegunungan/perbukitan yang membatasi di bagian atas (daerah aliran sungai/basin) bertindak sebagai pensuplai bahan rombakan yang kemudian diendapkan di daerah rendah (pantai). Perlu diperhatikan kemungkinan adanya penyusupan air laut.

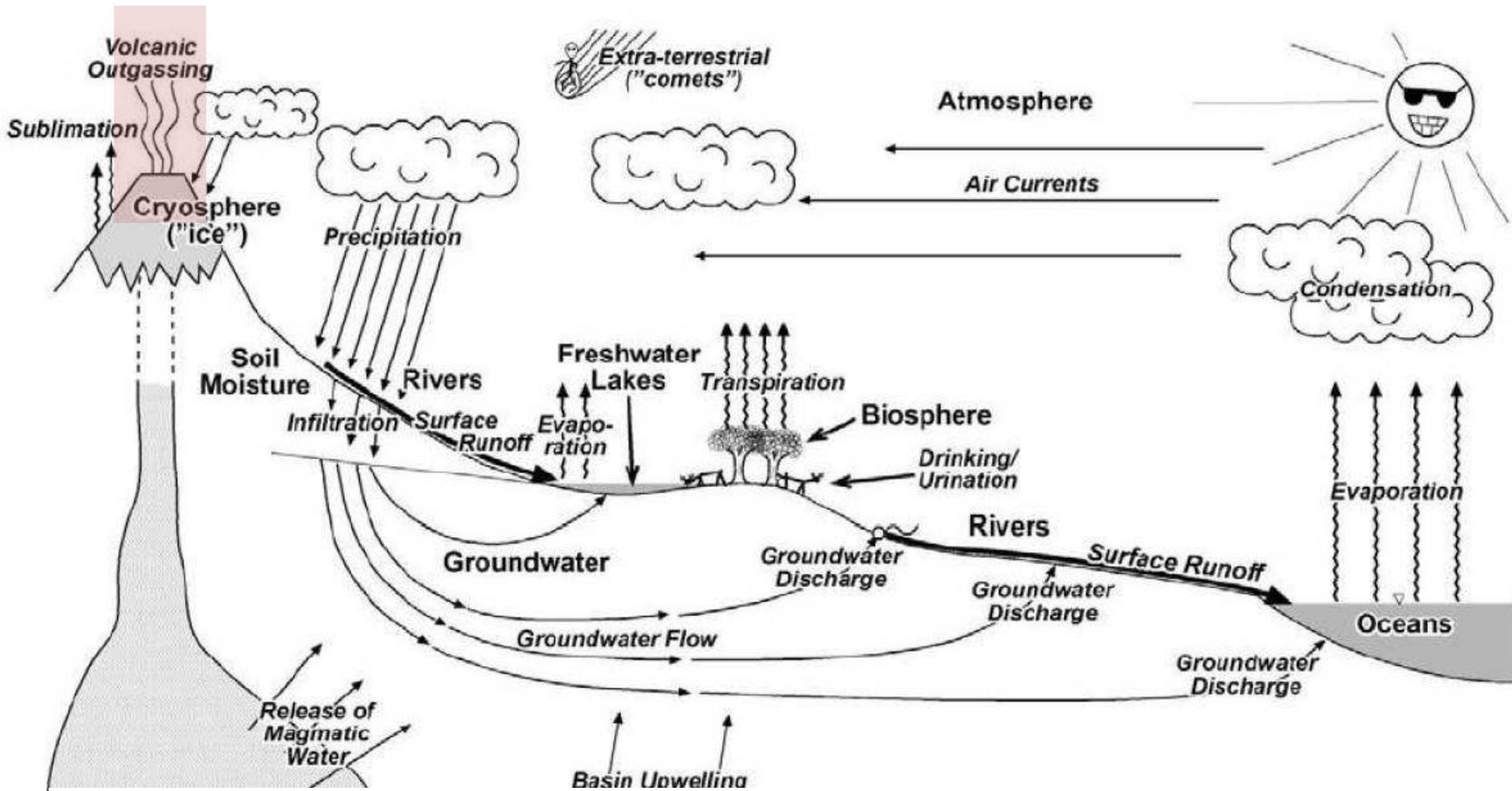
- Daerah lembah antar gunung (*intermountain valleys*)

Lembah yang dikelilingi oleh pegunungan/gunung dan tersusun oleh material lepas dalam jumlah yang sangat besar, berupa pasir dan kerikil. Daerah ini, menerima pengisian dari daerah tinggian (*recharge area*) di sekelilingnya maupun dari rembesan-rembesan sungai di mulut kipas alluvial.

Pada umumnya merupakan lembah-lembah tersendiri yang terpisah-pisah oleh pegunungan/gunung dengan jenis akuifer berupa airtanah tertekan.

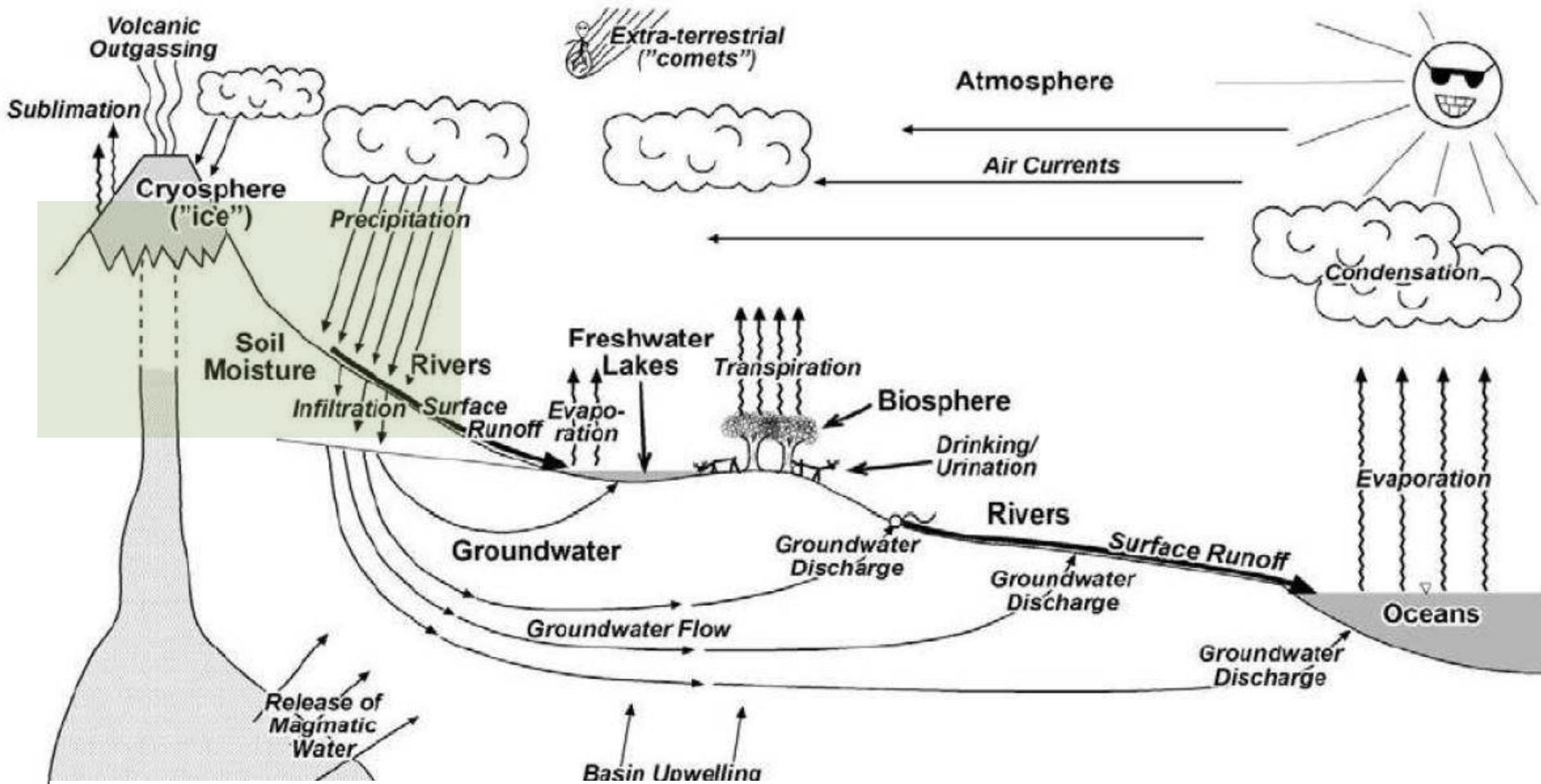
# Berdasarkan morfologinya, daerah gunungapi berperan dalam pembentukan airtanah, yaitu:

- Daerah puncak/kerucut gunung api
- Daerah tubuh gunungapi
- Daerah kaki gunungapi



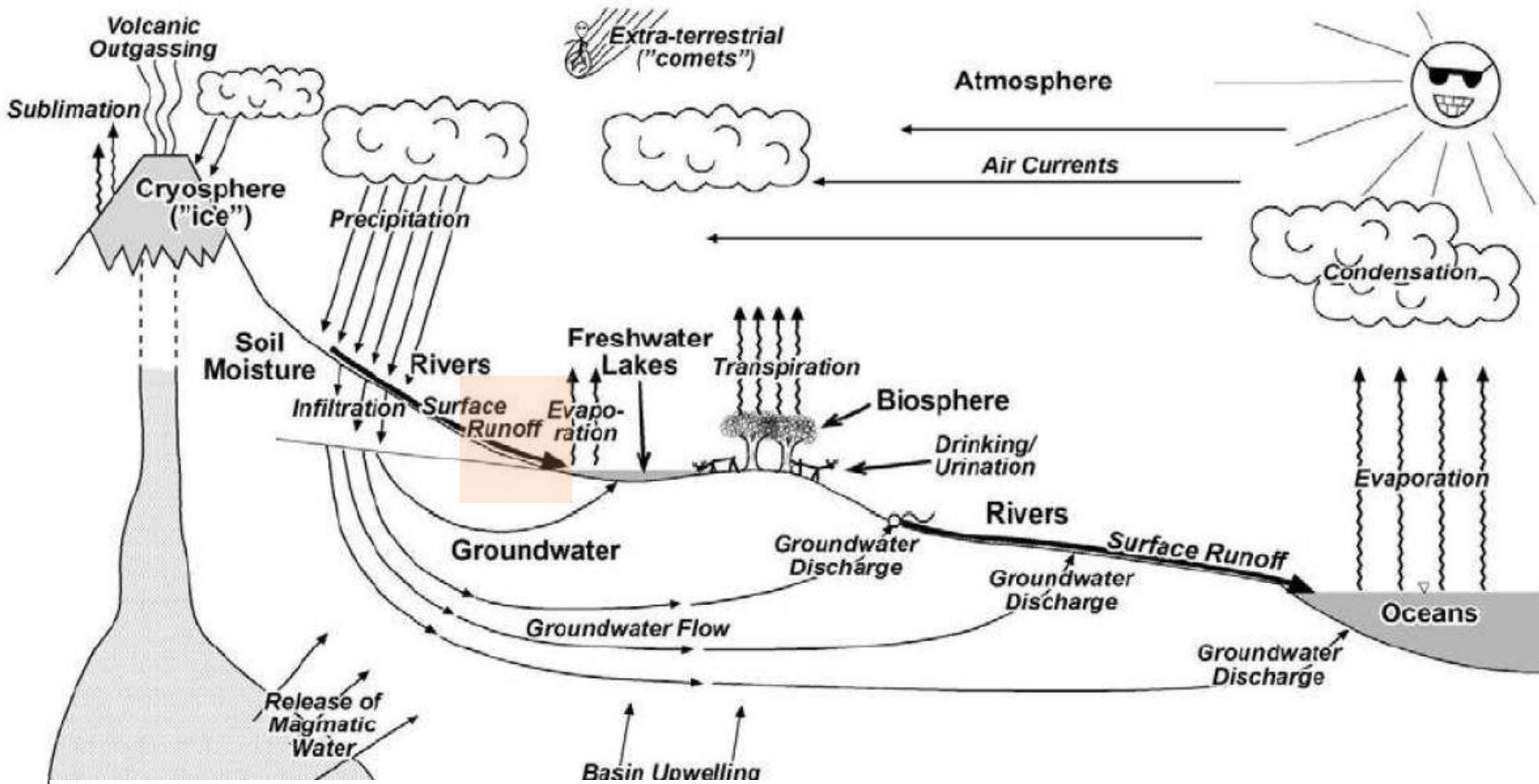
- Daerah puncak (kerucut gunungapi)

Daerah pengaliran permukaan dengan kemiringan lereng > 35°.



- Daerah tubuh gunungapi

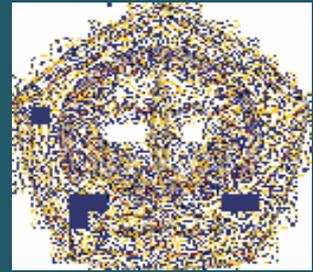
Daerah perkolasi daerah awal terbentuknya airtanah, di sini sudah dijumpai adanya mataair. Kemiringan lereng  $10^{\circ}$  -  $20^{\circ}$ .



- Daerah kaki gunungapi  
Daerah utama terbentuknya airtanah, kemiringan lereng  $< 5^\circ$ .

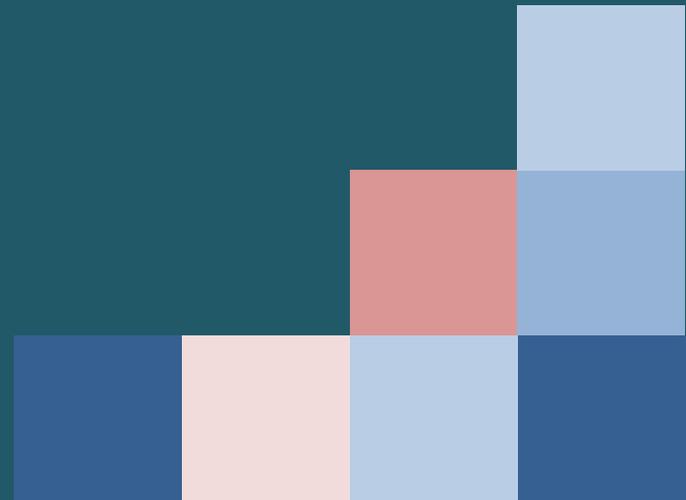
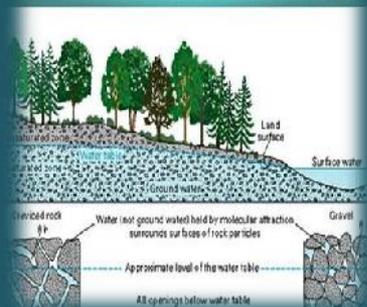
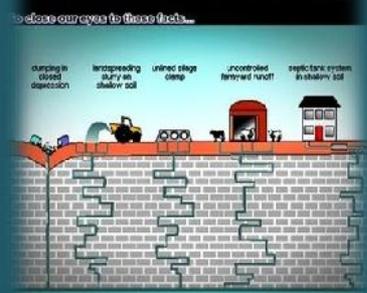
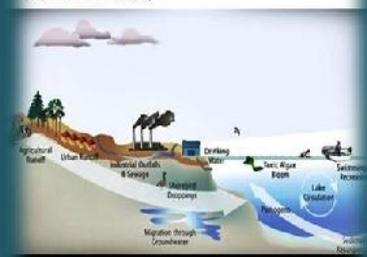
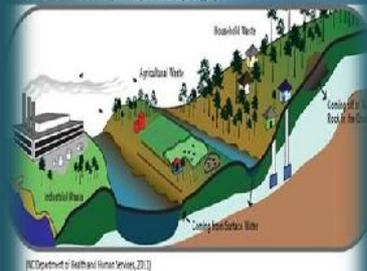


TERIMAKASIH



# BAB II

# SIKLUS GEOHIDROLOGI





# Pembentukan Airtanah

Airtanah seluruh jenis air yang ditemukan di bawah permukaan Bumi. Dengan demikian, airtanah dapat berupa:

- (1) Uap lembab/embun/butiran air yang ditemukan mengisi lubang antar pori pada tanah.
- (2) Air tawar hingga air sedikit asin yang ditemukan pada unit geologi bersifat jenuh yang berada dekat permukaan dimanfaatkan untuk minum & irigasi.
- (3) Air yang sangat asin, berasosiasi dengan endapan petroleum ataupun unit sedimen dalam.
- (4) Air yang ditemukan pada litosfer bagian bawah dan pada mantel.

# Siklus Hidrologi

Suatu rangkaian yang terdiri dari reservoir & aliran menyimpan dan menggerakkan air melalui atmosfer, di permukaan maupun di bawah permukaan.

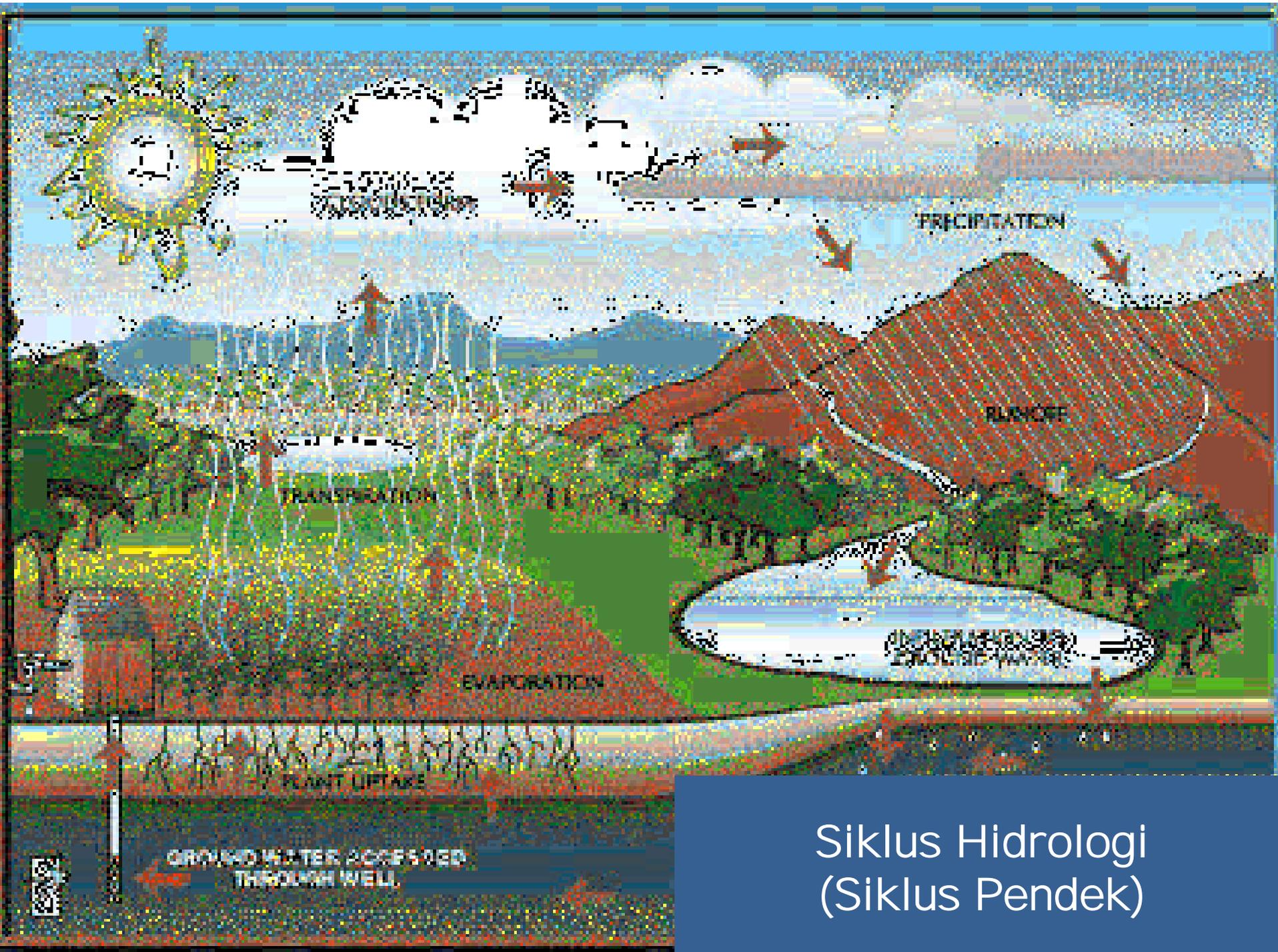
(Pao, W.K.S.; 2007)

Sirkulasi air di mulai dari lautan, atmosfer & daratan.

(Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P.; 2010)

## Konsep Studi Siklus Hidrologi

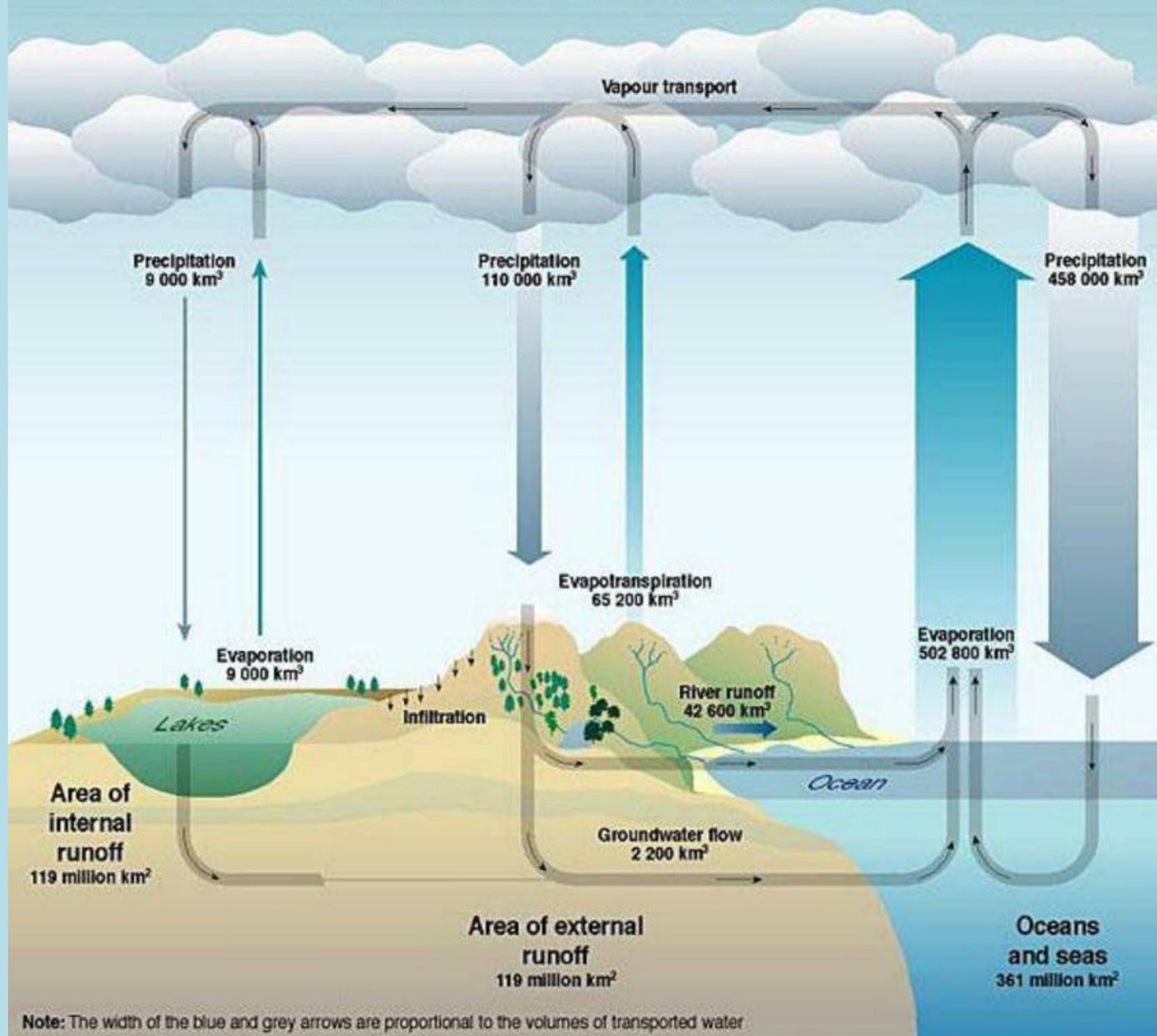
- Memahami pembentukan air dan membantu dalam pengembangan maupun pengelolaan suplai air.

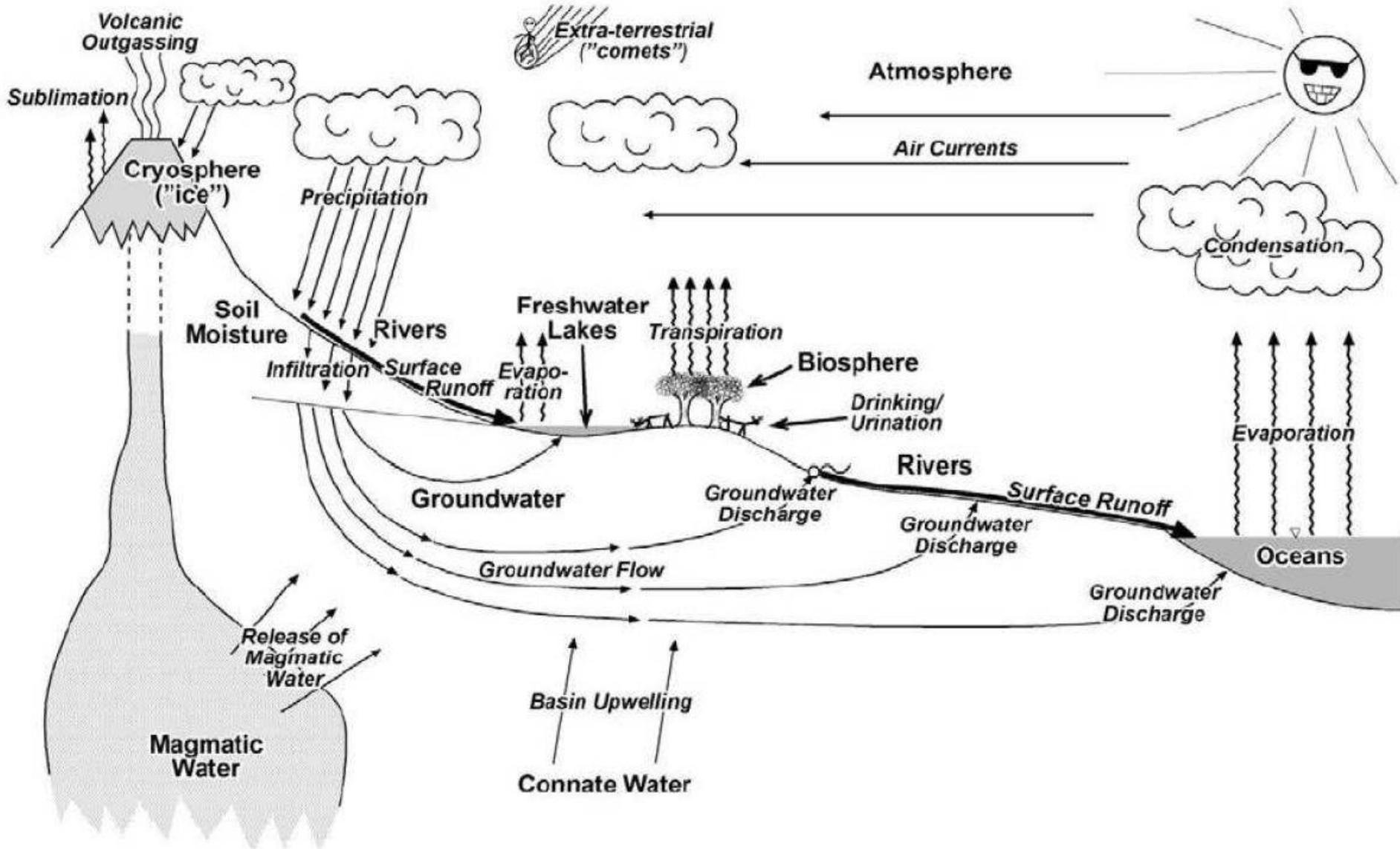


Siklus Hidrologi  
(Siklus Pendek)

# The World's Water Cycle

## Global Precipitation, Evaporation, Evapotranspiration and Runoff





Siklus Hidrologi (Pao, W.K.S.; 2007)

# Komponen Penting Siklus Hidrologi

- 1) Sebuah atau suatu kelompok elemen yang terdapat dalam aliran air ( $H_2O$ ).
- 2) Reservoir tempat berkumpul/tersimpannya air.  
(atmosfer, laut, danau, sungai, lapisan tanah jenuh air, lapisan akuifer, *connate water* pada batuan sedimen, dan air magmatik yang berasal dari mantel, serta lapisan es & gletser)

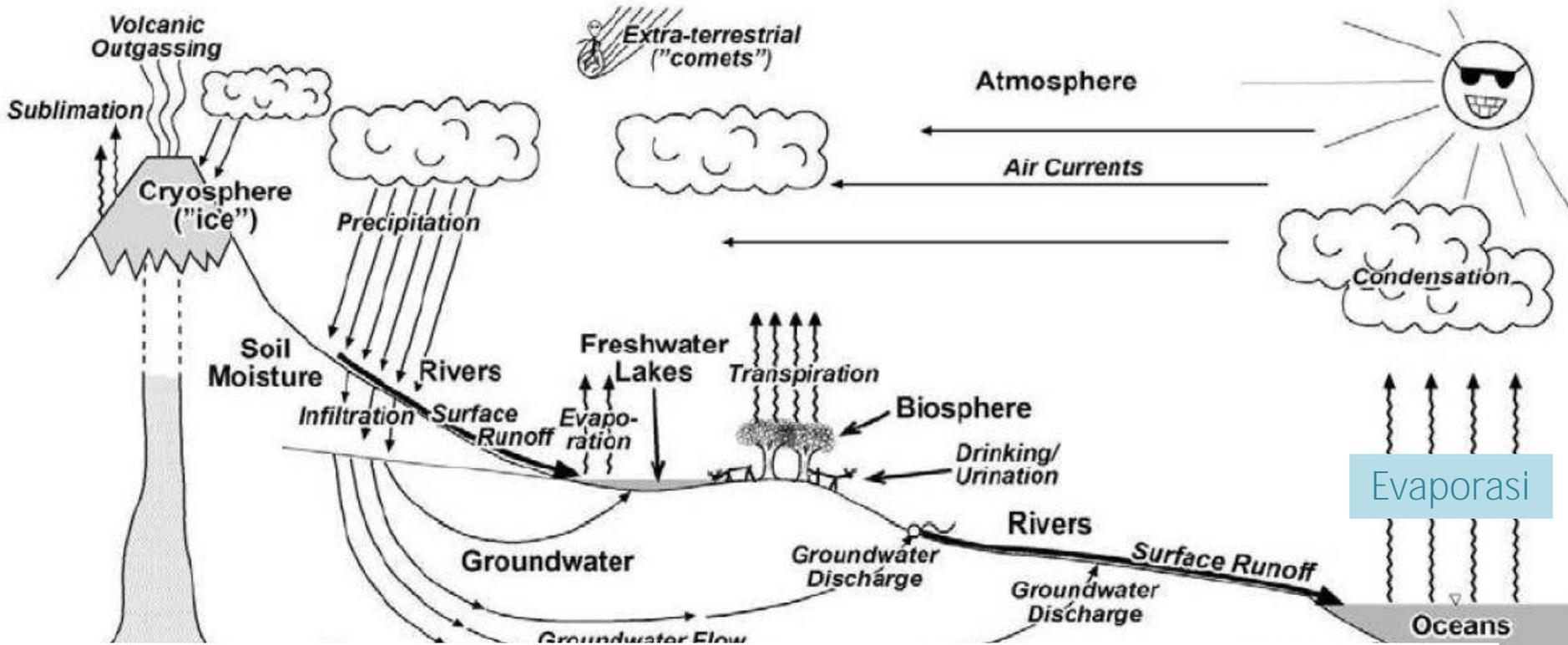
# Komponen Penting Siklus Hidrologi

- 3) Suatu rangkaian proses yang berperan menggerakkan elemen (air) dari satu reservoir menuju reservoir lainnya ataupun dalam reservoir itu sendiri.

Proses yang berperan menggerakkan air dari reservoir satu menuju reservoir lainnya     **infiltrasi, presipitasi, evaporasi.**

Proses yang berperan menggerakkan air dalam reservoir itu sendiri     **aliran airtanah & gelombang laut.**

- 4) Energi yang berperan dalam menjalankan siklus tersebut     **sinar matahari**

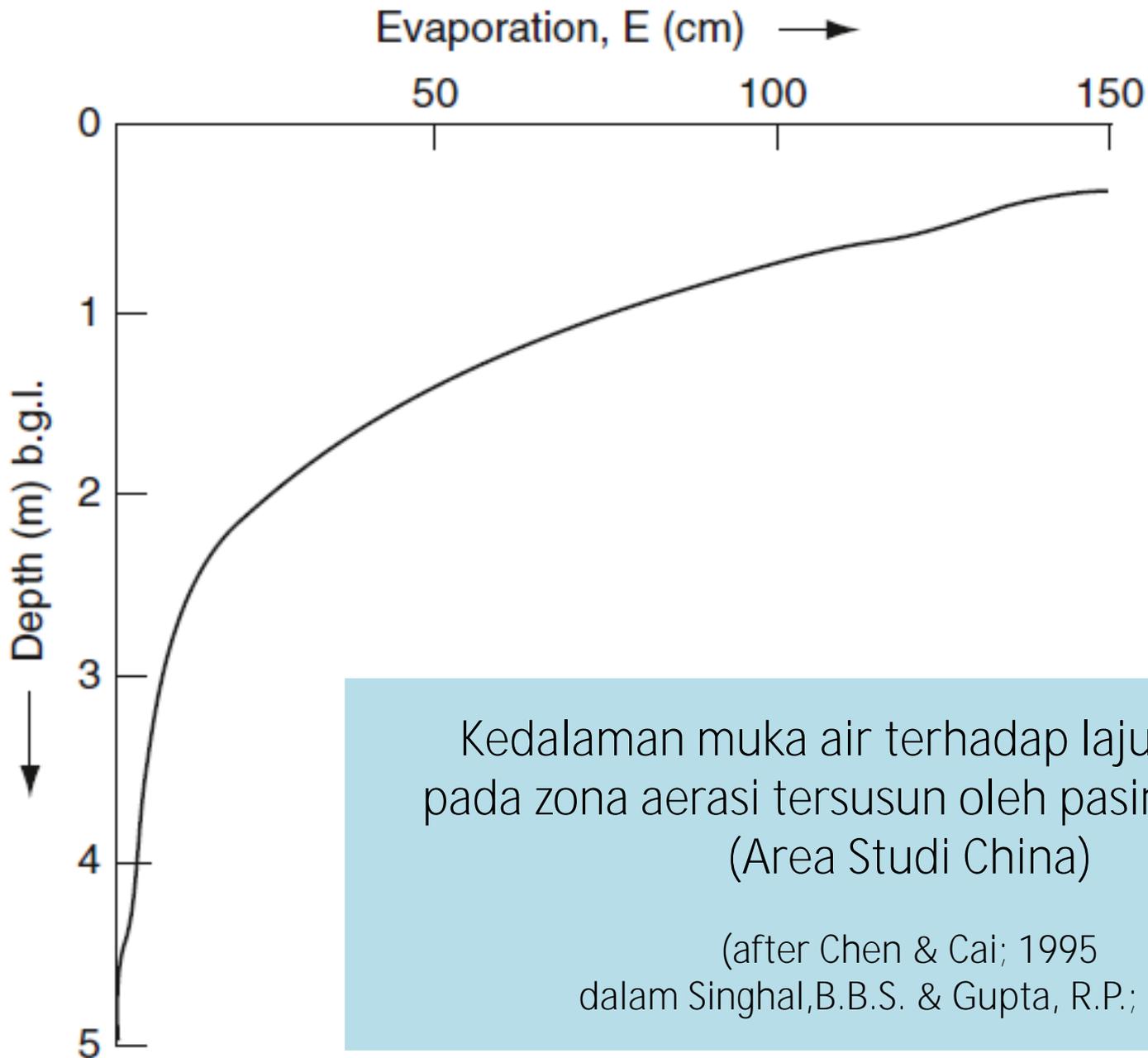


Evaporasi/penguapan

lepasnya molekul air menuju atmosfer dari tubuh air/permukaan tanah oleh adanya perbedaan tekanan antara permukaan air dan udara.

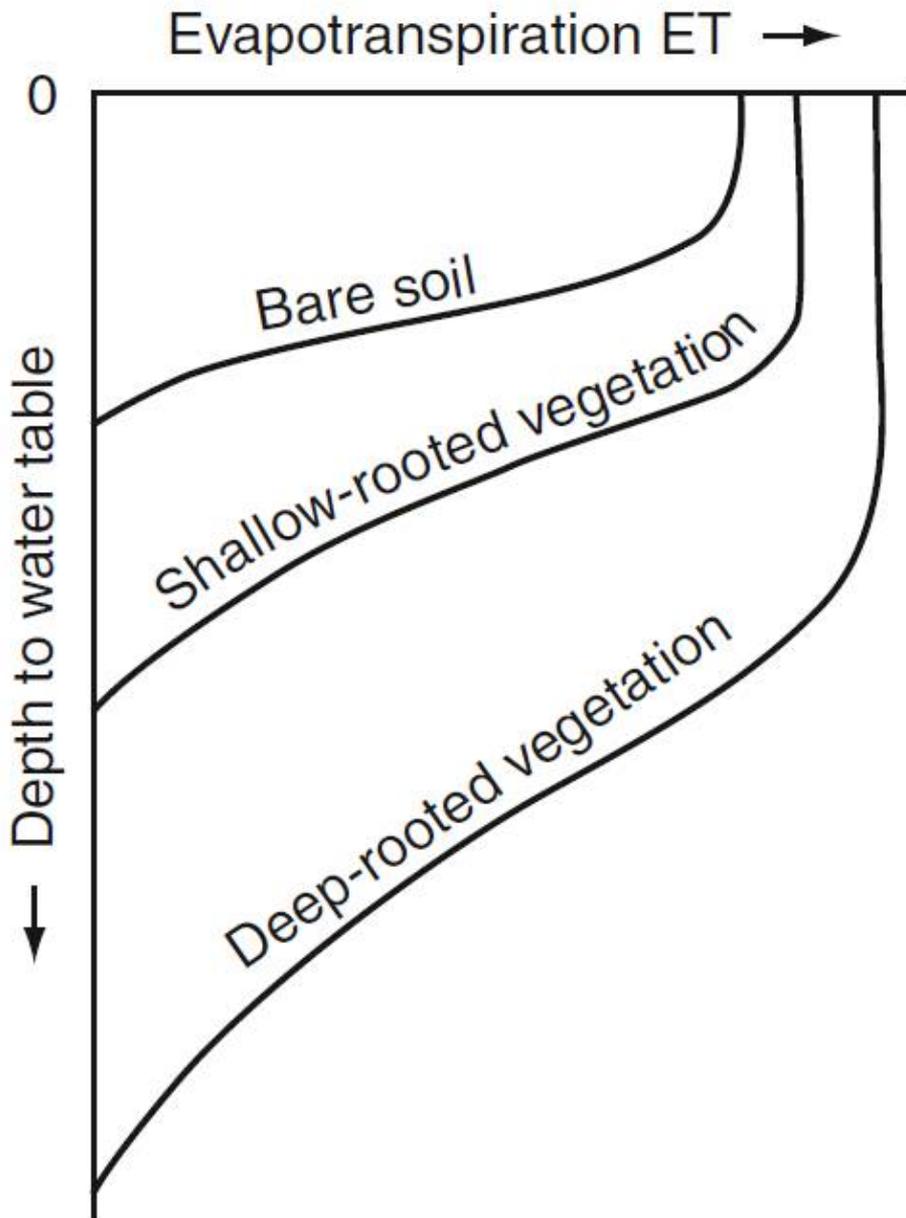
Dipengaruhi oleh:

temperatur air maupun disekitarnya  
kelembaban udara di atas permukaan air  
kecepatan angin



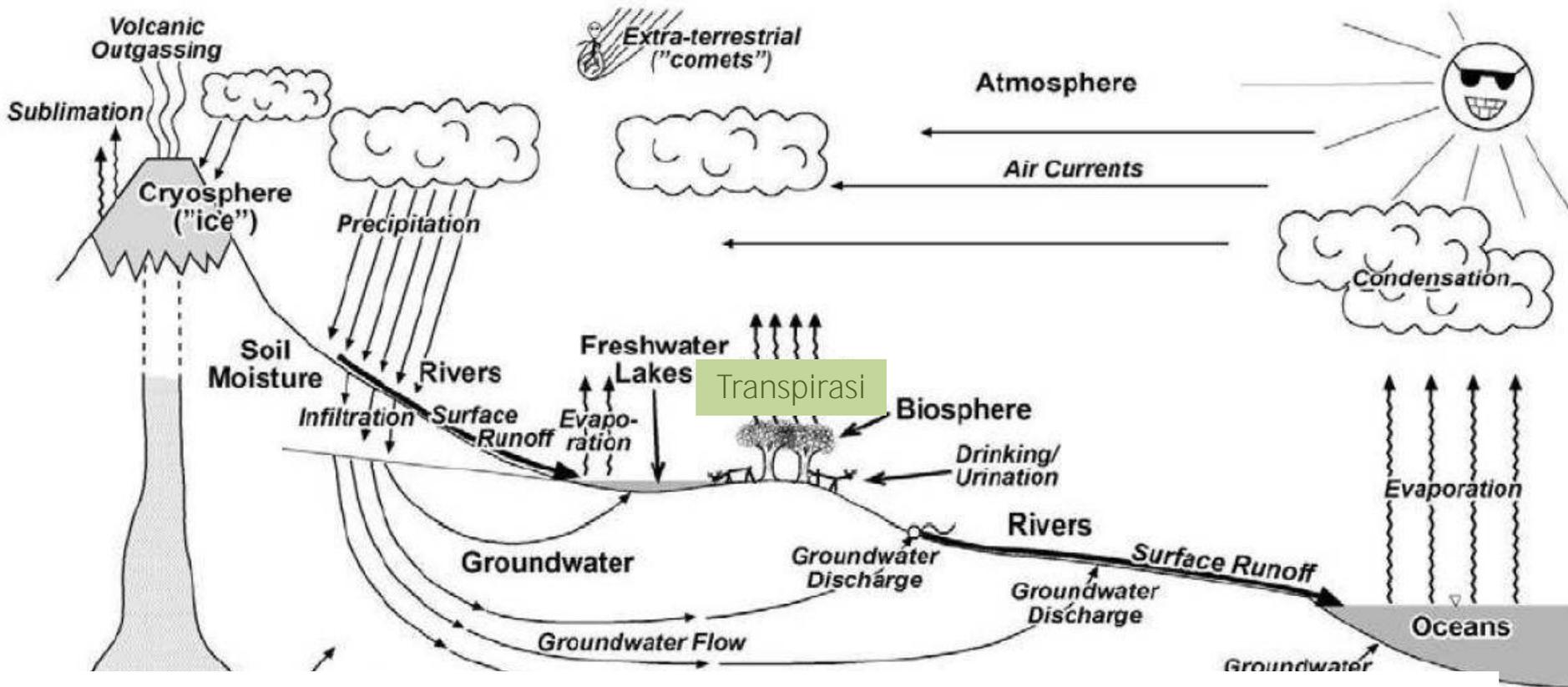
Kedalaman muka air terhadap laju evaporasi pada zona aerasi tersusun oleh pasir lempungan (Area Studi China)

(after Chen & Cai; 1995  
dalam Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P.; 2010)



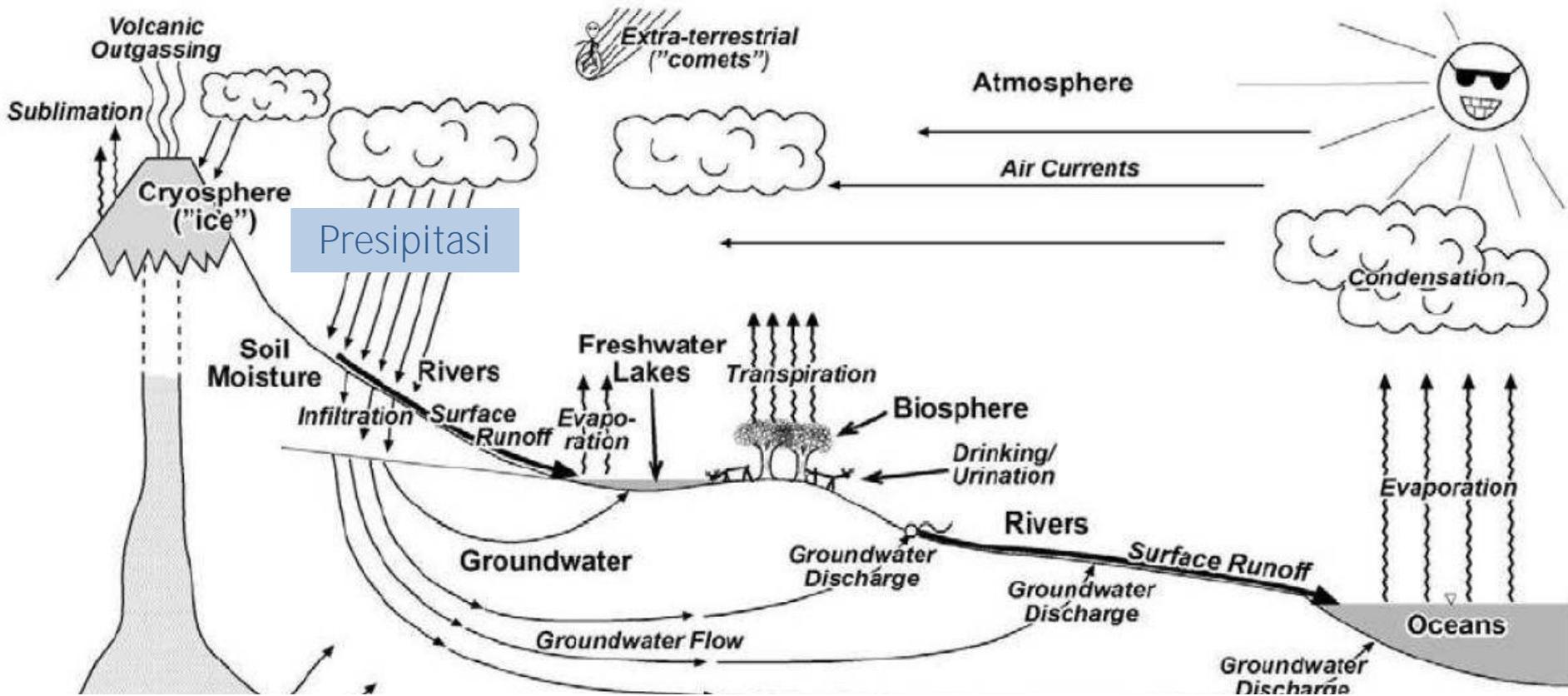
Hubungan  
evapotranspirasi  
terhadap kedalaman  
muka air pada kondisi  
terai berbeda

(after Bouwer; 1978  
dalam Singhal, B.B.S. &  
Gupta, R.P.; 2010)



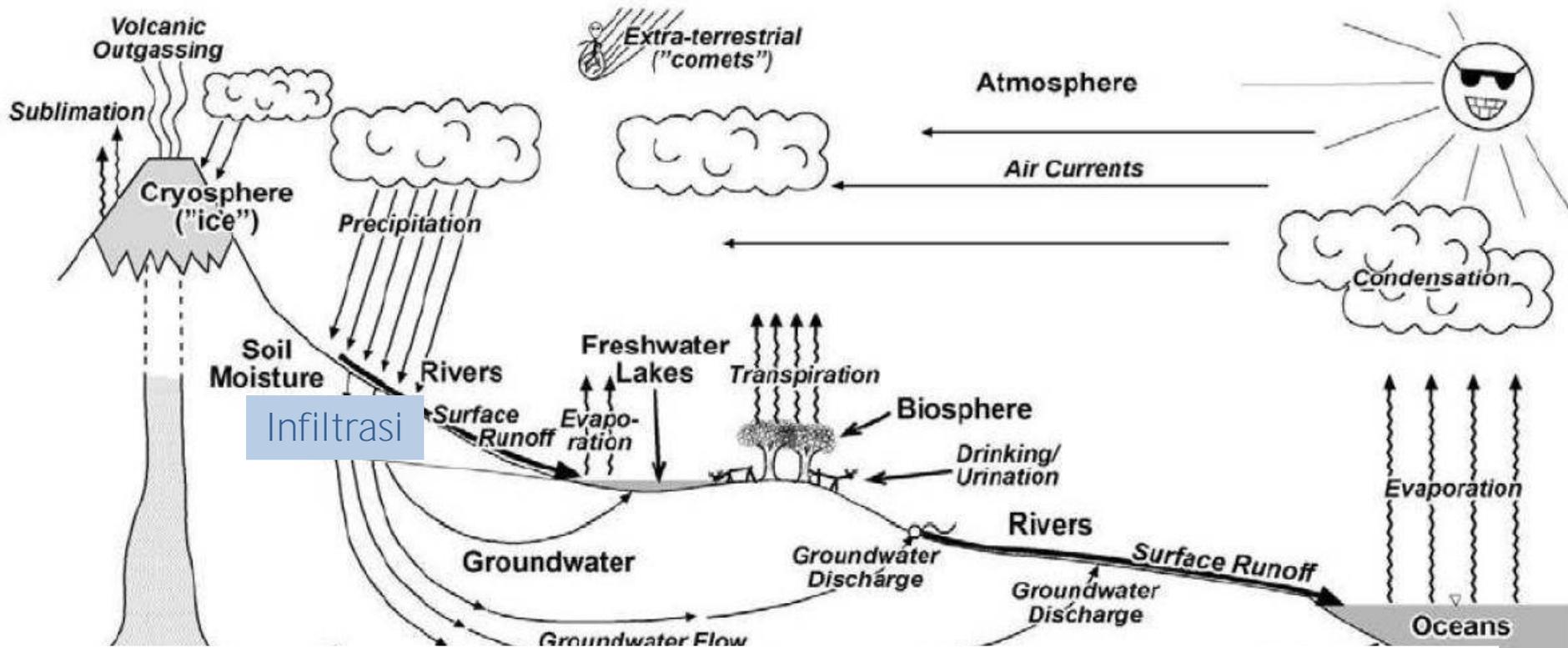
Transpirasi hilang/lepasnya sejumlah air dari tumbuhan dikarenakan tekanan uap di udara lebih rendah dari tekanan pada sel daun.

Dipengaruhi oleh: Jenis  
Densitas  
Ukuran tumbuhan.



Presipitasi gerimis, hujan, salju, hujan es

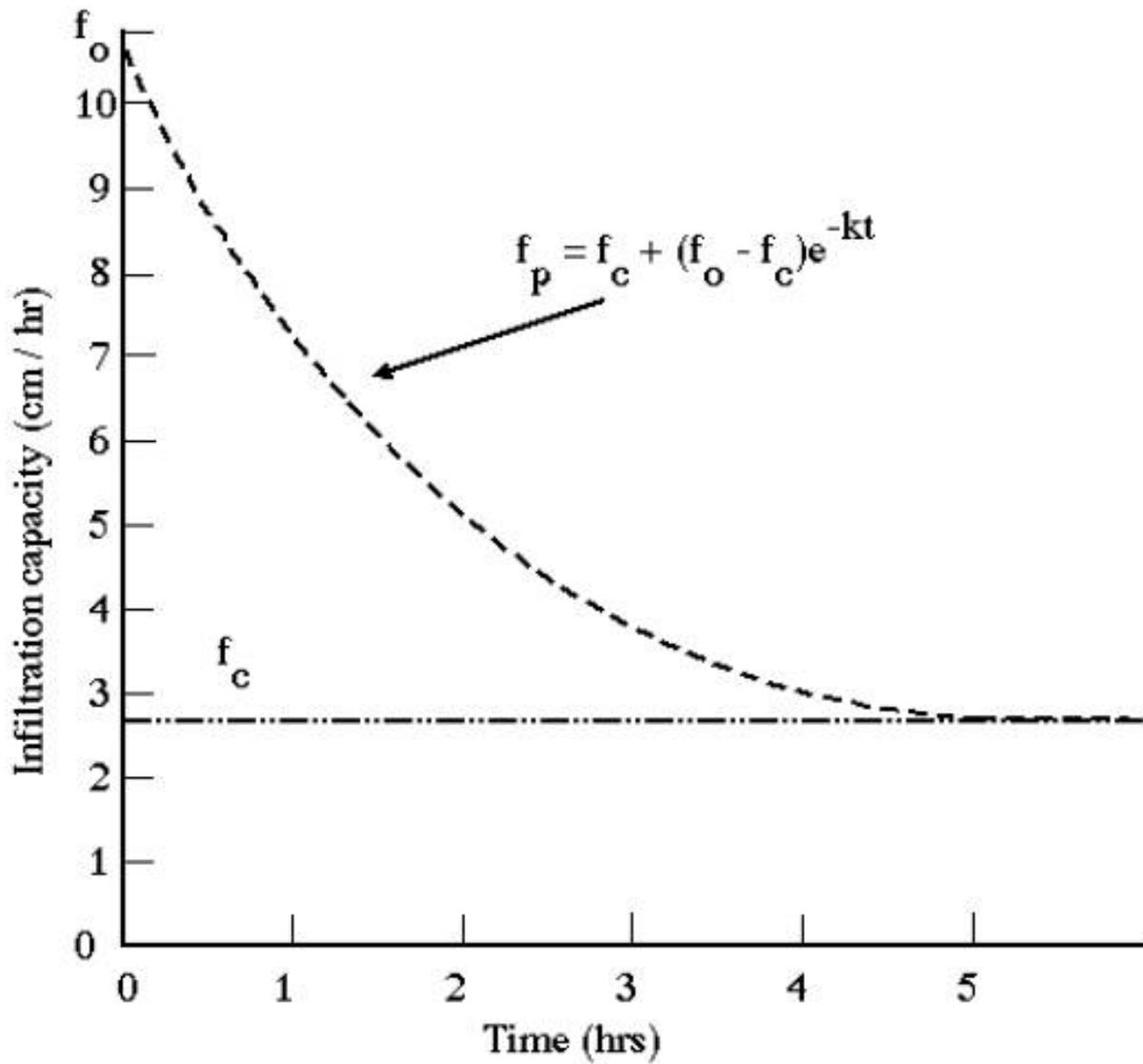
Presipitasi pembentukan gerimis, hujan, salju ataupun hujan es oleh adanya kondensasi dan peningkatan kadar kelembaban di udara akibat penurunan temperatur.



Infiltrasi proses penyerapan air hujan ataupun air pada tubuh air lainnya ke dalam tanah/batuan.

Tergantung oleh: sifat tanah/batuan  
vegetasi penutup

Kecepatan & kapasitas infiltrasi ke dalam tanah dipengaruhi oleh kecepatan tanah untuk menyerap air.



Waktu terhadap  
kapasitas infiltrasi

(dalam  
Pao, William K.S.; 2007)

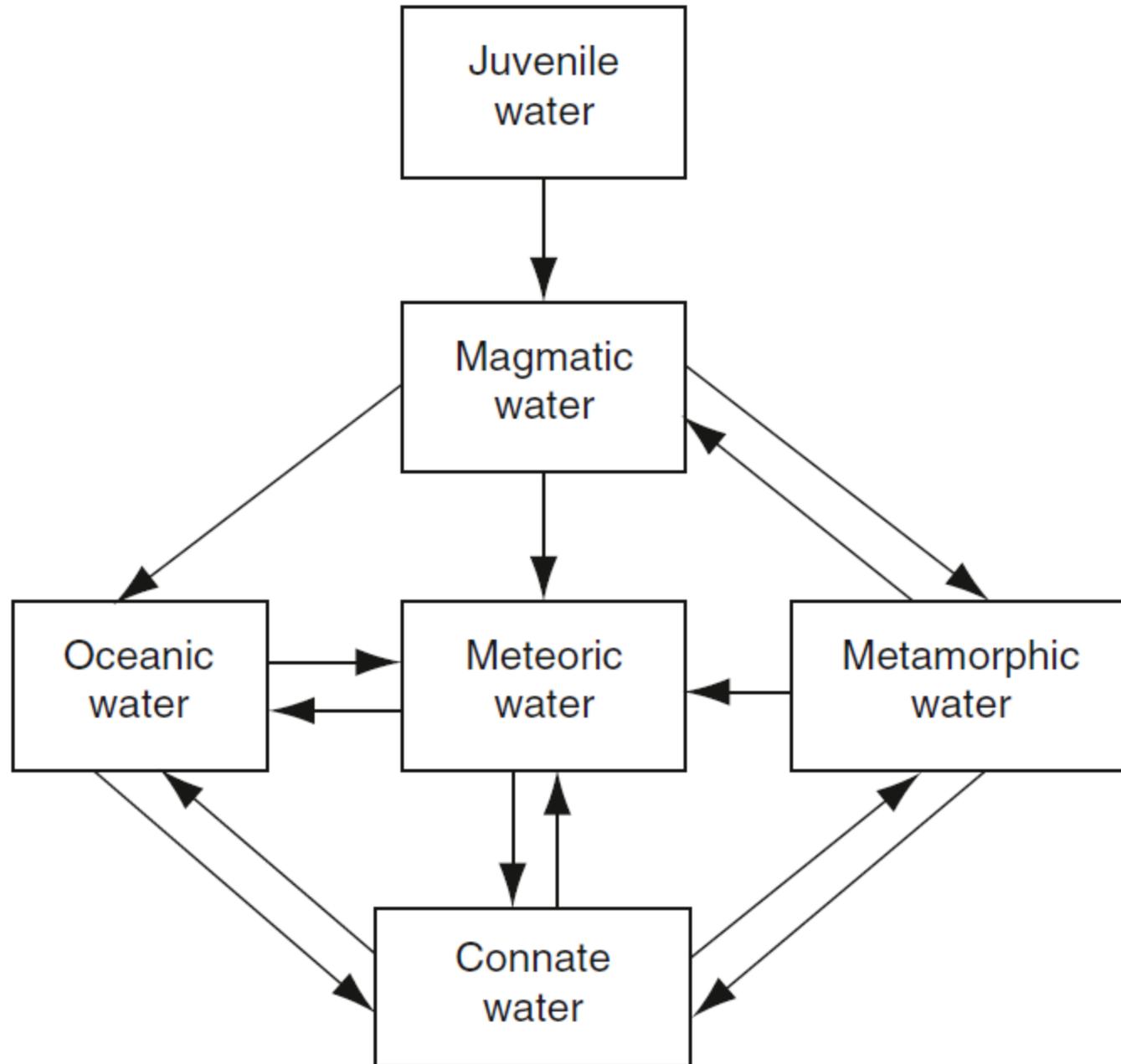
# Kapasitas airtanah di suatu daerah dipengaruhi oleh :

- Iklim/musim atau intensitas curah hujan.  
Suatu daerah dengan frekuensi hujan yang cukup tinggi dengan intensitas curah hujan sedang infiltrasi & suplai air hujan terhadap airtanah akan lebih besar.
- Vegetasi penutup  
Kehadiran tumbuhan/tanaman, terutama berakar tunggang dapat membantu menangkap air dan menjaga kelembaban tanah.
- Kondisi topografi
- Sifat dan jenis litologi  
Suatu litologi dengan derajat porositas/kesarangan tinggi kemampuan batuan mengalirkan dan menyimpan air akan tinggi.

The slide features a light peach background. In the top-left corner, there is a cluster of squares in shades of blue and red. In the bottom-right corner, there is another cluster of squares in shades of blue, red, and light blue. A horizontal blue bar spans across the middle of the slide, containing the title text.

# Jenis Air Berdasarkan Asal/Genetiknya

Hubungan antara berbagai jenis air secara genetik/ pembentukannya



(After White; 1957  
dalam Singhal, B.B.S. &  
Gupta, R.P.; 2010)

## Air Meteorik (*Meteoric Water*)

Air yang berasal dari presipitasi (hujan dan/ salju), meskipun sebagian besar air hujan ataupun air lelehan salju/es terkumpul di laut melalui aliran permukaan/*runoff* dan sebagian lainnya masuk ke dalam tanah hingga terkumpul membentuk airtanah di akuifer.

## Air Baru (*Juvenile Water*)      Air Magmatik

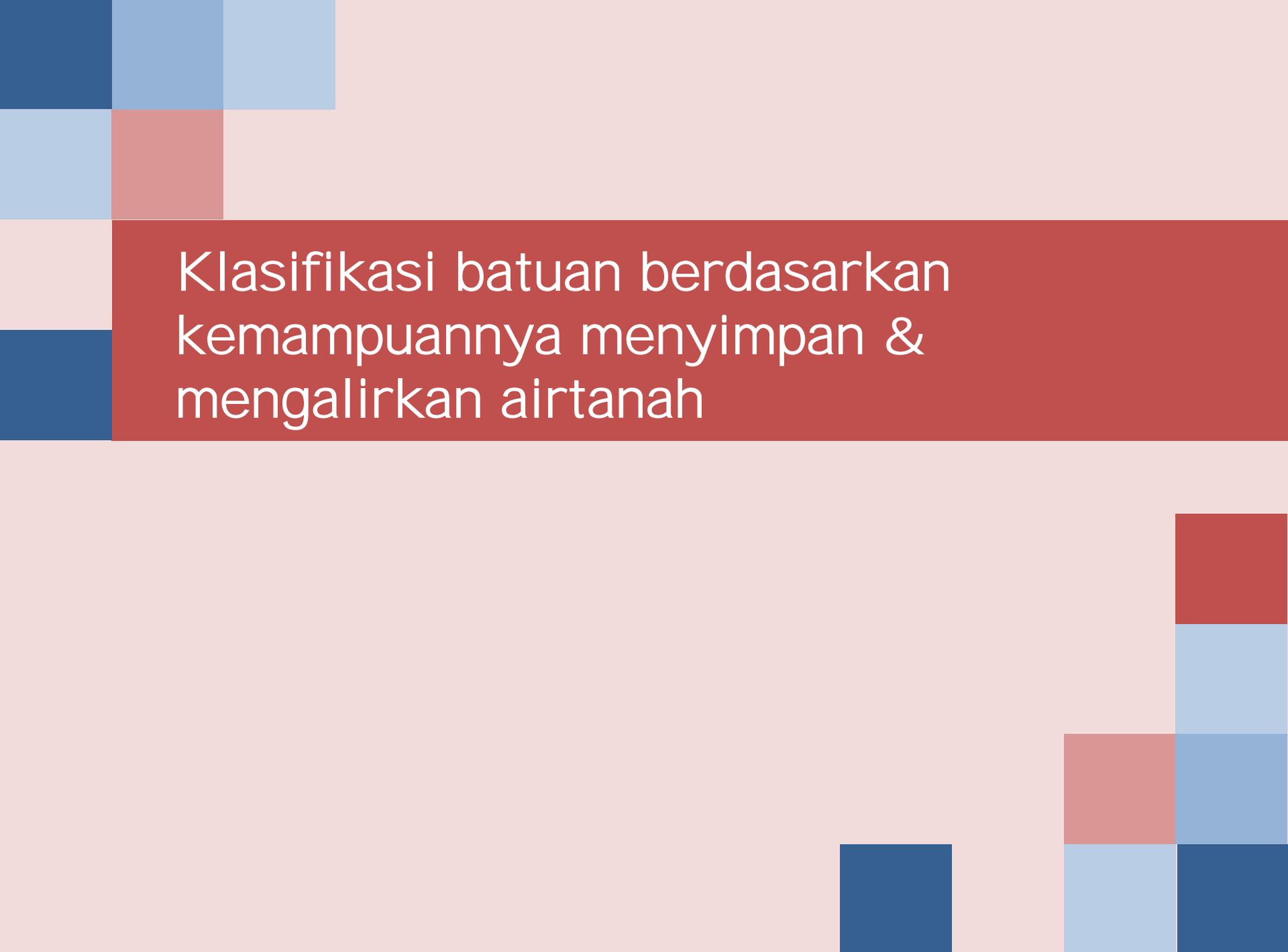
Air yang terbentuk pertama kali di hidrosfer dengan air magmatik merupakan sumber dari air baru (*juvenile water*) yang berasal dari pemanasan lapisan jenuh air/lembab oleh panas dari magma ataupun oleh aktivitas vulkanik dangkal.

## *Connate Water*      Dikenal juga dengan air fosil atau air formasi.

Air yang terbentuk bersamaan dengan pembentukan suatu lapisan batuan.  
Air yang tertahan dalam akuifer dalam waktu lama & tidak berkaitan dengan siklus hidrologi saat ini.

## Air Metamorfik/Air yang terejuvinasi

Air yang berasal dari mineral kaya air (hidrous), seperti mineral lempung, mika dll oleh adanya proses metamorfisme.

The slide features a light beige background with decorative geometric shapes. In the top-left corner, there is a 3x3 grid of squares in shades of blue and red. In the bottom-right corner, there is a 3x2 grid of squares in shades of blue and red. A solid red horizontal bar spans the width of the slide, containing the main text.

Klasifikasi batuan berdasarkan kemampuannya menyimpan & mengalirkan airtanah

## Akuifer    lapisan permeabel    lapisan pembawa air

Lapisan yang tersusun oleh batuan dengan porositas & permeabilitas besar, sehingga mampu menyimpan maupun mengalirkan air dalam jumlah ekonomis.

- Contoh : pasir, kerikil, batupasir, batugamping yang berlubang-lubang, lava yang retak-retak, dsb.

## Akuitar

Lapisan yang tersusun oleh batuan dengan porositas cukup tinggi sehingga dapat menyimpan air, namun hanya dapat mengalirkan air dalam jumlah yang terbatas karena adanya sifat kedap air. Tampak adanya rembesan atau kebocoran-kebocoran.

## Akuiklud    lapisan impermeabel    lapisan kedap air

Lapisan yang tersusun oleh batuan bersifat impermeabel/kedap air yang dapat menyimpan air, tetapi tidak dapat mengalirkan dalam jumlah yang berarti.

- Contoh : lempung, lanau, serpih, tuf halus, ataupun berbagai batuan yang berukuran lempung.

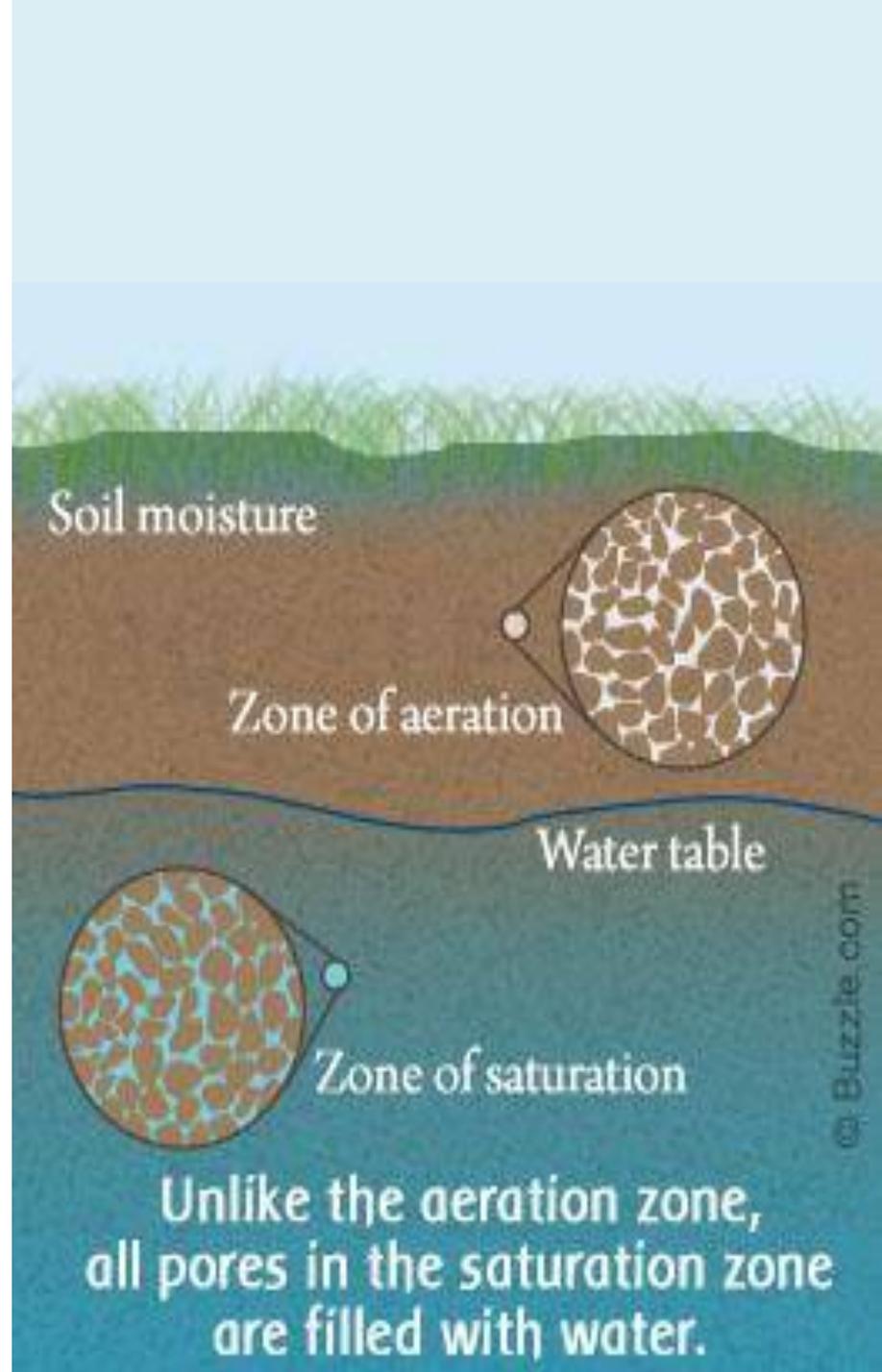
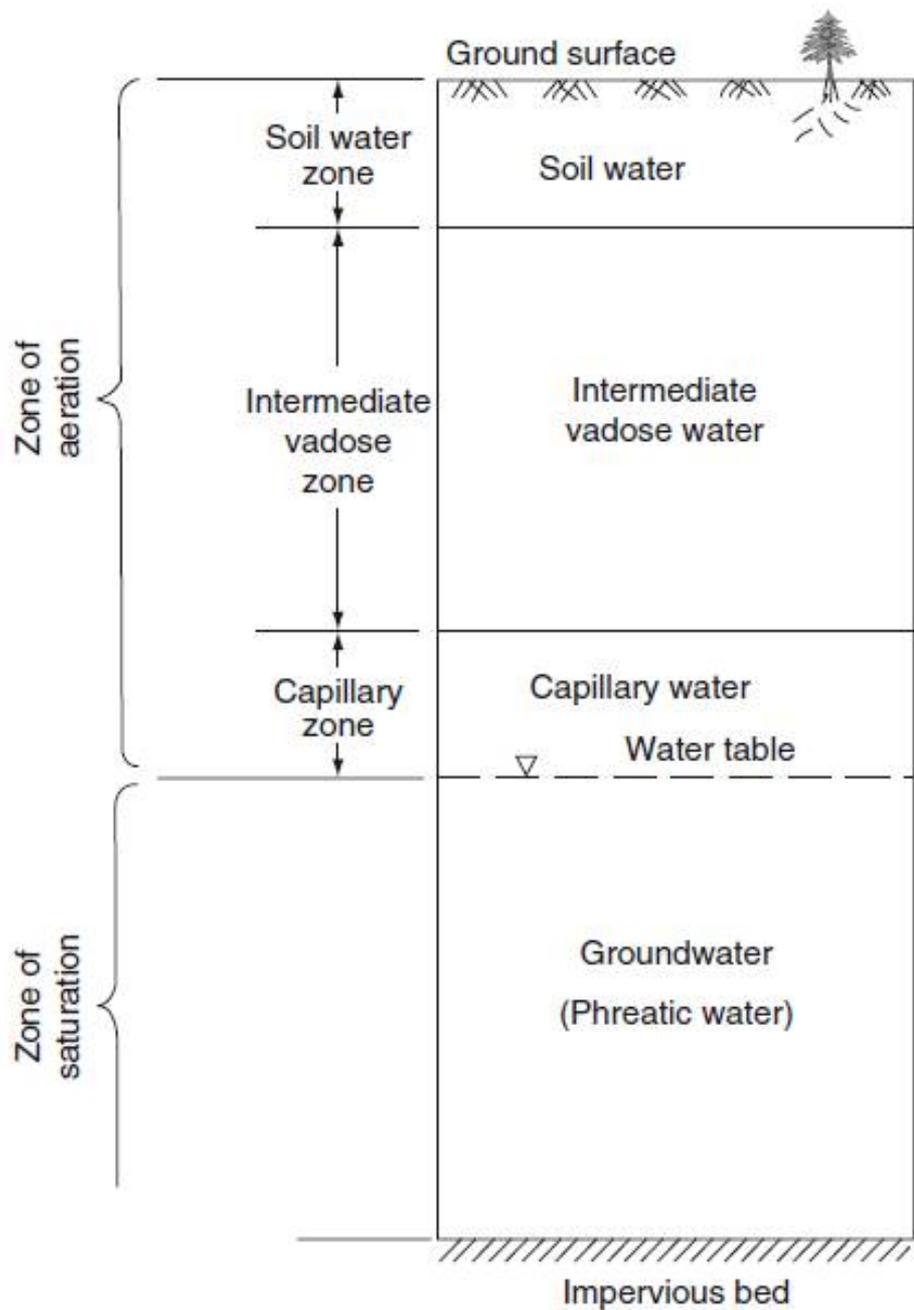
## Akuifug lapisan kedap air

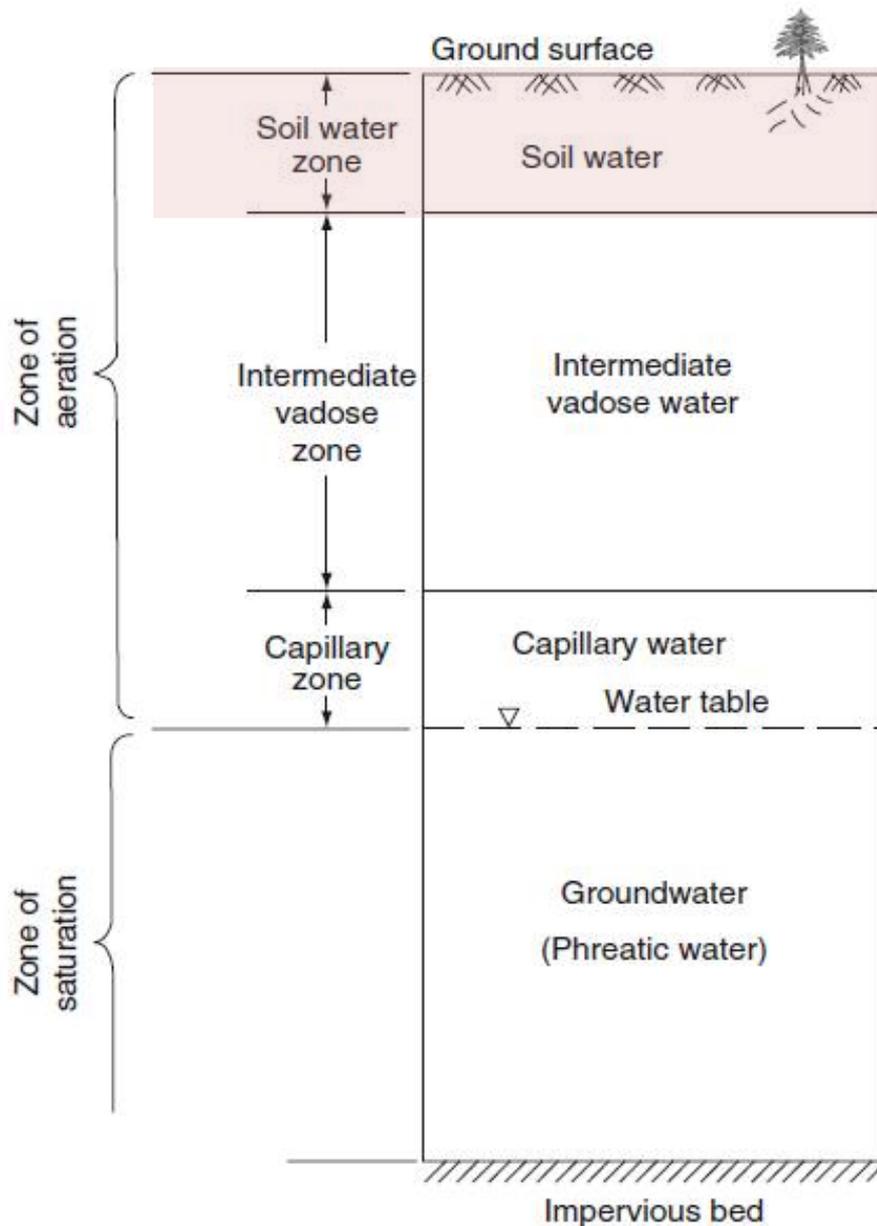
Lapisan yang tersusun oleh batuan dengan porositas sangat kecil dan bersifat kedap air, sehingga tidak dapat menyimpan maupun mengalirkan air.

- Contoh : granit, batuan-batuan yang kompak, keras, padat.



# Penyebaran Vertikal Airtanah

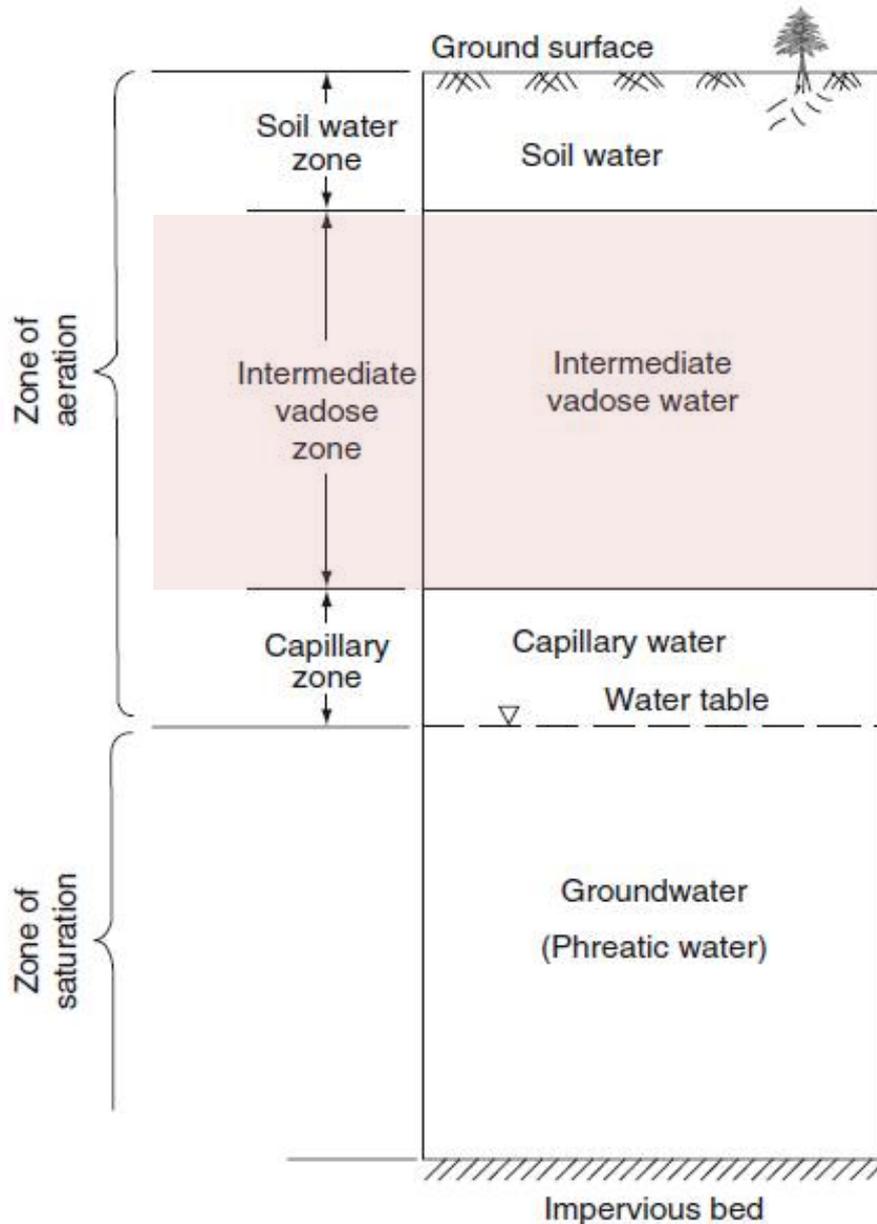




## Zona Aerasi/Zona Tidak Jenuh Air

### Zona Tanah kaya Air

- Zona ini bersifat kurang/sedikit jenuh air berupa lapisan tanah dekat permukaan (zona pertumbuhan akar tanaman) kandungan air dipengaruhi hujan/irigasi.
- Kandungan air mudah hilang oleh transpirasi & evaporasi.
- Dijumpai di kedalaman 1 – 9 m.

