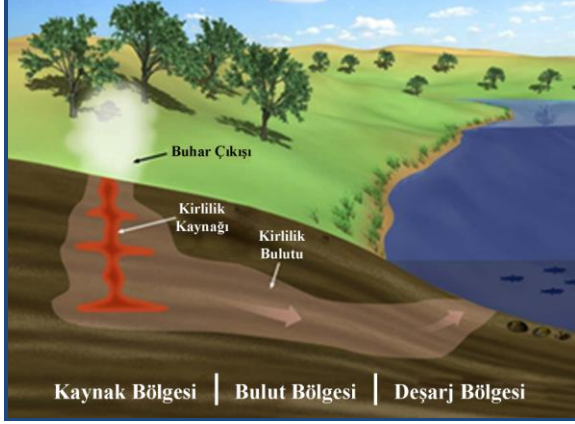




KİRLENMİŞ SAHALARDA KARŞILAŞILABİLECEK KİRLETİCİLER VE UYGUN TEKNOLOJİLER:

TEMEL BİLGİLER VE ÖRNEK UYGULAMALAR

Prof.Dr. İpek İmamoğlu

ORTA DOĞU TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
Çevre Mühendisliği Bölümü



Güçlü bireyler.
Güçlü toplumlar.

- Teknoloji seçiminde ön bilgiler
- Teknolojilerin sınıflandırılması
 - Kirlenmiş ortama göre
 - Kirletici maddelere göre
 - Teknolojinin temel çalışma prensibine göre
- En çok tercih edilen teknolojiler (ABD, İngiltere'den örnekler)
- Türkiye'nin potansiyel kirlenmiş sahaları için önde gelen parametreler
- Teknoloji seçiminde kriterler
- Teknolojilerin örneklerle açıklanması

Teknoloji Seçimi

➤ **Kirleticiye özgü parametreler**

- Uçuculuk
- Suda çözünürlük vb.

➤ **Kirlenmiş ortama özgü parametreler**

- Toprak
- Yeraltı suyu

➤ **Sahaya özgü parametreler**

- Hidrojeoloji
- Stratigrafi

➤ **Kavramsal saha modeli**

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

- Partikül boyutu dağılımı
- Homojenite ve izotropi
- Hacim/Yığın yoğunluğu
- Partikül yoğunluğu
- Geçirgenlik
- Nem
- pH
- Redoks potansiyeli (Eh)
- Oktanol/su dağılım katsayısı (K_{ow})
- Hümik içerik
- Toplam organik karbon (TOK)
- Elektron alıcılar
- Yağ ve gres



Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

Geçirgenlik

- Yerinde temizleme teknolojilerinde öncelikli önemi olan bir parametredir.
- Toprak yıkama sıvılarının kirleticilerle teması ve giderim etkinliği düşük toprak geçirgenliği ile ya da farklı toprak katmanları arasındaki geçirgenlik farkları ile azalabilir.
- Düşük geçirgenlik hava ve buharın toprak ortamından geçişini kısıtlar. (ör. SVE prosesinde VOClerin buharlaşmasını azaltır.)
- Yerinde biyoremediasyon çalışmalarında kullanılan nütrient çözeltileri düşük geçirgenliğe sahip olan topraklarda istenen sürede nüfuz edemeyebilir.
- Yerinde vitrifikasyon çalışmalarını, buhar çıkışını yavaşlattığı için sınırlandırır.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

Partikül boyutu dağılımı

- Çoğu toprak temizleme teknolojisi için önemli bir faktördür.
- Genellikle kaba taneli, gevşek (ör. kum ve ince çakıl) yapıların temizlenmesi kolaydır.
- Değişken partikül yapısı nütrient beslemesinde homojen olmayan dağılıma neden olur ve pek çok arıtma prosesinde tutarsız giderim hızlarına yol açar.
- Büyük mıcır ve kaba çakıl yapıdaki topraklar vitrifikasyon ve kimyasal ekstraksiyon prosesleri için tercih edilmez. Ayrıca solidifikasyon/stabilizasyon teknolojileri için de uygun olmayabilir.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ **Homojenite ve izotropi**

- Homojen olmayan topraklar (ör. birbirini izleyen kil ve kum katmanları) kirliliği, ve yeraltına verilen temizleyici maddeleri yönlendirebilir ve temizleme veriminde düşüşe neden olabilir.
- Bu durum yüzey altı akışkan hareketlerine dayanan yerinde temizleme teknolojilerini (toprak yıkama, toprak gazı ekstraksiyonu, vakum ekstraksiyonu, biyobozunma) zorlaştırmaktadır.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ Hacim/Yığın yoğunluğu

➤ Toprağın içerisindeki su ve boşluklar da dâhil olmak üzere birim hacimde toprağın ağırlığını ifade eden birimdir.

➤ Malzeme taşıma/yönetme hesaplarında ağırlığı hacime çevirme hesabında

➤ Uygun karıştırma ve ısı transferi koşullarının oluşup oluşmayacağını belirlenmesinde kullanılır.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ **Partikül yoğunluğu**

- Toprak parçacığının özgül ağırlığını ifade eden parametredir.
- Partikül yoğunluğundaki değişiklikler ayırma proseslerinde (ör.ağır metallerin ayrılması) veya toprak yıkama prosesinde önemli rol oynar.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ **Nem**

- Yüksek nem içeriği, havanın/gazların toprak içerisindeki hareketini engeller (vakum ekstraksiyon tekniğinde önemlidir).
- Hafriyat ve malzeme taşıma sorunlarına neden olabilir.
- Vitrifikasyon ve ısıtma işlemlerinde, enerji gereksinimine bağlı maliyetleri arttırır.
- Yerinden alınmadan gerçekleştirilen biyolojik arıtma işlemlerinin verimini arttırır.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ pH

- Atığın veya kirlenmiş toprağın pH'ı pek çok temizleme teknolojisi için önemlidir.
- İnorganik kirleticilerin çözünürlüğü pH'tan etkilenir.
- Genellikle yüksek pH'lı topraklarda inorganiklerin hareket kabiliyeti azalır.
- İyon değişimi ve flokülasyon prosesleri çok düşük veya çok yüksek pH'larda etkilenir.
- Biyoremediasyon prosesindeki mikroorganizma çeşitliliği ve faaliyetleri, aşırı pH aralıklarından etkilenebilir.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ Redoks potansiyeli (Eh)

➤ Kimyasal yükseltgenme, indirgenme reaksiyonlarının söz konusu olduğu durumlarda, ele alınan kirlenmiş toprağın yükseltgenme/indirgenme (redoks) potansiyelini ortaya koyar.

➤ Örnekler: Sıvı fazda düşük Eh şartlarının sağlanması, bazı halojenli organik bileşiklerin anaerobik biyolojik bozunmasını destekler.

➤ Diğer yandan, organiklerin aerobik oksidasyon ile CO_2 ve H_2O 'ya yükseltgenebilmesi için yüksek Eh şartlarının sağlanması gerekir.

➤ Siyanatların alkali klorlaması, kromun sülfid ile asidik koşullarda indirgenmesi için de Eh değerinin bilinmesine ihtiyaç vardır.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

- Oktanol/su dağılım katsayısı (K_{ow}) → **kirleticiye özel**
- Bir kimyasal maddenin organik faz (ör. solvent) ile su fazı arasında nasıl dağılım göstereceğini ifade eden katsayıdır.
- K_{ow} çevre sistemlerinde organik kimyasalların akıbetini açıklamak için kullanılan önemli bir parametredir. Bu parametre sudaki çözünürlük ve toprakta soğurulma katsayısı ile ilişkilidir.
- Düşük Kow değerine (<10) sahip kimyasalların hidrofilik olduğu, suda yüksek çözünürlüğe sahip olduğu, yağ/sediman tutunma katsayılarının küçük olduğu ve sucul organizmalarda biyobirikiminin düşük olacağı söylenebilir.
- Büyük Kow değerine ($>10^4$) sahip kimyasallar sudan kaçınır, suda çözünürlüğü düşüktür, hümik topraklar gibi organik yüzeylerde tutunma eğilimi gösterir ve sucul organizmalarda biyobirikim yapar.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ **Hümkik içerik**

- Toprakta doğal olarak bulunan organik içeriğin bozunabilir bölümüdür.
- Yüksek hümkik içerik; toprağa bağlanır, organiklerin toprağa tutunmasını arttırır ve hareket kabiliyetini kısıtlar, yeraltı suyuna kirleticilerin geçişini azaltır.
- Organik maddelerin yüksek soğurma özelliği nedeniyle toprak gazı ekstraksiyonu, toprak yıkama gibi prosesleri kısıtlar.
- Biyoremediasyon ve kimyasal oksitlenmeyi olumsuz etkileyecek şekilde aşırı oksijen ihtiyacına yol açabilir.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

- **Toplam Organik Karbon (TOK)**
- Biyobozunma için uygun olan kirleticilerin varlığının bir göstergesi olarak kullanılır (kirletici miktarına dair bilgi vermez).
- Toprağın yapısındaki doğal organikler ve organik kimyasal kirleticilerin tamamının varlığına işaret eder.
- Toprak TOK değeri indirgenme/yükseltgenme tepkimelerinde sadece kirletici için değil, topraktaki organik içerik için de ayrıca kimyasal madde eklenmesi gerekeceğinin habercisidir.
- Biyoremediasyon yöntemlerinden özellikle Biyoventilasyon yönteminin uygunluğu için toprakta yüksek TOK miktarı önerilir.

Toprak Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ **Elektron alıcılar**

- Biyobozunur kirleticilerin akıbetinin belirlenmesinde oksijen, nitrat, demir, mangan, sülfat gibi elektron alıcıların varlığı önemlidir.

➤ **Yağ ve gres**

- Toprak parçacıklarını kaplayarak, toprağın bağ kurma kabiliyetini zayıflatır, karıştırma gibi işlemleri zorlaştırır. Benzer şekilde, indirgenme/yükseltgenme reaksiyonlarında reaktif madde ile atığın temasını zorlaştırabilir ve reaksiyon verimini olumsuz etkiler.

Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler



- pH
- Redoks potansiyeli (Eh)
- Organik içerik (BOİ, KOİ ve TOK)
- Yağ ve gres
- Askıda Katı Madde (AKM)
- Diğer

Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ pH

- Pek çok arıtma prosesinin uygulanabilirliğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. pH'nın arıtma proseslerine özel ayarlanması gerekmektedir.
- pH değişimleri ile kirleticilerin çözünürlüğü ve toksisitesi değişebilir.
- Düşük pH kimyasal indirgenme/yükseltgenme prosesleri ile girişim yapabilir.
- Aşırı pH seviyeleri biyolojik arıtma sistemlerinin uygulanmasını zorlaştırır.
- Ortamda bulunan metaller ve inorganik maddeler, fenolik ve azot içeren bileşikler ortam pH'ından etkilenir. (karbon adsorpsiyonu, iyon değişimi ve flokülasyon gibi prosesleri etkiler).

Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

- **Redoks potansiyeli (Eh)**
- pH ile birlikte indirgenme/yükseltgenme dengesinin durumunu ortaya koyar.
- Düşük/Eh anaerobik biyobozunmanın sağlanmasını ve bazı halojenli bileşiklerin halojensizleşerek bozunmasını destekler.

Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

- **Organik içerik (BOİ, KOİ ve TOK)**
- BOİ, KOİ ve TOK ölçümleri sırasıyla, kirleticinin biyobozunur, kimyasal olarak oksitlenebilir veya yanabilir özelliklerini gösterir.
- **Yağ ve gres**
- Yeraltı suyunda ayrı bir faz olarak bulunabilir.
- Düşük konsantrasyonlarda olsa dahi, birincil arıtma sistemlerini (ör. iyon değişim reçineleri, aktif karbon sistemleri gibi) tıkayabilir.
- Yağ ve gres içeriğine sahip suların ön arıtmadan geçirilmesi gerekir.

Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ Askıda Katı Madde (AKM)

➤ Arıtma ünitelerinin tıkanmasına neden olabileceği için, ön arıtma işlemine tabi tutulması gerekebilir.

➤ Havalandırmada AKM ile birlikte çökme potansiyeline karşı demir konsantrasyonları ve alkalinite ölçülmelidir.

➤ Diğer

➤ Temel anyonlar (klor, sülfat, fosfat ve nitar) ve katyonlar (kalsiyum, magnezyum, sodyum, ve potasyum) yerinde jeolojik-kimyasal etkileşimlerin, kirlilik çeşitliliğinin ve su içeren bölgeye hareketin değerlendirilmesinde önemlidir.

Yeraltı Suyu Kirliliğinin Temizlenmesinde Önemli Parametreler

➤ Diğer (devam)

- Jeolojik ve hidrolojik bilgiler planlama, temizleme ve izleme aşamaları için çok gereklidir.
- Yüzey altı hidrostratigrafisini (homojenite ve izotropi) değerlendirebilmek için detaylı bir jeolojik karakterizasyon çalışması gereklidir.
- Yeraltı suyunun ortalama akış hızının hesaplanması önemlidir. Ortalama akış hızı hidrolik iletkenlik, hidrolik gradyan (izleme kuyularındaki yeraltı suyu seviyesi kullanılarak hesaplanır) ve efektif porozite (literatürden elde edilen bilgilere göre tahmin edilebilir) verilerinden yola çıkarak hesaplanabilir.
- Tüm bu parametreler, temizlenecek sahada pompa testlerinin yapılmasını gerekli kılar.



Saha karakterizasyonu _VIDEO



Teknolojilerin Sınıflandırılması

➤ **YERİNDE (In-situ)**

➤ Hafriyat veya kazı gerektirmez

➤ **YERİNDEN ALINARAK (Ex-situ)**

➤ Sahada:

➤ Hafriyat veya kazı gerektirir

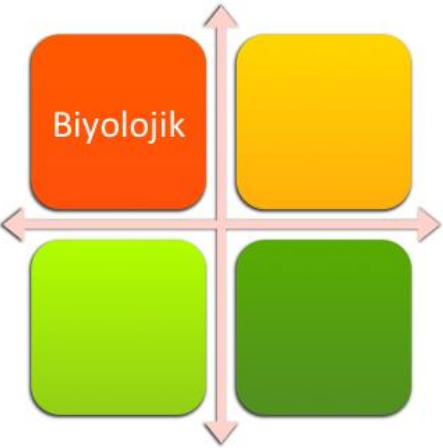
➤ Saha dışında:

➤ Hafriyat veya kazı + taşıma gerektirir

Teknolojilerin Sınıflandırması



- **Biyolojik:** aerobik veya anaerobik mikrobiyal aktivite ile kirleticilerin temizlenmesi
- **Fiziksel/kimyasal:** Kirleticilerin ya da sahanın fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerini, kirliliği kimyasal olarak dönüştürmek, ayırmak veya hapsetmek
- **Termal:** Kirleticilerin uçuculuğunu arttırarak topraktan ayırmak, yakmak veya ısıtarak parçalamak



Biyolojik İyileştirme Teknolojileri

TOPRAK

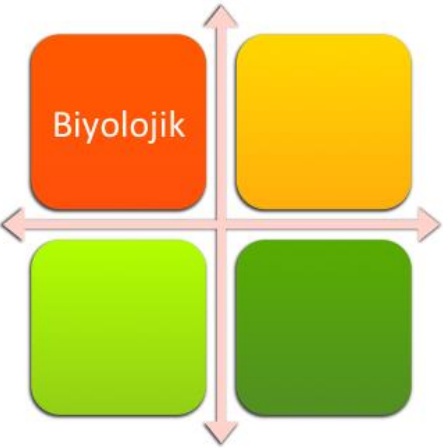
YERİNDE

- Biyoventilasyon
- Fitoremediasyon
- Geliştirilmiş Biyoremediasyon

YERALTI SUYU

YERİNDE

- Fitoremediasyon
- Geliştirilmiş Biyoremediasyon
- İzlemeli Doğal Giderim



Biyolojik İyileştirme Teknolojileri

TOPRAK

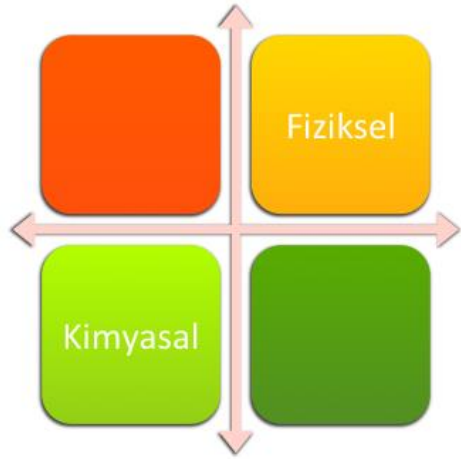
YERİNDEN ALINARAK

- Kompostlama
- Toprak Biyoyığınları
- Arazide Islah
- Siluri Faz Biyolojik Arıtım

YERALTI SUYU

YERİNDEN ALINARAK

- Biyoreaktör
- Yapay Sulak Alan



Fiziksel/Kimyasal İyileştirme Teknolojileri

YERALTI SUYU

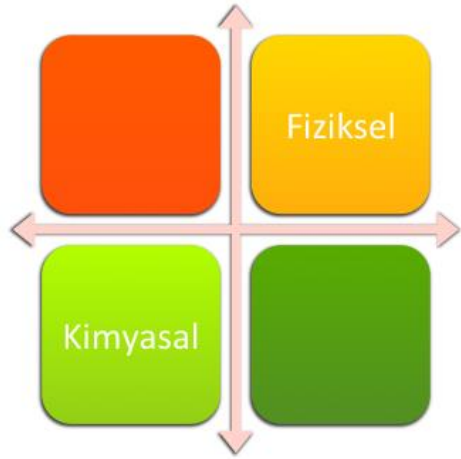
YERİNDEN ALINARAK (Ex-situ)

- Ayırma
- Yeraltı Suyu Pompalama
- Havalı Sıyırma
- Yağmurlama Sulama
- İleri Oksidasyon
- İyon değişimi
- Yumaklaştırma/Topaklaştırma/Çöktürme
- Adsorpsiyon/Absorpsiyon
- Granül Aktif Karbon

TOPRAK

YERİNDEN ALINARAK (Ex-situ)

- Kimyasal Ekstraksiyon
- Halojensizleştirme
- Kimyasal İndirgenme/Yükseltgenme
- Toprak Yıkama
- Solidifikasyon/Stabilizasyon
- Hafriyat/Saha dışına taşıma
- Yüzey Kapatma



Fiziksel/Kimyasal İyileştirme Teknolojileri

YERALTI SUYU

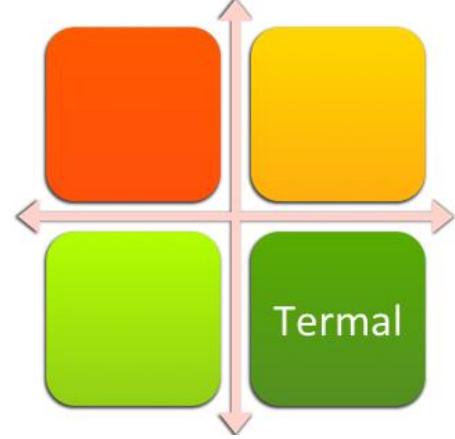
YERİNDE (In-Situ)

- Çift faz ekstraksiyonu
- Hava kabarcıklı arıtım
- Sıvı-gaz emişli arıtım
- Kuyu içi havalı sıyırma
- Kimyasal oksidasyon
- Isıl arıtım
- Pasif/reaktif arıtma bariyerleri
- Fiziksel bariyerler
- Yönlü kuyular

TOPRAK

YERİNDE (In-Situ)

- Elektrokinetik Ayırma
- Toprak Gazı Ekstraksiyonu
- Kimyasal Oksidasyon
- Toprak Yıkama
- Solidifikasyon/Stabilizasyon
- Yüzey Kapatma
- Çatlaklama



Termal İyileştirme Teknolojileri

TOPRAK

YERİNDEN ALINARAK

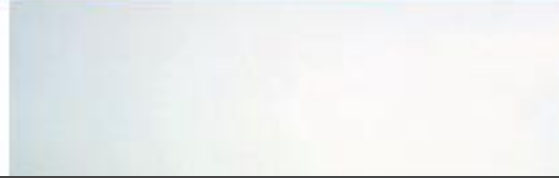
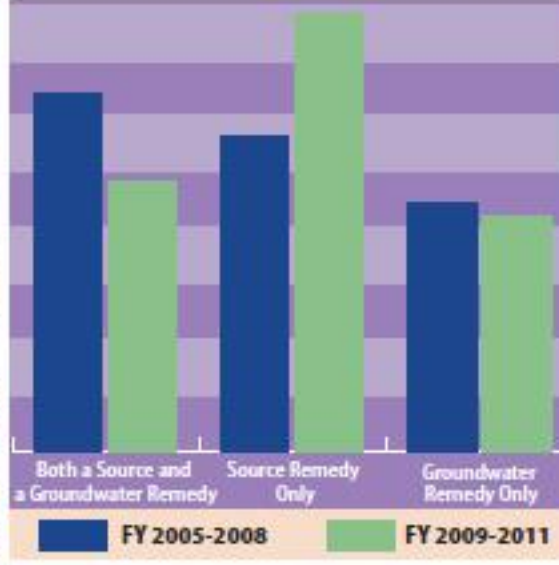
- Yakma
- Isıl Desorpsiyon
- Piroliz
- Açık Yakma/Açık Patlatma

TOPRAK

YERİNDE

- Isıl Arıtım

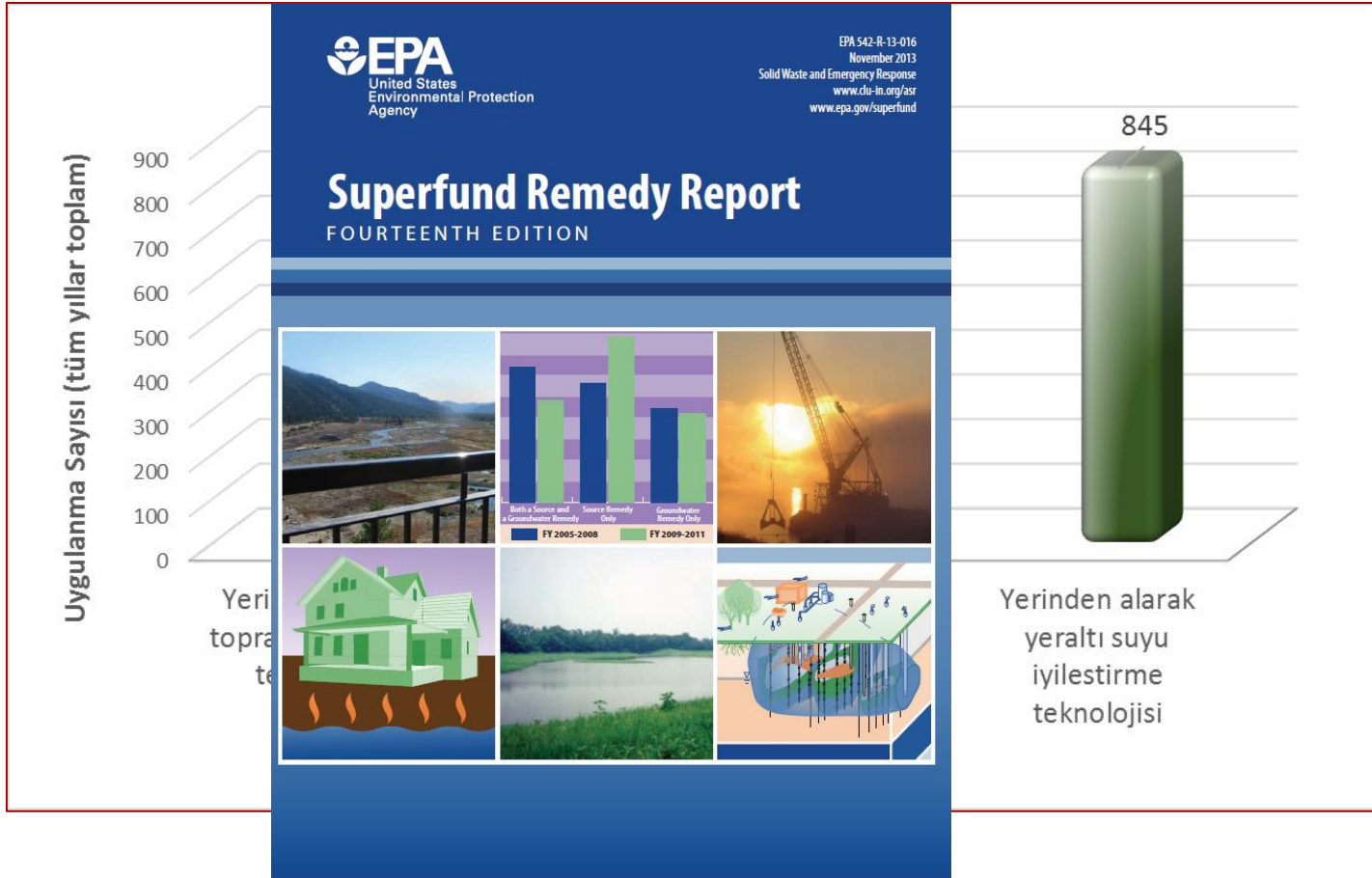




En çok tercih edilen teknolojiler?