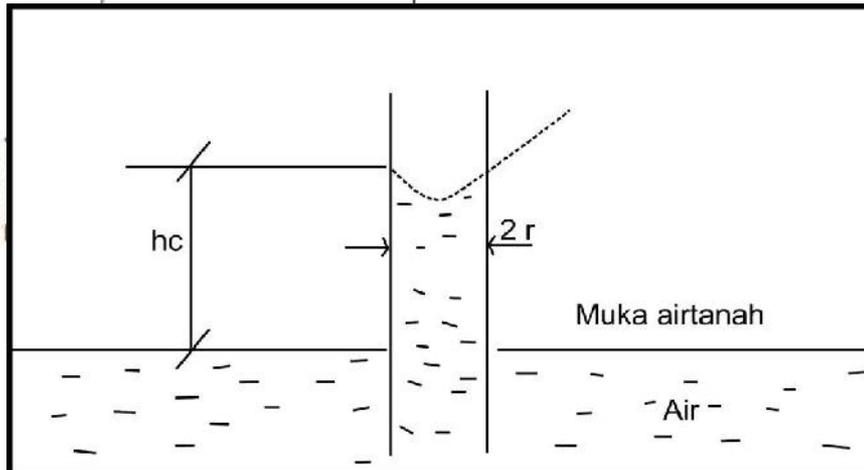
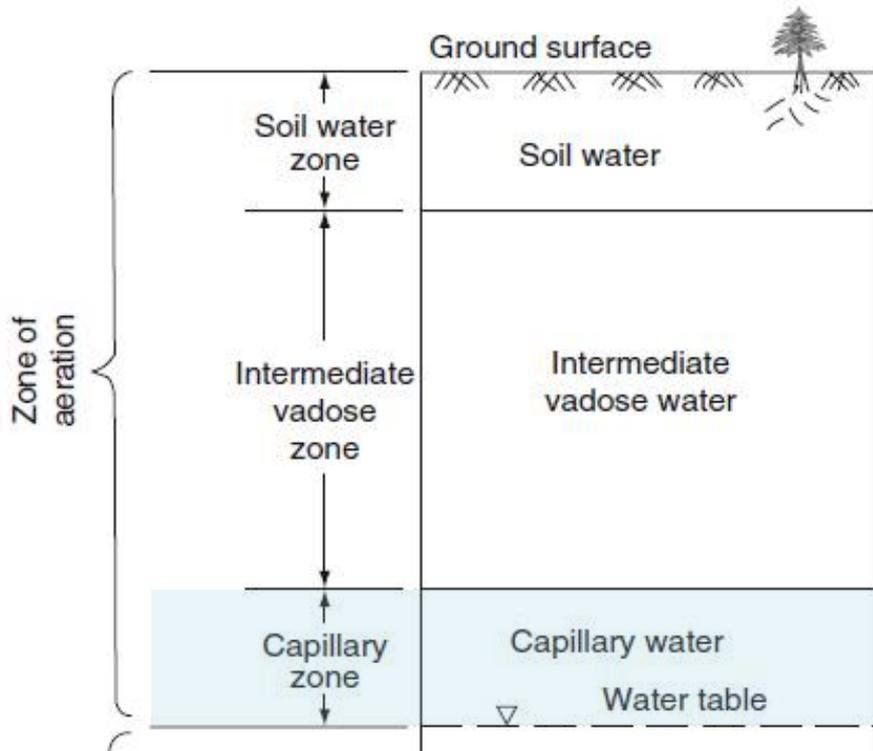


## Zona Aerasi/Zona Tidak Jenuh Air

### Zona Vadose

- Zona tidak jenuh air yang dijumpai dekat dengan permukaan.
- Ketebalan: 0 (daerah dengan airtanah sangat dangkal) - >100 m (daerah dengan airtanah sangat dalam).
- Tekanan air pori < atm.
- Dijumpai 2 macam air:
  - Pallicular water* air tidak bergerak sebab tertahan oleh gaya higroskopis & daya kapiler.
  - Gravitational water* air bergerak vertikal turun karena adanya gaya berat/gaya gravitasi.

## Zona Aerasi/Zona Tidak Jenuh Air



### Zona Kapileri

- Zona terbawah dengan ketebalan dari muka airtanah ke atas sampai batas kenaikan air.
- Dijumpai pada tanah dan/ batuan dengan ukuran butir halus.
- Kenaikan air dapat dihitung berdasarkan persamaan:

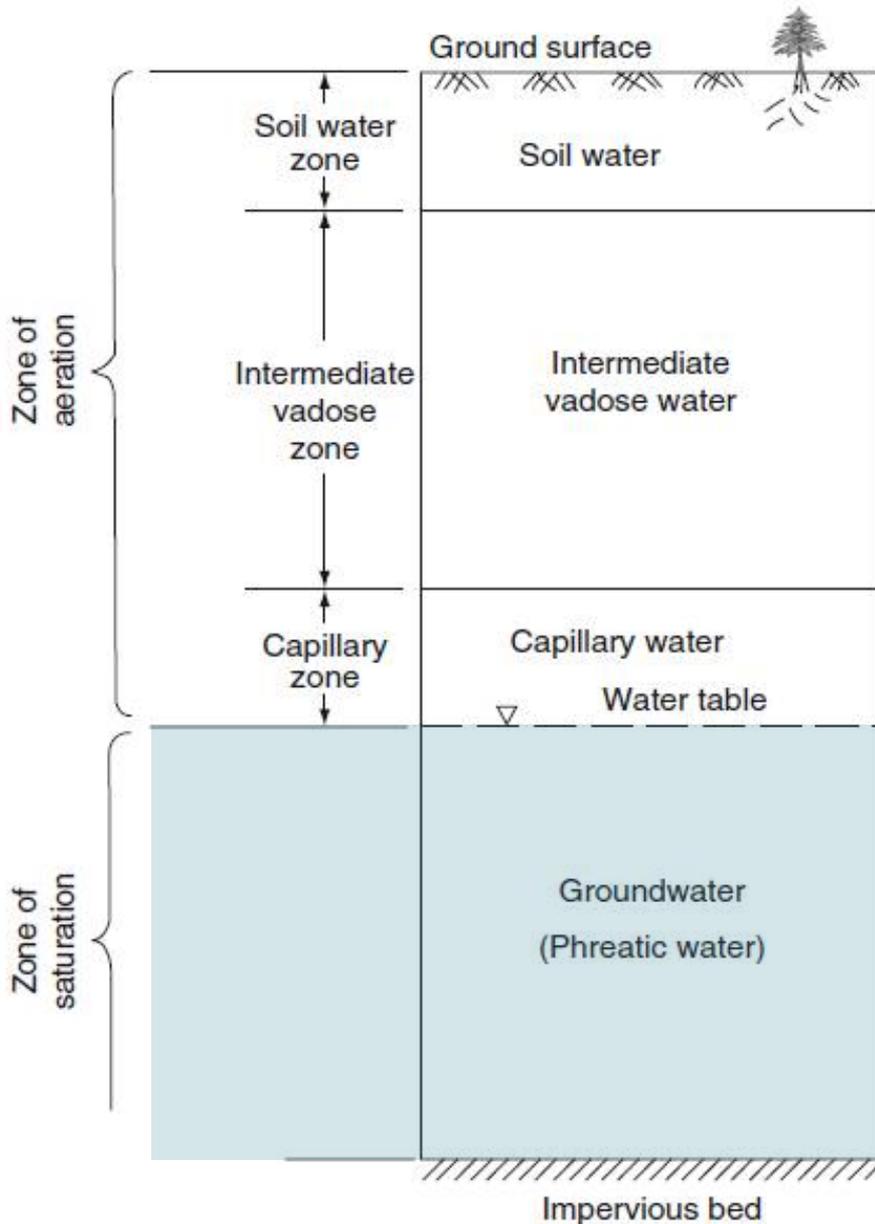
$$2 r T \cos \theta = hc r^2 \gamma_w$$

$$hc = \frac{2T \cos \theta}{r \gamma_w}$$

$$hc = \frac{0,15}{r} \cos \theta$$

dengan T : tegangan permukaan (0,074 gr/cm pada 50°F); r = jari-jari lubang;  $\gamma_w$  : berat jenis air (gr/cm<sup>3</sup>);  $\theta$  : sudut kontak miniskus dengan dinding; dan hc bervariasi (inci pada kerikil, feet pada pasir dan beberapa meter pada lempung).

## Zona Saturasi/Zona Jenuh Air



### Air Freatik Airtanah

- Pada zona ini tempat terbentuknya airtanah dengan bagian atas muka air (*water table*).
- Berupa lapisan/tubuh batuan yang bersifat porous & permeabel seluruh lubang/pori/rongga/rekahan telah jenuh terisi dengan air.
- Air pada zona ini tidak seluruhnya dapat diambil/dipompa. Sebagian air akan tertinggal : *retained water* karena adanya tenaga molekuler & tegangan permukaan.

- *Retained water* sebagian air yang tertinggal dalam zona freatik  
*Specific Retention (Sr)*.
- *Specific Retention (Sr)* perbandingan volum air yang tertahan dalam tanah/batuan jenuh air setelah diadakan pemompaan terhadap volum total batuan/tanah (satuan %).

$$Sr = \frac{\text{Volum air tertahan}}{\text{Volum total batuan/tanah}} \times 100\%$$

- *Specific Yield (Sy)*/kesarangan efektif perbandingan volum air yang dapat diambil dari tanah /batuan jenuh air terhadap volum total batuan/tanah (satuan %).

$$Sy = \frac{\text{Volum air yang dapat diambil}}{\text{Volum total batuan/tanah}} \times 100\%$$

- Nilai *Specific Yield (Sy)* dipengaruhi oleh :  
pemadatan (nilai Sy berkurang sesuai dengan kedalamannya);  
ukuran butir; dan  
bentuk pembagian pori-pori.

No	Jenis Material	Sy (%) Todd, D.K., 1980	Sy (%) Walton W.C., 1970
1.	Kerakal kasar	23	--
2.	Kerakal	24	--
3.	Kerikil	25	15 - 30
4.	Pasir kasar	27	10 - 30
5.	Pasir sedang	29	Pasir & kerikil 15 - 25
6.	Pasir halus	23	
7.	Lanau	8	--
8.	Serpih	--	0,5 - 5
9.	Lempung	3	1 - 10
10.	Batupasir halus	21	5 - 15
11.	Batupasir sedang	27	
12.	Batugamping	14	0,5 - 5
13.	Sand dune	38	--
14.	Sekis	26	--
15.	Tuf	21	--

Nilai *Specific Yield (Sy)* pada material/batuan



# Porositas/Derajat Kesarangan

- **Porositas** semua lubang yang terdapat pada suatu massa batuan/tanah dengan ukuran tidak terbatas dan memungkinkan untuk terisi oleh air.
- **Porositas** kapasitas/volum air yang dapat disimpan dalam zona saturasi atau suatu akuifer.
- **Porositas ( )** perbandingan volum pori/rongga/lubang (W) terhadap volum total tanah/batuan (V).

Keterangan	Rumus
Porositas	$= \frac{W}{V} \times 100\%$
Kaitan porositas dengan <i>Specific Retention</i> maupun <i>Specific Yield</i>	$P = S - R$

## Porositas berdasarkan proses pembentukannya

Porositas asli /primer (*original interstices*) lubang/rongga/ pori yang terbentuk bersamaan dengan pembentukan batuan.

Porositas tidak asli /sekunder terbentuk setelah pembentukan batuan.  
Contoh: kekar, retakan, lubang pelarutan dsb.

## Porositas berdasarkan ukuran lubang

Ukuran kapiler (*capillary interstices*) air dapat tersimpan pada lubang/rongga/pori karena tegangan permukaan.

Ukuran sub kapiler ukuran lubang lebih kecil dari pada ukuran kapiler.

Ukuran super kapiler ukuran lubang lebih besar daripada ukuran kapiler.

## Porositas berdasarkan hubungan antar lubang/rongga/pori

Saling berhubungan (*communicating interstices*).

Terisolasi (*isolated interstices*).

# Porositas/kesarangan dipengaruhi oleh:

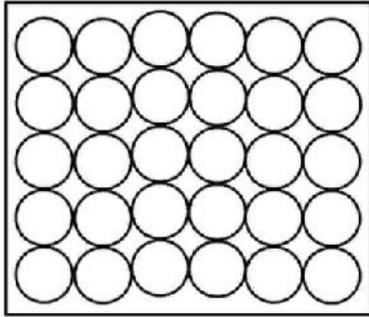
Ukuran & bentuk butir

Hubungan, susunan & keseragaman butir (sortasi & kemas)

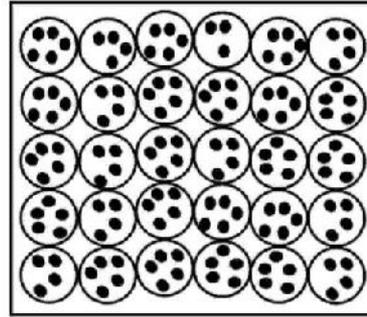
Kompaksi

Lempung mempunyai porositas 80 – 90 %, setelah mengalami kompaksi akibat pembebanan porositas berkurang menjadi 30 - 40 %.

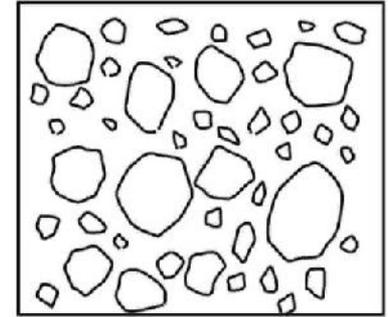
Sementasi      memperkecil porositas sebesar 2 - 5 %



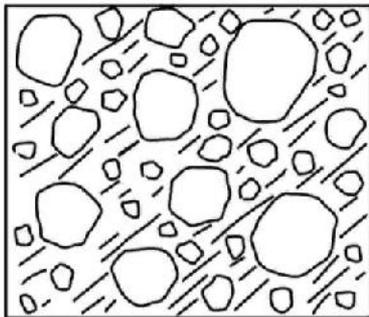
Sortasi baik  
Kesarangan tinggi



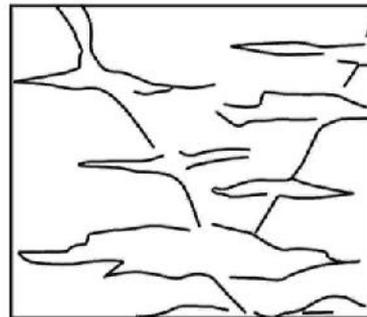
Sortasi baik  
Butiran berpori  
Kesarangan sangat tinggi



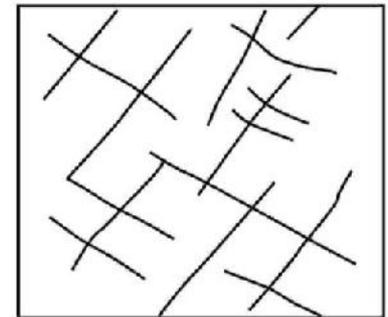
Sortasi Jelek  
Kesarangan rendah



Tesemen  
Kesarangan berkurang



Lubang pelarutan  
Kesarangan bertambah



Retakan  
Kesarangan bertambah

No	Jenis Material	Porositas (%) Todd, D.K., 1980	Porositas (%) Walton W.C., 1970
1.	Tanah (soil)	50 - 60	--
2.	Lempung	45 - 55	45 - 55
3.	Lanau	40 - 50	--
4.	Serpilh	1 - 10	1 - 10
5.	Pasir sedang - kasar	35 - 40	35 - 40
6.	Pasir berukuran/ bentuk butir seragam	30 - 40	
7.	Pasir halus - sedang	30 - 35	
8.	Kerikil	30 - 40	30 - 40
9.	Kerikil dan pasir	20 - 35	20 - 35
10.	Batupasir	10 - 20	10 - 20
11.	Batugamping	1 - 10	1 - 10

Nilai porositas material/batuan sedimen



# Keterdapatan Airtanah

Berdasarkan sifat material penyusun lapisan pembawa air, letak/keterdapatannya di alam dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

- Material lepas (*unconsolidated materials*)
- Material kompak (*consolidated materials*)

Kira-kira 90 % airtanah dijumpai pada material lepas berupa pasir, kerikil, campuran pasir dan kerikil, dsb.

# Pembagian jenis batuan & jenis porositas terkait ketersediaan airtanah

(Dept. of Economic and Social affairs, menurut Todd,dk 1980)

Tipe porositas/ kesarangan	Batuan Sedimen			Batuan Beku & Batuan Metamorf	Batuan Vulkanik	
	Kompak	Lepas	Karbonat		Kompak	Lepas
Antar butiran	---	Pasir kerikilan, Pasir lempungan, Lempung pasiran	---	Zona pelapukan dari Granit ataupun Gneis	Zona pelapukan Basal	Batuan vulkanik lepas, berupa blok hingga debu vulkanik
Antar butiran & retakan	Breksi, Konglomerat, Batupasir	---	Batugamping oolitik	---	Breksi vulkanik, Tuf, Batuapung	---
Retakan	---	---	Batugamping dolomit	Granit, Gabro, Diorit, Kuarsit, Gneis, Sekis	Basal, Andesit, Riolit	---

# Keterdapatan airtanah pada material kompak, dijumpai pada :

- Batugamping

Batugamping dapat bertindak sebagai akuifer, apabila terbentuk banyak retakan lubang pelarutan porositas sekunder.

- Batuan beku gang (dalam)

Batugamping dapat bertindak sebagai akuifer, apabila terbentuk banyak retakan kekar.

- Batuan vulkanik

Batuan vulkanik primer berupa lava basal dapat bersifat sangat lulus air, apabila banyak lubang-lubang bekas gas maupun retakan. Endapan vulkanik, dapat bertindak sebagai akuifer yang baik terutama yang berumur muda.

Berdasarkan daerah pembentukannya, letak/ ketersediaan airtanah pada material lepas dapat dibedakan menjadi empat wilayah, yaitu:

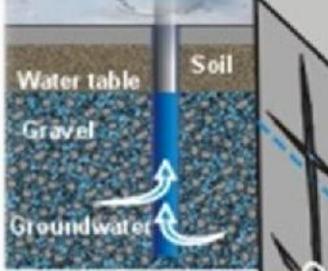
- Daerah aliran air (*water courses*)

Berupa dataran/endapan aluvial yang terletak di kanan kiri sungai yang mengalir. Apabila muka air sungainya lebih tinggi dari muka airtanah, maka potensi airtanah cukup besar.

Daerah ini sangat potensial tersusun oleh material bersifat lepas dan air sungai berperan mensuplai airtanah.

Contoh : Dataran lembah Sungai Citandui, Serayu, Bengawan Solo. Dataran di sini cukup lebar terutama di daerah hilir, hanya sayangnya materialnya sangat halus dan tidak begitu tebal.

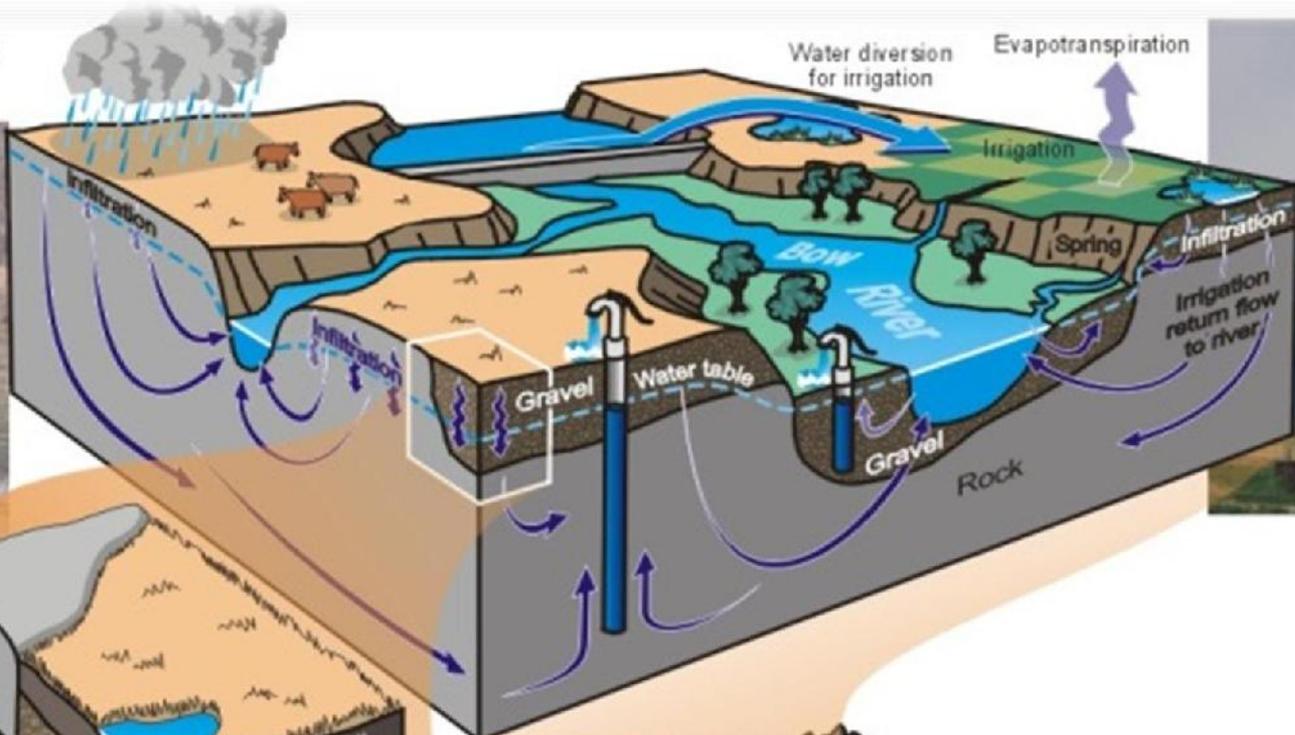
A hand pump provides groundwater for drinking at Big Hill Springs Provincial Park, near Cochrane.



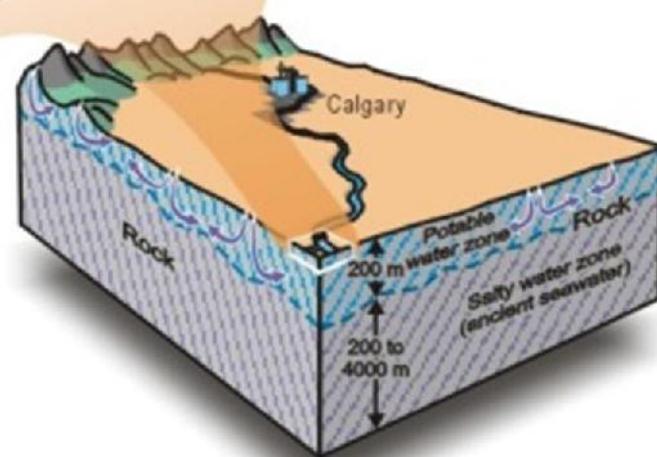
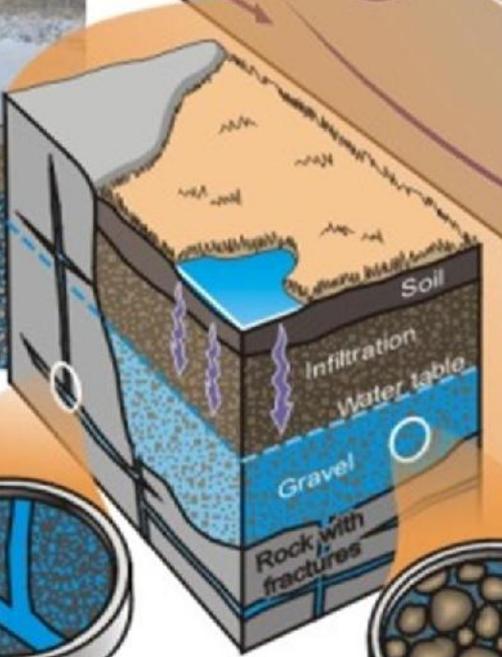
Water-filled fractures and pores in rock



Water-filled pores in gravel



A windmill pumps groundwater for cattle southeast of Calgary.



- Daerah lembah mati (*abandoned buried valleys*)

Lembah yang sudah tidak dilewati sungai.

Potensi airtanah cukup besar, namun suplai air yang diterima tidak sebesar daerah aliran air.

- Daerah dataran (*extensive plains*)

Dataran luas dengan endapan yang belum mengeras berupa pasir atau kerikil. Pengisian pada umumnya diperoleh dari perkolasi air hujan/sungai.

Contoh :

Dataran pantai, kondisinya ditentukan oleh keadaan geologi daerah pegunungan/perbukitan yang membatasi di bagian atas (daerah aliran sungai/basin) bertindak sebagai pensuplai bahan rombakan yang kemudian diendapkan di daerah rendah (pantai). Perlu diperhatikan kemungkinan adanya penyusupan air laut.

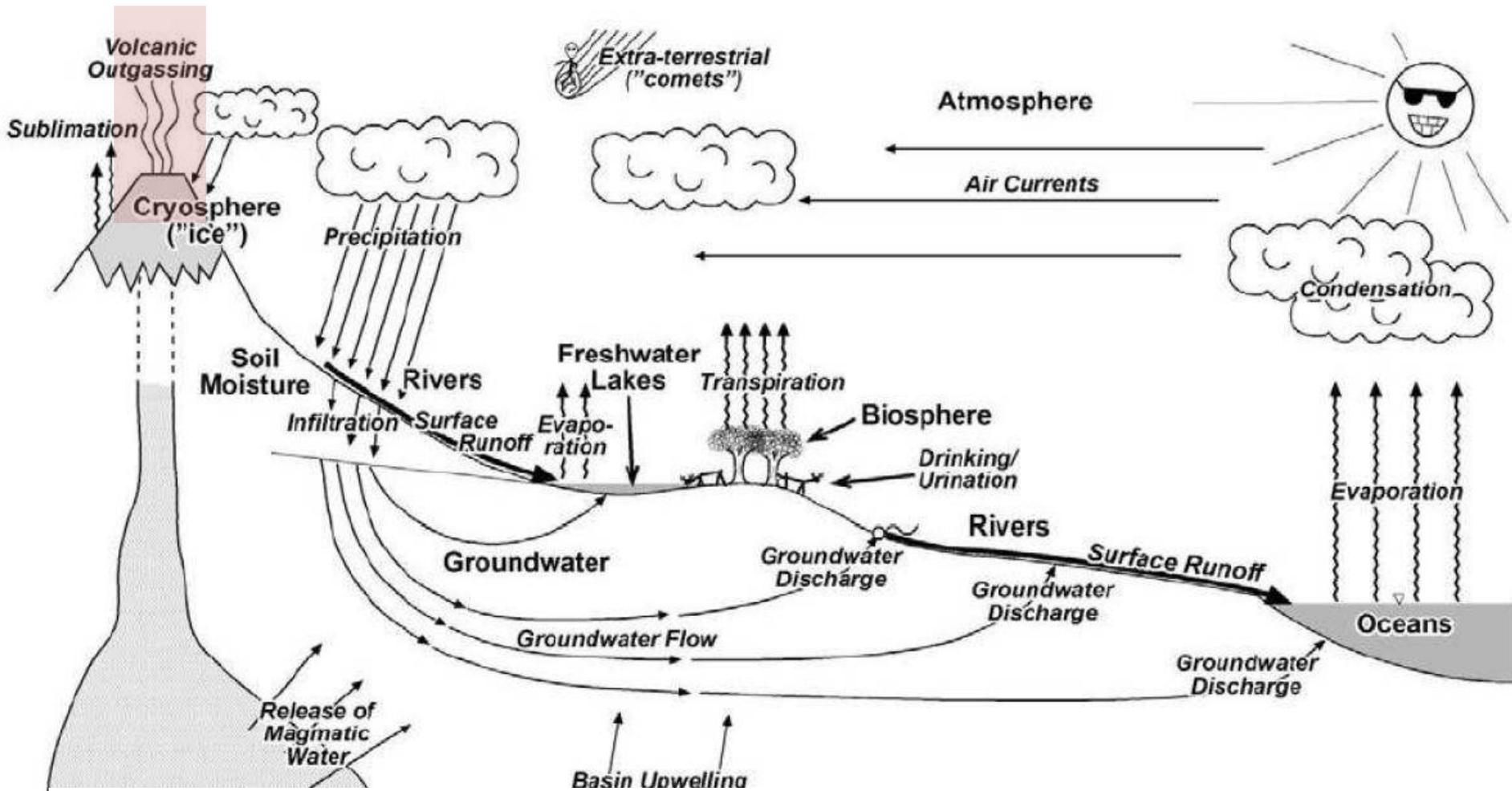
- Daerah lembah antar gunung (*intermountain valleys*)

Lembah yang dikelilingi oleh pegunungan/gunung dan tersusun oleh material lepas dalam jumlah yang sangat besar, berupa pasir dan kerikil. Daerah ini, menerima pengisian dari daerah tinggian (*recharge area*) di sekelilingnya maupun dari rembesan-rembesan sungai di mulut kipas alluvial.

Pada umumnya merupakan lembah-lembah tersendiri yang terpisah-pisah oleh pegunungan/gunung dengan jenis akuifer berupa airtanah tertekan.

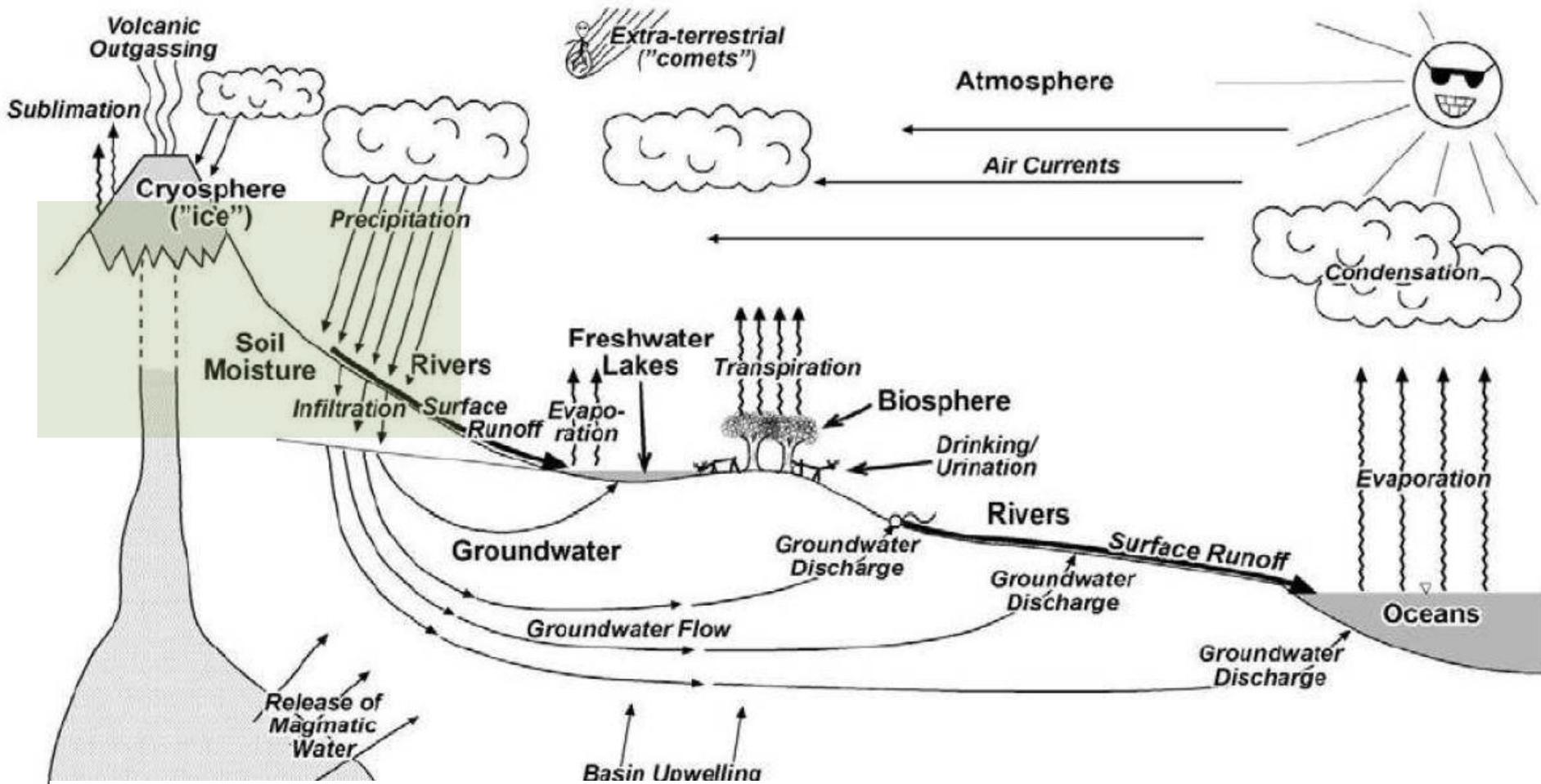
# Berdasarkan morfologinya, daerah gunungapi berperan dalam pembentukan airtanah, yaitu:

- Daerah puncak/kerucut gunung api
- Daerah tubuh gunungapi
- Daerah kaki gunungapi



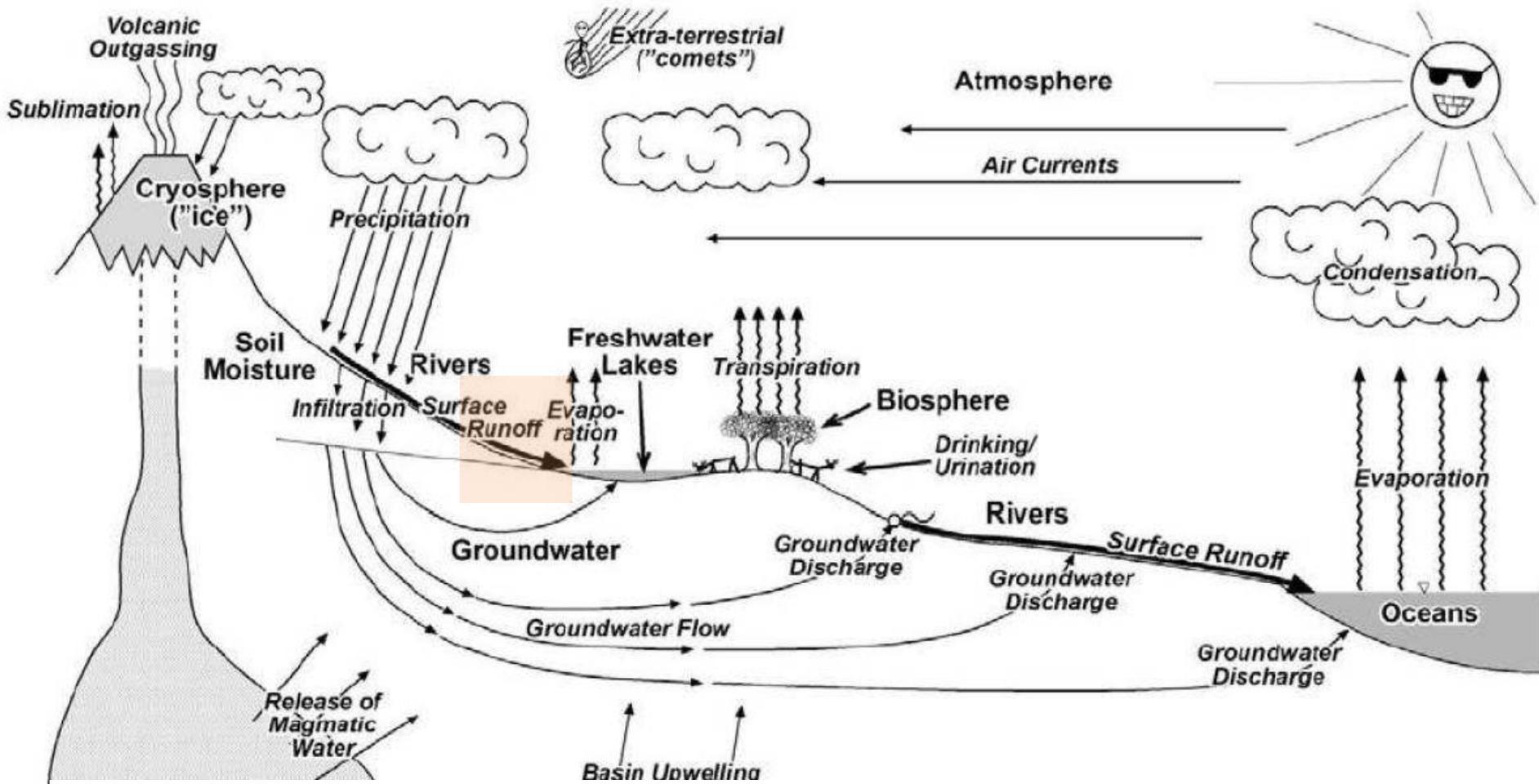
- Daerah puncak (kerucut gunungapi)

Daerah pengaliran permukaan dengan kemiringan lereng > 35°.



- Daerah tubuh gunungapi

Daerah perkolasi daerah awal terbentuknya airtanah, di sini sudah dijumpai adanya mataair. Kemiringan lereng  $10^{\circ}$  -  $20^{\circ}$ .



- Daerah kaki gunungapi  
 Daerah utama terbentuknya airtanah, kemiringan lereng  $< 5^\circ$ .

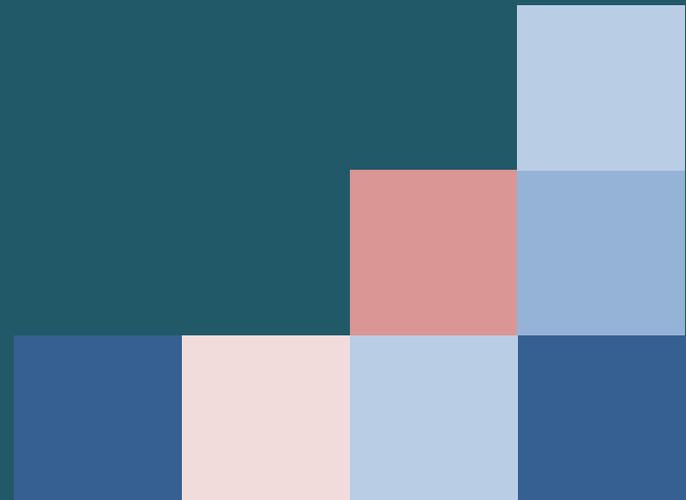
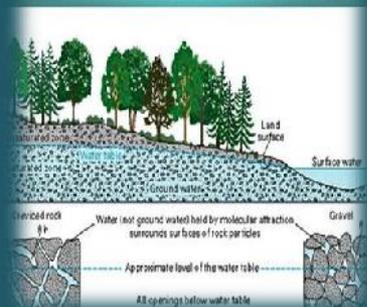
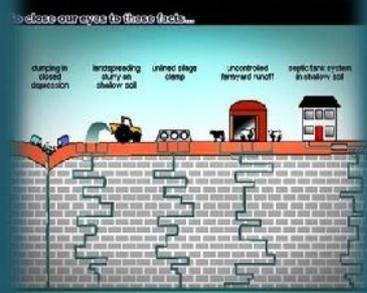
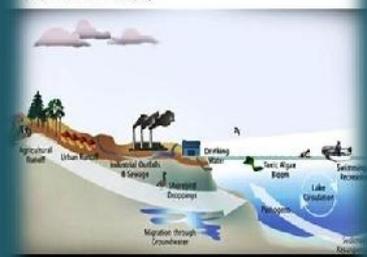
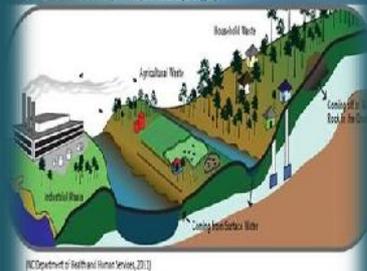


TERIMAKASIH



# BAB III

## Pemunculan Airtanah



# Keterdapatan Airtanah

Berdasarkan sifat material penyusun lapisan pembawa air, letak/keterdapatan airtanah di alam dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

- Material lepas (*unconsolidated materials*)
- Material kompak (*consolidated materials*)

Kira-kira 90 % airtanah dijumpai pada material lepas berupa pasir, kerikil, campuran pasir dan kerikil, dsb.

# Pembagian jenis batuan & jenis porositas Terkait ketersediaan airtanah

(Dept. of Economic and Social affairs, menurut Todd,dk 1980)

Tipe porositas/ kesarangan	Batuan Sedimen			Batuan Beku & Batuan Metamorf	Batuan Vulkanik	
	Kompak	Lepas	Karbonat		Kompak	Lepas
Antar butiran	---	Pasir kerikilan, Pasir lempungan, Lempung pasiran	---	Zona pelapukan dari Granit ataupun Gneis	Zona pelapukan Basal	Batuan vulkanik lepas, berupa blok hingga debu vulkanik
Antar butiran & retakan	Breksi, Konglomerat, Batupasir	---	Batugamping oolitik	---	Breksi vulkanik, Tuf, Batuapung	---
Retakan	---	---	Batugamping dolomit	Granit, Gabro, Diorit, Kuarsit, Gneis, Sekis	Basal, Andesit, Riolit	---

# Keterdapatannya airtanah pada material kompak, dijumpai pada :

- Batugamping
- Batuan beku gang (dalam)
- Batuan vulkanik

# Berdasarkan daerah pembentukannya, letak/ ketersediaan airtanah pada material lepas dapat dibedakan menjadi empat wilayah, yaitu:

- Daerah aliran air (*water courses*) dataran/endapan aluvial yang terletak di kanan kiri sungai yang mengalir. Apabila muka air sungainya lebih tinggi dari muka airtanah, maka potensi airtanah cukup besar.
- Daerah lembah mati (*abandoned buried valleys*) lembah yang sudah tidak dilewati sungai. Potensi airtanah cukup besar, namun suplai air yang diterima tidak sebesar daerah aliran air.
- Daerah dataran (*extensive plains*) dataran luas dengan endapan (pasir ataupun kerikil) yang belum mengeras. Pengisian pada umumnya diperoleh dari perkolasi air hujan/sungai.
- Daerah lembah antar gunung (*intermountain valleys*) lembah yang dikelilingi oleh pegunungan/gunung dan tersusun material lepas (pasir dan kerikil) dalam jumlah yang sangat besar. Pengisian dari daerah tinggian di sekelilingnya maupun rembesan sungai di mulut kipas alluvial.

Pemunculan Airtanah



MATAAIR/*SPRINGS*

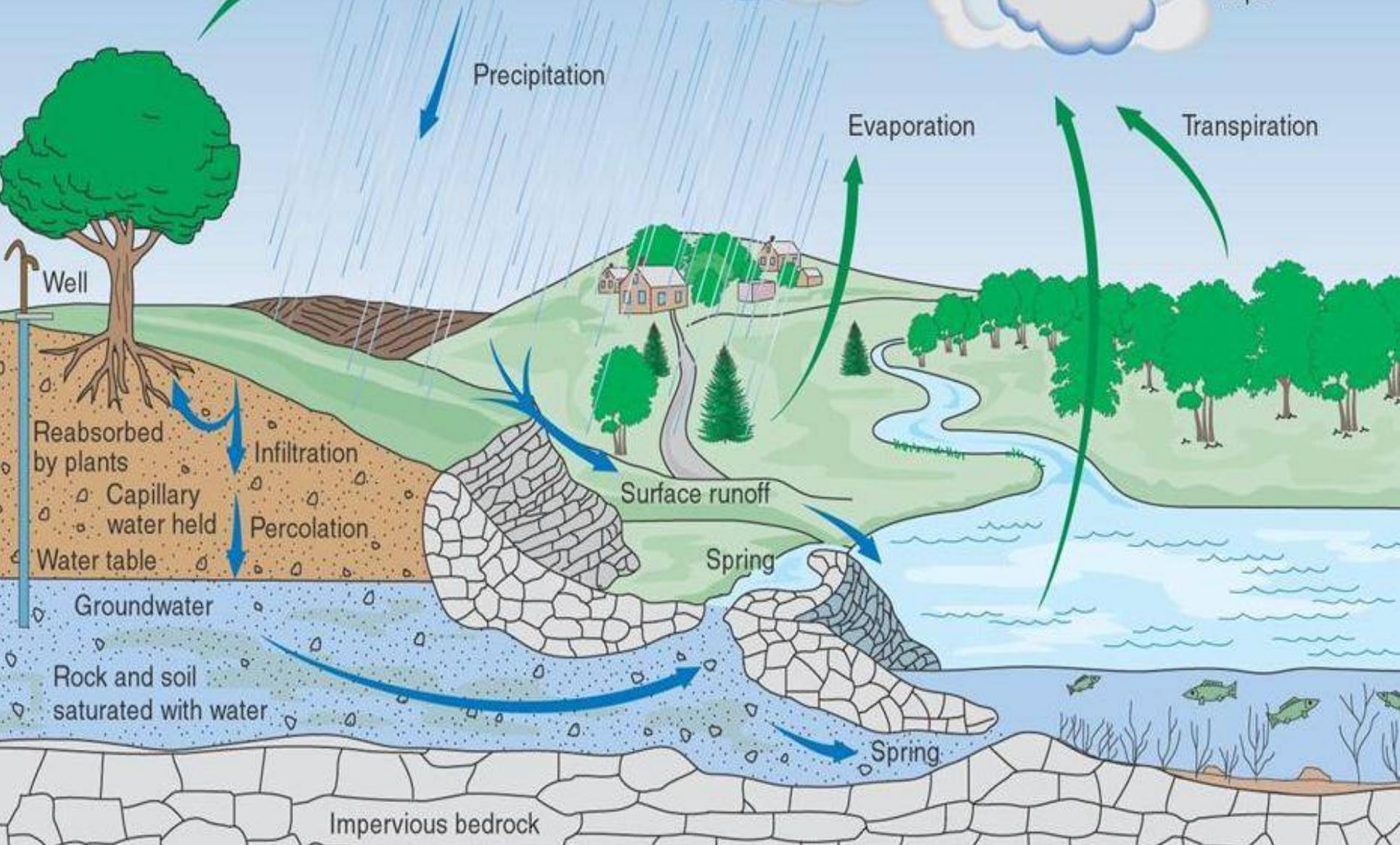
Mataair?

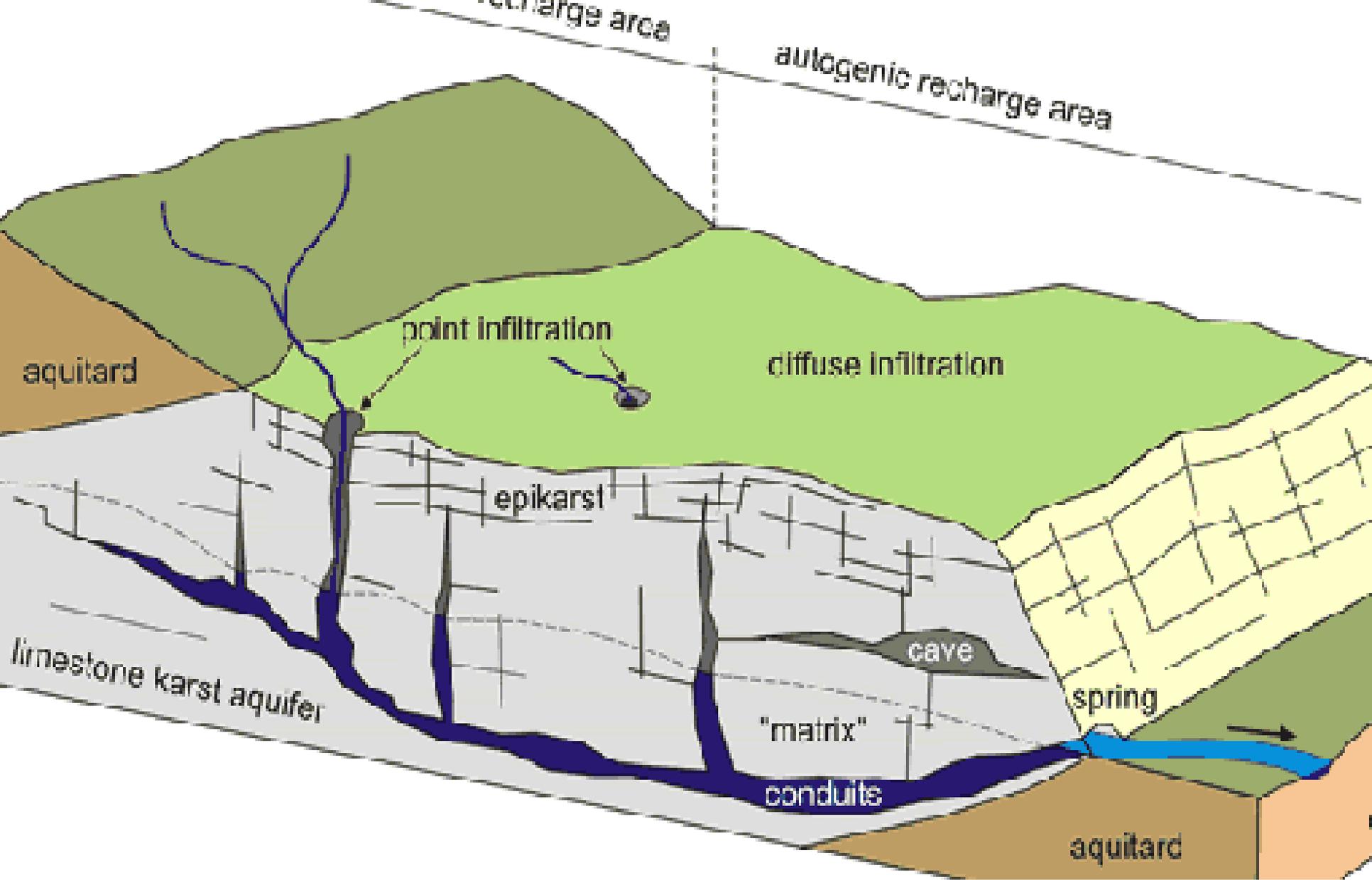
pemusatan dari pengeluaran airtanah yang muncul pada permukaan tanah sebagai arus dari aliran air.

air yang keluar secara alamiah pada suatu tempat dari celah yang tertentu.

Rembesan?

air yang keluar perlahan-lahan dan menyebar pada permukaan tanah.





## Klasifikasi/pembagian mataair :

- 1) Sifat pengaliran;
- 2) Besarnya debit pengaliran;
- 3) Suhu air;
- 4) Tenaga penyebab; dan
- 5) Tipe material pembawa air.

# Klasifikasi mataair berdasarkan sifat pengalirannya

- Mata air menahun (*perennial springs*) mataair yang mengeluarkan airnya sepanjang tahun.
- Mata air musiman (*intermitten springs*) mataair yang mengeluarkan airnya pada musim-musim tertentu. Pada musim penghujan mataair tersebut mengeluarkan air, sedangkan pada musim kemarau mataair tersebut mati.
- Mata air periodik (*periodic springs*) mataair yang mengeluarkan airnya pada periode-periode yang tertentu.

Hal ini disebabkan oleh adanya pengurangan proses penguapan pada malam hari, perubahan tekanan luar, adanya pasang surut dari permukaan laut, proses pendidihan air oleh tubuh batuan yang panas.

# Klasifikasi mataair berdasarkan besar debit pengalirannya

- Debit  $> 100$  cfs  $\pm 2829,98$  liter/detik
- Debit antara 10 – 100 cfs.
- Debit antara 1 – 10 cfs
- Debit antara 100 galon/menit – 1 cfs
- Debit antara 10 – 100 galon/menit
- Debit antara 1 – 10 galon/menit
- Debit antara 1 pt/menit – 1 galon/menit
- Debit antara  $<1$  pt/menit

Keterangan :

- 1 pt : 180 galon/hari
- 1 pt : 0,5682 liter
- 1 cfs : 449 galon/menit
- 1 cfs : 23,8 liter/detik

## Klasifikasi mataair berdasarkan suhu air

- Mataair sejuk (*cold springs*)
- Mataair normal (*ordinary temperature springs*)/*non thermal springs*
- Mataair panas (*thermal springs*)

Batasan suhu hanya diberikan antara mataair normal dengan mataair panas  $21,11^{\circ}\text{C}$  hanya untuk daerah dingin.

Batasan suhu sebaiknya dilakukan dengan membandingkan suhu udara tempat keterdapatan mataair.

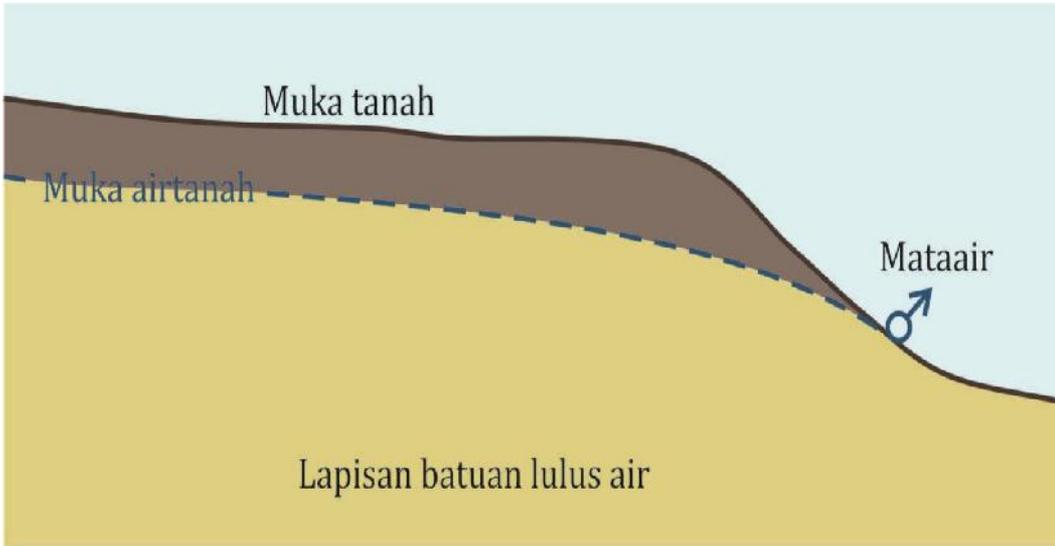
# Klasifikasi mataair berdasarkan tenaga penyebab pembentuk mataair

Gaya Gravitasi

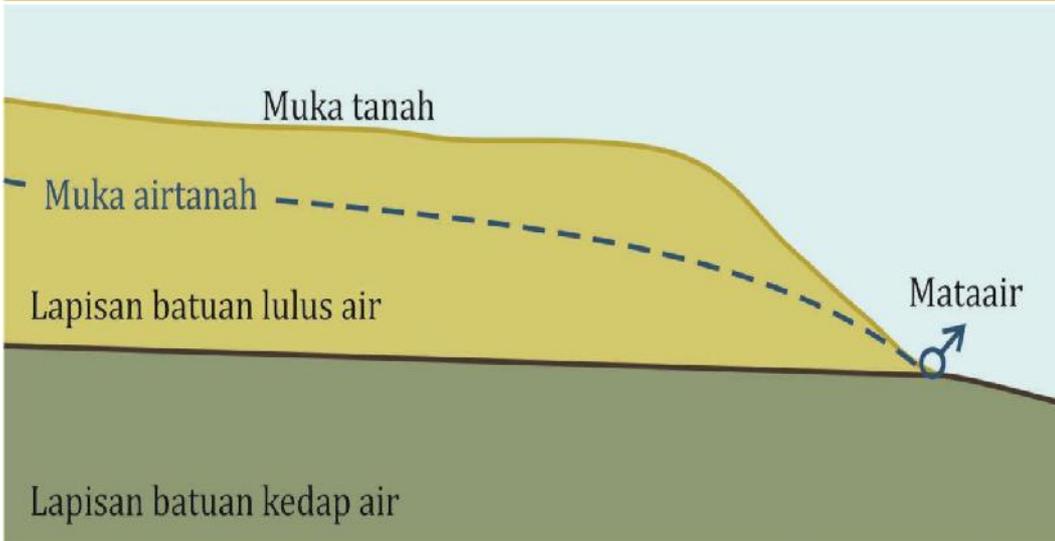
Selain Gaya Gravitasi

Mataair muncul di permukaan tanah oleh adanya tenaga dalam bumi, seperti : air panas, geiser dan sebagainya.

# Klasifikasi mataair berdasarkan tenaga penyebab pembentuk mataair gaya gravitasi

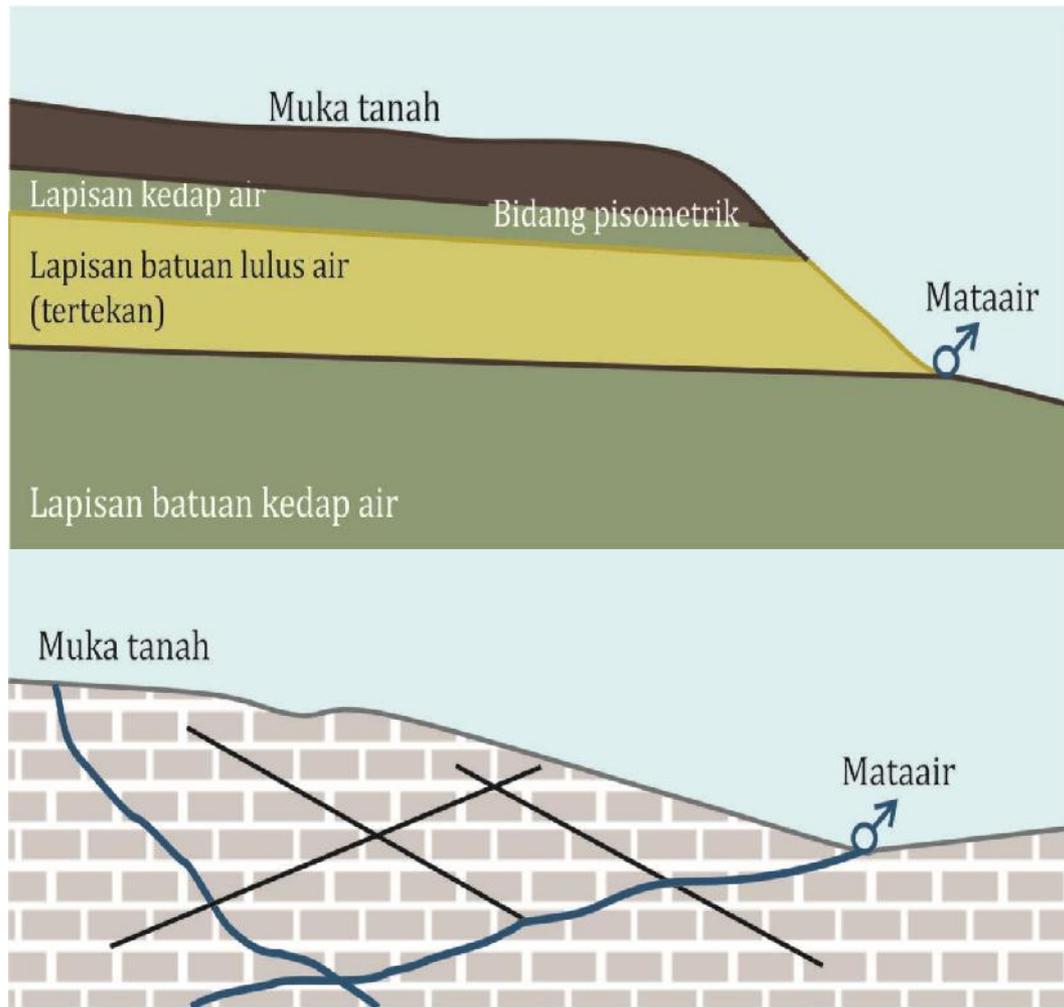


Mataair cekungan disebabkan karena permukaan tanah memotong muka airtanah setempat pada material (batuan) yang lulus air.



Mataair kontak muncul pada kontak (batas) antara batuan lulus air dengan batuan kedap air di bawahnya.

# Klasifikasi mataair berdasarkan tenaga penyebab pembentuk mataair gaya gravitasi



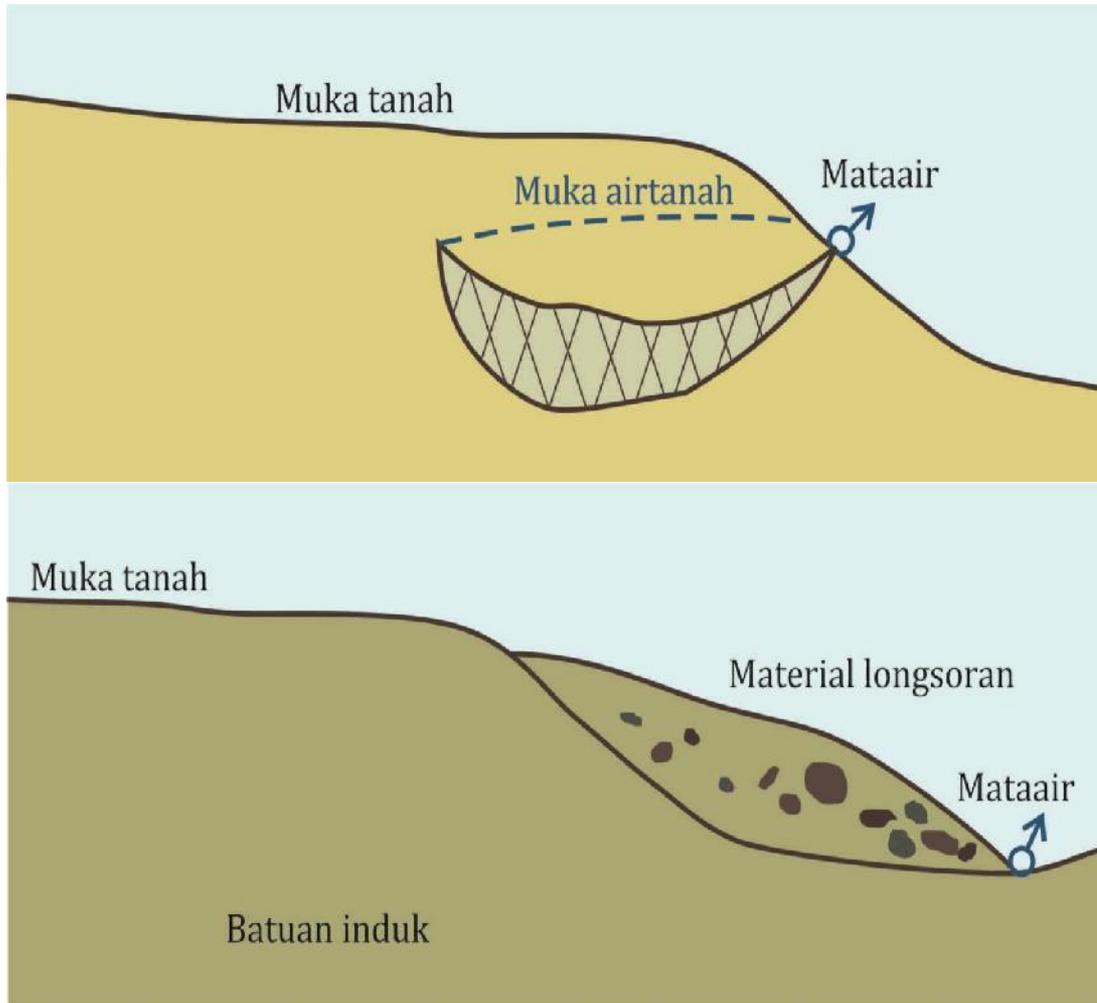
## Mataair artesis

terbentuk akibat terpotongnya lapisan akuifer tertekan oleh struktur geologi ataupun aktifitas manusia.

## Mataair melalui lubang sekunder

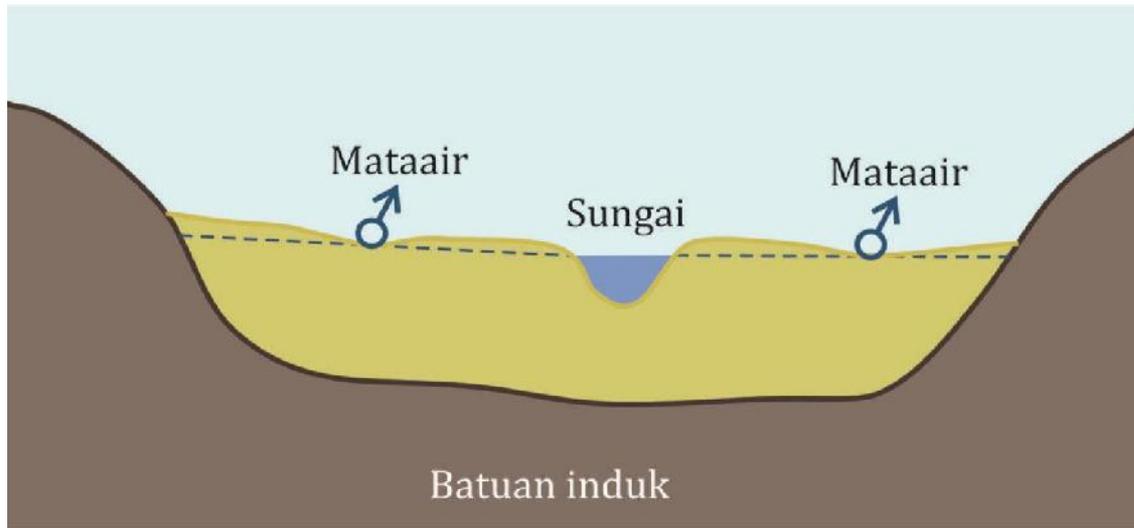
muncul melalui lubang pelarutan pd batugamping ataupun rekahan-rekahan pd lava /batuan beku lain.

# Klasifikasi mataair berdasarkan tipe material pembawa air (akuifer)



Mataair muncul dari material lulus air yang tipis mataair akuifer menggantung (atas), mataair talus (bahan rombakan), dan mataair pada material longSORAN (bawah).

# Klasifikasi mataair berdasarkan tipe material pembawa air (akuifer)



Mataair muncul dari material lulus air yang tebal mataair lembah atau mataair pada alur.

- Mataair muncul berselang-seling antara material lulus air dan kedap air berhubungan dgn struktur geologi, seperti kehadiran antiklin, sinklin, dsb.
- Mataair muncul melalui saluran lubang pelarutan pada batugamping.
- Mataair muncul pada lava muncul dari tepi singkapan lava yang terpotong oleh permukaan tanah setempat.
- Mataair muncul dari retakan pada batuan.

# Mataair Khusus

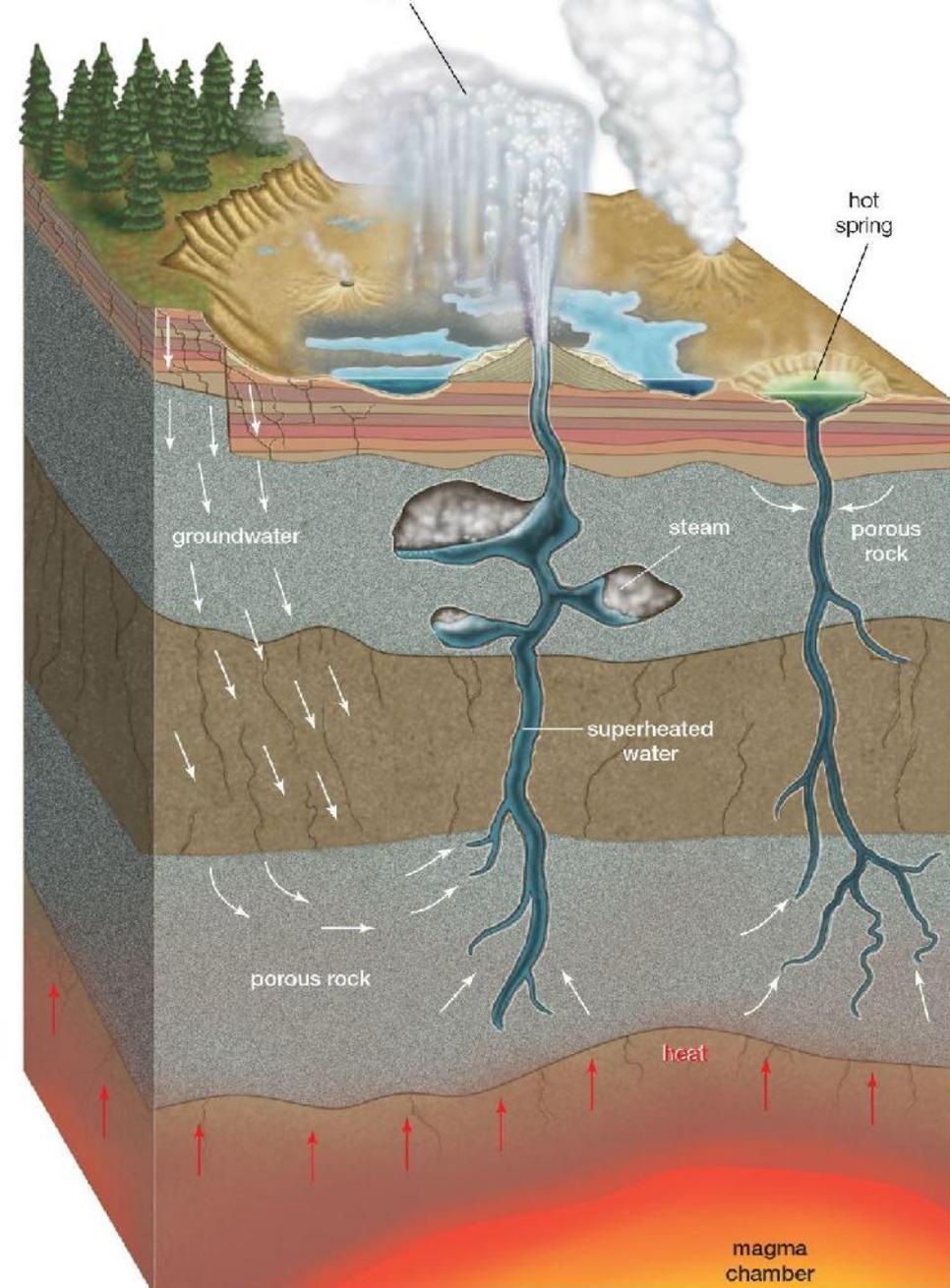
Mataair khusus dipengaruhi oleh kondisi geologi tertentu, sehingga mataair akan memiliki sifat yang tertentu pula.

- Mataair panas suatu lapisan pembawa air berada dekat dengan massa batuan vulkanik yang masih aktif atau belum mendingin, ataupun lapisan pembawa air berada jauh di dalam bumi akan memiliki suhu lebih tinggi dari suhu di permukaan dan dapat pula diakibatkan peristiwa kimia (radioaktif).
- Geyser mataair panas yang memancar keluar secara periodik, umumnya dijumpai di daerah vulkanik.
- Mataair mineral mengandung garam terlarut dalam jumlah relatif di atas normal.

# Mataair Khusus

Dipengaruhi kondisi geologi tertentu, sehingga mataair akan memiliki sifat yang tertentu pula.

- Mataair panas lapisan pembawa air berada dekat dengan massa batuan vulkanik yang masih aktif atau belum mendingin.
- Geyser mataair panas yang memancar keluar secara periodik, umumnya dijumpai di daerah vulkanik.



# CONE GEYSER

Side channels can often release pressure within thermal systems. They can act as indicators of when primary feature eruptions may occur.

Water cools near the vent's surface. This cooler water "caps" the hotter water below. Eventually, superheated water (water heated above boiling by pressure) flashes to steam, expanding and lifting the water above the vent in an eruption.

Side Channel

Silica is dissolved from the volcanic rock, rhyolite, and precipitates as sinter, which forms the geyser cone.

Sinter

Sinter

High pressure area caused by expanding water and steam.

Sinter is deposited on the walls and acts like a throttle in the vent by constricting water circulation and allowing pressure to build up.

Recharge of superheated water.



Mataair mineral mengandung garam terlarut dalam jumlah relatif di atas normal.

Proses Pembentukan:

Kandungan garam dapat berasal dari proses pelarutan batuan yang dilalui airtanah ataupun berasal dari penyusupan air laut. Jumlah kandungan garam dalam airtanah dipengaruhi :

1) jarak perjalanan air tanah, 2) jenis batuan yang dilewati, 3) tekanan dan suhu lingkungan, serta 4) kandungan gas di dalam airtanah tersebut.

Contoh: mataair asin ( $\text{NaCl}$ ), mataair sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), mataair tawas ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_2$ ), mataair belerang, mataair kaya bahan organis akan menimbulkan warna seperti pelangi pada permukaan air.

# Fluktuasi airtanah

Muka airtanah baik, berupa muka airtanah bebas (phreatic) maupun muka airtanah pisometrik elevasi tekanan atmosfer dari akuifer.

Setiap penyimpangan dari keadaan normal yang menghasilkan suatu perubahan dalam tekanan airtanah menyebabkan muka airtanah berubah.

Perubahan dapat terjadi bervariasi dari waktu ke waktu oleh adanya perbedaan penambahan dan pengambilan airtanah, dsb. Perubahan muka airtanah disebabkan oleh :

- 1) pemompaan,
- 2) variasi tingkatan aliran,
- 3) evaporasi, transpirasi, infiltrasi
- 4) pembebanan dari luar, dan
- 5) pasang surut.

# Jenis Fluktuasi, berdasarkan waktu :

1) *Secular* perubahan berlangsung dalam skala tahunan.

Hal ini dapat disebabkan oleh panjangnya musim kemarau atau sebaliknya. Selain itu, dapat disebabkan oleh curah hujan di atas atau di bawah rata-rata tahunannya, namun curah hujan bukan patokan fluktuasi airtanah.

2) *Seasonal* perubahan berlangsung setiap musim.

Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan musim, misalnya musim kemarau dengan musim penghujan.

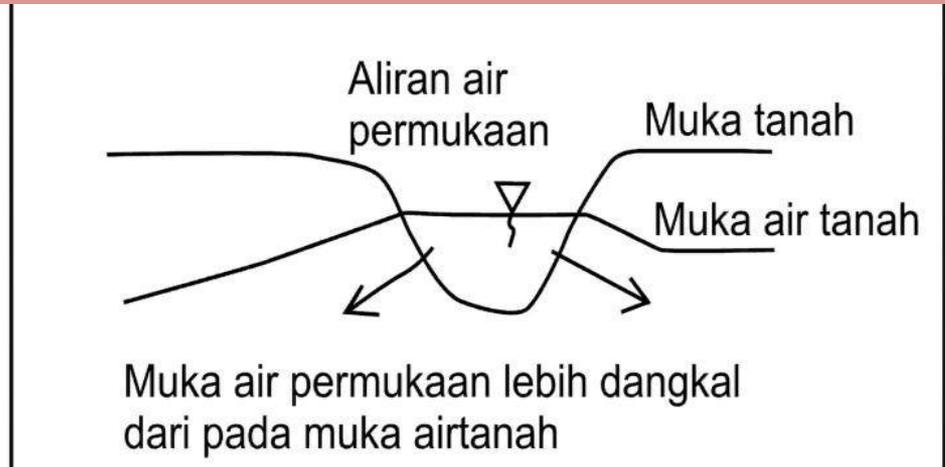
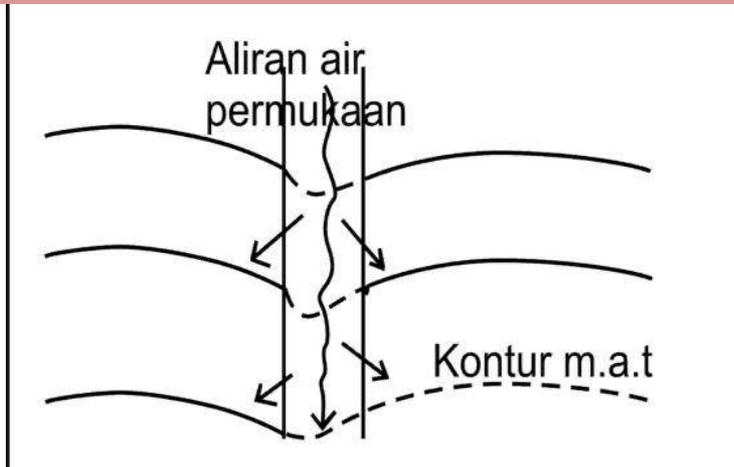
3) *Journal* perubahan berlangsung dalam skala harian.

Perubahan muka airtanah jenis ini dapat disebabkan oleh adanya perbedaan besar penguapan ataupun perbedaan tekanan udara.

4) *Temporer* perubahan berlangsung sesaat.

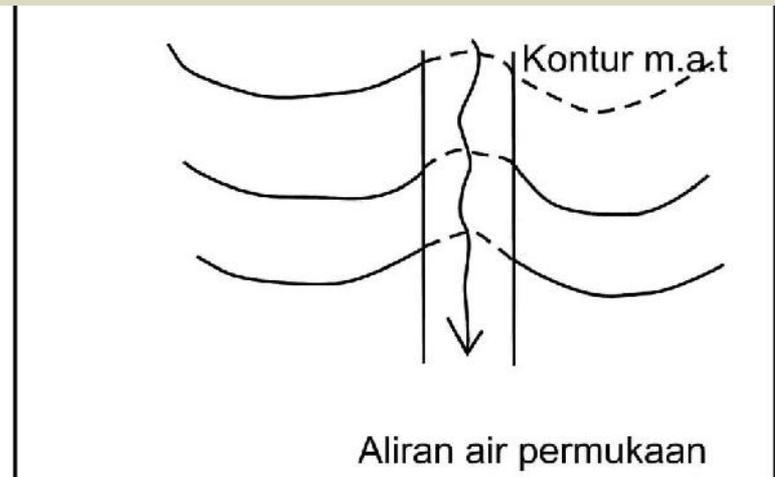
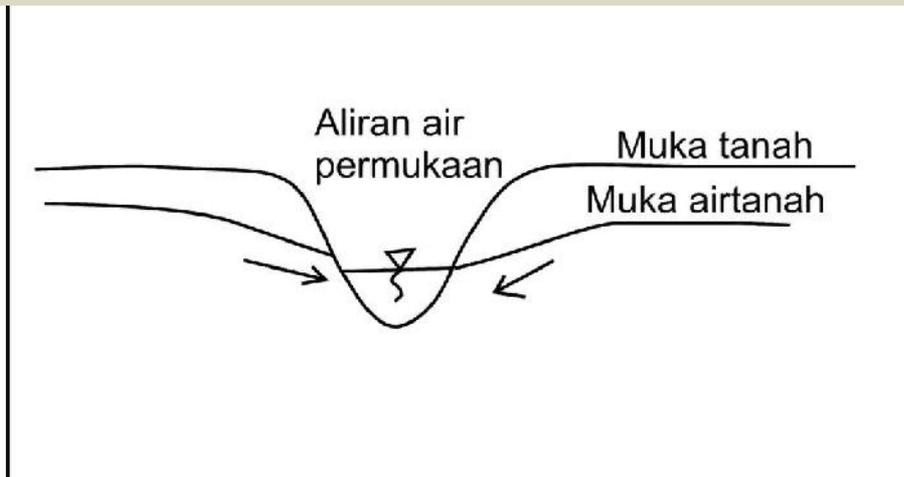
Hal ini dipicu oleh adanya gempa bumi yang menyebabkan perubahan fluktuasi secara temporer ataupun dapat disebabkan adanya muatan dari luar.

# Pengaruh aliran (air permukaan) terhadap fluktuasi



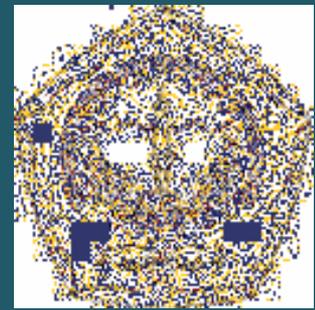
Sungai influent (*losing stream*)

aliran air permukaan berperan sebagai pemberi air pada airtanah.



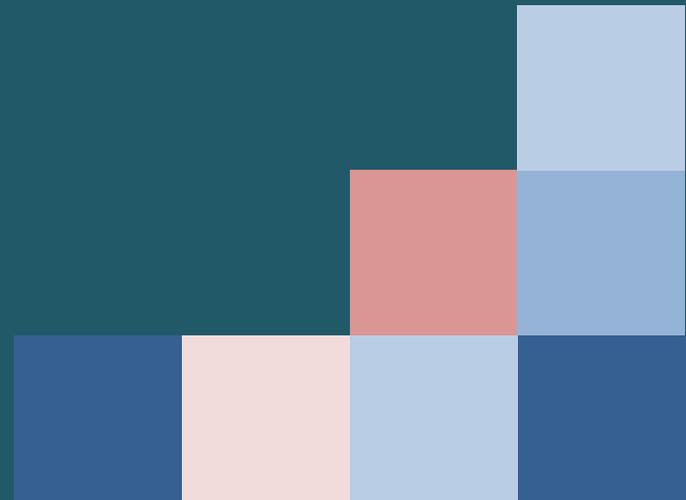
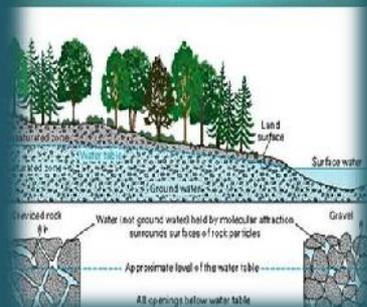
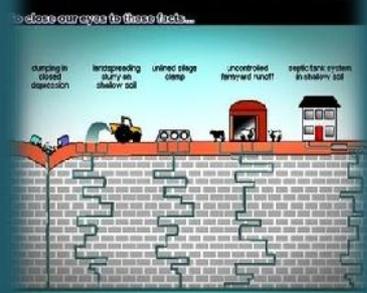
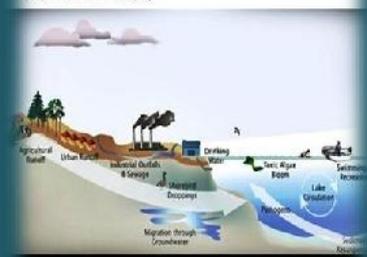
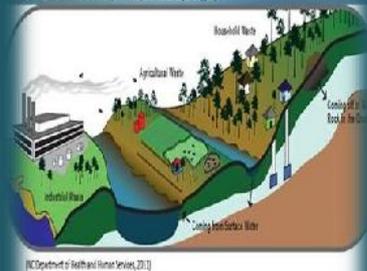
Sungai effluent (*gaining stream*)

Airtanah berperan sebagai pemberi/mensuplai air pada aliran air permukaan.

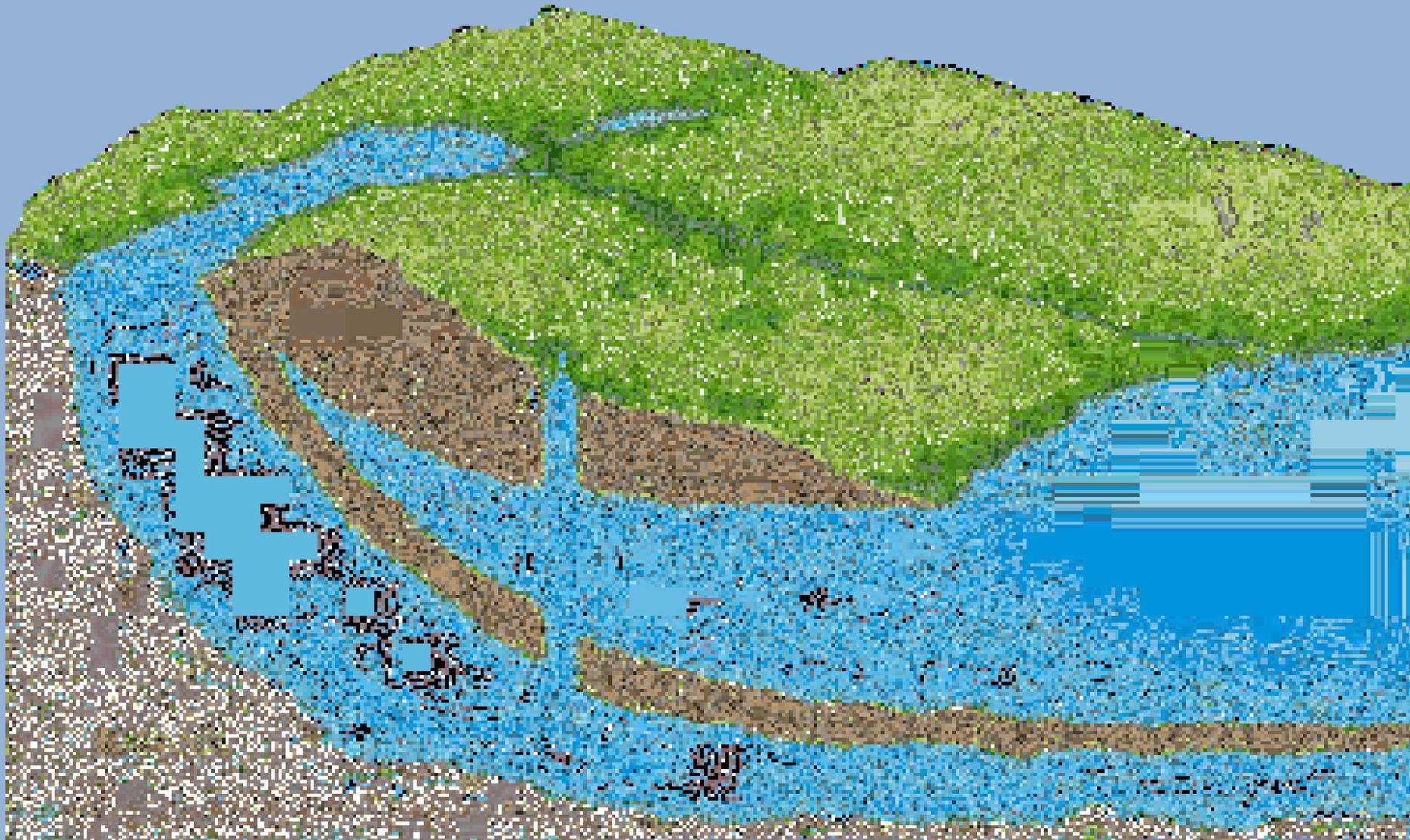


# BAB IV

## Jenis & Pengujian Akuifer



Apakah akuifer?



## Akuifer Bebas/Akuifer Tidak Tertekan (*Unconfined aquifer*)

jenis akuifer dengan muka airtanah sebagai bidang batas sebelah atas pada zona jenuh air.

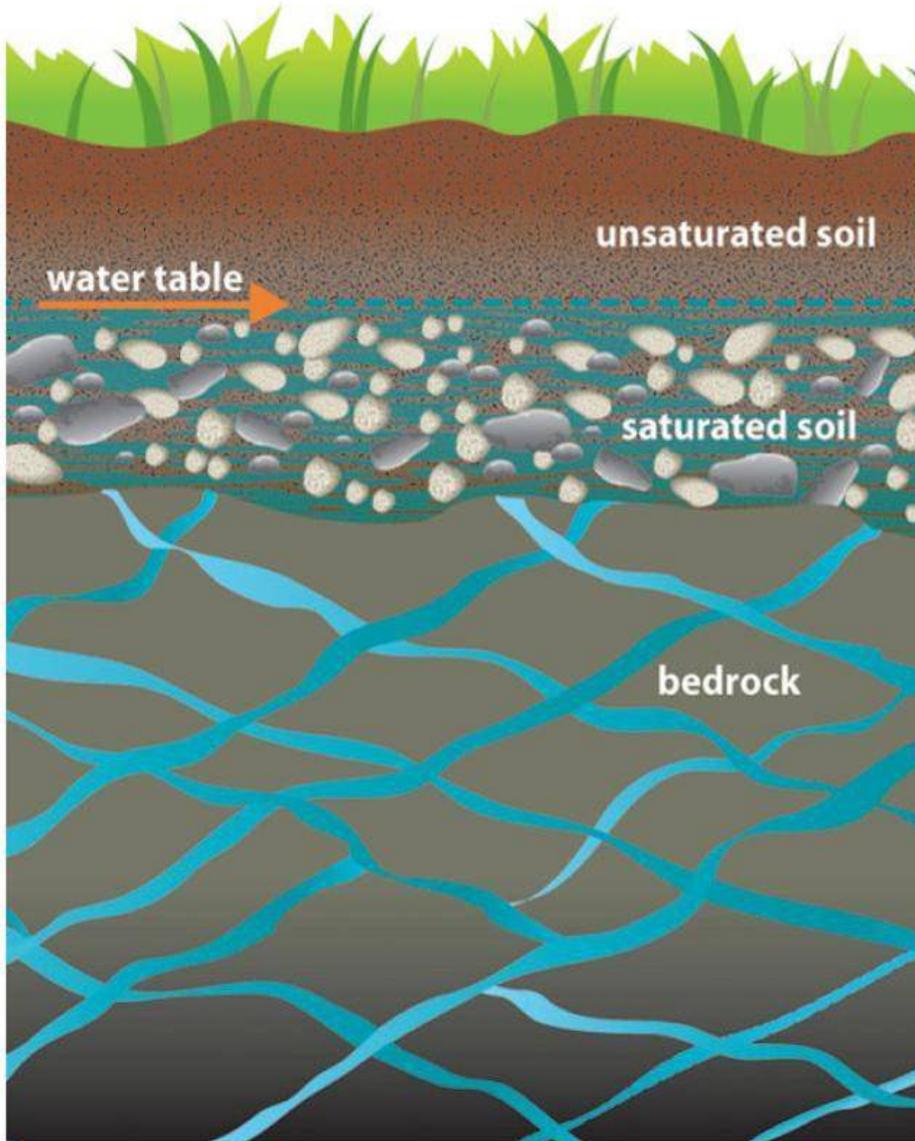
Akuifer ini disebut juga sebagai *phreatic aquifer*, *nonartesian aquifer* atau *free aquifer*.

## Akuifer Tertekan/Akuifer Terkekang (*Confined Aquifer*)

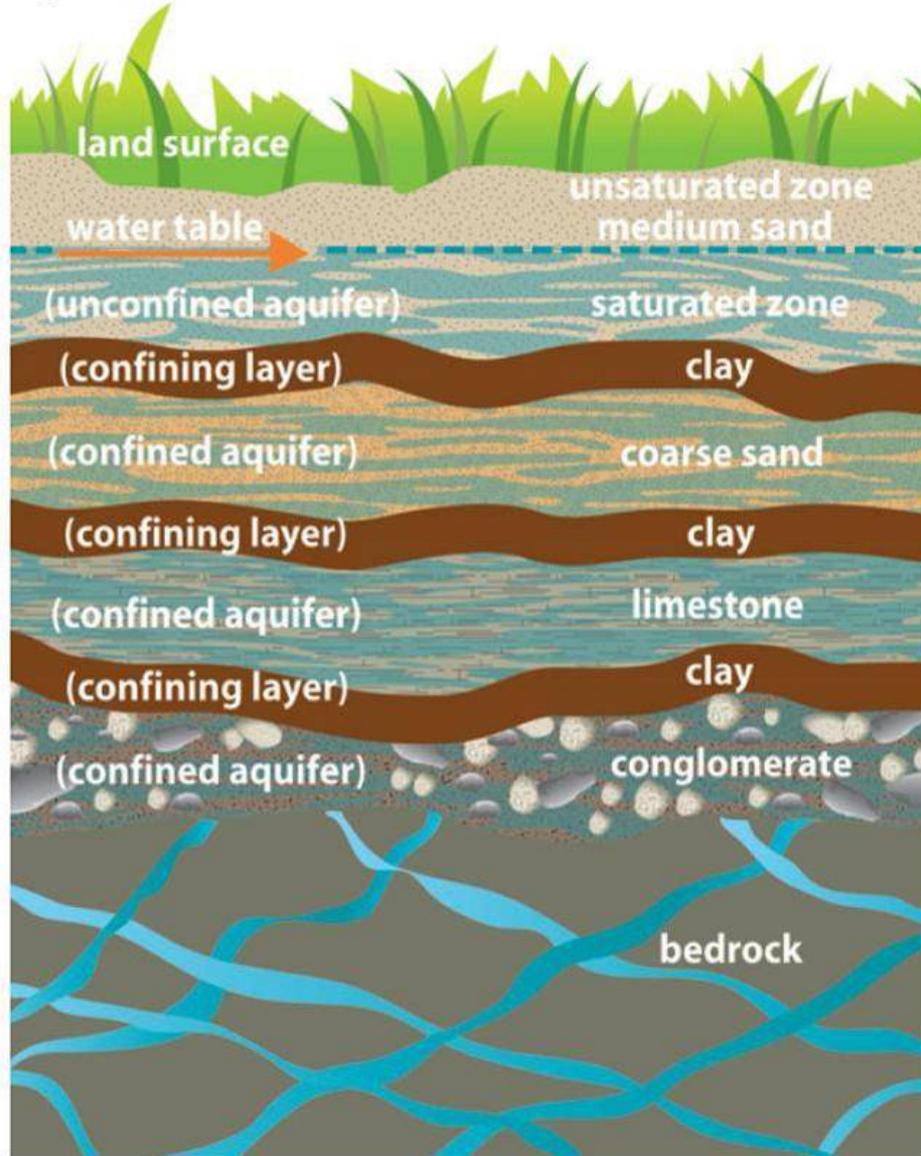
suatu jenis akuifer dengan airtanah terletak di bawah lapisan kedap air (*impermeable*) dan memiliki tekanan lebih besar daripada tekanan atmosfer.

Akuifer ini disebut juga *pressure aquifer* atau *artesian aquifer*.

## AQUIFER TYPICAL OF THE PIEDMONT AND MOUNTAINS



## AQUIFER TYPICAL OF THE COASTAL PLAIN



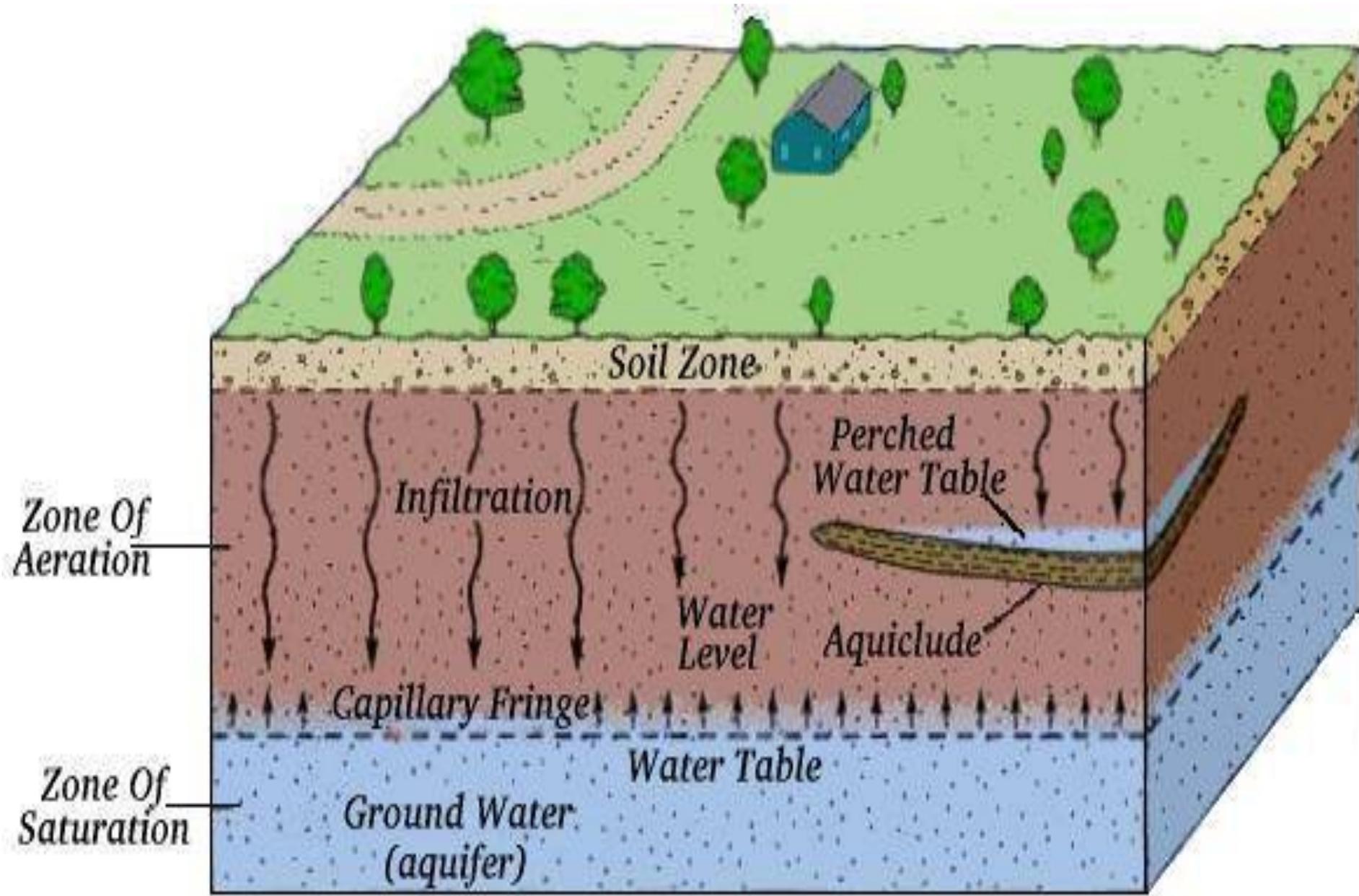
## Akuifer Bocor (*Leakage Aquifer*)

jenis akuifer dengan airtanah terletak di bawah lapisan setengah kedap air.

Pada umumnya, akuifer ini dijumpai terletak diantara akuifer bebas dengan akuifer tertekan.

## Akuifer Menggantung/Akuifer Tumpang (*Perched Aquifer*)

akuifer dengan massa airtanah terpisah dari airtanah induk oleh suatu lapisan yang relatif kedap air yang tidak begitu luas dan terletak di atas zone jenuh air.



# Bidang Pisometrik (Kruseman, 1970)

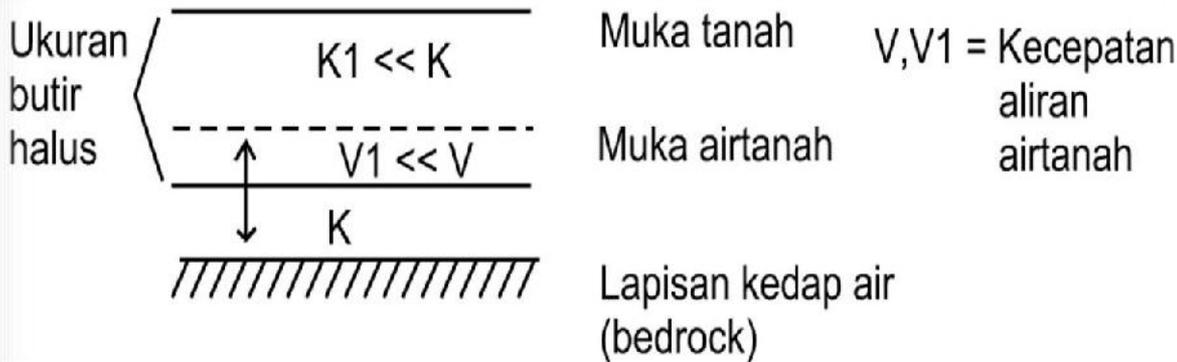
suatu permukaan imajiner/bayangan yang berimpitan dengan permukaan tekanan hidrostatik pada akuifer tertekan.

Jenis akuifer berdasarkan harga kelulusan air, dapat dibedakan menjadi empat, yaitu :

- 1) Akuifer Bebas (*Unconfined Aquifer*);
- 2) Akuifer Setengah Bebas (*Semi-unconfined Aquifer*);
- 3) Akuifer Tertekan (*Confined Aquifer*); Dan
- 4) Akuifer Bocor (*Leakage Aquifer*).

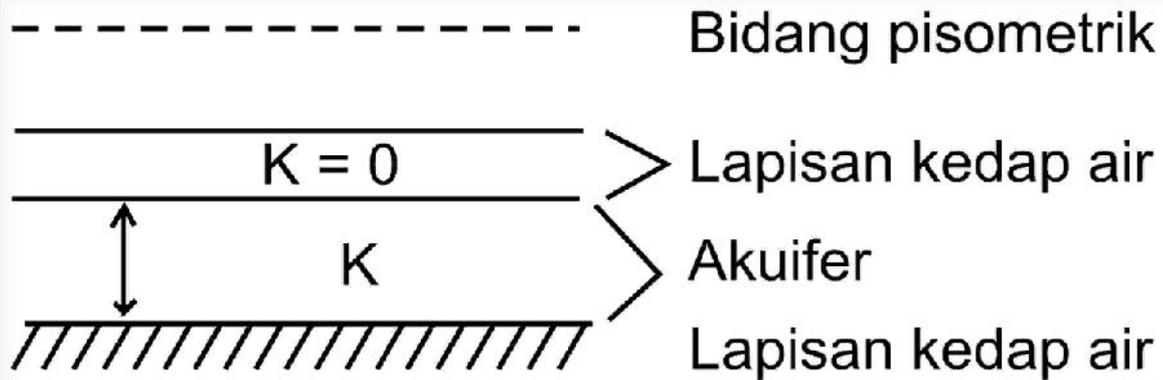


*Akuifer Bebas  
(Unconfined Aquifer)*

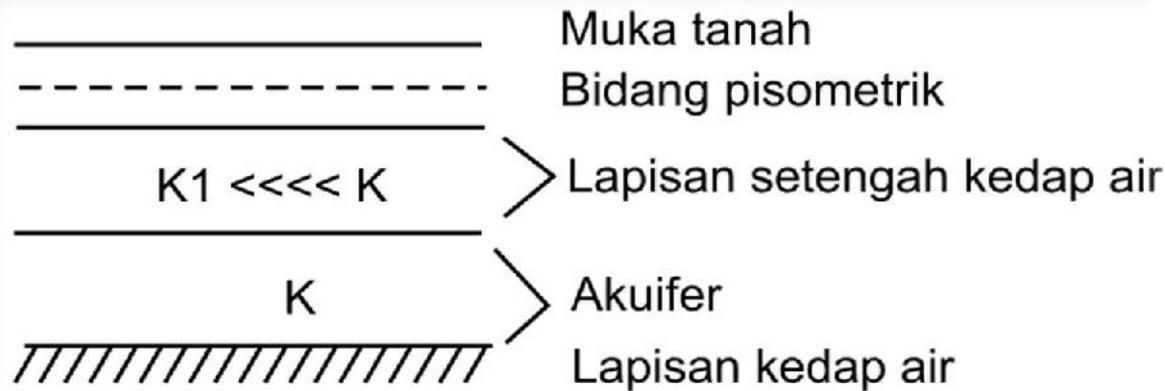


Akuifer Setengah Bebas  
*(Semi-Unconfined Aquifer)*

Aliran airtanah pada lapisan berbutir halus yang terletak di atas tidak dapat diabaikan walaupun harga  $K_1 \ll K$ , sehingga muka airtanahnya sedikit di atas lapisan pembawa air yang berada di bawah.



Akuifer Tertekan  
(*Confined Aquifer*)



Akuifer Bocor  
(*Leakage Aquifer*)

# Pengujian Akuifer

Sejumlah persamaan dalam penentuan hidrolika sumur hanya dapat digunakan dalam kondisi yang ideal, maka penerapan pada akuifer di lapangan perlu dibuat anggapan/asumsi hasil yang diperoleh merupakan pendekatan yang masih diijinkan.

Anggapan/asumsi tersebut :

- akuifer bersifat homogen maupun isotropis, dan
- akuifer mempunyai penyebaran luas tidak terbatas.

- Pengaliran sumur, pada akuifer tertekan maupun akuifer bebas dapat diakibatkan oleh pemompaan.
- Pemompaan dengan debit tetap (konstan) pada suatu sumur dapat menyebabkan terjadinya dua kondisi berikut :
  - 1) *Steady/Equilibrium Stage* (Kesetimbangan) muka airtanah (bidang pisometrik) turun sampai batas tertentu hingga tidak terjadi penurunan lagi.
  - 2) *Unsteady/Non Equilibrium Stage* (Tidak setimbang) terjadi penurunan muka airtanah (bidang pisometrik) pd saat dipompa dengan debit tetap.

Bidang pisometrik permukaan imajiner/bayangan yang berimpitan dengan permukaan tekanan hidrostatik pada akuifer tertekan.

# Pola Aliran

## Aliran Tetap (*Steady*)

- Aliran tetap satu arah.
- Aliran tetap memusat menuju sumur.

Masing-masing berlaku, baik pada akuifer bebas maupun akuifer tertekan.

## Aliran Tidak Tetap (*Unsteady*)

- Aliran tidak tetap pada akuifer bebas dengan hasil tunda & akuifer setengah bebas.
- Aliran tidak tetap pada akuifer setengah tertekan (*Semi-confined aquifer*).
- Aliran tidak tetap memusat menuju sumur

Oleh adanya kondisi tersebut, nilai debit ( $Q$ ) pada akuifer bebas maupun tertekan dapat ditentukan berdasarkan :

1) *Teori Equilibrium Steady* analisis dilakukan apabila telah tercapai kesetimbangan dan pemompaan dilakukan dengan debit tetap.

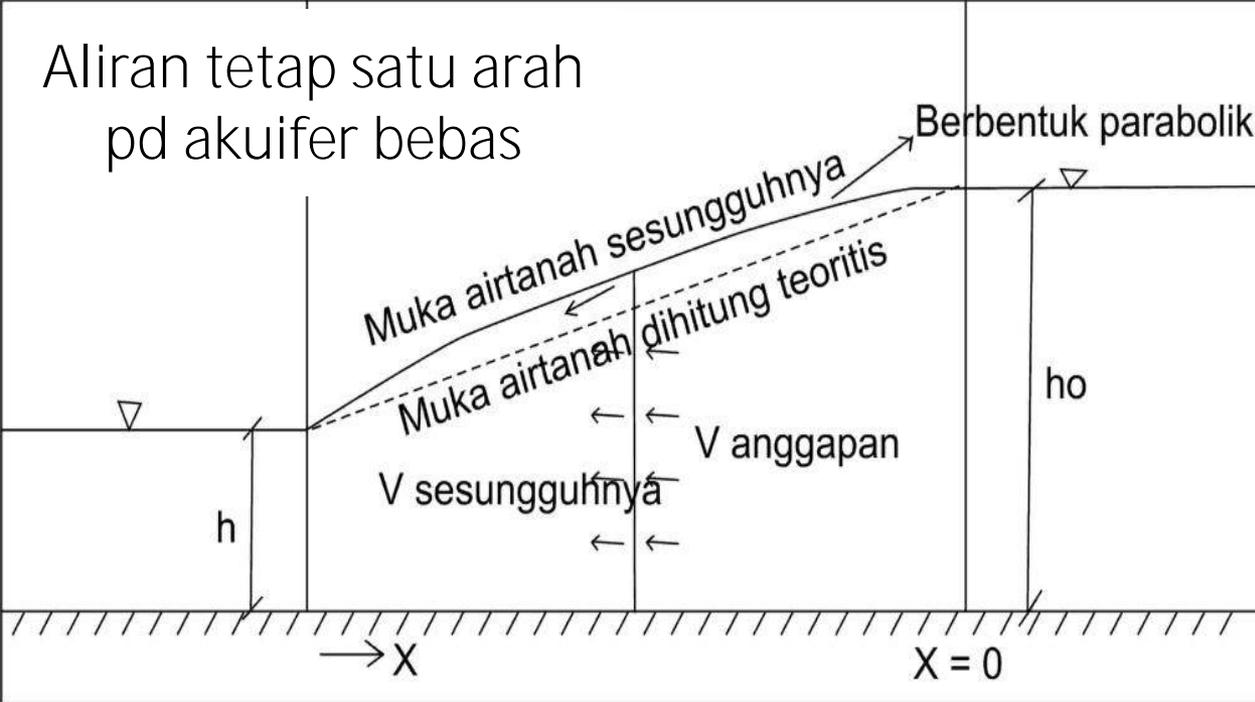
Dikemukakan, oleh: Theim, Hantush-Jacob, Ernst dsb.

2) *Teori Non Equilibrium Unsteady* analisis dilakukan sebelum tercapainya kesetimbangan dan pemompaan dilakukan dengan debit tetap.

Dikemukakan, oleh: Theis, Jacob, Chow, Hantush, Walton, Boulton dsb.

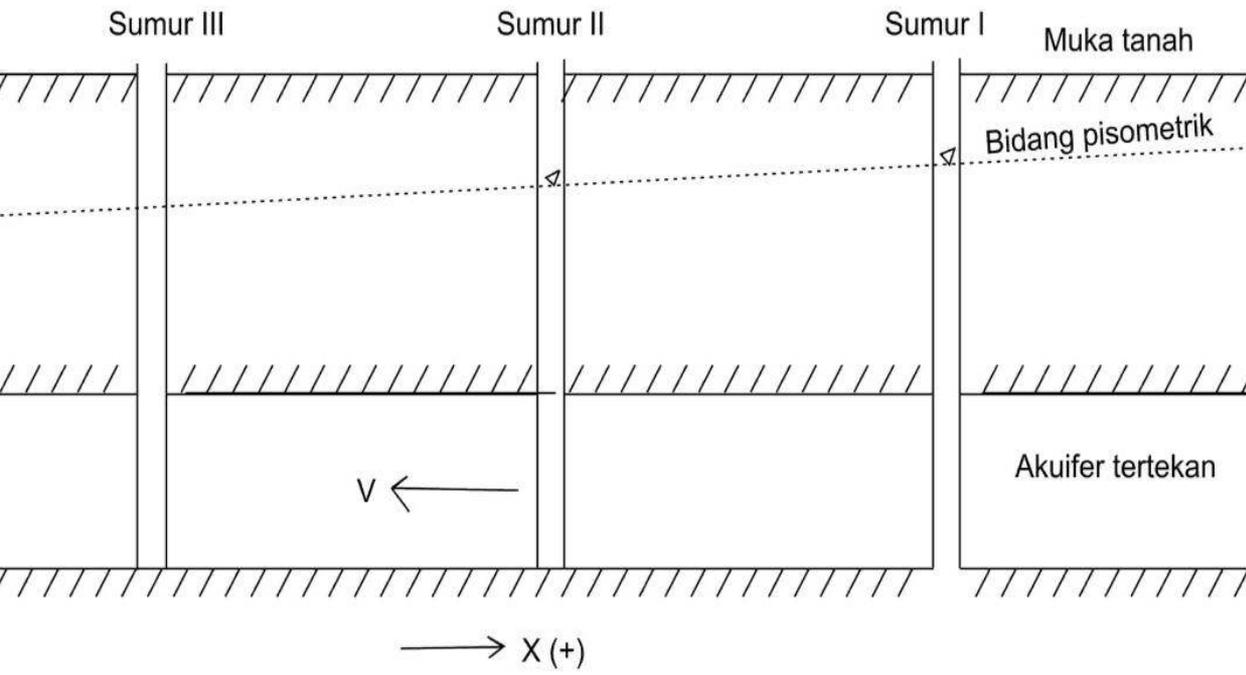
Aliran Tetap

Aliran tetap satu arah  
pd akuifer bebas

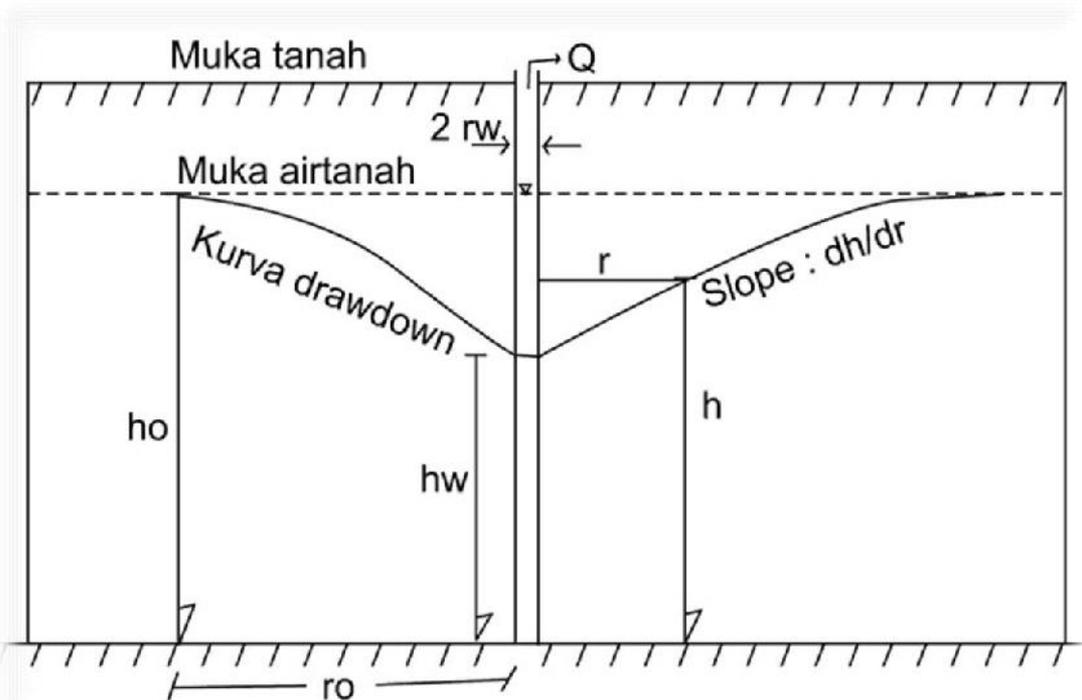


Berdasarkan Du Poit, diasumsikan :

- lapisan bersifat isotropis dan dalam kondisi tidak tertekan;
- kecepatan aliran berbanding lurus dengan landaian hidrolika ( $i$ );
- aliran harus horisontal dan seragam di seluruh bagian penampang tegak.



# Aliran tetap memusat menuju sumur pada akuifer bebas



Persamaan Theim

$$Q = A \cdot V$$

$$= -2 r h K \frac{dh}{dr}$$

$$h = h_w, r = r_w$$

$$h = h_0, r = r_0$$

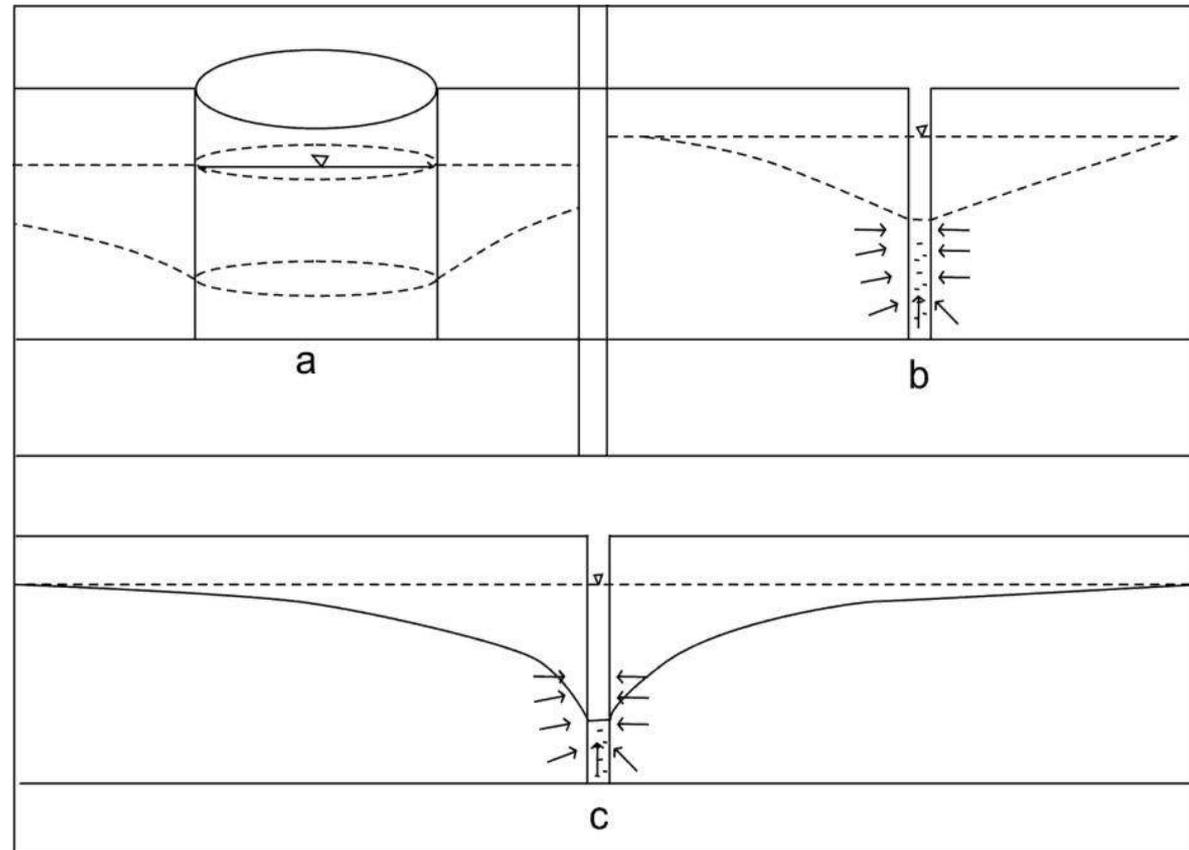
$$Q = K \frac{h_0^2 - h_w^2}{\ln r_0/r_w}$$

Pada sumur pengamat, nilai ( $Q$ ) diperoleh melalui persamaan :

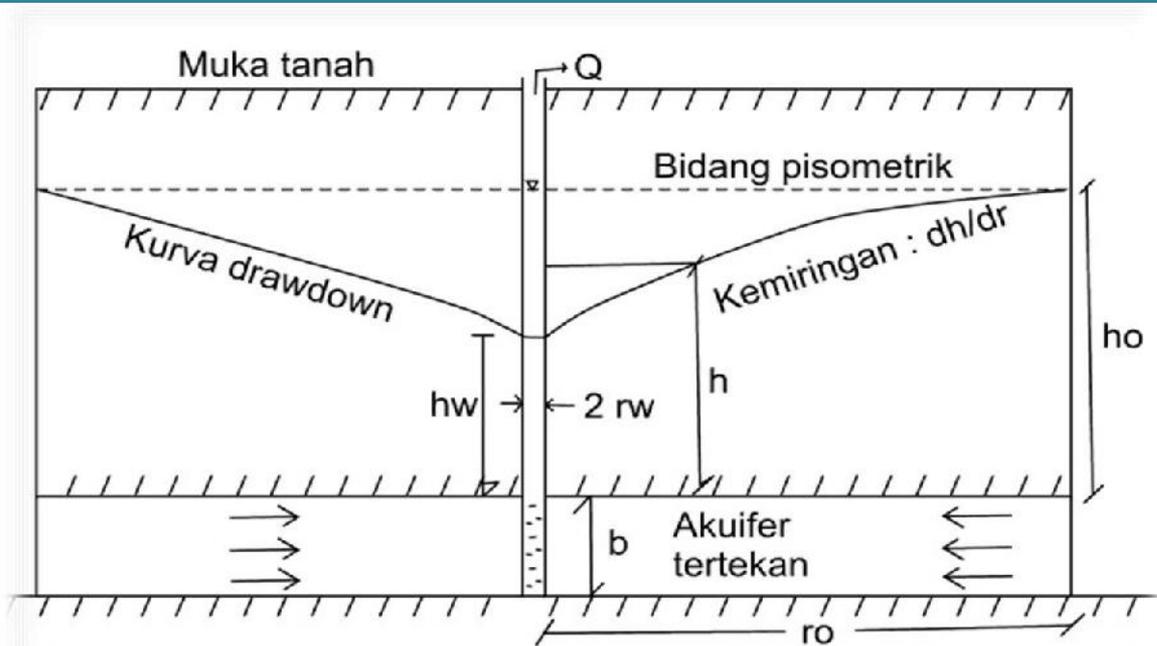
$$Q = K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln r_2/r_1}$$

Persamaan Theim, sebagaimana diuraikan sebelumnya tidak berlaku apabila :

- a) diameter sumur terlampau besar;
- b) penetrasi sumur bor tidak penuh; dan
- c) aliran turbulen di dekat lubang bor.



# Aliran tetap memusat menuju sumur pada akuifer tertekan



## Persyaratan :

- sumur menembus seluruh akuifer tertekan;
- akuifer tertekan bersifat homogen & isotropis; dan
- anggapan Du Poit berlaku.

$$Q = A \cdot V$$

$$= -2 r b K \frac{dh}{dr}$$

$$dh = \frac{Q}{2 r b K} \frac{dr}{r}$$

$$\int_{hw}^{ho} dh = \frac{Q}{2 r b K} \int_{rw}^{ro} \frac{dr}{r}$$

$$h = hw, r = rw$$

$$h = ho, r = ro$$

$$ho - hw = \frac{Q}{2 b K} \ln \frac{ro}{rw}$$

## Persamaan Theim

$$Q = 2 K b \frac{ho - hw}{\ln ro/rw}$$

Jari-jari pengaruh akibat pemompaan ( $r_o$ ) menjadi tidak terbatas jauhnya, dengan demikian setiap harga  $r$  menjadi :

$$Q = 2 \quad K \quad b \frac{h - h_w}{\ln r/r_w}$$

Persamaan di atas disubstitusikan dengan persamaan Theim diperoleh :

$$h - h_w = (h_o - h_w) \frac{\ln r/r_w}{\ln r_o/r_w}$$

Apabila terdapat adanya sumur pengamat sumur piezometri, maka : *drawdown* =  $s_1 : s_2$  dengan

$$s_1 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_1}{r_w} \quad \text{dan} \quad s_2 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_2}{r_w}$$

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

Diasumsikan  $r$  dan  $h$   $h_o$ .

Berdasarkan persamaan Theim, harga (K) dapat ditentukan dengan :

$$K = \frac{Q}{2 b (h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$r_1, r_2$  : jarak sumur pengamat ke sumur pompa;

$h_1, h_2$  : ketinggian bidang pisometrik pada masing-masing sumur pengamat.

Jari-jari pengaruh akibat pemompaan ( $r_o$ ) tidak terbatas jauhnya setiap harga  $r$  menjadi :

$$Q = 2 \quad K \quad b \quad \frac{h - h_w}{\ln r/r_w}$$

$$h - h_w = (h_o - h_w) \frac{\ln r/r_w}{\ln r_o/r_w} \quad \text{hasil substitusi dengan pers. Theim}$$

Apabila terdapat adanya sumur pengamat sumur pisometri, maka :  
*drawdown* =  $s_1 : s_2$  dengan

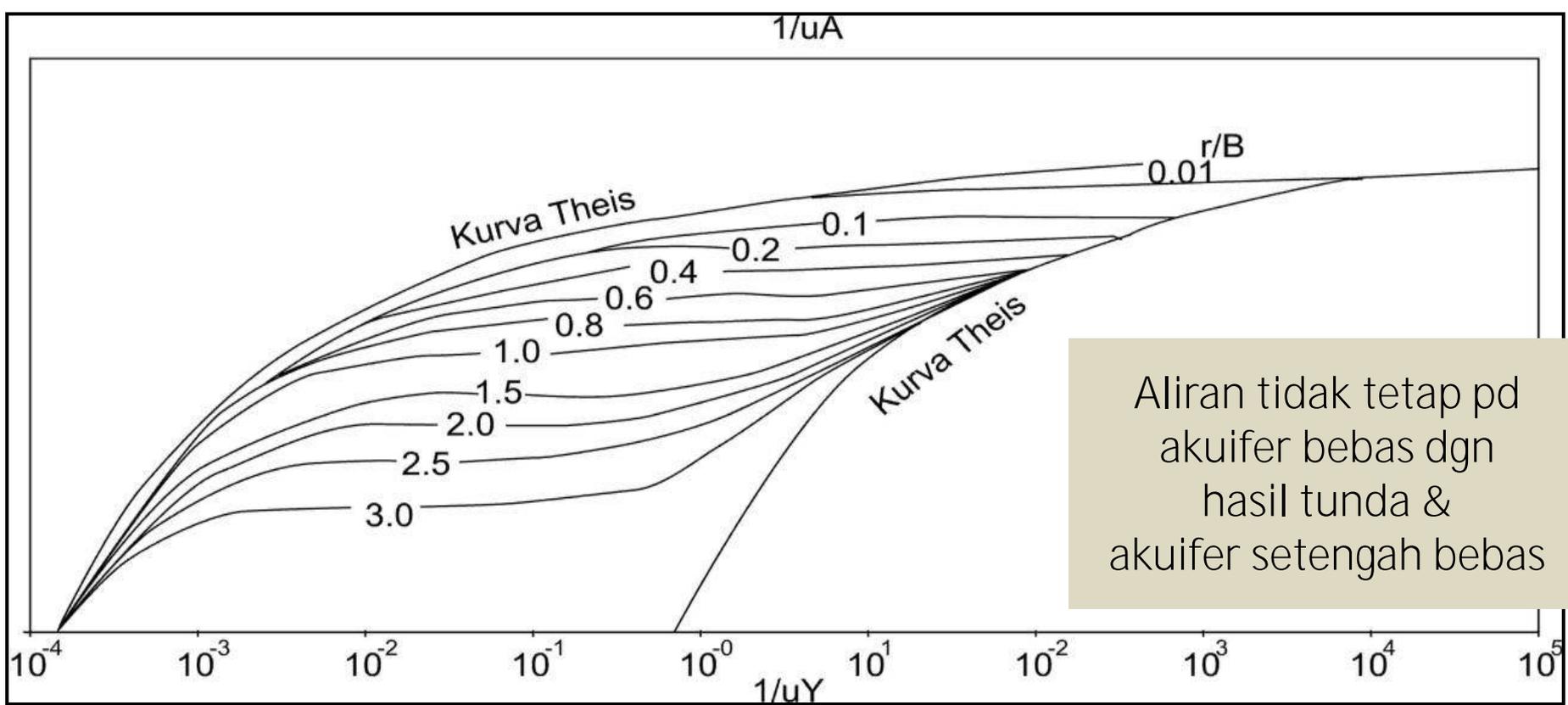
$$s_1 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_1}{r_w} \quad \text{dan} \quad s_2 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_2}{r_w} \quad s_1 - s_2 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

Diasumsikan  $r$  dan  $h$   $h_o$ .

$$K = \frac{Q}{2 \quad b \quad (h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{Berdasarkan persamaan Theim}$$

$r_1, r_2$  : jarak sumur pengamat ke sumur pompa;

$h_1, h_2$  : ketinggian bidang pisometrik pada masing-masing sumur pengamat.



### Metode Boulton

Bagian kiri perilaku muka airtanah pada awal pemompaan akan sama dengan perilaku muka airtanah pada akuifer tertekan Analisis dengan Metode Theis

Bagian tengah penurunan kemiringan kurva disebabkan adanya pengisian kembali akuifer oleh pengaliran gaya berat di atas kerucut penurunan muka airtanah.

Bagian kanan perilaku muka airtanah beberapa saat setelah pemompaan dimulai. Pada bagian ini, kurva akan kembali menyerupai kurva baku Theis kesetimbangan antara pengaliran gaya berat dengan kecepatan penurunan muka airtanah.

Penentuan koefisien cadangan efektif berdasarkan persamaan :

$$ySA = SA + Sy$$

$$y = 1 + Sy/SA$$

SA : banyaknya air yang dilepaskan dari cadangan per satuan *draw-down* per satuan luas horisontal (koefisien cadangan efektif waktu awal).

Sy : volum total hasil tunda per satuan *drawdown* per satuan luas horisontal (*specific yield*).

Aliran tidak tetap memusat menuju sumur  
(*unsteady radial flow to a wall*)

Persamaan integral digunakan secara luas pada uji pompa dengan kondisi :

- 1) harga  $S$  mudah ditentukan;
- 2) diperkenankan hanya dengan satu sumur pengamat;
- 3) waktu uji pompa lebih pendek; dan
- 4) tidak diperlukan persyaratan untuk aliran tetap.

Akan tetapi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- 1) akuifer homogen, isotropis, dan ketebalan seragam;
- 2) sebelum dipompa, bidang pisometrik harus datar;
- 3) debit pemompaan konstan;
- 4) penetrasi sumur penuh pada akuifer, sehingga aliran yang menuju sumur bersifat datar (horizontal);
- 5) diameter sumur kecil, sehingga cadangan air pada sumur dapat diabaikan; dan
- 6) air yang keluar dari cadangan air (*storage*) dikeluarkan seketika itu juga sebesar penurunan tinggi tekan (*head loss*).

# Persamaan Theis

$$S = \frac{Q}{4T} w(\mu), \text{ dengan } w(\mu) : \text{ fungsi sumur}$$

$$\frac{r^2}{t} = \left( \frac{4T}{S} \right) \mu$$

Persamaan di atas menunjukkan hubungan antara ( $w(\mu)$ ) dan ( $\mu$ ) dengan ( $s$ ) dan ( $r^2/t$ ). ( $s$ ) akan berubah sesuai dengan perubahan ( $w(\mu)$ ), begitu pula dengan ( $\mu$ ) berubah seiring perubahan ( $r^2/t$ ).

Hal yang perlu diperhatikan :

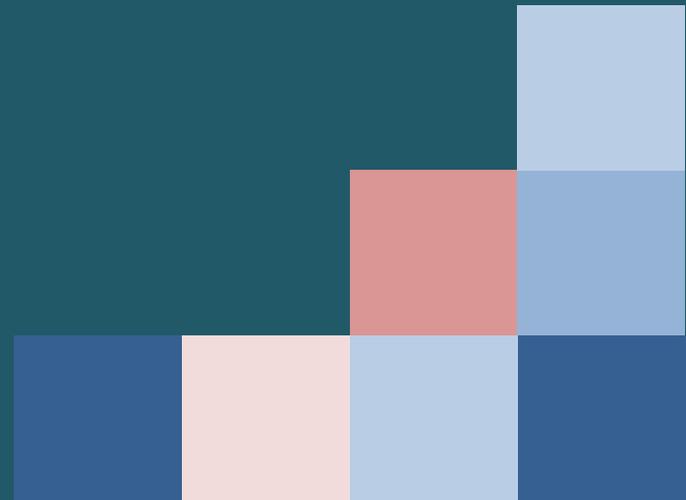
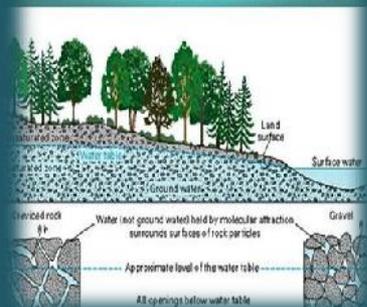
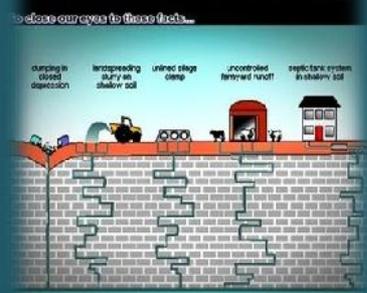
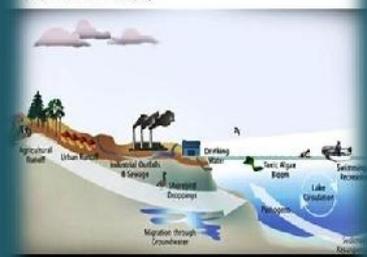
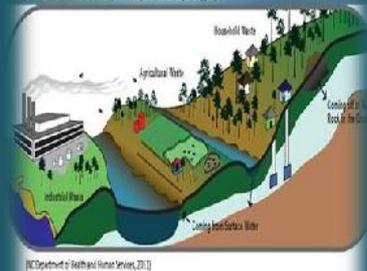
- pemompaan berlangsung kontinu/terus menerus dengan debit konstan dan *drawdown* tetap,
- letak sumur pengamat cukup dekat dengan sumur pompa, dan
- terpenuhinya anggapan Du Poit.

TERIMAKASIH

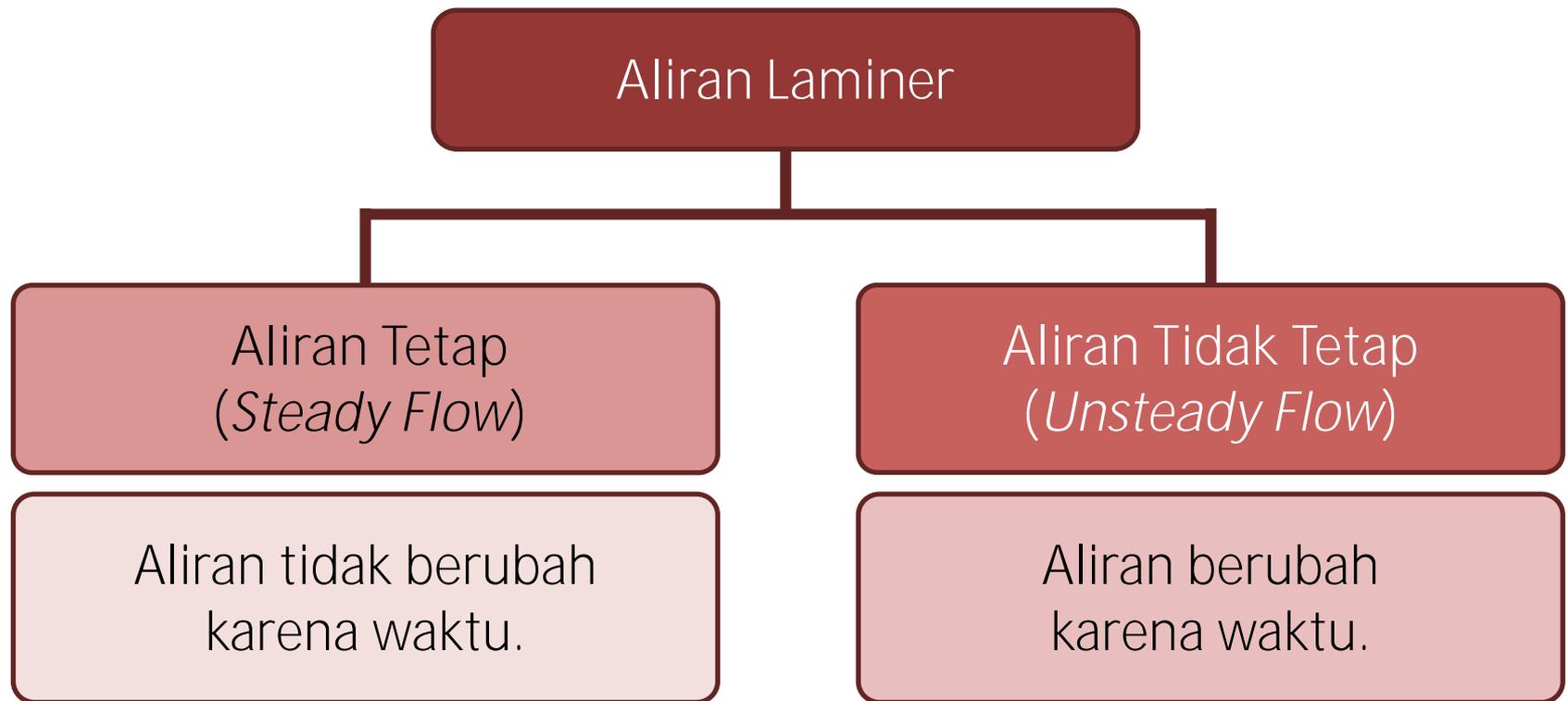


# BAB V

# Aliran Airtanah



Airtanah mempunyai kecenderungan bergerak dalam bentuk aliran ke arah kesetimbangan pada umumnya, aliran airtanah bergerak laminar.



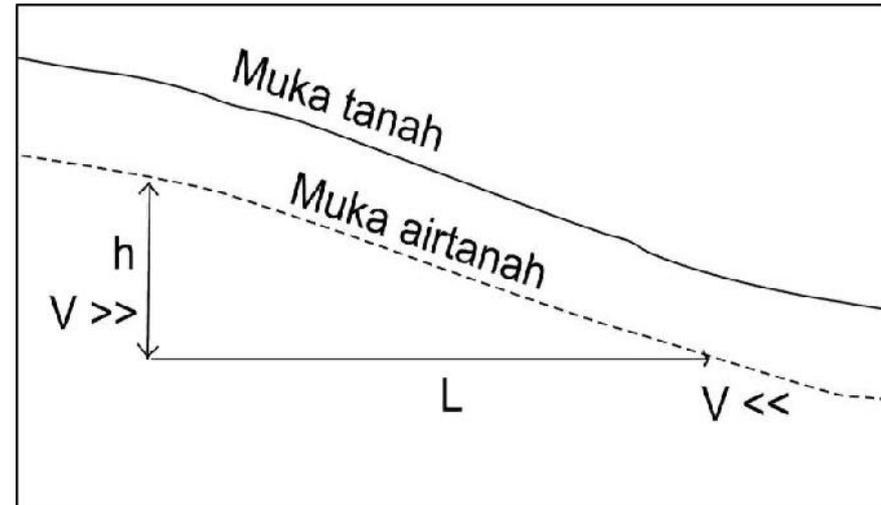
# Kecepatan aliran airtanah

## Gravitasi (Landaian Hidrolika)

Mendorong airtanah bergerak dari tempat yang tinggi ke tempat yang rendah.

Besaran landaian hidrolika ( $i$ ).

$$(i) = \frac{h}{L}$$



## Friksi (Gesekan)

Penghambat laju aliran airtanah.

# Friksi (Gesekan)

## Gesekan Dalam

Tergantung pd kekentalan & suhu air.  
Semakin kental air, aliran semakin lambat.

## Gesekan Luar

Gesekan luar tergantung pada ukuran partikel. Batuan berbutir halus akan mempunyai permukaan luas banyak air yang menempel/melekat pada butiran (gaya adhesi) gesekan luar semakin besar aliran menjadi lambat.

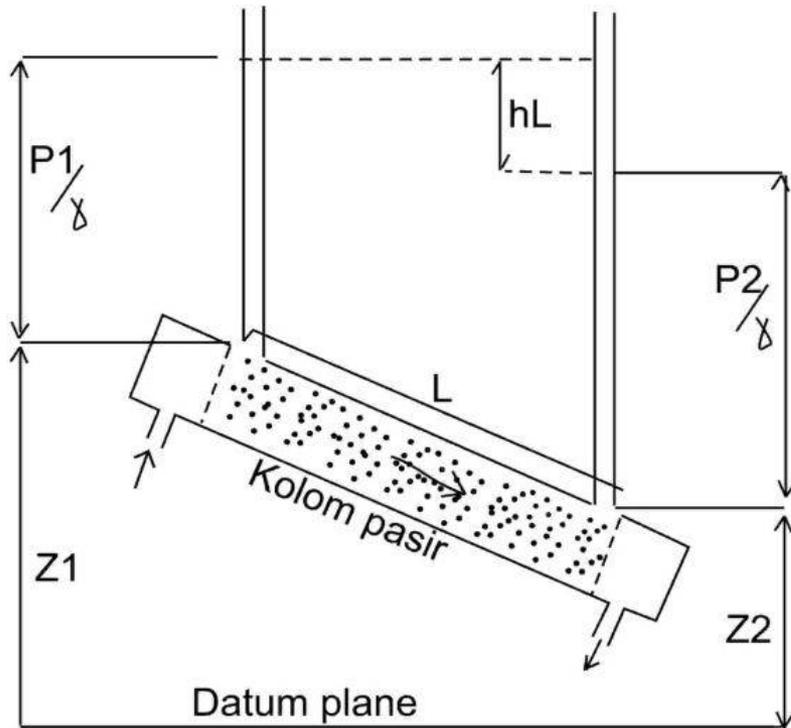
Pada umumnya kecepatan aliran airtanah : 30 – 60 feet/day.

Pada akuifer batupasir, kecepatan aliran airtanah : 50 feet/day.

Pada akuifer berupa kerikil, kecepatan aliran airtanah : 400 feet/day.

# Persamaan Darcy

- Penyelidikan tentang aliran airtanah melalui media berpori tahun 1856.
- Percobaan Darcy mengalirkan air dalam kolom pasir berbentuk silinder dengan debit tertentu.
- Hasil percobaan kecepatan aliran melalui media berpori dipengaruhi oleh landaian hidrolika dan kelulusan air.



## Keterangan :

- $V$  : kecepatan aliran (cm/detik)
- $Q$  : debit yang dialirkan melalui kolom pasir
- $Z$  : elevasi (cm)
- $L$  : panjang lintasan (cm)
- $hL$  : perbedaan puncak air di kedua ujung
- $A$  : luas penampang kolom pasir ( $\text{cm}^2$ )
- $P$  : tekanan (gr/cc)
- $g$  : percepatan, gaya berat ( $\text{cm/detik}^2$ )
- $\gamma$  : *specific weight* (gr/cc)

# Hukum Darcy

- 1) Kecepatan aliran air melalui suatu perlapisan pasir berbanding lurus terhadap tekanan dan berbanding terbalik terhadap ketebalan lapisan yang dilaluinya (lintasan).

$$V = \frac{h}{L};$$

- 2) Besar debit pengaliran pada media berpori berbanding lurus dengan *head loss* dan berbanding terbalik dengan panjang lintasan aliran air.

$$Q = A V = \frac{K A h}{L}, \text{ secara umum } Q = -K A i$$

HUKUM DARCY hanya berlaku apabila aliran airtanah bersifat laminar nilai dari bilangan REYNOLD  $< 1$ .

Bilangan Reynold  $NR = \frac{\rho V D}{\mu} < 1$  ;

dengan  $\rho$  : kerapatan;  $V$  : kecepatan aliran;  $D$  : diameter butir; &  $\mu$  : kekentalan.

Sifat batuan sebagai media aliran airtanah  
sifat kelulusan air, kapasitas jenis, kemenerusan air,  
dan daya simpan air (cadangan air).

# Koefisien kelulusan air (K)

Koefisien kelulusan air (K) kemampuan batuan meluluskan air melalui rongga-rongga dalam batuan tanpa mengubah sifat air.

Suatu akuifer mempunyai kelulusan air yang berbeda pada setiap arah aliran anisotropis vektornya dinyatakan :

$$V_x = K_x \frac{h}{x}; V_y = K_y \frac{h}{y}; V_z = K_z \frac{h}{z}$$

- $K_x, K_y, K_z$  koefisien kelulusan air pada setiap arah sumbu.

Guna memudahkan dalam perhitungan, dianggap pada semua arah mempunyai kelulusan air sama bersifat isotropis, sehingga persamaannya :

$$V_x = -K \frac{h}{x}; V_y = -K \frac{h}{y}; V_z = -K \frac{h}{z}$$

$$K = Q / \left( A \frac{dh}{dL} \right)$$

Koefisien kelulusan air fungsi dari : kekentalan ( $\mu$ ), *specific gravity* ( $g$ ), dan densitas fluida ( ).

$$K = \frac{k}{g}; \text{ dengan } k : \text{permeabilitas intrinsik}$$

( $k$ ) satuan luas, nilainya sangat kecil dinyatakan dalam mikrometer<sup>2</sup> (  $m^2$ ) =  $10^{-12} m^2$  atau dinyatakan dalam darcy 1 darcy =  $0,987 \times 10^{-8} cm^2$ .

Kelulusan air, dipengaruhi oleh : derajat kesarangan dan sifat cairan yang melaluinya

Koefisien Kelulusan Air terdiri dari:

1) Koefisien Kelulusan Air di lapangan ( $K_f$ ) dan 2) Koefisien Kelulusan Air di laboratorium atau standart ( $K_s$ ).

# Hubungan antara k, K, Macam Batuan dan Sifatnya terhadap Aliran Airtanah

k (darcy)	$10^5 - 10^4$	$10^3 - 10^1$	$1 - 10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-5}$
Macam batuan	<i>Clean pebble</i>	<i>Clean sand, mix of clean sand - pebble</i>	<i>Very fine sand, silt, mix sand, clay, &amp; layered clays</i>	<i>Clay</i>
Karakteristik aliran akuifer	Baik		Jelek	Kedap air
K (gal/hari/ft <sup>2</sup> )	$10^8 - 10^2$		$10^1 - 10^{-2}$	$10^{-3} - 10^{-4}$

## Harga koefisien kelulusan air (K) dari berbagai macam batuan

No	Macam batuan	K (m/hari)	No	Macam batuan	K (m/hari)
1	Kerikil kasar	$15 \times 10^1$	10	Lempung	$2 \times 10^{-3}$
2	Kerikil menengah	$27 \times 10^1$	11	Batugamping	$94 \times 10^{-2}$
3	Kerikil	$45 \times 10^1$	12	Dolomit	$1 \times 10^{-3}$
4	Pasir kasar	45	13	Sekis	$2 \times 10^{-1}$
5	Pasir menengah	12	14	Batusabak	$9 \times 10^{-5}$
6	Pasir halus	2,5	15	Tuf	$2 \times 10^{-1}$
7	Batupasir menengah	3,1	16	Basalt	$1 \times 10^{-2}$
8	Batupasir halus	$2 \times 10^{-1}$	17	Gabro lapuk	$2 \times 10^{-1}$
9	Silt	$8 \times 10^{-2}$	18	Granit lapuk	$14 \times 10^{-1}$

# Harga koefisien kelulusan air (K) dari berbagai macam batuan

$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	K (m/hari)		$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Sangat tinggi		Tinggi		Menengah		Rendah		Sangat rendah		
<u>Endapan lepas</u>										
Kerikil bersih	Pasir bersih pasir & kerikil		Pasir halus			Silt, lempung campuran pasir, silt, lempung		Lempung masif		
<u>Batuan kompak</u>										
Basalt vesikuler, skorious, batugamping (dolomit) berlubang			Batupasir bersih, batuan beku, batuan ubahan retak-retak			Batupasir laminasi shale, mudstone		Batuan beku batuan ubahan		

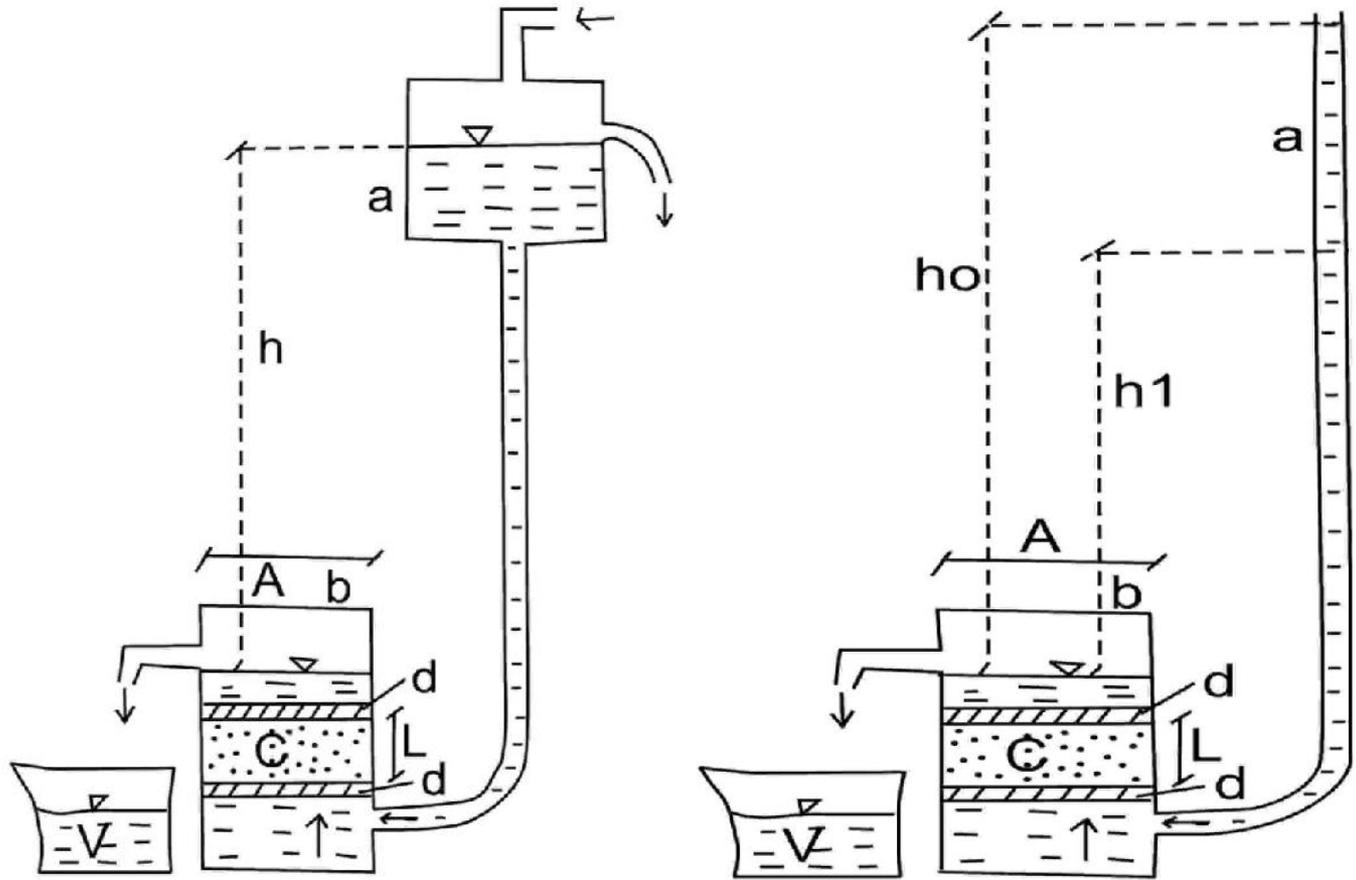
Pengukuran nilai koefisien kelulusan air (K)

Nilai koefisien kelulusan air (K) dapat ditentukan melalui analisis di laboratorium maupun di lapangan.

Pengukuran di laboratorium dapat dilakukan menggunakan alat permeameter.

Kanan: *Constant head permeameter* alat ukur kelulusan air dengan tinggi tekan tetap.

Kiri: *Falling head permeameter* alat ukur kelulusan air dengan tinggi tekan turun.



Keterangan : a: tabung; b: silinder tempat conto batuan; c: conto batuan; d: pelat porous; h: beda tinggi (cm);  $h_0$ : tinggi tekan mula-mula;  $h_1$ : tinggi tekan setelah percobaan dalam waktu t detik;  $h_0 - h_1$ : tinggi tekan turun dalam percobaan selama t detik;  $a^1$ : luas penampang tabung; L: panjang conto batuan (cm); A: luas conto batuan selama t detik; dan v: volume air yang tertampung (cc).

## Constant Head Permeameter

Diperoleh persamaan :

Kecepatan aliran  $(V) = K i = K -$

Volum  $(v) = Q t = V A t$

Debit pengaliran  $(Q) = v/t$

K : koefisien kelulusan air (cm/detik)

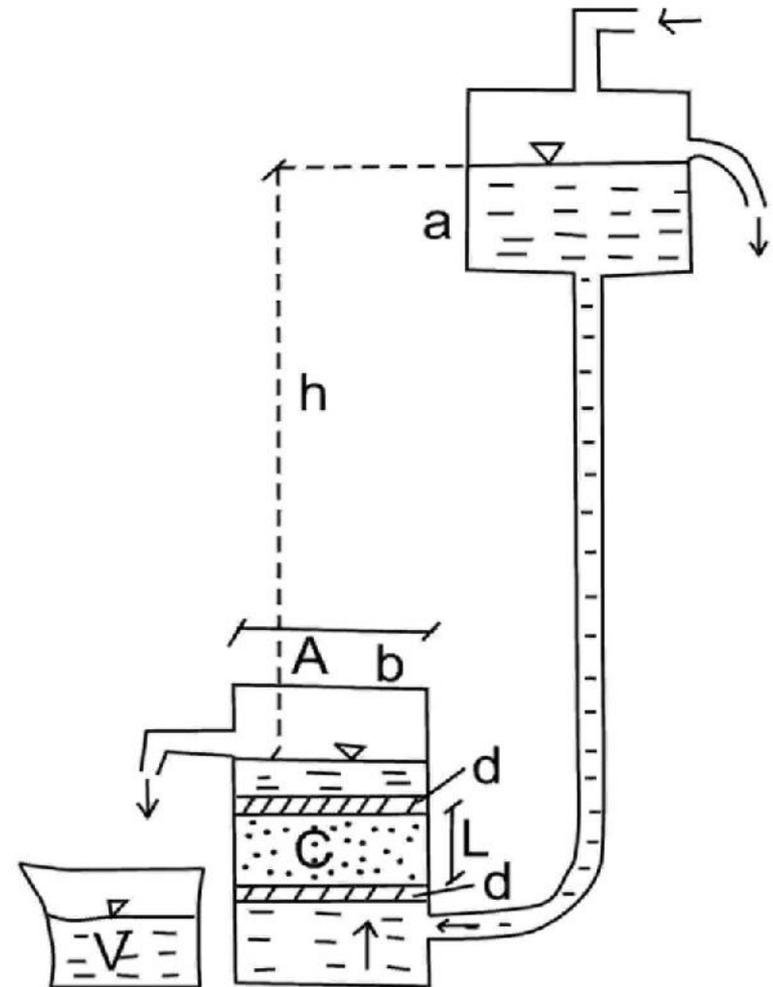
i : landaikan hidrolika

h : beda tinggi (cm)

L : panjang penampang (cm)

A : luas penampang

t : waktu(detik)



# Falling Head Permeameter

Diperoleh persamaan :

$$\text{Debit pengaliran } (Q) = V A$$

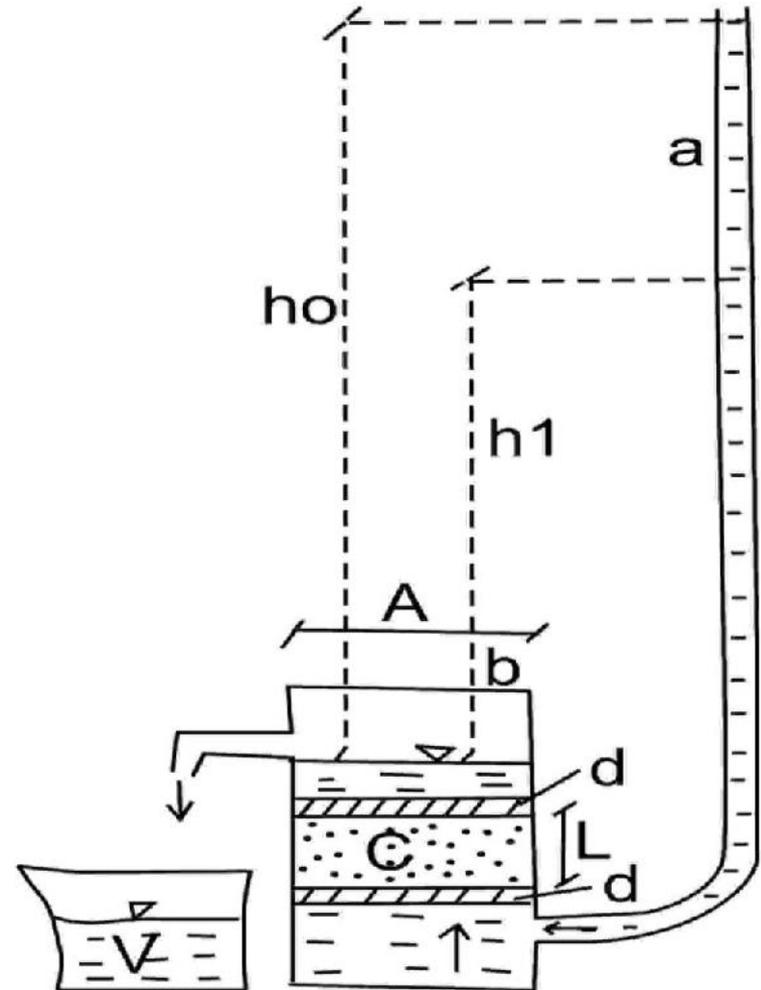
Kecepatan penurunan muka air pada tabung a = —, maka:

$$A K \frac{dh}{dt} = - a^1 \frac{V}{A}$$

$$A K \frac{dh}{dt} = - a^1 \frac{V}{A}$$

$$K \frac{dh}{dt} = - a^1 \frac{V}{A^2}$$

$$K = 2,3 \frac{a^1}{L} \log \frac{h_0}{h_1}$$



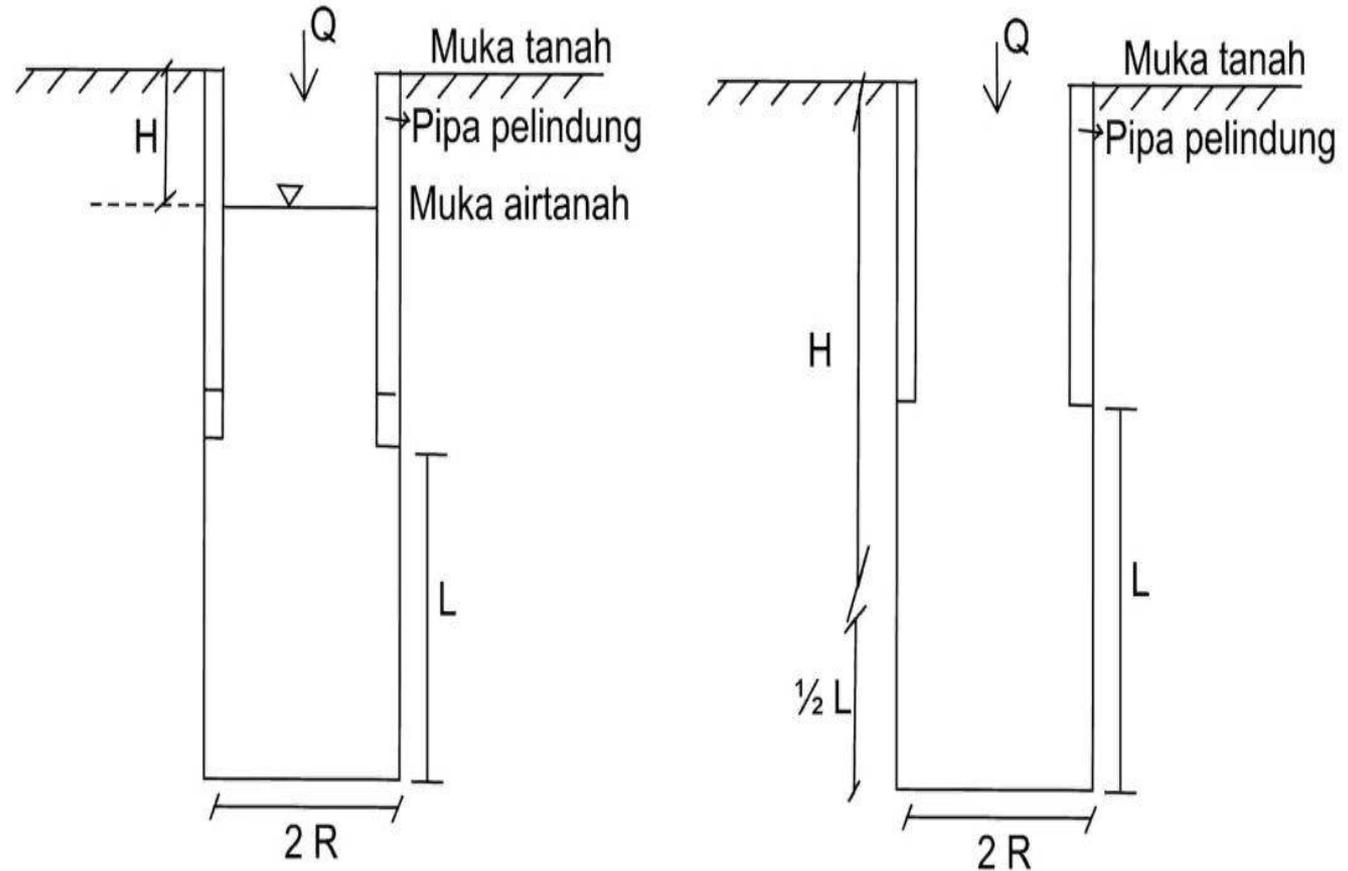
Pengukuran nilai koefisien kelulusan air (K) di lapangan, melalui uji perkolasi dan uji peker.

Pengujian dilakukan pada lubang bor ataupun pada sumur uji

# Uji Perkolasi

Kanan : Uji perkolasi dengan zona pengujian terletak di bawah muka airtanah.

Kiri: Uji perkolasi dengan zona pengujian terletak di atas muka airtanah.



Keterangan :  $Q$ : debit air yang diberikan secara tetap dalam keadaan setimbang (*constant head*);  $H$ : jarak muka airtanah sampai ujung pipa;  $H_1$ : jarak dari titik tengah zona pengujian hingga ujung pipa;  $L$ : zona pengujian; dan  $R$ : jari-jari dasar lubang.

Nilai koefisien kelulusan air (K) dapat diperoleh berdasarkan persamaan:

$$K = \frac{Q}{4R} \log \frac{L}{H}$$

Q : debit air yang dimasukkan ke dalam lubang bor ( $\text{cm}^3/\text{detik}$ )

R : jari-jari dasar lubang bor (cm)

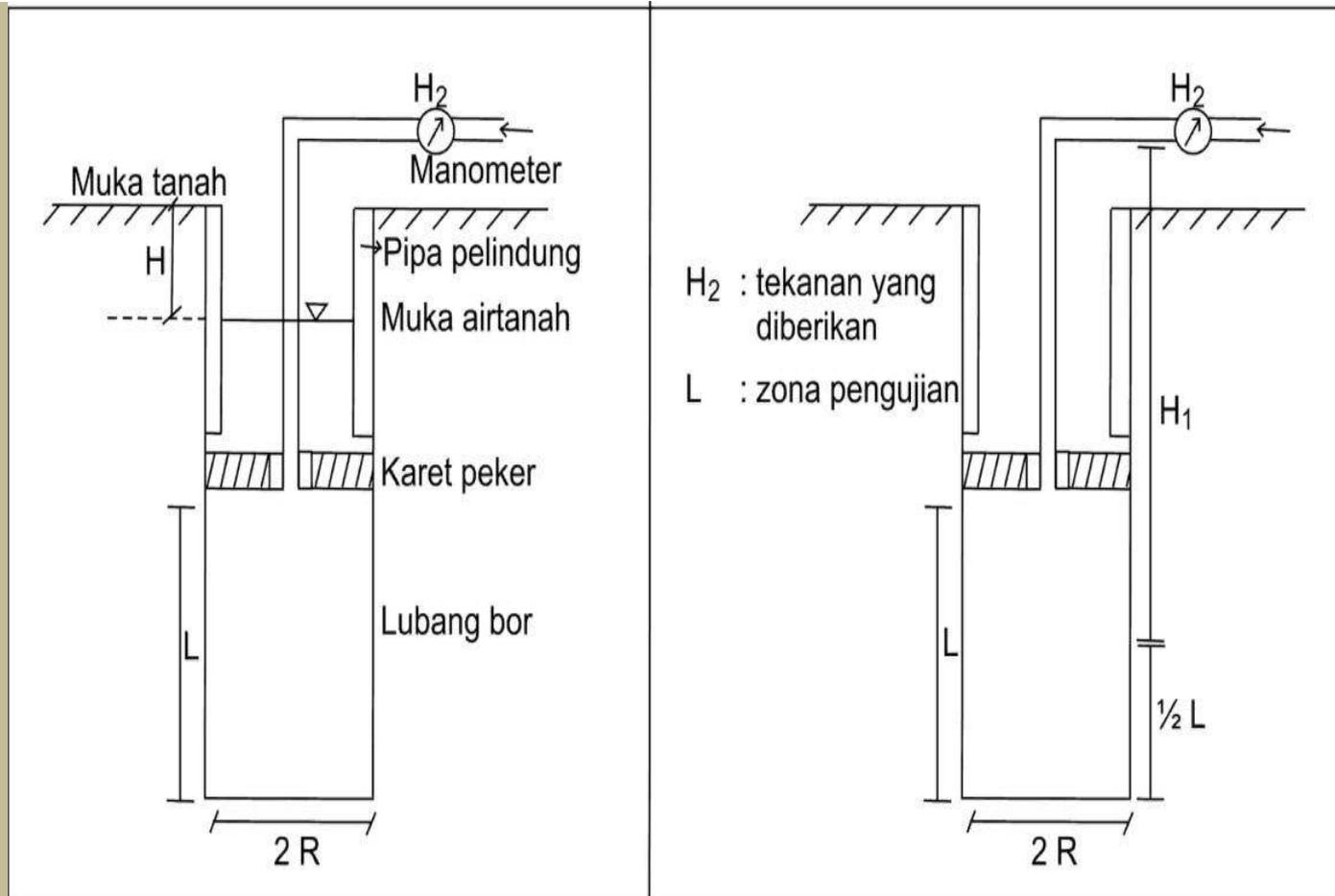
L : panjang zona pengujian (cm)  $L \geq 10 R$

H : perbedaan tinggi (cm)

# Uji Peker tunggal

Kanan : Uji peker tunggal dengan zona pengujian di bawah muka airtanah.

Kiri: Uji peker tunggal dengan zona pengujian di atas muka airtanah.