ABD Çevre Koruma Ajansı'nın 29 yıllık verileri ve İngiltere'den veriler

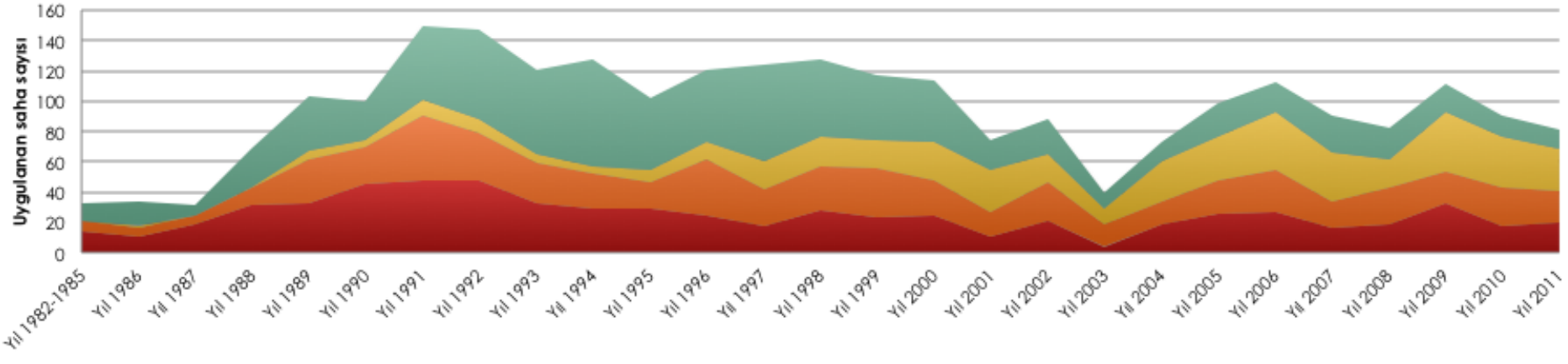
ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet 1982 – 2011 yılları arası iyileştirme faaliyetleri



Bilgiler 2014 tarihli USEPA Superfund Remedy Report'dan alınmıştır.

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet 1982 – 2011 yılları arası iyileştirme faaliyetleri

Kirlenmiş Saha İyileştirme Teknolojilerinin yıllara göre dağılımı



ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

YERİNDEN ALARAK TOPRAK iyileştirme teknolojisi	Toplam = 666	
	adet saha	Yüzde (%)
Solidifikasyon/stabilizasyon	214	32,1
Yakma (saha dışında)	111	16,7
Fiziksel Ayırma	99	14,9
Isıl desorpsiyon	72	10,8
Biyoremediasyon (yerinden alınarak)	67	10,1
Yakma (sahada)	42	6,3
Kimyasal arıtma (yerinden alınarak)	18	2,7
Toprak gazı ekstraksiyonu (yerinden alınarak)	9	1,4
Nötralizasyon (yerinden alınarak)	8	1,2
Fitoremediasyon (saha dışı)	6	0,9
Toprak yıkama (yerinden alınarak)	6	0,9
Açık Yakma/Açık Patlatma	5	0,8
Çözücü ekstraksiyonu	4	0,6
Mekanik toprak havalandırması	4	0,6
Camlaştırma	1	0,2

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

YERİNDE TOPRAK

iyileştirme teknolojisi	601 adet saha	Yüzde (%)
Toprak gazı ekstraksiyonu	302	50,2
Biyoremediasyon	67	11,1
Solidifikasyon/stabilizasyon	66	11,0
Çok fazlı ekstraksiyon	51	8,5
Kimyasal arıtma	43	7,2
Isıl arıtım	31	5,2
Toprak yıkama	20	3,3
Fitoremediasyon	8	1,3
Nötralizasyon	8	1,3
Camlaştırma	2	0,3
Mekanik toprak havalandırması	2	0,3
Elektrikle ayırma	1	0,2

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

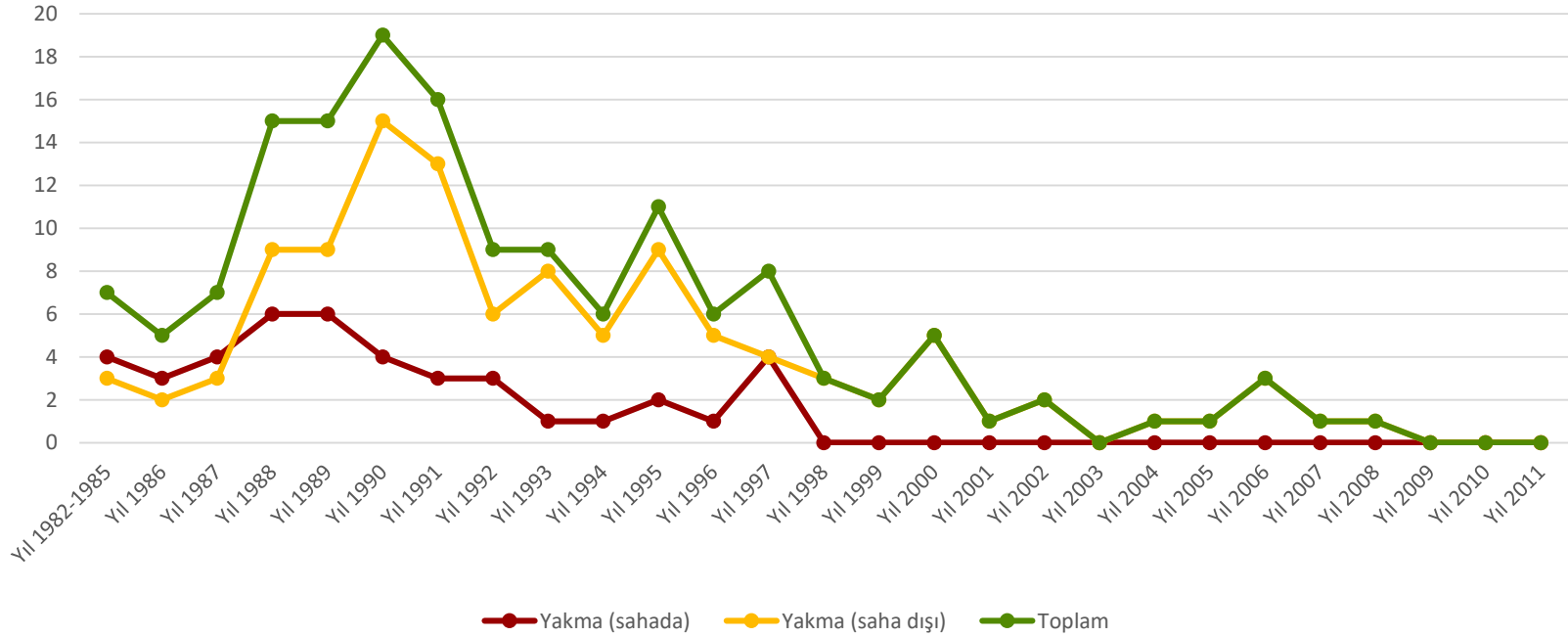
YERİNDE YERALTI SUYU iyileştirme teknolojisi	447 adet saha	Yüzde (%)
Biyoremediasyon	164	36,7
Kimyasal arıtım	98	21,9
Hava kabarcıklı arıtırma	92	20,6
Geçirgen reaktif bariyer	38	8,5
Çok fazlı ekstraksiyon	27	6,0
Fitoremediasyon	17	3,8
Kuyu içi havalı sıyrırma	10	2,2
Toprak yıkama	1	0,2

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

- **Yerinden alınarak** kirlenmiş toprağın temizlenmesi durumunda tercih edilen teknolojiler:
 - Fiziksel Ayırma
 - Solidifikasyon/Stabilizasyondur.
- 2005-2008 yılları arasında beş sahada tercih edilmiş olmasına karşın, 2009-2011 yılları arasında saha dışında yakma hiç tercih edilmemiştir.

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet Yakma

Yakma teknolojisinin uygulanmasının yıllara bağlı değişimi



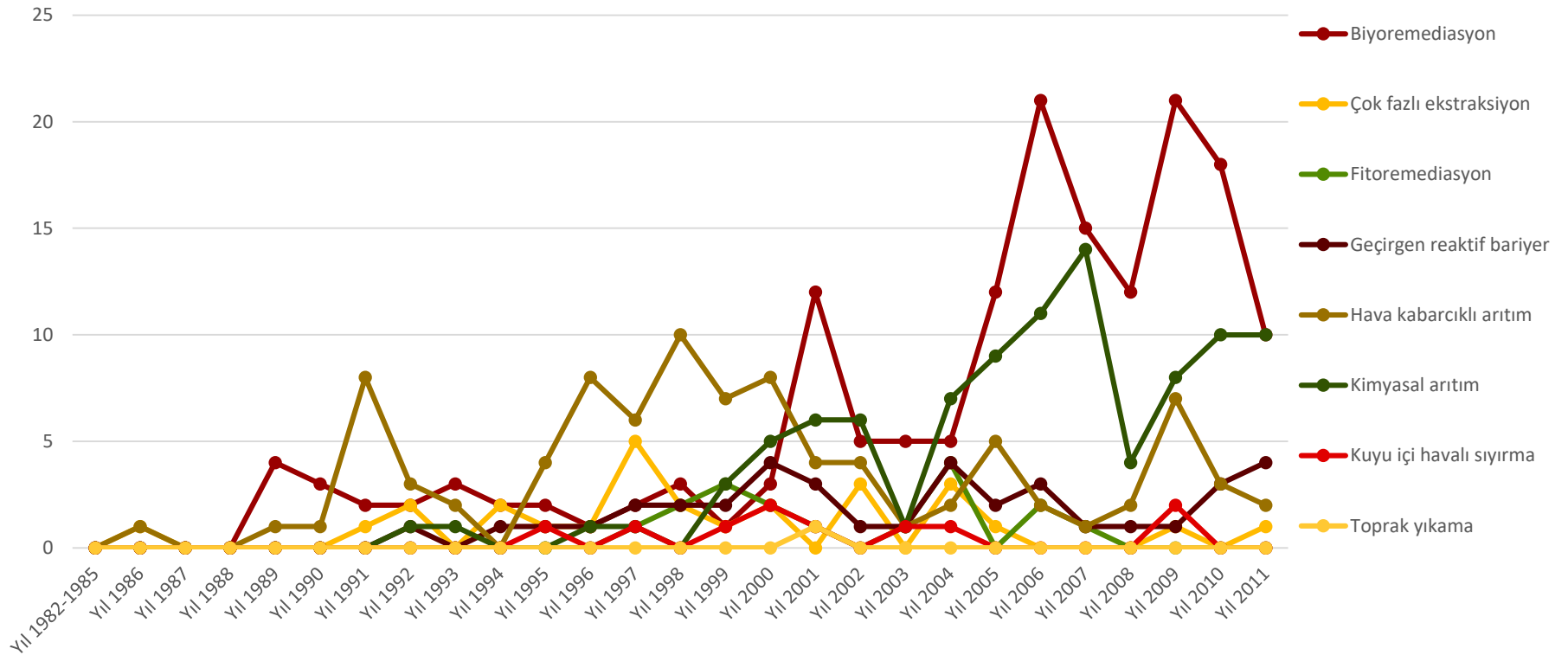
ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

- **Yeraltı suyu** temizlenmesi durumunda daha çok **yerinden alınarak** uygulanan teknolojiler tercih edilmekle birlikte
 - yeraltı suyu pompalama – pompala & arıt sistemleri,
- **yerinde** temizleme teknolojilerinin tercihi önceki yıllara göre çok artmıştır:
 - Biyoremediasyon (anaerobik)
 - Kimyasal arıtım (kimyasal oksidasyon)

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

Yerinde Yeraltı Suyu İyileştirme

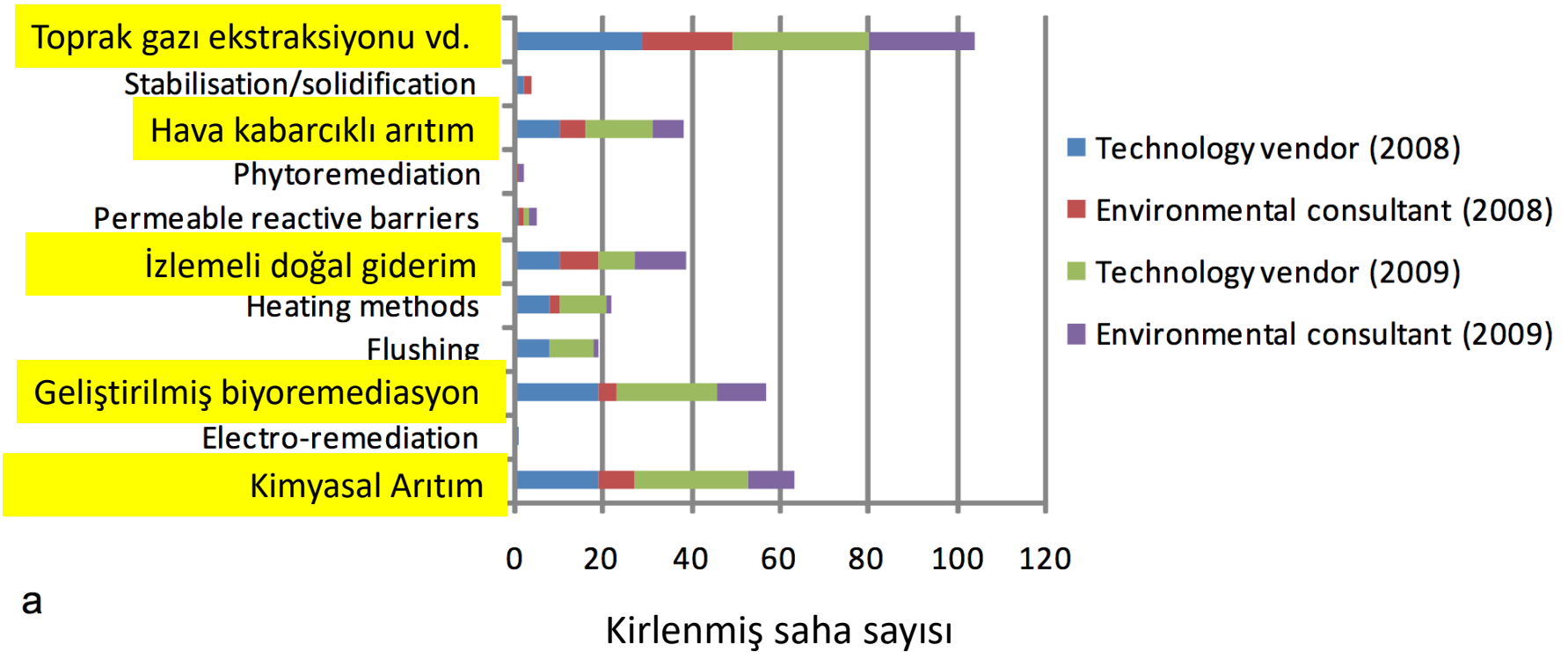
Yerinde Yeraltı Suyu İyileştirme Teknolojilerinin Yıllara Göre Değişimi



ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

- Toprak kirliliğinin iyileştirilmesinde **yerinde arıtma teknolojileri** daha çok tercih edilmekte.
- 2009 ila 2011 yılları arasında gerçekleştirilen toprak iyileştirme faaliyetlerinde en çok:
 - Toprak Gazı Ekstraksiyonu
 - Kimyasal Arıtma
 - Solidifikasyon/Stabilizasyon
 - Çift Faz Ekstraksiyonu
 - Geliştirilmiş Biyoremediasyon
 - Isıl Arıtımtercih edilmiştir.

İngiltere’de Kullanılan Teknolojiler (2008, 2009)



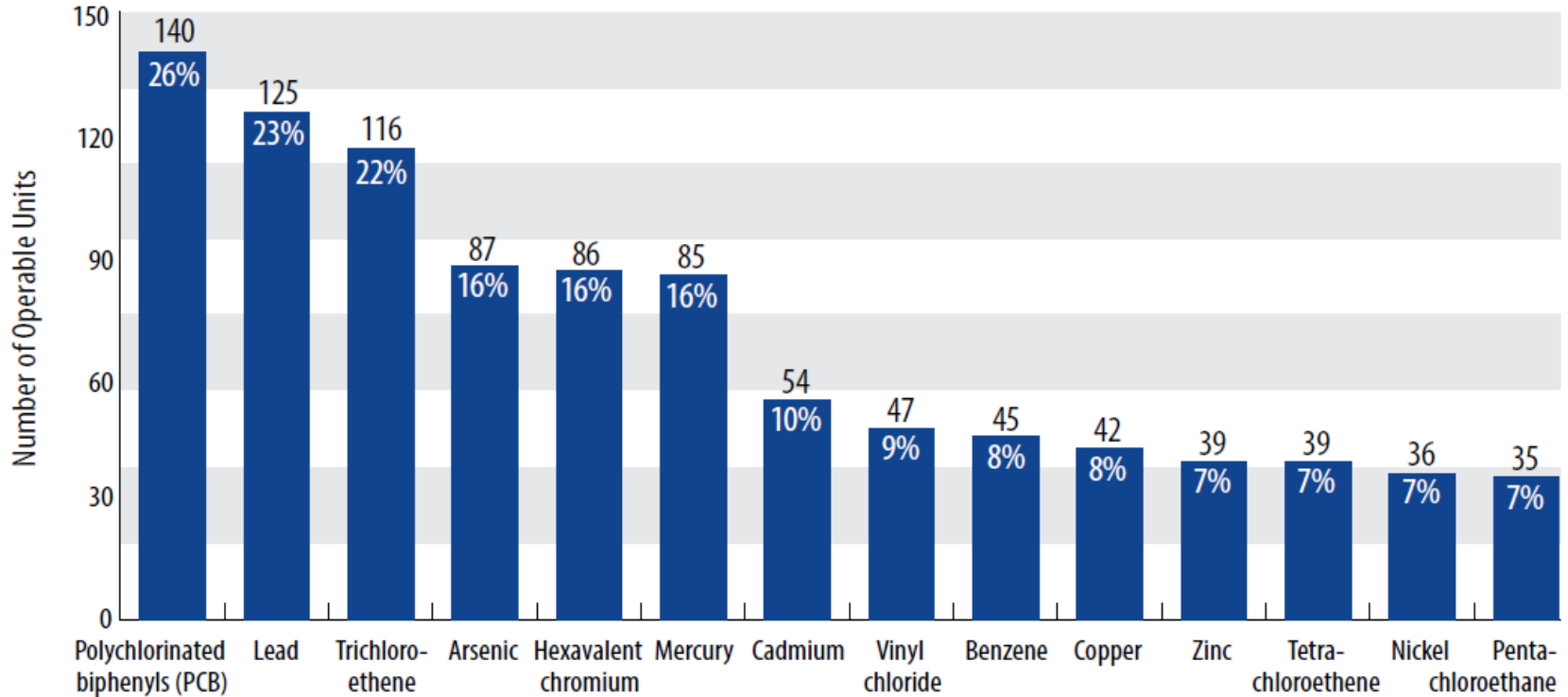
İngiltere’de Kullanılan Teknolojiler (2008, 2009)

- İngiltere’de son 5 yılda uygulanan iyileştirme teknolojilerine bakıldığında, **yerinde** gerçekleştirilen saha iyileştirmelerinin arttığı belirtilmiştir.
- Kimyasal arıtım, hava kabarcıklı arıtım/toprak gazı ekstraksiyonu/sıvı-gaz emişli arıtım artmış
- Toprak yıkama ve solidifikasyon/stabilizasyon daha az tercih edilmiştir.