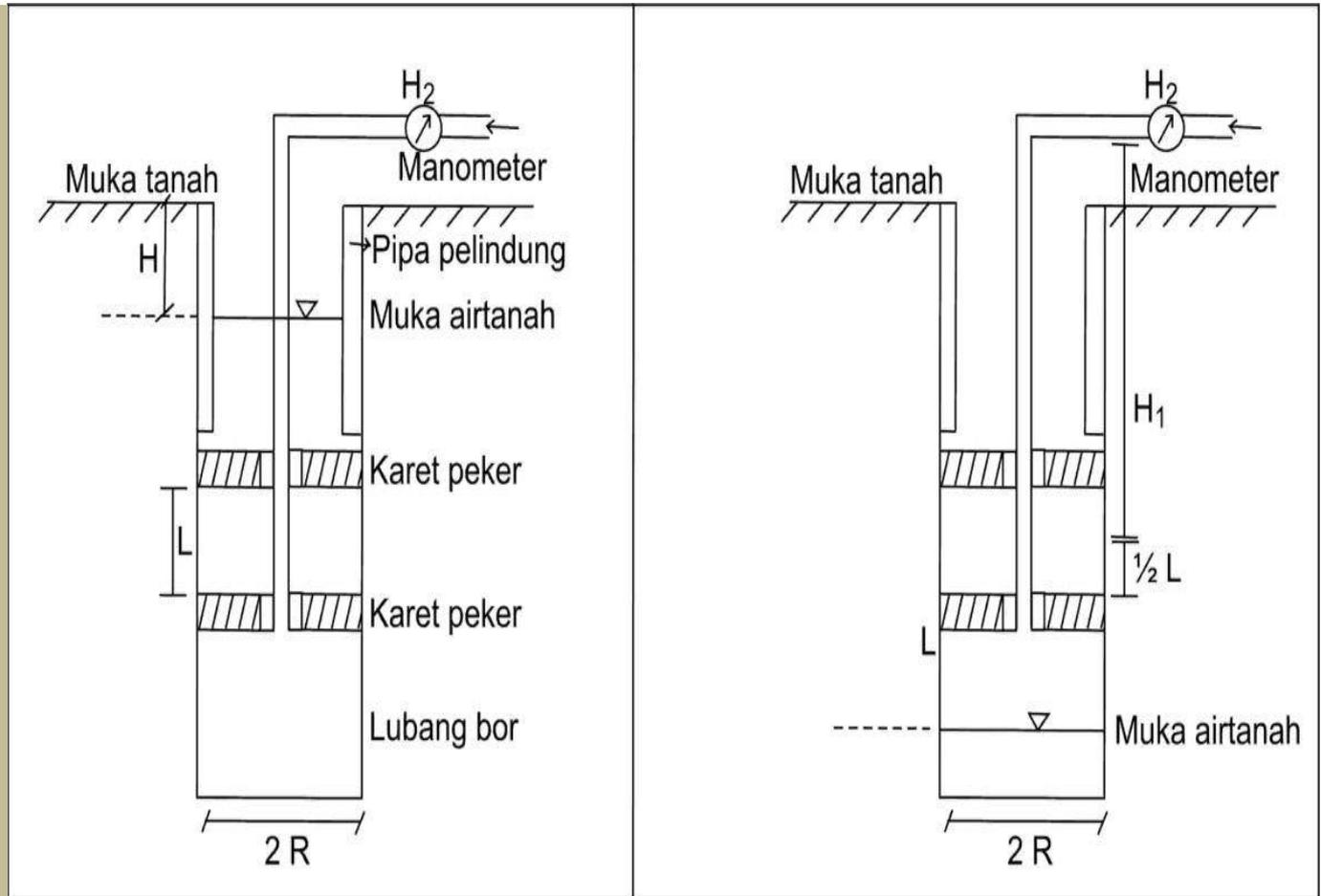


Keterangan :  $H_2$ : tekanan yang diberikan selama pengujian;  $H$ : jarak muka airtanah sampai ujung pipa;  $H_1$ : jarak dari titik tengah zona pengujian hingga ujung pipa;  $L$ : zona pengujian; dan  $R$ : jari-jari dasar lubang.

# Uji Peker ganda

Kanan : Uji peker ganda dengan zona pengujian di bawah muka airtanah.

Kiri: Uji peker ganda dengan zona pengujian di atas muka airtanah.



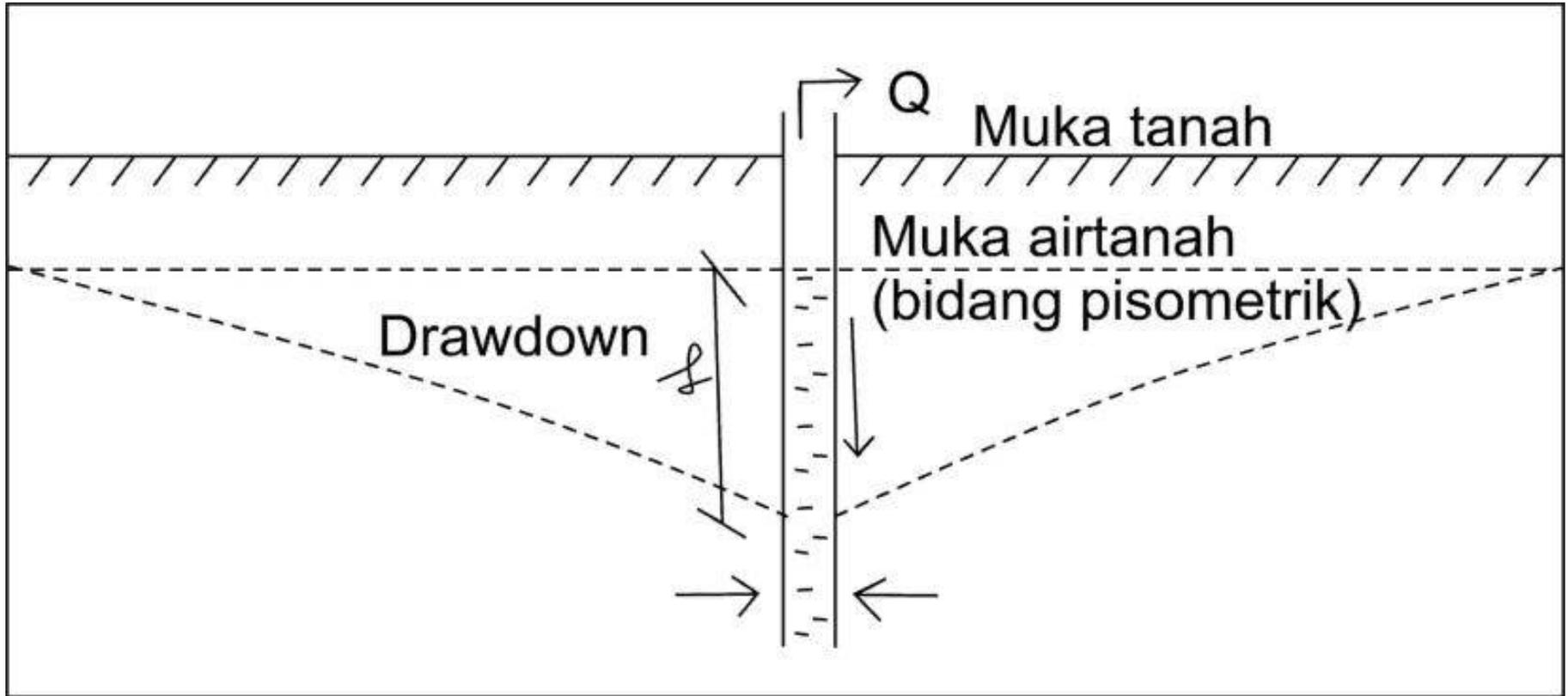
Keterangan :  $H_2$ : tekanan yang diberikan selama pengujian;  $H$ : jarak muka airtanah sampai ujung pipa;  $H_1$ : jarak dari titik tengah zona pengujian hingga ujung pipa;  $L$ : zona pengujian; dan  $R$ : jari-jari dasar lubang.

## Kapasitas jenis atau *specific capacity*

debit air yang dapat diperoleh setiap penurunan permukaan airtanah pada akuifer bebas ataupun akuifer tertekan, sepanjang satu satuan panjang dalam satu sumur pompa pada akhir periode pemompaan.

Kapasitas jenis ( $SQ$ ,  $Sc$ ) dapat ditentukan berdasarkan persamaan :

$$SQ = Q/s \quad \text{satuan } L^3/T/L = L^2/T.$$



$Q$  : debit pemompaan (konstan) dan  $s$  : *drawdown* penurunan muka airtanah/  
bidang pisometrik akibat pemompaan

Koefisien Kemenerusan Air/  
*Coefficient of Transmissibility/*  
*Coefficient of Transmissivity (T)*

banyaknya air yang mengalir melalui suatu bidang vertikal, setebal akuifer dan selebar satu satuan panjang dengan landaian hidrolika 100 %.

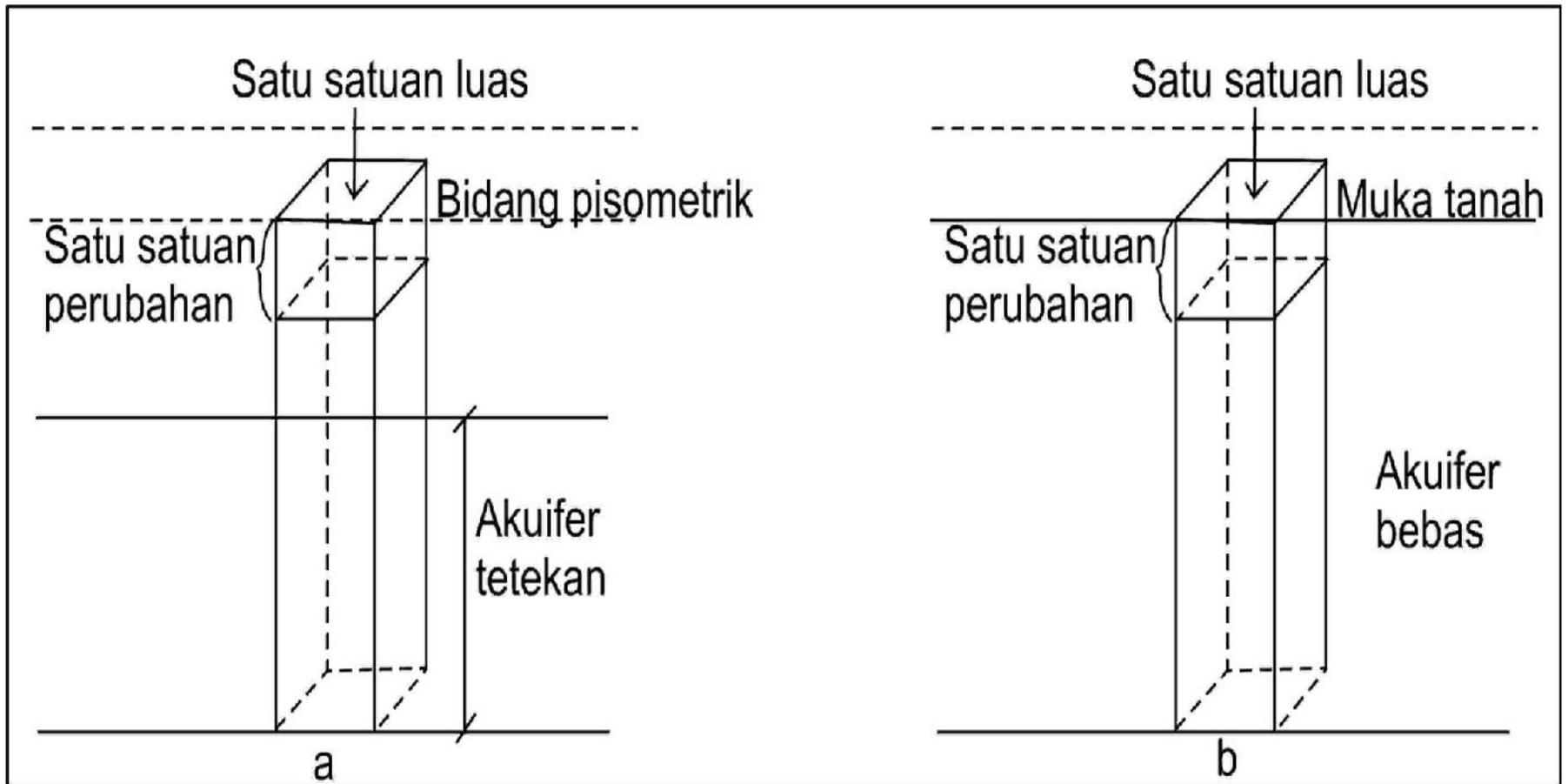
Koefisien kemenerusan air (T) dapat ditentukan berdasarkan persamaan :

$$T = K b \quad \text{satuan } L^2/T ;$$

dengan K : koefisien kelulusan air dan b : tebal akuifer.

Koefisien Daya Simpan Air/  
Koefisien Cadangan Air/  
*Coefficient of Storage (S)*

volum air yang dapat dilepaskan ataupun disimpan  
suatu akuifer pada setiap satu satuan luas akuifer  
pada satu satuan perubahan kedudukan muka airtanah,  
baik airtanah bebas ataupun airtanah tertekan.



(a) Koefisien daya simpan air ( $S$ ) pada akuifer tertekan dan (b) pada akuifer bebas.

## Kisaran nilai S pada akuifer bebas dan tertekan

Jenis akuifer	Harga S	Jenis akuifer	Harga S
Akuifer bebas	$1 \times 10^{-2} - 35 \times 10^{-2}$	Akuifer bebas	$5 \times 10^{-2} - 30 \times 10^{-2}$
Akuifer tertekan	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$	Akuifer bocor	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-2}$
		Akuifer tertekan	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$

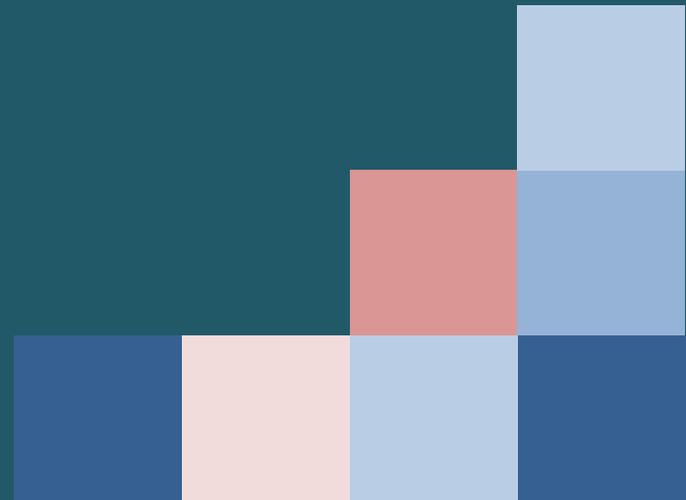
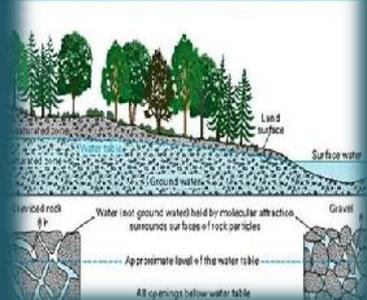
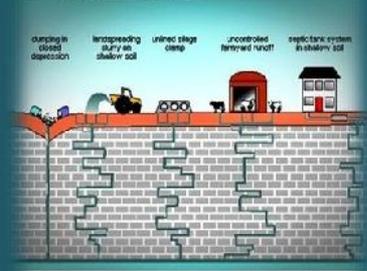
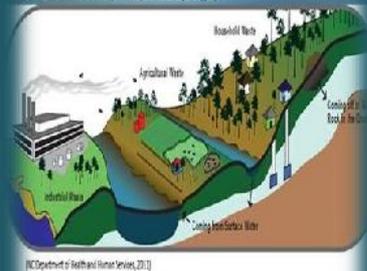
- Koefisien daya simpan air (S) tidak mempunyai satuan **membantu menentukan jenis akuifer** maupun **menghitung jumlah kandungan airtanah** di suatu daerah.
- Koefisien daya simpan air (S) tergantung pada koefisien kelulusan air dan ketebalan akuifer dari *well loss*.

TERIMAKASIH



# BAB VI

## Hidrolika Sumur & Pengujian Akuifer



# Aliran tetap memusat menuju sumur pada akuifer bebas

Persamaan Theim

$$Q = A \cdot V$$

$$= -2 \pi r h K \frac{dh}{dr}$$

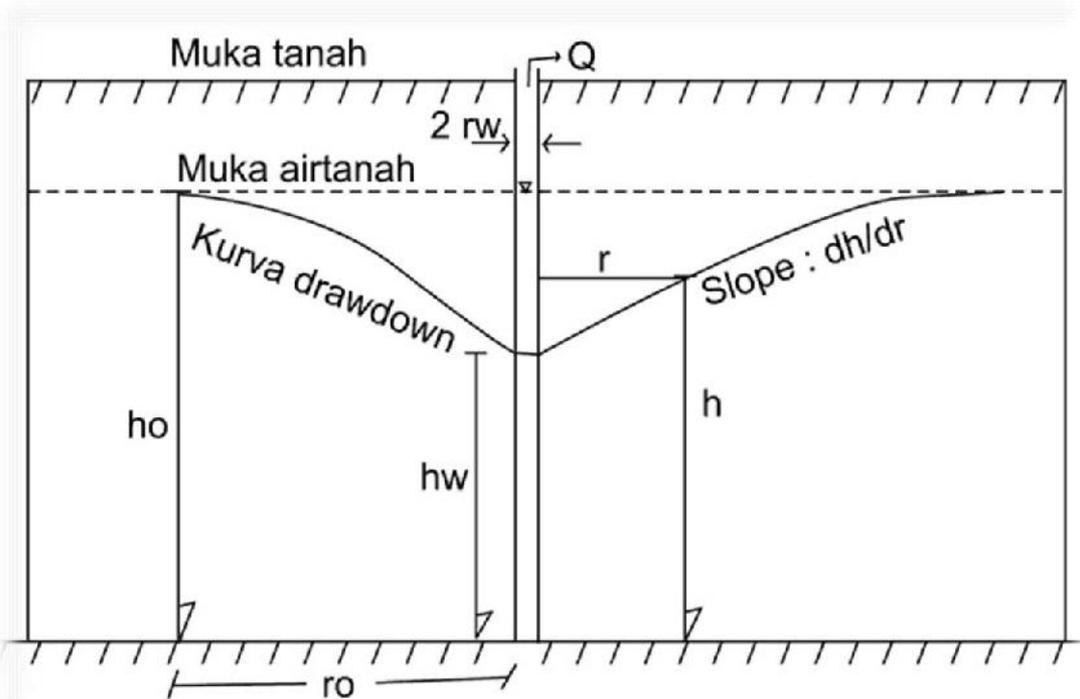
$$h = h_w, r = r_w$$

$$h = h_o, r = r_o$$

$$Q = K \frac{h_o^2 - h_w^2}{\ln r_o / r_w}$$

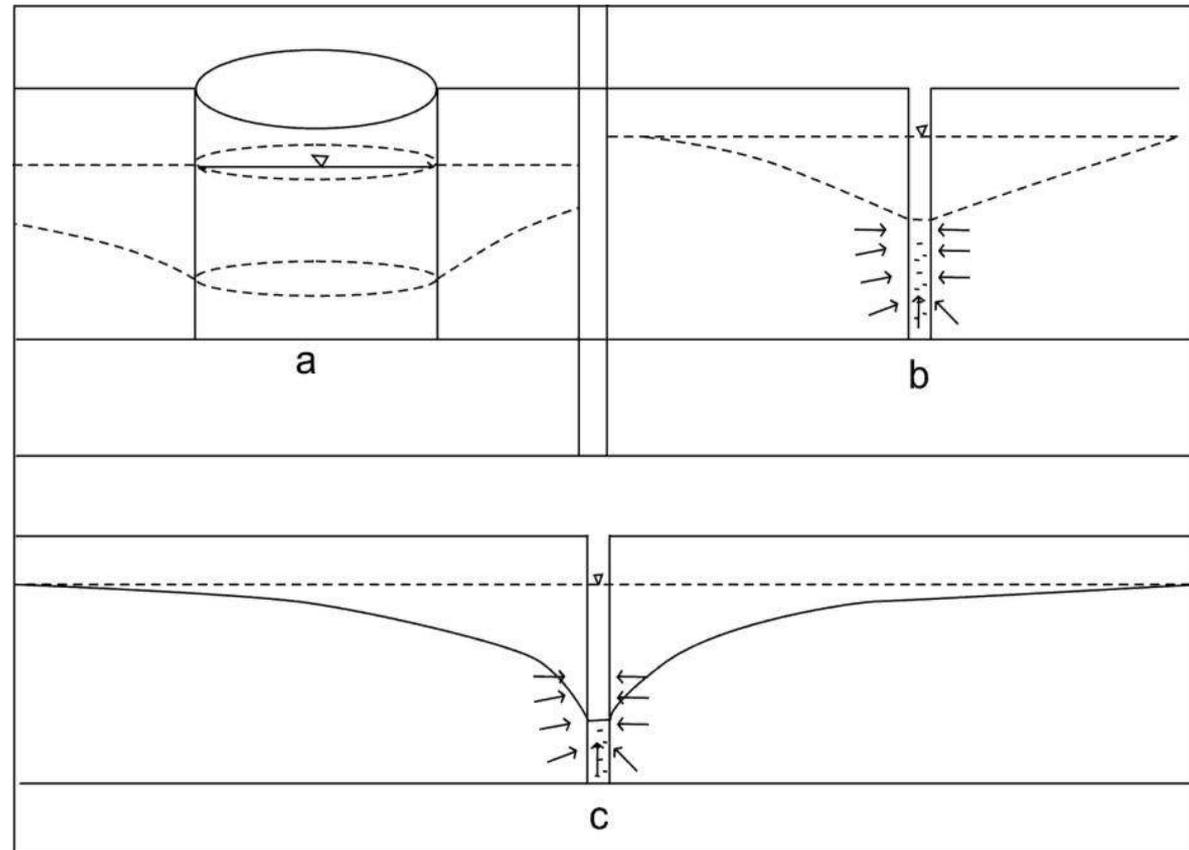
Pada sumur pengamat, nilai (Q) diperoleh melalui persamaan :

$$Q = K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln r_2 / r_1}$$

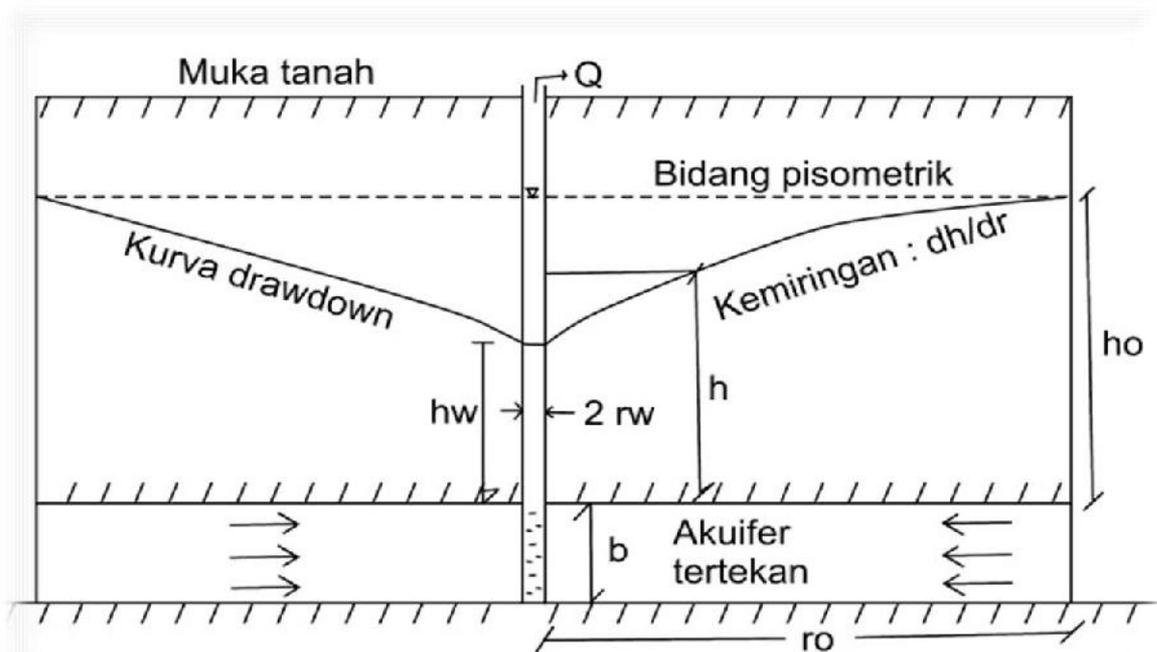


Persamaan Theim, sebagaimana diuraikan sebelumnya tidak berlaku apabila :

- a) diameter sumur terlampau besar;
- b) penetrasi sumur bor tidak penuh; dan
- c) aliran turbulen di dekat lubang bor.



# Aliran tetap memusat menuju sumur pada akuifer tertekan



## Persyaratan :

- sumur menembus seluruh akuifer tertekan;
- akuifer tertekan bersifat homogen & isotropis; dan
- anggapan Du Poit berlaku.

$$Q = A \cdot V$$

$$= -2 r b K \frac{dh}{dr}$$

$$dh = \frac{Q}{2 r b K} \frac{dr}{r}$$

$$\int_{h_w}^{h_o} dh = \frac{Q}{2 r b K} \int_{r_w}^{r_o} \frac{dr}{r}$$

$$h = h_w, r = r_w$$

$$h = h_o, r = r_o$$

$$h_o - h_w = \frac{Q}{2 b K} \ln \frac{r_o}{r_w}$$

## Persamaan Theim

$$Q = 2 K b \frac{h_o - h_w}{\ln r_o/r_w}$$

Jari-jari pengaruh akibat pemompaan ( $r_o$ ) tidak terbatas jauhnya setiap harga  $r$  menjadi :

$$Q = 2 \quad K \quad b \quad \frac{h - h_w}{\ln r/r_w}$$

$$h - h_w = (h_o - h_w) \frac{\ln r/r_w}{\ln r_o/r_w} \quad \text{hasil substitusi dengan pers. Theim}$$

Apabila terdapat adanya sumur pengamat sumur pisometri, maka :  
*drawdown* =  $s_1 : s_2$  dengan

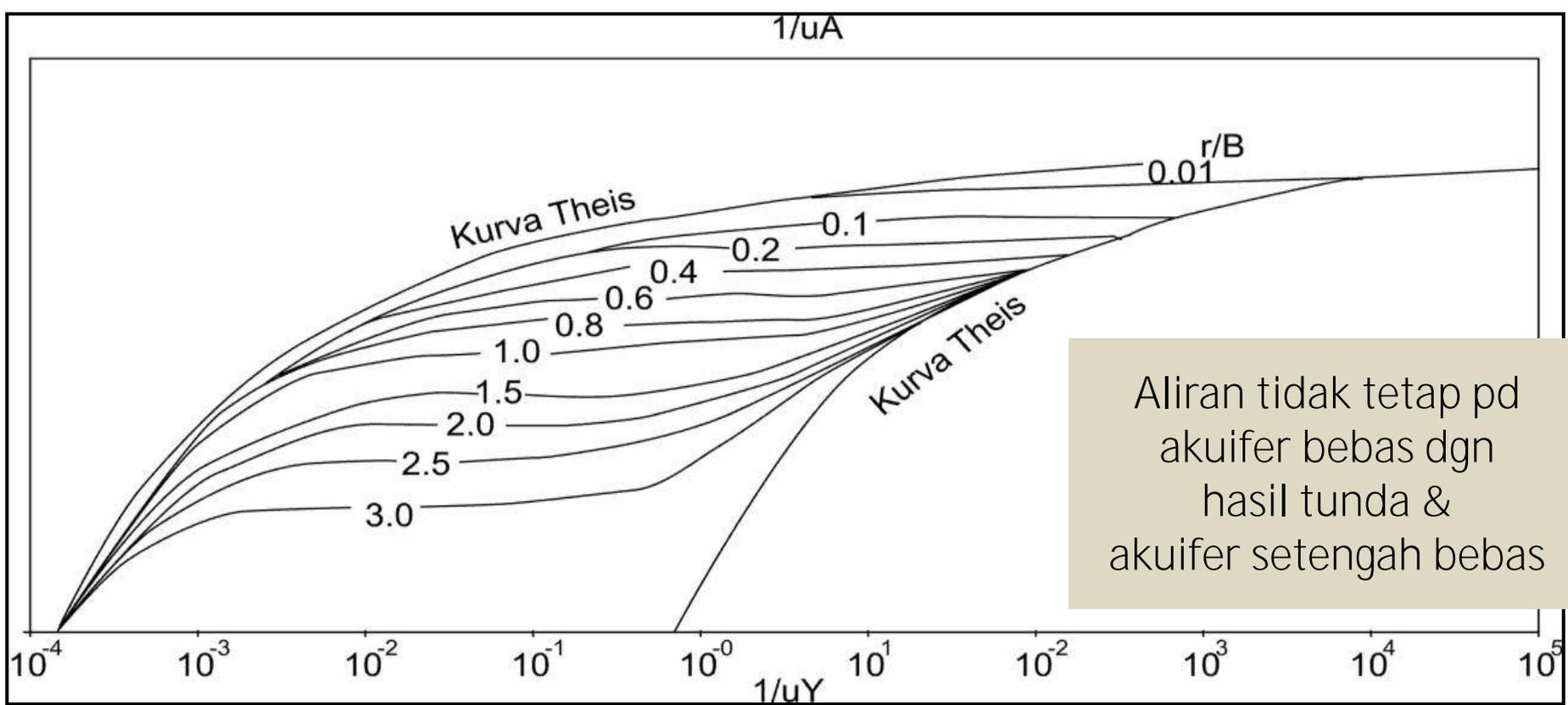
$$s_1 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_1}{r_w} \quad \text{dan} \quad s_2 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_2}{r_w} \quad s_1 - s_2 = \frac{Q}{2 \quad T} \ln \frac{r_1}{r_2}$$

Diasumsikan  $r$  dan  $h$   $h_o$ .

$$K = \frac{Q}{2 \quad b \quad (h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{Berdasarkan persamaan Theim}$$

$r_1, r_2$  : jarak sumur pengamat ke sumur pompa;

$h_1, h_2$  : ketinggian bidang pisometrik pada masing-masing sumur pengamat.



## Metode Boulton

Bagian kiri perilaku muka airtanah pada awal pemompaan akan sama dengan perilaku muka airtanah pada akuifer tertekan Analisis dengan Metode Theis

Bagian tengah penurunan kemiringan kurva disebabkan adanya pengisian kembali akuifer oleh pengaliran gaya berat di atas kerucut penurunan muka airtanah.

Bagian kanan perilaku muka airtanah beberapa saat setelah pemompaan dimulai. Pada bagian ini, kurva akan kembali menyerupai kurva baku Theis kesetimbangan antara pengaliran gaya berat dengan kecepatan penurunan muka airtanah.

Penentuan koefisien cadangan efektif berdasarkan persamaan :

$$ySA = SA + Sy$$

$$y = 1 + Sy/SA$$

SA : banyaknya air yang dilepaskan dari cadangan per satuan *drawdown* per satuan luas horisontal (koefisien cadangan efektif waktu awal).

Sy : volum total hasil tunda per satuan *drawdown* per satuan luas horisontal (*specific yield*).

Aliran tidak tetap memusat menuju sumur  
(*unsteady radial flow to a wall*)

Persamaan integral digunakan secara luas pada uji pompa dengan kondisi :

- 1) harga  $S$  mudah ditentukan;
- 2) diperkenankan hanya dengan satu sumur pengamat;
- 3) waktu uji pompa lebih pendek; dan
- 4) tidak diperlukan persyaratan untuk aliran tetap.

Akan tetapi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- 1) akuifer homogen, isotropis, dan ketebalan seragam;
- 2) sebelum dipompa, bidang pisometrik harus datar;
- 3) debit pemompaan konstan;
- 4) penetrasi sumur penuh pada akuifer, sehingga aliran yang menuju sumur bersifat datar (horizontal);
- 5) diameter sumur kecil, sehingga cadangan air pada sumur dapat diabaikan; dan
- 6) air yang keluar dari cadangan air (*storage*) dikeluarkan seketika itu juga sebesar penurunan tinggi tekan (*head loss*).

# Persamaan Theis

$$S = \frac{Q}{4T} w(\mu), \text{ dengan } w(\mu) : \text{ fungsi sumur}$$

$$\frac{r^2}{t} = \left( \frac{4T}{S} \right) \mu$$

Persamaan di atas menunjukkan hubungan antara ( $w(\mu)$ ) dan ( $\mu$ ) dengan ( $s$ ) dan ( $r^2/t$ ). ( $s$ ) akan berubah sesuai dengan perubahan ( $w(\mu)$ ), begitu pula dengan ( $\mu$ ) berubah seiring perubahan ( $r^2/t$ ).

Pada persamaan Theis harga (T) dan (S) dapat diperoleh melalui dengan metode grafik.

Harga ( $w(\mu)$ ) dan ( $\mu$ ) diplot terhadap harga pada kertas log yang memiliki ukuran sama dengan kurva baku Theis.

Plotting data berhimpitan terhadap kurva baku dengan sumbu-sumbu ordinat kedua kurva selalu sejajar dan usahakan seluruh titik-titik yang diplot dapat jatuh dalam kurva.

Suatu titik sembarang dipilih dalam segmen yang berhimpitan (*match point*) harga (s), ( $r^2/t$ ), ( $\mu$ ), dan ( $w(\mu)$ ) dapat ditentukan dari grafik tersebut.

Selanjutnya, menggunakan persamaan di atas dapat ditentukan harga (T) dan (S).

## Contoh soal :

Sebuah sumur pompa menembus akuifer tertekan, dilakukan pemompaan dengan debit konstan ( $Q$ ) sebesar  $1026,32 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Selama waktu pemompaan, pada sumur pengamatan yang berjarak ( $r$ )  $57,89$  meter dari sumur pompa, teramati penurunan muka air sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1. Tentukan nilai Transmisivitas ( $T$ ) dan koefisien daya tampung ( $S$ ) dengan Metode Theis.

# Tabel 1. Penurunan muka air

t (menit)	s (meter)	t (menit)	s (meter)
0	0.000	35	4.030
5	2.968	40	4.043
6	3.050	45	4.261
7	3.250	50	4.261
8	3.345	55	4.190
9	3.486	60	4.202
10	3.521	70	4.214
12	3.592	80	4.226
14	3.627	90	4.226
16	3.733	100	4.300
18	3.768	120	4.402
20	3.836	150	4.500
25	3.873	180	4.683
30	4.014		

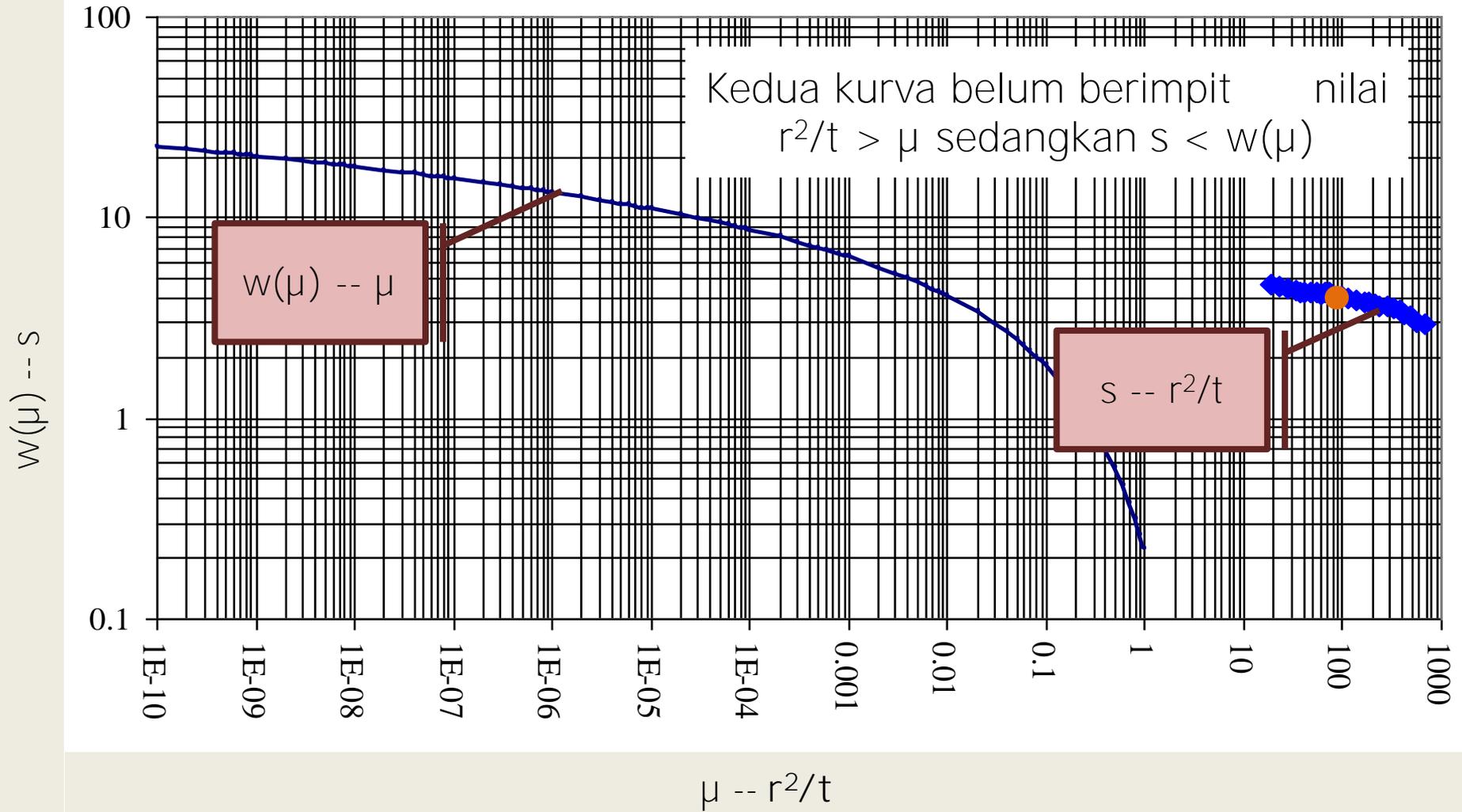
# Penyelesaian

Diketahui :

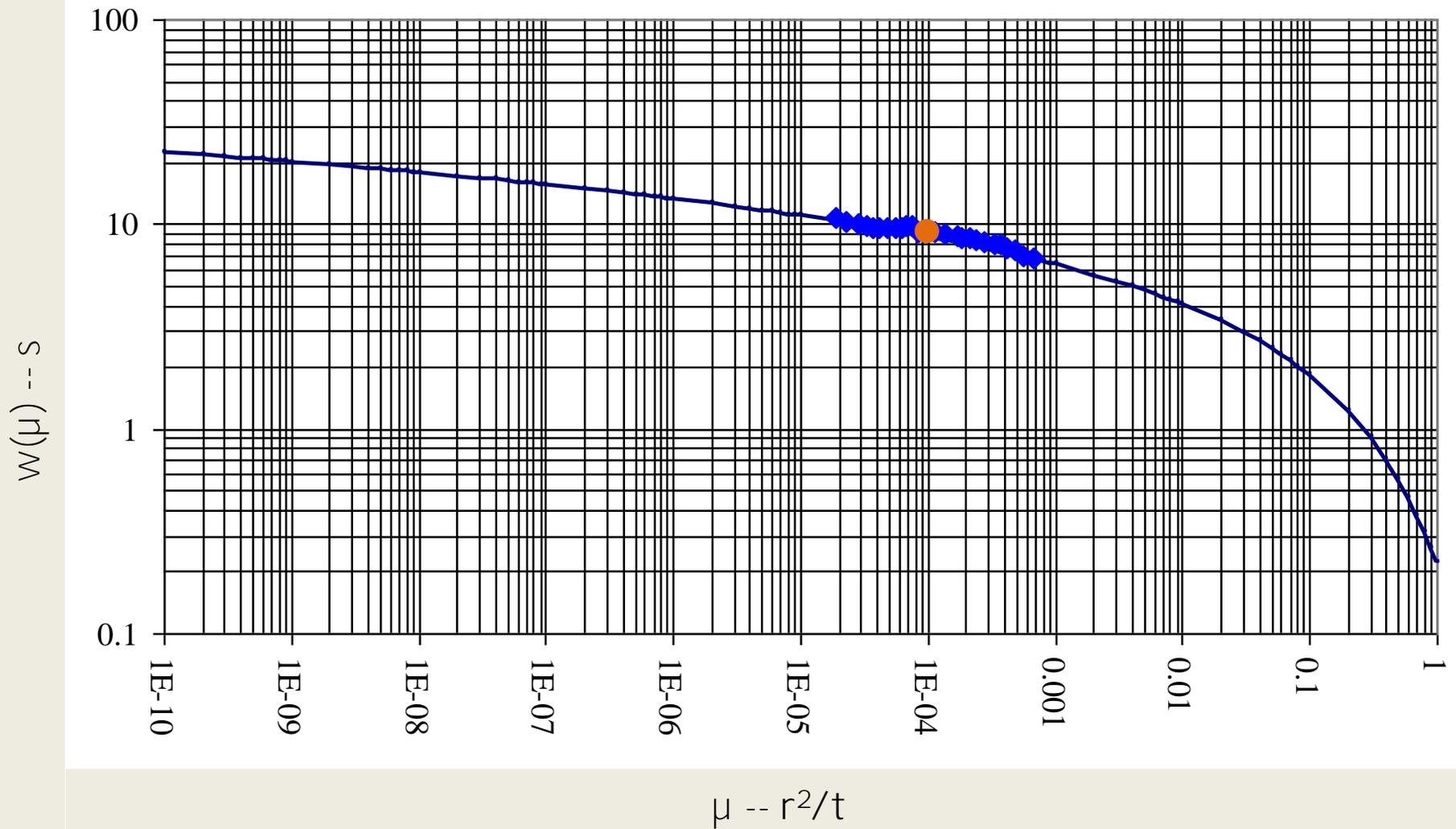
- $Q = 1026,32 \text{ m}^3/\text{hari}$
- $r = 57,89 \text{ m}$

t (menit)	$r^2/t$ ( $\text{m}^2/\text{menit}$ )	s (meter)
0	---	0.000
5	670.250	2.968
6	558.542	3.050
7	478.750	3.250
8	418.907	3.345
9	372.361	3.486
10	335.125	3.521
12	279.271	3.592
14	239.375	3.627
16	209.453	3.733
18	186.181	3.768
20	167.563	3.836
25	134.050	3.873
30	111.708	4.014

t (menit)	$r^2/t$ ( $\text{m}^2/\text{menit}$ )	s (meter)
35		4.030
40		4.043
45		4.261
50		4.261
55		4.190
60		4.202
70		4.214
80		4.226
90		4.226
100		4.300
120		4.402
150		4.500
180		4.683



Kurva  $s - r^2/t$  digambarkan pada kurva  $W(u) - u$



Titik A dengan nilai  $w(\mu) = 10$  dan  $(\mu) = 1.10^{-4}$  nilai  $(s) = 10/2,3 = 4,348$  m dan  $r^2/t = 1.10^{-4} \times 10^6 = 10^2$  m<sup>2</sup>/menit 144000 m<sup>2</sup>/hari.

Maka :

$$w(\mu) = 10$$

$$(\mu) = 1 \times 10^{-4}$$

$$(s) = 4,348 \text{ m}$$

$$r^2/t = 10^2 \text{ m}^2/\text{menit} = 144000 \text{ m}^2/\text{hari}$$

$$T = \frac{Q w(\mu)}{4 s} = ?$$

$$S = \frac{4T (\mu)}{r^2/t} = ?$$

# Metode Cooper – Jacob      Metode Jacob

- Penurunan dari Metode Theis
- Digunakan untuk nilai  $\mu$  kecil ( $\mu < 0,01$ )

$$\begin{aligned}
s &= \frac{Q}{4T} \left[ -0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right] \\
&= \frac{Q}{4T} \left[ \ln 0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right] \\
&= \frac{Q}{4T} \ln \left[ \frac{4Tt \cdot 0,5772}{r^2 S} \right] & s &= \frac{Q}{4T} \ln \frac{2,25Tt}{r^2 S} \\
& & s &= \frac{2,30Q}{4T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}
\end{aligned}$$

Selisih dua pengukuran penurunan muka air tanah ( s ) :

$$s_1 - s_2 = \frac{2,30Q}{4T} \left\{ \log \frac{2,25Tt_1}{r^2 S} - \log \frac{2,25Tt_2}{r^2 S} \right\} \quad s = \frac{2,30Q}{4T} \left( \frac{1}{2} \right)$$

Apabila  $(s) = 0$  dan  $t = t_0$ , maka diperoleh :

$$0 = \frac{2,30 Q}{4 T} \log \frac{2,25 T t_0}{r^2 S} \quad 1 = \frac{2,25 T t_0}{r^2 S}$$

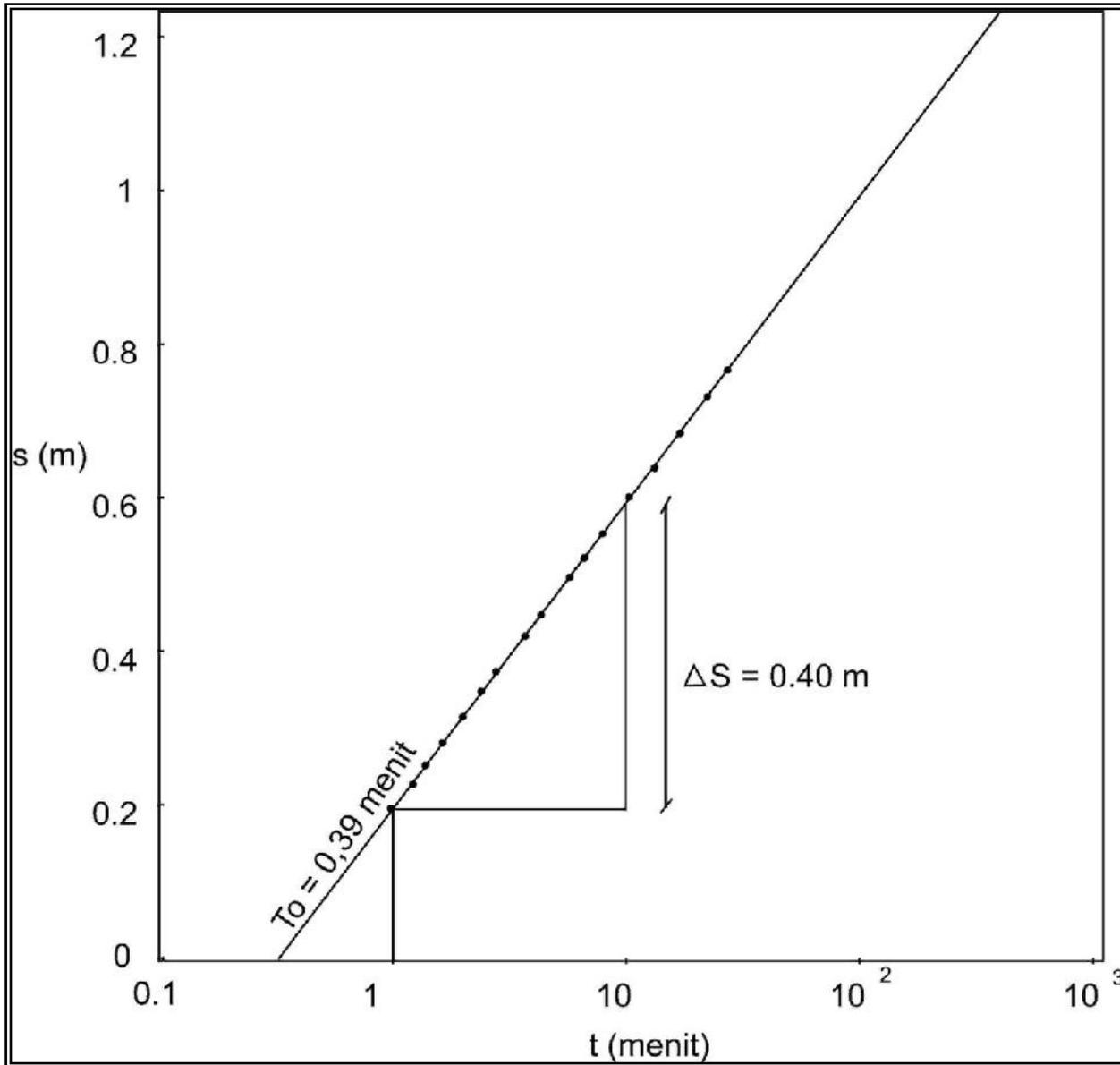
$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2}$$

Harga (T) dapat diperoleh dengan mengambil 1 siklus log  $\log t/t_0 = 1$ , sehingga  $(s) = (s)$  *drawdown* per log siklus dari (t). Dengan demikian harga (T) :

$$T = \frac{2,30 Q}{4 s}$$

## Langkah-langkah perhitungan :

1. Dari data pemompaan (hubungan antara  $s$  &  $t$ ) dibuat kurva linier dengan  $s$  sumbu Y dan  $t$  sumbu X,
2. Kurva memotong sumbu X, diperoleh  $t_0$
3. Hitung  $s$  dengan mengambil nilai  $t_2 = 10 t_1$ .  
Misalnya  $t_1 = 1$   $s = s_1$   $t_2 = 10$   $s = s_2$
4. Hitung nilai T .
5. Hitung nilai S.



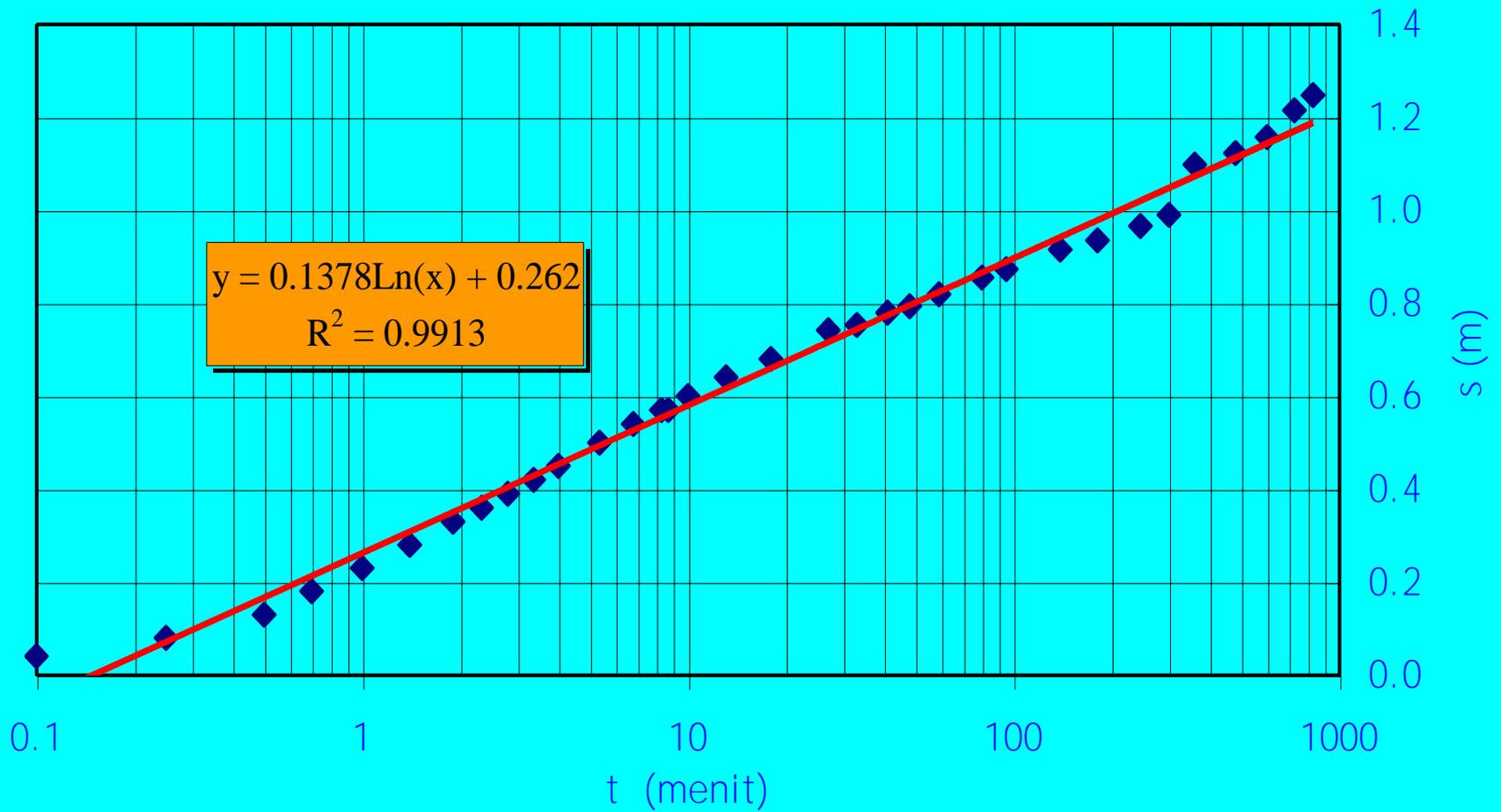
## Contoh soal :

Sebuah sumur pompa menembus akuifer tekan, dilakukan pemompaan dengan debit konstan ( $Q$ ) :  $1081,16 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Selama waktu pemompaan, pada sebuah sumur pengamatan yang berjarak  $r$  :  $57,89$  meter dari sumur pompa, teramati penurunan muka air sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2. Hitung nilai Transmisivitas ( $T$ ) dan Koefisien Daya Tampung ( $S$ ) dengan Metode Cooper-Jacob. Jika diketahui tebal akuifer tekan ( $B$ ) :  $15$  meter, hitung nilai Konduktivitas Hidraulika ( $K$ ) dari akuifer tersebut.

## Tabel 2. Penurunan muka air

t (menit)	s (meter)	t (menit)	s (meter)	t (menit)	s (meter)
0.10	0.040	6.80	0.540	95.00	0.873
0.25	0.080	8.30	0.570	139.00	0.915
0.50	0.130	8.70	0.570	181.00	0.935
0.70	0.180	10.00	0.600	245.00	0.966
1.00	0.230	13.10	0.640	300.00	0.990
1.40	0.280	18.00	0.680	360.00	1.098
1.90	0.330	27.00	0.742	480.00	1.123
2.33	0.360	33.00	0.753	600.00	1.157
2.80	0.390	41.00	0.779	728.00	1.215
3.36	0.420	48.00	0.793	830.00	1.247
4.00	0.450	59.00	0.819		
5.35	0.500	80.00	0.855		

## Kurva Penurunan Muka Air Tanah



Diketahui :

$$(Q) : 1081,16 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$(r) : 57,89 \text{ meter}$$

$$(B) : 15 \text{ meter}$$

Persamaan garis penurunan muka air :

$$s : 0.1378 \ln (t) + 0.262$$

$$t_0 : 0,14 \text{ menit} \quad s_0 = 0,000001$$

$$s : 0,32 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{2,30 Q}{4 s} \\ &= \frac{2,30 \times 1081,16}{4 \times 0,32} \\ &= 623,82 \text{ m}^2/\text{hari} \\ &= 0.433 \text{ m}^2/\text{menit} \end{aligned}$$

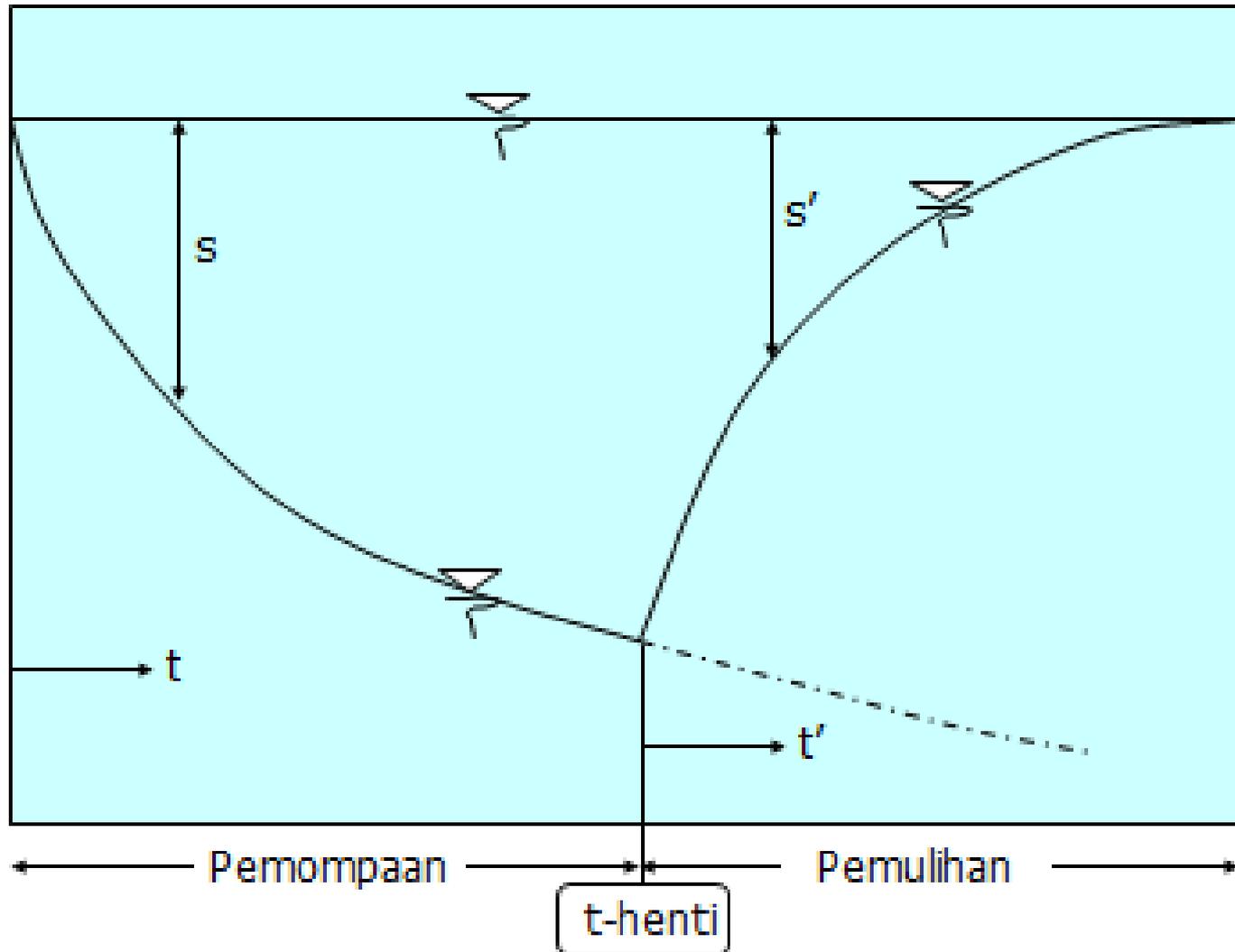
$$\begin{aligned} S &= \frac{2,25 T t_0}{r^2} \\ &= \frac{2,25 \times 0.433 \times 0.14}{57.89^2} \\ &= 4.1 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K &= T/B \\ &= 0.433 / 15 \\ &= 29 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

# METODE RECOVERY COOPER-JACOB

- Memanfaatkan data pemulihan muka air sumur setelah pemompaan dihentikan.
- Besarnya penurunan ( $s'$ ) diukur dari tinggi muka air-tanah sebelum pemompaan      Penurunan Residual
- Digunakan untuk menghitung nilai T sebagai pembandingan nilai T yang diperoleh dari tes pemompaan awal.

# Grafik Recovery Cooper-Jacob



- Penurunan Residual ( $s'$ ) dihitung dengan anggapan pemompaan diteruskan pada sumur dengan debit  $Q$ , dan sejak  $t$  henti dioperasikan pemompaan pada sumur dengan debit  $-Q$  (dimana  $Q - Q = 0$ , artinya pemompaan dihentikan).
- Selanjutnya  $t = t \text{ henti} + t'$

Persamaannya :

$$s' = \frac{Q}{4T} w(\mu) + \frac{-Q}{4T} w(\mu)$$

pemompaan semula
pemompaan baru

$$s' = \frac{Q}{4T} w(\mu) + \frac{-Q}{4T} w(\mu) \quad s' = \frac{Q}{4T} \{w(\mu) - w(\mu)\}$$

$$s' = \frac{Q}{4T} \left\{ \left[ -0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4T t} \right] - \left[ -0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4T t'} \right] \right\}$$

$$s' = \frac{Q}{4T} \ln t/t'$$

$$s' = \frac{2,30 Q}{4T} \log \left( \frac{(-)_1}{(-)_2} \right)$$

Nilai T diperoleh pada  $\log \left( \frac{(-)_1}{(-)_2} \right) = 1$

$$T = \frac{2,30 Q}{4 S}$$

## Langkah-langkah perhitungan

1. Dari data pemompaan (hubungan antara  $s'$  &  $t$ ) dibuat kurva linier dengan  $s$  sumbu Y dan  $t$  sumbu X.
2. Hitung  $s'$  dengan mengambil nilai  $t_2 = 10 t_1$ .  
Misal :  $t_1 = 1$      $s' = s_1$      $t_2 = 10$      $s' = s_2$
4. Hitung nilai T.

## Contoh soal

Sebuah sumur menembus akuifer tekan, dipompa dengan debit konstan ( $Q$ ) :  $1026,32 \text{ m}^3/\text{hari}$  selama  $205,26$  menit. Setelah pemompaan dihentikan, pada sebuah sumur pengamatan yang berjarak  $r$  :  $57,89 \text{ m}$  dari sumur pompa teramati perubahan muka air sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Hitung nilai Transmisivitas ( $T$ ) dengan Metode Recovery Cooper-Jacob. Jika diketahui tebal akuifer tekan ( $B$ ) :  $15 \text{ m}$ , hitung nilai Konduktivitas Hidraulika ( $K$ ).

# Penyelesaian

Dari grafik Recovery Cooper-Jacob disimpulkan bahwa nilai  $t$  : akumulasi dari saat pemompaan dimulai sehingga selesai, dengan bentuk persamaan :

$$t = t \text{ henti} + t' = 205,26 + t'$$

Untuk nilai  $t' = 1$  maka :

$$t = 205,26 + 1 = 206,26 \text{ menit dan}$$

$$t/t' = 206,26/1 = 206,26$$

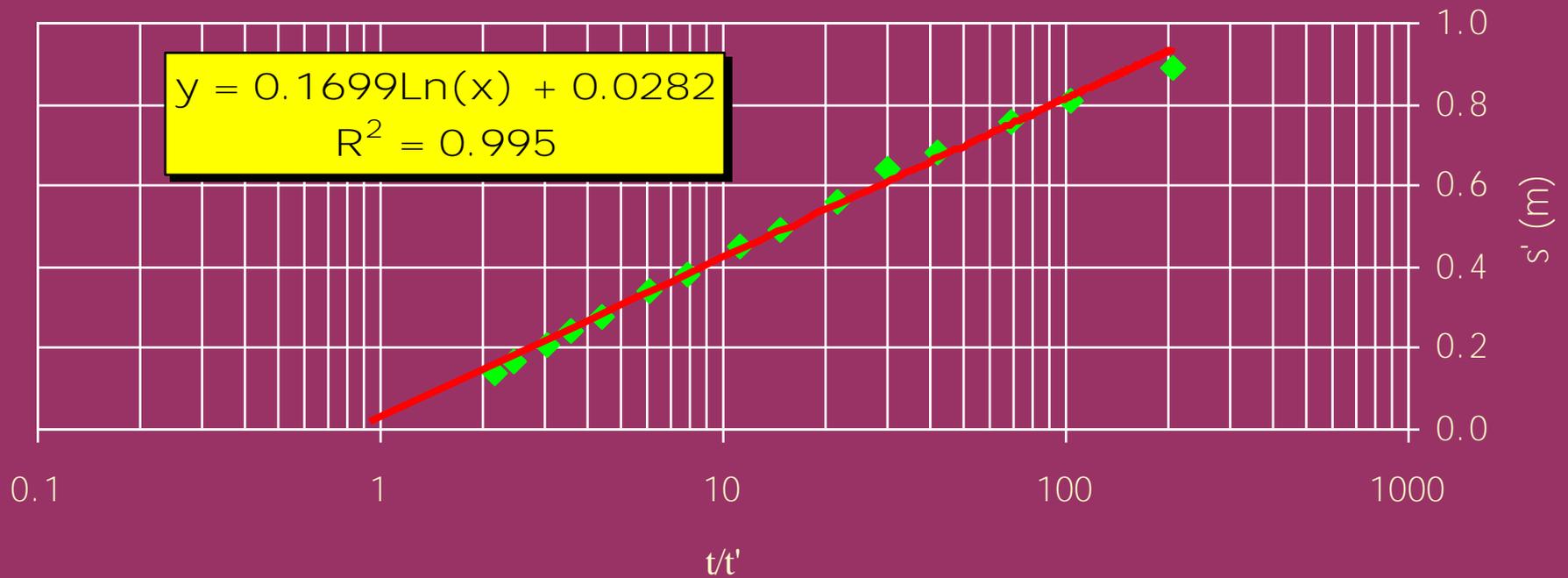
Selanjutnya hitungan ditabelkan.

# Penyelesaian

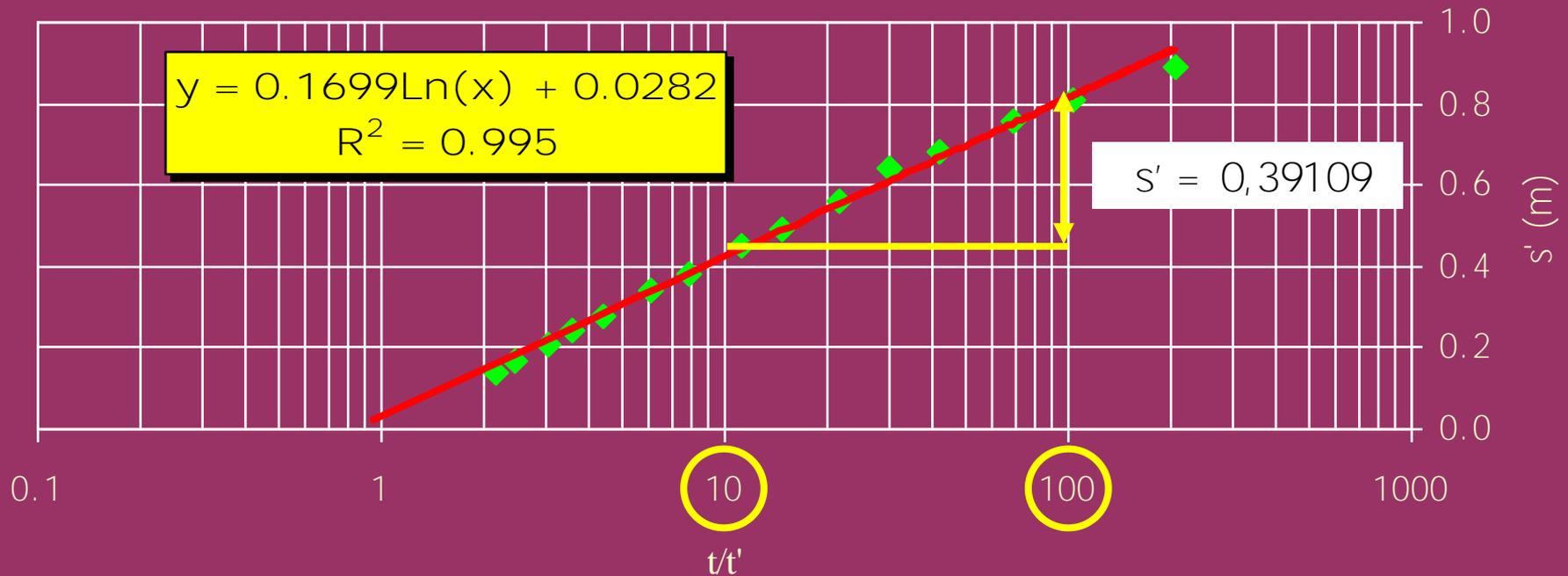
$t'$ (menit)	$t/t'$	$s'$ (meter)
1	206.260	0.89
2	103.630	0.81
3	69.420	0.76
5	42.052	0.68
7	30.323	0.64
10	21.526	0.56
15	14.684	0.49
20		0.45
30		0.38
40		0.28
80		0.24
100		0.21
140		0.17
180		0.14

Tabel 3. Analisa  $t/t'$  &  $s'$

## Kurva Recovery s' dan t/t'



## Kurva Recovery s' dan t/t'



$$\begin{aligned}
 T &= \frac{2,30 Q}{4 S} \\
 &= \frac{2,30 \times 1026,32 \text{ m}^3/\text{hari}}{4 \times 0,39109 \text{ m}} = 479.9483 \text{ m}^2/\text{hari}
 \end{aligned}$$

## Efisiensi Sumur

Pemompaan pada sumur dan penurunan muka airtanah (bidang pisometrik) tidak hanya disebabkan besarnya pemompaan, tetapi disebabkan pula oleh adanya *well loss*.

*Well Loss* akibat dari sebagian aliran airtanah tertahan oleh pipa saringan yang dipasang pada konstruksi sumur bor maupun aliran turbulen di sekitar sumur di dekat pompa.

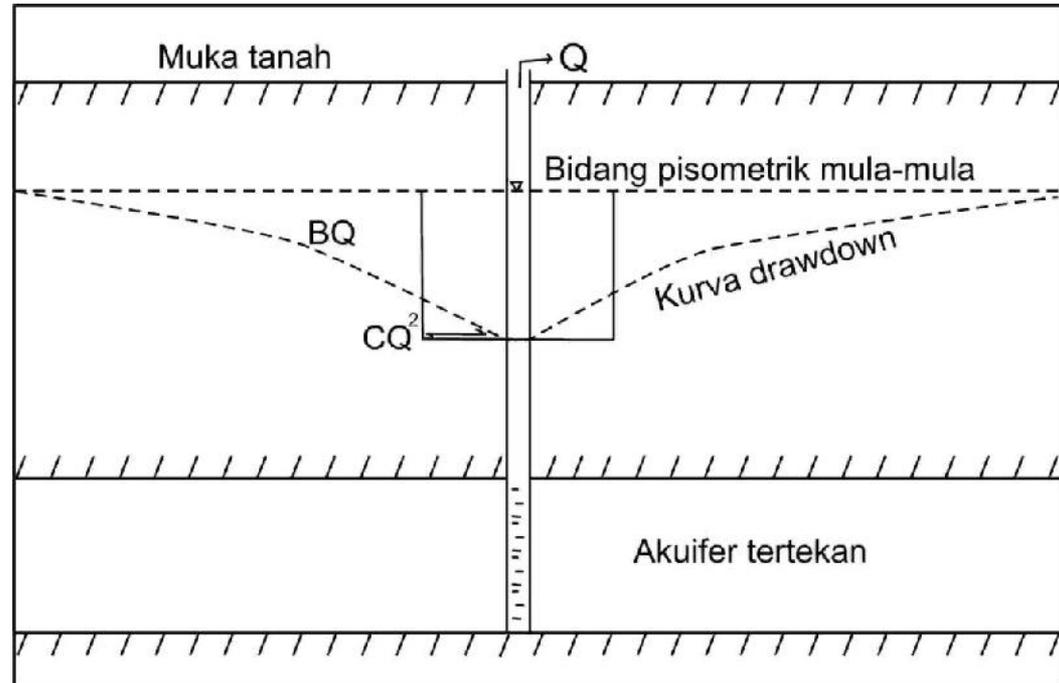
## Hubungan *well loss* dengan *drawdown* (s) pada akuifer tertekan

$$s = \frac{Q}{2T} \ln \frac{r_o}{r_w} + CQ^2$$

aliran tetap

$$s = BQ + CQ^2$$

$$B = \frac{\ln r_o/r_w}{2T}$$



$s$  : drawdown;  $BQ$  : aquifer-loss;  $CQ^2$  : well-loss;  $Q$  : debit pemompaan;  $B$  : koefisien aquifer-loss; dan  $C$  : koefisien well-loss.

- Sumur yang efisien      sumur yang mempunyai *well loss* kecil.
- Bierschenk      bahwa efisiensi sumur tergantung besarnya pemompaan yang terdiri atas : *Efficiency of Pumping* ( $E_p$ ) dan *Factor of Development* ( $F_d$ ).

$$E_p = BQ/sw \text{ (100 \%)} \quad E_p \text{ minimal 50 \%} \quad \text{efisien}$$

$$F_d = C/B \text{ (100 \%)}$$

# Klasifikasi sumur berdasarkan *Factor of Development* (Fd)

No	<i>Factor of Development</i> (Fd)	Kelas
1	$< 0,1$	Sangat baik
2	$0,1 - 0,5$	Baik
3	$0,5 - 1$	Sedang
4	$> 1$	Jelek

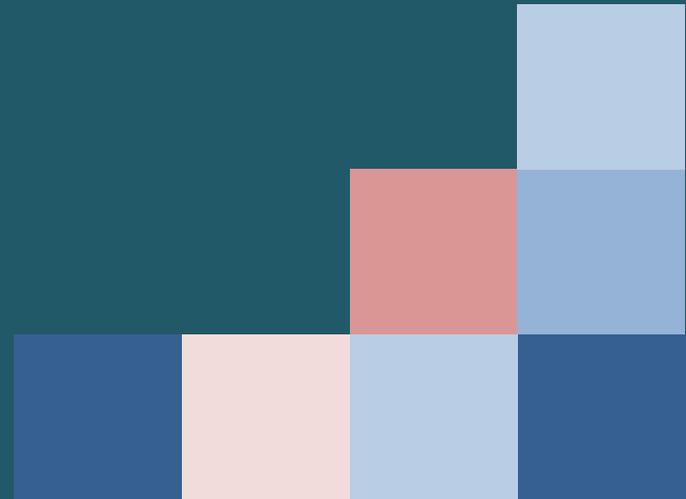
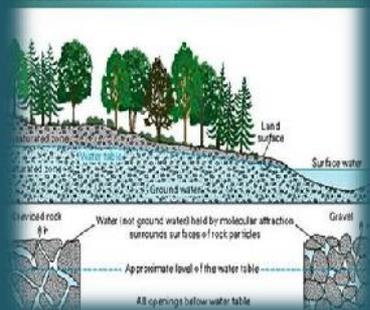
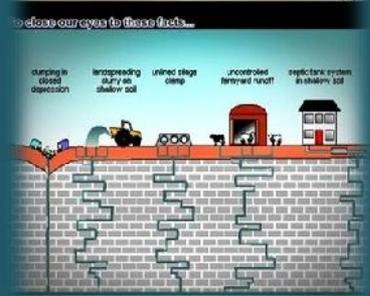
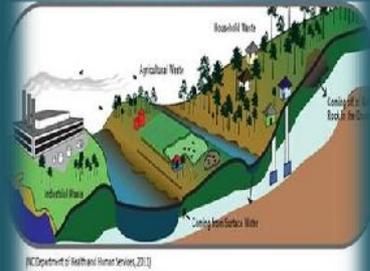
Walton      bahwa kondisi sumur dapat ditentukan dengan harga koefisien *well-loss* (C).

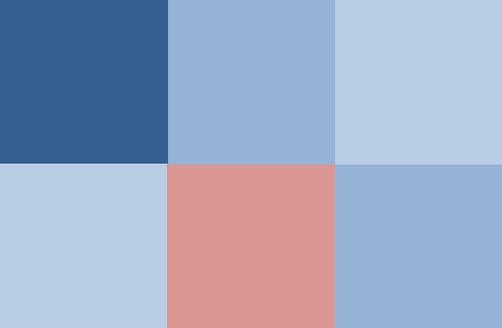
No	Koefisien <i>well-loss</i> (C) menit <sup>2</sup> /m <sup>5</sup>	Kondisi Sumur
1	< 0,5	Konstruksi sumur tepat dengan pencucian cukup bersih
2	0,5 – 1	Mengalami penyumbatan sedikit
3	1 - 4	Penyumbatan di beberapa tempat
4	> 4	Sulit dikembalikan seperti semula

TERIMAKASIH



# BAB VII KUALITAS AIR TANAH





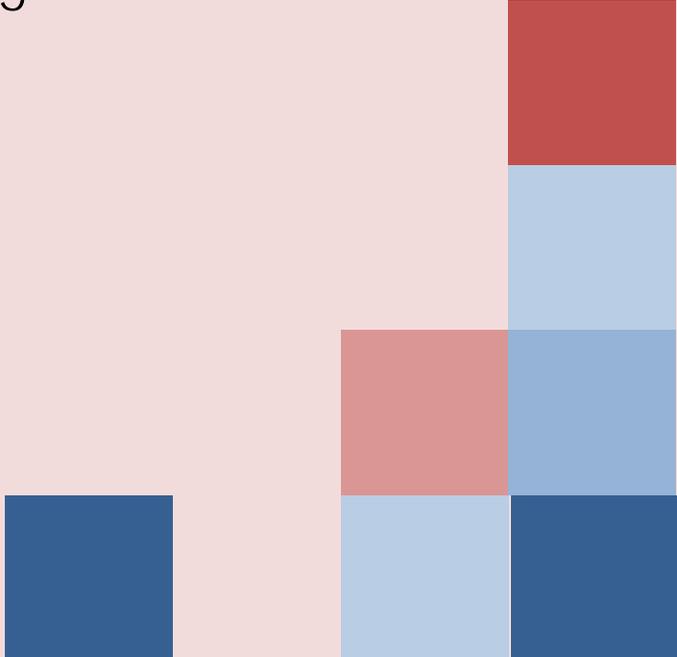
# Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kualitas Airtanah

- Asal mataair litologi yang dilalui;
- Lingkungan; dan
- Iklim.

Kuantitas airtanah dipengaruhi atas:

- litologi;
- topografi;
- vegetasi dan
- iklim.

Manfaat studi kualitas airtanah?



Engelen (1981),  
menyatakan kualitas airtanah dipandang sebagai satu sistem.

## Kualitas Airtanah

Jenis  
tanah/batuan  
penyusun akuifer

Berperan dalam reaksi antara mineral penyusun tanah/batuan terhadap komposisi kimia airtanah

Jenis  
pengaliran

Aliran laminar, turbulen, konveksi, dispersi, dan difusi.

Proses  
perubahan

Perubahan yang terjadi sesuai dengan hukum-hukum fisika, kimia, biologi atau segala proses yang dapat mengakibatkan perubahan kualitas.

	Proses yang terjadi
Zona	Airtanah berasal dari air permukaan ataupun air hujan yang meresap masuk ke dalam tanah.
Horison A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pada zona ini, kaya bahan organik</li> <li>• <math>C</math> (bahan organik) + <math>O_2</math> (astenosfer/tanah) <math>\rightarrow CO_2</math></li> <li>• <math>CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3</math>.</li> </ul>
Horison B	Air kaya $H_2CO_3$ + ( $Fe_2O_3$ (oksida besi), lempung, humus) meningkatkan keasaman. Proses reaksi berlangsung melalui proses biokimia & hidrokimia.
Akuifer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Airtanah mengalir ke dalam akuifer.</li> <li>• Airtanah + NaCl peningkatan kadar garam terlarut.</li> </ul>
Zona Atas	Pada zona ini, airtanah mengalir dengan cepat. Airtanah kaya ion $HCO_3^-$ dengan kadar garam terlarut sedikit.
Zona Tengah	Pada zona ini, sirkulasi airtanah kurang aktif . Airtanah mengalami penambahan kadar garam terlarut dan kandungan sulfat dominan.
Zona Bawah	Pada zona ini, aliran airtanah lambat. Airtanah memiliki konsentrasi Cl sangat tinggi umur akuifer yang tua/ penyusupan airlaut. Perkembangan ion pada airtanah di zona ini, tergantung pada <i>mineral availability</i> dan <i>mineral solubility</i> .

# Hubungan antara ion penyusun airtanah dengan jenis mineral

(Davis dan De Wiest, 1966)

	Ion	Asal	Jenis Mineral
Kation	Natrium (Na <sup>+</sup> )	Batuan beku plutonik dan batuan metamorf.	Plagioklas, Mineral Lempung, Nefelin, Sodalit, Natrolit, Glaukofan
	Kalium (K <sup>+</sup> )	Batuan beku maupun hasil evaporasi.	Ortoklas, Mikroclin, Biotit, Leusit, Silvit
	Kalsium (Ca <sup>2+</sup> )	Endapan laut	Kalsit, Dolomnit, Aragonit, Anhidrit, Gypsum
		Material hasil pelapukan batuan beku ataupun metamorf.	Apatit, Wolastonit, Fluorit, Feldspar, Amfibol, Piroksen
	Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	Batuan beku dan batuan metamorf.	Dolomit, Olivin, Biotit, Hornblenda, Augit, Serpentin, Talk, Diopsid, Tremolit
	Besi, Mangan (Fe, Mn)	Batuan vulkanik dan batuan beku.	Piroksen, Amfibol, Magnetit, Pirit, Mineral Lempung

# Hubungan antara ion penyusun airtanah dengan jenis mineral

(Davis dan De Wiest, 1966)

	Ion	Asal	Jenis Mineral
Anion	Klorida (Cl <sup>-</sup> )	Mineral hasil evaporasi dari <i>connate water</i> ataupun penyusupan airlaut.	Sodalit, Apatit, Mika, Hornblenda
	Bikarbonat, Karbonat (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Karbon dioksida di atmosfer, tanah ataupun pelarutan batuan karbonat.	Kalsit, Dolomit
	Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Endapan evaporasi atau oksidasi, gas-gas pada daerah vulkanik.	Pirit, Markasit
	Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Bahan-bahan organik atau hasil akhir stabilisasi aerobik zat-zat yang mengandung nitrogen organik.	
	Silika (SiO <sub>2</sub> )	Batuan vulkanik dan batuan beku.	Mineral Kuarsa, Mineral Lempung, Mineral Silikat

# SIFAT FISIS

(Warna, Bau, Rasa, Kekentalan, Kekeruhan, & Suhu)

1. Warna disebabkan zat-zat terlarut, ditentukan menggunakan skala Pt-Co.
2. Bau disebabkan zat-zat terlarut atau gas-gas yg mempunyai aroma.
3. Rasa disebabkan adanya kandungan garam atau zat lain, baik yg tersuspensi ataupun terlarut.
4. Kekentalan dipengaruhi partikel-partikel yg terkandung di dalamnya. Semakin banyak kandungan partikel, maka semakin kental. Semakin tinggi suhu, maka kekentalannya akan semakin turun.
5. Kekeruhan disebabkan zat-zat tidak terlarut, contoh: lempung, lanau, zat-zat organik serta mikroorganisme, ditentukan dgn turbidimeter.
6. Suhu dipengaruhi keadaan sekeliling, seperti: musim, cuaca, siang-malam, tempat atau lokasinya.

# SIFAT KHEMIS

(Kesadahan, TDS, DHL, pH, & Kandungan Ion)

1. Kesadahan atau kekerasan *Total Hardness* (Hr), terdapat 2 jenis:

- kesadahan karbonat dan
- kesadahan non karbonat.

Dapat ditentukan dg titrasi (satuan bpj: bagian per juta atau ppm: *part per million*) mg/l, atau dgn D (1 D = 10 mg/l CaO).

$Hr = Ca (CaCO_3/Ca) + Mg (CaCO_3/Mg)$ , dengan Ca dan Mg dalam mg/l

Klasifikasi air berdasarkan harga kesadahan

(Hem dlm Douwer, 1978 dan Sawyer & Mc Carty dlm Todd, 1980)

Kesadahan (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		Kelas Air
Hem	Sawyer & Mc Carty	
0 - 60	0 - 75	lunak
61 - 120	75 - 150	menengah
121 - 180	150 - 300	keras
> 180	> 300	sangat keras

2. Jumlah Garam Terlarut atau *Total Dissolved Solid* (TDS) ditentukan berdasarkan Daya Hantar Listrik (DHL).

Air dgn kandungan garam tinggi, mempunyai nilai DHL tinggi.

Klasifikasi air berdasarkan Jumlah Garam Terlarut  
jumlah konsentrasi garam yang terkandung di dalam air

Jumlah garam terlarut (mg/l)	Jenis air	
	Hem (Douwer, 1978)	Davis & De Wiest 1966
< 1000	tawar ( <i>fresh</i> )	tawar ( <i>fresh</i> )
3000 - 10.000	masin ( <i>moderately saline</i> )	payau ( <i>brackish</i> )
10.000 - 35.000	sangat masin ( <i>very saline</i> )	--
> 35.000	asin ( <i>briny</i> )	--
10.000 - 100.000	--	<i>salty</i>
> 100.000	--	<i>briny</i>

3. Daya Hantar Listrik (DHL) atau *Electrical Conductivity* (EC) menunjukkan kemampuan air menghantarkan listrik.

- Diukur pada suhu standart 25 C, koreksi:

$$\text{DHL } 25 \text{ C} = \text{DHL } t \text{ C} / (1 + 0,02 (t - 25))$$

- Besaran DHL dpt dikonversikan dgn besaran TDS (mg/l)

$$1 \text{ mmho/cm} (10^3 \mu\text{mho/cm}) = 640 \text{ mg/l}$$

$$\text{atau } 1 \text{ mg/l} = 1,56 \mu\text{S/m}$$

Harga konversi dipengaruhi jenis garam 1 mmho/cm = 450 mg/l (garam MgCl) sampai 1.000 mg/l (garam Na HCO<sub>3</sub>).

DHL ( $\mu\text{mho/cm}$ pada 25°C)	Macam Air
0,055	air murni
0,5 - 5,0	air suling
5 - 30	air hujan
30 - 2.000	air tanah
35.000 - 45.000	air laut

Klasifikasi air berdasarkan  
Daya Hantar Listrik

4. Keasaman (pH) sebagai zat pelarut yang akan melarutkan semua zat yang ada padanya, baik bersifat asam, basa ataupun netral.

- $\text{pH} < 7$  **asam**, air mengandung  $\text{Cl}_2$  berlebihan.

Air yang asam, sangat mudah melarutkan Fe mengandung besi yang tinggi.

- $\text{pH} > 7$  **basa**, air mengandung garam Ca atau Mg karbonat maupun bikarbonat (pH 7,5 – 8)

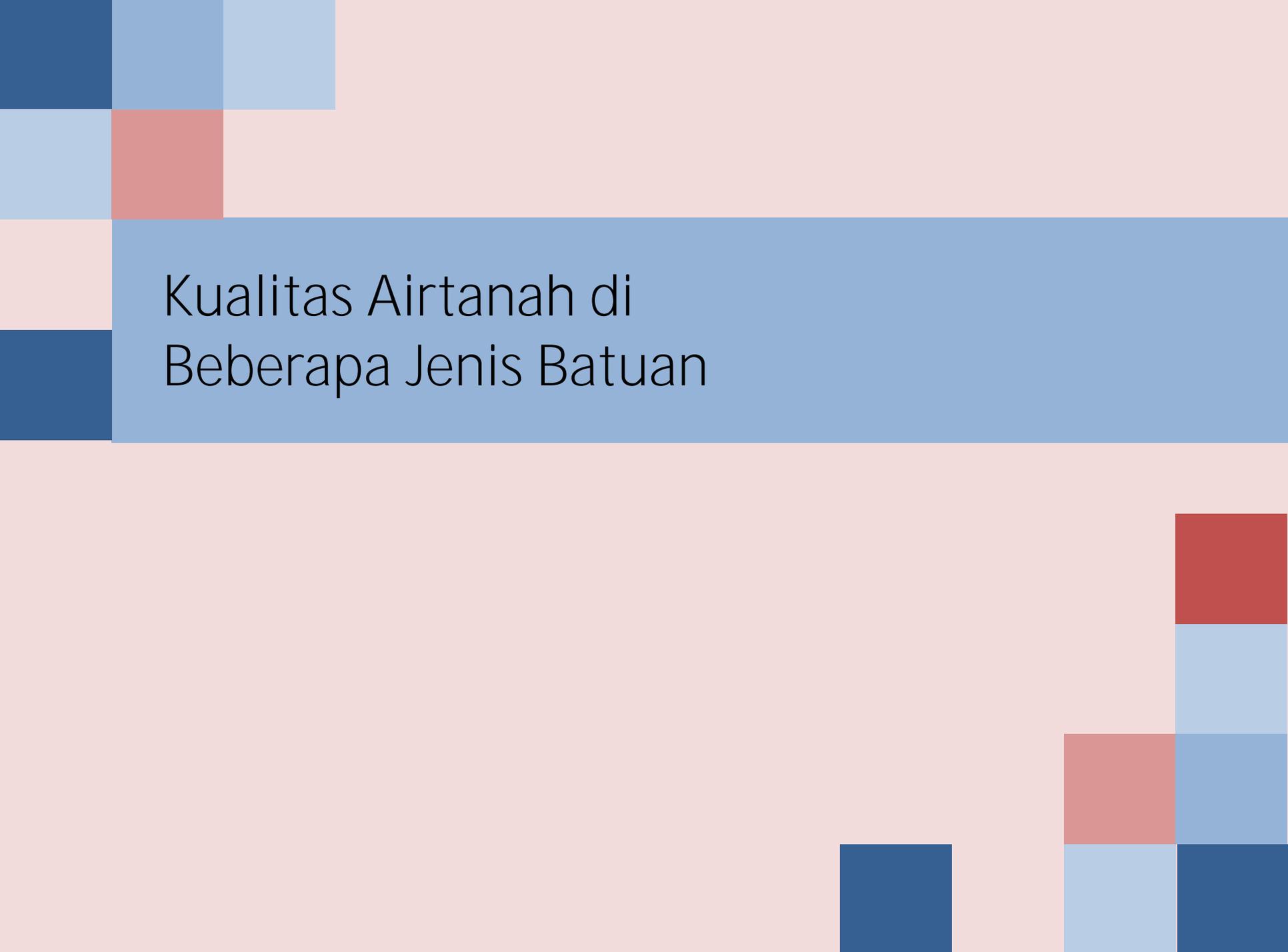
5. Kandungan Ion kation & anion, ditentukan dgn Metode Volumetric, Calorimetri, Flame Fotometri, dan Spektrometri.

- Ion-ion penting:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , dan boron.
- Ion-ion logam jarang bersifat racun: As, Cd, Cr, Co, Pb, Se, dan  $\text{Hg}^+$ .

## SIFAT BIOLOGIS (BAKTERIOLOGIS)

- Kandungan biologis di dalam air **bakteriologis (bakteri E coli)**, ditentukan berdasarkan pendekatan dengan daftar MPN dari Hoskins.

Caranya dengan mempersiapkan 15 tabung. Setiap 5 tabung diisi air sebanyak 10 ml, 1 ml, dan 0,1 ml. Pada masing-masing tabung ditambahkan beberapa tetes *lauryl tryptose broth*, kemudian diinkubasikan selama 48 jam pada suhu 35°C. Dicatat tabung-tabung yang mengeluarkan gas (positip). Berdasarkan daftar MPN dapat diketahui jumlah bakteri E coli dalam 100 ml air.

The slide features a light peach background. In the top-left corner, there is a cluster of squares in shades of blue and red. In the bottom-right corner, there is another cluster of squares in shades of blue, red, and light blue. A wide, horizontal blue bar spans across the middle of the slide, containing the title text.

# Kualitas Airtanah di Beberapa Jenis Batuan

# Kualitas Airtanah pada Batuan Beku Dalam & Batuan Metamorf

- Kualitas airtanah, umumnya baik.
- Namun, apabila terdapat di daerah kering terdapat konsentrasi garam akibat proses penguapan. Hal serupa dpt terjadi pd daerah yang mengandung air fosil atau terjadi intrusi air laut melalui retakan batuan.
- Diorit & Syenit kandungan kuarsa rendah, tetapi mineral silika relatif mudah larut kadar  $\text{SiO}_2$  terlarut di dalam airtanah mencapai 25 - 55 bpj.
- Kuarsit, Marmer, Batusabak, & Filit kadar  $\text{SiO}_2 < 30$  bpj.
- Dolomit & Marmer kesadahan sedang - tinggi.
- Serpentin, Gabro, Ampibolit, dan sejenisnya kadar  $\text{Mg} >$  kadar  $\text{Ca}$ .
- Air yg berasal dari Granit, Gneiss, Sekis Mika, & Riolit bersifat asam dan TDS mencapai 71 bpj dgn kesadahan 23 bpj.
- Air yg berasal dari Gabro, Diorit, & Gneiss Hornblende TDS sebesar 233 bpj dgn kesadahan 145 bpj. (Le Grand dalam Davis & De Wiest, 1966)

# Kualitas Airtanah pada Batuan Vulkanik

- Pada umumnya, kualitas air baik dan cenderung sebagai air Kalsium Magnesium-Bikarbonat.
- Batuan vulkanik bersifat asam air Natrium-Bikarbonat dengan kadar  $\text{SiO}_2$  tinggi.
- Kualitas air yang jelek dijumpai pada sumber air hangat atau fumarol kadar Na dan Cl tinggi dgn pH rendah. Selain itu, dijumpai di daerah pantai yang terjadi penyusupan air laut maupun di daerah gurun dgn penguapan sangat tinggi.

# Kualitas Airtanah pada Batuan Sedimen/Endapan

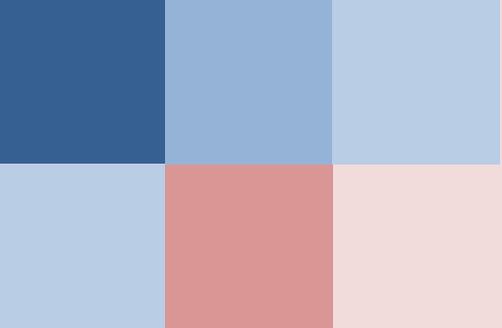
- Kualitas airtanah beragam air asin sampai air dgn TDS < 100 bpj.
- Semakin dalam akuifer, kualitas airtanah semakin jelek.
- Serpih kandungan Fe dan F cukup tinggi dgn pH 5,5 – 7.
- Batupasir kualitas airtanah beragam, tetapi pd umumnya kualitas baik. Kualitas airtanah dipengaruhi: komposisi mineral, kedalaman akuifer, dan jauh dekatnya pengaliran.
- Batugamping kandungan silika rendah, Ca & Mg melimpah dgn pH > 7.
- Airtanah pada endapan akibat sedimentasi lapukan batuan sedimen banyak mengandung Ca, Mg, CO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> dgn kandungan Cl tergantung pencucian.
- Endapan berasal dari batuan beku/batuan metamorf TDS, kadar SO<sub>4</sub>, dan Cl relatif rendah.
- Endapan berasal dari batuan vulkanik kadar SiO<sub>2</sub> melimpah.

# Kualitas Airtanah pada Endapan

- Pd lembah yg sangat luas, terbentuk oleh proses tektonik kualitas yang beragam. Pd endapan lembah sungai, umumnya memiliki kualitas baik, kecuali di daerah gurun dan daerah yang telah berkembang pesat.

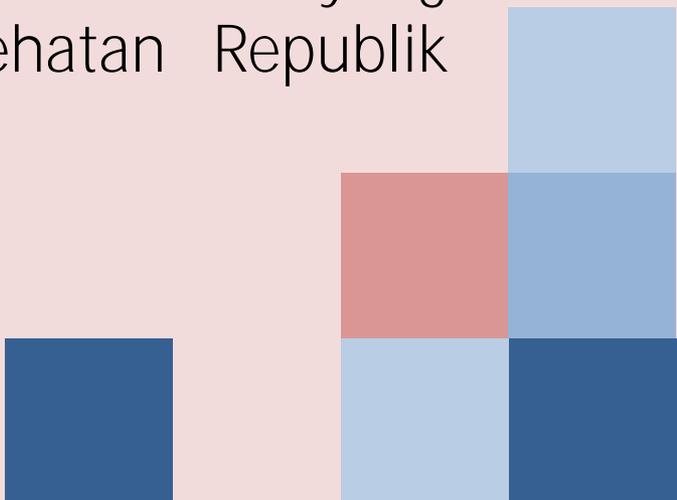
Kualitas airtanah dipengaruhi: air yang masuk ke dalam akuifer, vegetasi, kultur, dan tipe batuan di tepi sungai maupun dasar lembah.

- Pd lembah dgn sistem pengaliran yang bagus kualitas airtanah baik. Pengaliran terbuka mencegah akumulasi air garam akibat penguapan dan membantu peredaran airtanah yang akan menggerakkan air fosil.
- Pd dataran pantai kandungan TDS sedikit. Ion Na, Ca, dan  $\text{HCO}_3$  sangat melimpah di dekat permukaan. Semakin dalam akuifer, kandungan  $\text{SO}_4$ , Ca, & Mg rendah, sedangkan Na &  $\text{HCO}_3$  dominan.
- Pd daerah penyusupan air laut kadar  $\text{SiO}_2$  rendah dan  $\text{SO}_4$  lebih tinggi apabila dibandingkan dengan air fosil. Ion Na & Cl melimpah.



# Standart Kualitas Airtanah Berdasarkan Penggunaannya

Penggunaan airtanah, terutama untuk keperluan air minum, air irigasi dan industri standart yang dikeluarkan oleh Departemen Kesehatan Republik Indonesia.



No	Unsur	Satuan	Minimum yang diperbolehkan	Maksimum yang dianjurkan	Maksimum yang diperbolehkan
1	Suhu	°C	-	-	suhu udara
2	Warna	Pt-Co	-	5	50
3	Bau dn rasa	-	tidak berbau, tidak berasa	tidak berbau, tidak berasa	tidak berbau, tidak berasa
4	kekeruhan	unit	-	5	25
5	pH	-	6,5	-	9,2
6	Jumlah garam terlarut	mg/l	-	500	1.5
7	KmnO4(zat organik)	mg/l	-	-	10
8	CO2	mg/l	-	-	0
9	Kesadahan	°D	5	-	10
10	Ca	mg/l	-	75	200
11	Mg	mg/l	-	30	150
12	Fe	mg/l	-	0,1	1,0
13	Mn	mg/l	-	0,05	0,5
14	Cu	mg/l	-	0,05	1,5
15	Zn	mg/l	-	1,0	15
16	Cl	mg/l	-	200	600
17	SO4	mg/l	-	200	400
18	H2S	mg/l	-	-	0
19	F	mg/l	1,0	-	2,0
20	NH4	mg/l	-	-	0
21	NO3	mg/l	-	-	20,0
22	NO2	mg/l	-	-	0
23	Phenol	mg/l	-	0,01	0,002
24	AS	mg/l	-	-	0,05
25	Pb	mg/l	-	-	-
26	Se	mg/l	-	-	0,01
27	Cr	mg/l	-	-	0,05
28	CN	mg/l	-	-	0,05
29	Cd	mg/l	-	-	0,01
30	Hg	mg/l	-	-	0,001
31	Sinar alfa	C/ml	-	-	10 <sup>-9</sup>
32	Sinar beta	C/ml	-	-	10 <sup>-8</sup>
33	Angka kuman	1 ml	-	-	100
34	Bakteri Coli	100 ml	-	-	0

Penentuan kualitas airtanah guna keperluan irigasi, berdasarkan:

- Imbangan Serapan Natrium (*Sodium Adsorption Ratio* = SAR),
- % Na,
- Na Karbonat Tersisa (*Residual Sodium Carbonate* = RSC), dan
- Kadar boron.

*Sodium Adsorption Ratio*,  
satuan dalam epj

$$SAR = Na / \sqrt{\frac{+}{+}}$$

Persen Natrium,  
satuan dalam epj

$$\% Na = (Na + K) 100 / (Ca + Mg + Na + K)$$

*Residual Sodium Carbonate*,  
satuan dalam epj

$$RSC = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg)$$

- Parameter penting lain *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) mengukur tingkat pengotoran atau pencemaran oleh bahan organik. Semakin besar harga BOD, semakin tinggi tingkat pengotoran, sehingga semakin rendah kadar oksigen yang tersedia dalam air.
- Klasifikasi air untuk keperluan irigasi berdasarkan: harga DHL, SAR, RSC, gabungan SAR & DHL, % Na & DHL, dan boron.

Kelas air	DHL (mmho)	Keterangan
I	0 – 2	Aman dipakai, pengaruh salinitas dapat diabaikan.
II	2 – 4	Daya hasil tanaman yang sangat peka dapat tertekan.
III	4 – 8	Daya hasil tanaman banyak mengalami pembatasan.
IV	8 – 6	Tanaman yang tahan dapat memberi hasil memuaskan.
V	> 16	Tanaman yang sangat tahan dapat memberi hasil memuaskan.

Klas air	SAR	Keterangan
Rendah	0 – 10	Bahaya Na/alkali tidak ada atau sedikit
Menengah	10 – 18	Bahaya Na (alkali) sedang
Tinggi	18 – 26	Bahaya Na (alkali) besar
Tinggi sekali	> 26	Bahaya Na (alkali) sangat besar

Klas air	RSC	Keterangan
Rendah	< 1,25	Aman untuk dipakai
Menengah	1,25 – 2,5	Kurang aman dipakai
Tinggi	> 2,5	Tidak aman dipakai

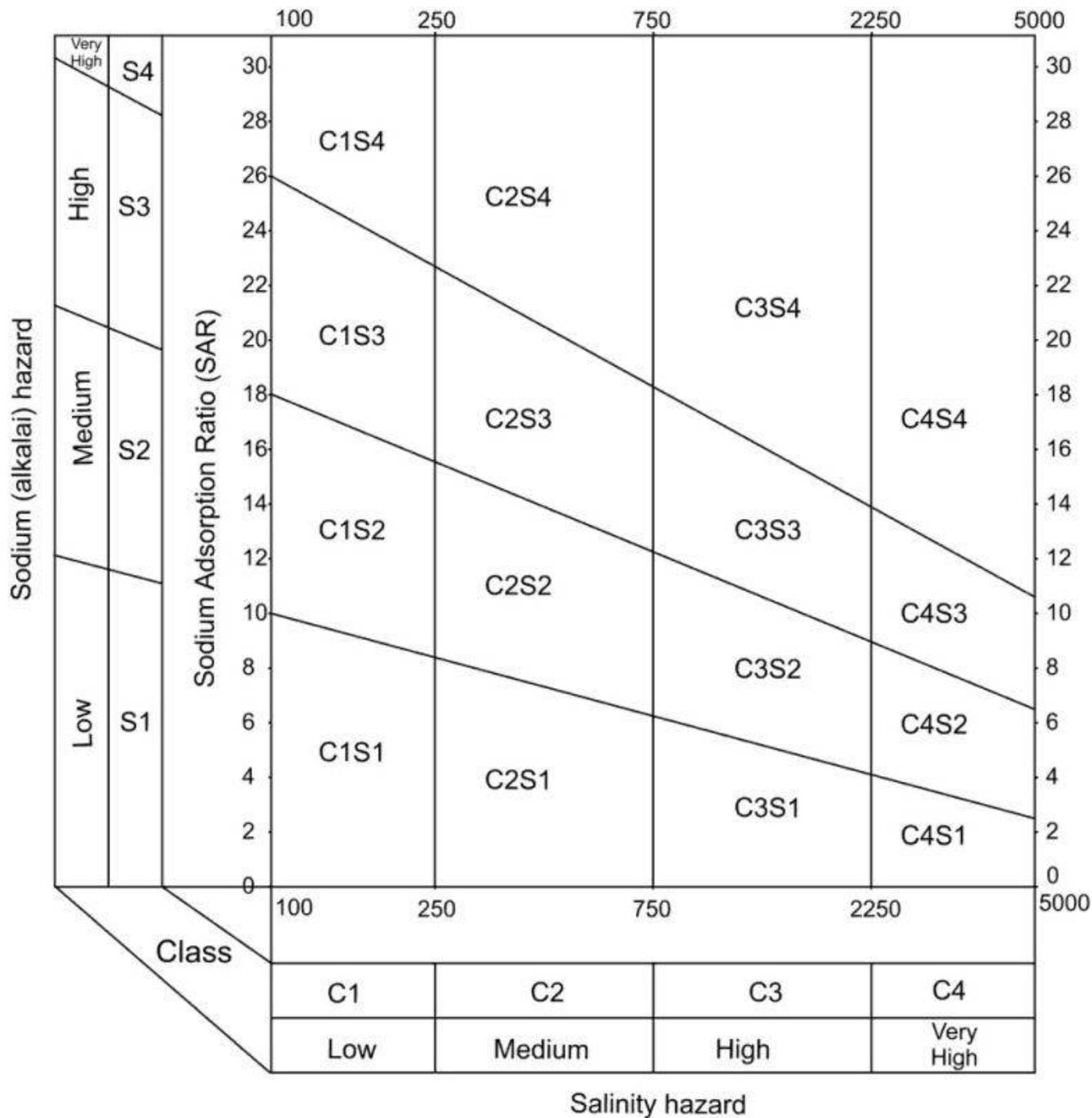


Diagram klasifikasi air untuk irigasi berdasarkan harga DHL dan SAR.

(Seatz & Peterson, 1964, modifikasi dari Richaeds, 1954)

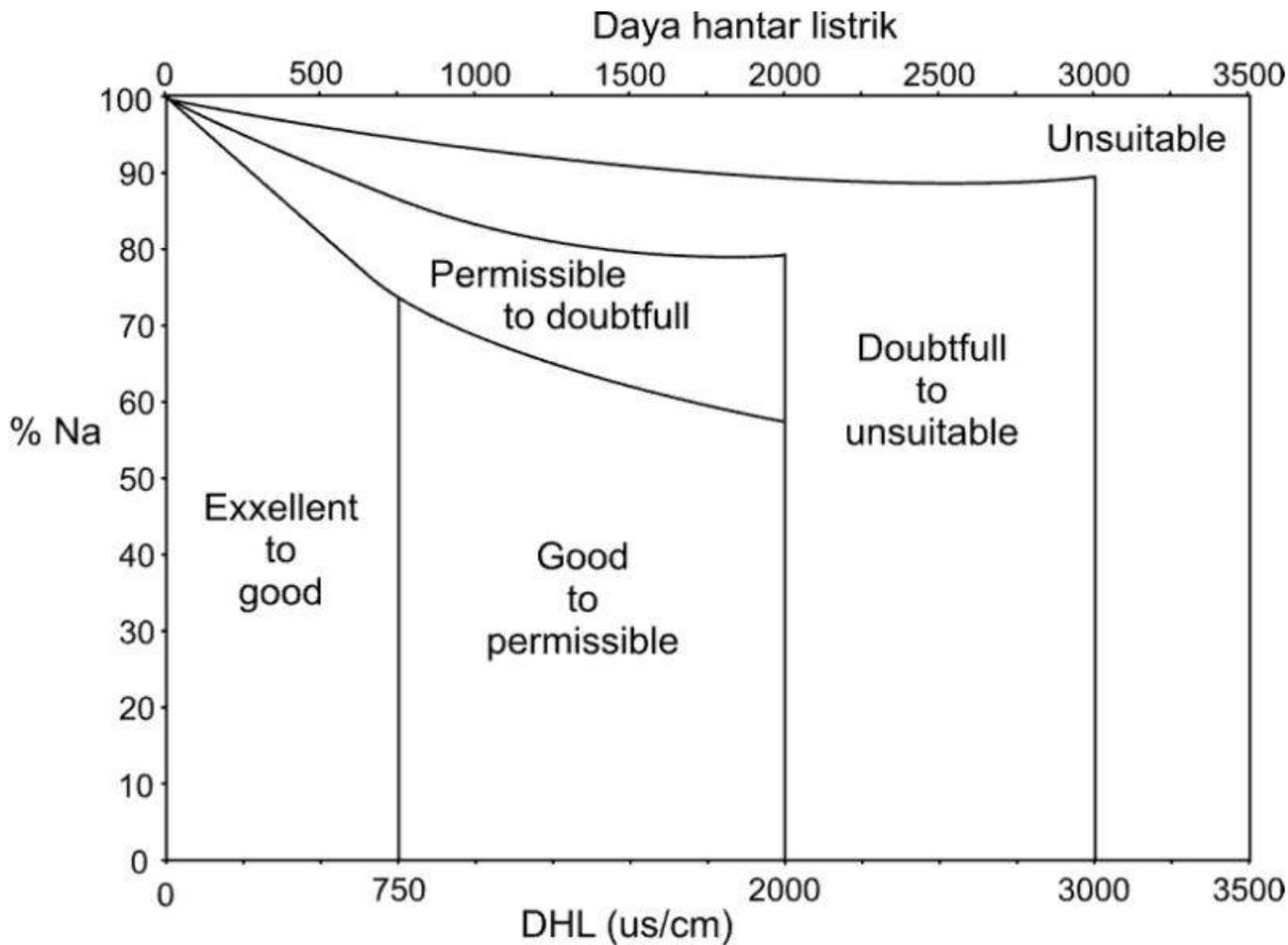


Diagram klasifikasi air untuk irigasi berdasarkan harga % Na dan DHL.

(Wilcox, 1955 dalam Todd, 1959)

Klas air	% Na	DHL $\mu\text{S}/\text{cm}$	Boron (mg/cl)		
			Kondisi Tanaman		
			Peka	Setengah Peka	Tahan
Baik sekali	< 20	< 250	< 0,33	< 0,67	< 1,0
Baik	20 – 40	250 – 750	0,33 – 0,67	0,67 – 1,33	1,0 – 2,0
Dijinkan	40 – 60	750 – 2000	0,67 – 1,0	1,33 – 2	2,0 – 3,0
Meragukan	60 – 80	2000 – 3000	1,00 – 1,25	2 – 2,5	3,0 – 3,75
Tidak dapat dipakai	>80	> 3000	> 1,25	>2,5	> 3,75

Klasifikasi air untuk irigasi berdasarkan harga % Na, DHL, dan kadar boron.

(Wilcox, 1955 dalam Todd, 1959)



# Interpretasi Geologi dari Data Kualitas Airtanah

Tujuan interpretasi menentukan klasifikasi, korelasi, analisis, sintesis, dan ilustrasi (Zaporozec, 1972).

Interpretasi dilakukan berdasarkan kandungan:

Ion Kation      Kalsium, Magnesium, Natrium, Kalium,  
Besi, Mangan.

Anion            Klorida, Sulfat, Bikarbonat, Karbonat,  
Nitrat, dan kadang-kadang Fluoride.

Interpretasi dilakukan pula berdasarkan: kadar  $\text{SiO}_2$ , TDS, DHL, suhu, dan pH.

Satuan bpj dari ion-ion tersebut harus diubah menjadi epj, berdasarkan persamaan:

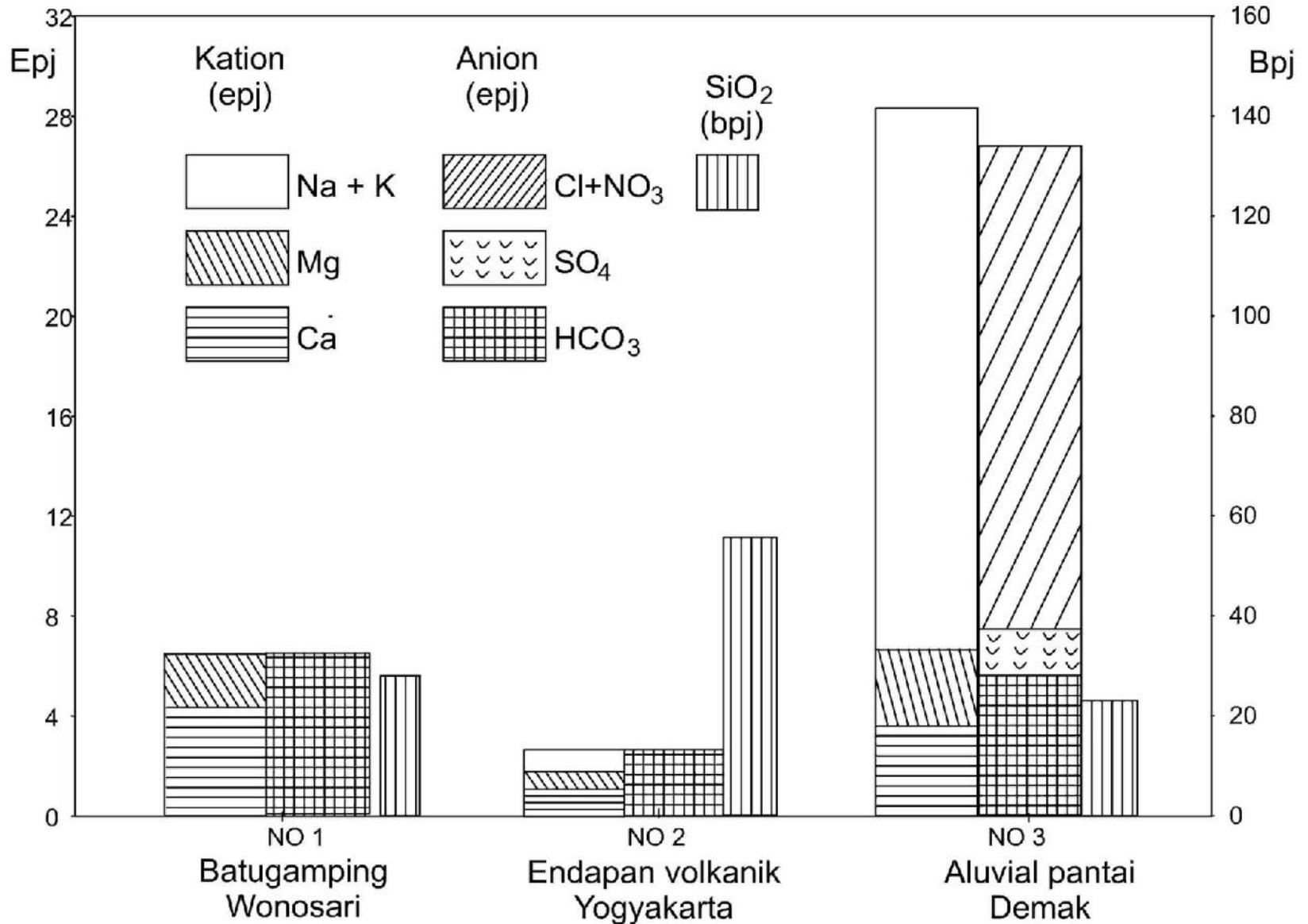
$$\text{epj} = \text{valensi} \times \text{bpj} / \text{berat atom atau}$$

$$\text{epj} = \text{valensi} \times \text{bpj} / \text{berat molekul}$$

## Penentuan klas air dengan Metode Klasifikasi Kurlov , contoh airtanah di daerah Jawa Tengah

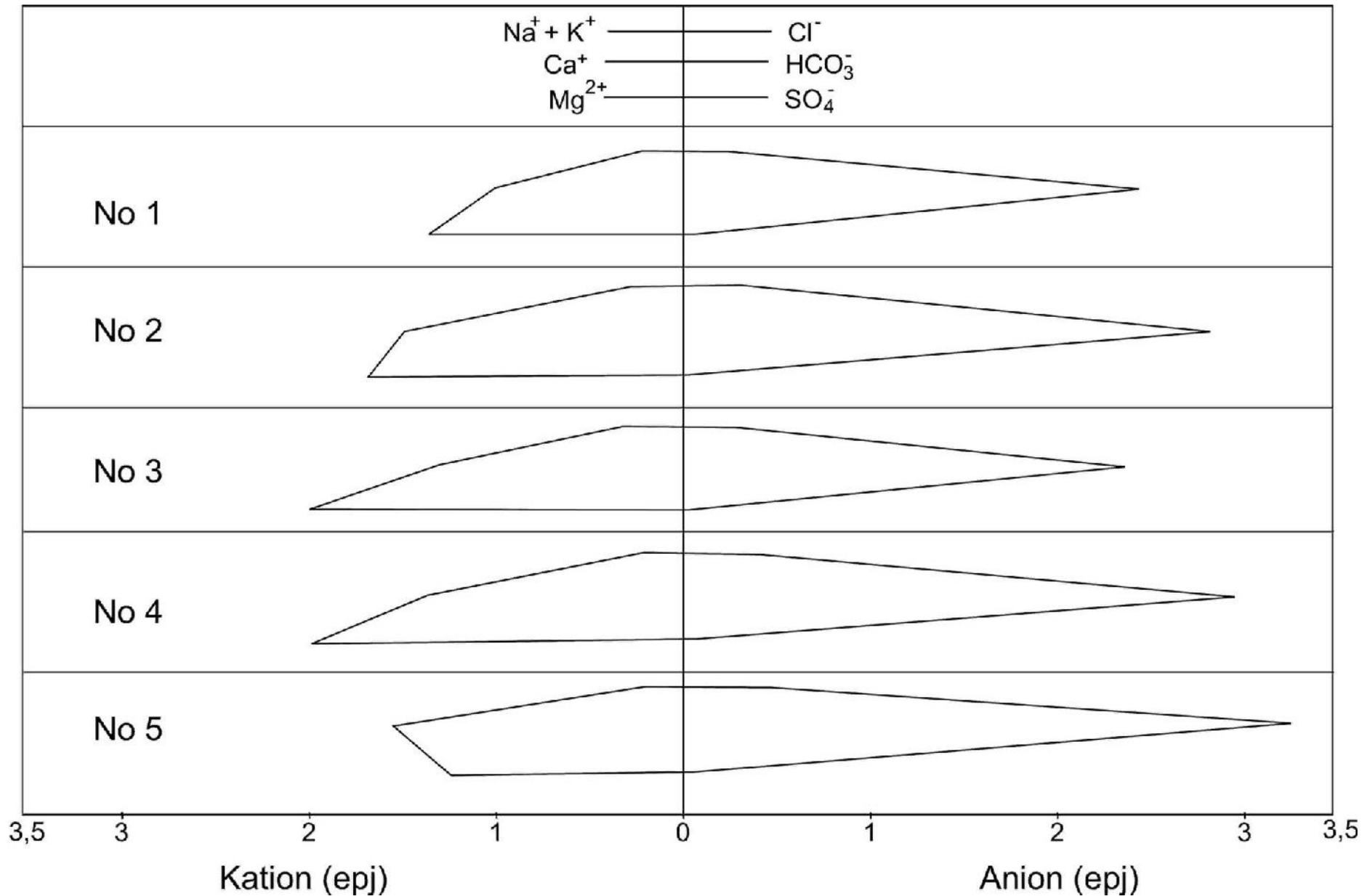
LOKASI		Wonosari (Batugamping)		Yogyakarta (Endapan Vulkanik)		Demak (Aluvial Pantai)	
Analisis Kimia		epj	%	epj	%	epj	%
KATION	Na + K	0,25	2,3	0,75	36,4	21,85	76,6
	Mg	2,06	31,1	0,58	28,2	2,82	9,9
	Ca	4,41	66,6	0,73	35,4	3,87	13,5
	Jumlah	6,62	100	2,06	100	28,54	100
ANION	Cl	0,35	5,4	0,17	8,3	19,04	72,4
	NO <sub>3</sub>	0,05	0,8	-	-	0,01	-
	HCO <sub>3</sub>	5,97	91,5	1,89	91,7	5,16	19,6
	SO <sub>4</sub>	0,15	2,3	-	-	2,08	8,0
	Jumlah	6,52	100	2,06	100	26,29	100
SiO <sub>2</sub> (bpj)		29,50		55		20,5	
pH		7,43		7,3		7,4	
Klas air		kalsium-magnesium bikarbonat		Alkali-kalsium- bikarbonat		Alkali klorida	

# Interpretasi data kualitas airtanah dari sumur bor dengan menggunakan Diagram Bar Collins



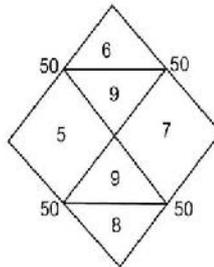
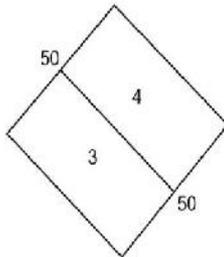
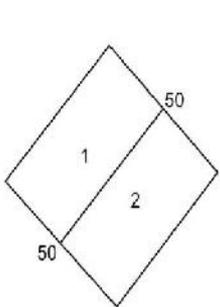
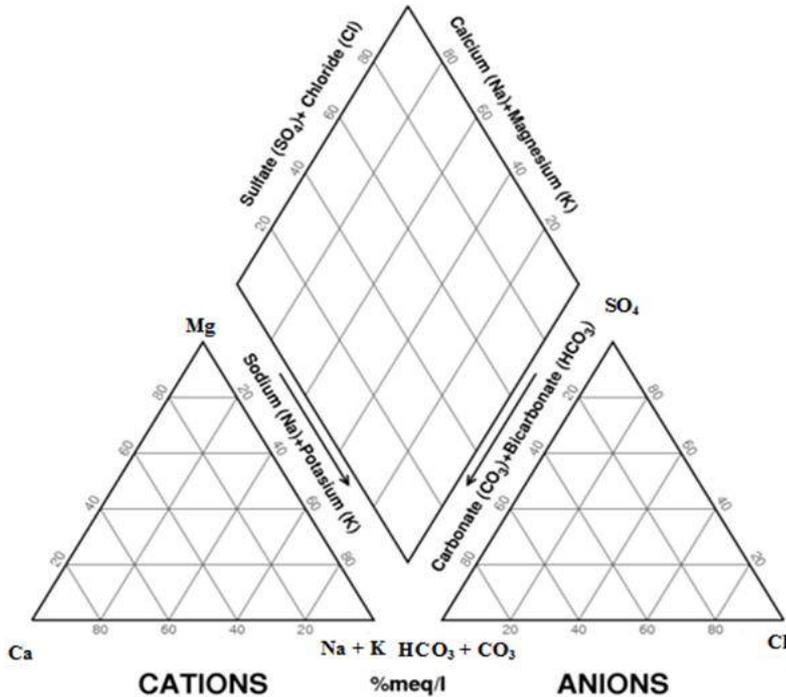
# Interpretasi data kualitas airtanah dangkal dengan Diagram Stiff

Studi area : daerah Kalasan



# Interpretasi data kualitas airtanah dengan Diagram Trilinier Piper

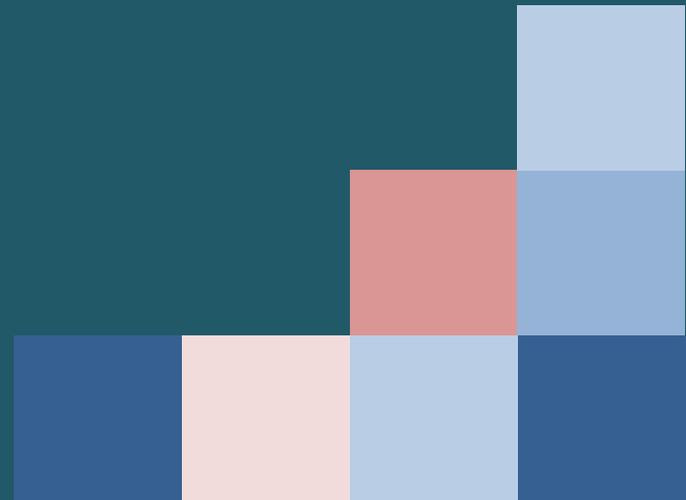
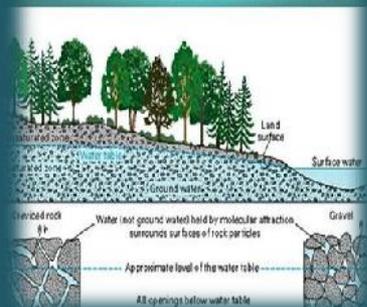
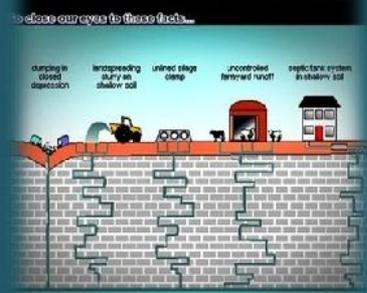
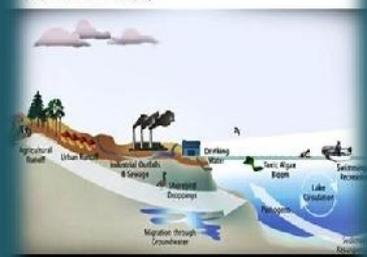
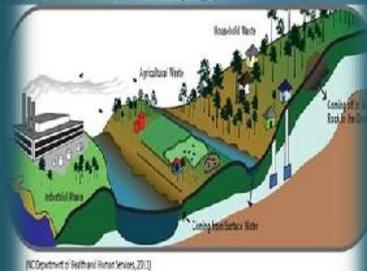
Tipe kualitas airtanah dapat diketahui secara cepat dengan memperhatikan kelompok dominan hasil pengeplotan data pada jajaran genjang. Pembagian daerah pada jajaran genjang (Walton, 1970).

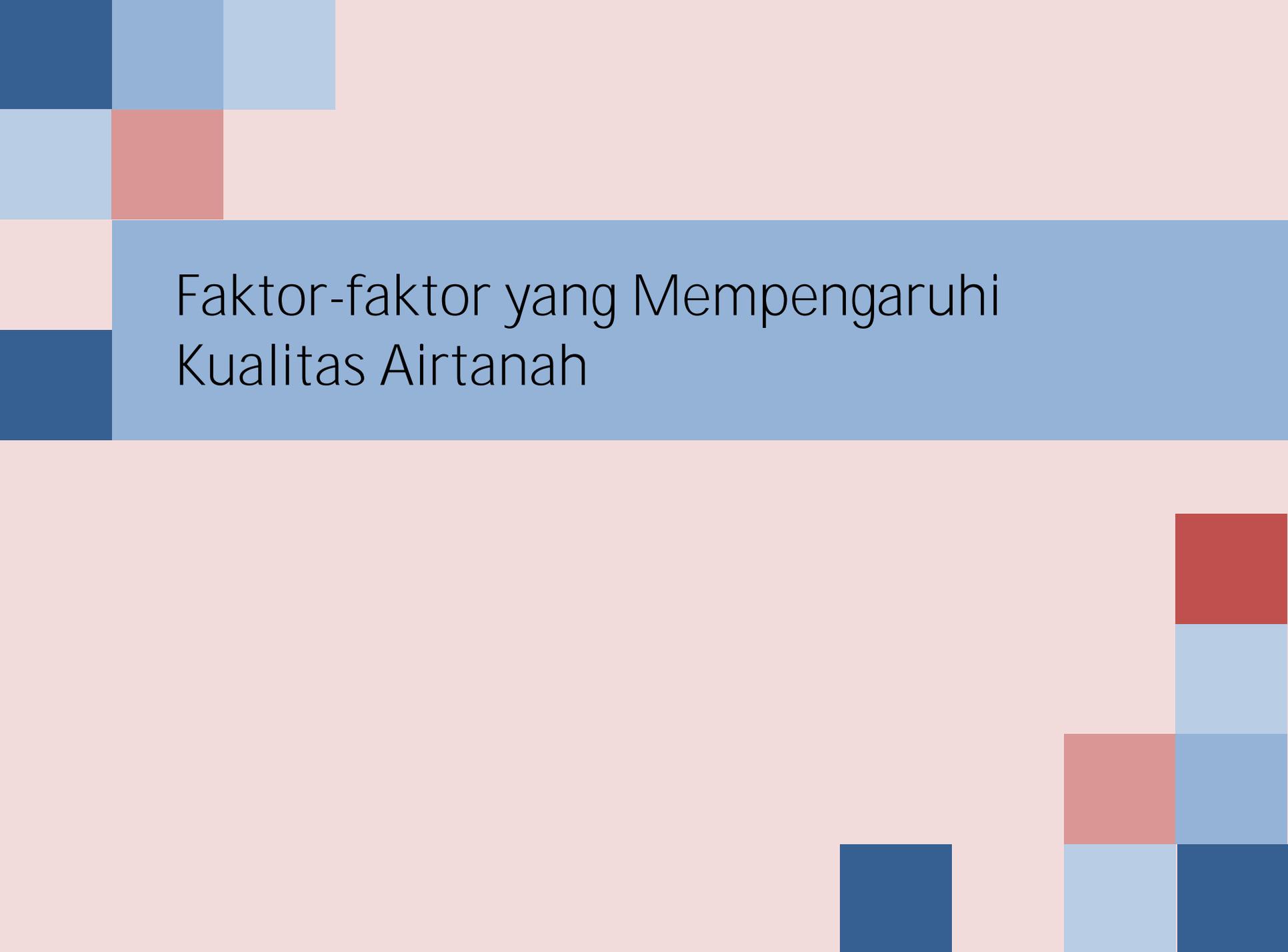


- 1) Alkali tanah (Ca + Mg) melebihi alkali (Na + K).
- 2) Alkali (Na + K) melebihi alkali tanah (Ca + Mg).
- 3) Asam lemah (CO<sub>3</sub> + HCO<sub>3</sub>) melebihi asam kuat (SO<sub>4</sub> + Cl).
- 4) Asam kuat (SO<sub>4</sub> + Cl) melebihi asam lemah (CO<sub>3</sub> + HCO<sub>3</sub>).
- 5) Jenis Magnesium bikarbonat kekerasan karbonat (alkalinitas sekunder) > 50 %, sifat kimia airtanah didominasi oleh alkali tanah dan asam lemah.
- 6) Jenis Kalsium-klorida kekerasan non karbonat (kegaraman sekunder) > 50 %.
- 7) Jenis Sodium-klorida non karbonat alkali (kegaraman primer) > 50 %, sifat kimia airtanah didominasi oleh alkali dan asam kuat. Air laut & air garam di plot pada daerah ini.
- 8) Jenis Sodium-bikarbonat karbonat alkali (alkalinitas primer) > 50 %.
- 9) Jenis campuran pasangan kation-anion seimbang, tidak ada yang melebihi 50 %.



# BAB VIII PENYELIDIKAN AIR TANAH





# Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kualitas Airtanah

Engelen (1981), menyatakan kualitas airtanah dipandang sebagai satu sistem.



## Manfaat studi kualitas airtanah

- mengetahui sejarah,
- proses terjadi/pembentukan,
- perkembangan,
- interpretasi ke dalam geologi/geohidrologinya.

## Kualitas airtanah dipengaruhi oleh :

- asal mata air;
- lingkungan dan
- iklim.

## Kuantitas airtanah dipengaruhi oleh :

- litologi;
- topografi;
- vegetasi dan
- iklim.

## Proses yang terjadi

Zona	Airtanah berasal dari air permukaan ataupun air hujan yang meresap masuk ke dalam tanah.
Horison A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pada zona ini, kaya bahan organik</li> <li>• <math>C</math> (bahan organik) + <math>O_2</math> (astenosfer/tanah) → <math>CO_2</math></li> <li>• <math>CO_2 + H_2O</math> → <math>H_2CO_3</math>.</li> </ul>
Horison B	Air kaya $H_2CO_3$ + ( $Fe_2O_3$ (oksida besi), lempung, humus) meningkatkan keasaman. Proses reaksi berlangsung melalui proses biokimia & hidrokimia.
Akuifer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Airtanah mengalir ke dalam akuifer.</li> <li>• Airtanah + NaCl → peningkatan kadar garam terlarut.</li> </ul>
Zona Atas	Pada zona ini, airtanah mengalir dengan cepat. Airtanah kaya ion $HCO_3^-$ dengan kadar garam terlarut sedikit.
Zona Tengah	Pada zona ini, sirkulasi airtanah kurang aktif. Airtanah mengalami penambahan kadar garam terlarut dan kandungan sulfat dominan.
Zona Bawah	Pada zona ini, aliran airtanah lambat. Airtanah memiliki konsentrasi Cl sangat tinggi umur akuifer yang tua/penyusupan airlaut. Perkembangan ion pada airtanah di zona ini, tergantung pada <i>mineral availability</i> dan <i>mineral solubility</i> .

# Hubungan antara ion penyusun airtanah dengan jenis mineral (Davis dan De Wiest, 1966)

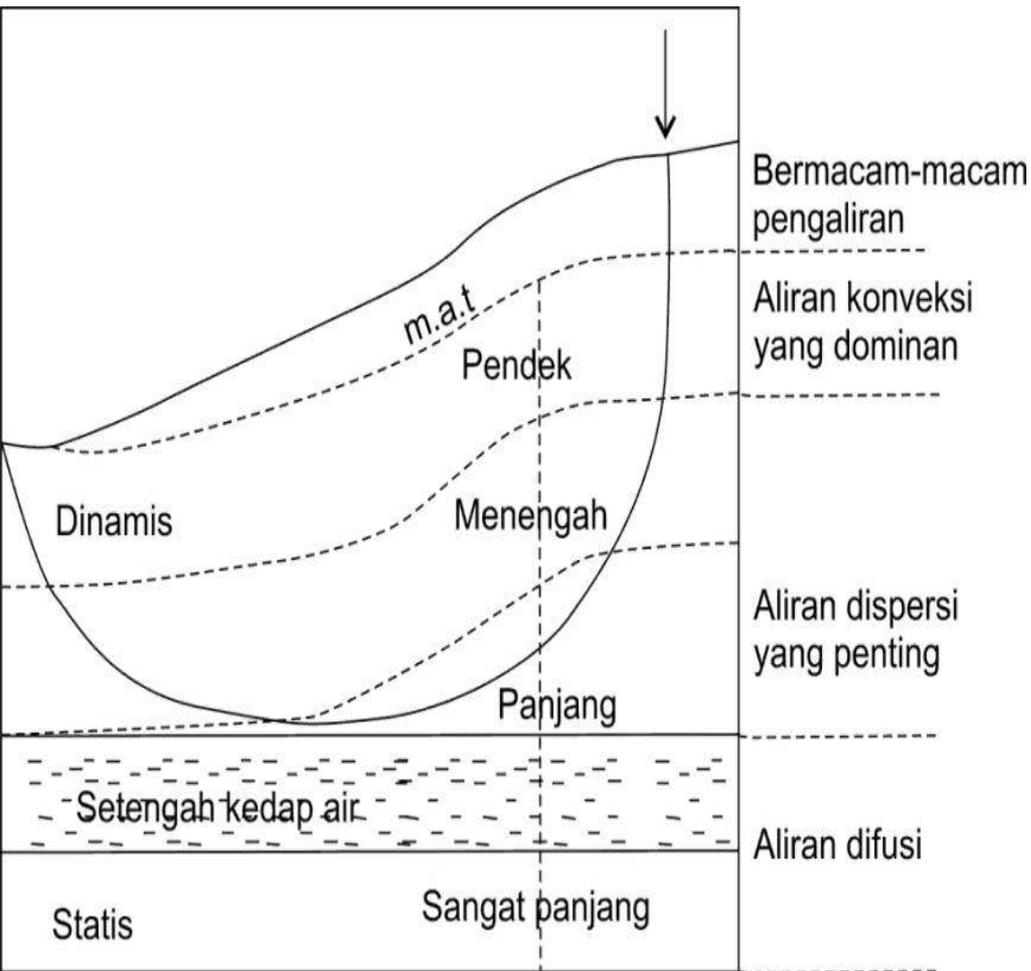
	Ion	Asal	Jenis Mineral
Kation	Natrium (Na <sup>+</sup> )	Batuan beku plutonik dan batuan metamorf	Plagioklas, Mineral Lempung, Nefelin, Sodalit, Natrolit, Glaukofan
	Kalium (K <sup>+</sup> )	Batuan beku maupun hasil evaporasi	Ortoklas, Mikroclin, Biotit, Leusit, Silvit
	Kalsium (Ca <sup>+</sup> )	Endapan laut	Kalsit, Dolomnit, Aragonit, Anhidrit, Gypsum
		Material hasil pelapukan batuan beku ataupun metamorf	Apatit, Wolastonit, Fluorit, Feldspar, Amfibol, Piroksen
	Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	Batuan beku dan batuan metamorf	Dolomit, Olivin, Biotit, Hornblenda, Augit, Serpentin, Talk, Diopsid, Tremolit
	Besi, Mangan (Fe, Mn)	Batuan vulkanik dan batuan beku	Piroksen, Amfibol, Magnetit, Pirit, Mineral Lempung

# Hubungan antara ion penyusun airtanah dengan jenis mineral

(Davis dan De Wiest, 1966)

	Ion	Asal	Jenis Mineral
Anion	Klorida (Cl <sup>-</sup> )	Mineral hasil evaporasi dari connate water ataupun penyusupan airlaut	Sodalit, Apatit, Mika, Hornblenda
	Bikarbonat, Karbonat (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Karbon dioksida di atmosfer, tanah ataupun pelarutan batuan karbonat.	Kalsit, Dolomit
	Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	Endapan evaporasi atau oksidasi, gas-gas pada daerah vulkanik.	Pirit, Markasit
	Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Bahan-bahan organik atau hasil akhir stabilisasi aerobik zat-zat yang mengandung nitrogen organik.	
	Silika (SiO <sub>2</sub> )	Batuan vulkanik dan batuan beku	Mineral Kuarsa, Mineral Lempung, Mineral Silikat

# Macam Pengaliran Airtanah



(Engelen, 1981)

## Aliran Konveksi

Berlangsung dengan cepat, terutama pada rekahan, retakan, pori-pori yang besar dsb. Aliran konveksi tinggi (lebih tinggi dari aliran dispersi & difusi) dijumpai di bagian atas yang dangkal.

## Aliran Dispersi

Aliran konveksi berkurang terjadi di bagian tengah & bawah pada bagian kaki yang turun. Secara perlahan berkembang menjadi aliran dispersi

## Aliran Difusi

Berlangsung pada bagian bawah

Kualitas airtanah ditentukan oleh tiga sifat utama :

- sifat fisis,
- sifat khemis,
- sifat biologis (bakteriologis)

# SIFAT FISIS

(Warna, Bau, Rasa, Kekentalan, Kekeruhan, & Suhu)

## 1. Warna

- Disebabkan oleh adanya zat-zat berupa suspensi maupun terlarut.
- Ditentukan dengan menggunakan skala Pt-Co.

## 2. Bau

- Disebabkan oleh adanya zat-zat atau gas-gas yang mempunyai aroma.

## 3. Rasa

- Disebabkan oleh adanya garam atau zat lain, baik yang tersuspensi ataupun terlarut.

## 4. Kekentalan

- Dipengaruhi oleh partikel-partikel yang terkandung di dalamnya. Semakin banyak yang dikandung akan semakin kental. Suhu semakin tinggi, maka kekentalannya akan semakin turun (encer).

# SIFAT FISIS

(Warna, Bau, Rasa, Kekentalan, Kekeruhan, & Suhu)

## 5. Kekeruhan

- Disebabkan oleh adanya zat-zat yang dikandung tetapi tidak terlarutkan. contohnya lempung, lanau, zat-zat organik serta mikroorganisme.
- Ditentukan dengan turbidimeter.

## 6. Suhu

- Dipengaruhi oleh keadaan sekelilingnya, seperti musim, cuaca, siang-malam, tempat atau lokasinya.

## SIFAT KHEMIS

(Kesadahan, Jumlah Garam Terlarut (*Total Dissolved Solids*), Daya Hantar Listrik (*Electric Conductance*), Keasaman, & Kandungan Ion)

1. Kesadahan atau kekerasan *total hardness* : Hr,

Kesadahan ada dua macam yaitu :

- kesadahan karbonat dan
- kesadahan non karbonat.

Disebabkan oleh kandungan Ca & Mg.

Dapat ditentukan dengan titrasi (satuan bpj : bagian per juta atau ppm : *part per million*) mg/l, atau dengan D (1 D = 10 mg/l CaO)

$$\text{Hr} = \text{Ca} (\text{CaCO}_3/\text{Ca}) + \text{Mg} (\text{CaCO}_3/\text{Mg}),$$

dengan Ca dan Mg dalam mg/l

## Klasifikasi air berdasarkan harga kesadahan

(Hem dalam Douwer, 1978 dan Sawyer & Mc Carty dalam Todd, 1980)

Kesadahan (mg/l CaCO <sub>3</sub> )		Kelas Air
Hem	Sawyer & Mc Carty	
0-60	0-75	lunak
61-120	75-150	menengah
121-180	150-300	keras
> 180	>300	sangat keras

## 2. Jumlah Garam Terlarut

- Nilainya dapat diketahui dengan harga daya hantar listrik (DHL-EC) menunjukkan sifat/kemampuan air menghantarkan listrik.
- Air yang banyak mengandung garam akan mempunyai harga daya hantar listrik yang tinggi.
- Pengukuran : EC meter (satuan mikrosiemen ( $\mu\text{S}/\text{Sm}$ ) atau mikromho ( $\mu\text{mho}/\text{Sm}$ )).

Jumlah garam terlarut atau *total dissolved solids*  
jumlah konsentrasi garam yang terkandung di dalam air  
(Hem dalam Douwer, 1978 dan Sawyer & Mc Carty dalam Todd, 1980)

Jumlah garam terlarut (mg/l)	Macam air	
	Hem (Douwer, 1978)	Davis & De Wiest 1966
< 1000	tawar ( <i>fresh</i> )	tawar ( <i>fresh</i> )
3000-10.000	masin ( <i>moderately saline</i> )	payau ( <i>brackish</i> )
10.000-35.000	sangat masin ( <i>very saline</i> )	--
> 35.000	asin ( <i>briny</i> )	--
10.000-100.000	--	<i>salty</i>
> 100.000	--	<i>briny</i>

### 3. Daya Hantar Listrik (DHL)

- Daya hantar listrik (DHL), diukur pada suhu standart **25 C**, maka perlu dilakukan koreksi berdasarkan persamaan berikut :

$$DHL_{25\ C} = DHL_t\ C / ( 1 + 0,02 (t - 25) )$$

- Airtanah : 100-5.000  $\mu\text{S}/\text{Sm}$ .
- Besarnya daya hantar listrik dapat dikonversikan dengan besaran jumlah garam terlarut (mg/l) yaitu :

$$1\ \text{milimho}/\text{Sm} (10^3\ \mu\text{mho}/\text{Sm}) = 640\ \text{mg}/\text{l}\ \text{atau}$$

$$1\ \text{mg}/\text{l} = 1,56\ \mu\text{S}/\text{Sm}$$

- Harga konversi dipengaruhi oleh jenis garam, yaitu 1 milimho/Sm = 450 mg/l untuk garam MgCl sampai 1.000 mg/l untuk garam Na HCO<sub>3</sub>.

## Klasifikasi air berdasarkan daya hantar listrik (DHL)

DHL ( $\mu\text{mho}/\text{Sm}$ pada $25^\circ\text{C}$ )	Macam Air
0,055	air murni
0,5-5,0	air suling
5-30	air hujan
30-2.000	air tanah
35.000-45.000	air laut

## 4. Keasaman Air

- Keasaman air sebagai zat pelarut yang akan melarutkan semua zat yang ada padanya, baik bersifat asam, basa ataupun netral.
- Derajat keasaman **pH**, berkisar antara 1 - 14.
- **pH < 7** **asam**, air mengandung  $\text{Cl}_2$  berlebihan. Air dengan pH 4,5 dijumpai adanya ion bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ).
- Air yang asam, sangat mudah melarutkan Fe air yang asam akan mengandung besi yang tinggi.
- **pH > 7** **basa**, air mengandung garam Ca atau Mg karbonat, bikarbonat (pH 7,5 – 8)
- **pH 7** **netral**.
- Pengukuran pH dengan menggunakan pH meter.

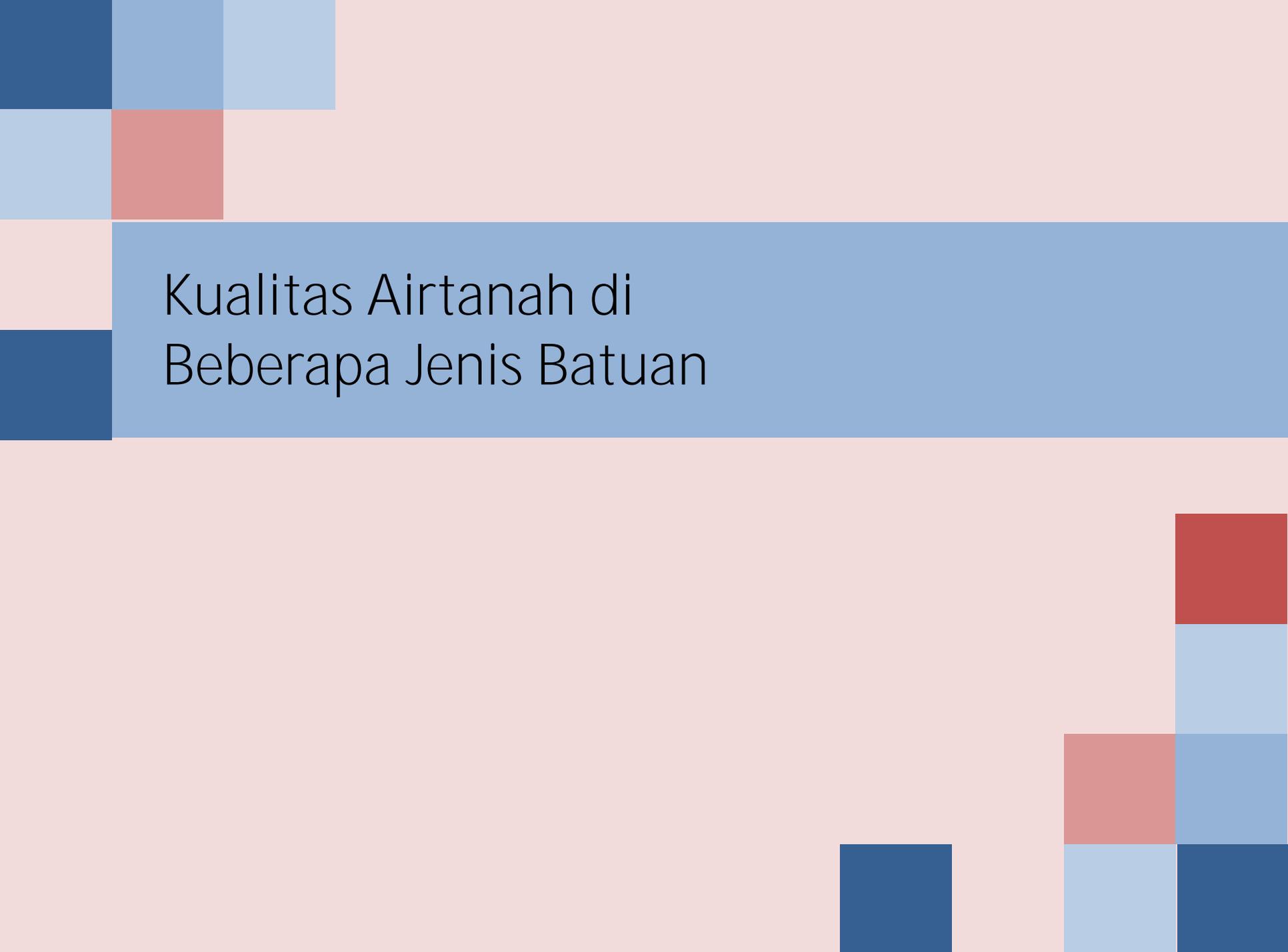
5. Kandungan Ion kation, anion atau ion logam.

- Penentuan dilakukan dengan metode volumetric, calorimetri, flame fotometri, spektrometri.
- Ion-ion penting antara lain Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , F,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , dan boron. Ion-ion logam jarang yang bersifat racun antara lain: As, Pb, Se, Cr, Cd, Hg, dan Co.

## SIFAT BIOLOGIS (BAKTERIOLOGIS)

- Kandungan biologis di dalam air **bakteriologis (bakteri E coli)**
- Kandungan bakteri E coli dapat ditentukan berdasarkan pendekatan dengan daftar MPN dari Hoskins.

Caranya dengan mempersiapkan 15 tabung. Setiap 5 tabung diisi air sebanyak 10 ml, 1 ml dan 0,1 ml. Pada masing-masing tabung ditambahkan beberapa tetes *lauryl tryptose broth*, kemudian diinkubasikan selama 48 jam pada suhu 35°C. Dicatat tabung-tabung mana yang mengeluarkan gas (positip). Dengan menggunakan daftar MPN dapat diketahui jumlah bakteri coli dalam 100 ml air.

The slide features a light peach background. In the top-left corner, there is a cluster of five squares in shades of blue and red. In the bottom-right corner, there is a cluster of five squares in shades of blue, red, and light blue. A horizontal blue bar spans the width of the slide, containing the title text.

# Kualitas Airtanah di Beberapa Jenis Batuan

## Kualitas Airtanah pada Batuan Beku Dalam & Batuan Metamorf

- Kualitas airtanah pada kedua jenis batuan ini umumnya baik.
- Namun apabila, terdapat di daerah kering oleh adanya proses penguapan garam-garam akan terkonsentrasi. Hal serupa dijumpai di daerah yang mengandung air fosil atau terjadi penyusupan air laut lewat retakan batuan.
- Pada batuan diorit & syenit kandungan kuarsa rendah, tetapi mineral silika relatif mudah larut kadar  $\text{SiO}_2$  terlarut di dalam airtanah dapat mencapai 25 - 55 bpj.
- Pada kuarsit, marmer, batusabak, & filit kadar  $\text{SiO}_2 < 30$  bpj.
- Pada dolomit dan marmer kesadahan sedang - tinggi.
- Pada serpentinit, gabro, ampibolit, dan sejenisnya kadar magnesium  $>$  kadar kalsium.

# Kualitas Airtanah pada Batuan Beku Dalam & Batuan Metamorf

- Air yang berasal dari granit, gneiss, sekis mika, riolit bersifat asam dan jumlah garam terlarut mencapai 71 bpj dengan kesadahan 23 bpj.
- Air yang berasal dari gabro, diorit, gneiss hornblende jumlah garam terlarut sebesar 233 bpj dengan kesadahan 145 bpj. (Le Grand dalam Davis & De Wiest, 1966)

# Kualitas Airtanah pada Batuan Vulkanik

- Pada umumnya, air yang berasal dari batuan vulkanik kualitas baik dan cenderung sebagai air kalsium magnesium-bikarbonat.
- Pada batuan vulkanik bersifat asam air natrium-bikarbonat dengan kadar  $\text{SiO}_2$  tinggi.
- Kualitas air yang jelek dijumpai pada sumber air hangat atau fumarol kadar natrium dan klorida tinggi dengan pH rendah.
- Kualitas air yang jelek, dijumpai juga di daerah pantai yang terjadi penyusupan air laut maupun di daerah gurun yang penguapnya sangat tinggi.

# Kualitas Airtanah pada Batuan Sedimen/Endapan

- Kualitas airtanah beragam air asin sampai air dengan kandungan jumlah garam terlarut  $< 100$  bpj.
- Semakin dalam akuifer, kualitas airtanah semakin jelek.
- Pada serpih kandungan besi dan fluorida cukup tinggi dengan pH rendah (5,5 – 7).
- Pada batugamping kandungan silika rendah, kalsium & magnesium melimpah dengan pH  $> 7$ .
- Pada batupasir kualitas airtanah beragam, tetapi pada umumnya memiliki kualitas baik. Kualitas airtanah dipengaruhi oleh komposisi mineral, kedalaman akuifer, dan jauh dekatnya pengaliran.

# Kualitas Airtanah pada Endapan

- Kualitas airtanah pada lembah yang sangat luas, terbentuk oleh proses tektonik kualitas yang beragam. Pada endapan lembah sungai, umumnya memiliki kualitas baik, kecuali di daerah gurun dan daerah yang telah berkembang dengan pesat.
- Kualitas airtanah dipengaruhi oleh air yang masuk ke dalam akuifer, vegetasi, kultur dan tipe batuan di tepi sungai maupun dasar lembah.
- Pada lembah dengan sistem pengaliran yang bagus kualitas airtanah baik. Pengaliran terbuka akan mencegah akumulasi air garam yang disebabkan oleh penguapan dan membantu peredaran airtanah yang akan menggerakkan air fosil.
- Pada endapan yang berasal dari batuan beku/batuan metamorf jumlah garam terlarut relatif rendah, demikian pula kadar  $\text{SO}_4$  dan Cl.

- Pada endapan yang berasal dari batuan vulkanik kadar  $\text{SiO}_2$  melimpah.
- Kualitas airtanah pada endapan yang terbentuk oleh sedimentasi lapukan batuan sedimen banyak mengandung Ca, Mg,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ . Kandungan Cl tergantung dari pencucian.
- Pada dataran pantai kandungan jumlah garam terlarut sedikit, akan tetapi ion Na, Ca, dan  $\text{HCO}_3$  sangat melimpah di dekat permukaan. Semakin dalam akuifer, kandungan  $\text{SO}_4$ , Ca, & Mg rendah, sedangkan Na &  $\text{HCO}_3$  tetap dominan.
- Pada daerah penyusupan air laut kadar  $\text{SiO}_2$  rendah dan  $\text{SO}_4$  lebih tinggi apabila dibandingkan dengan air fosil. Ion yang melimpah : Na, Cl.



# Interpretasi Geologi dari Data Kualitas Airtanah

Interpretasi dilakukan berdasarkan kandungan ion penyusun utama, baik berupa kation maupun anion. Kation **Kalsium, Magnesium, Natrium, Kalium, Besi, Mangan**. Anion **Klorida, Sulfat, Bikarbonat, Karbonat, Nitrat**, dan kadang-kadang **Fluoride**. Interpretasi dilakukan pula berdasarkan kadar  $\text{SiO}_2$ , jumlah garam terlarut atau daya hantar listrik, suhu, dan pH.

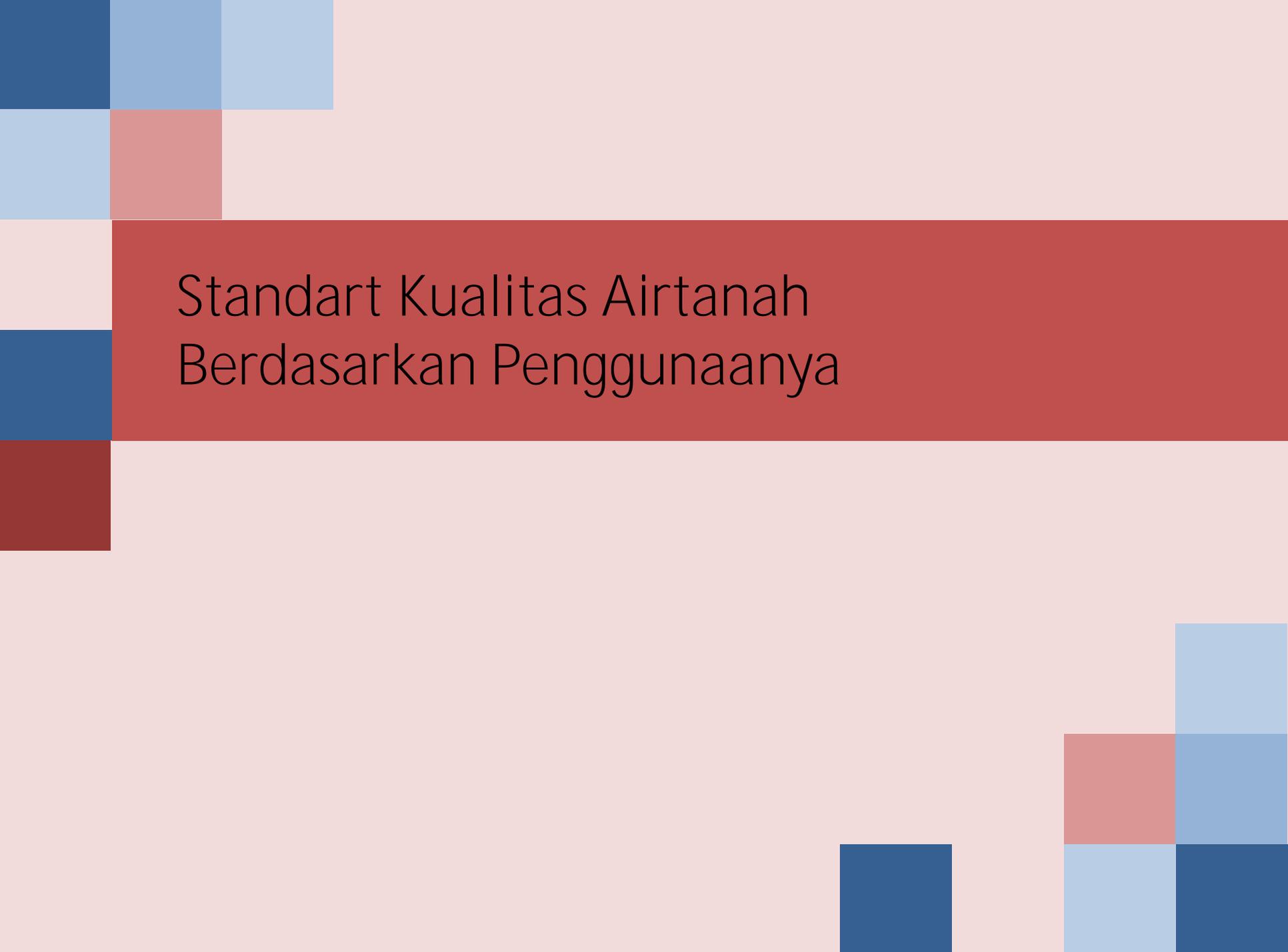
Satuan bpj dari ion-ion tersebut harus diubah menjadi epj (ekivalen per juta).

$$\text{epj} = \text{valensi} \times \text{bpj} / \text{berat atom atau}$$

$$\text{epj} = \text{valensi} \times \text{bpj} / \text{berat molekul}$$

Jumlah kation (satuan epj) sama dengan jumlah anion (satuan epj) atau perbedaanya harus kecil (kurang dari 5 %). Penamaan kelas air ditentukan berdasarkan kandungan ion yang mempunyai jumlah > 25 %.

Tujuan interpretasi menentukan klasifikasi, korelasi, analisis, sintesis, dan ilustrasi (Zaporozec, 1972).



# Standart Kualitas Airtanah Berdasarkan Penggunaanya

Penggunaan airtanah, terutama untuk keperluan air minum, air irigasi dan industri standart yang dikeluarkan oleh Departemen Kesehatan Republik Indonesia.

No	Unsur	Satuan	Minimum yang diperbolehkan	Maksimum yang dianjurkan	Maksimum yang diperbolehkan
1	Suhu	°C	-	-	suhu udara
2	Warna	Pt-Co	-	5	50
3	Bau dn rasa	-	tidak berbau, tidak berasa	tidak berbau, tidak berasa	tidak berbau, tidak berasa
4	kekeruhan	unit	-	5	25
5	pH	-	6,5	-	9,2
6	Jumlah garam terlarut	mg/l	-	500	1.5
7	KmnO4(zat organik)	mg/l	-	-	10
8	CO2	mg/l	-	-	0
9	Kesadahan	°D	5	-	10
10	Ca	mg/l	-	75	200
11	Mg	mg/l	-	30	150
12	Fe	mg/l	-	0,1	1,0
13	Mn	mg/l	-	0,05	0,5
14	Cu	mg/l	-	0,05	1,5
15	Zn	mg/l	-	1,0	15
16	Cl	mg/l	-	200	600
17	SO4	mg/l	-	200	400
18	H2S	mg/l	-	-	0
19	F	mg/l	1,0	-	2,0
20	NH4	mg/l	-	-	0
21	NO3	mg/l	-	-	20,0
22	NO2	mg/l	-	-	0
23	Phenol	mg/l	-	0,01	0,002
24	AS	mg/l	-	-	0,05
25	Pb	mg/l	-	-	-
26	Se	mg/l	-	-	0,01
27	Cr	mg/l	-	-	0,05
28	CN	mg/l	-	-	0,05
29	Cd	mg/l	-	-	0,01
30	Hg	mg/l	-	-	0,001
31	Sinar alfa	C/ml	-	-	10 <sup>-9</sup>
32	Sinar beta	C/ml	-	-	10 <sup>-8</sup>
33	Angka kuman	1 ml	-	-	100
34	Bakteri Coli	100 ml	-	-	0

Untuk kepentingan irigasi, diperlukan beberapa parameter lain:

- Imbangan Serapan Natrium (*Sodium Adsorption Ratio* = SAR),
- % Na Karbonat Tersisa (residual Sodium carbonate = RSC), dan
- kadar boron.

Imbangan Serapan Natrium (SAR) diperoleh berdasarkan:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Na, Ca dan Mg dalam satuan epj

- % Na didapatkan dengan rumus :

$$\% \text{ Na} = (\text{Na} + \text{K}) 100 / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}), \text{ satuan ion epj}$$

- Na Karbonat Tersisa (RSC) didapatkan dengan rumus :

$$\text{RSC} = (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) - (\text{Ca} + \text{Mg}), \text{ satuan ion epj}$$

- Parameter penting lain, yaitu : *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) mengukur taraf pengotoran atau pencemaran oleh bahan organik. Semakin besar harga BOD, semakin besar taraf pengotoran, sehingga semakin rendah kadar oksigen yang tersedia dalam air.
- Klasifikasi air untuk keperluan irigasi berdasarkan harga Daya Hantar Listrik , SAR, RSC, gabungan SAR dan DHL, % Na, DHL, dan boron.