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

Kirlenmiş sahalarda karşılaşılan kirleticiler

Figure 14: Most Frequently Occurring Contaminants at OUs in the RI/FS Phase

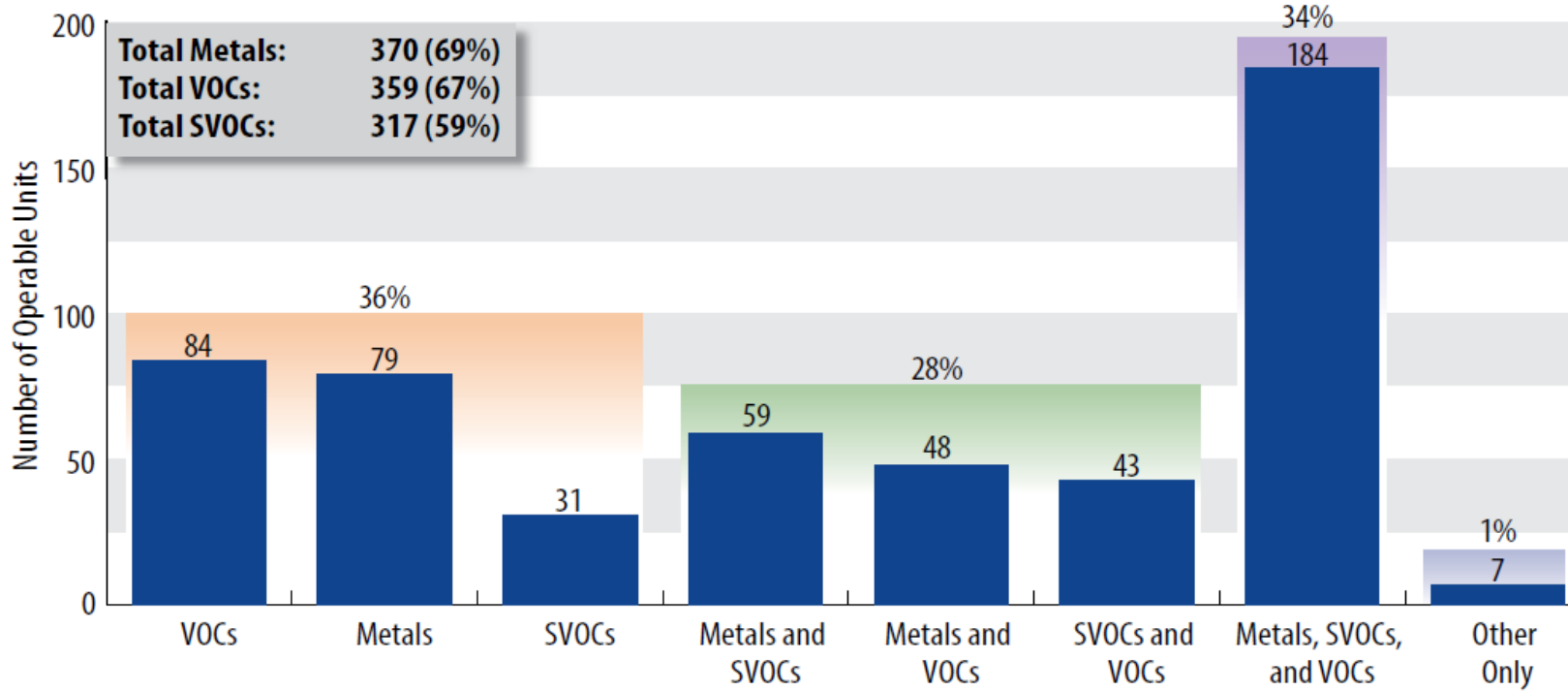


• Total Number of OUs = 447

ABD Çevre Koruma Ajansı'ndan Özet

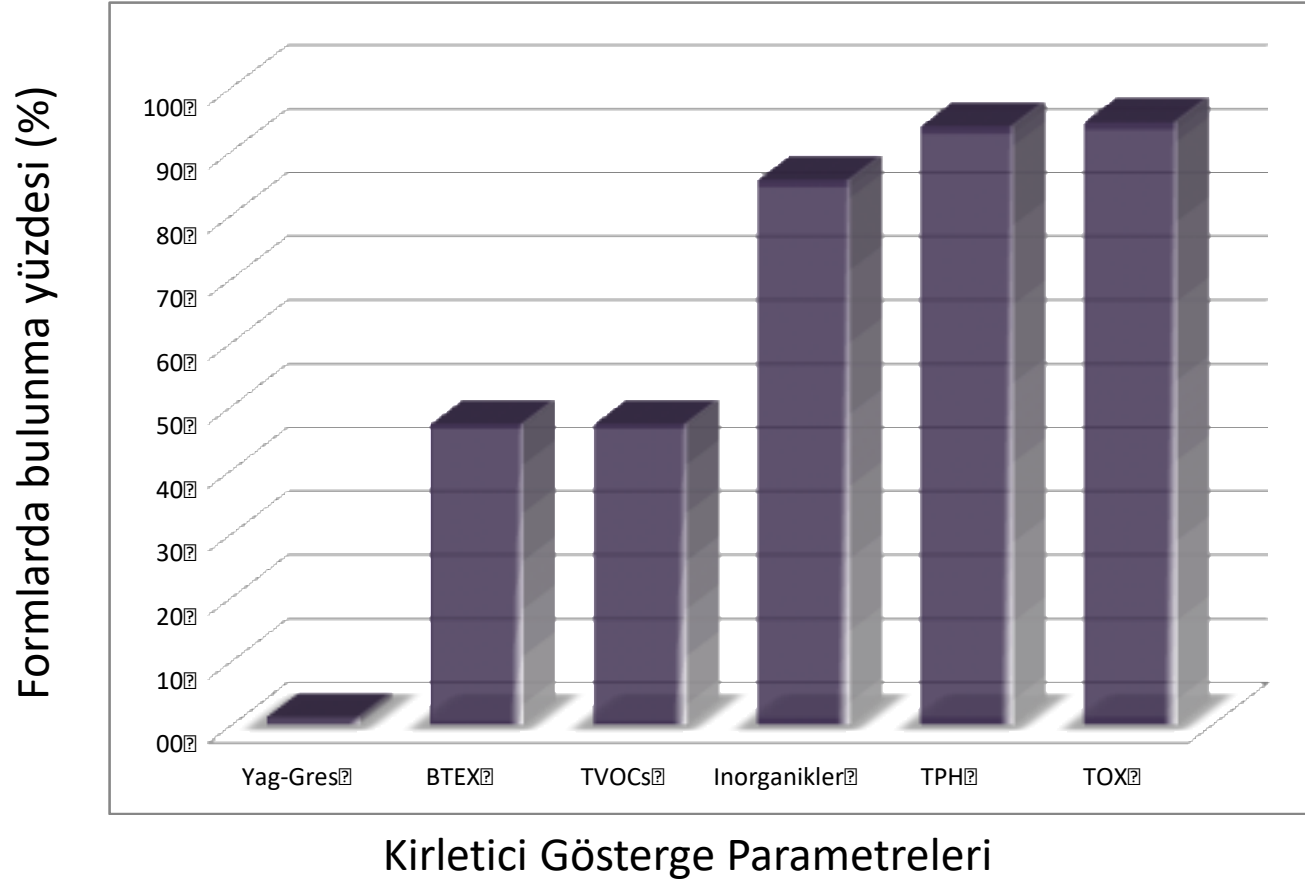
Kirlenmiş sahalarda karşılaşılan kirleticiler

Figure 15: Number of OUs in the RI/FS Phase by Contaminant Group



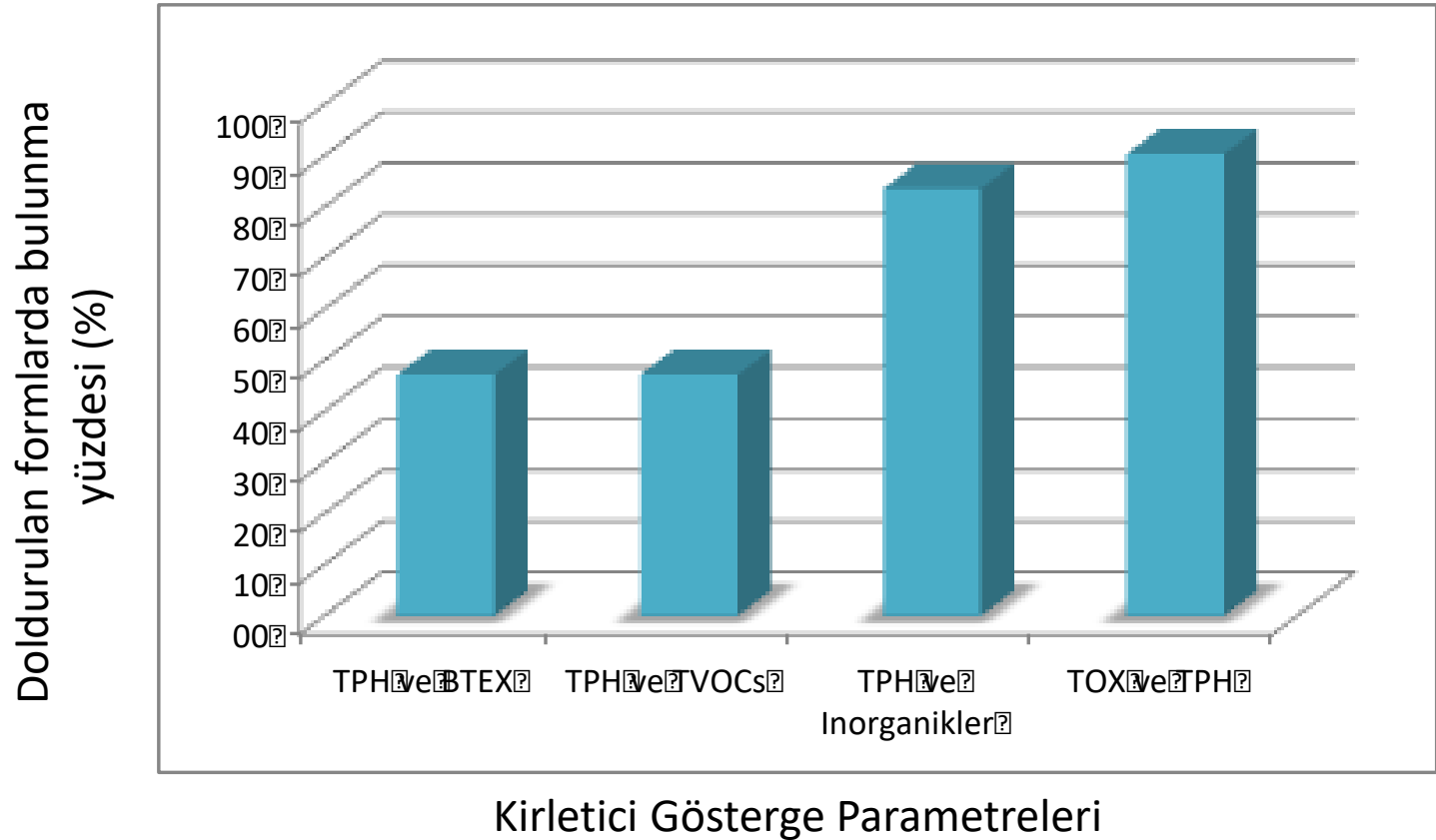
Türkiye'nin potansiyel kirlenmiş sahaları

Onaylanan Faaliyet Ön Bilgi Formlarına Göre İlk 50 sektör için sahalardaki olası kirleticiler



Türkiye'nin potansiyel kirlenmiş sahaları

Onaylanan Faaliyet Ön Bilgi Formlarına Göre İlk 50 sektör için sahalardaki olası kirleticiler (gruplar halinde)





KRİTERLER

KRİTERLER

➤ Genel

- Kirletici türü
- Toprak yapısı
 - Kaba kum (çok geçirgen)
 - Heterojen (geçirgenlik orta seviyede)
 - Kil ve silt (geçirgenlik çok düşük)
- Kirliliğin derinliği
 - Sığ (<0,2-0,5 m)
 - Orta (0,5 – 1,5 m)
 - Derin (>1,5 m)

KRİTERLER

➤ **Sahaya Özel Uygulanabilirlik**

- Sahadaki kirlilik derişimi
- Erişilebilir minimum derişim
- Temizlenen ortamın niteliği (yapısal değişiklikler, temizleme sonrası kullanım)
- İşletme güvenliği riski (işçi ve civar halk)
- Sahanın fiziksel kısıtları (saha civarında bulunan konut/işletmeler dar alanda çalışmayı gerektirebilir)

➤ **Arıtılabilirlik çalışmaları**

KRİTERLER

➤ Performans Değerlendirme

- Teknolojinin gelişmişlik düzeyi
- Uygulama yaygınlığı
- Güvenilirlik ve bakım ihtiyacı
- Açığa çıkan yan ürünler/kalıntılar
- Veri gereksinimi
- Kendi başına yeterlilik
- Halk tarafından kabul edilebilirlik

KRİTERLER

➤ Zaman-Maliyet Değerlendirmesi

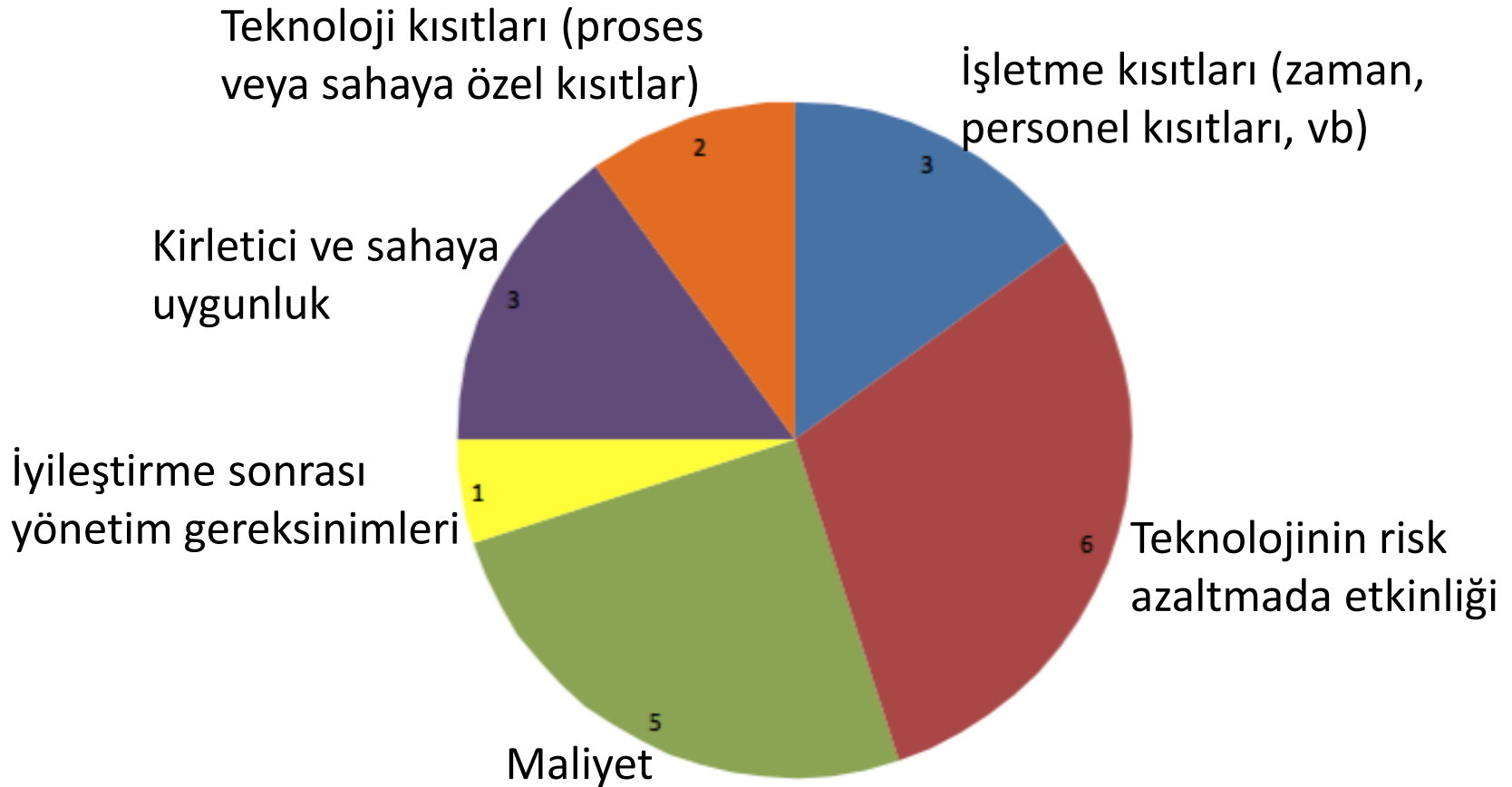
➤ Temizleme süresi

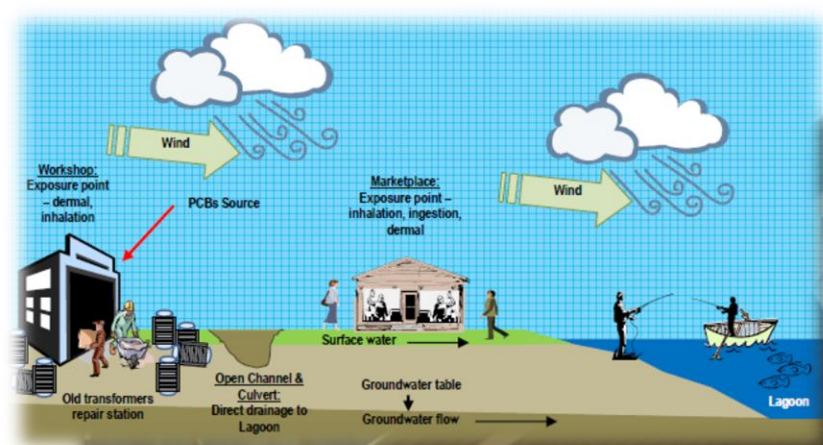
Temizleme Zamanı	TOPRAK		YERALTI SUYU
	Yerinden Alınarak Temizleme	Yerinde Temizleme	
Kısa Süre	6 aydan az	1 yıldan az	3 yıldan az
Orta Süre	6 ay - 1 yıl arası	1 yıl – 3 yıl arası	3 – 10 yıl
Uzun Süre	1 yıldan fazla	3 yıldan fazla	10 yıldan fazla

➤ Yatırım maliyeti

➤ İşletme maliyeti

Teknoloji Seçiminde Faktörler (İngiltere’de danışmanların görüşleri)





TEMİZLEME TEKNOLOJİLERİ

YERİNDE (IN-SITU) TEKNOLOJİLER



YERİNDE (IN-SITU) TEKNOLOJİLER

En çok kullanılan teknolojiler sunuma dahil edilmiştir.

➤ TOPRAK

- Toprak Gazı Ekstraksiyonu
- Geliştirilmiş Biyoremediasyon
- Solidifikasyon/Stabilizasyon
- Kimyasal Oksidasyon
- Çift Faz Ekstraksiyonu
- Isıl Arıtma

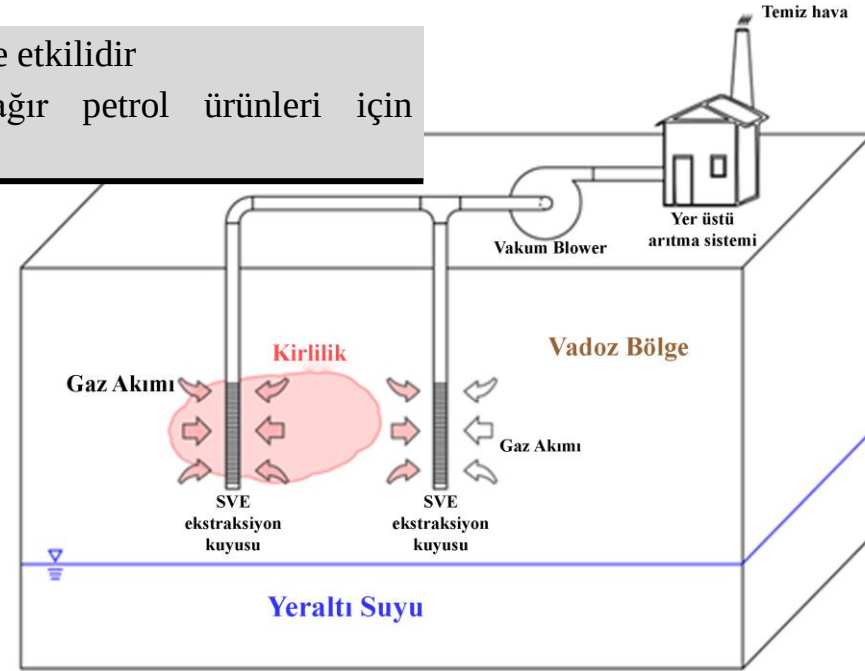
Toprak Gazı Ekstraksiyonu

TOPRAK GAZI EKSTRAKSİYONU

Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC* Yakıtlar
Maliyet	405 – 1485 USD/metreküp
Süre	1 – 3 yıl
Diğer	Doygun olmayan bölgede etkilidir Dizel, kerosen gibi ağır petrol ürünleri için uygulanamaz

*Başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

- Proses sonucunda toprak gazı arıtımının yapılması gerekir.



SVE – Toprak Gazı Ekstraksiyonu

- Doygun olmayan bölgede uygulanan,
- Su tablasının üzerinde yer alan VOC ve bazı yakıtların gideriminde etkili bir teknolojidir.
- Özellikle benzin gibi hafif (uçuculuğu yüksek) petrol ürünlerinin temizlenmesine daha başarılıdır.
- Yeraltında depolanan tanklar nedeniyle kirlenen sahalarda topraktaki VOC kirliliğinin gideriminde etkili olduğu pek çok tam ölçekli çalışma ile kanıtlanmıştır.
- Benzinden daha az uçucu olan dizel yakıt, ısıtma yağları, ve kerosen SVE yöntemi ile giderilemez. SVOC grubuna giren kirleticiler arıtilamaz.