Kelas air	DHL (mmho)	Keterangan
I	0 – 2	Aman dipakai, pengaruh salinitas kebanyakan dapat diabaikan
II	2 – 4	Daya hasil tanaman yang sangat peka dapat tertekan
III	4 – 8	daya hasil tanaman banyak mengalami pembatasan
IV	8 – 6	Hanya tanaman yang tahan dapat memberi hasil memuaskan
V	> 16	hanya tanaman yang sangat tahan dapat memberi hasil memuaskan

Klas air	SAR	Keterangan
Rendah	0 – 10	Bahaya Na atau alkali tidak ada atau sedikit
Menengah	10 – 18	Bahaya Na (alkali) sedang
Tinggi	18 – 26	Bahaya Na (alkali) besar
Tinggi sekali	> 26	Bahaya Na (alkali) sangat besar

RSC	Keterangan
< 1,25	Aman untuk dipakai
1,25 – 2,5	Kurang aman dipakai
> 2,5	Tidak aman dipakai

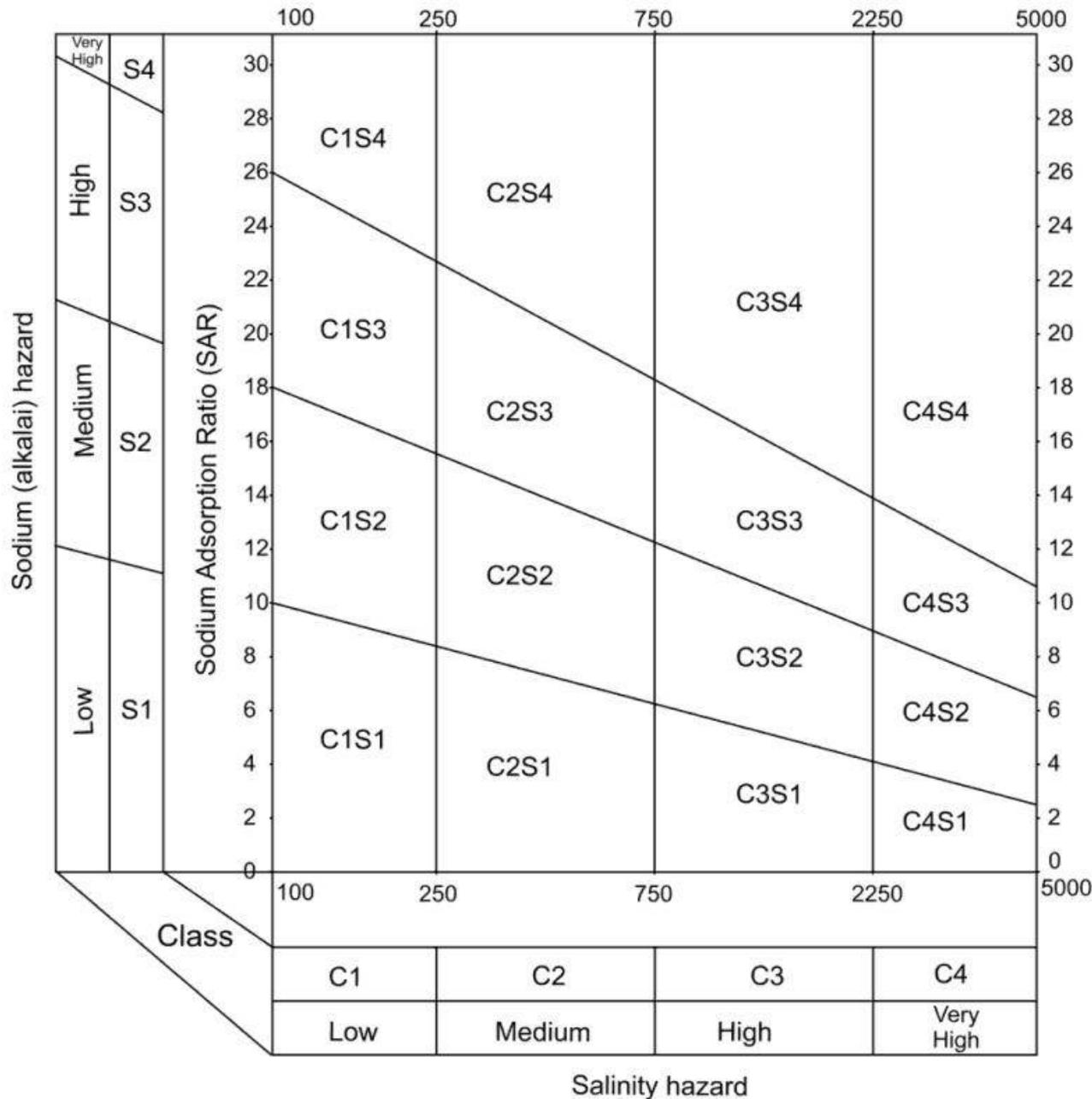


Diagram klasifikasi air untuk irigasi berdasarkan harga DHL dan SAR

(Seatz & Peterson, 1964, modifikasi dari Richaeds, 1954)

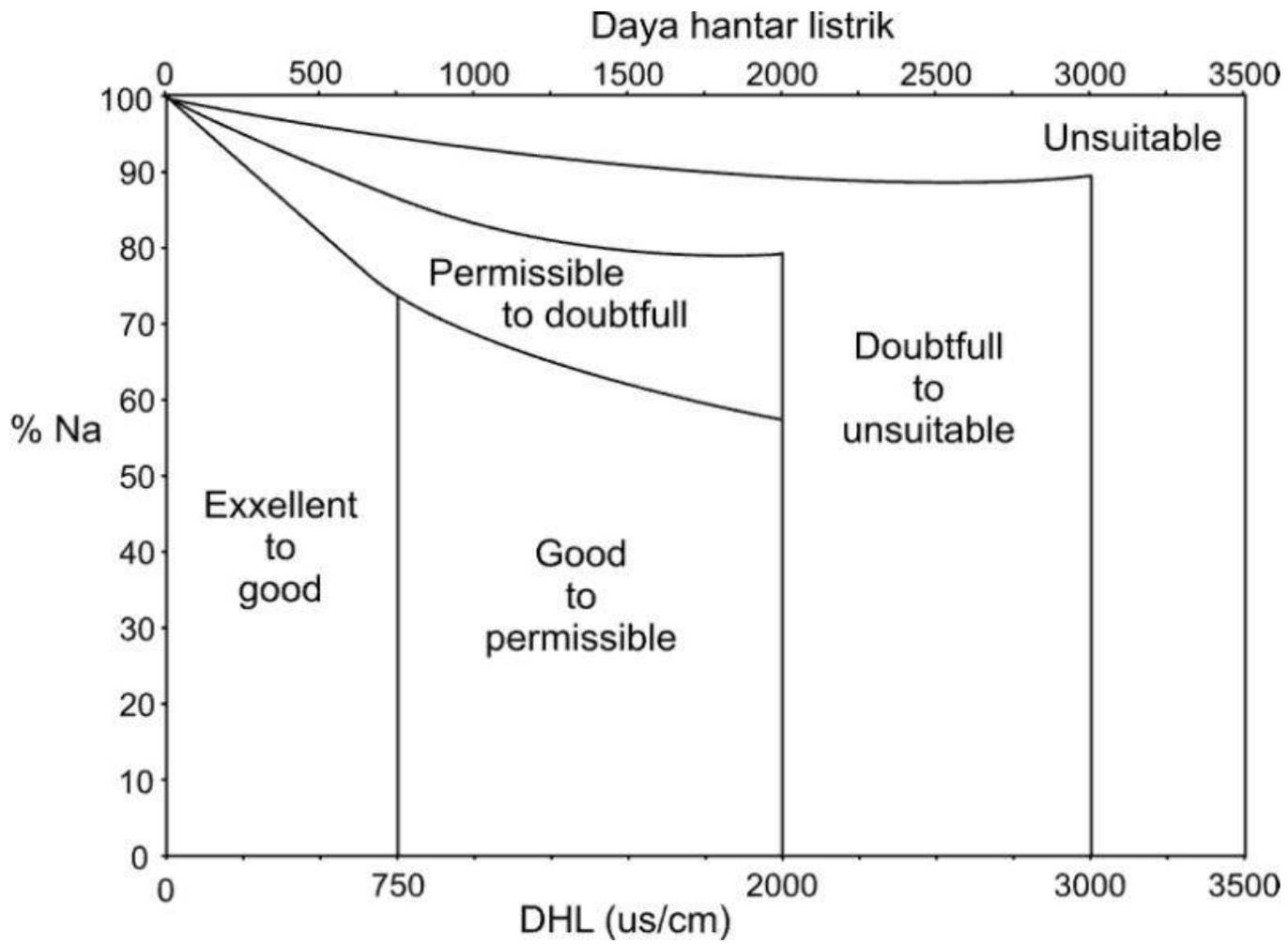


Diagram klasifikasi air untuk irigasi berdasarkan harga DHL dan % Na

(Wilcox, 1955 dalam Todd, 1959)

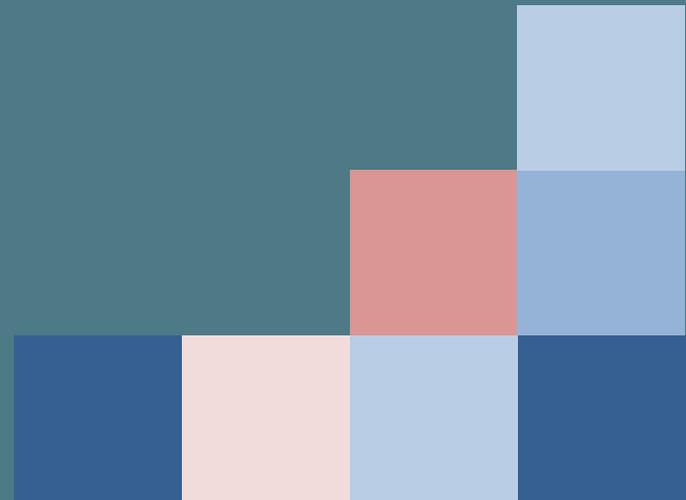
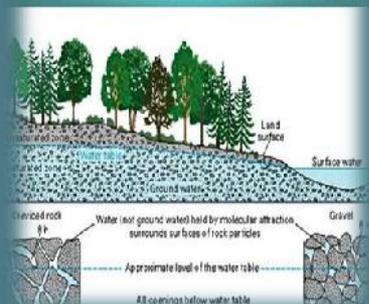
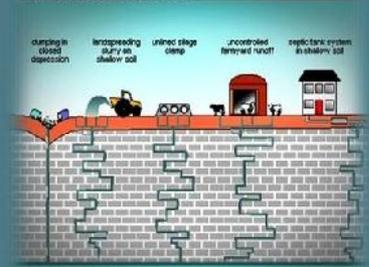
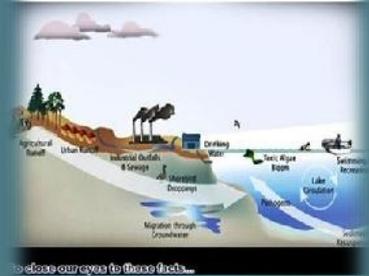
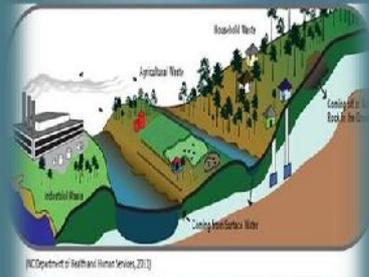
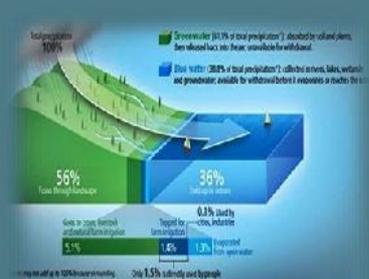
Klas air	% Na	DHL $\mu\text{S/cm}$	Boron (mg/cl)		
			Tanaman Peka	Tanaman Setengah Peka	Tanaman Tahan
Baik sekali	< 20	< 250	< 0,33	< 0,67	< 1,0
Baik	20 – 40	250 – 750	0,33 – 0,67	0,67 – 1,33	1,0 – 2,0
Dijinkan	40 – 60	750 – 2000	0,67 – 1,0	1,33 – 2	2,0 – 3,0
Meragukan	60 – 80	2000 – 3000	1,00 – 1,25	2 – 2,5	3,0 – 3,75
Tak dapat dipakai	>80	> 3000	> 1,25	>2,5	> 3,75

Klasifikasi air untuk irigasi berdasarkan harga DHL, % Na, dan kadar boron.  
(Wilcox, 1955 dalam Todd, 1959)



# BAB IX

## PENURAPAN AIR TANAH



Prinsip Metode Penurunan Airtanah  
membuat lubang di tanah sampai  
kedalaman di bawah muka airtanah.

Apabila kapasitasnya tidak mencukupi kebutuhan  
penambahan luas kontak akuifer yang diturap,  
secara mendatar, tegak ataupun keduanya.

## Pemilihan Metode Penurapan Airtanah, dilakukan berdasarkan :

- Kondisi geohidrologi
- Kuantitas & kualitas airtanah
- Peralatan & tenaga yang tersedia
- Biaya

## Metode Penurunan Airtanah, dibedakan menjadi :

- Penurunan secara mendatar
  - Liang pengumpul
  - Parit pengumpul
  - Terowongan pengumpul
  - Sumur pengumpul
- Penurunan secara tegak
  - Sumur dangkal
  - sumur dalam

Metode Penurapan		Keterangan
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liang pengumpul</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penurapan airtanah melalui serambi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kondisi airtanah dangkal</li> <li>• Kuantitas terbatas</li> <li>• Kualitas kurang baik</li> <li>• Peralatan sederhana</li> <li>• Tenaga tidak perlu ahli</li> <li>• Biaya relatif murah.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parit pengumpul</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terowongan pengumpul</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tenaga ahli</li> <li>• Biaya yang tidak sedikit</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sumur pengumpul</li> </ul>		

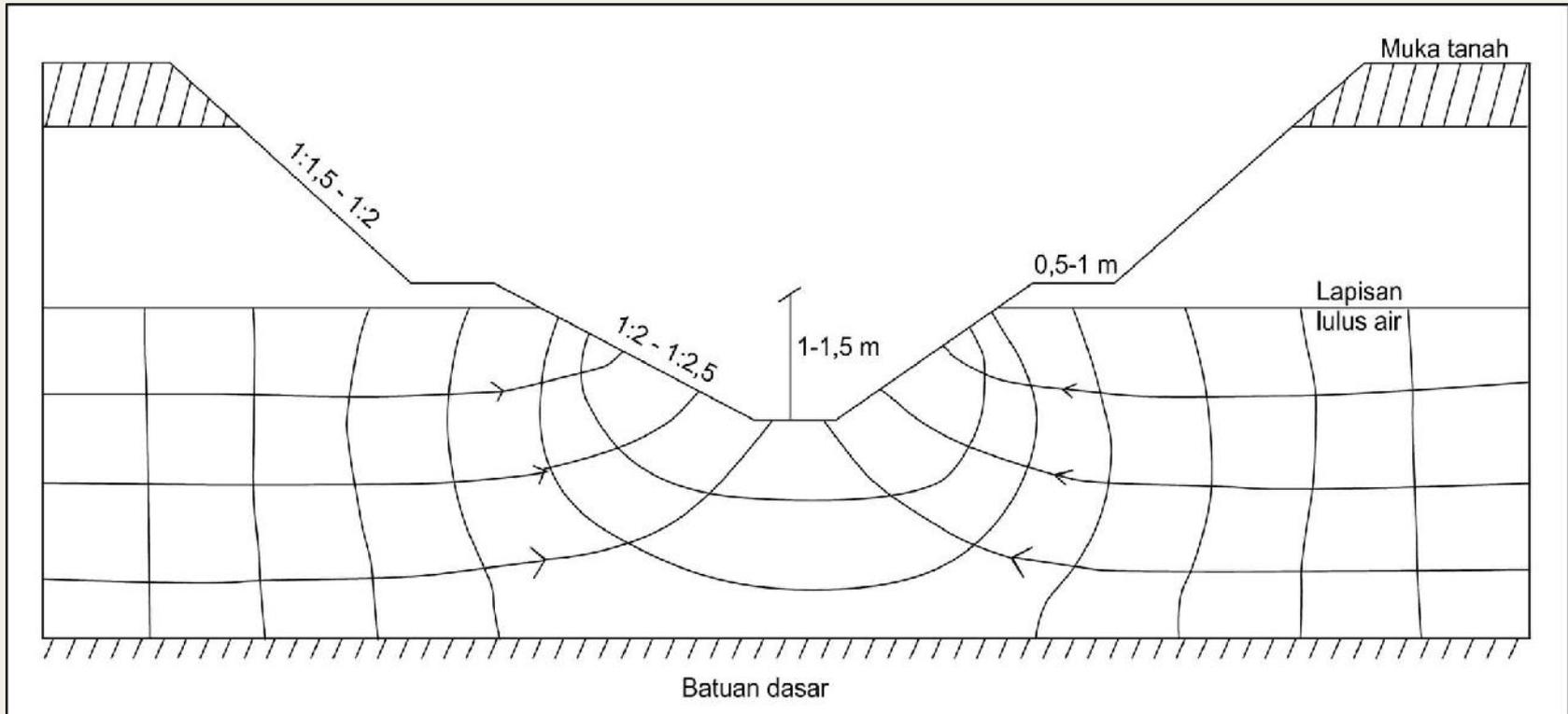


# LIANG PENGUMPUL

penurunan airtanah secara mendatar,  
menggunakan saluran terbuka yang  
memotong muka airtanah.

# Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan liang pengumpul :

- Permukaan basah dari liang pengumpul dibutuhkan untuk dapat meluluskan air dengan kecepatan yang rendah.  
Koefisien gesekan kecil menghindari terjadinya erosi pada dinding lulus air dari permukaan basahnya.
- Kedalaman permukaan basah lebih dari 1 – 1,5 m menjaga turunnya muka airtanah pada musim kemarau.
- Kelandaian dinding permukaan basah harus cukup kecil (1 : 2 – 1 : 2,5), tergantung dari material akuifer menjaga kestabilan lereng.
- Kelandaian dinding di atas muka airtanah maks., antara 1 : 1,5 – 1 : 2.
- Penampang melintang dibuat bertangga dan setengah meter di atas muka airtanah maks. dipotong mendatar untuk memudahkan pemeliharaan atau pembersihannya.



- Kedalaman permukaan basah lebih dari 1 - 1,5 m menjaga turunnya muka airtanah pada musim kemarau.
- Kelandaian dinding permukaan basah harus cukup kecil (1 : 2 - 1 : 2,5), tergantung dari material akuifer menjaga kestabilan lereng.
- Kelandaian dinding di atas muka airtanah maks., antara 1 : 1,5 - 1 : 2.

Penurunan airtanah dengan liang pengumpul. (Huisman, 1975)

- Umumnya, pembuatan liang pengumpul terletak di bawah deretan rembesan airtanah atau mata air atau dibuat sejajar dengan aliran sungai.
- Dibuat dengan posisi arah memanjang yang tegak lurus dengan arah aliran airtanah.
- Dapat menampung air dalam kapasitas yang cukup besar, tergantung luasnya akan tetapi hanya dapat dilakukan pada daerah dengan kedalaman muka airtanahnya 3 – 5 m.
- Dikarenakan terbuka di bagian atasnya dan berhubungan langsung dengan atmosfer maupun tanah di sekelilingnya memungkinkan terjadinya adanya pengotoran/pencemaran secara langsung maupun tidak langsung.
- Sebaiknya liang pengumpul dibuat di daerah yang jauh dari daerah industri, pemukiman yang padat.
- Baik diterapkan di pedesaan dengan memenuhi persyaratan pembuatannya.

- Telah diterapkan di daerah Klaten dikenal sebagai bak air.

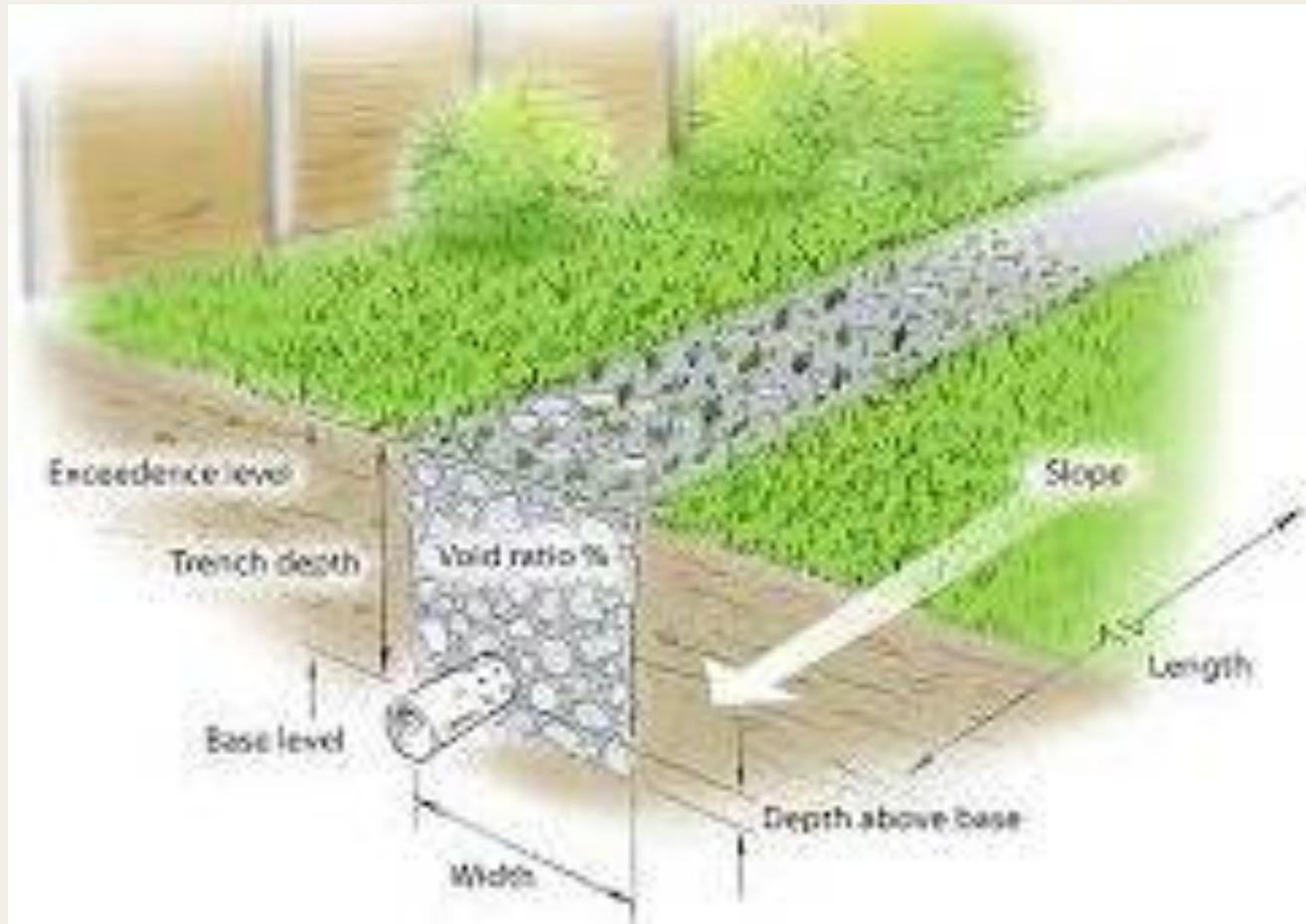
Daerah Trucuk, Wedi dengan lebar : 10 – 20 m, panjang : 30 – 100 m, sedangkan lebar di bagian dasar : 2 – 4 m.

- Nganjuk liang pengumpul ditambah dengan sejumlah bambu yang dimasukkan ke dalam tanah guna mendapatkan tambahan dari akuifer yang berada di bawah.

# Parit Pengumpul

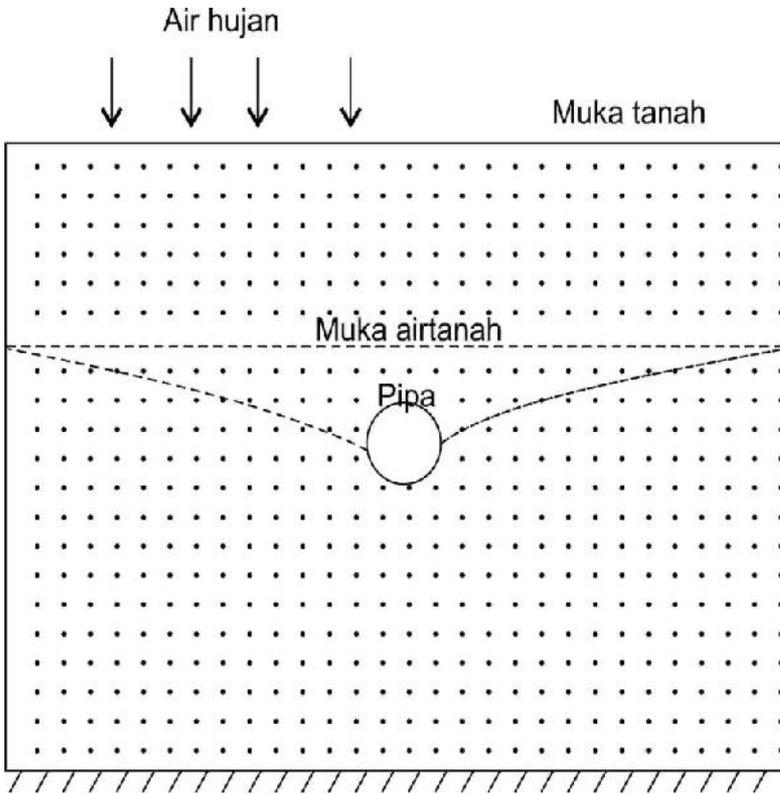
penurunan airtanah secara mendatar dengan sifat saluran yang tertutup dan dilakukan melalui saluran yang lulus air.

Parit pengumpul dibuat tegak lurus arah aliran airtanah atau sejajar aliran sungai bila letaknya di kanan kiri sungai.



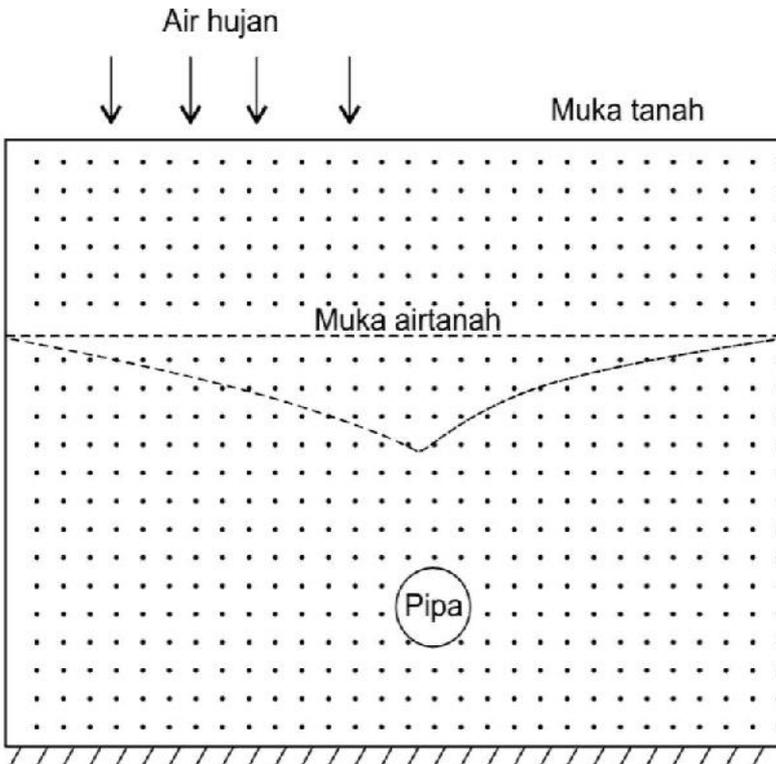
- Airtanah akan masuk ke dalam saluran melalui lubang/celah pipa saluran.
- Pipa saluran berlubang lubang dibuat dari beton halus/dari logam yang tahan karat.
- Bagian luar pipa dilapisi dengan material ber-ukuran pasir kasar.

# Penurunan di bagian atas akuifer



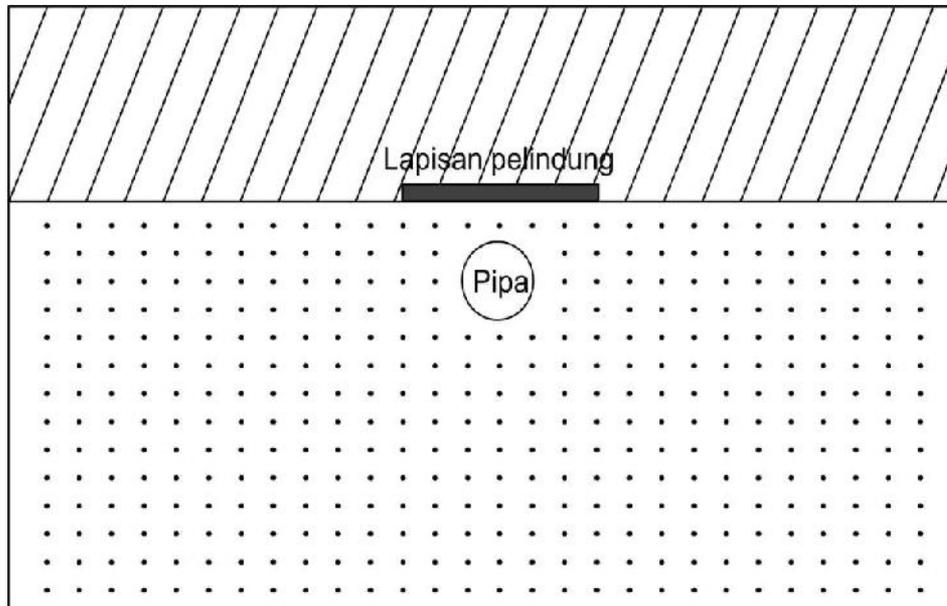
- Lubang cukup dibuat setengah lingkaran pada bagian bawah pipa, demikian sebaliknya.
- Pada akuifer berupa kerikil lubang pipa dibuat sesuai dengan ukuran material akuifer diharapkan dapat menahan material masuk ke dalam pipa.
- Pada akuifer yang berbutir halus – sedang pipa berpori (buatan pabrik, berukuran lubang halus). Apabila menggunakan pipa berlubang/bercelah buatan sendiri harus dilapisi satu/beberapa lapis kerikil pembalut (gravel pack).
- Kerikil pembalut berfungsi mencegah material halus masuk ke dalam pipa. Kerikil pembalut lapisan terluar hingga terdalam tersusun dari kerikil halus/pasir kasar yang bersih hingga kerikil kasar.

# Penurunan lebih dalam



- Diperoleh kualitas & kuantitas airtanah yang lebih baik.
- Melindungi dari kecepatan penyumbatan pipa saluran & kerikil pembalut dengan lebih baik.
- Penyumbatan akibat pengendapan hasil reaksi Fe, Mn dengan  $O_2$  menyebabkan penyerapan air hujan yang mengandung  $O_2$  semakin ke dalam semakin kecil.

# Pengurangan penyumbatan & pengotoran/pencemaran



- Mengurangi penyumbatan :  
memperdalam letak pipa saluran  
mengatur aliran airtanah di dalam pipa saluran.
- Memperkecil pengotoran/-pencemaran :  
membuat lapisan pelindung berupa
- Pemeliharaan dilengkapi dengan ruang pemeriksaan.

# Kelebihan/keuntungan

- Tidak menggunakan tempat yang luas & tertutup sehingga tanah di bagian atas dapat dipergunakan untuk keperluan lain.
- Kemungkinan pengotoran/pencemaran dari sekitarnya lebih kecil.

# Terowongan Pengumpul

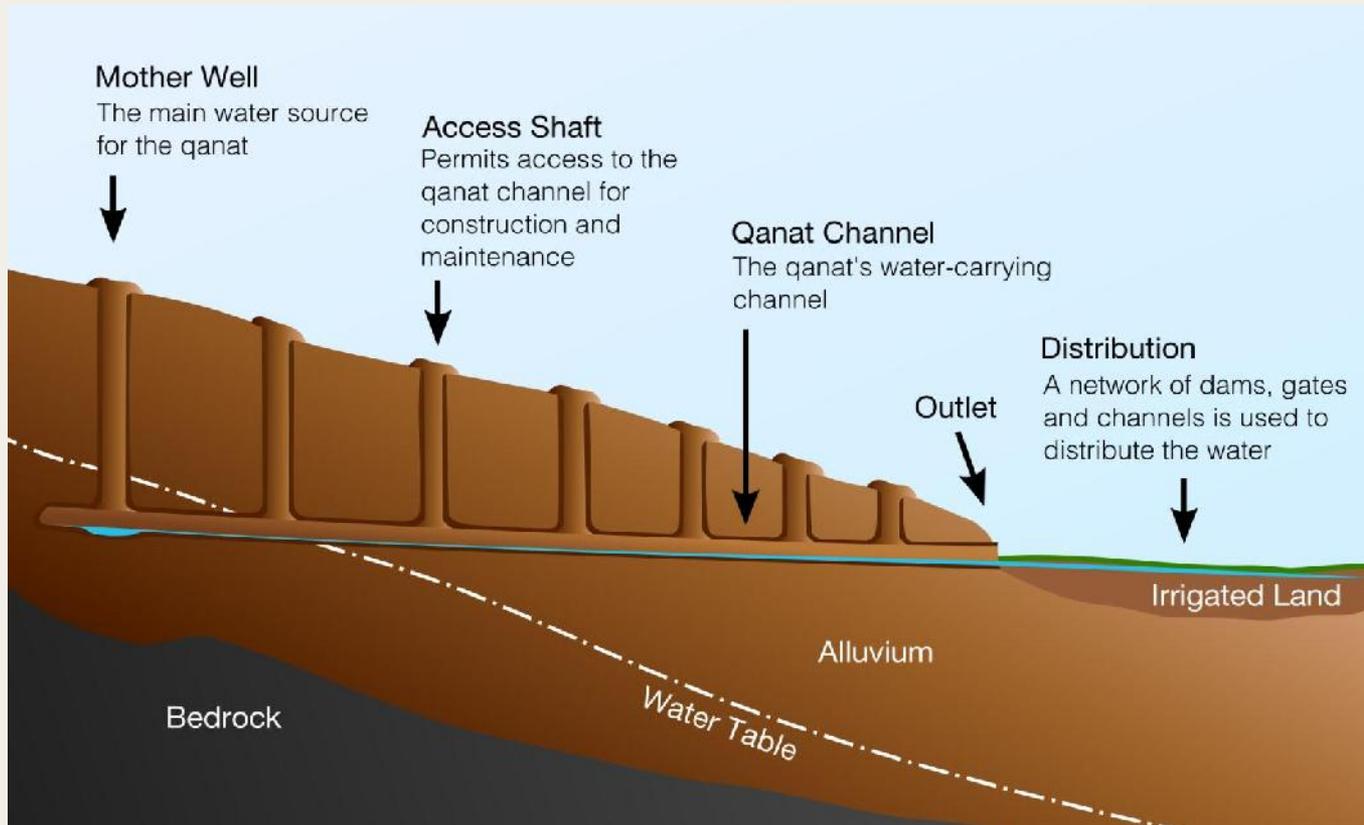
Diperlukan penyelidikan geohidrologi yang teliti guna menghindari kegagalan, baik yang disebabkan cara pembuatannya maupun hasil yang didapat.

- Baik diterapkan pada :
  - akuifer yang terbentuk oleh rekahan pada batuan beku/batu-gamping
  - endapan kipas aluvial di kaki perbukitan,
  - batuan vulkanik dikaki ataupun tubuh gunungapi yang tersusun dari batuan kompak dan keras
  - pulau-pulau kecil sehingga terhindar dari penyusupan air asin
- Terowongan pengumpul dibuat dengan kemiringan yang kecil menembus pada retakan batuan di bawah kedudukan muka airtanahnya.
- Runtuhnya dinding terowongan akibat retakan dihindari dengan penyangga dari baja, beton, maupun kayu.

- Di Indonesia terowongan pengumpul digunakan untuk memperbesar debit mataair yang muncul di kaki atau tubuh gunungapi.

Di daerah Malang, terowongan pengumpul dibuat menembus lava andesit yang banyak retakannya.

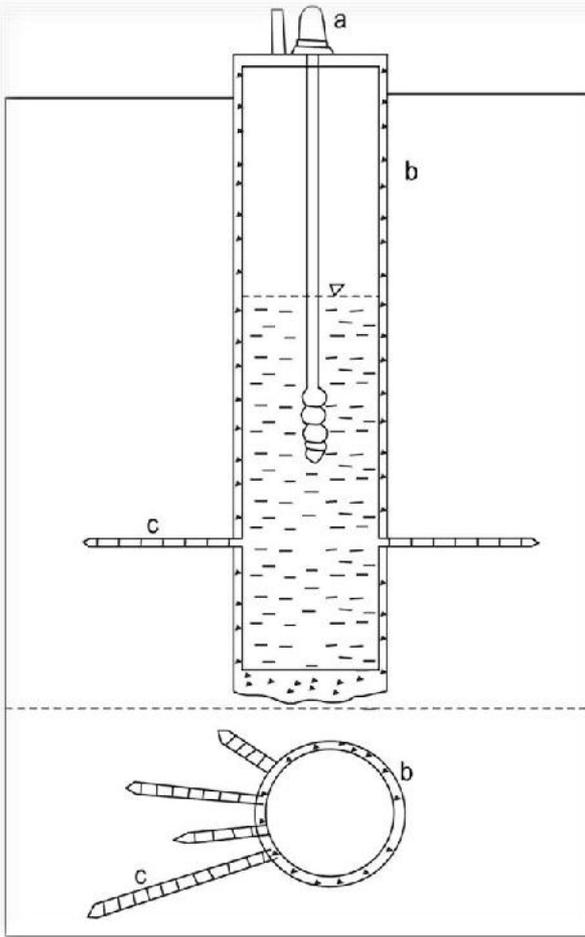
Di kaki Gunung Ciremai Cirebon, terowongan pengumpul menghasilkan air lebih dari 100 ltr/detik, dilengkapi dengan 8 buah terowongan tegak.



Di Timur Tengah, terowongan pengumpul dikenal dengan Khanat.

# Sumur Pengumpul

Terdiri dari sebuah sumur galiberukuran besar, pada bagian bawah ditembuskan sejumlah pipa saringan sepanjang beberapa meter sampai ratusan meter dengan arah mendatar, miring, dan ke segala arah.



Keterangan :

- a. Pompa selam
- b. Sumur gali dengan dinding beton
- c. Pipa saringan

- Pipa saringan, terletak relatif datar berfungsi sebagai penurap airtanah.
- Pipa saringan dapat dibuat bertingkat tidak hanya pada satu akuifer saja melainkan pada beberapa lapisan akuifer
- Sumur gali berfungsi sebagai penampung air yang berasal dari pipa saringan.

Baik diterapkan pada :

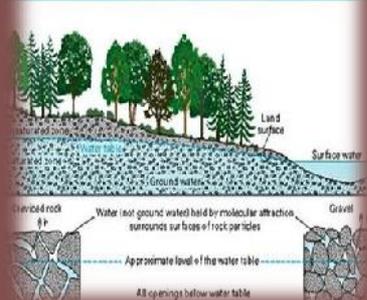
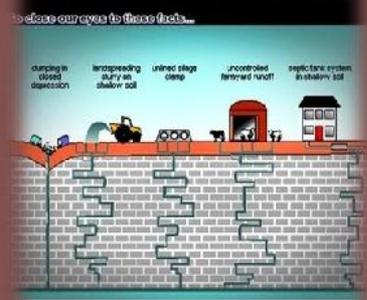
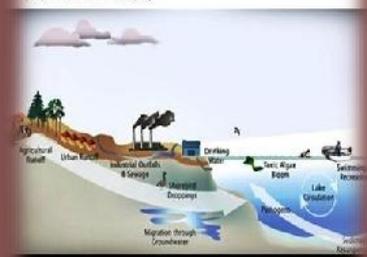
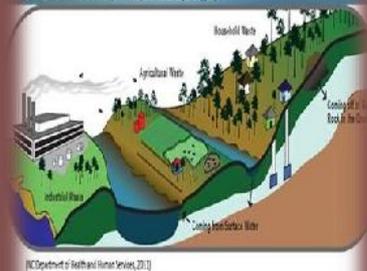
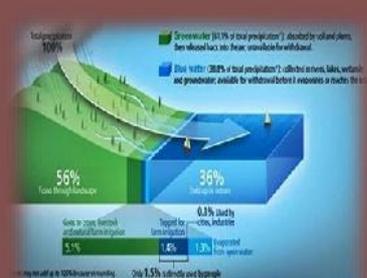
akuifer, tersusun oleh material lepas berukuran butir pasir – kerikil

akuifer yang tipis tetapi perlu diperhitungkan asal airtanah, nilai keterusan air, dsb

akuifer yang mengalami pengotoran bersumber dari air peresapan, dengan cara memperdalam pipa saringan sehingga pengotoran dari atas akan tersaring dulu oleh lapisan yang di atasnya

Manfaat :

menghindari penurunan muka airtanah lokal yang dalam sangat baik diterapkan pada penurunan airtanah yang mengapung di atas air asin



# Penurunan Airtanah Secara Tegak

Diterapkan pada kondisi airtanah dangkal maupun dalam.

Pada kondisi airtanah dalam diperlukan peralatan lebih kompleks, tenaga ahli, dan biaya lebih besar.

# Sumur Gali      Sumur Dangkal

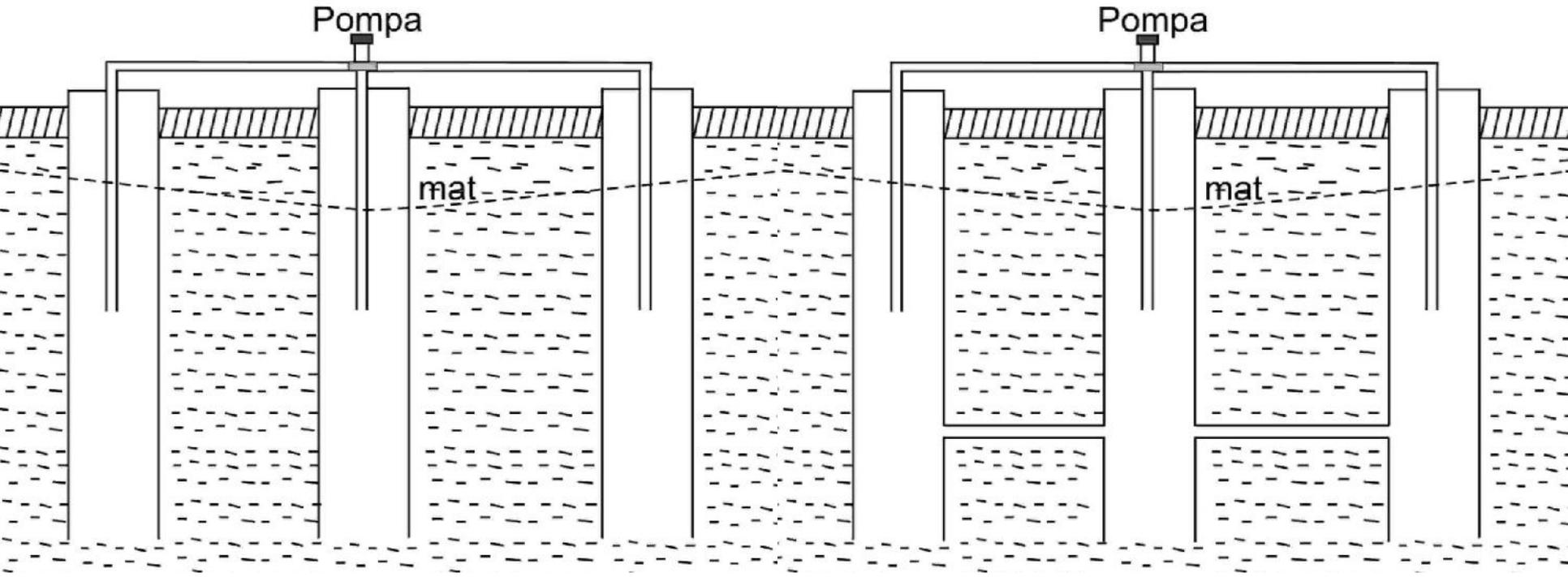
Cara yang paling populer di Indonesia

Akuifer yang diturap      akuifer dengan airtanah bebas

- Pembuatan sumur sebaiknya dilakukan pada akhir musim kemarau atau awal musim penghujan.
- Diterapkan dengan menggali tanah,  $D : \pm 1 \text{ m}$  dan kedalaman disesuaikan dengan kondisi setempat, umumnya kurang dari 20 meter.
- Kedalaman sumur harus di bawah kedudukan muka airtanah.
- Pada bagian dasar sumur terbuka, apabila memungkinkan dinding sumur di bagian bawah diberi lubang airtanah yang masuk dalam sumur akan semakin besar.
- Pembuatan sumur pada lapisan batuan mudah runtuh harus dibuatkan dinding (pasangan batubata, beton buis, ataupun anyaman bambu).

- Penerapan sumur gali pada akuifer sangat dangkal kurang baik airtanah mudah mengalami pengotoran/pencemaran.
- Sumur gali dibuat jauh dari sumber pengotoran/pencemaran dan pada bagian mulut sumur ditutup.

# Sumur Gali Ganda



- Dibuat berderet tegak lurus arah aliran airtanah atau sejajar arah aliran sungai apabila terletak di dekat sungai.
- Masing-masing dihubungkan dengan pipa saringan berfungsi sebagai jalan masuk airtanah ke dalam sumur & menyetimbangkan muka airtanah di setiap sumur gali.

# Sumur Dalam

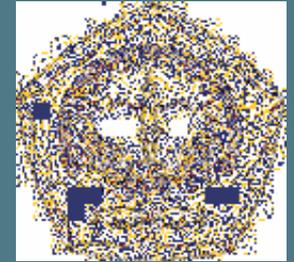
Tujuan penurapan airtanah dalam jumlah yang cukup besar dari akuifer yang letaknya dalam, terutama untuk akuifer tertekan, setengah tertekan.

Penerapan :

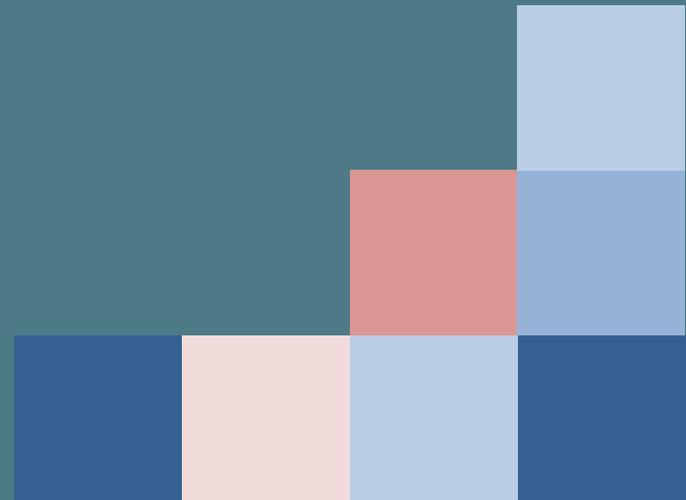
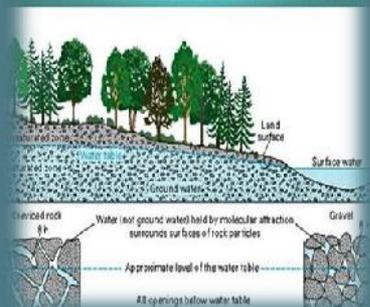
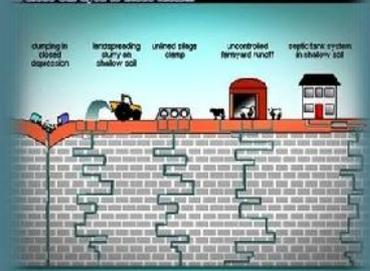
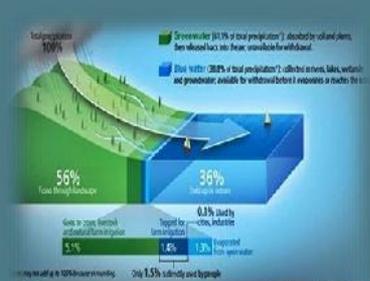
- pemboran memerlukan keahlian dengan peralatan yang memadai & biaya cukup besar.
- perlu dilakukan penyelidikan yang teliti & memperhitungkan dampaknya pada saat ini maupun masa mendatang.

Hasil penyelidikan digunakan dalam penentuan cara pemboran, konstruksi, dsb.

TERIMAKASIH



# BAB X PENGOTORAN & PENYEHATAN AIR TANAH



# Pengotoran Airtanah

Apa saja penyebab pengotoran airtanah?

Polusi/Kontaminasi/Infeksi

Istilah polusi dan kontaminasi kerap kali digunakan satu terhadap lainnya dalam bidang lingkungan terkait penjelasan mengenai suatu substansi pada konsentrasi yang cukup membahayakan bagi kehidupan manusia, binatang ataupun tumbuhan.

# Polusi

Masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, dan atau komponen lain ke dalam lingkungan, atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam sehingga kualitas lingkungan turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya. (Undang-undang Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup No. 4 Tahun 1982)

# Kontaminasi

Kejadian atau proses masuknya atau terikutnya unsur-unsur lain yang tidak dikehendaki (karena merugikan) ke dalam objek yang diperhatikan.

# Polusi

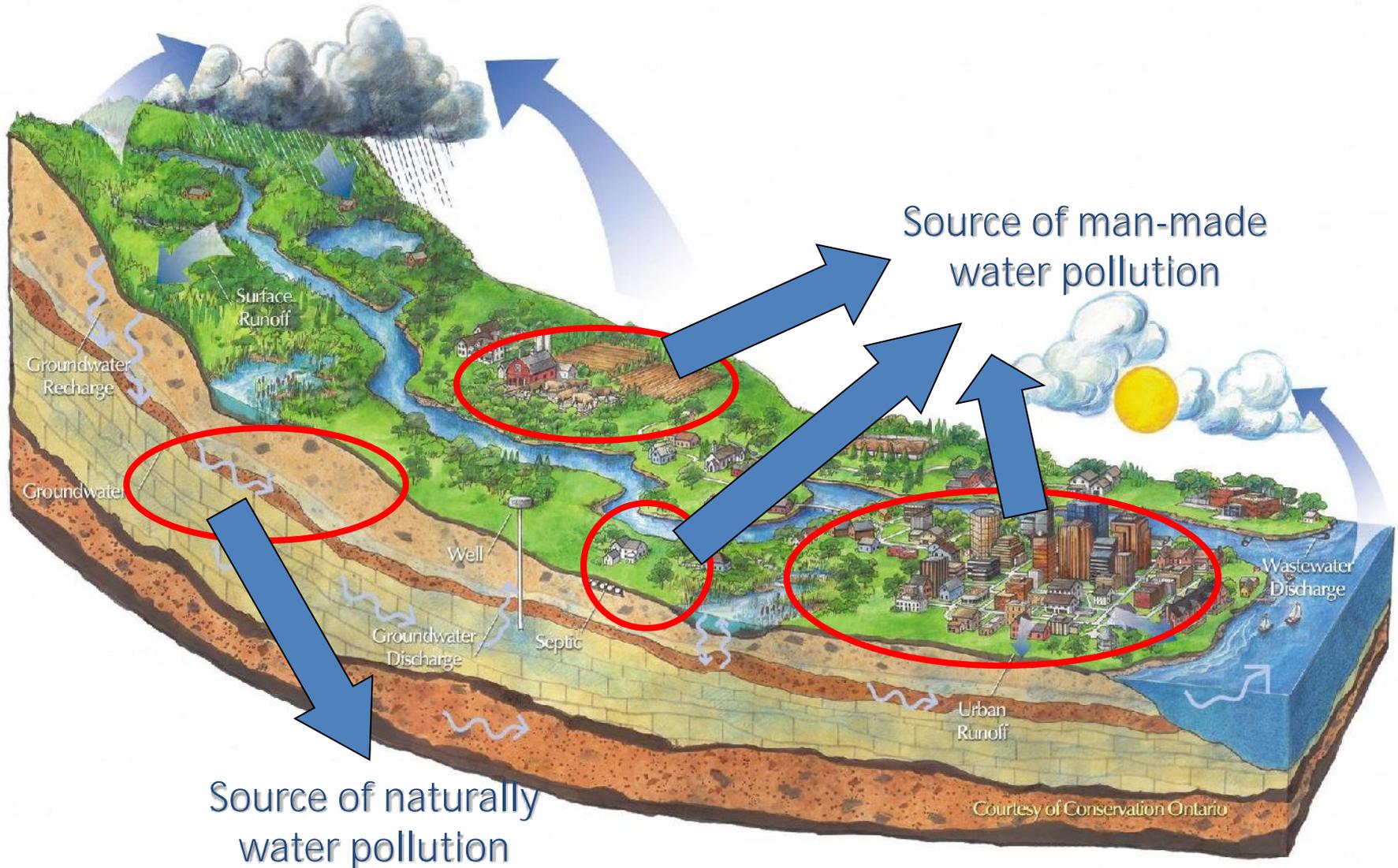
## Alami

- Litologi penyusun permukaan ataupun bawah permukaan bumi.

## Aktivitas Manusia

- Segala aktivitas manusia dan limbah yang dihasilkan.

# Polusi oleh Faktor Alami dan Aktivitas Manusia



# Aktivitas Manusia

- Pemicu : agrikultur/pertanian, pemukiman perkotaan, dan industri meningkat secara cepat.
- Kontaminasi airtanah oleh material kimia berasal dari aktivitas pemukiman perkotaan dan industri, pertanian modern maupun pembuangan limbah.
- Terjadi oleh adanya aktivitas tidak tepat atau tidak terkontrol pada permukaan dan oleh adanya perubahan fungsi lahan.

Rupture of underground tanks holding a chemical denser than water

Rupture of surface tanks holding a chemical less dense than water

Concentrated chemical sits on top of water table

water table

Groundwater Flow

Impermeable layer blocks downward flow

Concentrated chemical moves along base of saturated zone

Dilute chemical moves with ground water flow

Vapor phase migrates through saturated zone

# Polusi pada Air Permukaan & Airtanah, Sumber : Aktivitas Pedesaan – Perkotaan (Doni Prakasa E.P., 2012)



CENV0590



CENV0273



CENV0084



CENV0099

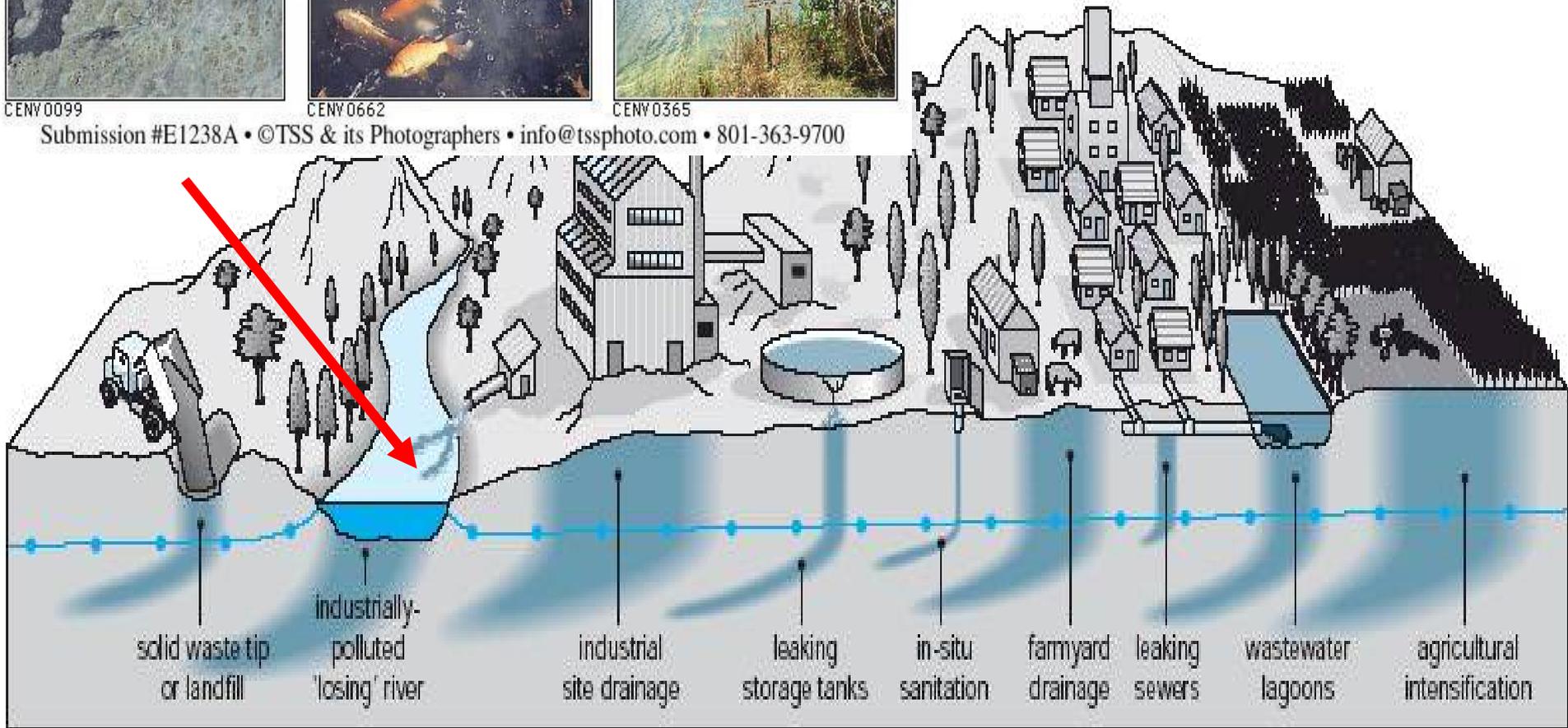


CENV0662

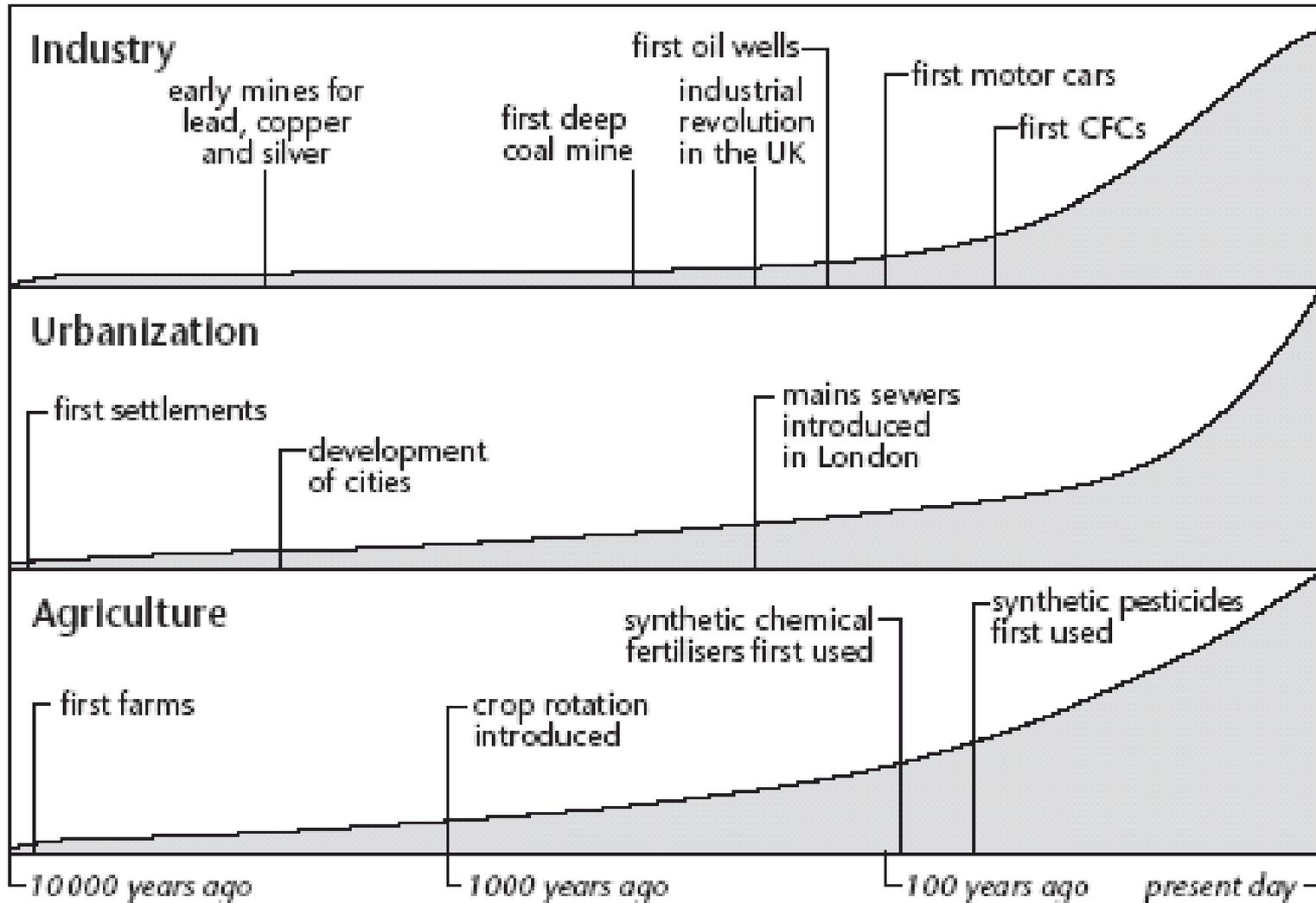


CENV0365

Submission #E1238A • ©TSS & its Photographers • info@tssphoto.com • 801-363-9700



# Aktivitas Major Manusia & Perkembangannya Seiring Waktu



# Faktor Pengotoran Airtanah

# FISIKA

## warna, bau & rasa, kekeruhan, dan suhu

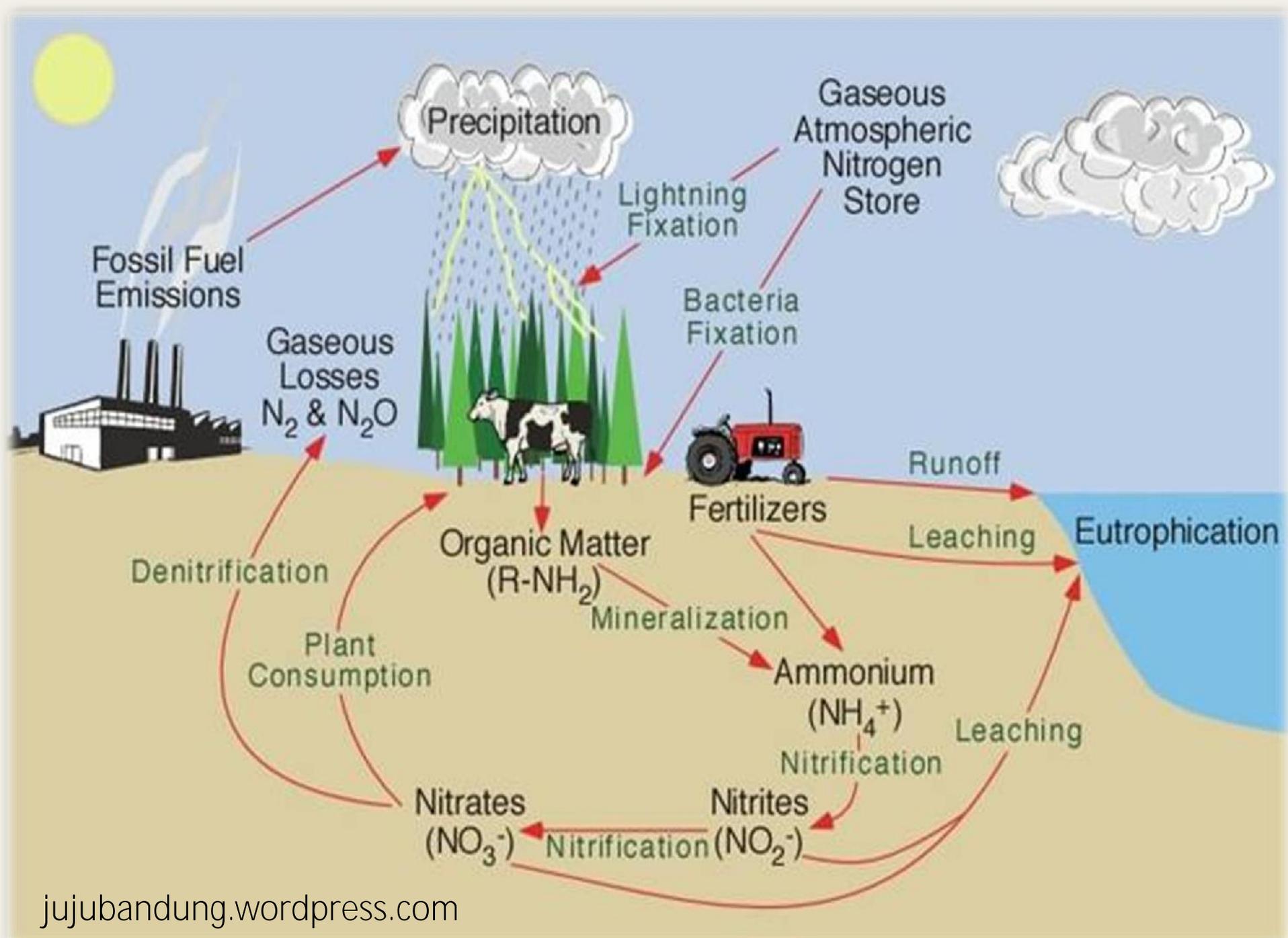
- Warna pada airtanah      kadar oksigen.  
Warna diakibatkan adanya material/mineral pada airtanah berupa suspensi maupun terlarut.
- Bau & rasa disebabkan oleh zat maupun gas terlarut, bakteri, mineral besi atau sulfur.  
Bau & rasa disebabkan oleh sistem distribusi pipa besi yang bereaksi dengan airtanah      tumbuhnya bakteri besi (*crenothryx*).
- Kekeruhan disebabkan oleh material suspensi atau koloid (lempung, lanau), mikroorganisme atau reaksi kimia dari sistem distribusi perpipaan.
- Suhu mempengaruhi berat jenis, kekentalan, dsb.

# Kimia

## ion, kegaraman, keasaman, dan daya hantar listrik

Pengotoran oleh ion nitrat, banyak dijumpai pada bakteri siklus nitrogen sebagai fase oksidasi.

- Nitrat petunjuk adanya material organik dalam airtanah.
- Nitrogen pada tanah aerobik ammonium terjadi nitrifikasi nitrat, menunjukkan tanah kaya bakteri, terutama *nitrobacteriaceae*.



# Kimia

## ion, kegaraman, keasaman, dan daya hantar listrik

Pengotoran garam : kalsium karbonat, magnesium bikarbonat, sodium sulfat, dan sodium klorida.

- Kalsium karbonat & magnesium bikarbonat airtanah bersifat alkalis & keras.
- Sodium sulfat airtanah beruap & berbuih.
- Sodium klorida airtanah mempunyai rasa.
- Garam besi & mangan airtanah berwarna, korosif, keras & mempunyai rasa.
- Garam yang berasal dari tumbuh-tumbuhan airtanah berwarna & asam.

# Biologi (Bakteriologi)

- Pengotoran oleh bakteri coliform (E-coli)      tanda adanya hubungan dengan manusia ataupun hewan. S
- Pengotoran oleh bakteri crenothryx      pelarutan mineral besi dari sistem perpipaan.
- Pengotoran oleh algae & Protozoa.

# Biologi (Bakteriologi)

- Pengotoran oleh bakteri coliform (E-coli)      tanda adanya hubungan dengan manusia ataupun hewan.
- Pengotoran oleh bakteri crenothryx      pelarutan mineral besi dari sistem perpipaan.
- Pengotoran oleh algae & Protozoa.

Macam pengotoran & luas wilayah pengotoran tergantung pada :

- Kondisi geohidrologi
  - Sifat pengotor
- Berhasil tidaknya pengaturan atau pencegahan pengotoran yang telah dilakukan.

- Dispersi atau penghamburan dari faktor-faktor penyebab penurunan kadar kualitas airtanah.
- Kebocoran dari sistem buangan kotoran.
- Kebocoran dari tempat pembuangan akhir.
- Kebocoran dari bak penampungan licit.
- Kebocoran pipa penyaluran.
- Kebocoran dari instalasi nuklir.
- Kotoran air selokan & endapan lumpur.
- Pertanian penggunaan pupuk ataupun penyemprotan pestisida.
- Pertambangan.
- Pengotoran aliran/tubuh air permukaan.
- Penyusupan air asin.
- Laguna dan daerah evaporasi.
- Makam dan sebagainya.

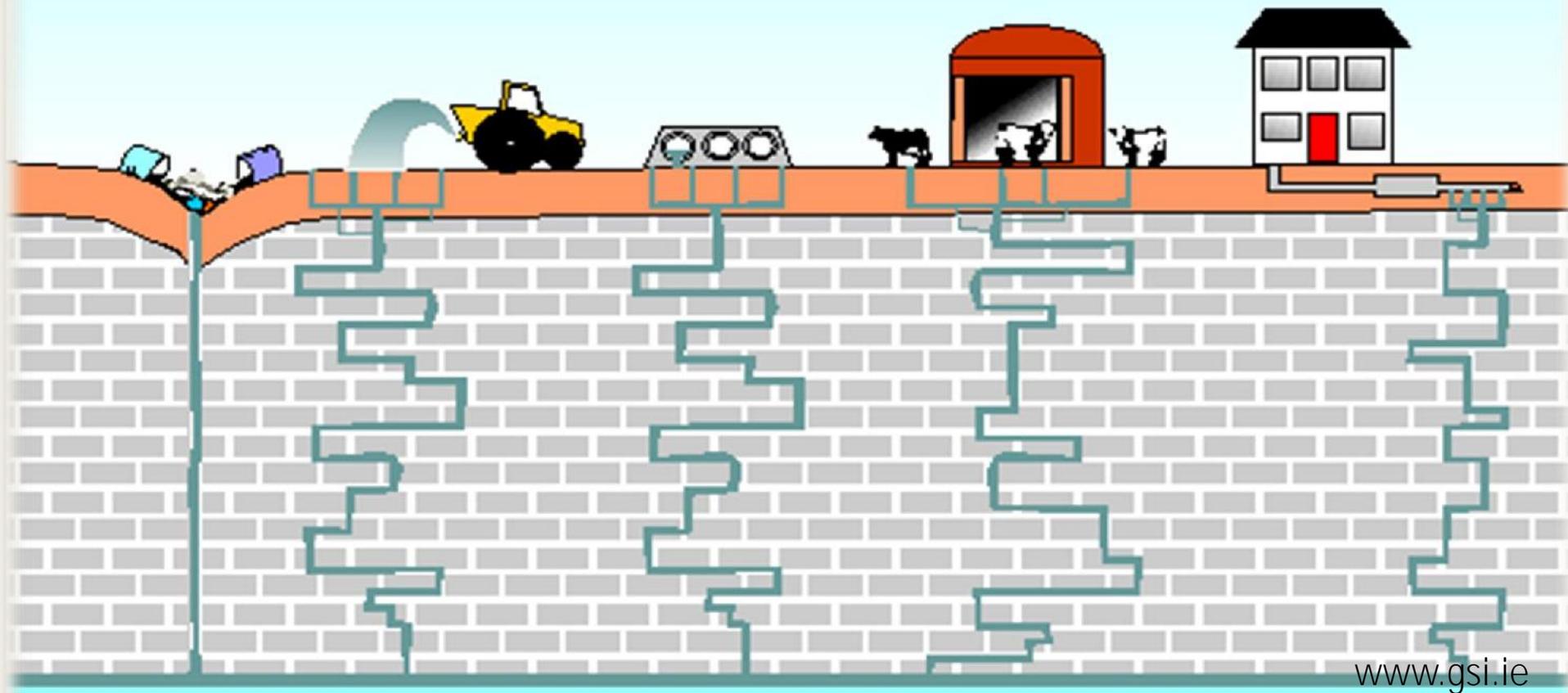
dumping in  
closed  
depression

landspreading  
slurry on  
shallow soil

unlined silage  
clamp

uncontrolled  
farmyard runoff

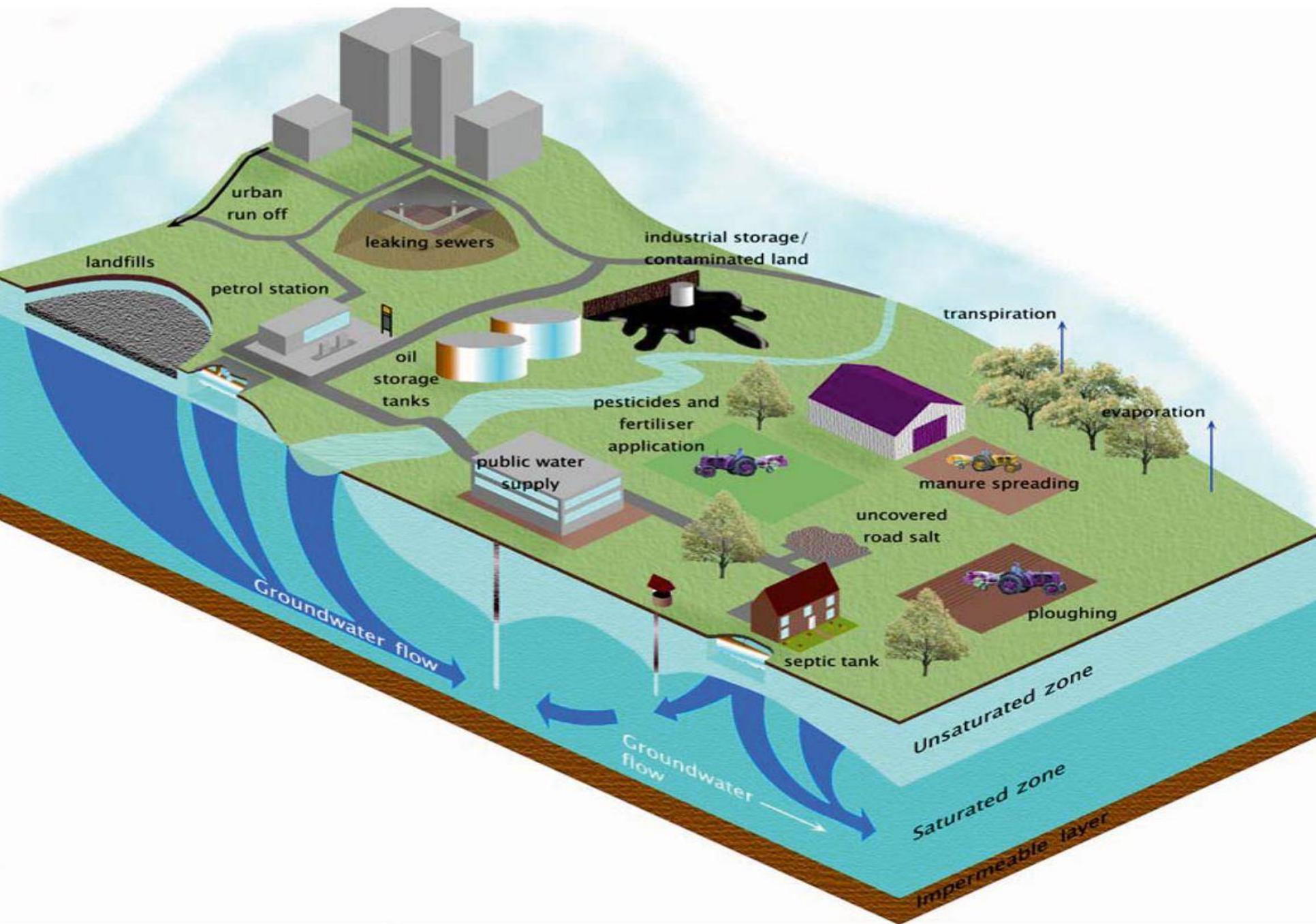
septic tank system  
in shallow soil

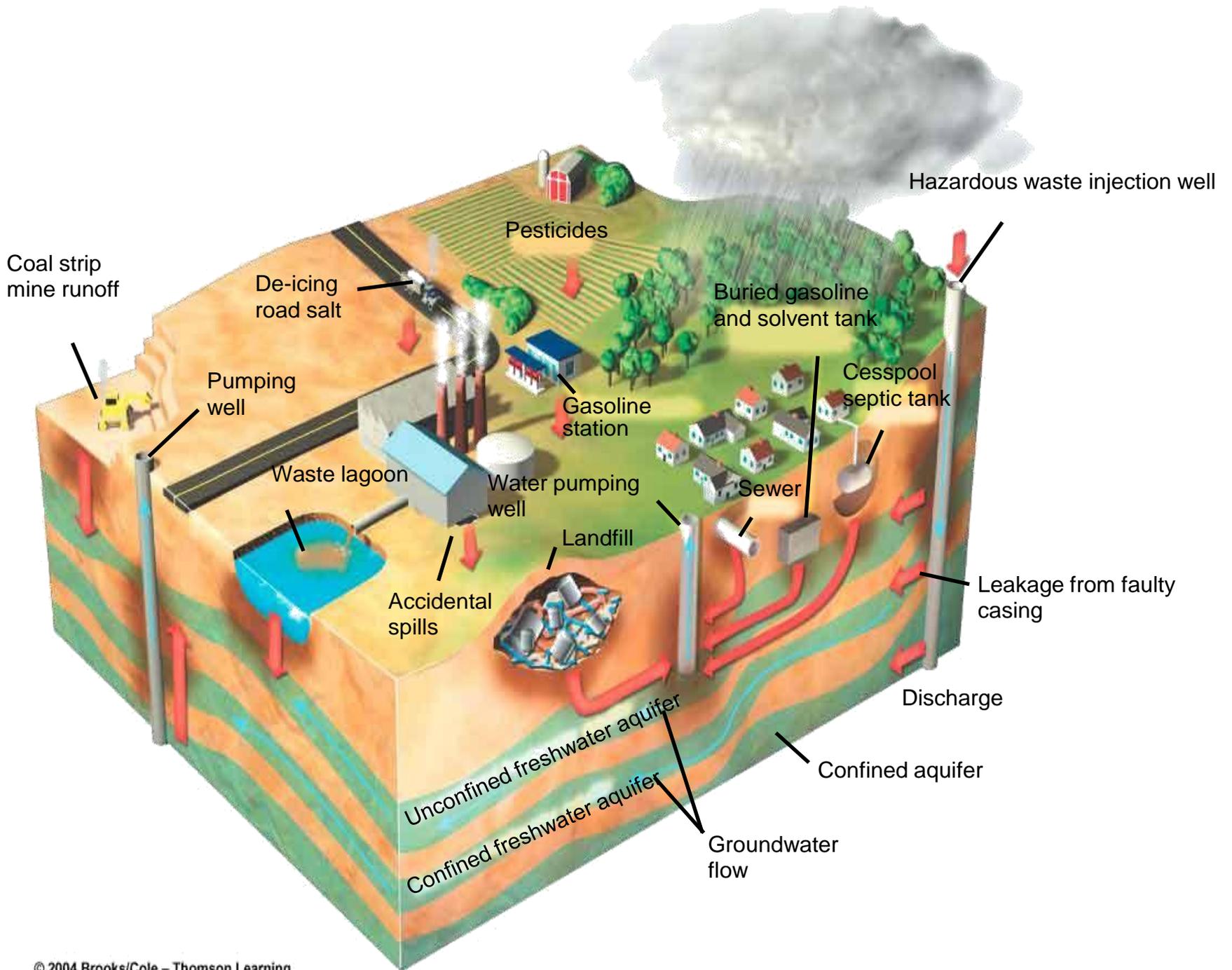


www.gsi.ie

Apabila pengotor masuk di daerah pengisian dengan jumlah sangat besar luas wilayah pengotoran akan sangat luas sesuai dengan aliran airtanah.

Apabila daerah tersebut tersusun oleh material kasar atau bercelah mempercepat dan memperluas wilayah pengotoran.

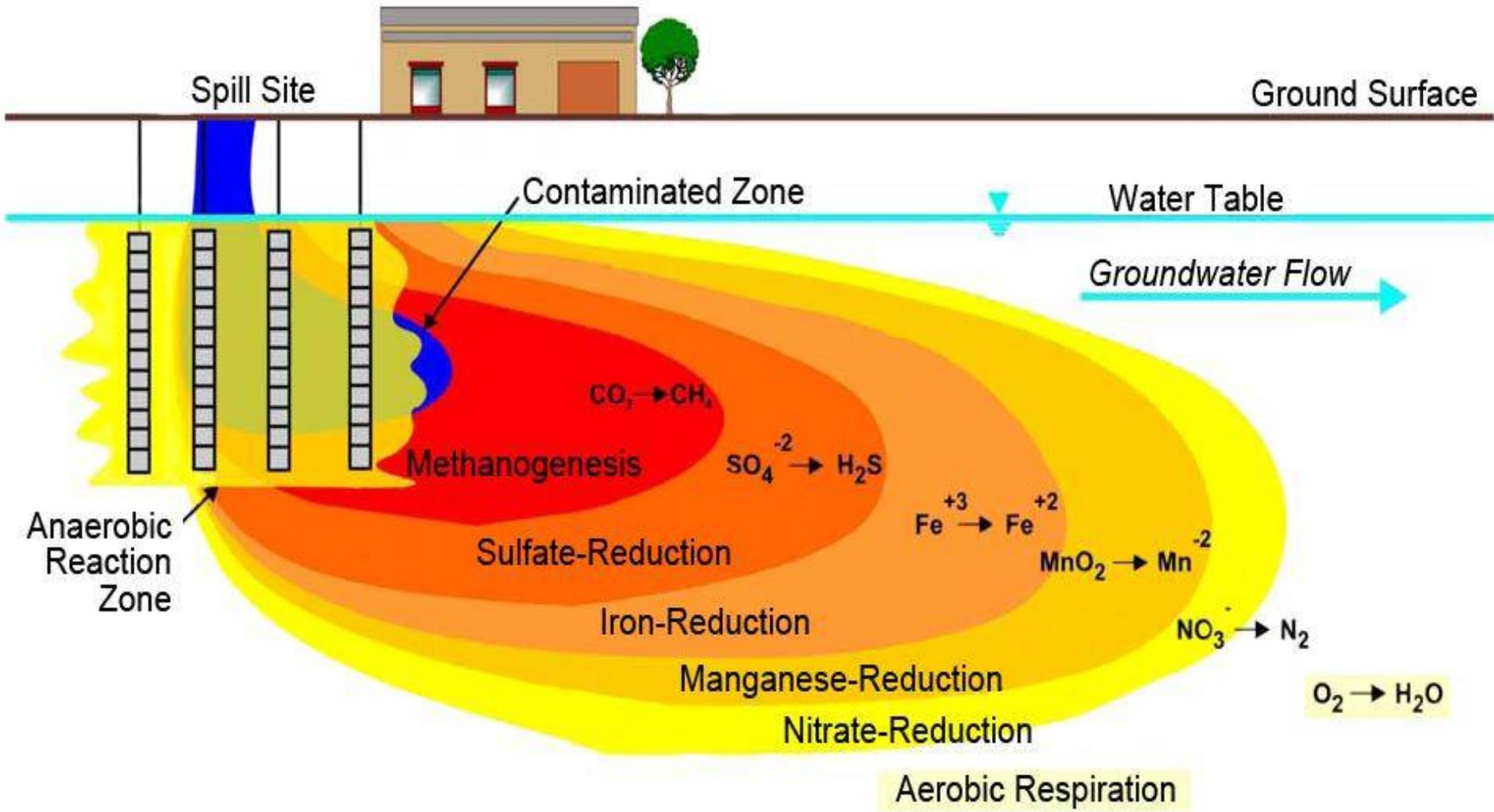




# Dispersi atau penghamburan dari faktor-faktor penyebab penurunan kadar kualitas airtanah

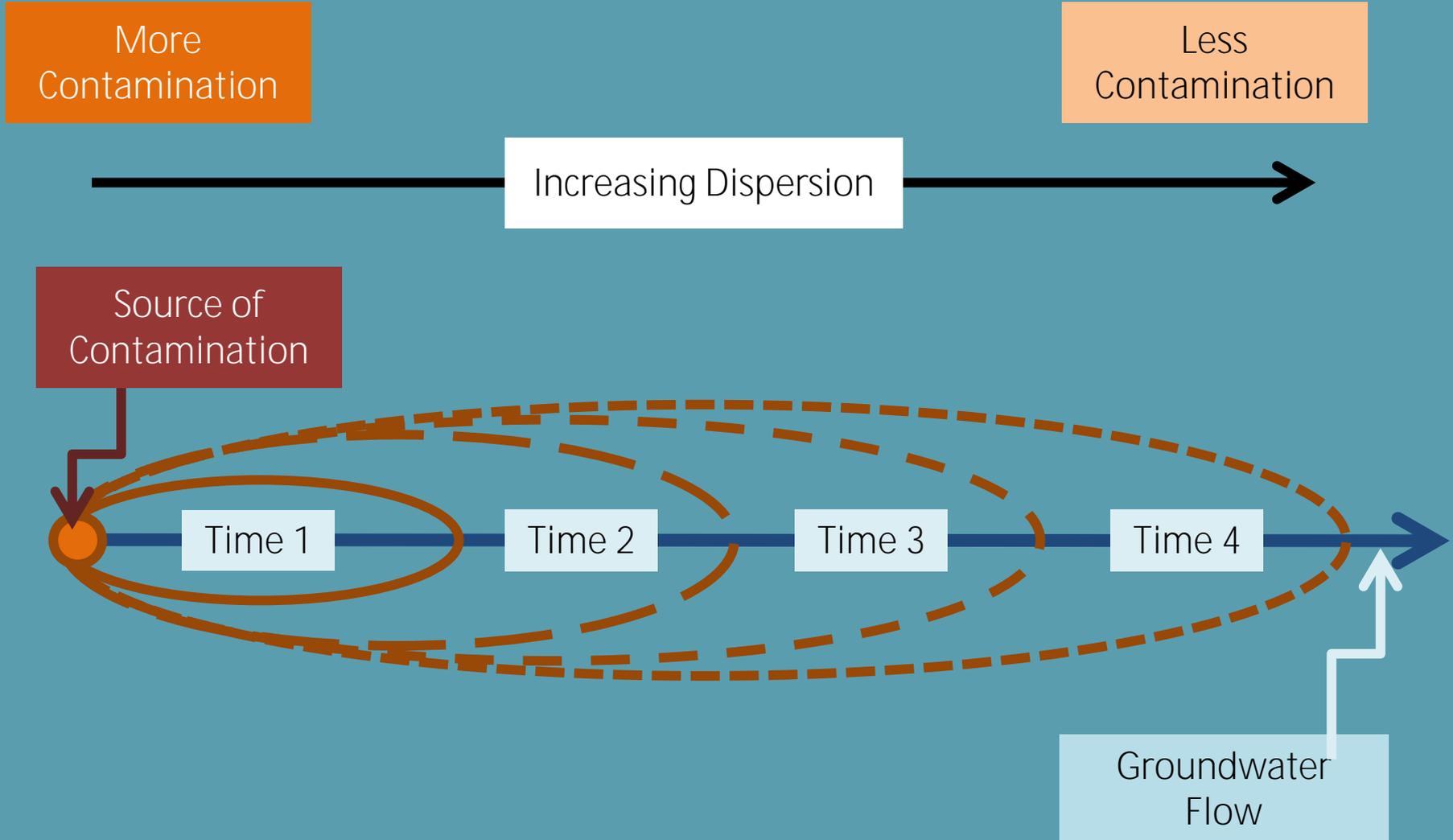
Apabila air berkualitas jelek bergerak menuju akuifer airtanah yang baik konsentrasi dari pengotor akan berkurang sesuai jarak yang ditempuh disebabkan adanya dispersi longitudinal maupun dispersi transversal yang menghasilkan *plume down gradient*.