SVE – Toprak Gazı Ekstraksiyonu

- Toprak gazı ekstraksiyonu **toprağa vakum uygulanarak** kontrollü hava akımı sağlanması prensibine dayanır.
- Böylelikle **uçucu ve yarı uçucu kirleticilerin** topraktan ayrılarak gaz fazında serbest kalması sağlanır.
- SVE yöntemi toprağa, su tablasının üzerine, yüzeyin yaklaşık 1 metre altına bir veya daha fazla ekstraksiyon bacasının açılmasını içeren bir yöntemdir. Dikey bacalar 1,5 m veya daha derin konabilir. Yatay bacalar da kirlenmiş bölgenin dağılım geometrisine bağlı olarak kullanılabilir.
- **Toprak geçirgenliği** SVE'nin etkinliğini belirleyen en önemli parametredir.
- SVE'den yüksek verim alabilmek için:
 - Geçirgenliği yüksek,
 - nem içeriği az ve
 - organik madde miktarı çok yüksek olmayan topraklar üzerinde uygulanmalıdır.

SVE – Toprak Gazı Ekstraksiyonu

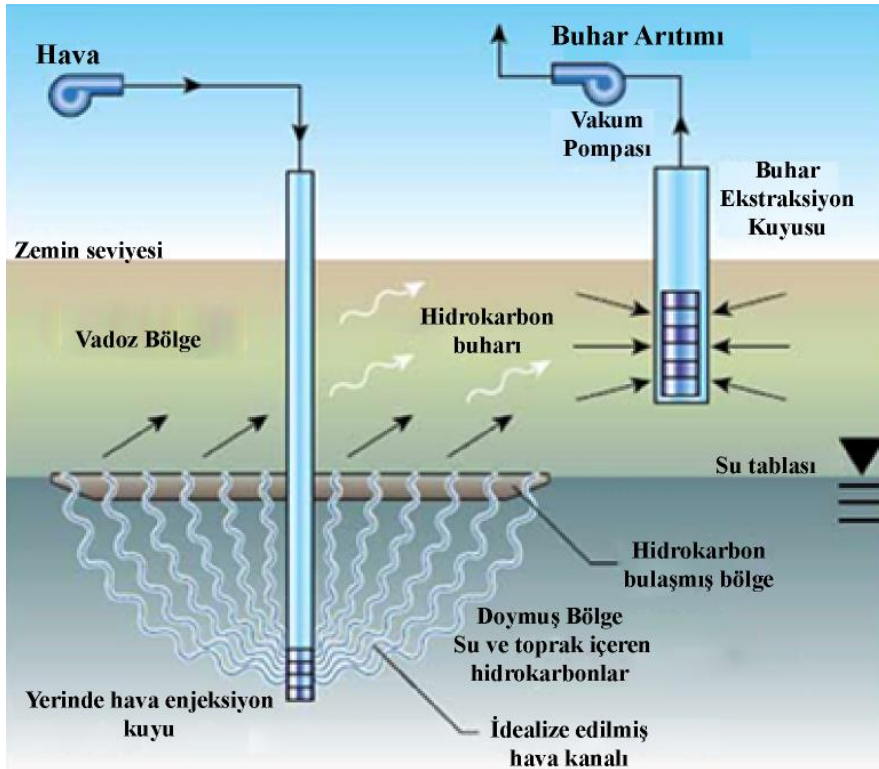
- SVE sistemi **çıkış gazlarının**, çevreye ve civardaki insanlara zarar vermemesi bakımından **arıtıma tabi tutulması** gerekir.
- İşletme sırasında ekstrakte edilen kirletici miktarında daha fazla artış gözlenemiyorsa, sistem kesikli işletmeye alınabilir.
- SVE işlemi ile temizleme hedeflerine ulaşamadıysa, kalıntı kirliliğin gideriminde varolan kuyulardan hava verilerek **biyoremediasyon** yapılması ciddi bir ek maliyet getirmeksizin **ikincil bir teknoloji** olarak değerlendirilebilir.

SVE – Toprak Gazı Ekstraksiyonu

KISITLAMALAR

- Kirliliğin derinliği ve alansal yayılımı, su tablasına kadar olan mesafesi, toprak tipi ve özellikleri önemlidir.
- Yüksek silt ve kil içeriği toprağın yumuşamasına, genişmesine yol açabilir ve buhar ekstraksiyonu esnasında geçirgenliği düşürerek proses verimini azaltır.
- Toprağın geçirgenliğinin ve katman yapılarının çok değişken olduğu sahalarda, ekstraksiyon kuyularının açılması öncesinde sahada çok geniş çaplı bir inceleme yapılması gerekmektedir.
- Aksi takdirde gaz akışı dağılımı homojen olmayabilir ve esas kirliliğin olduğu bölgelerde yeterli gaz hareketi sağlanamayabilir. Yüksek organik içerikteki veya aşırı derecede nemli topraklarda giderim verimi düşüktür.
- Sistemde çıkış gazı arıtımı neticesinde katı ve sıvı atıklar oluşacaktır.

SVE ve Hava Kabarcıklı Arıtım (AS)

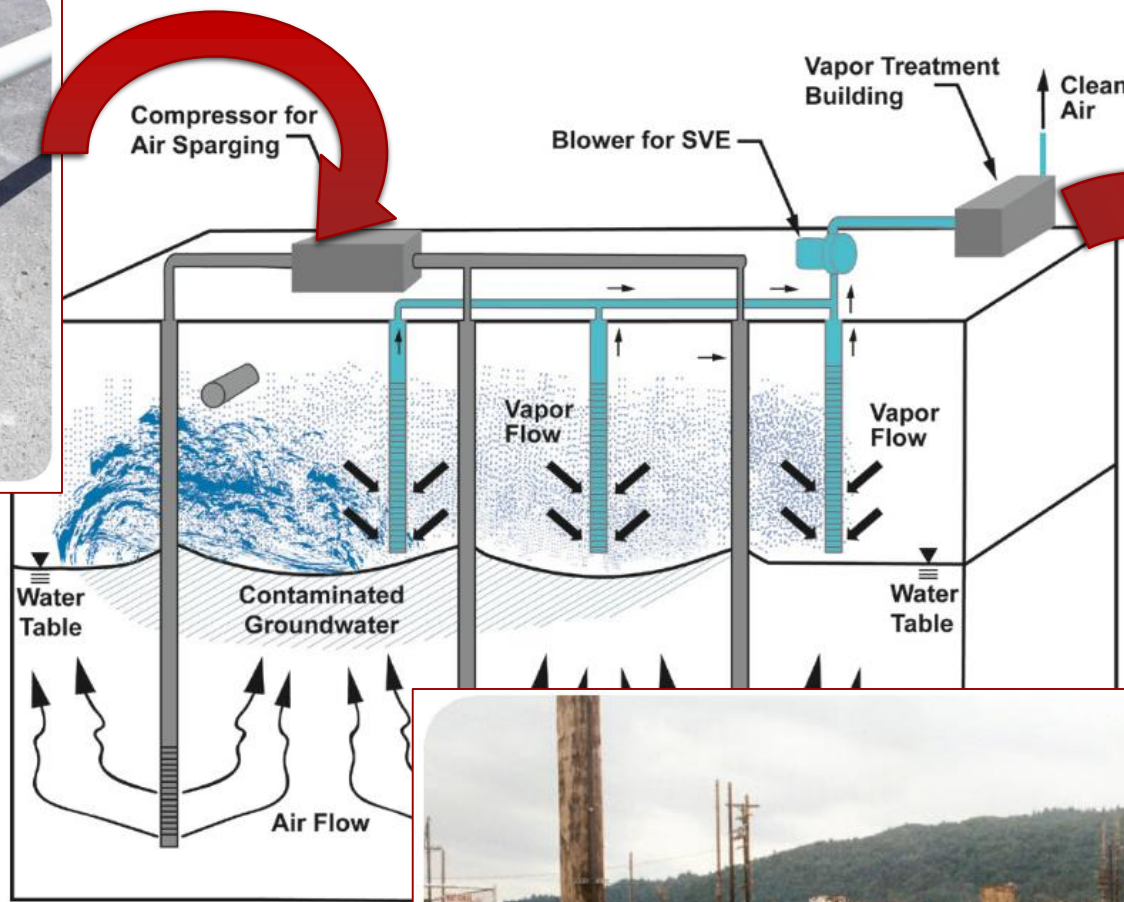


➤ **Hava kabarcıklı arıtım** (yeraltı suyu tabakası altına enjeksiyon)

ve

➤ **Toprak Gazı Ekstraksiyonu** (yeraltı suyu tabakası üzerindeki havanın çekilmesi)

➤ **Yerleşimlere mümkün olan en az rahatsızlığı vererek, hayatın doğal akışını bozmaksızın temizleme gerçekleştirilmesine olanak tanıyan yöntemlerdir.**



Örnek

- Tetrakloroetilen (PCE)
- Klorlu uçucu organik (HVOC)
- Tipik olarak metal endüstrisinde (metal parçalardaki yağların temizlenmesinde) ve kuru temizleyicilerde ve kullanılır
- Toprak ve yeraltı suyu kirliliği



BİYOREMEDİASYON

GELİŞTİRİLMİŞ BİYOREMEDİASYON

Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak	Yeraltı suyu
Proses Türü	Biyolojik	Biyolojik
Uygulanabilecek kirletici türleri*	VOC Yakıtlar HVOC, SVOC HSVOC	VOC Yakıtlar HVOC, SVOC HSVOC
Maliyet	30 – 100 USD/metreküp	10 – 20 USD/ metreküp
Süre	6 Ay - 5 Yıl	6 Ay – 5 Yıl
Diğer	Ahşap koruma/kaplama	sanayinde, petrol
	rafinericiliğinde sıklıkla kullanılır	
	Düşük derişimdeki kalıntı kirliliğinin gideriminde kullanılır	
	Kil ve heterojen yapıdaki toprakların kirliliğinin gideriminde kullanılır	
	KOK kirliliğinin gideriminde kullanılır	

Yakıtlar
Petrol hidrokarbonları (TPH, PAHlar)
BTEX
Çözücüler
Pestisitler
Ahşap koruyucuları (PCP, kreosot)



GELİŞTİRİLMİŞ BİYOREMEDİASYON

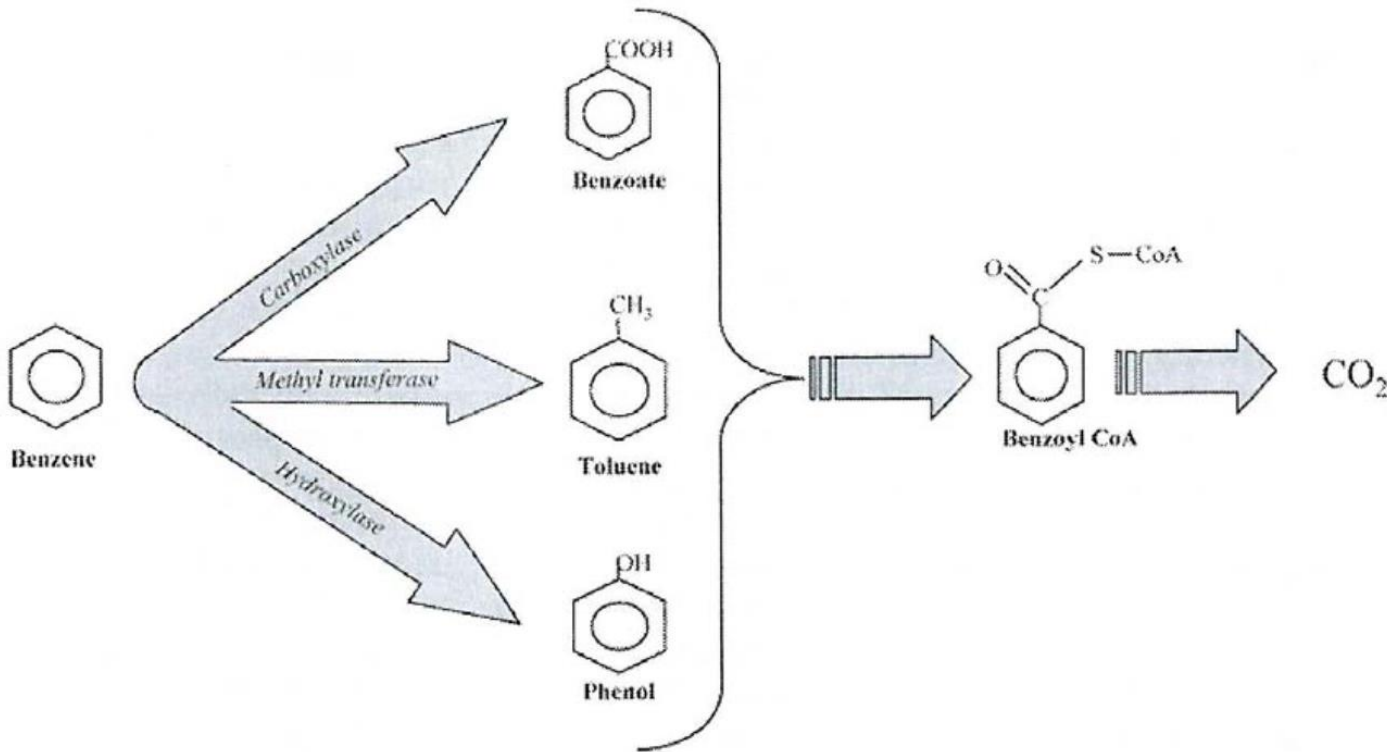
- Ortama eklenen mikroorganizmaların toprak ve/veya yeraltı suyundaki organik kirleticileri uygun koşullar altında besin ve enerji kaynağı olarak tüketmesi ile yerinde bozunmasının sağlanmasıdır.
- **Oksijen, nütrient, nem** sağlanarak, **sıcaklık** ve **pH** kontrolü ile uygun koşulların oluşturulması mümkün olur. Saha çalışması öncesinde laboratuvar ölçekli arıtılabilirlik çalışmaları gerçekleştirilmelidir.
- Biyoremediasyonda, mikroorganizmaların doğal bozunma süreçlerinin hızlandırılması amacıyla **nütrient, elektron tutucu** (BİYOSTİMÜLASYON) veya bozunmayı gerçekleştirdiği bilinen **mikroorganizma** eklemesi (BİYOOĞMENTASYON) yapılmaktadır.
- **Aerobik:** organik kirleticiler → karbon dioksit, su, etilen
- **Anaerobik:** organik kirleticiler → metan, karbon dioksit, hidrojen gazı

GELİŞTİRİLMİŞ BİYOREMEDİASYON

KISITLAMALAR

- Temizleme sırasında ve sonrasında izleme çalışmaları gerekli ve önemlidir.
- Biyoremediasyon sonucunda, toksik veya daha mobil yan ürünler oluşabilir.
- Kirlenmiş yeraltı suyu uygulamalarında; zemin yapısının heterojen olduğu koşullarda uygulama zorlaşabilir.
- Kil, çok katmanlı veya heterojen toprak yapısındaki ortamlarda oksijen transfer kısıtları dolayısıyla bu sistemin uygulanması tavsiye edilmez.
- Yüksek ağır metal derişimleri, çok klorlu organikler, uzun zincirli hidrokarbonlar ve inorganik tuzlar mikroorganizmalar için toksik olabilir.

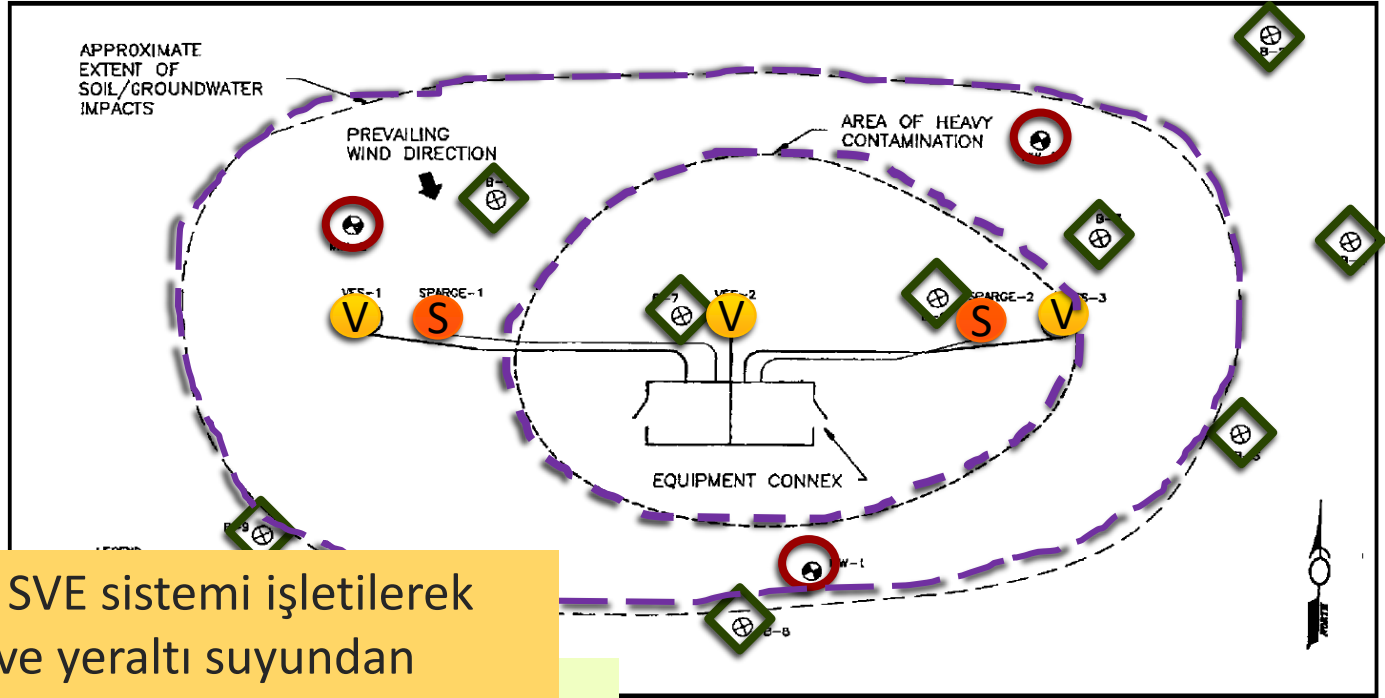
ÖRNEK



Ortamda
bulunan elektron
alıcılar
(O_2 , NO_3 , MnO_2 ,
 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, SO_4^{2-}),
ve
Elektron
vericilerin (BTEX)
oranı önemli
olmaktadır

Benzenin anaerobik ortamda parçalanma yolları

Örnek – SVE + AS + G.Biyoremed



○ izleme kuyusu

◇ Toprak sondaj

○ S Hava kabarcıklı arıtım için kuyu

○ V Toprak gazı ekstraksiyonu için kuyu

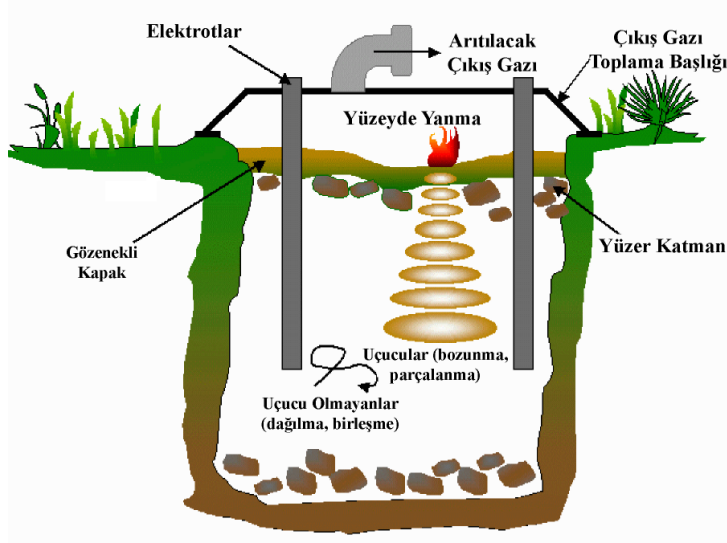
➔ 18 ay boyunca SVE sistemi işletilerek yakıtın toprak ve yeraltı suyundan temizlenmesine çalışılmış

➔ Sonrasında SVE kuyularından nutrient verilerek kalan yakıt kaynaklı hidrokarbonların biyolojik olarak parçalanması sağlanmış

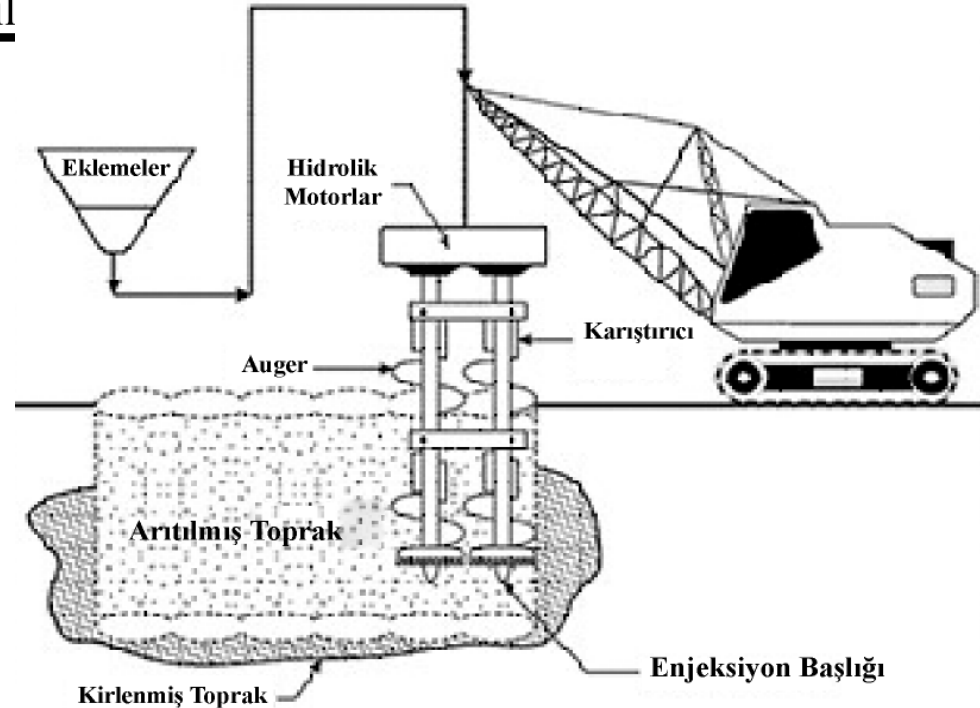
SOLİDİFİKASYON/STABİLİZASYON

SOLİDİFİKASYON/STABİLİZASYON

Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak	Toprak
Proses Türü	Kimyasal Arıtma	Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	İnorganikler*	İnorganikler*
Maliyet	50 - 425 USD/metreküp	124 - 248 USD/metreküp
Süre	En çok 1 yıl	



Vitrifikasyon (SVOC ve HSVOC için)



SOLİDİFİKASYON/STABİLİZASYON

- Kirliliğin **hareket kabiliyetini sınırlandıran** bir tekniktir. **Kirleticileri yok etmez.**
- **Stabilizasyon:** kirlenmiş topraktan kirleticilerin çevreye sızma ihtimalini en aza indirmek için kimyasal tepkimeler yardımıyla kirlenmiş toprağı kararlı hale getirir.
- **Solidifikasyon:** kirlenmiş toprak bağlayıcı ajanlarla karıştırılıp kirletici ile toprak birbirine bağlanır.
- **Bağlayıcı ajanlar:** çimento, asfalt, uçucu kül ve kil + su eklenir
- Karışımlar kurutulur ve katı blok oluşturmak üzere sertleşmeye bırakılır.
- Sahanın yüzeyinde karıştırılarak katılaştırılan veya stabilize edilen atıklar dolgu maddesi olarak kullanılabilir veya bir düzenli depolama tesisinde bertaraf edilebilir.

SOLİDİFİKASYON/STABİLİZASYON

KISITLAMALAR

- Kirlilik derinliği, kirletici çeşidi ve toprağın fiziksel özellikleri önemlidir.
- Bazı prosesler hacim artışına (orijinal hacmin iki katına kadar) neden olabilir.
- Yerinde uygulamalarda reaktifin beslenmesi ve etkin karıştırma, yerinden alınarak gerçekleştirilen uygulamalara göre daha zordur.
- Bu teknolojinin seçiminde arıtılabilirlik çalışmaları gerekmektedir.
- Katılaştıran malzeme sahanın ilerideki kullanımlarını kısıtlayabilir
- Yerinden alınarak gerçekleştirilen uygulamalarda, pek çok kirletici/proses kombinasyonunun uzun dönem etkinliği kanıtlanmamıştır. Proses etkinliğinin takip edilmesi için süzüntü testleri ile izleme gerçekleştirilmesi gerekir.

Örnek – S/S



➤ Kurşun ve kalıcı organik kirleticilerle (HSVOC grubu) kirlenmiş, eski atık arıtma çamurlarının olduğu bir sahanın iyileştirilmesinde kullanılmıştır.



- Yerinde S/S sonrasında sahanın üstü toprak ile kaplanmıştır.
- Süzüntü suyu izleme çalışmaları 10 yıl içinde herhangi bir kirletici sızıntısı göstermemiştir.

KİMYASAL OKSİDASYON

KİMYASAL OKSİDASYON

Yerinde /Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş
Ortam

Proses Türü

Uygulanabilecek kirletici
türleri

Maliyet

Süre

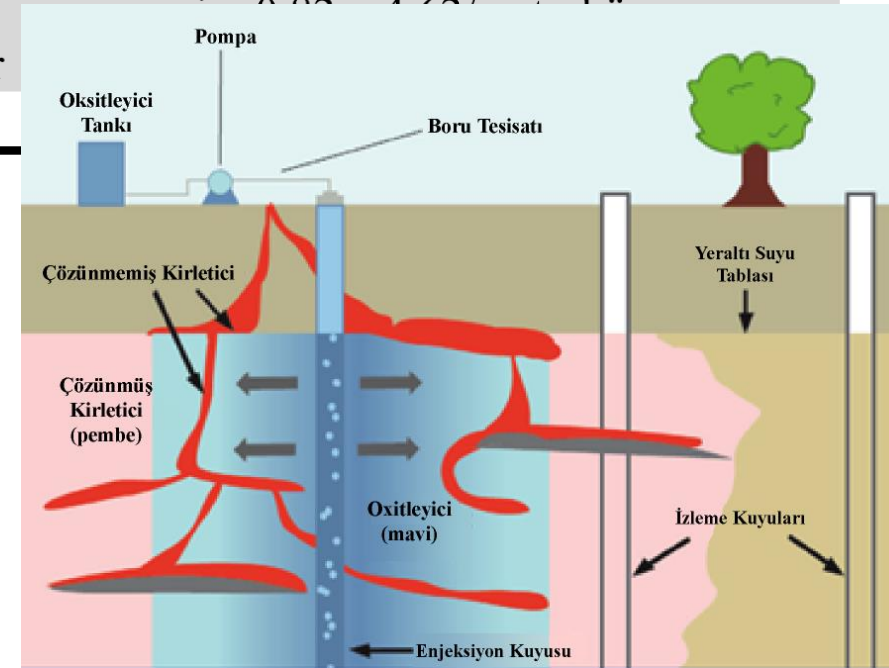
Yerinde
Toprak

Kimyasal
VOC, HVOC,
HSVOC

Yeterli
bulunmamaktadır
En çok 1 yıl

Yerinde
Yeraltı Suyu

Kimyasal
VOC, HVOC,
HSVOC



KİMYASAL OKSİDASYON

- Toprak ve yeraltı suyunu yerinde temizlemek için oksitleyici maddeler yeraltına kuyular yoluyla pompalanarak enjekte edilir.
- Oksitleyici, kuyulara pompalandığında civarındaki toprağa ve yeraltı suyuna yayılarak kirleticileri parçalayan ve zararsız yan ürünler oluşturan kimyasal tepkimeler meydana gelir, tehlikeli kimyasallar tehlikesiz veya daha stabil, az hareketli, ve/veya inert, daha az toksik bileşenlere dönüştürülür.
- Avantaj: **hızlı**
- Başarıda kritik nokta: **oksitleyici maddenin niteliği ve sahaya iletim sistemi**
- En çok kullanılan oksitleyici maddeler: **ozon, hidrojen peroksit, permanganat, persülfat, hipoklorit, klor ve klordioksit**

KİMYASAL OKSİDASYON

- Toprak/yeraltı suyu kirliliğini, kirleticilerin ilk olarak yayılmaya başladığı kirlilik kaynağına müdahale ederek temizlemeyi hedefler.
- Oksitleyici sevkiyatı yatay ve dikey enjeksiyon kuyuları kullanılarak ve yükseltgeyici maddeyi düzenli olarak yüzey altına hareket ettirecek dağıtım noktalarından gerçekleştirilir.
- Alifatik (trikloroetilen) ve aromatik bileşikler (ör. benzen) üzerinde çok seri reaksiyon hızlarında (dakika içerisinde %90 parçalama) yüksek arıtma verimine erişme kapasitesine sahiptir (%90 ve üzeri).

KİMYASAL OKSİDASYON

KISITLAMALAR

- Sahada oksitleyici kimyasalların muhafazası.
- Doğru oksitleyici madde ve hedef kirleticinin eşleştirilmesi bu sistemin performans hedefleri ve kurulumu için ana etmendir.
- Yeraltı suyunun temizlenmesinde bu teknolojinin kullanılması büyük miktarlarda kimyasal maddelerin yönetimini gerektirir.
- Hedef kirleticilerin bozunma hızı ve derecesi, kimyasalın yapısı ve oksidatif bozunma yatkınlığının yanı sıra, ortam şartları, özellikle pH ve sıcaklık bilinmelidir. Oksitleyici tüketen maddelerin konsantrasyonu (organikler, vd) verimi etkiler.
- Bazı toksik yan ürünler ortaya çıkabilir. Ayrıca ısı ve gaz çıkışı olabilir, biyolojik aktiviteler etkilenebilir. Bu nedenle, kimyasal oksidasyon prosesinin çok titizlikle izlenmesi ve kontrolü gerekir.

Örnek - KO

- Klorobenzenler (HSVOC) ile kirlenmiş bir sahada (toprak ve yeraltı suyu kirliliği + DNAPL)
 - İki farklı oksidanın denemesi:
 1. persülfat (katalizör çözelti: Demir(II) ve sitrik asit)
 2. modifiye Fenton (peroksit ve demir) çözeltileri, düşük pH ve pH ayarlanmamış toprak
- Toprak yapısının da etkisi ile
 1. Persülfat ile çok daha iyi giderim verimi (%50-80)
 2. Modifiye Fenton ile düşük giderim verimi (%40)
- Ana faktör: Persülfatın yeraltında toprak ile etkileşimi sırasında daha stabil kalması ve dolayısıyla kirleticilerle etkin giderim

Örnek - KO

- Eski havagazı fabrikası sahası
 - Kirleticiler: Poliaromatik hidrokarbonlar (PAHlar), TPH (SVOC grubu)
 - Saha: toprak ve yeraltı suyu kirliliği + DNAPL
 - Yüzey aktif madde (sürfaktan) ve oksidanın birlikte kullanımı
 - Enjeksiyon kuyularından yeraltına verilmesi ile yüzey aktif maddelerin DNAPL'ı topraktan etkin ayırması ve oksidan yardımıyla PAH ve TPH giderimi sağlanmış
 - **BTEX bileşiklerinde** (parçalanma yan ürünü) bir miktar artış gözlenmiş!



ÇİFT FAZ EKSTRAKSİYON

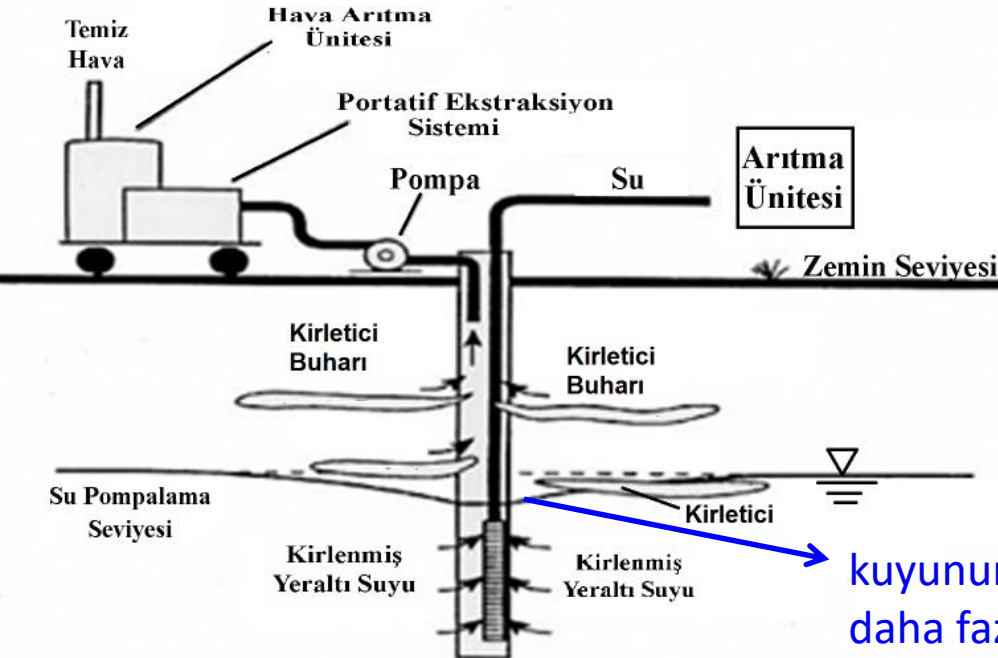
ÇİFT FAZ EKSTRAKSİYONU

Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC Yakıtlar
Maliyet	30 – 72 USD/metreküp
Süre	1 Yıl -10 Yıl
Diğer	Düşük geçirgenliğe sahip formasyonlarda önerilmez

- Tek başına uygulanabilir bir teknoloji değildir.
- Proses sonucunda su ve buhar arıtımının yapılması ve proses çıktılarının izlenmesi önemlidir

ÇİFT FAZ EKSTRAKSİYON

- Kirlenmiş yeraltı suyundaki, serbest fazdaki petrol ürününü ve hidrokarbon buharını aynı anda uzaklaştırmak için kullanılan **yüksek vakum sistemi**dir.



- Çıkarılan buhar ve sıvılar, toplanır ve **ayrı ayrı arıtılır**. Bu yöntem ile su tablasının üstündeki ve altındaki kirleticileri ortadan kaldırmak mümkündür

kuyunun etrafındaki su tablasını düşürerek, daha fazla alanı vakuma maruz bırakır.

ÇİFT FAZ EKSTRAKSİYON

KISITLAMALAR

- Kirleticinin fiziksel ve kimyasal özellikleri: ör. viskozite, yoğunluk, kompozisyon, derinlik ve çözünürlük,
- Toprak özellikleri: ör. kapiler kuvvetler, gözenek yapısı, nem içeriği, organik içerik, hidrolik iletkenlik,
- Kirlilik salınımı yapısı,
- Jeoloji: ör. serbest ürünün farklı noktalarda kümelenmesine olanak sağlayacak katman yapısı tercih edilmez,
- Hidrojeolojik rejim: ör. geçirgenlik, su tablasının yüksekliği, yeraltı suyu akış yönü ve eğimi

bu teknolojinin etkin şekilde gerçekleştirilmesinde önemli unsurlardır.

ISIL ARITIM

ISIL ARITIM

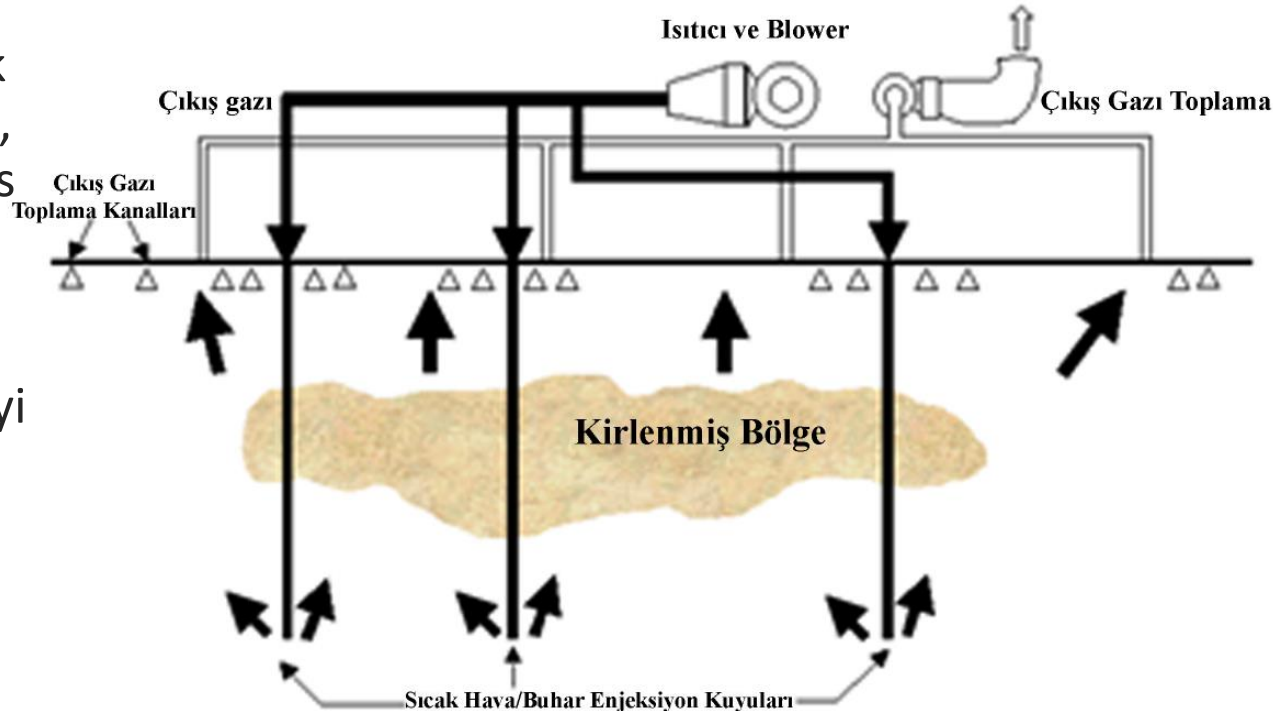
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinde
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Toprak
Proses Türü	Termal
Uygulanabilecek kirletici türleri	SVOC
Maliyet	20 – 47 USD/metreküp
Süre	1 Yıl – 3 Yıl arası

ISIL ARITIM

➤ Isıl işlem, yarı uçucu organik maddeleri (SVOC) daha uçucu hale getirerek ekstraksiyonunu kolaylaştırmak için kullanılır.

➤ Isıtma işlemi için elektrik direnci, elektromanyetik, fiber optik, radyo frekans gibi farklı yöntemler kullanılabilir.

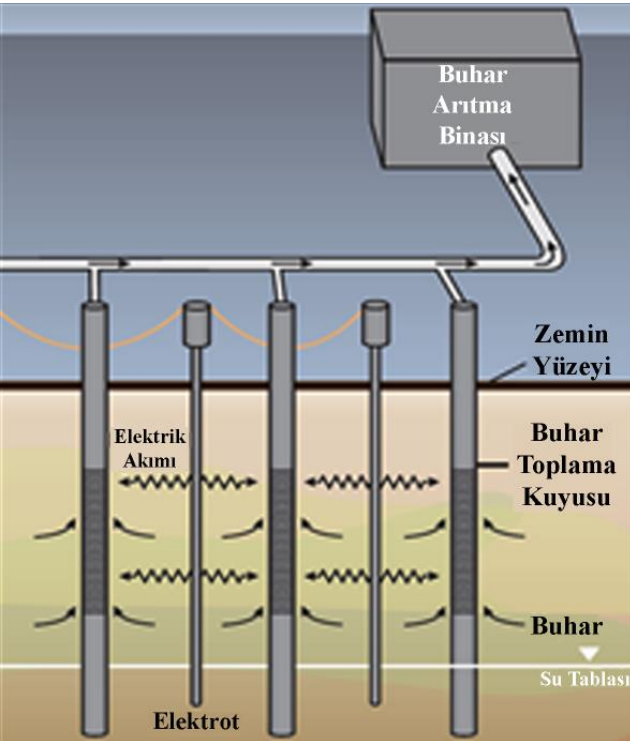
➤ Yüksek nem içeriği, SVE'yi sınırlandıran bir parametre olmasına rağmen ısı desorpsiyon ile bu problem aşılabılır.



Isıl Desorpsiyon _ ViDEO



ISIL ARITIM



- Bu teknoloji ahşap işleme tesisleri, petrol rafinerileri, kömür katranı, pentaklorofenol, kreosot ve petrol yan ürünleri gibi LNAPL-DNAPL kirliliği beklenen sahalarda kullanılabilir.
- Isıtma prosesi yardımıyla NAPL (çözücüler, petrol ve kreosot (ahşap koruyucu) giderimi kolaylaştırılabilir.
- Başka teknolojilerle temizleme performansının verimli olmadığı silt ve killi yapılarda kullanılabilir.
- Ayrıca, derinde yer alan veya bina altlarında bulunan kirliliğe de erişebilen bir yöntemdir. Bu sayede yer altına kazılarak inilip temizlenmesinin yaratacağı çok yüksek maliyetlerin önüne geçilmiş olur.
- Doygun bölgede kullanılamayan bir teknolojidir ancak su tablasının düşürülmesi ile kullanımı mümkün olur.

ISIL ARITIM

KISITLAMALAR

- Isıl işlem alanı genellikle ısıyı ve buharı aşağıda tutabilmek için beton, asfalt vb. geçirimsiz yüzey kaplaması ile kapatılır.
- Bu kapatma işlemi aynı zamanda kimyasal buharın kontrolsüz şekilde yüzeye çıkmasını da engeller.
- Gaz kaçışını tespit etmek için düzenli olarak hava numuneleri alınmalıdır.
- Proses sonucu açığa çıkan katı/sıvı atıkların bertaraf edilmesi gerekir.

YERİNDEN ALINARAK (EX-SITU) GERÇEKLEŞTİRİLEN TEKNOLOJİLER

En çok kullanılan teknolojiler dahil edilmiştir

➤ TOPRAK

- Solidifikasyon/Stabilizasyon ✓
- Geliştirilmiş Biyoremediasyon ✓
- Termal (Isıl) Desorpsiyon
- Yakma
- Fiziksel Ayırma yöntemleri (eleme, susuzlaştırma)

TERMAL (ISIL) DESORPSİYON

ISIL DESORPSİYON

**Yerinde /Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam
Proses Türü**

Yerinden alınarak

Toprak

Fiziksel/Kimyasal Arıtma

Uygulanabilecek kirletici türleri*

Tüm kirleticiler (inorganikler hariç)

Maliyet

44 -252 USD/metreküp

Süre

6 Ay – 1 Yıl

Diğer

Ön-işlem gerektirir

Kil içerikli topraklarda uygulanması tavsiye edilmez

KOKlarla kirlenmiş topraklarda uygulanabilir

TERMAL (ISIL) DESORPSİYON

- Organik kirleticilerin topraktan ısıtılarak gaz fazına geçirilerek ayrılmasını sağlar. (VOCl_{er} için: 93°C-315°C, sVOCl_{er} için: 315°C – 537°C).
- Sahada veya taşınarak ayrı bir yerde ısı desorpsiyon tesisine götürülebilir.
- Kirleticiler, topraktan ayrılır.
- Bir taşıyıcı gaz veya vakum sistemi ile su buharı ve gaz fazdaki organikler gaz arıtma sistemine taşınır. Bu sistemlerde tasarlanan yatak sıcaklığı ve bu sıcaklıkta kalma süreleri seçilmiş kirleticileri buharlaştırır ama oksitlemez.
- Tüm termal desorpsiyon sistemleri çıkış gazının arıtılmasını gerektirmektedir.

TERMAL (ISIL) DESORPSİYON

- Kirleticiler desorbe edildikten sonra yoğunlaştırularak ayrılabilir. Karbon adsorpsiyonu veya ikinci yakma odası/katalitik oksitleyici/kimyasal halojensizleştirme ile kirleticiler parçalanabilir.
- Isıl desorpsiyon yöntemi özellikle kirletici konsantrasyonunun yoğun olduğu yerlerde diğer yöntemlere göre daha başarılı bir performans gösterir.
- Kalıcı organik kirleticiler ile kirlenmiş sahaların, PCDD/F belirlenmemiş olsa bile işlem sırasında oluşabileceğinden ölçülerek izlenmesi gerekir.

TERMAL (ISIL) DESORPSİYON

KISITLAMALAR

- Büyük parçalar kırılarak küçültülmeli, yüksek nem içeriği azaltılmalıdır.
- KOK ile kirlenmiş topraklarda uygulanan ısı desorpsiyon prosesinden kaynaklanan emisyonların kontrol edilmesi ve arıtımı özellikle önemlidir.
- Kirlenmiş toprağın içinde ağır metal varsa, ısı desorpsiyon sonrasında toprağın stabilize edilmesi gerekebilir.
- Reaktörün küçük olması temizlenebilir madde miktarını sınırlandırabilir.
- Kil içerikli toprak yapısı (kek oluşumu nedeniyle) performansı olumsuz etkiler.