Reaksi yang turut menurunkan kualitas airtanah : penyaringan material padat, masuknya mikroorganisme, pemecahan material kandungan organik oleh proses biologi, nitrifikasi ammonia, denitrifikasi nitrat, tumbuh-matinya bakteri, virus, pertukaran ion, presipitasi kandungan kimia yang terlarut dan penyaringan garam pada lapisan lempung yang padat.



# Konsep jenis migrasi *plume* seiring waktu

(Sumber : <http://www.epa.illinois.gov>)



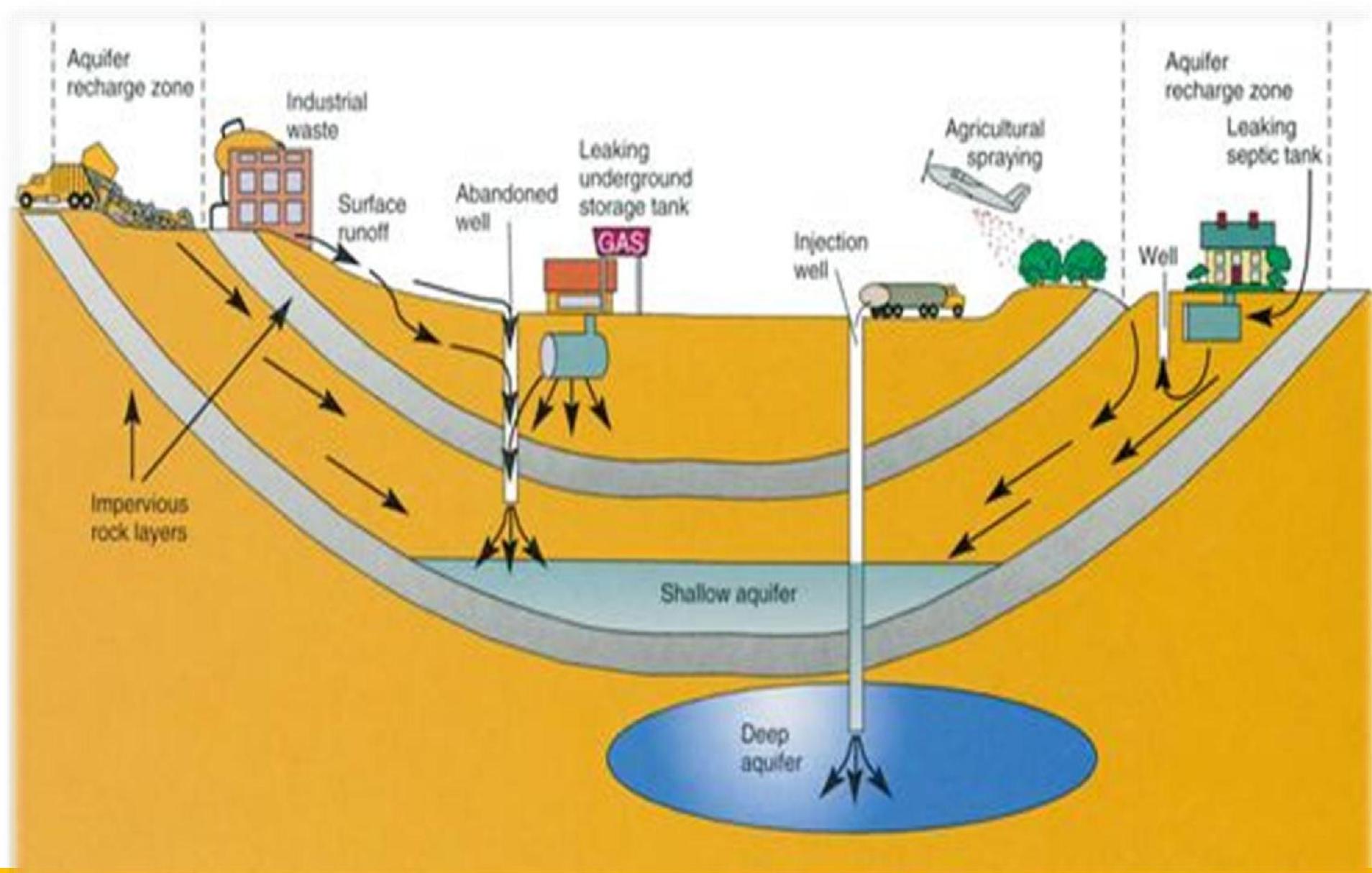
# Kebocoran dari penampungan kotoran/limbah cair

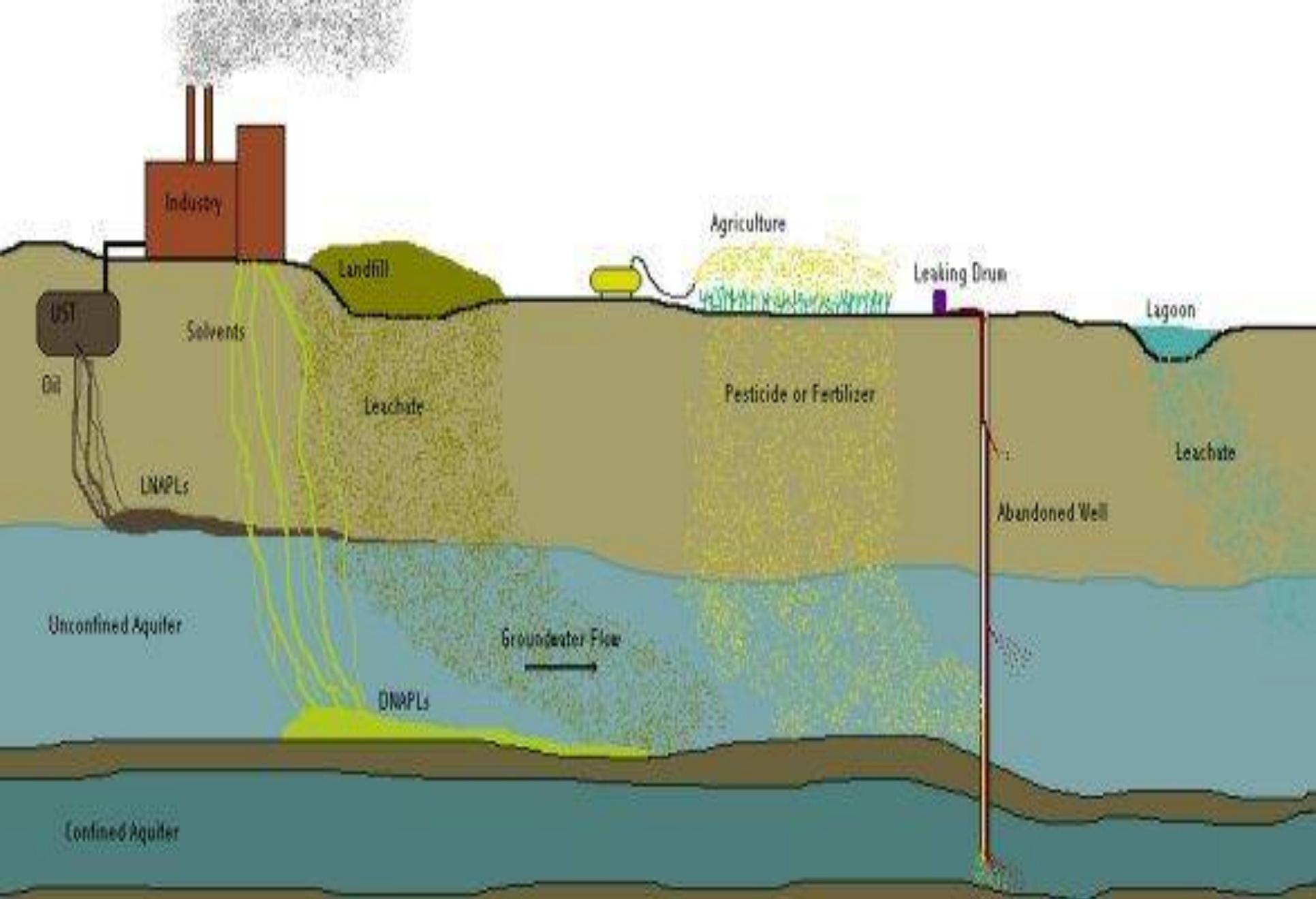
○ Kebocoran dari sistem buangan kotoran.

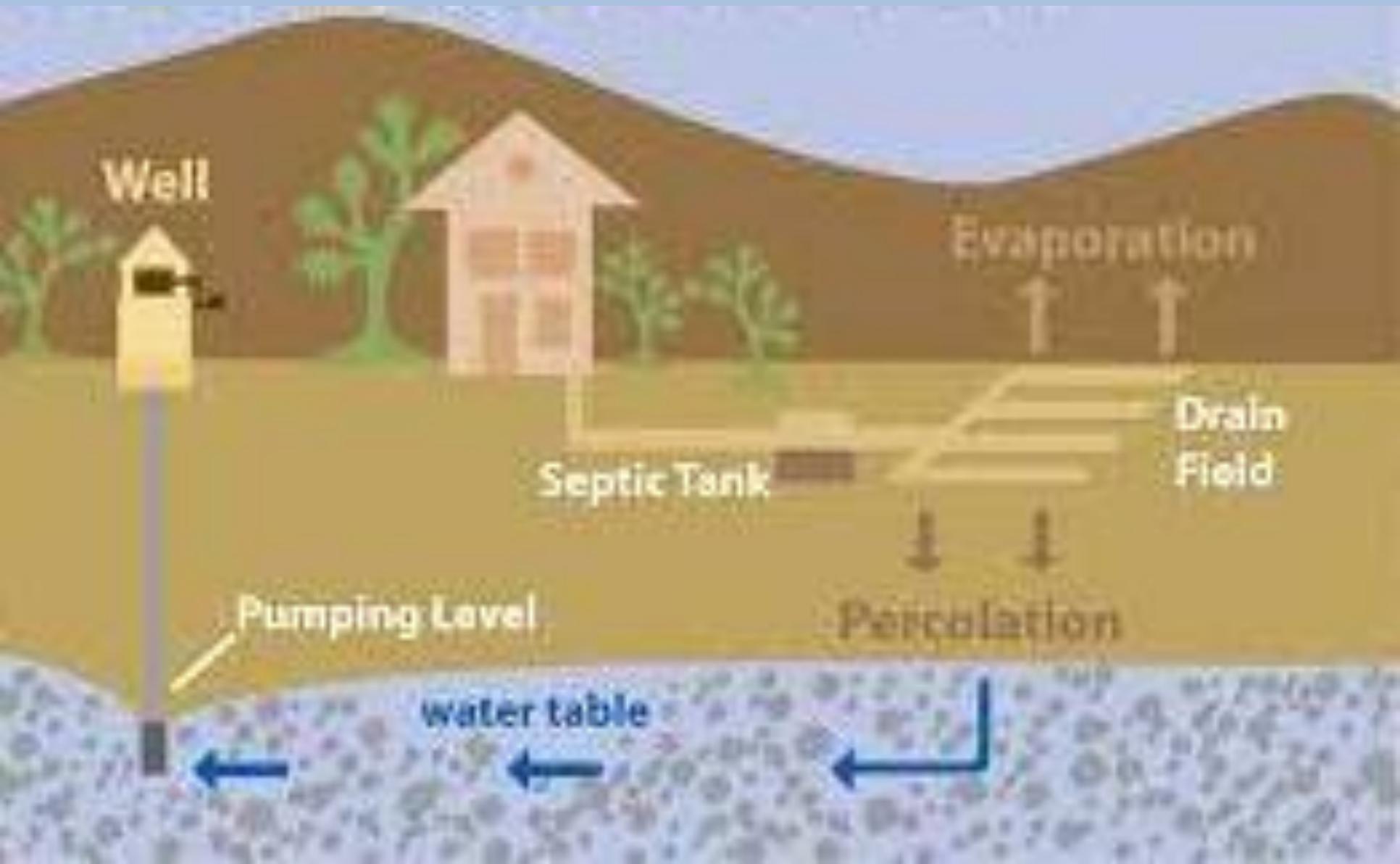
○ Kebocoran dari tempat pembuangan akhir.

○ Kebocoran dari bak penampungan licit.

- Tempat penampungan dalam tanah sumur injeksi pembuangan kotoran cair : zat-zat kimia, petrokimia, industri farmasi, dsb mempunyai kandungan material suspensi yang rendah untuk mencegah pengendapan.
- Penurunan kualitas airtanah : penambahan kandungan ion besi ataupun ion logam lainnya yang mudah bergerak/ masuk ke dalam formasi sumur.





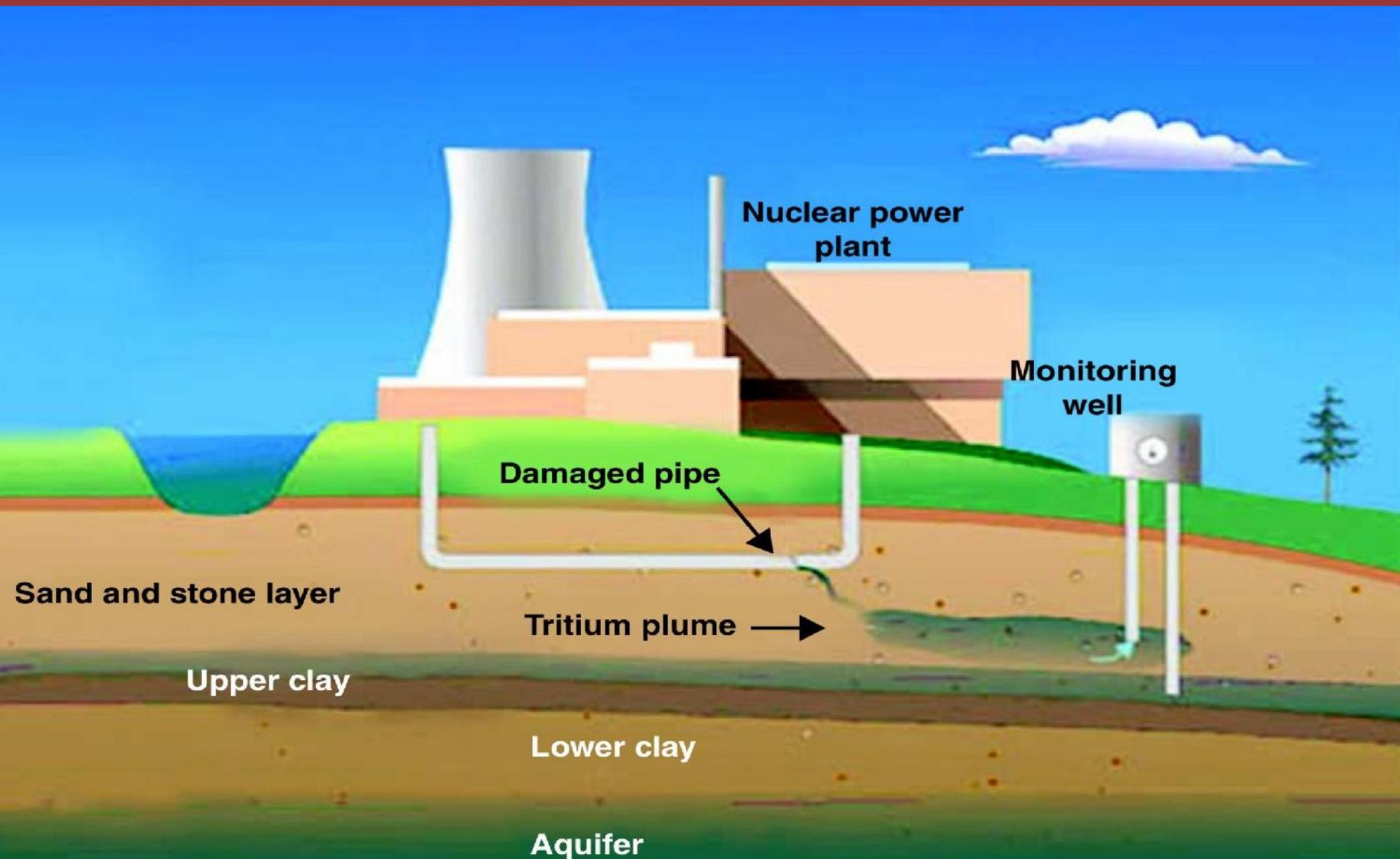


# Kebocoran pipa penyaluran

Bocornya pipa-pipa penyaluran minyak-gas bumi masuk ke dalam tanah menimbulkan rasa & bau, bersifat racun pada airtanah.



# Kebocoran pada instalasi nuklir



# Kotoran air selokan

- Air selokan air limbah berasal dari kakus, tempat sampah, industri, dsb memiliki kualitas beragam tergantung dari banyak-sedikit pengotor.
- Air limbah industri mengandung material logam & zat-zat kimia masuk ke dalam tanah karena bocornya saluran atau sebagai rembesan seiring pertambahan kedalaman kandungan pengotor akan berkurang (telah bergerak 1 – 2 meter).
- Pengotoran air selokan oleh nitrogen organik atau ammonium.

# Kotoran air selokan

- Air selokan berasal dari rumah tangga masuk ke dalam tanah, berperan penyehatan pertama.

Apabila tanah jenuh dengan air limbah rumah tangga pencemaran lingkungan, khususnya airtanah.

Pengotoran dari kakus menambah konsentrasi nitrat, klorida, bakteri E-coli dan material padat.

# Kotoran endapan lumpur

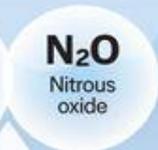
- Endapan lumpur berasal dari material organik mempunyai sifat tidak mau bereaksi dengan ion-ion logam dan bahan makanan dari tumbuh-tumbuhan.
- Endapan lumpur yang kering mengandung nitrogen kaya *nitrobakteriaceae*, memicu pembentukan nitrat mengakibatkan pencemaran airtanah.

# Pertanian

- Pengotoran penggunaan pupuk maupun pestisida meresap masuk ke dalam tanah infiltrasi air hujan atau pengairan akan bergerak masuk ke dalam airtanah.
- Di Indonesia, pengotoran pestisida dalam airtanah masih relatif kecil, tetapi perlu untuk diperhatikan pada pengotoran air permukaan.
- Pengotoran dari daerah pertanian terutama nitrat maupun ammonium.

# The Nitrogen Cycle

When it comes to agriculture, the primary sources of nitrogen in the soil are atmospheric nitrogen ( $N_2$ ) and fertilizer, created when manufacturers convert  $N_2$  into ammonium ( $NH_4^+$ ) and nitrate ( $NO_3^-$ ).



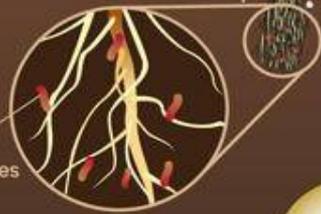
Fertilizer

## Runoff

Excess nitrate moves with rain and irrigation into surface waters, resulting in oxygen-starved dead zones.



Plant microbes



## Nitrogen Fixation

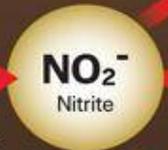
Microbes on the roots of some plants convert atmospheric nitrogen into  $NH_4^+$ .



Soil microbes

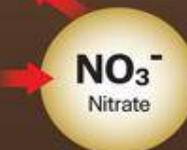
## Nitrification

Soil microbes and decomposition help release ammonium from soil organic matter, or the layers of biomass under the surface soil, transforming it into nitrite and then nitrate.



## Dentrification

Some nitrite and nitrate are released back into the atmosphere as  $N_2$  or the potent greenhouse gas nitrous oxide ( $N_2O$ ).

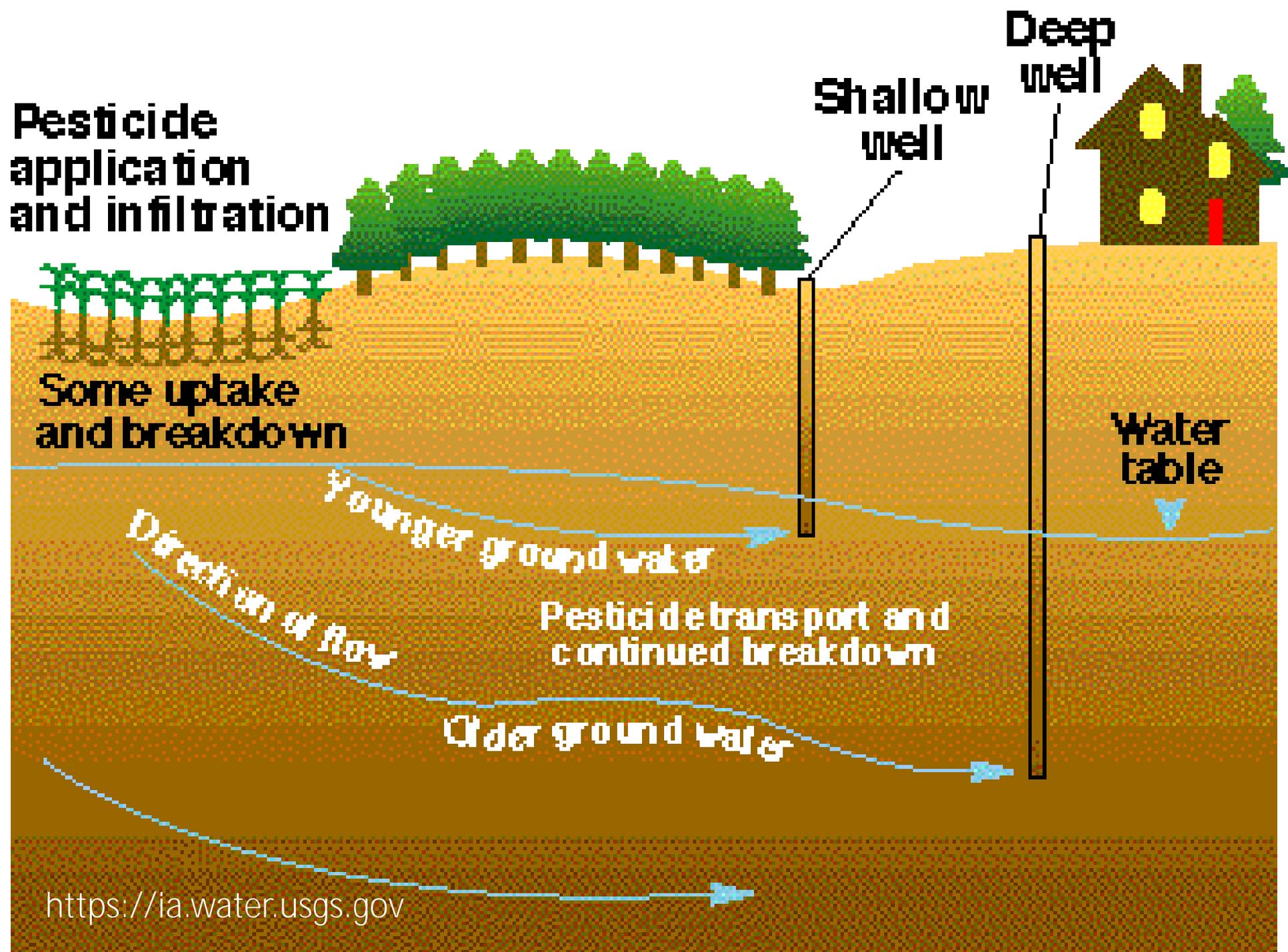


## Leaching

And some nitrite and nitrate pollute groundwater used for drinking.

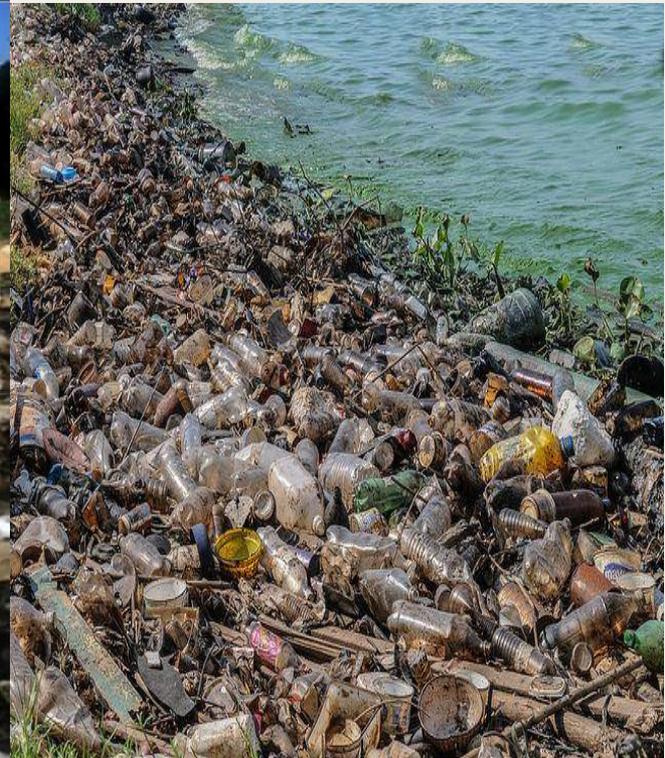
Surface water

Groundwater



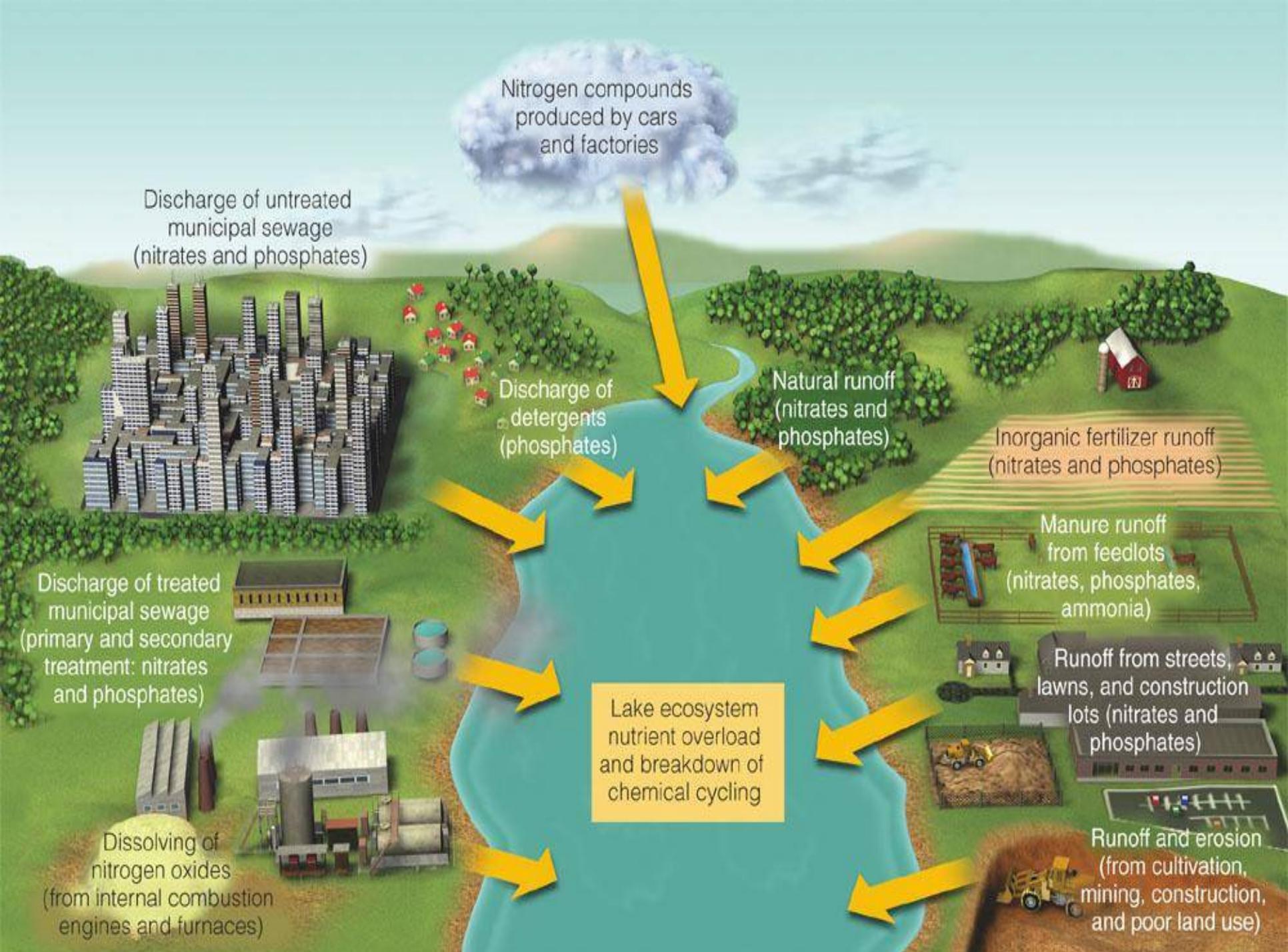
# Pertambangan

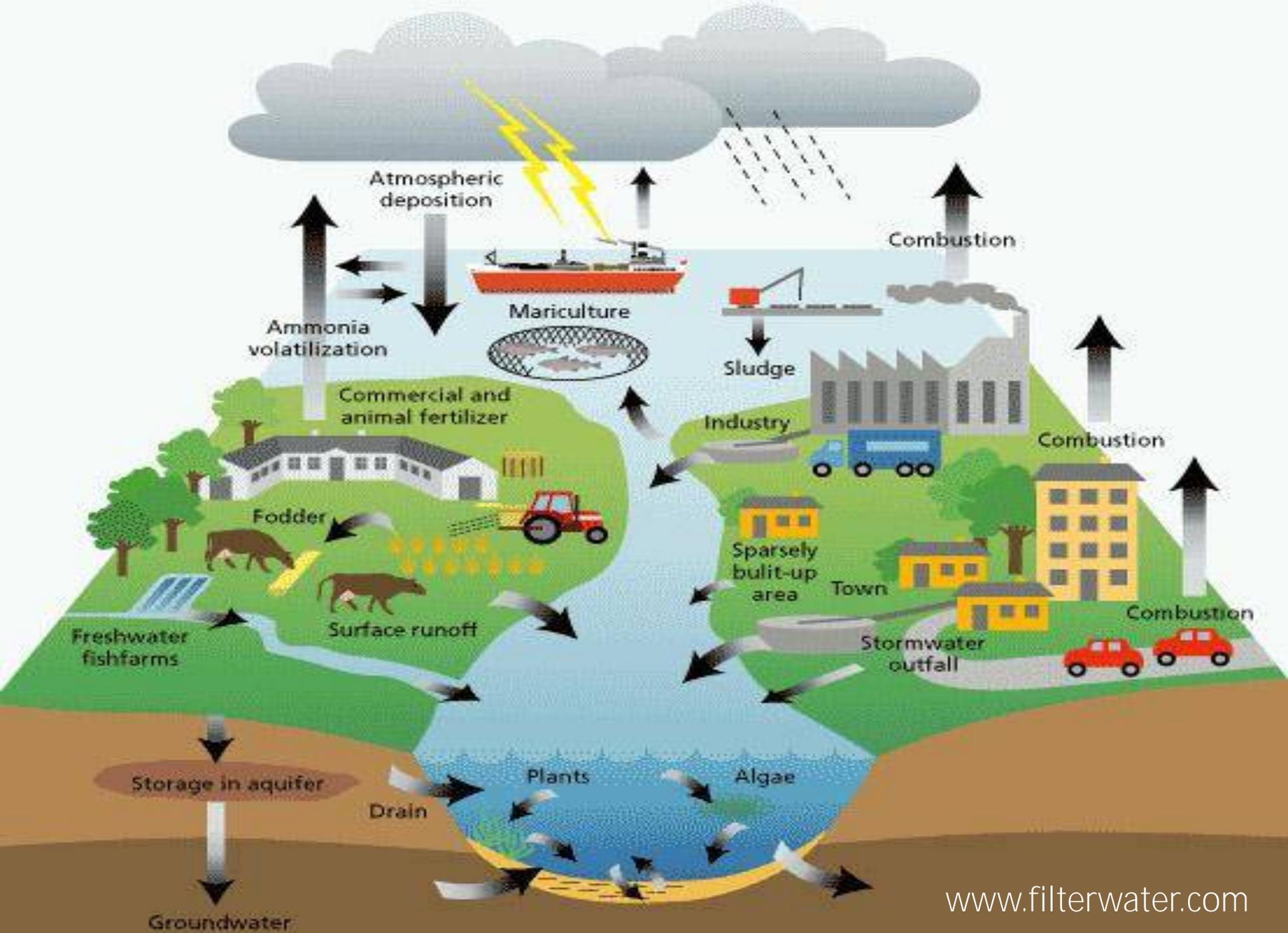
- Pengotoran airtanah tambang batubara, tambang logam, fosfat, dsb.
- Penambangan batubara terjadi oleh adanya oksidasi dengan pirit menghasilkan asam sulfat, besi hidroksida apabila terlarut mengakibatkan airtanah kaya akan besi, sulfat, dan pH nya turun.
- Penambangan logam limbah atau sisa-sisa penambangan maupun pengolahan akan meningkatkan konsentrasi logam dalam airtanah.
- Batuan mengandung fosfat seringkali menghasilkan uranium, walaupun dalam konsentrasi sangat kecil dapat membahayakan kualitas airtanah.



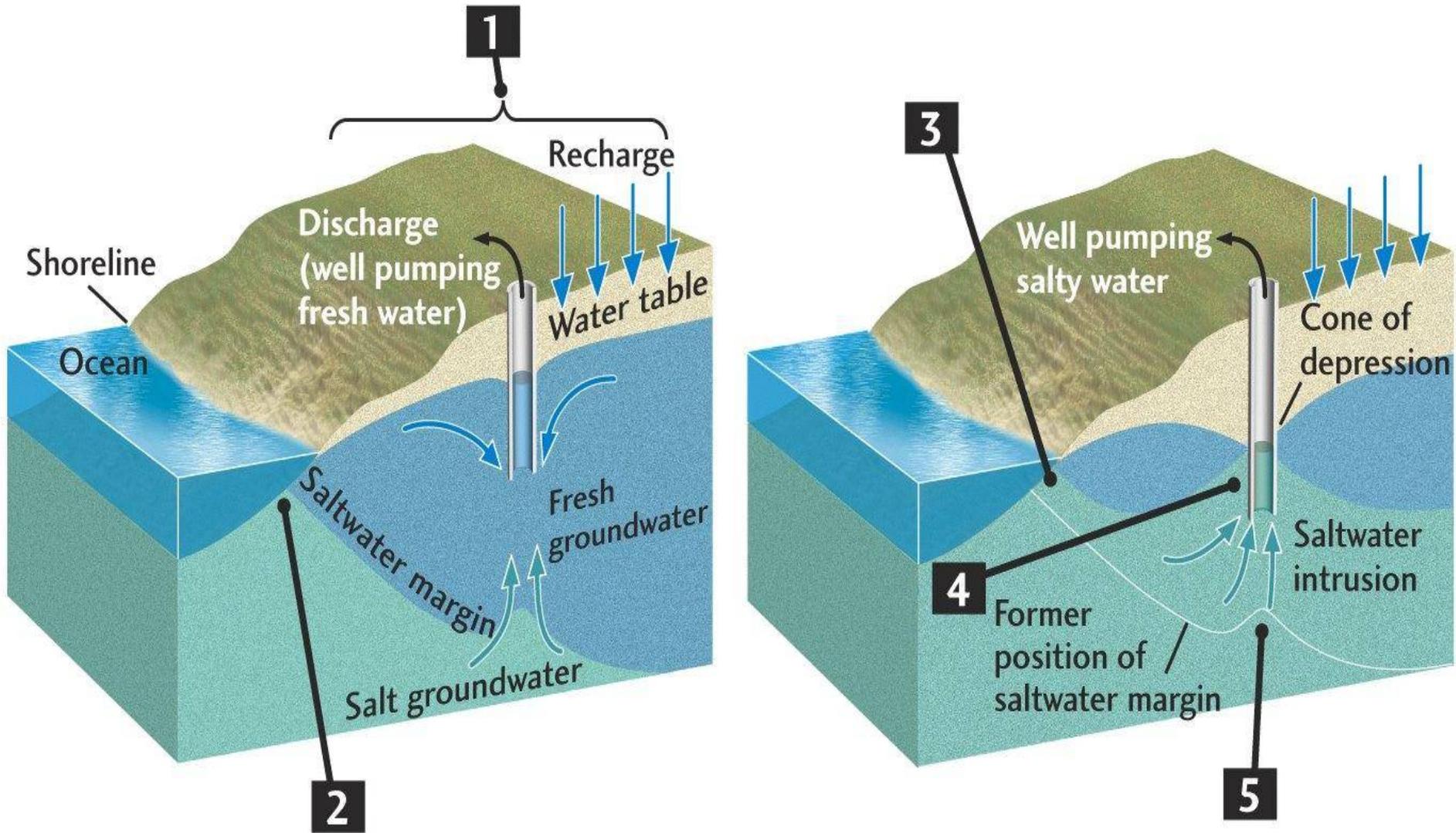
Pengotoran aliran/tubuh air permukaan







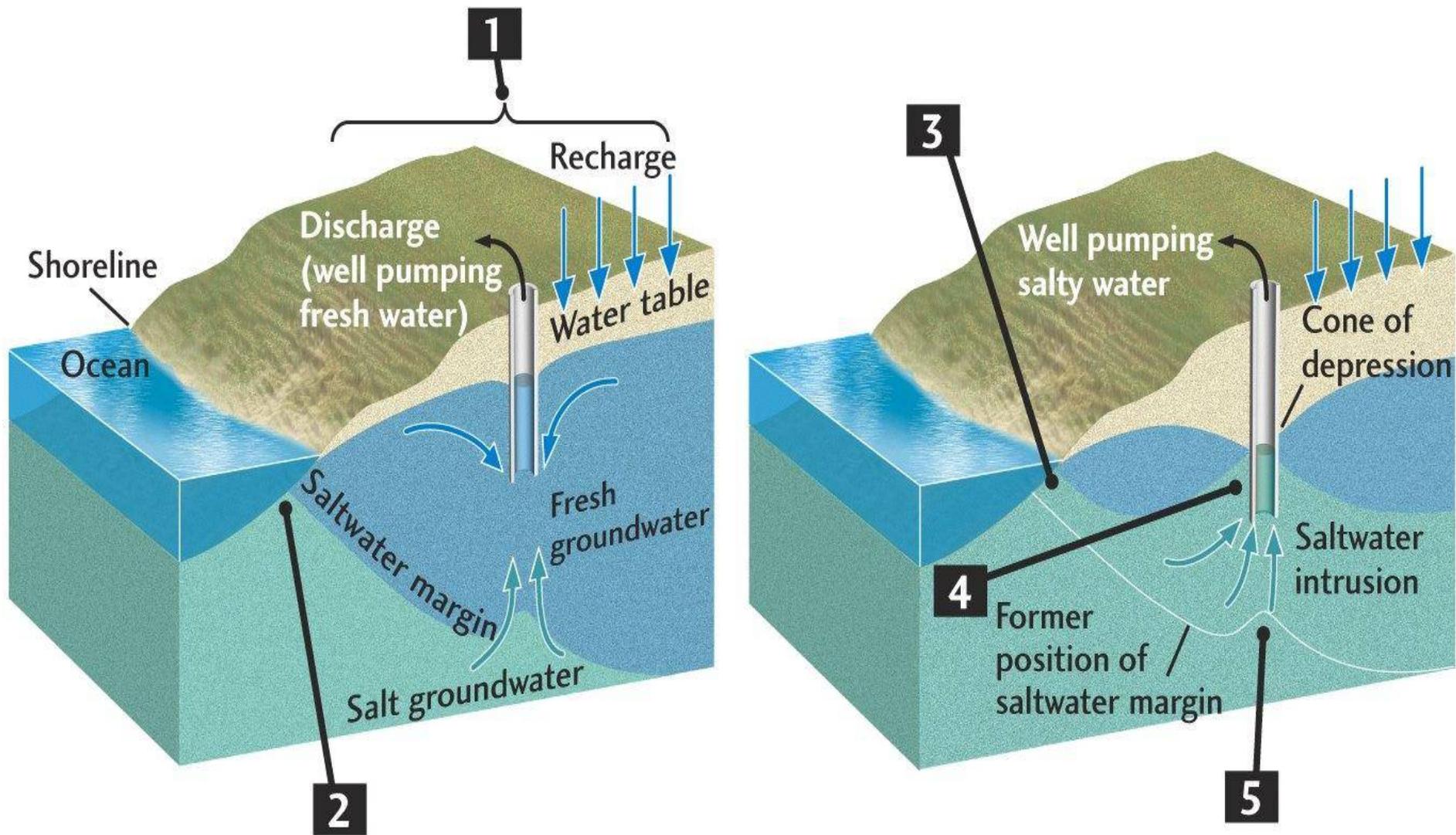
# Penyusupan air laut



# Pengotoran dari laguna & daerah evaporasi

- Laguna digunakan untuk proses penyehatan atau pembuangan air limbah industri apabila terjadi rembesan menyebabkan pengotoran airtanah yang berada di bawahnya.
- Garam-garam yang dihasilkan dari penguapan, sisa industri, ataupun lapangan minyak meningkatkan kadar NaCl dalam airtanah.

# Pengotoran dari laguna & daerah evaporasi gambar



# Pengotoran dari makam

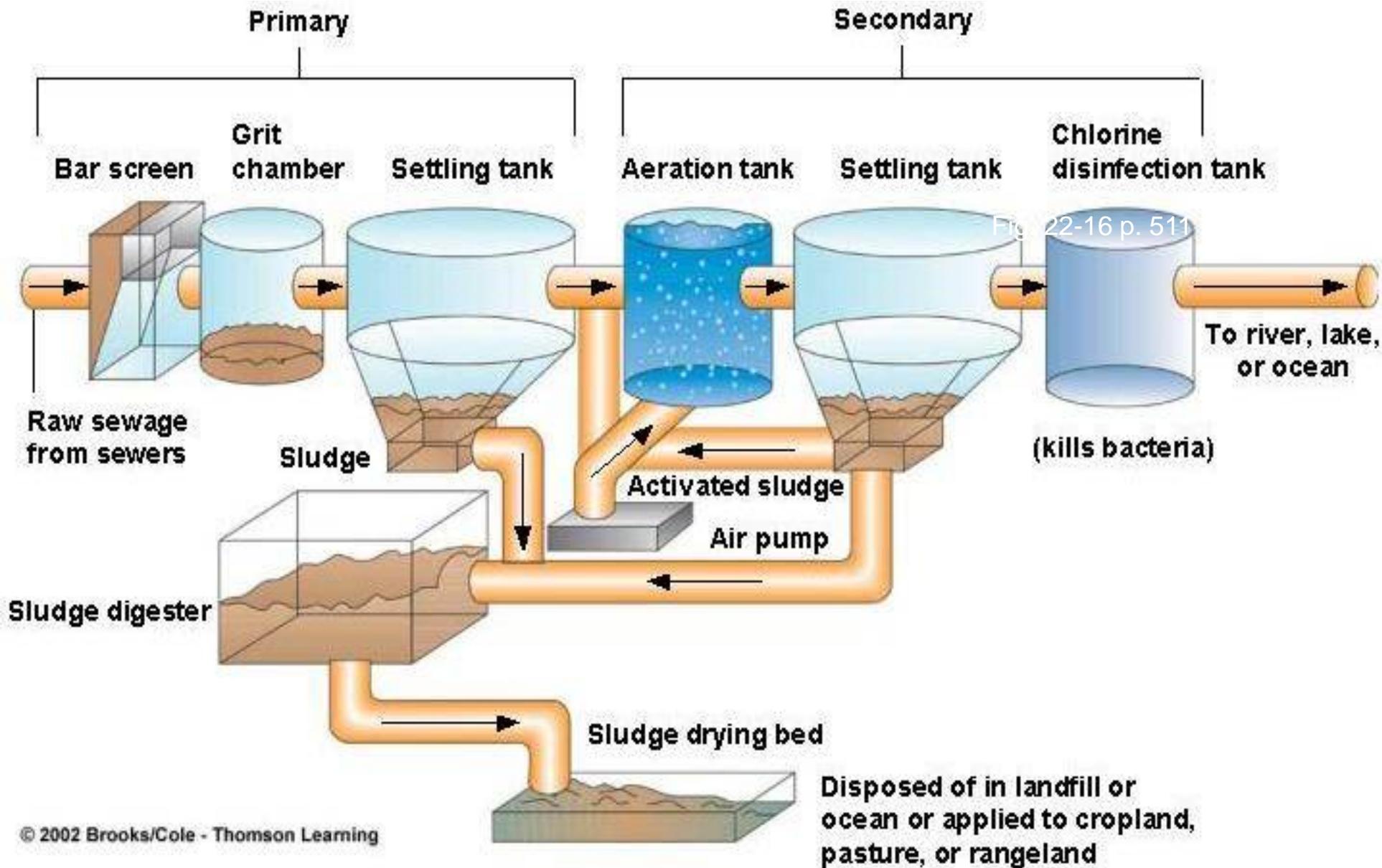
- Proses perubahan/pembusukan yang terjadi dalam tanah kuburan menghasilkan cairan yang dapat berperan sebagai pengotor apabila meresap masuk ke dalam airtanah yang terletak di bawahnya menyebabkan airtanah berbau, meningkatkan kadar bakteri ataupun ion-ion lainnya.
- Pengotoran terjadi apabila batuan yang menadasari bercelah atau berongga.

# Pencegahan Pengotoran Airtanah

## Pencegahan pengotoran dan guna menjaga kualitas airtanah, dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Menentukan zona konservasi kualitas airtanah, mencakup luasan cekungan dan daerah sumber pasokan air, serta sistem geohidrologi di daerah tersebut.
2. Menetapkan peraturan/pembatasan tataguna lahan dan kegiatan yang dilakukan di sekitar zona konservasi, termasuk pembuangan air limbah.
3. Melakukan pengelolaan air limbah.
4. Mengetahui komposisi, volum dan kemampuan kotoran di permukaan yang mengalami pelarutan.
5. Memetakan lokasi kotoran mungkin meresap ke dalam tanah.
6. Melakukan perbandingan airtanah yang tidak mengalami pengotoran dengan yang mengalami pengotoran di daerah tersebut.

# Pengelolaan limbah, secara fisika maupun biologis



Apabila pengotoran airtanah telah terjadi, upaya memperkecil tingkat pengotoran dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Memilih tempat pembuangan yang aman.
2. Melokalisir sumber pengotoran airtanah.
3. Mengetahui sifat pengotor, luas daerah yang mengalami pengotoran, dan macam pengalirannya
4. Melakukan monitoring kualitas airtanah secara menerus, sehingga dapat diketahui sedini mungkin terjadinya pengotoran airtanah.

# Penyehatan Air

Koagulasi dan Pengendapan

Metode Pertukaran Ion

Metode Aerasi

Evaporasi

Aktivitas karbon

Kombinasi

# Koagulasi dan Pengendapan

- Proses menghilangkan zat-zat yang tersuspensi dalam air.
- Alat berupa bak-bak pemisah yang disertai penyaring.

Penjernihan Air

Koagulasi

- proses menyatukan partikel-partikel halus maupun kotoran dalam air menjadi suatu massa yang segera dapat dipisahkan atau disaring.

Proses koagulasi & pengendapan dapat menghilangkan kadar garam yang terlarut, bahkan membunuh bakteri-bakteri dalam air.

## Proses Koagulasi

Proses koagulasi, meliputi : **proses netralisasi** muatan negatif dengan memberi nukleus ke partikel yang tersuspensi/koloid, sehingga menyatu.

(Partikel-partikel tersuspensi/koloid mempunyai muatan listrik negatif, menyebabkan saling tolak menolak dan tidak bersatu)

Koagulan :  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ion-ion bermuatan tiga positif akan bereaksi dengan muatan negatif partikel-partikel tersuspensi & mengumpulkan/menyatukan partikel-partikel tersebut.

## Proses Pengendapan dengan bahan sintesis polielektrolit

- Air yang mengalami pengotoran diendapkan dalam kolam mengendapkan material halus, seperti lempung atau lanau.

- Pemberian polielektrolit membantu mengikat & mengendapkan material terlarut atau tersuspensi/koloid dengan lebih cepat.

Pengendapan digunakan untuk mengurangi ion kalsium, magnesium terlarut, tingkat kebasaaan – kesadahan, silika dikenal sebagai proses pelunakan.

## Proses Pengendapan contoh

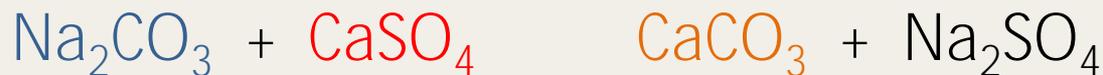
*Kalsium Hidroksida* ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) bereaksi dengan *Kalsium Bikarbonat* ( $\text{Ca(HCO}_3)_2$ ) & *Magnesium Bikarbonat* ( $\text{Mg(HCO}_3)_2$ ) yang larut membentuk endapan hampir seluruh *Kalsium Karbonat* ( $2\text{CaCO}_3$ ) & *Magnesium Hidroksida* ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) akan terpisah sebagai lumpur, sehingga dapat disaring.



## Proses Pengendapan contoh

Kapur soda bereaksi dengan *Magnesium Sulfat* ( $\text{MgSO}_4$ ) & *Klorida* ( $\text{MgCl}_2$ ) mengendapkan *Magnesium Hidroksida* ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), tetapi terbentuk *Kalsium Sulfat* ( $\text{CaSO}_4$ ) & *Kalsium Klorida* ( $\text{CaCl}_2$ ) yang larut.

*Kalsium Sulfat* ( $\text{CaSO}_4$ ) & *Kalsium Klorida* ( $\text{CaCl}_2$ ) diendapkan dengan soda abu ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) mengurangi kesadahan nonkarbonat mengendapkan *Kalsium Karbonat* ( $\text{CaCO}_3$ ) berupa lumpur yang mudah dipisahkan.



## Metode Pertukaran Ion

- Mineral terlarut dalam air menjadi partikel bermuatan listrik, berupa ion kation (muatan positif) dan ion anion (muatan negatif) menjadikan air bersifat asam ataupun basa-sadiah.
- Ion-ion dapat dihilangkan atau ditukar memperoleh kondisi pH air netral.
- Pertukaran ion menggunakan material berupa butir kecil & memiliki ketebalan tertentu yang diletakkan pada area yang akan dilalui air.
- Kesadahan air dapat dikurangi atau dihilangkan dengan **Zeolit** (tersusun oleh natrium, alumunium, & silica), sebagai penukar kation menukar ion Ca & Mg dengan ion Na.
- Zat penukar ion mempunyai kapasitas terbatas perlu regenerasi.
- Penukar anion dapat diregenerasi dengan NaOH, NH<sub>4</sub>OH, kadang-kadang Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

# Metode Aerasi

- Memencarkan atau menyemburkan air ke udara

Aerasi

## Manfaat

Air dapat melarutkan oksigen secara maksimum.

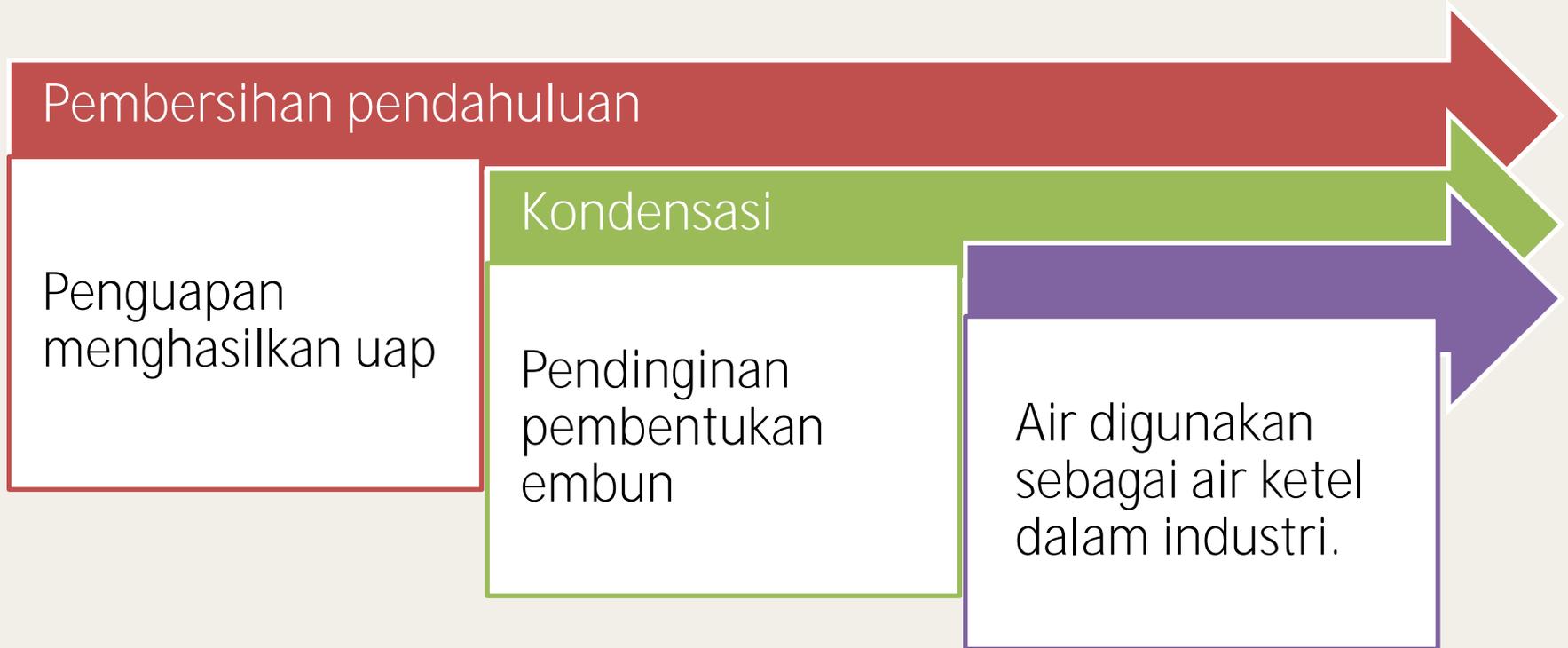
Membebaskan gas-gas lain ( $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $Cl$ ) yang ada dalam air.

Menghilangkan substansi-substansi lain ( $Fe$ ,  $Mn$ ) yang tidak diinginkan, kecuali kesadahan.

Menghilangkan bau & rasa.

Kandungan  $Fe$ ,  $Mn$  dan material organik bereaksi dengan  $KMnO_4$  atau klorin.  $Fe$  &  $Mn$  teroksidasi, sehingga mudah disaring.

# Evaporasi



Alat yang digunakan evaporator kumparan, berfungsi sebagai pemanas.

tangki air yang diberi

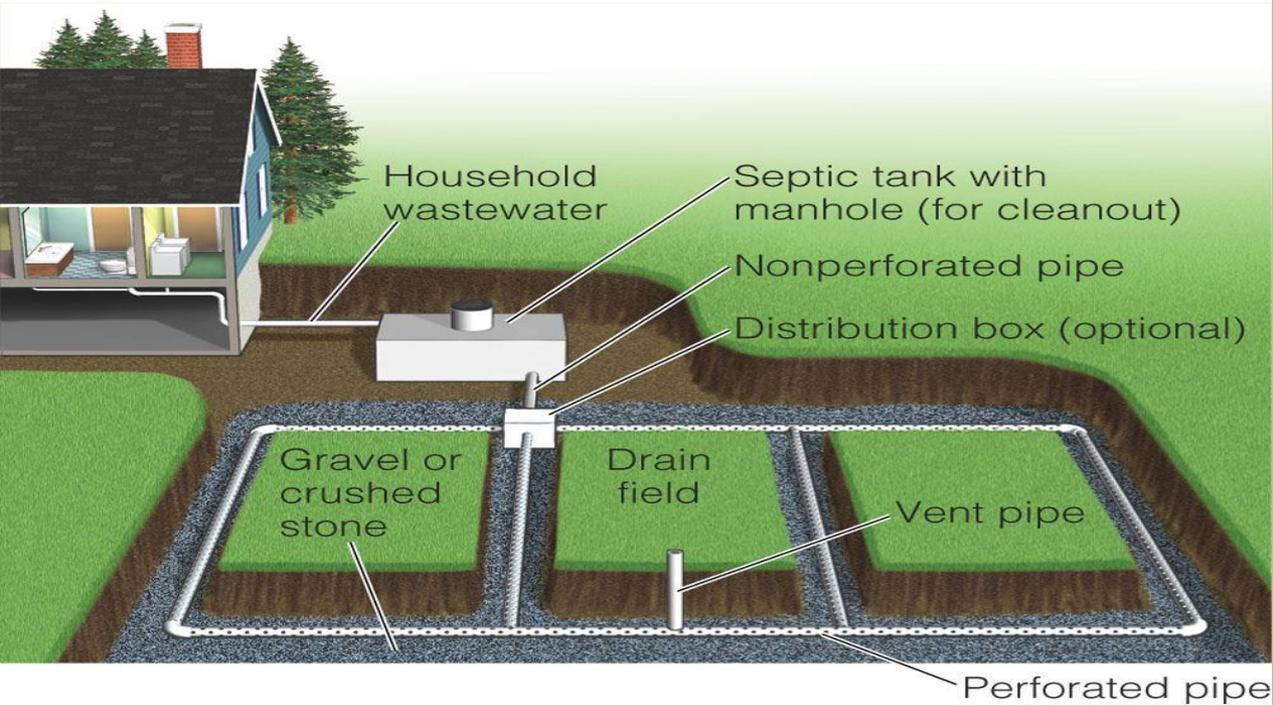
## Aktivitas Karbon arang menghilangkan warna, rasa, & bau.

- Pembersihan yang dilakukan di tempat luas & jumlah air banyak guna mengaktifkan karbon perlu ditambahkan karbon berbentuk bubuk.
- Karbon dapat ditambahkan diawal atau selama koagulasi dalam instalasi pembersih.
- Bubuk karbon akan mengendap, selanjutnya dapat dilakukan penyaringan.
- Aktivitas karbon berbutir kasar digunakan dalam membantu menyamakan tekanan filter pasir.

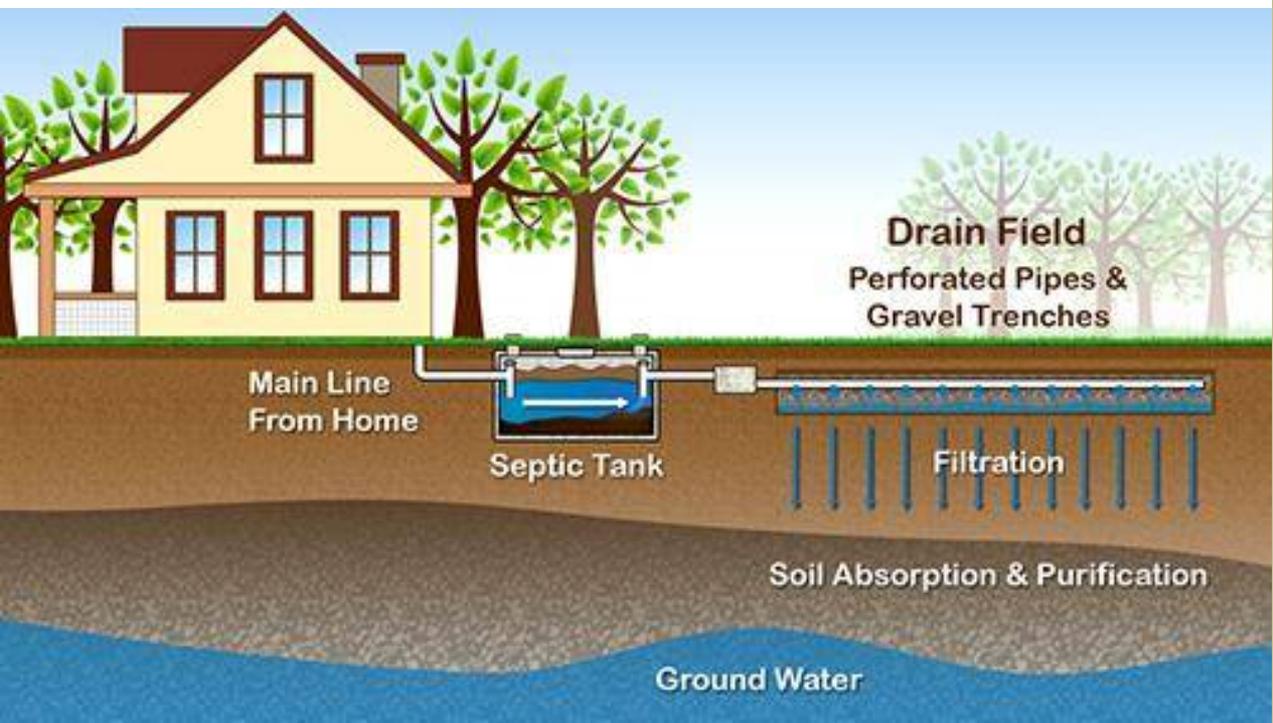
# Kombinasi

- Air dengan kandungan zat padat tersuspensi, zat organik mengalami kekeruhan diawali dengan penjernihan proses pertukaran ion.
- Cara kombinasi metode aerasi dengan koagulasi dan filtrasi.

Contoh upaya pencegahan &  
pengurangan pengotoran airtanah



## Sistem Pembuangan— Septic Tank



Diperlukan area yang cukup luas, serta diperlukan pemantauan dan perawatan.

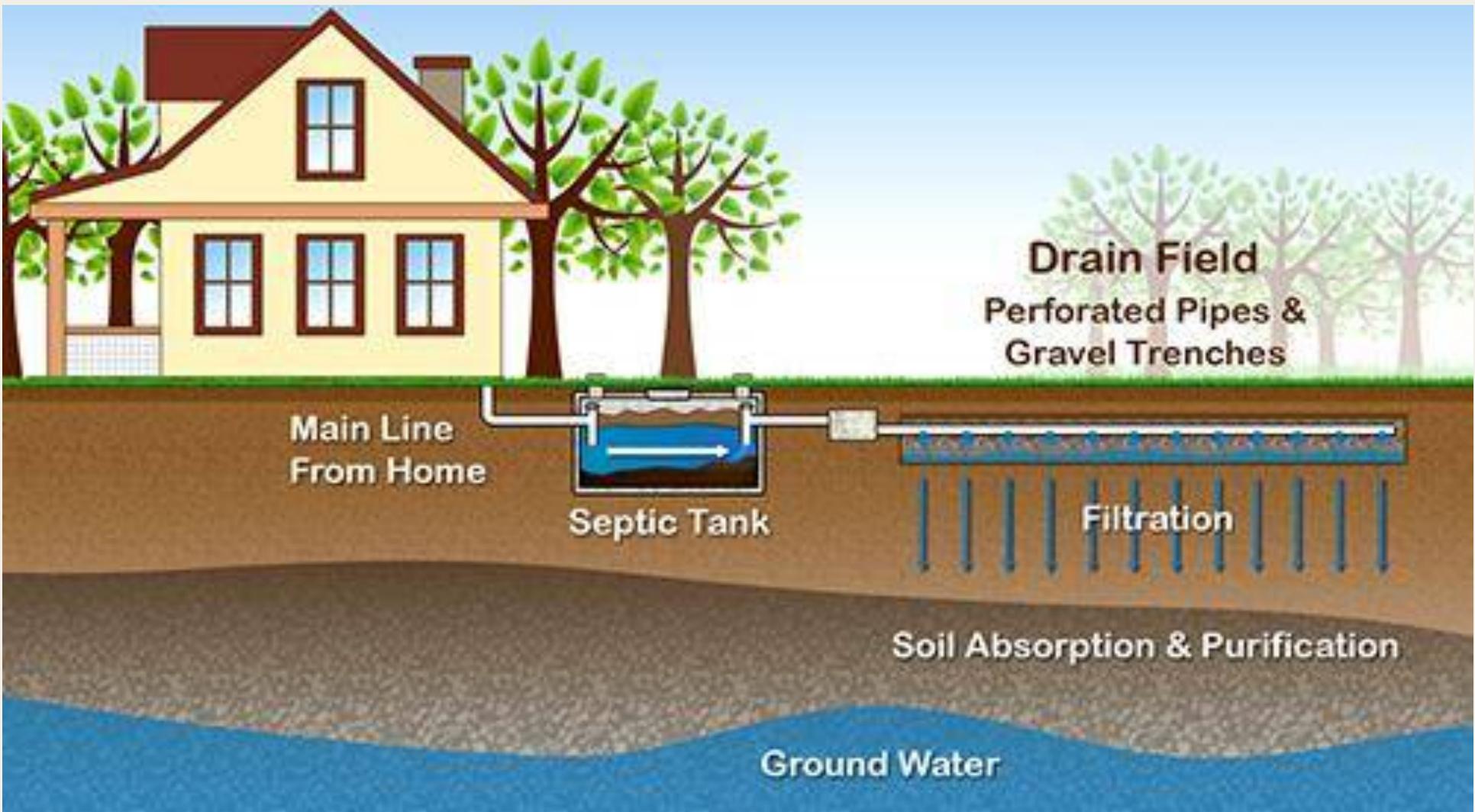
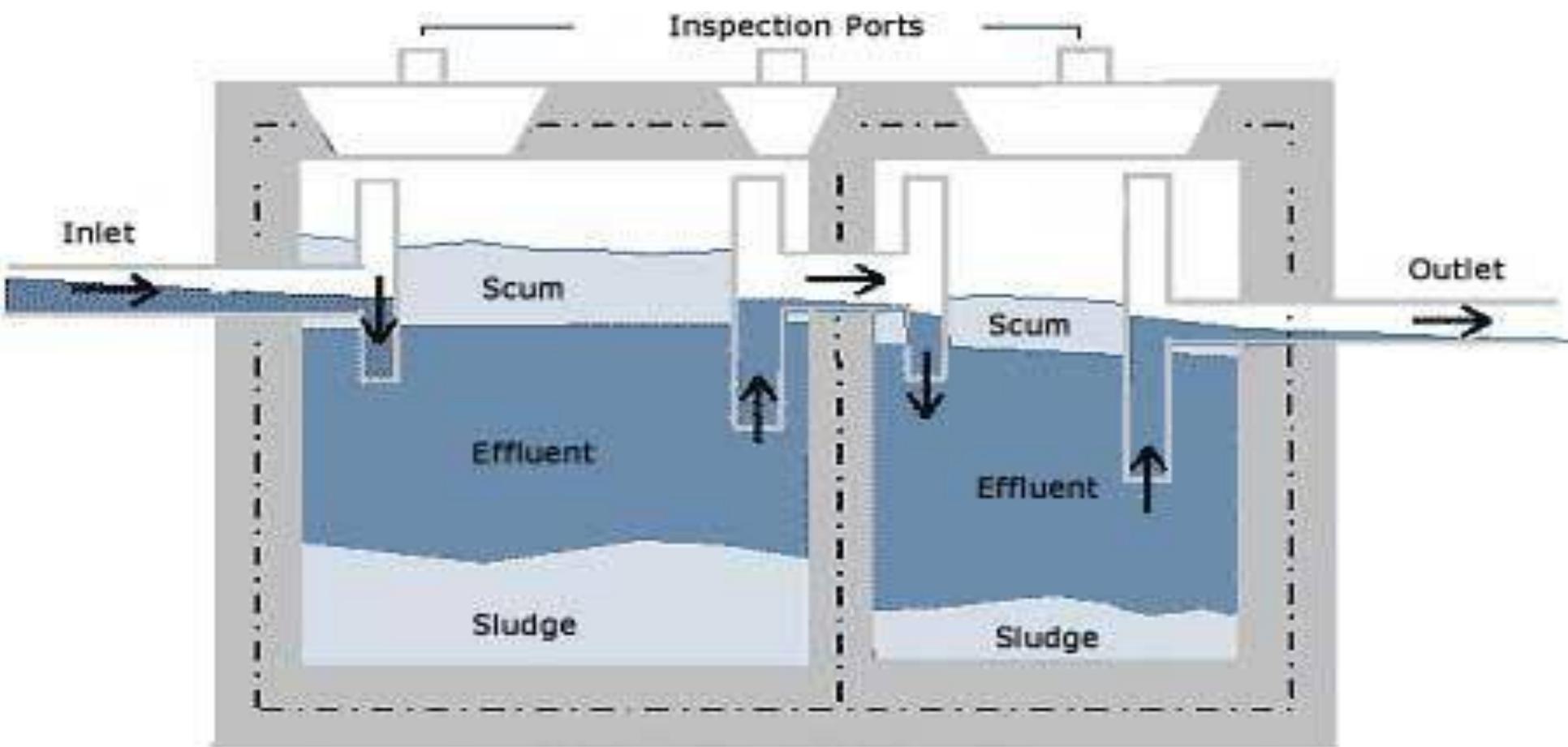


Fig. 22-15 p. 510



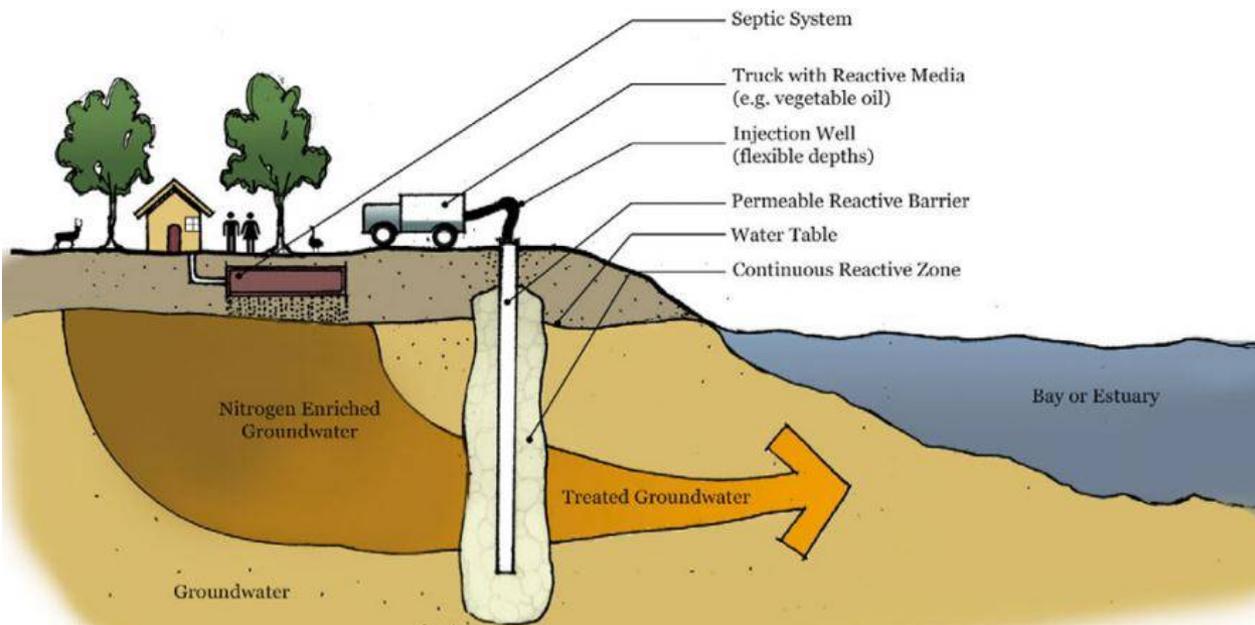
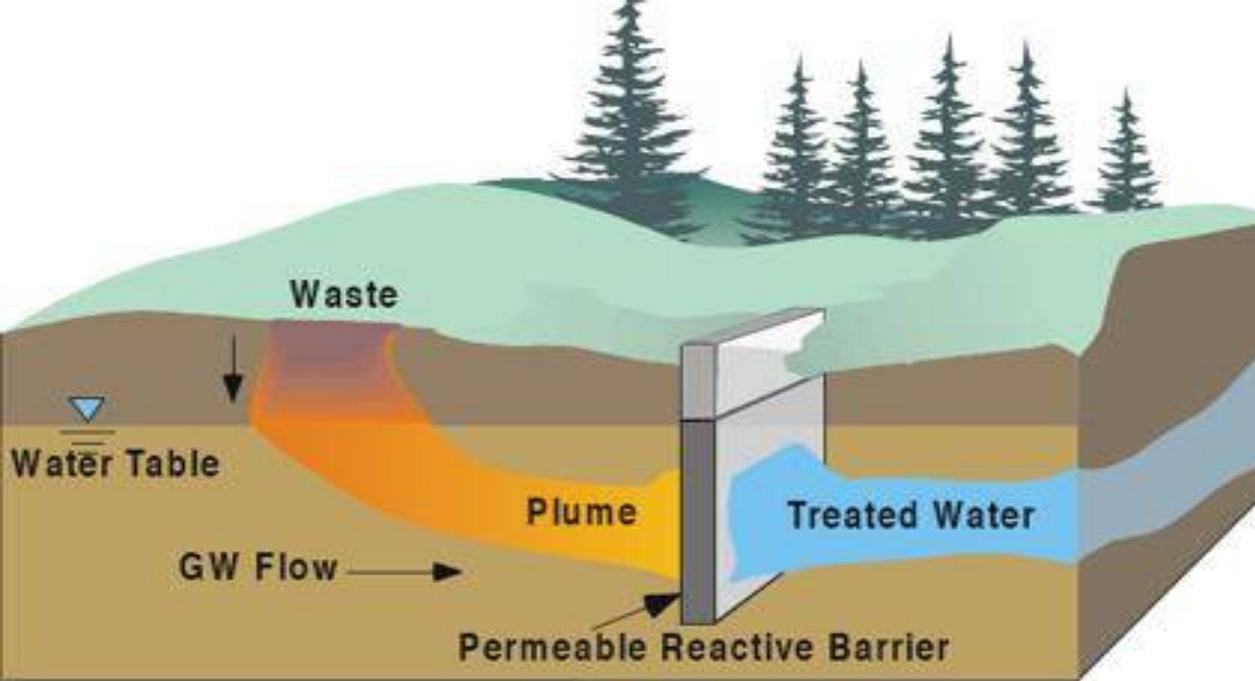
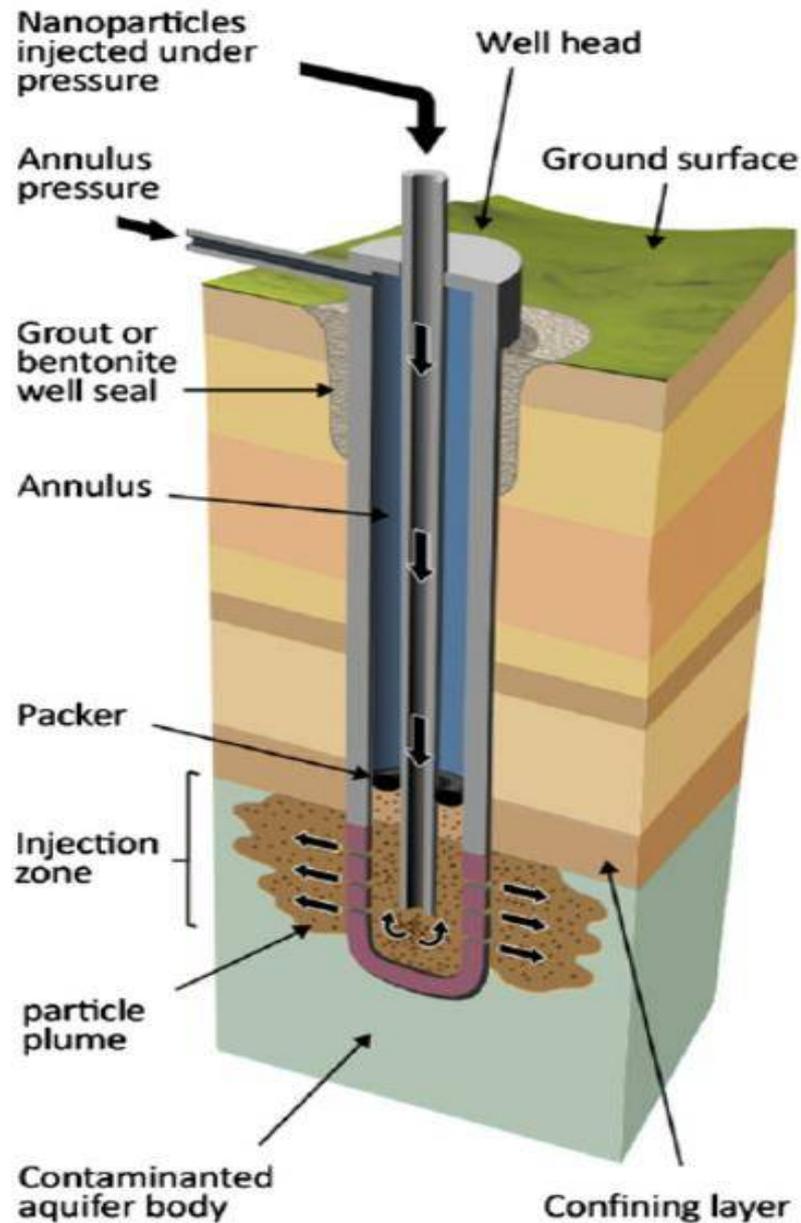


FIGURE NOT TO SCALE

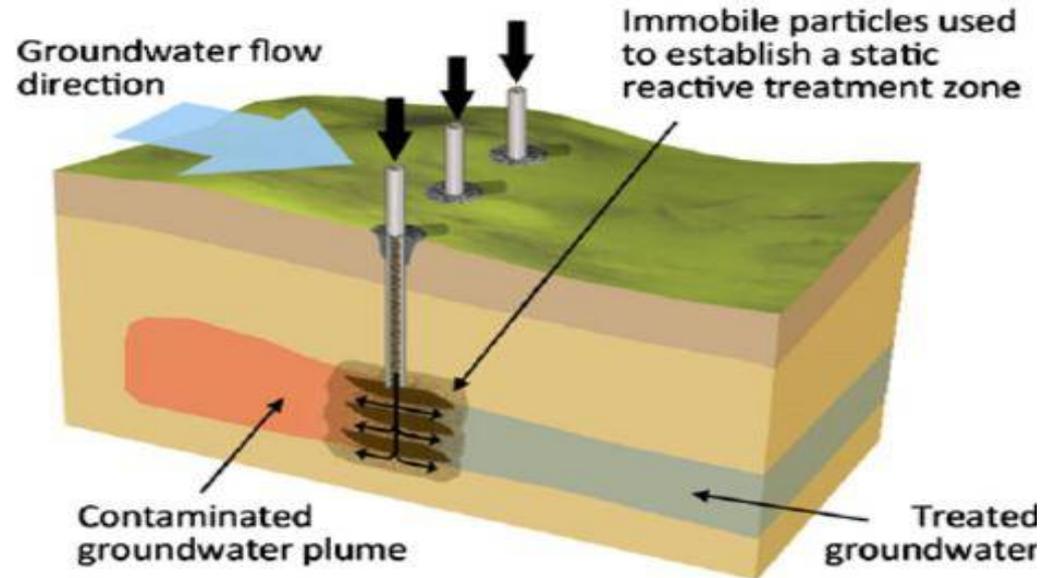
Penanggulangan kontaminasi oleh kebocoran penampungan kotoran/limbah

(capecodgreenguide.wordpress.com)