Örnek – ID



YAKMA

YAKMA

**Yerinde /Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam
Proses Türü
Uygulanabilecek kirletici türleri**

Yerinden alınarak

Toprak

Kimyasal

VOC*

HVOC, SVOC, HSVOC

Yakıtlar, patlayıcılar

Maliyet

914 – 1540 USD/metreküp

Süre

Birkaç hafta – birkaç yıl

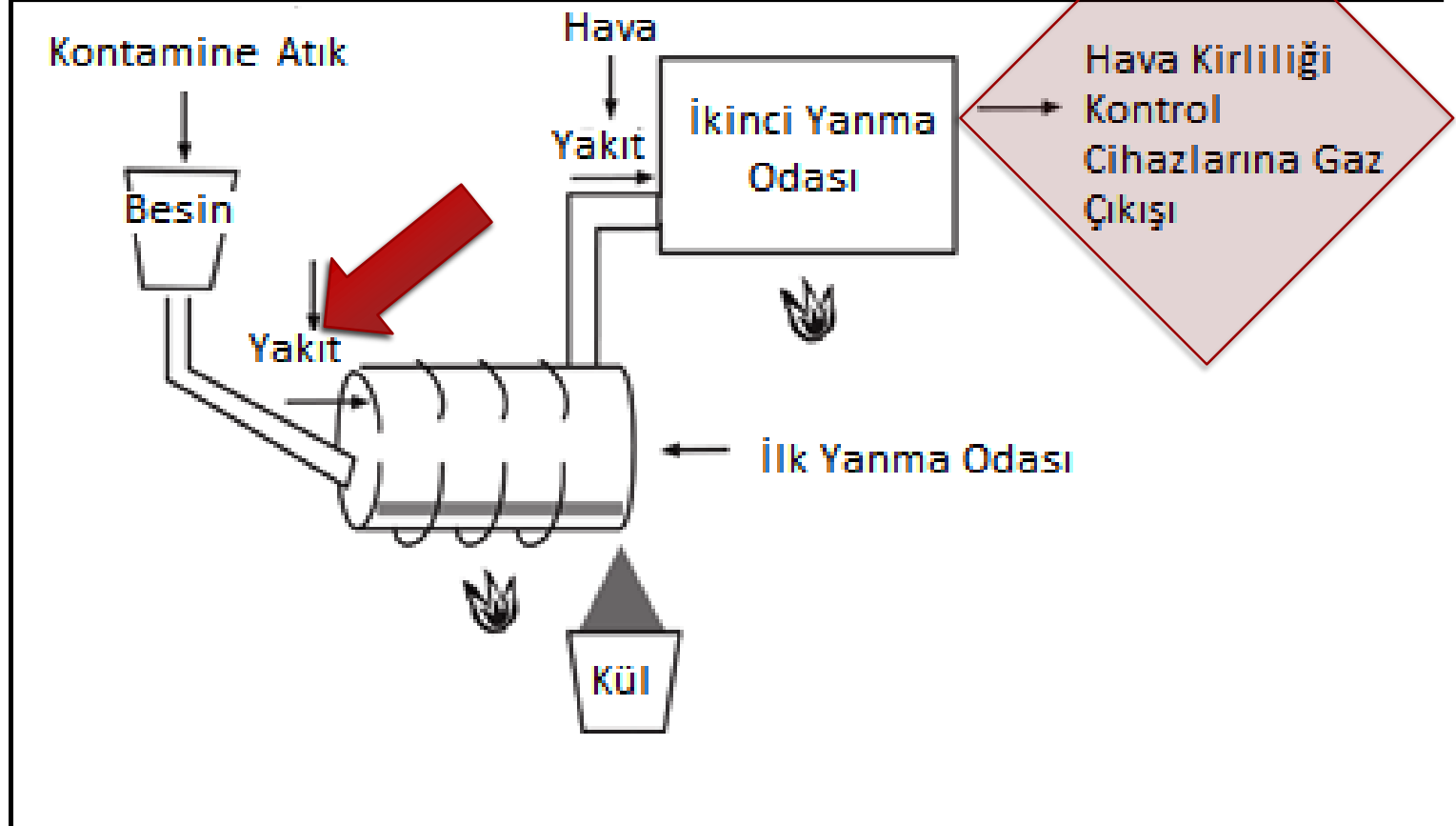
Diğer

Yakılacak toprağın içeriğine göre baca gazı emisyonlarının arıtımı önem kazanır. Topraktaki ağır metal, sodyum ve potasyum içeriği oluşan külü ve işletimi olumsuz etkiler.

KOKlar üzerinde uygulanabilir bir teknolojidir.

*VOCler (özellikle yakıt) ve ahşap koruma/kaplama sanayinde organiklerle kirlenmiş sahalarda başarısı kanıtlanmış, önerilen teknolojidir.

YAKMA



- Yüksek sıcaklıklarda, tehlikeli maddeleri yakarak parçalama işlemidir.
- Yüksek ısı (870°C-1200°C) zararlı atıkların içindeki halojenli ve ısıya dayanıklı organikleri parçalamak ve yakmak için kullanılır.
- Farklı atık yakma tasarımları, döner fırın, sıvı enjeksiyon, akışkan yatak, ve kızıl ötesidir.
- Sahada veya saha dışında yakma gerçekleştirilebilir.
- Yakma teknolojisi ile metal kirliliği giderimi yapılamaz.

- Küçük boyuttaki kirlenmiş sahalar için hafriyat ve sahadışı bir yakma fırınına transfer hızlı bir temizleme yaklaşımı olabilir.
- **Sistemin çıkış gazları ve yakma kalıntılarının ayrıca arıtılması/bertaraf edilmesi gerekmektedir.**
- KOK içeren atıklar ve KOK kaynaklı ısıl bozunma ürünleri yüksek sıcaklıklara yeteri kadar uzun süre maruz kaldığında tamamen yok edilebilir.
- Yakma tesislerinde teknik arızalar, inşaat malzemelerinin hasarlanması, sensör arızaları, operatör hataları, ve güç kesintileri sıklıkla karşılaşılan sorunlardır. Bu sorunlar PCDD/PCDF/KOK oluşumunu beraberinde getirir.

YAKMA

KISITLAMALAR

- Yakma işlemi, öğütme veya büyük kayaların ve kalıntıların çıkarılması veya fazla suyun giderilmesi gibi ön hazırlık gerektirebilir.
- Yakma tesislerinde teknik arızalar, inşaat malzemelerinin hasarlanması, sensör arızaları, operatör hataları ve güç kesintileri sıklıkla karşılaşılan sorunlardır. Bu sorunlar **PCDD/PCDF/KOK oluşumunu** beraberinde getirir.
- PCB ve dioksinlerin yakılmasında sadece saha dışında olan yakma tesisleri tercih edilmelidir.
- Kurşun, kadmiyum, cıva ve arsenik gibi uçucu ağır metaller yakma ünitesinde baca gazına geçerler.
- Saha dışında bir yakma fırını kullanıldığında, hafriyat sırasında oluşabilecek tehlikeli madde emisyonları ve atıkların taşıma esnasında topluma karşı olan potansiyel riski göz önüne alınmalıdır.

FİZİKSEL AYIRMA

AYIRMA	
Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı Suyu veya Toprak
Proses Türü	Fiziksel/Kimyasal Arıtma
Uygulanabilecek kirletici türleri	VOC, SVOC HVOC, HSVOC, Yakıtlar
Maliyet	0,36-1,20 USD/metreküp yeraltı suyu
Süre	3 Yıl – 10 yıl
Diğer	Ön arıtma veya son arıtma olarak kullanılır.

- Toprak için eleme, çökeltme hızına göre ayırma, vd.
Killi toprak için çok maliyetli olduğundan önerilmez
- Yeraltı suyu için filtrasyon

YERİNDE (IN-SITU) TEKNOLOJİLER

En çok kullanılan teknolojiler dahil edilmiştir

➤ YERALTI SUYU

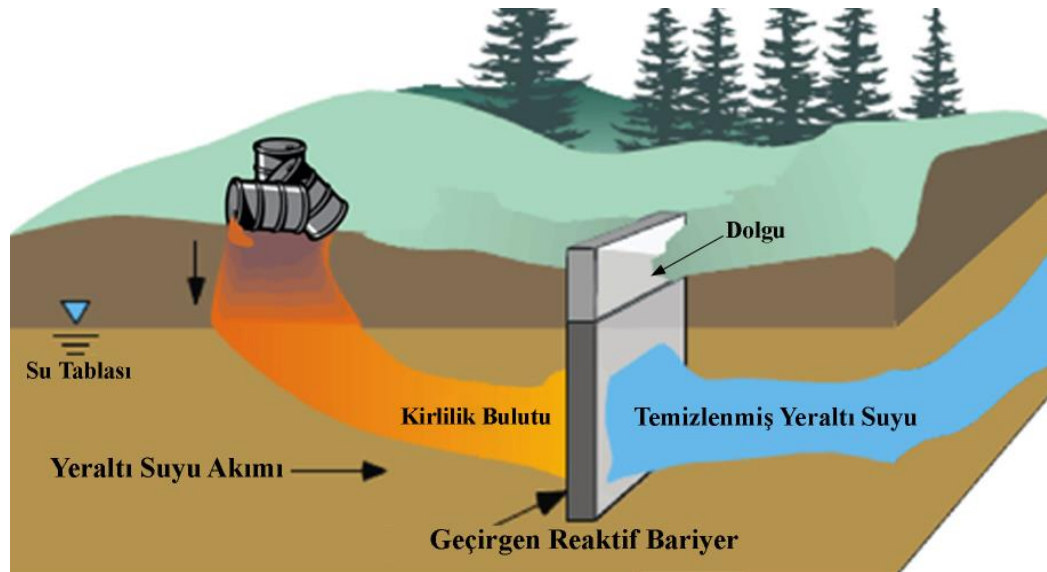
- Geliştirilmiş Biyoremediasyon ✓
- Kimyasal Arıtma ✓
- Hava Kabarcıklı Arıtım (AS) ✓
- Geçirgen Reaktif Bariyer (Pasif/Reaktif Arıtma Bariyerleri)

GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER

PASİF/REAKTİF ARITMA BARIYERLERİ

Yerinde /Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam
Proses Türü
Uygulanabilecek kirletici türleri
Maliyet
Süre

Yerinde
Yeraltı Suyu
Fiziksel/Kimyasal
VOC, HVOC, SVOC, HSVOC
1267 – 2580 USD/metreküp
En çok 3 yıl



GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER

- Kirletici maddelerin akış yoluna yerleştirilen bir reaksiyon duvarı ile suyun pasif bir şekilde duvarın içinden geçerken temizlenmesini sağlayan bir yöntemdir.
- Bariyerler su geçişine izin verirken, kirletici geçişine sıfır değerlikli metaller, şelatlar, sorbentler, mikroorganizmalar ve benzeri maddelerin etkisiyle izin vermezler.
- Reaktif maddelere bağlı olarak kirleticiler farklı mekanizmalarla temizlenir:
 - Soğurulma (adsorpsiyon), tutunma, çökelme, kimyasal tepkime, biyobozunma

GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER

KISITLAMALAR

- Sistem tasarımı için gerekli parametreler; hidrolik eğim, kirletici karakteristikleri, yeraltı suyu derinliği, geçirgen olmayan PRB bağlantı noktasına olan derinlik, saha stratigrafisi; yeraltı suyu hidrolojisi, su kalitesi, akış hızı ve yönü, toprak geçirgenliği ve tamponlama kapasitesidir.
- Pasif duvarların geçirgenliği metal tuzlarının çökmesi, biyolojik etkinlik veya diğer kimyasal çökme tepkimeleri nedeniyle azalabilir. Yenileme, bertarafa gönderme gerekebilir.
- Kazı ekipmanlarının çalışma koşulları nedeniyle, bariyerler 15 metreden daha derine yerleştirilemez.
- Daha derine bariyer yerleştirilmesi, daha kısa bir bariyerin, büyük çaplı sondaj deliklerinin açılması ve çatlatmayla genişletme yapılması sonrası yerleştirilmesi ile mümkün olabilir.

YERİNDEN ALINARAK (EX-SITU) GERÇEKLEŞTİRİLEN TEKNOLOJİLER

➤ YERALTI SUYU

➤ Pompaj ve arıtma

YERALTI SUYU POMPALAMA (POMPAJ VE ARITMA)

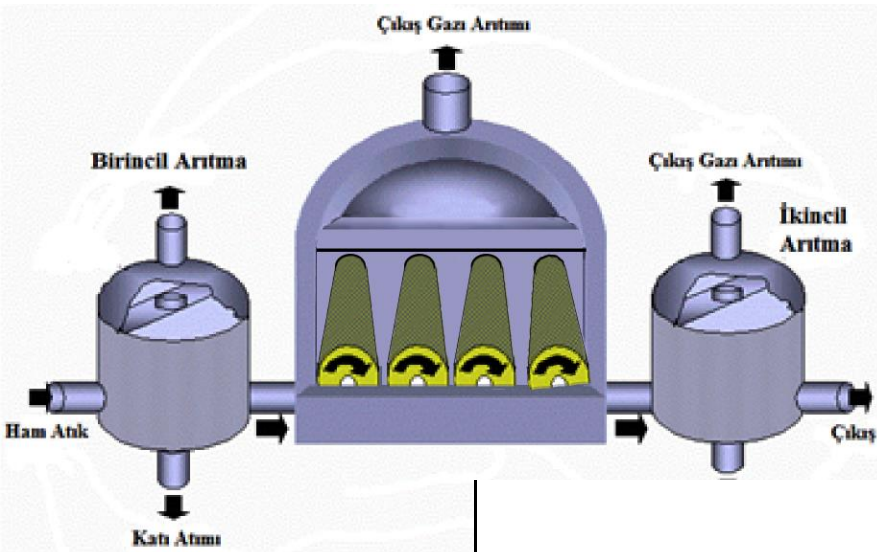
POMPAJ VE ARITMA

Yerinde /Yerinden alınarak	Yerinden alınarak
Uygulanabilen Kirlenmiş Ortam	Yeraltı suyu
Proses Türü	Fiziksel
Uygulanabilecek kirletici türleri	Tüm kirleticiler
Maliyet	Yeraltı suyu pompalama miktarı ve seçilen arıtma teknolojisine göre çok değişiklik gösterir
Süre	En az 3 yıl

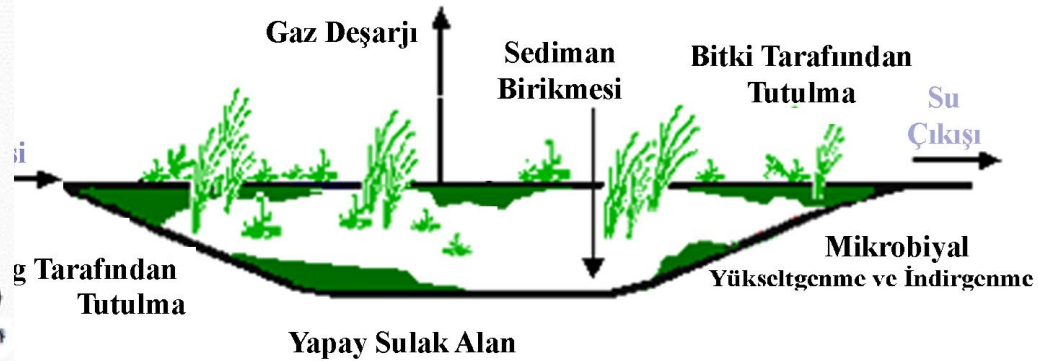
Pompalandıktan sonra:

- Biyoreaktörler
- Yapay sulak alan
- Adsorpsiyon/Absorpsiyon
- İyon değişimi
- Yumaklaştırma/Topaklaştırma/Çöktürme
- Ayırma (çöktürme, filtrasyon)

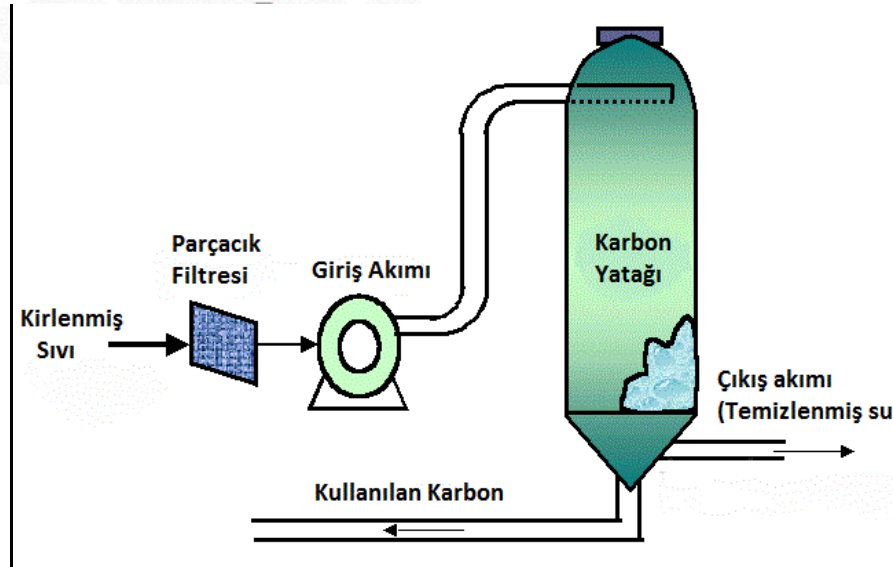
YERALTI SUYU POMPALAMA POMPAJ VE ARITMA → SONRASI



Bioreaktör



Yapay Sulak Alan



**Granül aktif karbon
adsorpsiyonu**

ÖNEMLİ NOT

- Tek bir **EN İYİ teknoloji** yoktur
 - Bir kirletici için
 - Bir toprak/yeraltı suyu yapısı için
- Tek bir **EN İYİ teknoloji** yoktur
 - “En az sayıda kısıtlaması olan”
 - “En makul fiyatlı olan”
 - “En hızlı olan”
 - “En az izleme/takip gerektiren”
- **Formül yoktur, her saha kendi içinde değerlendirilmelidir**

Kılavuzda Teknoloji Açıklamaları

- Tanım
- Uygulanabilirlik
- Kısıtlamalar
- Süre
- Maliyet
- Uygulamada dikkat edilecek noktalar

ÖNEMLİ NOT _ Maliyet ile ilgili

- Kirlenmiş sahaların iyileştirme maliyetlerinin belirlenmesinde, özellikle temizlenmesi gereken toprak hacmi arttıkça ($>5000 \text{ m}^3$) maliyetler düşebilir:
 - Özellikle pasif/reaktif arıtım duvarları, yerinden alınarak ısı desorpsiyon ve toprak yıkama teknolojileri için geçerli olabilir.
- Temizlenmesi gereken hacim arttıkça, bu teknolojilerin taşıma ve ilk maliyetleri daha uygun hale gelmektedir.

ÖNEMLİ NOT

- Genellikle, hiçbir teknoloji tek başına bir sahanın temizlenmesi için yeterli değildir.
- Bu nedenle her zaman teknolojiler **çeşitli kombinasyonlarda** kullanılarak en uygun temizleme süreci ortaya konmaya çalışılmalıdır



ÖRNEK SÜREÇLER



Başarısı Kabul Görmüş Teknolojiler

- Her kirlenmiş sahanın kendine özgü koşullarının olduğu hiçbir zaman unutulmamak kaydıyla, her seferinde bir kirlenmiş saha için çok çeşitli teknolojilerin en başından değerlendirilmesi de ciddi insan gücü ve zaman kaybı olabilmektedir.
- Bu durumdan hareketle, sahanın temizlenmesine karar verildikten sonra, sahaya özgü bilgiler elde edilerek, daha önce benzer sahalarda aynı kirleticiler için uygulanmış olan teknikleri ortaya koyulmuştur.

Başarısı Kabul Görmüş Teknolojiler

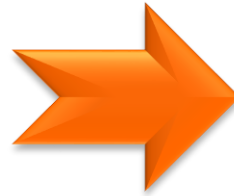
HVOC

Halojenli (TCE, vinil klorür, klorobenzen, vb)

VOC

halojensiz VOClerle (BTEX gibi aromatikler, keton/furanlar, vb.)

İle kirlenmiş topraklar için



Toprak Gazı Ekstraksiyonu (SVE)

Isıl Desorpsiyon

Yakma

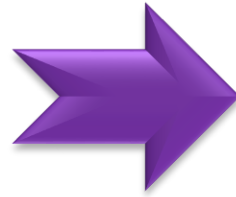
başarısı kabul görmüş teknolojilerdir.

- Bu teknolojiler, SVE için %85'in, diğerleri için %95'in üzerinde VOC giderim verimini tutarlılıkla sağladığından önerilmektedir.
- VOC ve HVOClerle kirlenmiş topraklar için SVE'nin sahaların çok büyük çoğunluğunda uygulandığı, diğer yandan göreceli çok daha az sayıda sahada termal desorpsiyon ve yakma uygulandığı bilinmektedir.

Başarısı Kabul Görmüş Teknolojiler

Ahşap işleme bölgelerinde
organik bileşiklerle
(pentaklorofenol, kreosot vb.)

ile kirlenmiş olan
topraklar için



Geliştirilmiş Biyoremediasyon

Isıl Desorpsiyon

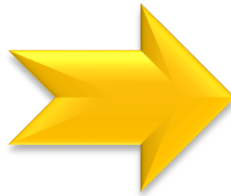
Yakma

başarısı kabul görmüş
teknolojilerdir.

- Biyoremediasyon saha içi veya dışı olarak uygulanabilmekte ve PAHlar için %64-95, klorofenoller için %78-98 giderim sağlandığından önerilmektedir.
- Termal desorpsiyonun verimi % 82-99, yakmanın ise %90-99 olabilmektedir.

Başarısı Kabul Görmüş Teknolojiler

İnorganiklerle
kirlenmiş sahalarda



solidifikasyon/stabilizasyon
başarısı kabul görmüş
teknolojilerdir.

- Bu teknoloji ile inorganiklerin giderim verimi %80-90'dır.

KİRLENMİŞ TOPRAK

VOC	HVOC	SVOC	HSVOC
SVE*	SVE*	Biyoremediasyon	Biyoremediasyon
Isıl	Isıl	Biyoverilasyon	Biyoverilasyon
desorpsiyon*	desorpsiyon*	Kompost	Kompost
Yakma*	Yakma*	Arazide ıslah	Arazide Islah
Biyoverilasyon	Biyoverilasyon	Siluri Faz Biyolojik Arıtma	Siluri Faz Biyolojik Arıtma
		Yakma	Halojensizleştirme
		Hafriyat, ve saha dışına taşıma	Yakma
			Hafriyat, ve saha dışına taşıma

** Bu tip kirlilikte genel olarak başarısı kabul görmüş teknolojidir.*

KİRLENMİŞ TOPRAK

Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
Biyoventilasyon*	Solidifikasyon*	Biyoreaktör
Biyoremediasyon	Hafriyat, ve saha dışına bertaraf	Kompost
Kompost	Kimyasal	Arazide Islah
Sıvı-Gaz Emişli Arıtım	ekstraksiyon	Fitoremediasyon
Biyoyığın	(asit)	Biyoremediasyon
Arazide Islah		
Siluri Faz Biyolojik Arıtma		
Yakma		
SVE		
Düşük Sıcaklıkta Isıl Desorpsiyon		

KİRLENMİŞ YERALTI SUYU

VOC	HVOC	SVOC**	HSVOC**
Havalı Sıyırma*	Havalı Sıyırma*	Karbon adsorpsiyonu	Karbon adsorpsiyonu
Karbon adsorpsiyonu*	Karbon adsorpsiyonu*	UV oksidasyonu	UV oksidasyonu
Ayırma, membran pervoporasyon	Ayırma, membran pervoporasyon		

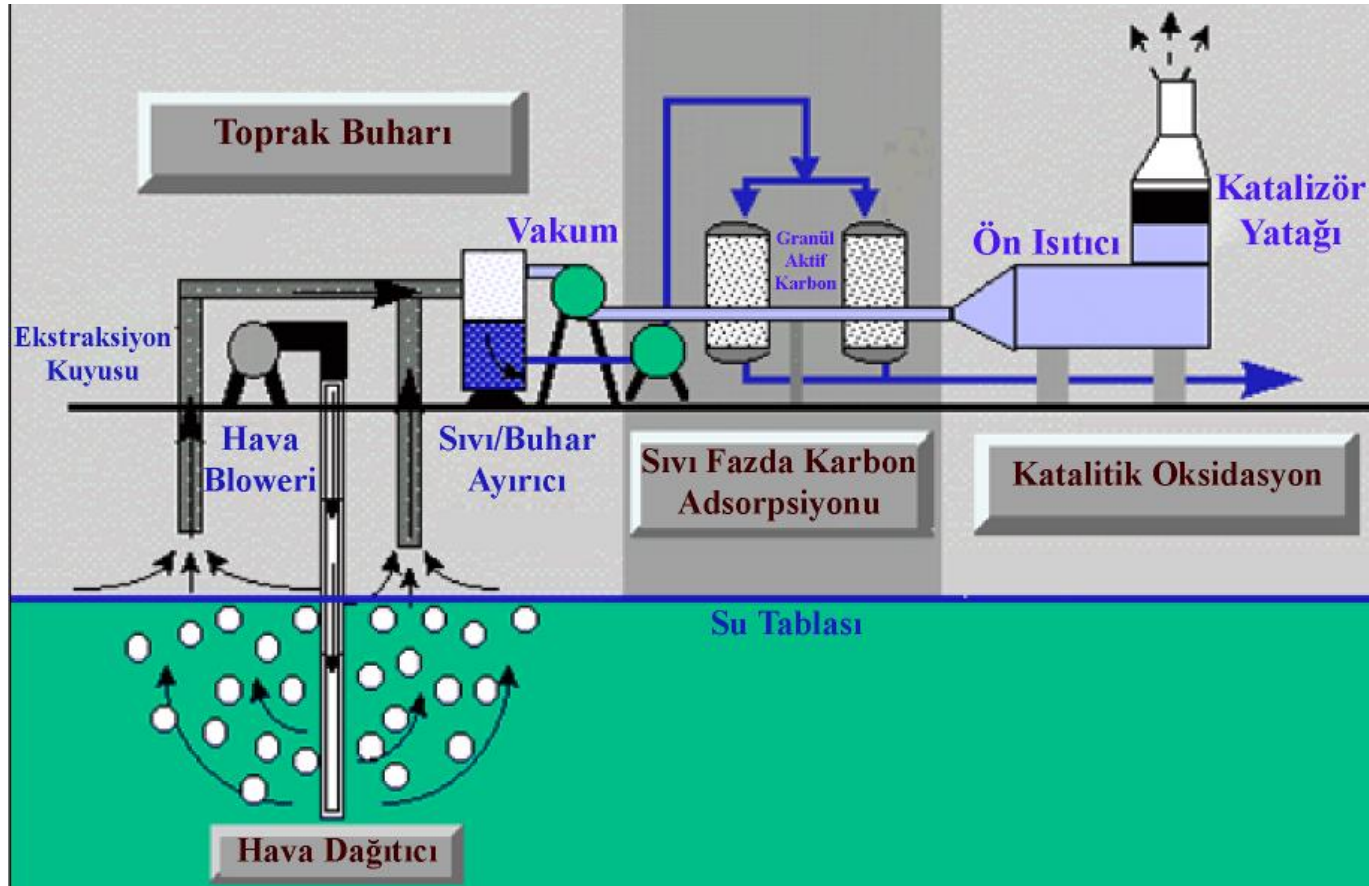
* Bu tip kirlilikte genel olarak başarısı kabul görmüş teknolojidir.

** Yeraltı suyunda belirtilen kirletici grupları için yerinde temizleme teknolojileri yaygın olarak kullanılmamaktadır.

KİRLENMİŞ YERALTI SUYU

Yakıt	İnorganik	Patlayıcı
Havalı Sıyırma	Çöktürme/Yumaklaştırma /Flokülasyon	Karbon adsorpsiyonu
Karbon adsorpsiyonu	Ayırma, filtrasyon	UV oksidasyonu
Çift Faz Ekstraksiyon	İyon değişimi	
Sıvı/Gaz ekstraksiyonu		
Sıvı-Gaz Emişli Arıtım		
Hava enjeksiyonu		

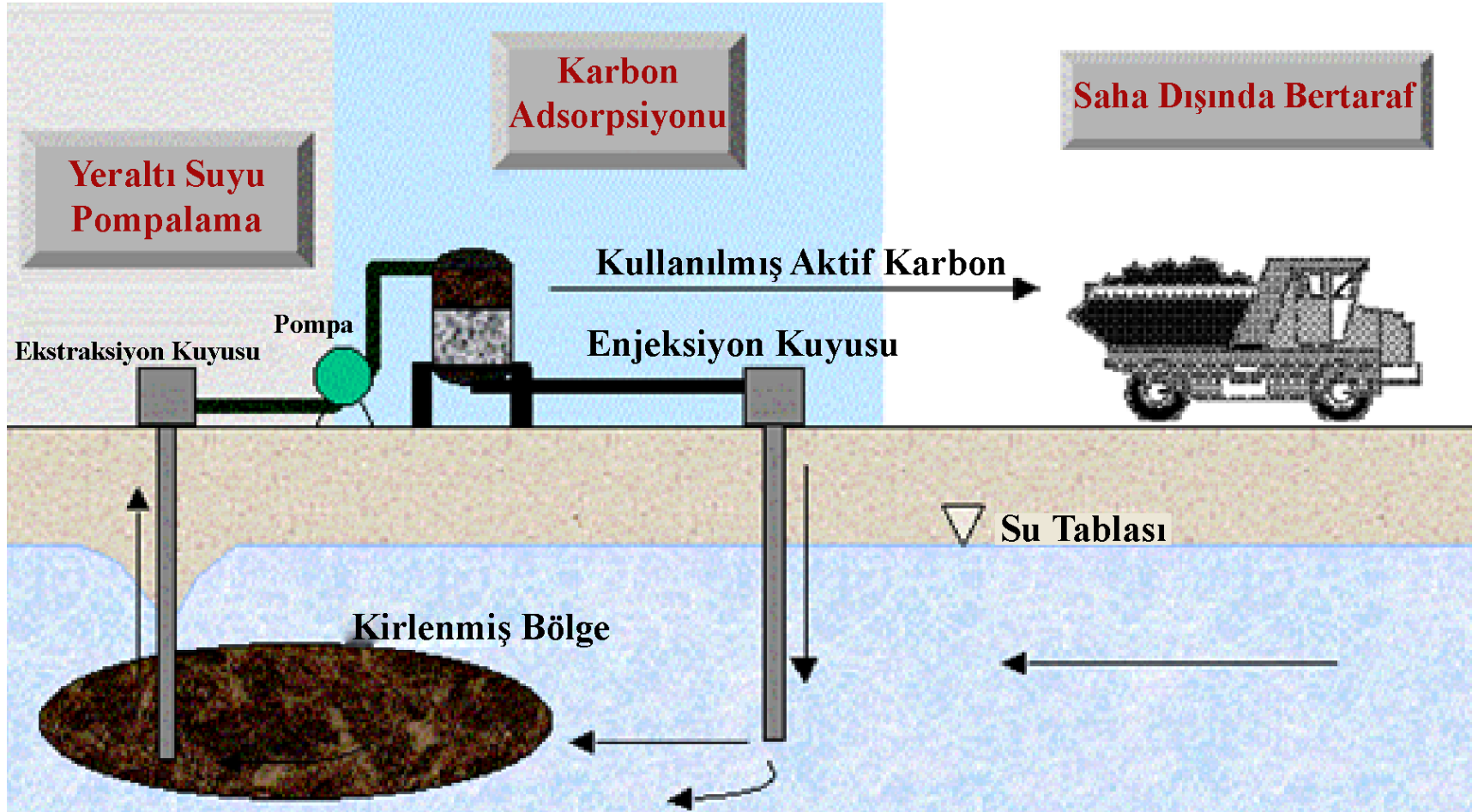
VOC veya HVOC için Örnek Temizleme



VOC veya HVOC için Örnek Temizleme

- SVE (Toprak gazı ekstraksiyonu) sistemi (ve hava kabarcıklı arıtım, AS) kirlenmiş topraktan (ve yeraltı suyundan) VOC buharını çekmek için kullanılır.
- Hava enjeksiyonu (AS) ile su tablasının altından hava verilerek biyoremediasyon verimi geliştirilmiş olur.
- VOC ile kirlenmiş su ve gaz, sıvı/gaz ayırıcısından geçtikten sonra sıvı faz granül aktif karbon (GAC) sisteminden geçirilir. GAC sistemi sudaki VOCları giderir. Çıkış suyu deşarj edilir veya sıvı geri kazanım şeklinde geri pompalanır.
- Bu esnada gaz fazında olan VOClar katalitik oksitlenme ile tamamen yok edilir. Karbondioksit ve su buharı oksidasyonun nihai ürünleri olarak atmosfere salınır

HVOC'LERLE KİRLENMİŞ YERALTI SULARI İÇİN ÖRNEK İYİLEŞTİRME

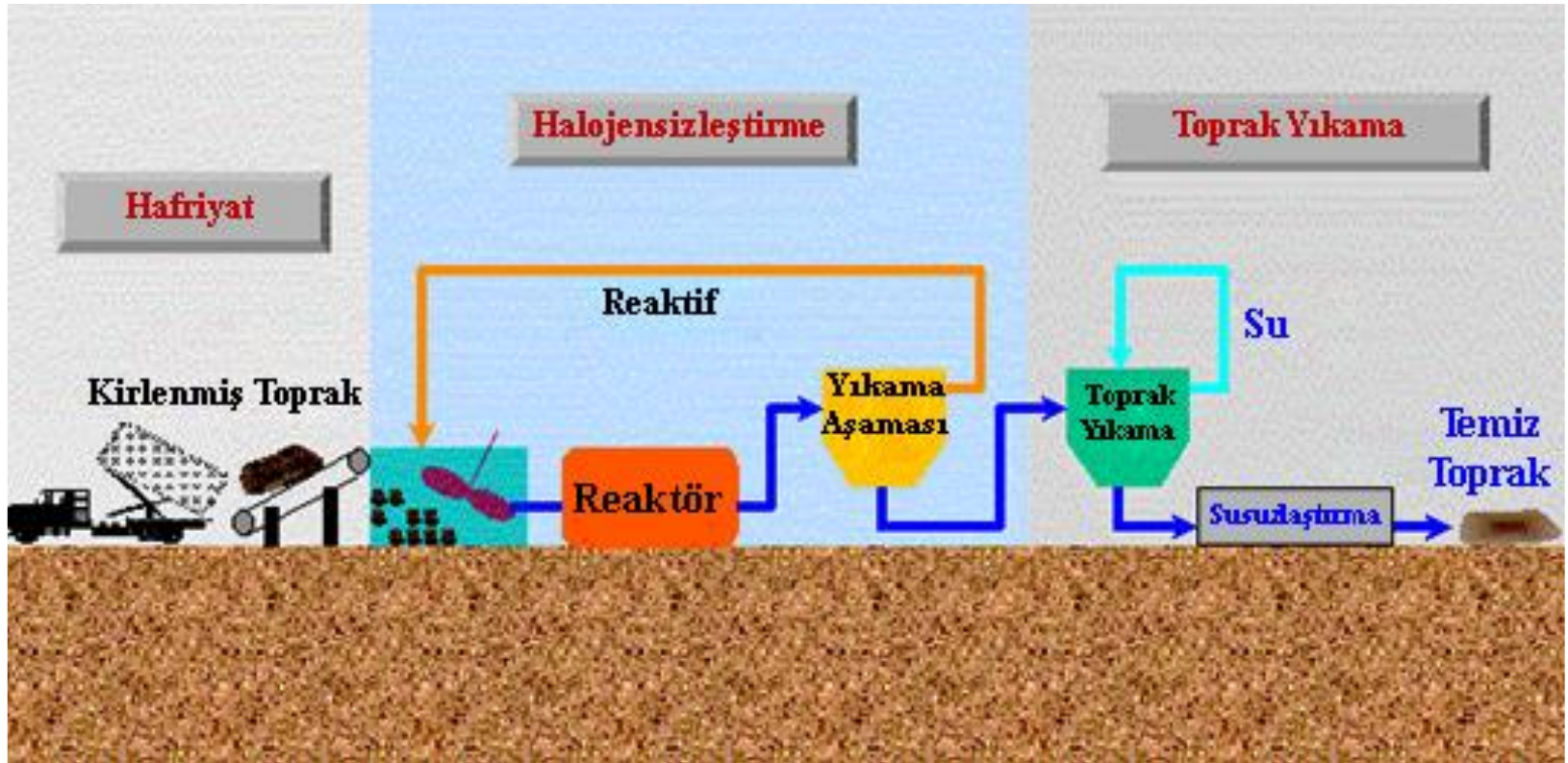


Pompala & Arıt sistemi

HVOCLERLE KİRLENMİŞ YERALTI SULARI İÇİN ÖRNEK İYİLEŞTİRME

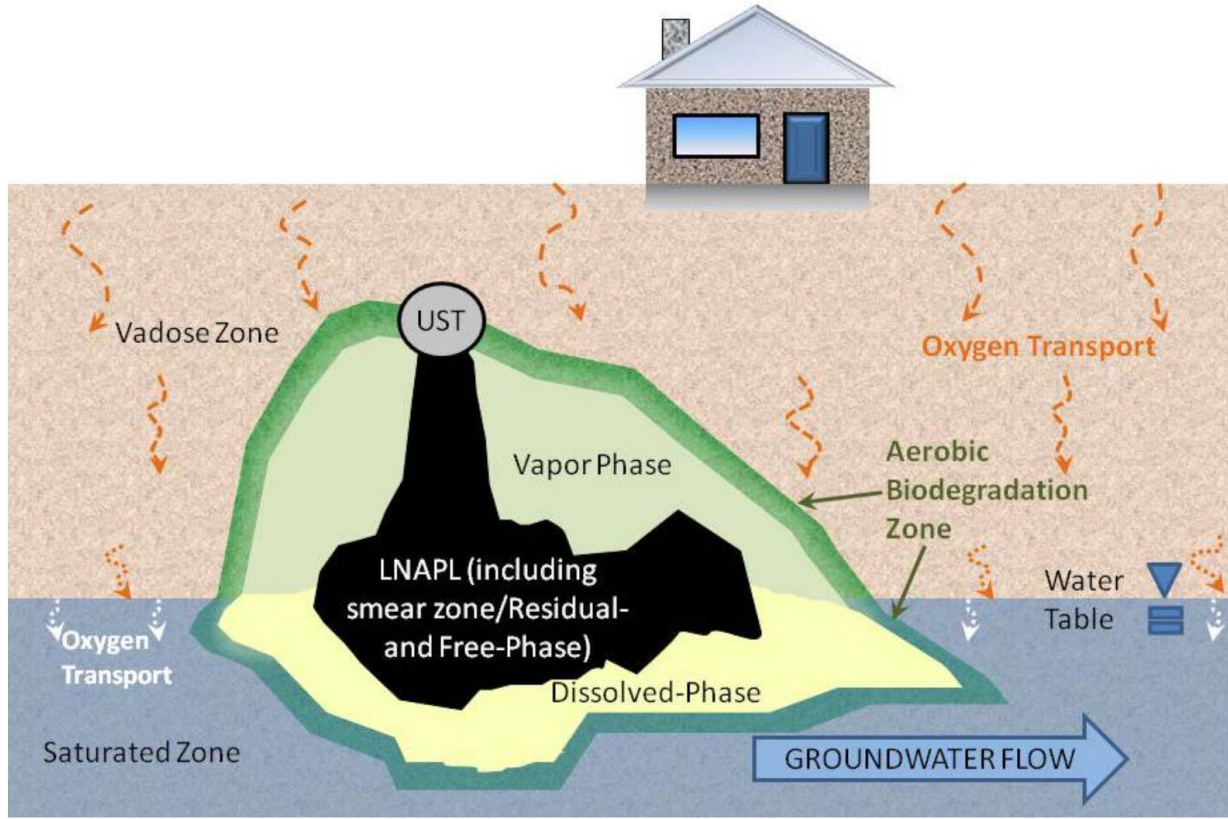
- Kirlenmiş yeraltı suyunu yüzeye çıkarmak için pompalama sistemi kullanılır.
- VOC ile kirlenmiş sular sıvı faz granül aktif karbon adsorpsiyon sisteminden geçirilir. GAC sistemi sudaki VOCları giderir ve çıkış suyu deşarj edilir veya yeraltına geri beslenir.
- Ömrü tamamlanan GAC geri kazanım veya bertaraf amacıyla yerinden alınır

HSVOC'LERLE KİRLENMİŞ TOPRAKLAR İÇİN ÖRNEK TEMİZLEME



HSVOC'LERLE KİRLENMİŞ TOPRAKLAR İÇİN ÖRNEK TEMİZLEME

- Kirlenmiş toprak hafriyatı gerçekleştirilerek bertaraf tesisine taşınır.
- İlk olarak kirlenmiş toprak halojensizleştirilir. Bu proste, toprak kimyasal reaktif maddeler ile karıştırılarak SVOC ile reaktiflerin tepkimesinin gerçekleştirildiği reaktöre beslenir.
- Sonrasında, fazla kimyasal reaktifler topraktan ayrılıp geri kazanılarak karıştırıcıya geri döndürülür.
- Halojensizleştirilen toprak, kalıntı olabilecek kirleticileri gidermek için yıkama prosesinde su ile temizlenir. Temizlenmiş (hedef kirletici konsantrasyonuna ulaşmış) toprağın susuzlaştırmasından sonra süreç tamamlanmış olur.