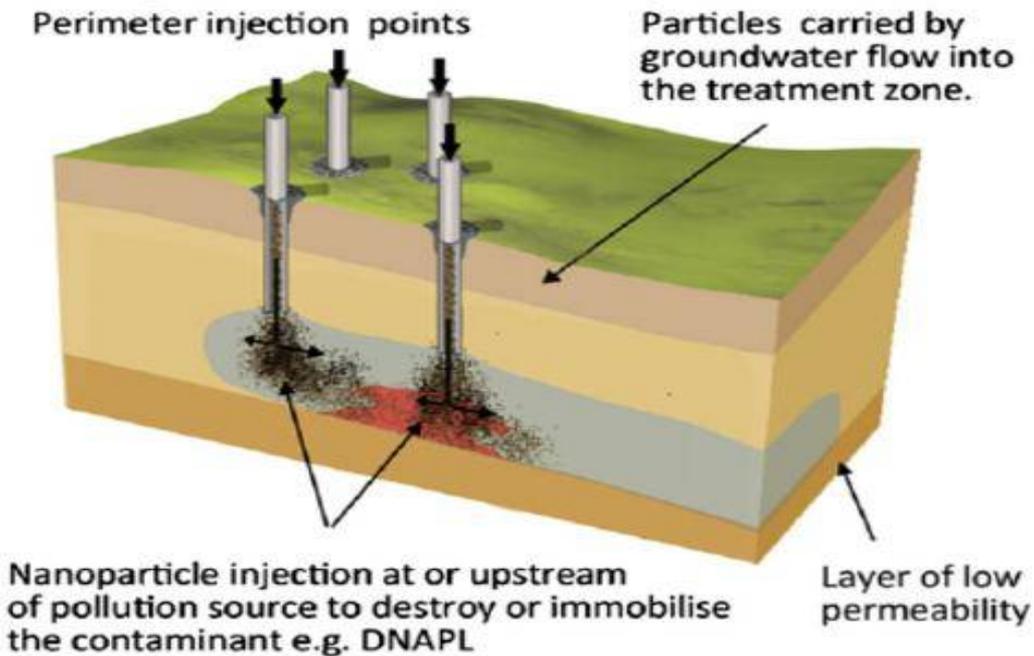
(a) Nanoparticle injection well

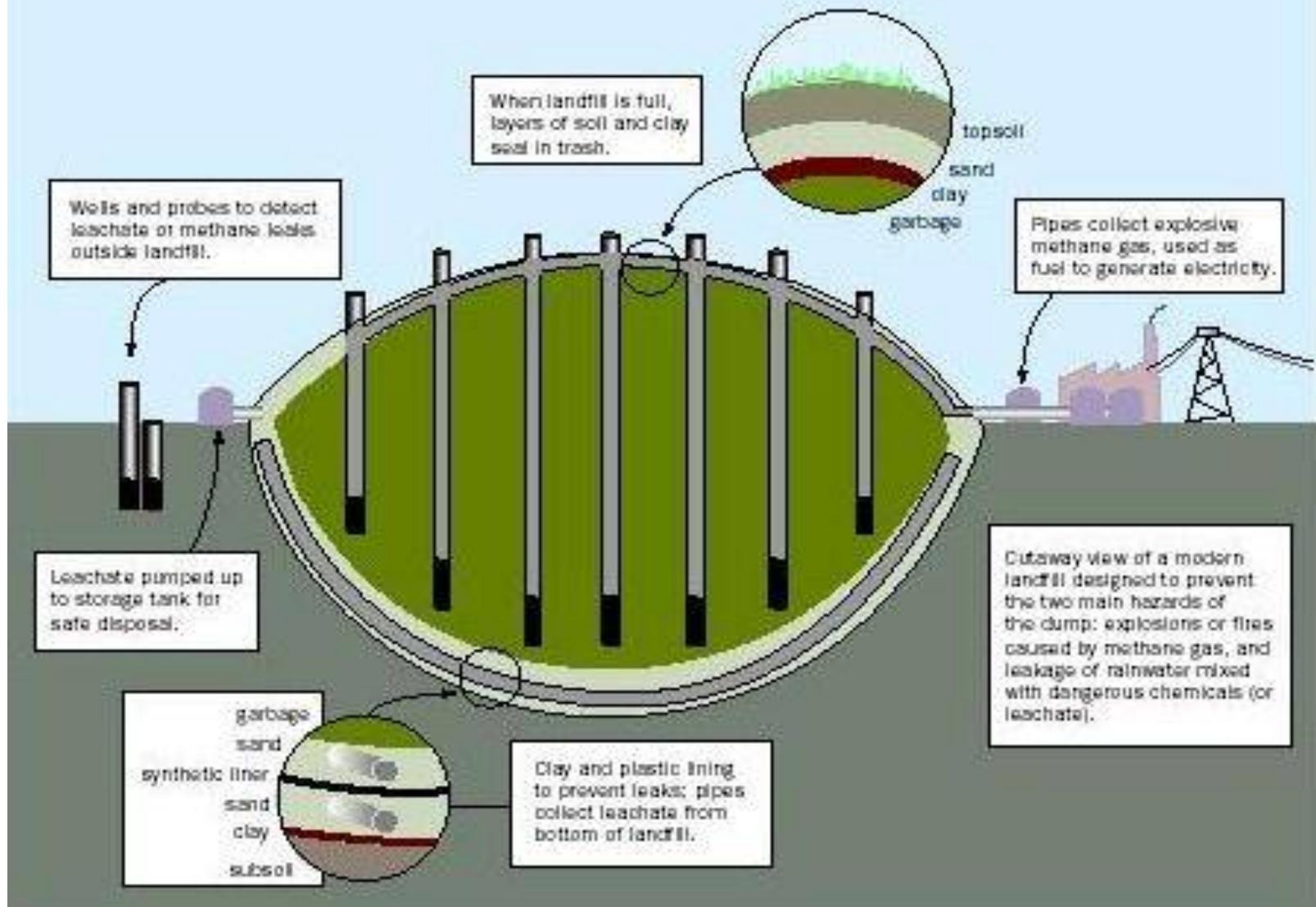


(b) Injection of immobile nanoparticles

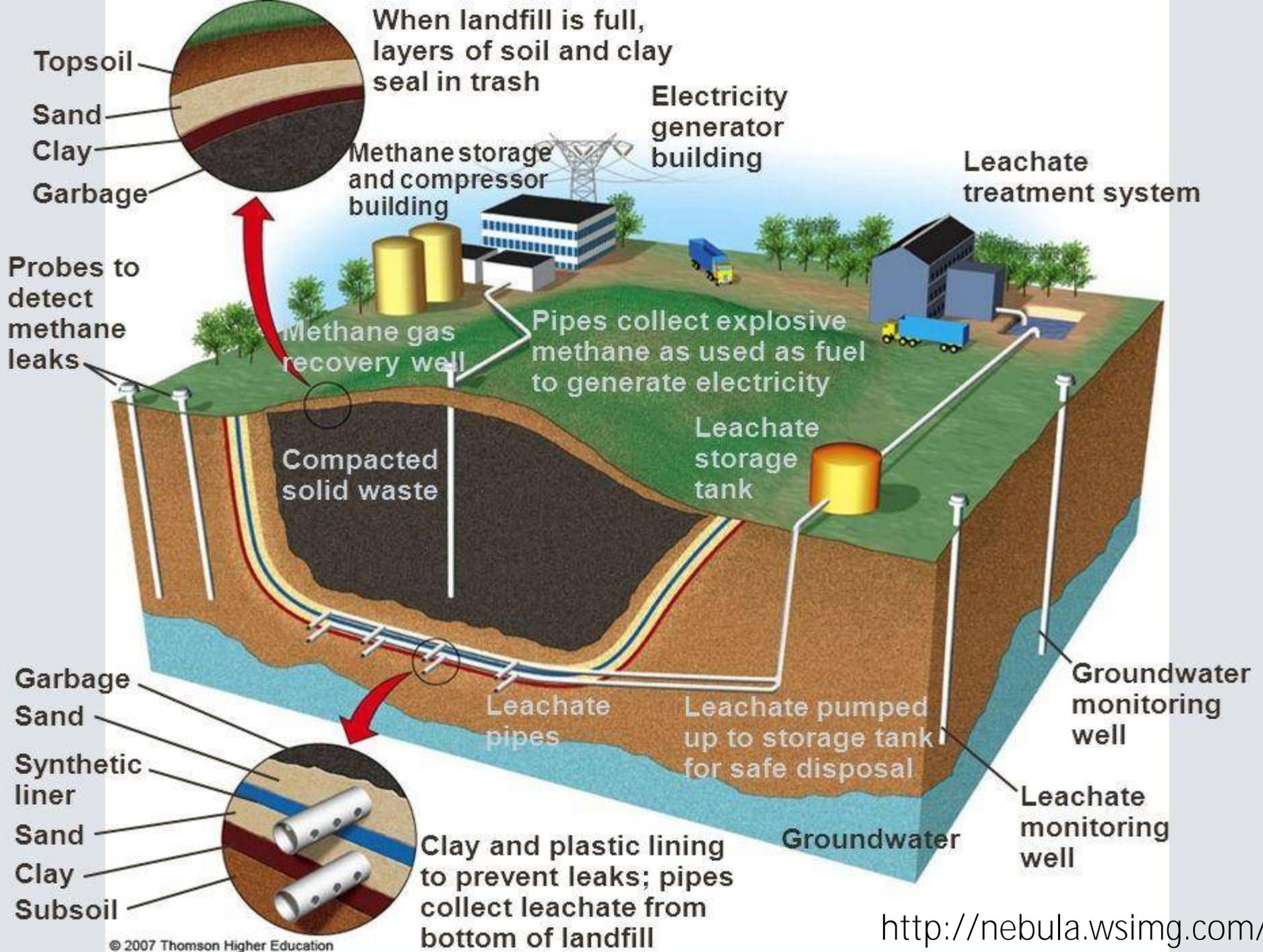


(c) Injection of mobile nanoparticles





Pembangunan tempat pembuangan akhir yang baik dapat mencegah kebocoran air licit



Topsoil  
Sand  
Clay  
Garbage

When landfill is full,  
layers of soil and clay  
seal in trash

Electricity  
generator  
building

Leachate  
treatment system

Probes to  
detect  
methane  
leaks

Methane storage  
and compressor  
building

Methane gas  
recovery well

Pipes collect explosive  
methane as used as fuel  
to generate electricity

Compacted  
solid waste

Leachate  
storage  
tank

Garbage  
Sand

Leachate  
pipes

Leachate pumped  
up to storage tank  
for safe disposal

Groundwater  
monitoring  
well

Synthetic  
liner

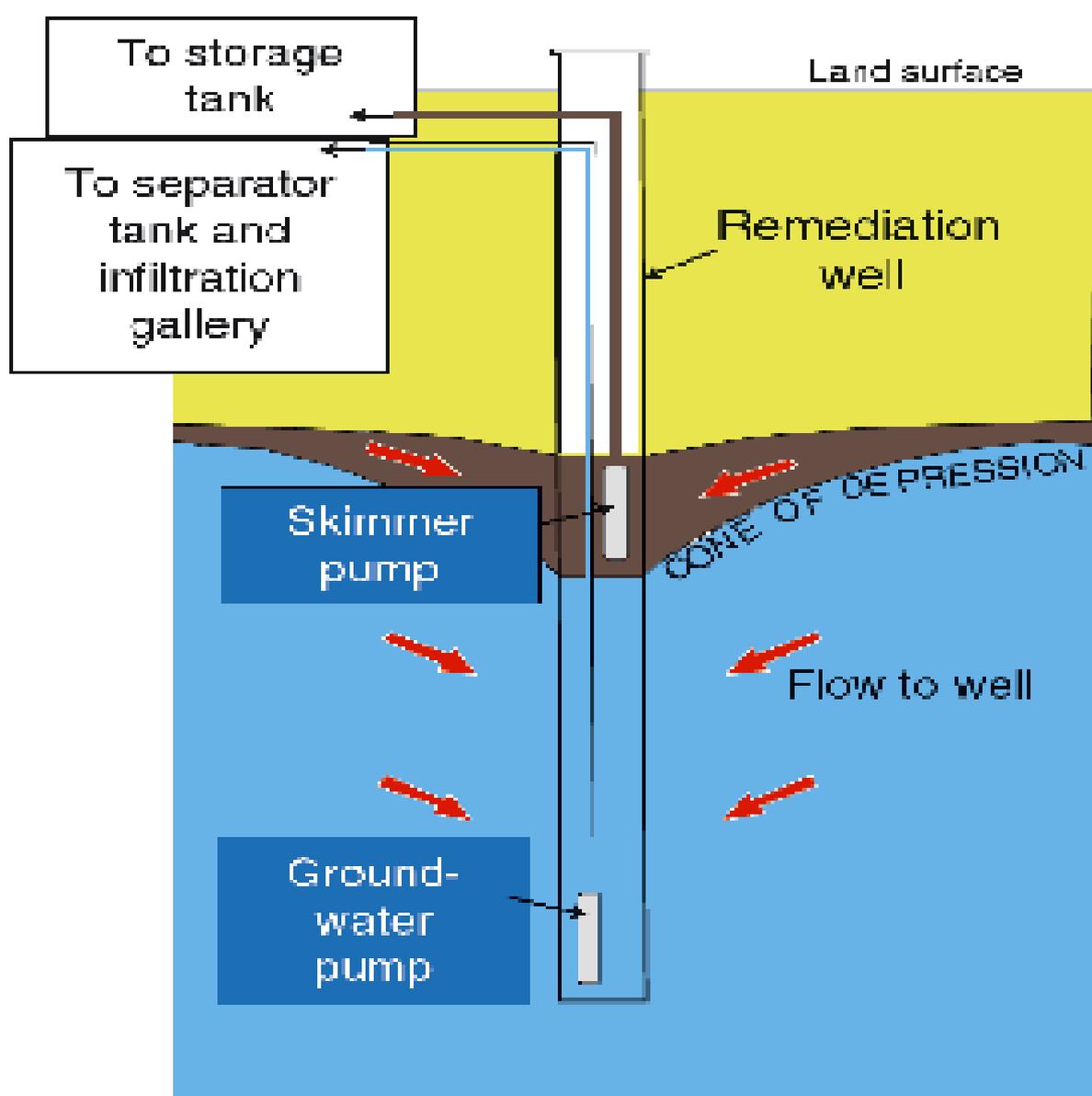
Leachate  
monitoring  
well

Sand  
Clay  
Subsoil

Clay and plastic lining  
to prevent leaks; pipes  
collect leachate from  
bottom of landfill

Groundwater

<http://nebula.wsimg.com/>

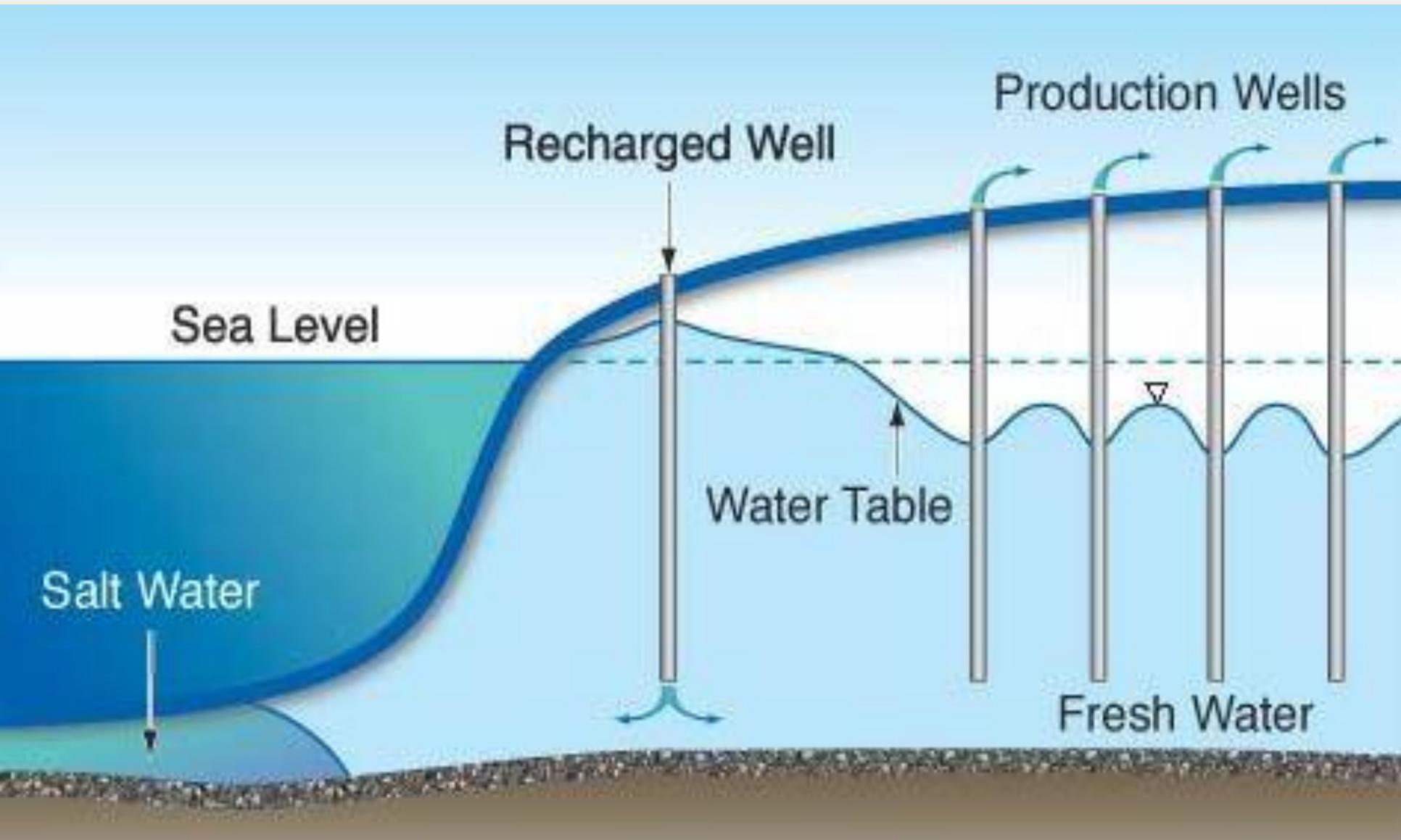


**LEGEND**

- Unsaturated zone
- Floating crude-oil zone
- Water saturated zone

Penanggulangan kontaminasi oleh kebocoran pipa penyaluran minyak bumi

(<http://toxics.usgs.gov/>)



Penanggulangan penyusupan air asin  
(<http://www.solinst.com/>)

# From saltwater to tap water

A look at how desalination plants convert saltwater to drinkable fresh water.



Source: Bay Area Regional Desalination Project, MCT  
Graphic: Bay Area News Group

© 2014 MCT

Desalination  
(<http://archive.redding.com/>)

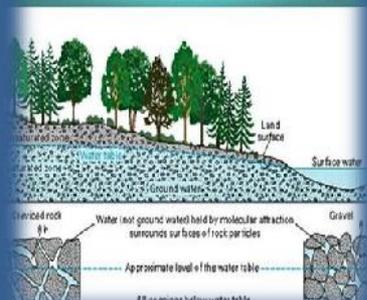
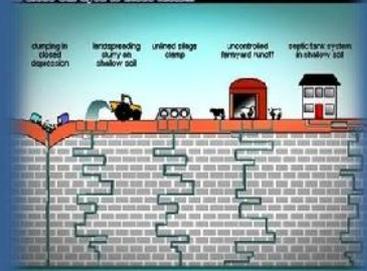
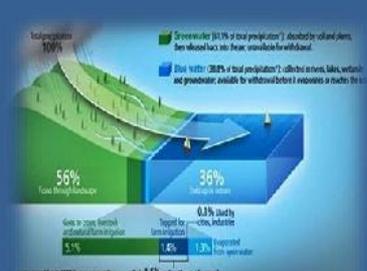
TERIMAKASIH



# BAB XI INTRUSI AIR LAUT

Ir. H. Joko Sungkono

Paramitha T. Trisnaning, S.T., M.Eng.

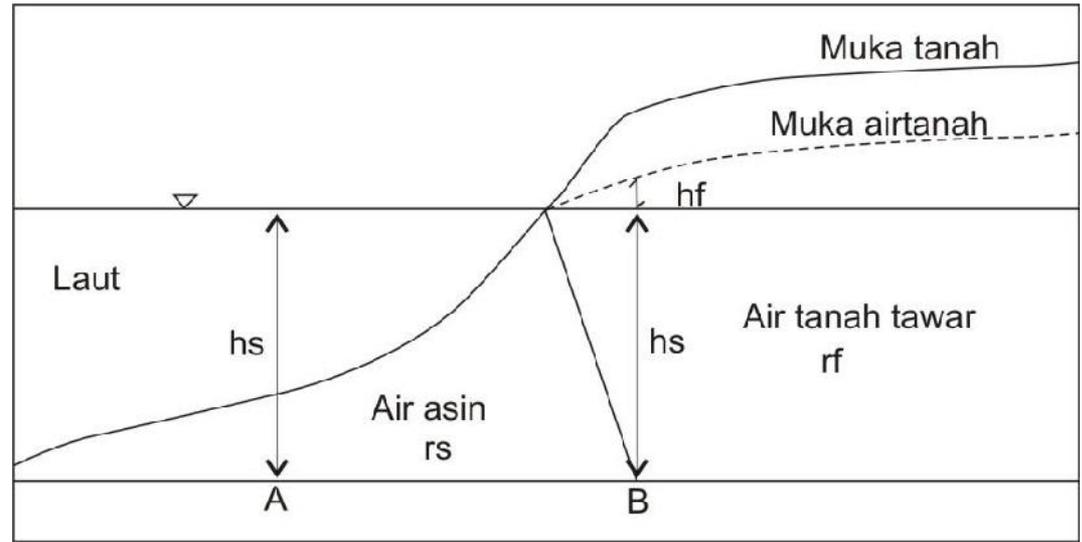


- Penyusupan air laut pada akuifer pantai  
masuknya air laut di bawah permukaan tanah melalui  
akuifer di daerah pantai.
- Penyusupan ini dapat terjadi akibat :
  - Penurunan muka airtanah atau bidang pisometrik di  
daerah pantai.
  - Pemompaan airtanah yang berlebihan di daerah pantai
  - Masuknya air laut ke daratan melalui sungai, kanal,  
saluran, rawa, cekungan lainnya.

Hukum Ghyben-Herzberg hubungan antara air laut dengan airtanah tawar pada akuifer pantai pada keadaan statis.

Kenyataan dengan adanya perbedaan berat jenis antara airlaut dengan airtanah tawar, maka bidang batasnya tergantung pada keseimbangan keduanya.

Hubungan air asin dengan airtanah tawar pada akuifer bebas di daerah pantai



Tekanan hidrostatik di titik  
A = B

$$P_A = P_B$$

$$s \cdot g \cdot h_s = f \cdot g \cdot h_f$$

$$h_s = \frac{f}{s - f} h_f$$

$$h_s = 40 h_f$$

s : kerapatan air laut (1,025 gr/cm<sup>3</sup>)

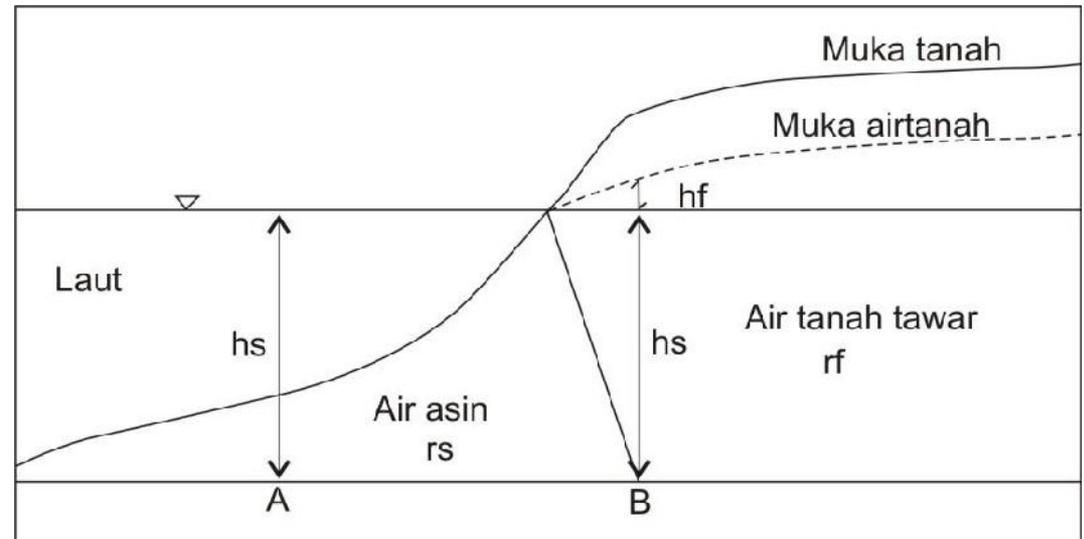
f : kerapatan airtanah tawar (1 gr/cm<sup>3</sup>)

g : percepatan gravitasi

hs : kedalaman muka airtanah dari titik A

hf : kedalaman muka airtanah dari muka laut

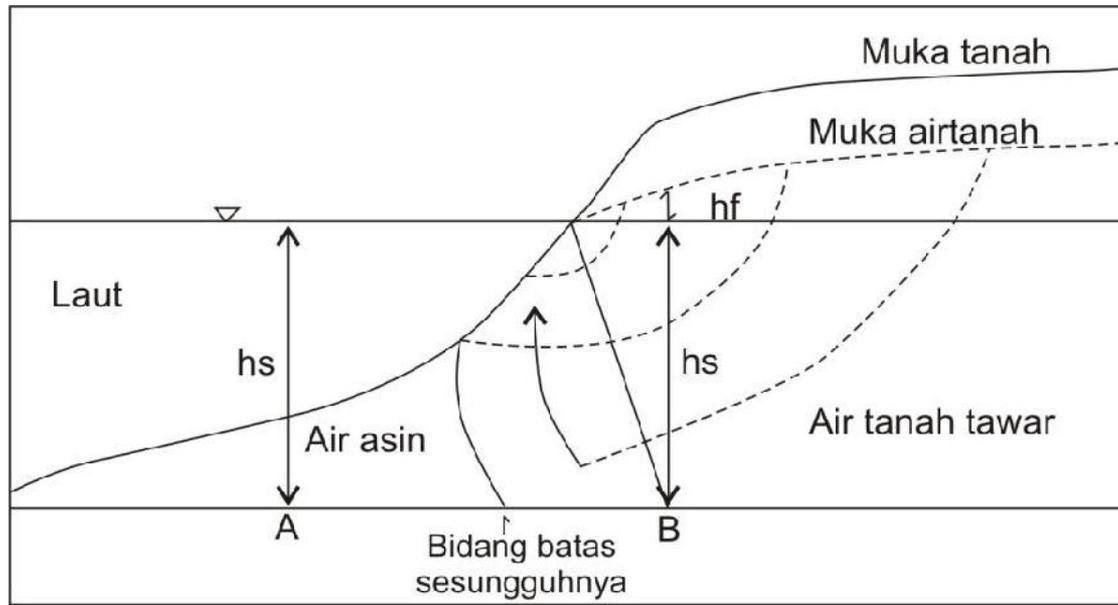
Hubungan air asin dengan airtanah tawar pada akuifer bebas di daerah pantai



Persamaan tersebut hanya berlaku jika :

- Muka airtanah (bidang pisometrik) berada di atas muka laut.
- Muka airtanah (bidang pisometrik) miring ke arah laut.

Pada kondisi yang dinamis, hukum Ghyben-Herzberg tidak sepenuhnya berlaku.

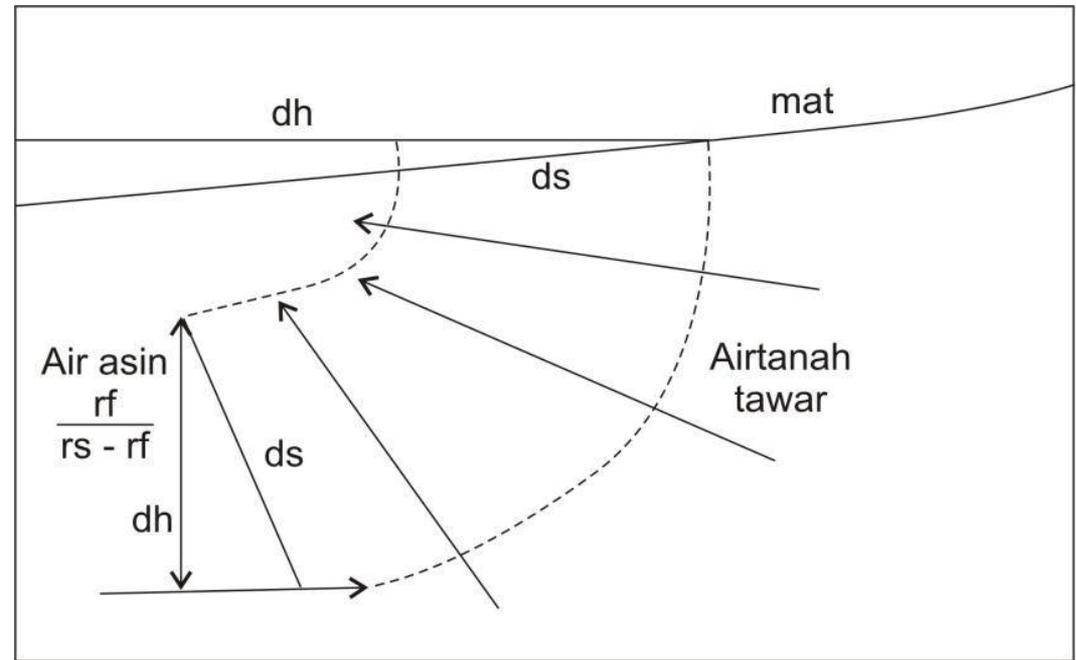


Garis batas sesungguhnya antara air asin dengan airtanah tawar pada kondisi dinamis

Garis aliran airtanah menunjukkan arah menaik. Pada pantai yang landai perbedaan bidang batas yang sesuai dengan hukum Ghyben-Herzberg dengan bidang batas sesungguhnya kecil, sedangkan pada pantai curam perbedaan tersebut cukup besar.

Garis batas sesungguhnya antara air asin dengan airtanah tawar pada kondisi dinamis.

Bidang batas sangat curam dibandingkan dengan kemiringan muka airtanah.



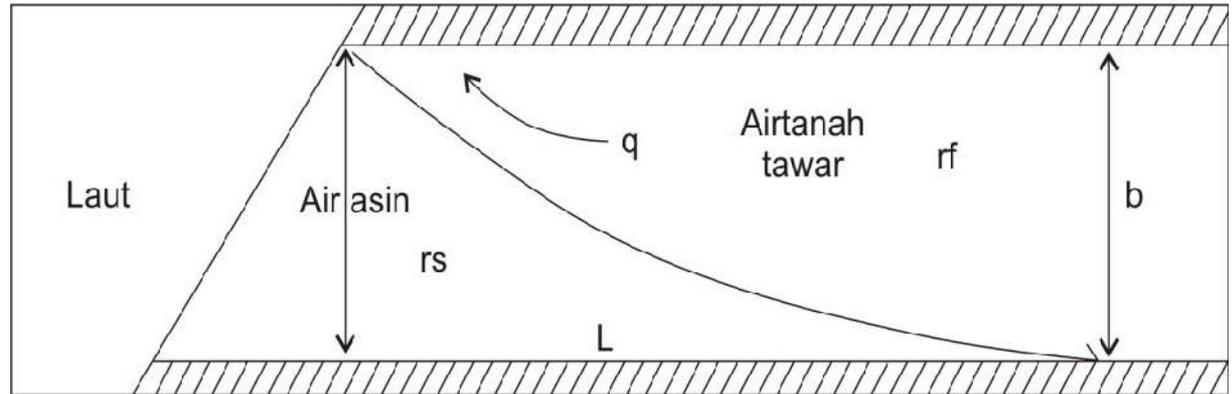
$$\sin = \frac{dh}{ds} = \frac{V}{K}$$

$$\sin = \frac{f}{s - f} \frac{dh}{ds}$$

$$\sin = 40 \frac{V}{K}$$

$$\sin = 40 \sin$$

## Panjang penyusupan air laut pada akuifer tertekan



Dengan hukum Darcy :

$$Q = \frac{1}{2} \left( \frac{s - f}{f} \right) \frac{Kb^2}{L}$$

$$L = \frac{Kb^2}{80Q}$$

L : panjang penyusupan air laut

b : tebal akuifer

K : koefisien kelulusan air

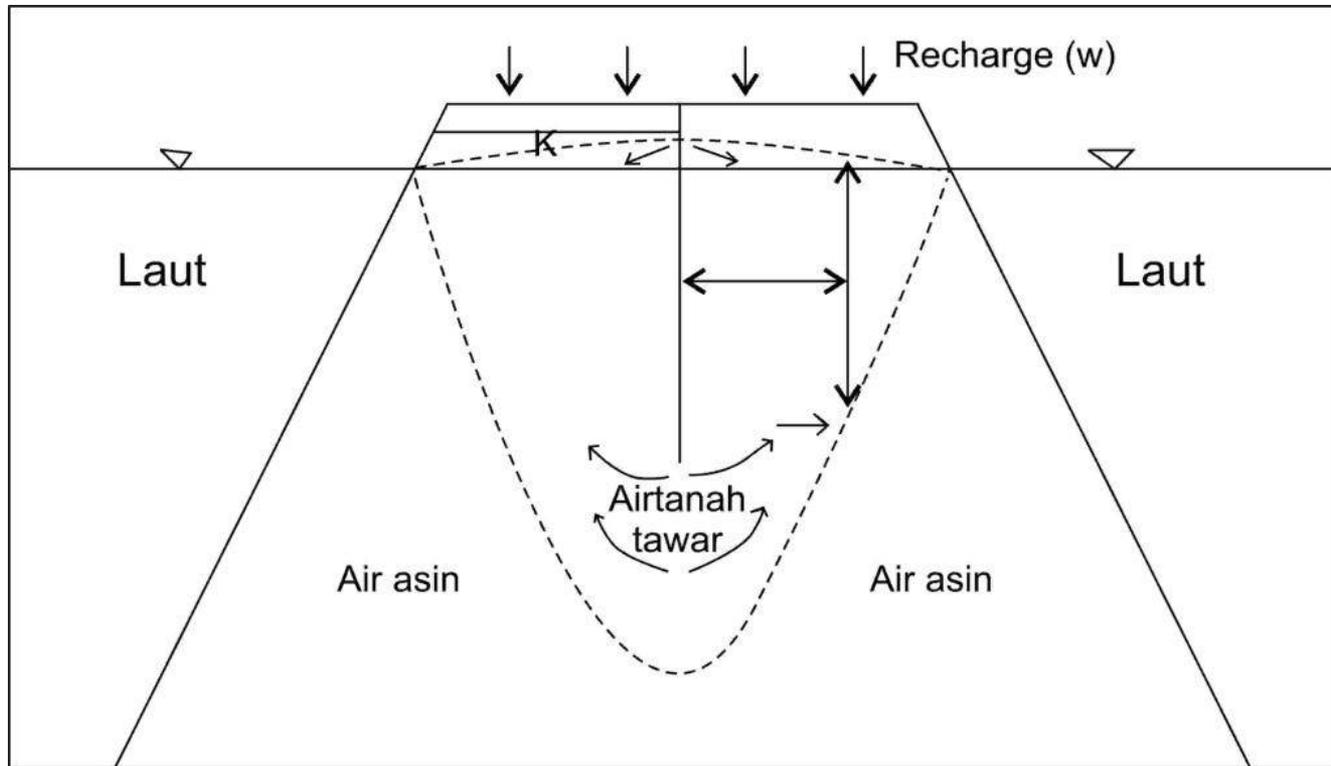
Q : aliran airtanah tawar (debit aliran airtanah/satuan luas akuifer)

Dengan demikian panjang penyusupan air laut pada akuifer pantai tergantung :

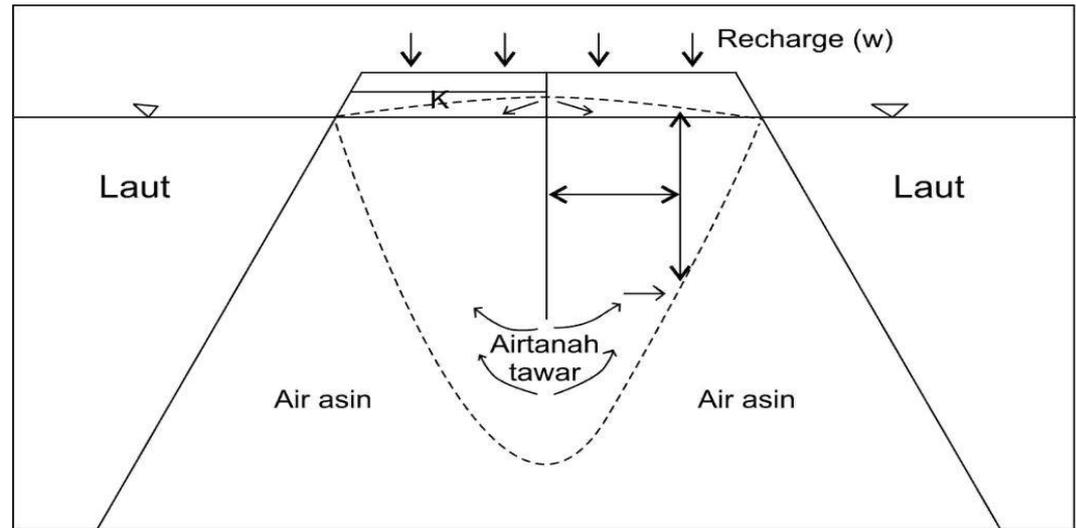
- Tebal akuifer atau tebal zone jenuh air
- Koefisien kelulusan air
- Debit aliran airtanah per satuan luas akuifer

Penyusupan air laut di suatu pulau kecil

Pulau yang di tengah lautan berbentuk relatif bulat, terdiri atas batuan lulus air. Di pinggir pulau akan terjadi kontak langsung antara airtanah tawar dengan air laut.



$R$  : jari-jari pulau  
 $Q$  : debit  
 $K$  : koefisien kelulusan air  
 $W$  : *recharge* (air hujan)



Dengan menggunakan Du Poit assumption dan Ghyben Herzberg Relation'

$Q = 2 \pi r K (1,025 h) \frac{(0,025)}{}$	persamaan 1
$dQ = 2 \pi r W dr$	persamaan 2
$Q = \pi r^2 W$	persamaan 3
$\frac{Wr dr}{0,0512 K} = h dh$	persamaan 1 & 3

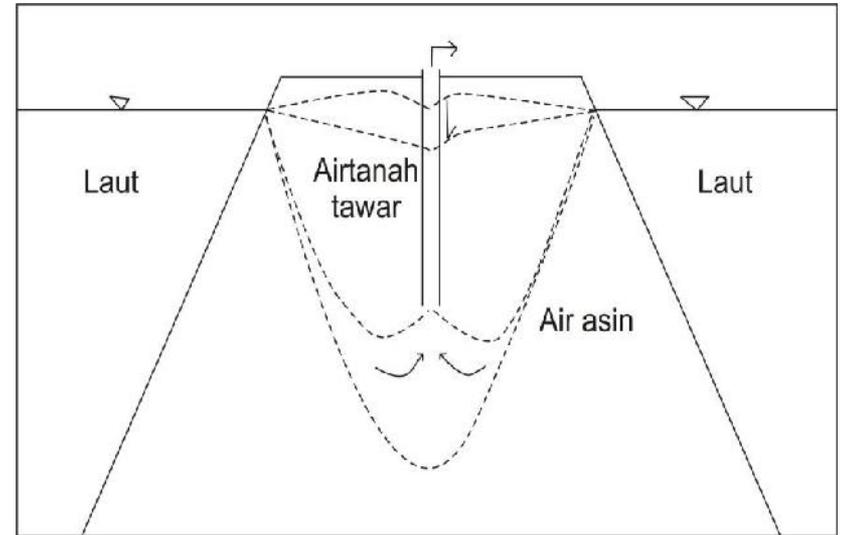
Kondisi batas  $h = 0$  jika  $r = R$

$$h^2 = \frac{(R^2 - r^2)}{0,0512}$$

Penurunan airtanah secara tegak dengan sumur bor di suatu pulau kecil tidak cocok.

Sebaiknya dengan penurunan airtanah secara mendatar melalui serambi.

Misalnya dengan menggunakan pipa atau dibuat kanal untuk pengumpulan airtanah.



Batas kedalaman airtanah tawar di seberang tempat di pulau kecil tergantung :

- Banyaknya air hujan
- Ukuran pulau
- Koefisien kelulusan air

Pemanfaatan airtanah di pulau kecil dengan sistem penurunan tegak/sumur bor dalam, maka lama kelamaan yang terpompa keluar adalah air asin.

# Penentuan penyusupan air laut pada akuifer pantai

Penyusupan air laut pada akuifer pantai, mengakibatkan perubahan komposisi airtanahnya, dengan cara :

- Reaksi antara air laut dengan mineral-mineral yang terdapat dalam akuifer
- Reaksi sulfat dan penambahan karbon atau asam lemah yang lain
- Terjadi pelarutan dan pengendapan

Perubahan total hanya terjadi pada yang ketiga. Disini akan diketahui bahwa ion Cl dan Na lebih dominan pada air laut, sedangkan pada airtanah ion yang dominan  $\text{CO}_3$  dan  $\text{HCO}_3$ .

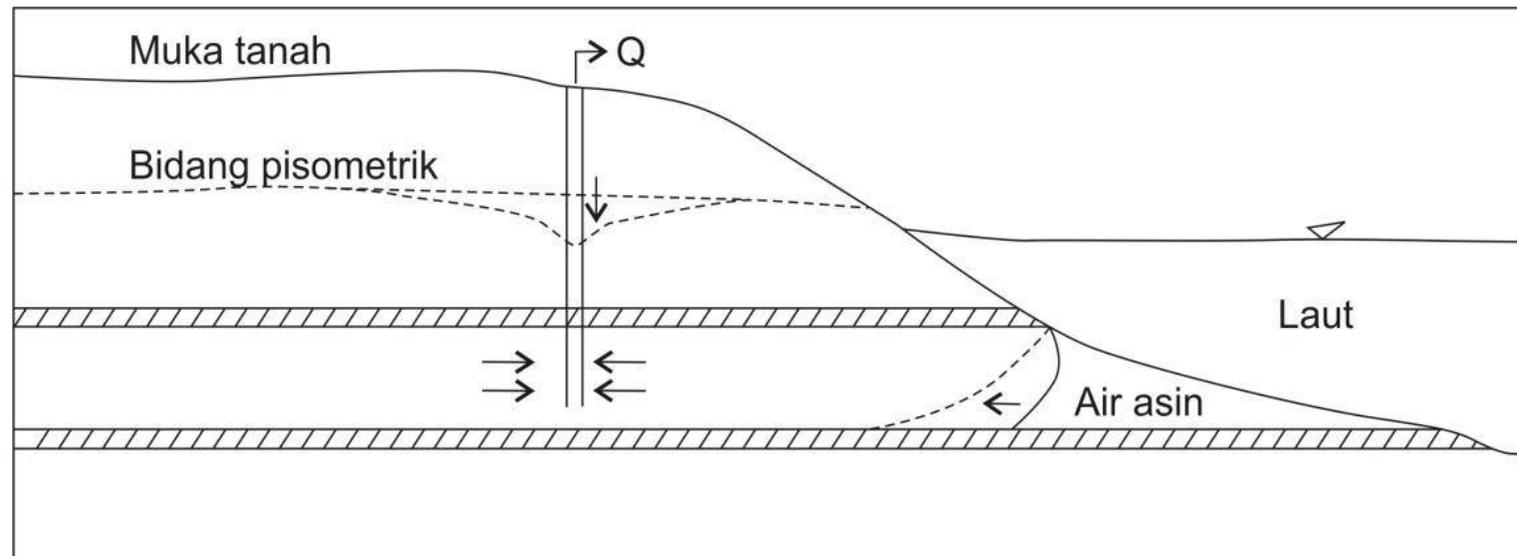
Komposisi airtanah akan bertambah dengan ion Cl. Untuk mengetahui adanya penyusupan tersebut dapat ditentukan dengan analisis kimia yang disebut perbandingan klorida bikarbonat (*Chlorida Bicarbonate Ratio*).

# Pengendalian penyusupan air laut pada akuifer pantai

- Mengurangi pemompaan di daerah pantai
- Membuat pengisian buatan (*artificial recharge*) pada akuifer pantai.
- Memompa air laut yang terletak pada akuifer pantai
- Membuat penghalang di bawah tanah di daerah pantai.

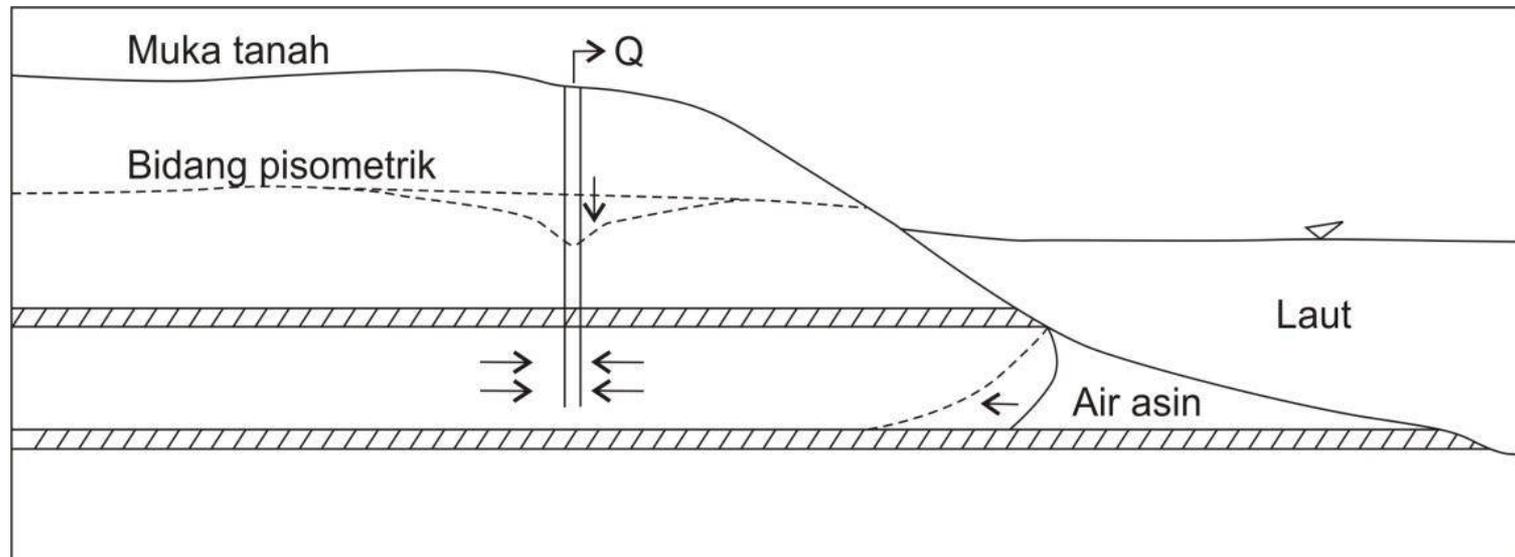
## Mengurangi pemompaan di daerah pantai

Pemompaan airtanah yang berlebihan akan mengganggu kesetimbangan muka airtanah /bidang pisometrik akan turun air laut mengisi kekosongan yang ditinggalkan oleh airtanah tawar, maka terjadi penyusupan tersebut.



# Membuat pengisian buatan

- Sumur pengisian membuat sumur dalam yang menembus pada akuifer dan memasukkan air permukaan dalam akuifer tersebut.
- *Spreading* menyebarkan air permukaan yang kelebihan dengan membuat parit-parit sehingga dengan parit tersebut terjadi penambahan airtanah.

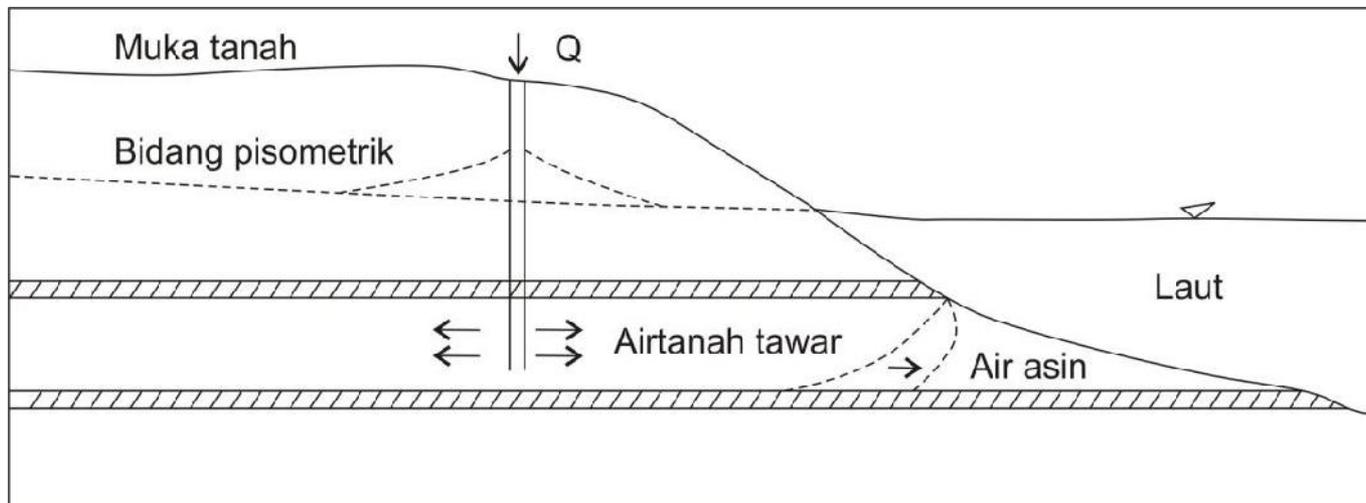


## Memompa air laut yang terletak pada akuifer pantai

Pemboran di pantai dan pada akuifer yang berisi air asin diberi pipa saringan seperti halnya konstruksi sumur dalam pada airtanah biasa. Bedanya di sini yang kita pompa adalah air asinnya. Dengan keluarnya air asin maka airtanah tawar akan mengisi kekosongan yang ditinggalkan oleh air asin. Akibatnya bidang batas antara air asin dan airtanah tawar pada akuifer tersebut bergeser ke arah laut.

# Membuat penghalang di bawah tanah di daerah pantai

- Menyebarkan air tawar di permukaan dan air tersebut masuk ke dalam tanah, sehingga di bawah tempat penyebaran air tawar tersebut akan menjadi tinggi seolah olah seperti penghalang.
- Membuat semacam bendungan di bawah tanah yang membatasi antara airtanah tawar dengan air asin. Bendungan tersebut dapat berupa lapisan kedap air/lapisan aspal.
- Menginjeksi air tawar kedalam akuifer di tepi pantai.





Pengisian airtanah buatan (*artificial recharge*) memasukkan air permukaan ke dalam tanah dengan maksud menambah jumlah airtanah.

Pengisian airtanah, dilakukan apabila tubuh air permukaan tidak dipergunakan untuk keperluan lain atau terdapat kelebihan air permukaan.

### Tujuan :

- mengurangi & mencegah penurunan airtanah,
- mengurangi & mencegah penyusupan air asin pada akuifer pantai, dan
  - menambah airtanah.

Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pengisian airtanah :

- Kondisi geologi atau geohidrologi, meliputi : kondisi cekungan airtanah, lapisan pembawa air, kapasitas, dsb.
- Jumlah & kualitas air yang dipergunakan untuk pengisian.
- Tingkat peresapan & kecepatan pengisian airtanah
- Penggunaan airtanah
- Efisiensi atau pertimbangan ekonomis.

# Metode pengisian airtanah buatan

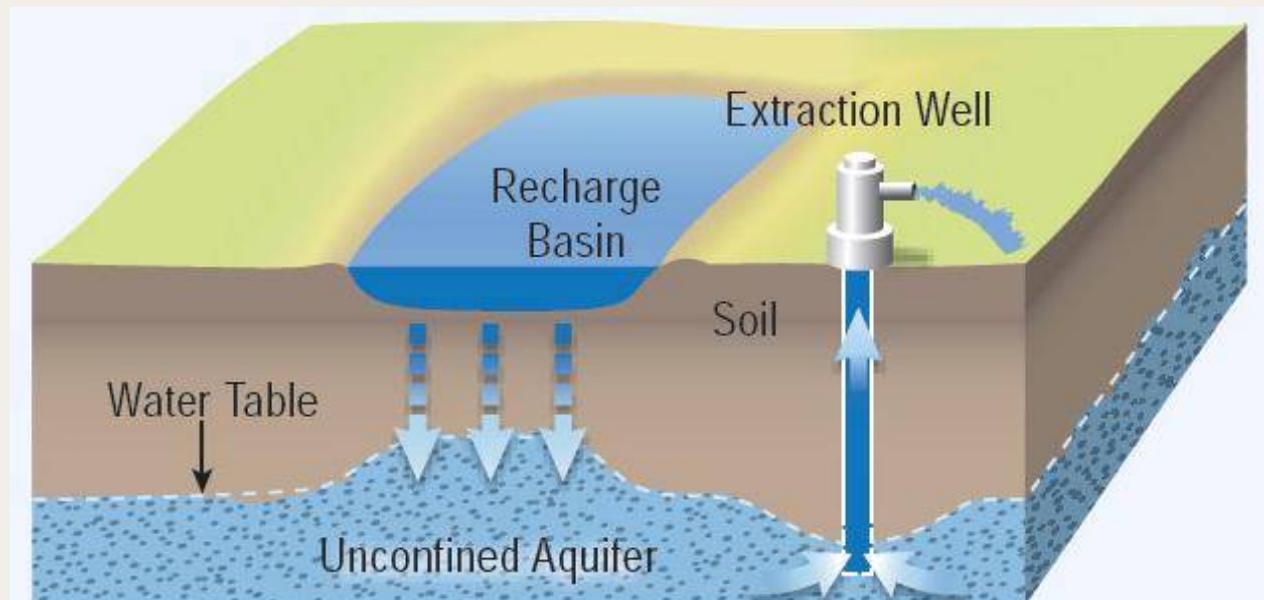
1. Metode penyebaran air di permukaan (*water spreading*), meliputi :
  - a) Metode cekungan (*basin method*)
  - b) Metode parit (*furrow method*)
  - c) Metode saluran alam (*natural channel method*)
  - d) Metode perendaman (*flooding method*)
  - e) Metode irigasi (*irrigation method*)
2. Metode pengisian melalui lubang galian
3. Metode pengisian melalui lubang injeksi
4. Metode *induced recharge*

# 1. Metode penyebaran air di permukaan

menyebarkan air di permukaan tanah agar penyerapan yang berlangsung lebih besar sehingga menambah jumlah airtanah.

## a) Metode Cekungan

air permukaan dialirkan ke suatu cekungan buatan. Air yang dimasukkan sedikit mengandung lumpur, agar tidak menutup cekungan dan mengurangi peresapan air.

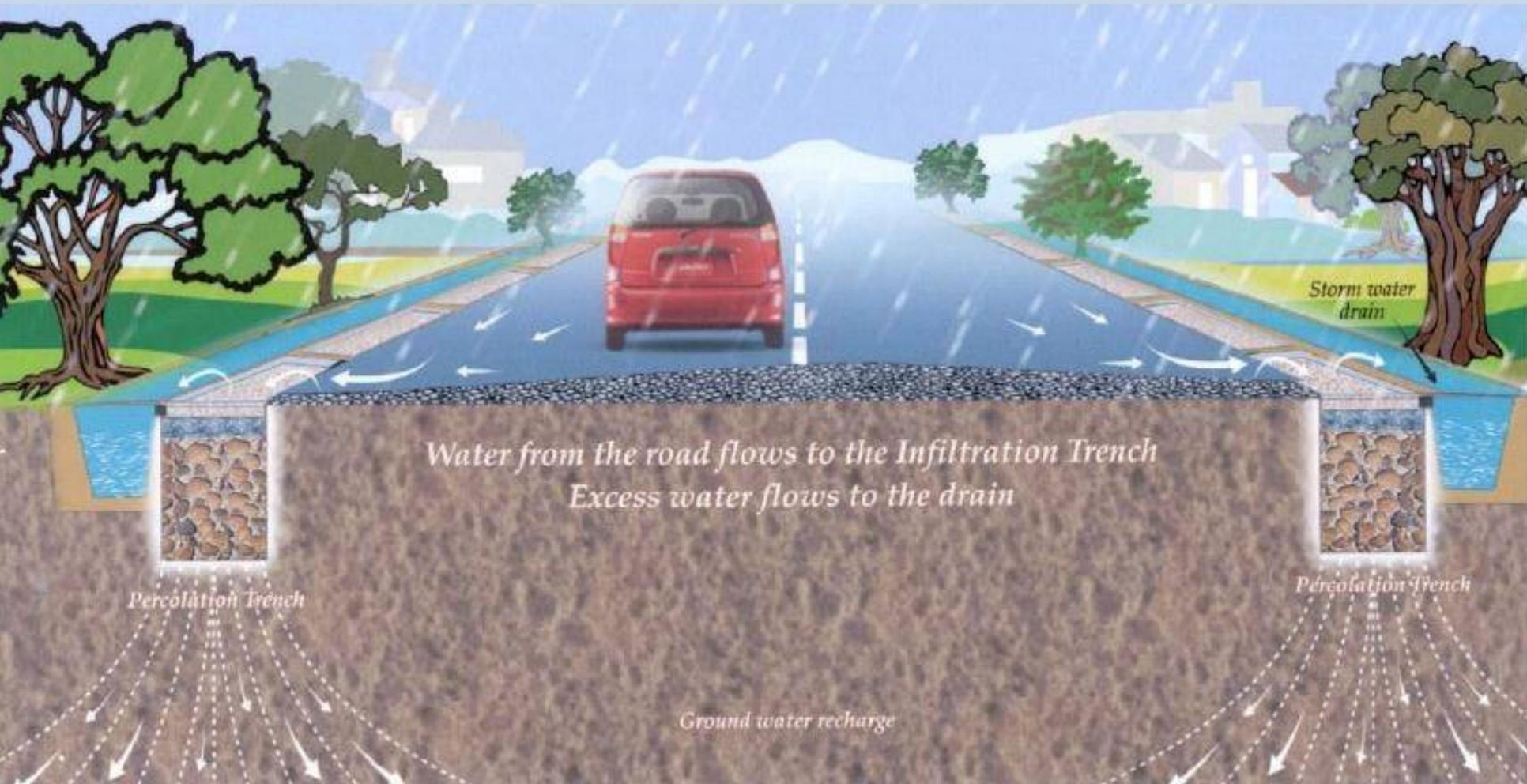


# 1. Metode penyebaran air di permukaan

## b) Metode Parit

mendistribusikan air permukaan pada suatu alur atau parit-parit kecil yang sejajar, dangkal dengan dasar yang rata.

- Parit dibangun dengan ukuran lebar 0,5 – 1 meter; kedalaman 1 – 1,5 meter dan panjang 10 – 15 meter. Parit secara gradasi dari bawah ke atas diisi berangkal kerakal pasir kasar.
- Metode ini memerlukan pemeliharaan yang lebih dibandingkan metode cekungan, karena lapisan pasir kasar perlu dibersihkan secara berkala.



# 1. Metode penyebaran air di permukaan

## c) Metode Saluran Alam

memanfaatkan aliran sungai dengan membuat *checkdam* (bendung) untuk memperlambat aliran air dan memperpanjang waktu kontak air dengan tanah, sehingga peresapan yang terjadi lebih besar.

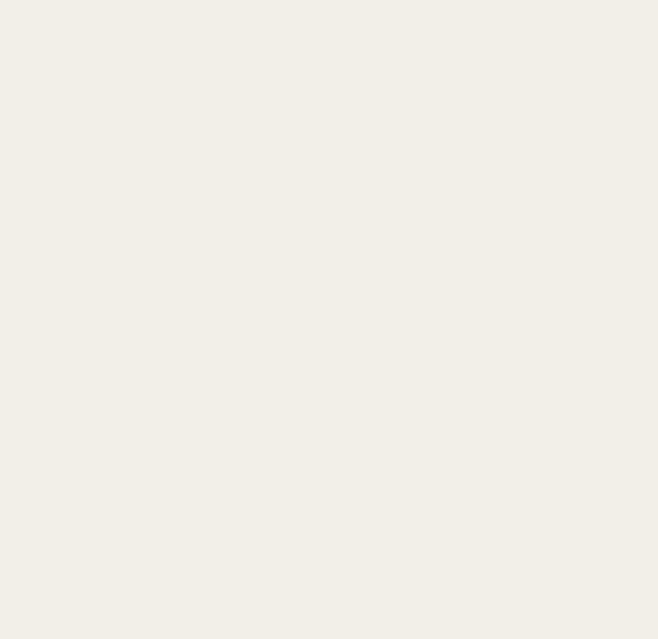
- Metode ini dipergunakan pada sungai influent (*lossing stream*).

# 1. Metode penyebaran air di permukaan

## d) Metode Perendaman

merendam tanah dengan air.

- Pada daerah yang datar & luas, kerap kali luas perendaman menyimpang dari yang telah direncanakan, maka sekeliling daerah perendaman dibuat parit-parit yang nantinya masuk ke saluran induk dan kembali disebarakan di daerah perendaman.
- Cara ini jarang dilakukan karena alirannya lambat, sehingga endapan lumpurnya besar yang akan menutup pori-pori tanah.



Courtesy Phillip A. Fortnam, Central Arizona Project

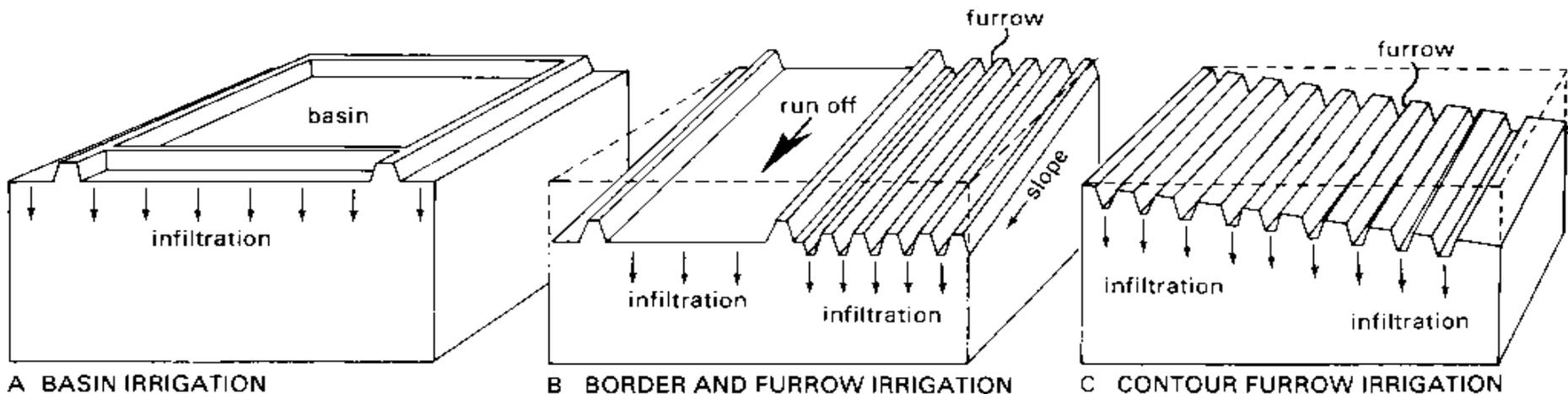
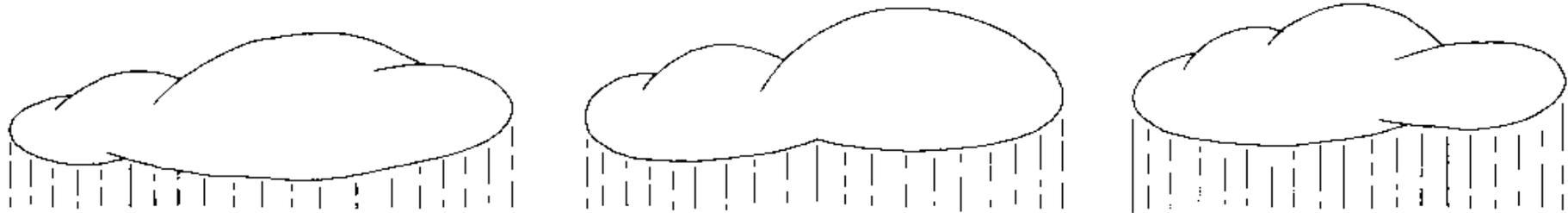


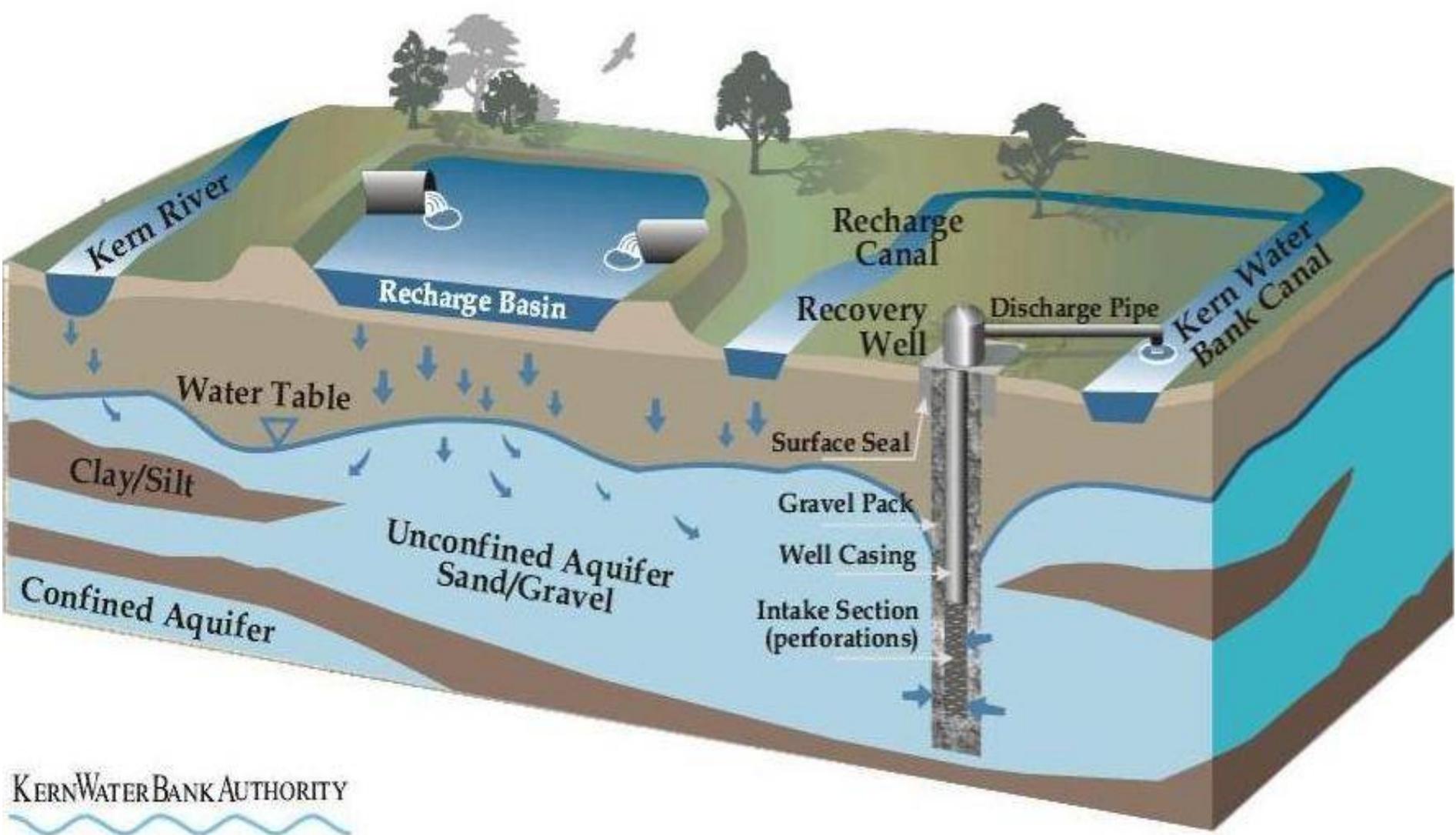
Courtesy Phillip A. Fortnam, Central Arizona Project

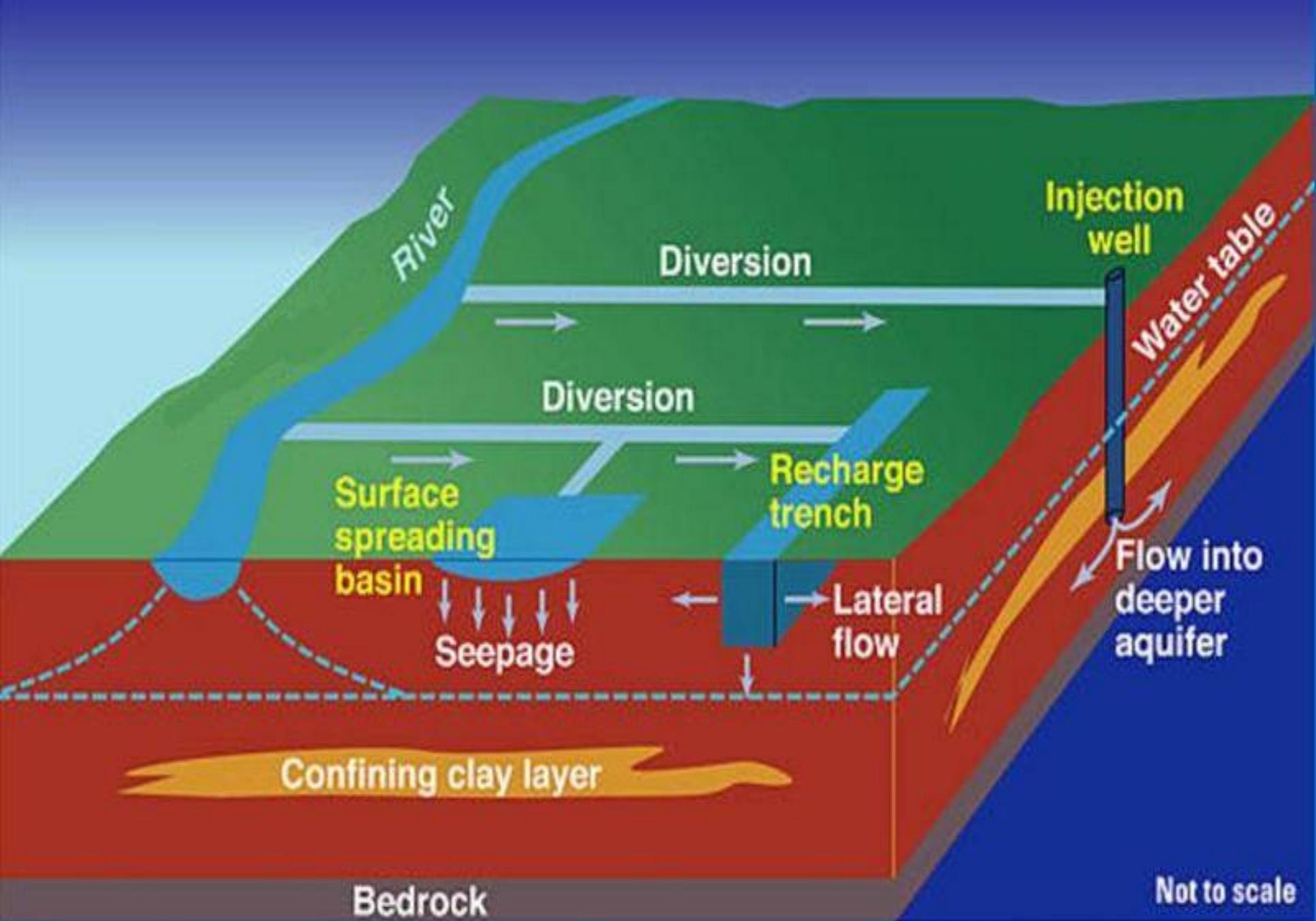
# 1. Metode penyebaran air di permukaan

## e) Metode Irigasi

saluran irigasi yang sistematis & terbuka mengakibatkan peresapan bertambah besar.







## 2. Metode pengisian melalui lubang galian

- Diterapkan pada daerah tersusun oleh batuan atau tanah kedap air.
- Apabila lapisan kedap air relatif tipis atau dangkal dilakukan penggalian hingga mencapai lapisan lulus air guna meningkatkan kualitas penyaringan pada bagian dasar diberikan kerikil pembalut.
- Air permukaan yang kelebihan dimasukkan dalam lubang galian yang ukurannya tergantung keperluannya meningkatkan peresapan yang akan menambah jumlah airtanah.

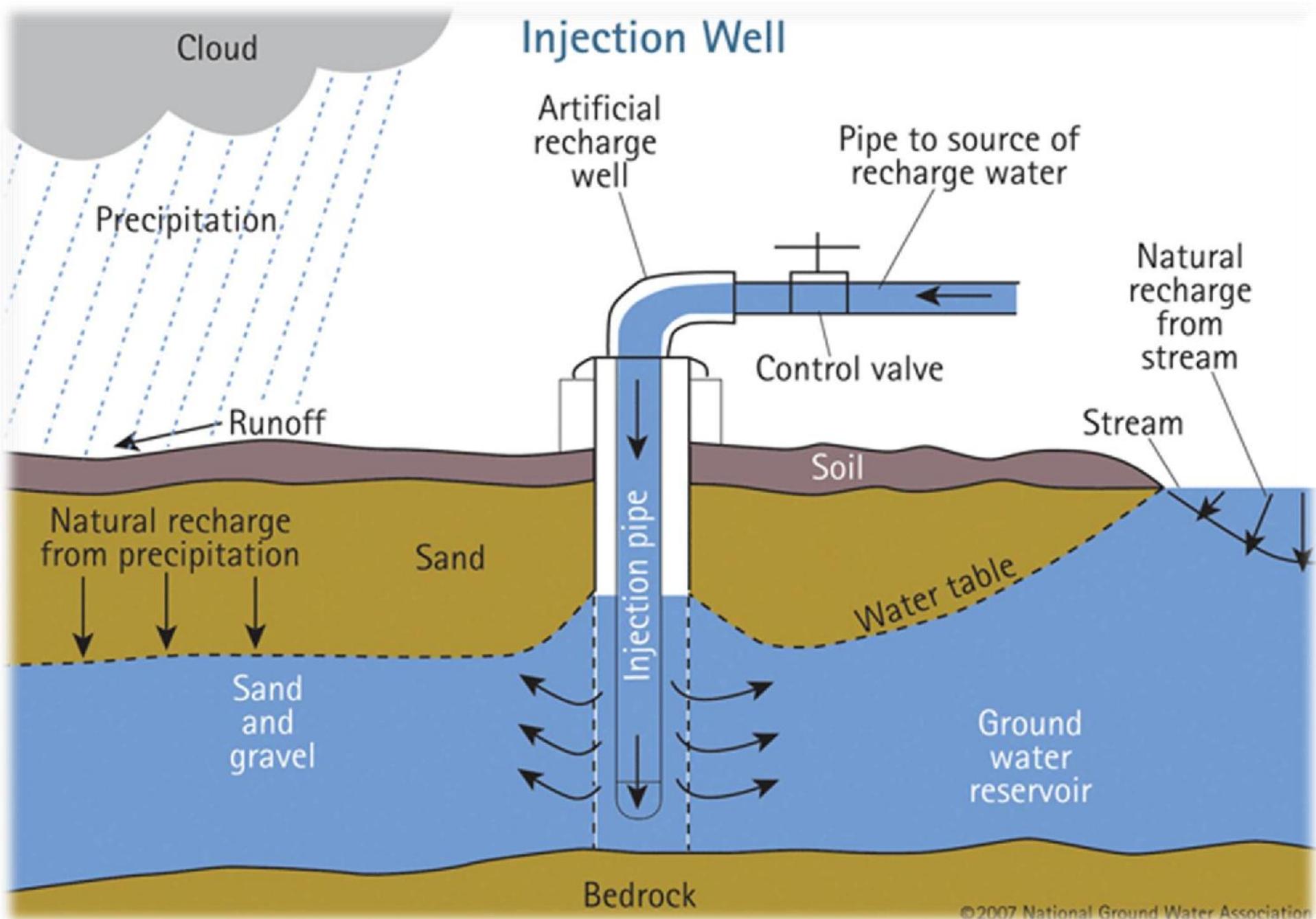
### 3. Metode pengisian melalui sumur injeksi

Pada akuifer tertekan  $Q = \frac{2 K b (h_w - h_o)}{\ln (r_o/r_w)}$

Pada akuifer bebas  $Q = \frac{K (h_w^2 - h_o^2)}{\ln (r_o/r_w)}$

Metode sumur injeksi baik diterapkan pada :

- Daerah sempit atau padat pemukiman, perkotaan, industri.
- Akuifer tertekan relatif dalam.
- Air yang diinjeksikan berkualitas baik dan bebas lumpur.



©2007 National Ground Water Association

Sumber : [www.ngwa.org](http://www.ngwa.org)

## 4. Metode *induced recharge* tidak langsung

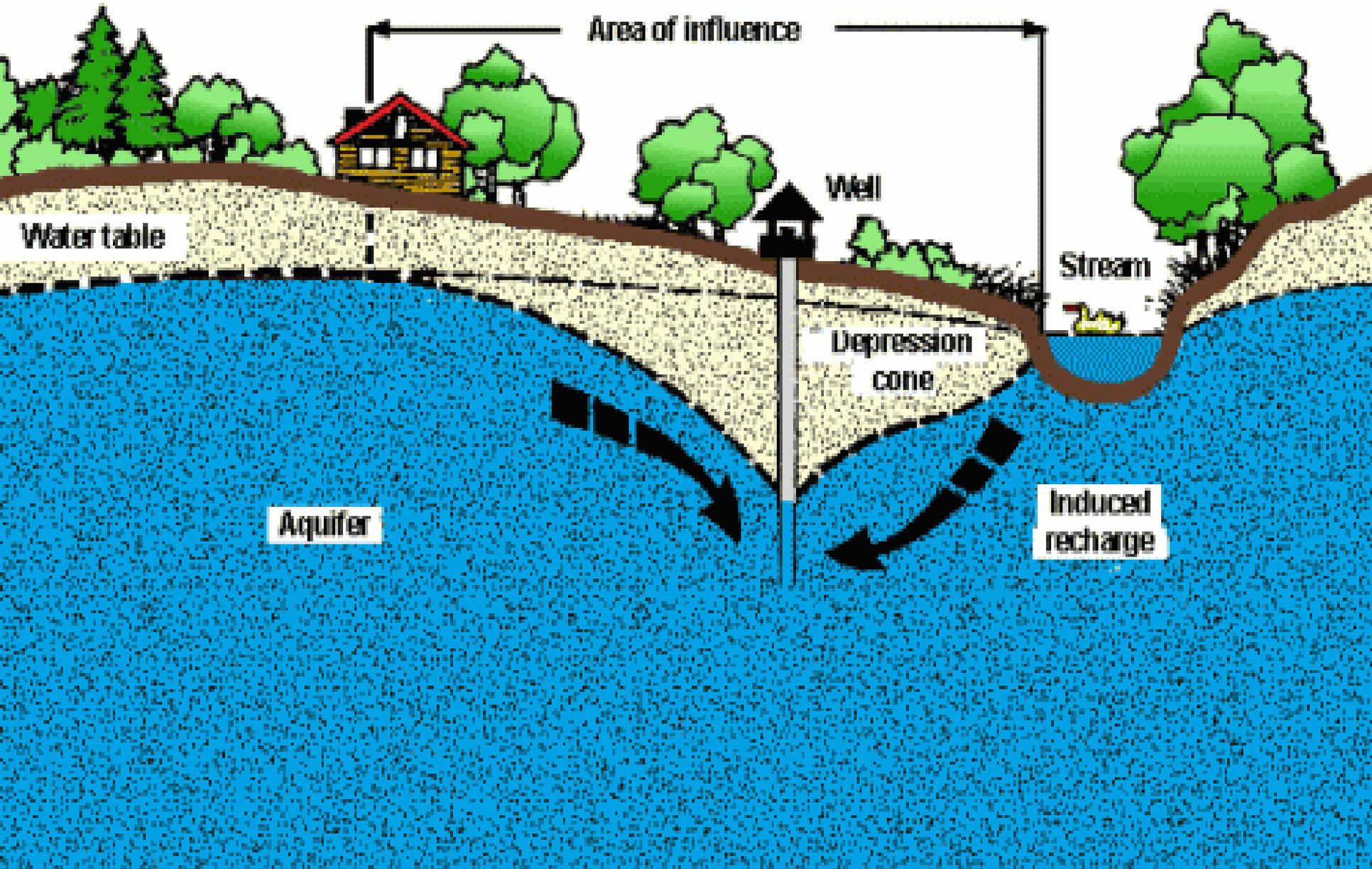
menurunkan muka airtanah disekitar sumber air permukaan dengan sumur pompa, sehingga peresapan ke bawah bertambah.

Kuantitas air yang meresap dengan metode ini tergantung pada :

- Jenis sumur pompa.
- Kecepatan pemompaan airtanah.
- Kelulusan, jenis atau kondisi tanah/batuan.
- Jarak sumber air permukaan dengan sumur pompa.
- Arah aliran airtanah

Dengan demikian,

- airtanah mengalami proses mineralisasi lebih intensif daripada air permukaan;
- penyaringan airtanah lebih intensif selama peresapannya; dan
- terjadi pencampuran antara air permukaan dengan airtanah, sehingga kualitasnya menjadi lebih baik.



# Kegunaan

- Dapat melindungi & mengatur air limpasan, serta aliran permukaan.
- Menambah kuantitas airtanah.
- Mengurangi & mencegah penyusupan air asin pada akuifer pantai.
- Mengurangi & mencegah penurunan muka airtanah mencegah terjadinya amblesan.
- Menstabilkan & memperbesar daya dukung tanah.
- Sebagai tempat penyimpanan airtanah.
- Sebagai persediaan air selama musim kering.
- Penyediaan air pada pemanfaatan energi geothermal.
- Menghilangkan/mengurangi adanya larutan zat padat dengan cara peresapan melalui tanah/batuan.
- Mencegah penghancuran struktur reservoir.
- Menjaga keseimbangan siklus hidrologi
- Menjaga kelestarian airtanah di alam.

# Keuntungan

- Tidak ada atau sedikit kehilangan air akibat penguapan.
- Tidak memerlukan konstruksi/instalasi khusus, misalnya sebagai bendungan dan instalasi penjernih air, dsb.
- Sangat baik untuk persediaan air dimusim kering dengan kualitas air yang baik.

TERIMAKASIH