YAKITLAR VE SIZDIRAN YERALTI 
YAKIT TANKLARI ile ilgili

Yakıt Kirliliği için Uygun Teknolojiler

Yakıt Kirliliği

Toprak

Yerinde

- Biyoventilasyon
- Geliş. Biyoremediasyon
- Toprak Buhar Ekstaksiyonu
- Isıl Arıtım
- Fitoremediasyon
- Çatlaklama
- Toprak Yıkama

Yerinden Alınarak

- Biyoyiğn
- Kompost
- Arazide Islah
- Siluri Faz Biyolojik Arıtım
- Yakma
- Piroliz
- Isıl Desorpsiyon
- Kimyasal Ekstraksiyon
- Kimyasal İnd./Yük.
- Toprak Yıkama
- Yüzey Kapatma
- Hafriyat, saha dışına taşıma

Yeraltı Suyu

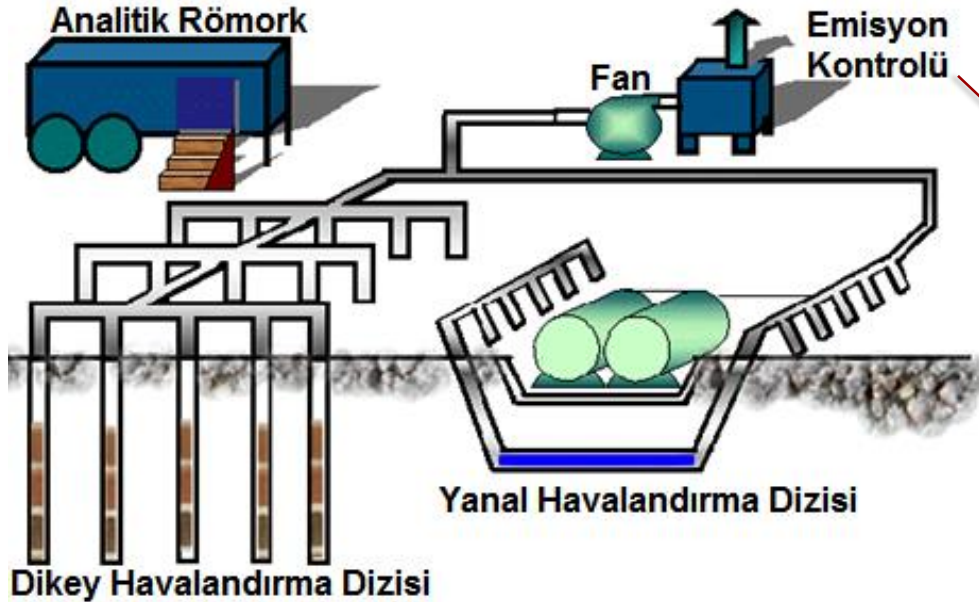
Yerinde

- Geliş. Biyoremediasyon
- İzlemeli Doğal Giderim
- Hava Kabarcıklı Arıtım
- Sıvı-Gaz Emişli Arıtım
- Çift Faz Ekstraksiyonu
- Isıl Arıtım
- Fiziksel Arıtım Bariyeri
- Fitoremediasyon
- Yönlü Kuyular
- Kuyu İçi Havalı Sıyırma
- Pasif/Reaktif Arıtım Duvarı
- Derin Kuyu Enjeksiyon

Yerinden Alınarak

- Biyoreaktör
- İleri Oksidasyon
- Granül Aktif Karbon
- Ayırma
- Yapay Sulak Alan
- Pompalama ve Arıtma

Yakıtlarla KİRLENMİŞ TOPRAKLAR İÇİN ÖRNEK TEMİZLEME

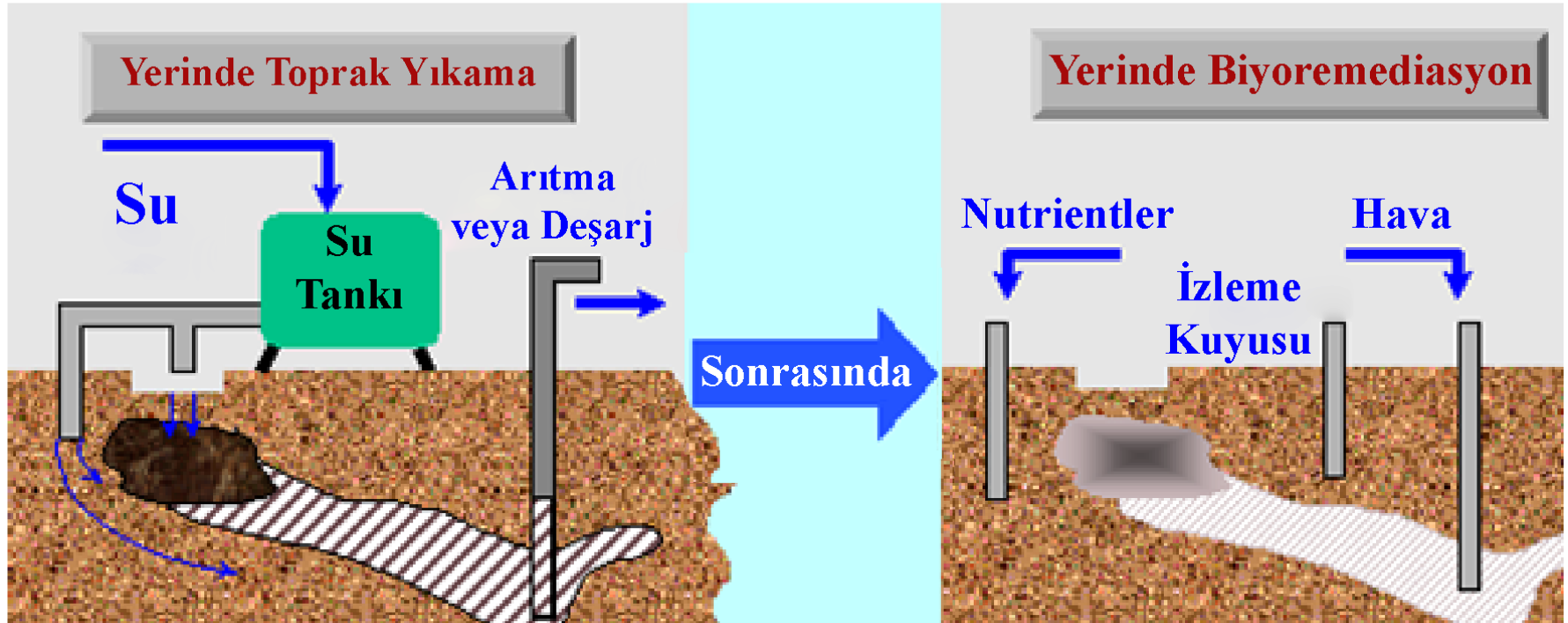


SVE prosesinden farklı olarak, düşük basınçta hava verildiği için genellikle toprak gazının arıtılmasına ihtiyaç olmaz

Biyoventilasyon

Toprak yıkama sonrası veya tek başına

Yakıtlarla KİRLENMİŞ TOPRAKLAR İÇİN ÖRNEK TEMİZLEME



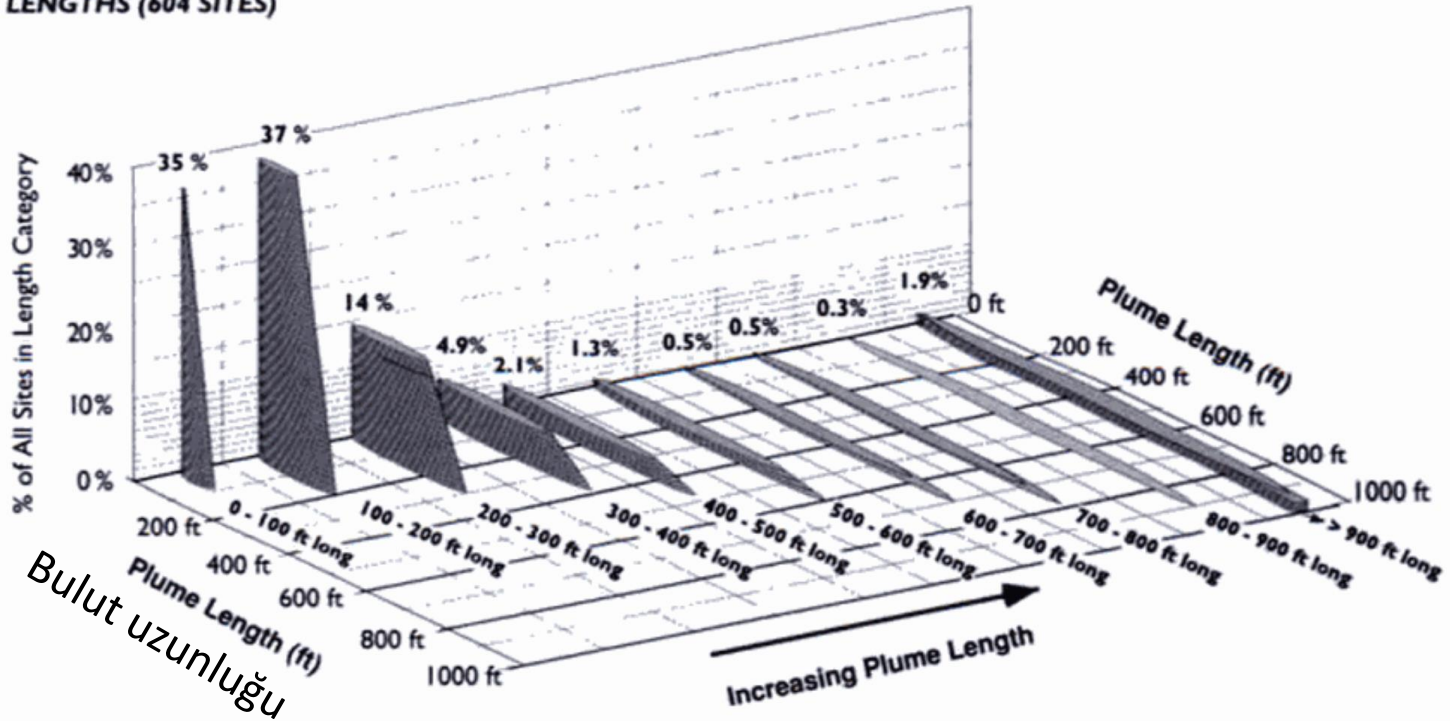
Yakıtlarla KİRLENMİŞ TOPRAKLAR İÇİN ÖRNEK TEMİZLEME

- Yakıtlarla kirlenmiş toprak ilk olarak toprak yıkama prosesinden geçirilerek arıtılır. Bu işlem kirlenmiş sahanın üzerinden su enjeksiyonu ile gerçekleşir. Yüzey aktif maddeler veya diğer eklentiler toprağın yıkama etkisini iyileştirmek için kullanılabilir.
- Kirli su, yeraltı suyu akış yönünün altından ekstraksiyon kuyularından, arıtmak amacıyla (ör. yumaklaştırma/topaklaştırma/çöktürme, biyoreaktör, adsorpsiyon, vd) yukarı pompalanır.
- Toprağa yerinde biyolojik temizleme prosesi uygulanır. Biyoremediasyon verimini arttırmak için sahaya nütrient ve hava enjekte edilebilir.

Petrol Hidrokarbonlarının Yayılımı

Petrol hidrokarbonları kirliliğinin yayılımı – 604 farklı kirlenmiş sahadan edinilen bilgiler sızdıran yeraltı depolama tanklarında kirlilik bulutunun uzunluğunun tipik olarak (sahaların %86'sında) 100m'den az olduğunu göstermiştir.

PERCENTAGE OF PLUMES OF DIFFERENT LENGTHS (604 SITES)



Tüm uzunluk kategorilerinde % saha sayısı

Bulut uzunluğu

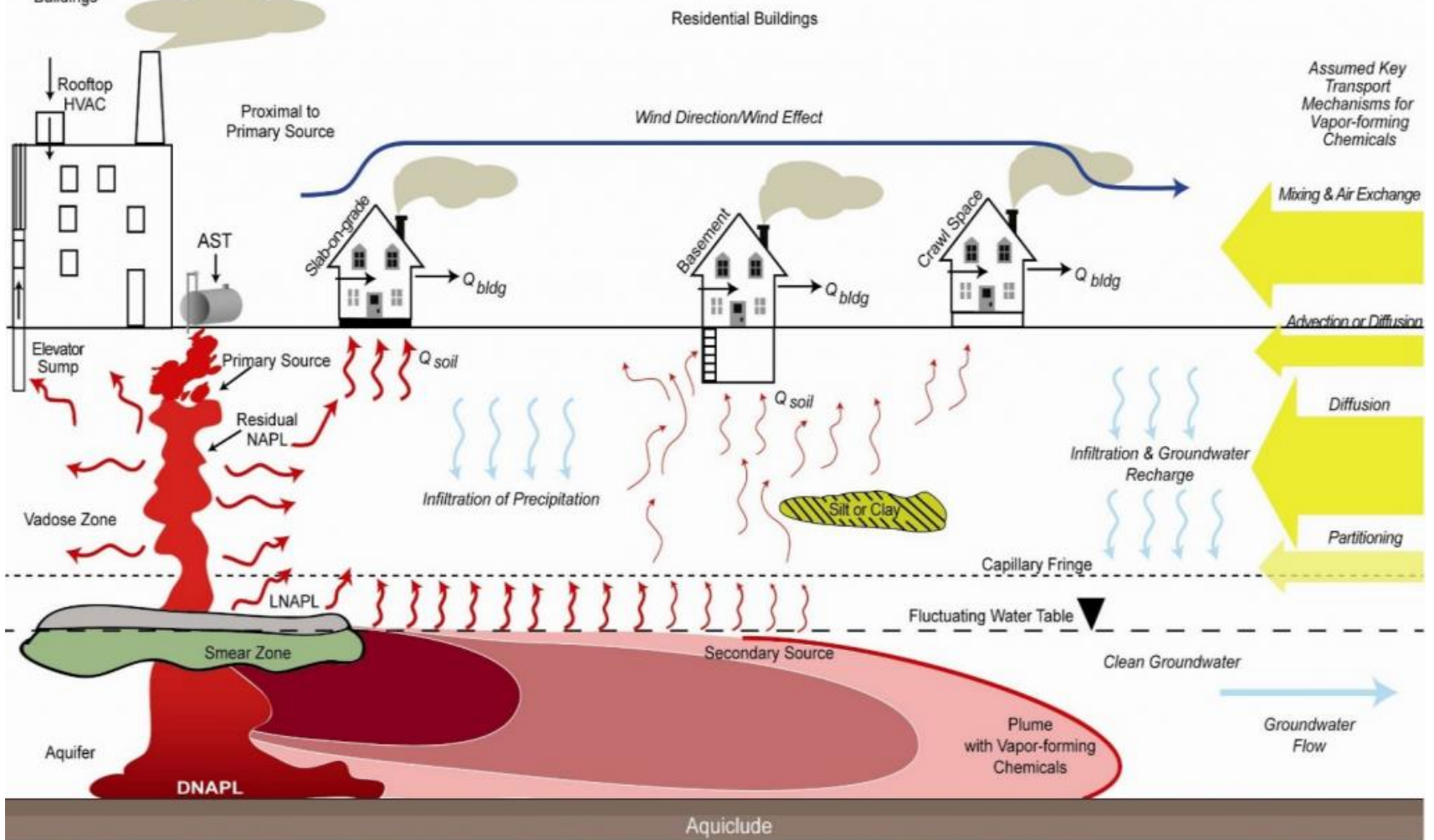
Temizlemede Karşılaşılan Zorluklar

Kirletici temizleme hedeflerine ulaşamamasındaki temel teknik sebepler:

- Saha karakterizasyonunda yaşanan problemler
 - Fiziksel heterojenite, yeraltı suyu akış güzergahının tahmininde yaşanan zorluklar
 - Yeraltının yeterince iyi tanımlanamaması
- Kirleticilerin ulaşması zor bölgelere taşınması (ör. Kil veya agregaların küçük gözeneklerine)
- Kirleticilerin yüzey altı toprak/malzemelerine tutunması (soğurulma)
- NAPL varlığı ve ortamdan temizlenememesinden dolayı sürekli kirletici kaynağı olarak işlev görmesi

Temizlemede Karşılaşılan Zorluklar

- Pompala-ve-arıt ve diğer girişimsel yöntemler, kaynak kirliliğini azaltmada çok etkili olsa da, hedef kirletici konsantrasyonlarına ulaşmakta zorluklar olabilir
- Yerinde uygulanacak –belki biraz daha uzun süreli- yöntemlerin (ör. izlemeli doğal giderim) ek olarak kullanılması düşünülebilir.



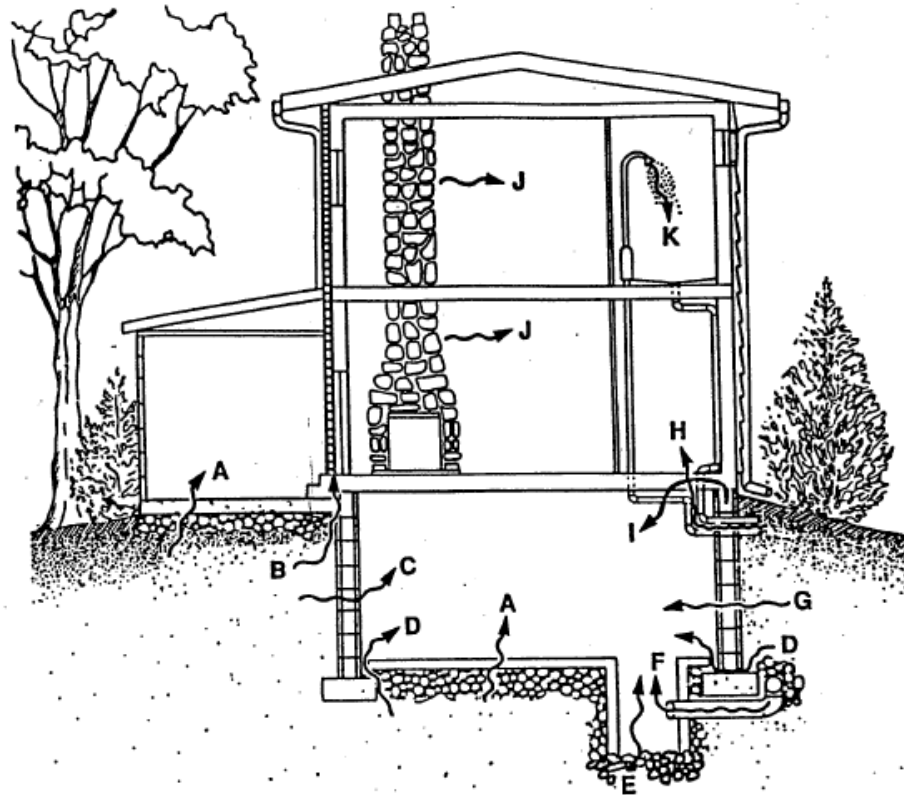
KİRLETİCİ BUHARI GİRİŞİMİ



Kirletici buharı girişimi

- Yeraltı yakıt depolama tanklarının sızdırması sonucu yakında bulunan ev/binalara kirletici buharının ulaşması söz konusu olabilir.
- Bina temelindeki tehlikeli madde buharı basıncının azaltılması amacıyla evlere ventilasyon yapılması gerekir
- Teknik bilgi ve destek ihtiyacı bulunmakta:
 - Tehlikeli madde buharı girişimi olan sahaların karakterize edilmesi
 - Buhar girişiminin azaltılması ve kontrolü

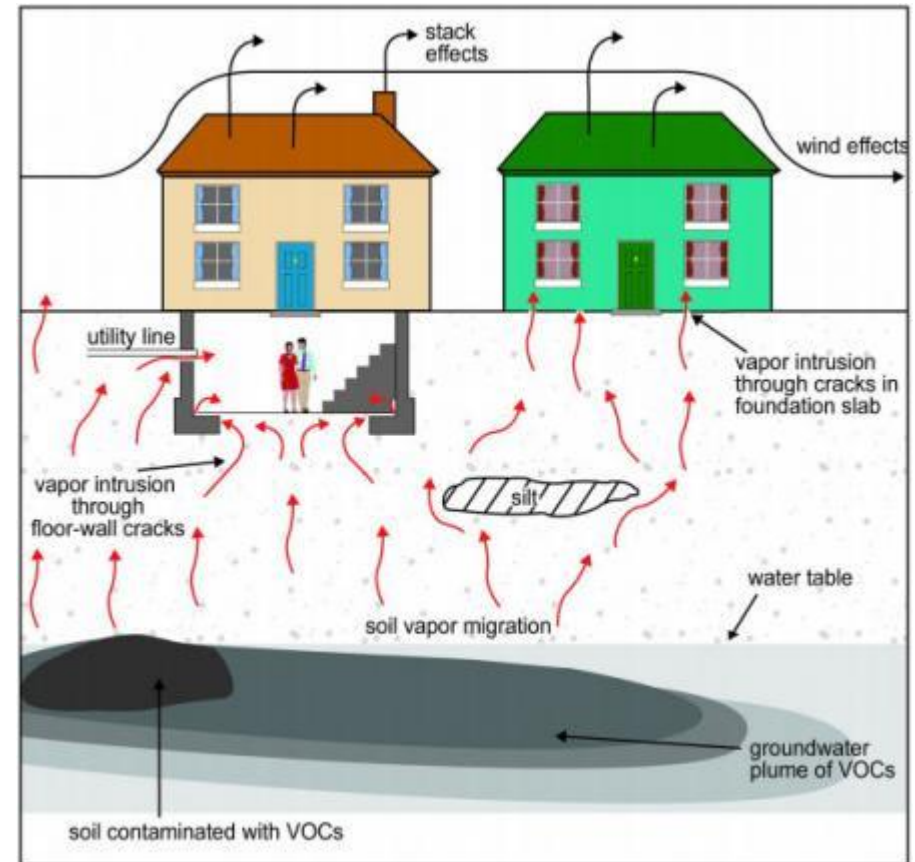
Kirletici buharı girişimi



- A. Cracks in concrete slabs
- B. Spaces behind brick veneer walls that rest on uncapped hollow-block foundation
- C. Pores and cracks in concrete blocks
- D. Floor-wall joints
- E. Exposed soil, as in a sump
- F. Weeping (drain) tile, if drained to open sump
- G. Mortar joints
- H. Loose fitting pipe penetrations
- I. Open tops of block walls
- J. Openings around fireplace and chimney supports
- K. Water (from some wells)

Source: EPA87

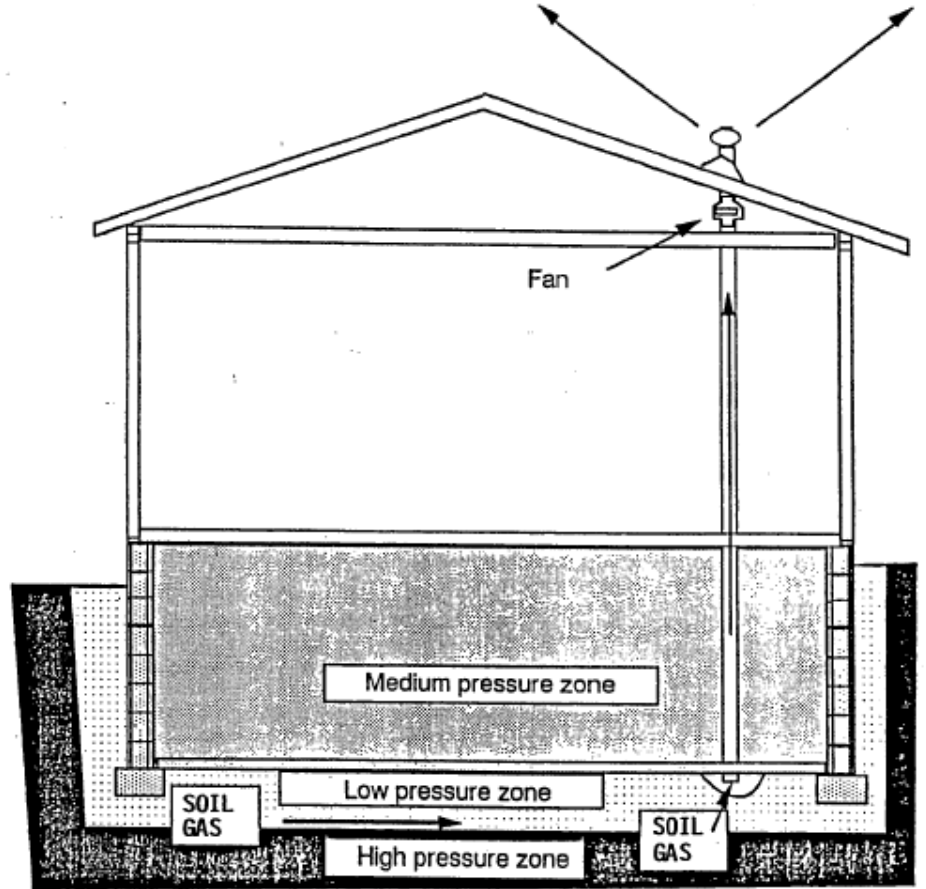
Figure 2-2. Major Soil Gas Entry Routes



Kaynak: USEPA, 1993

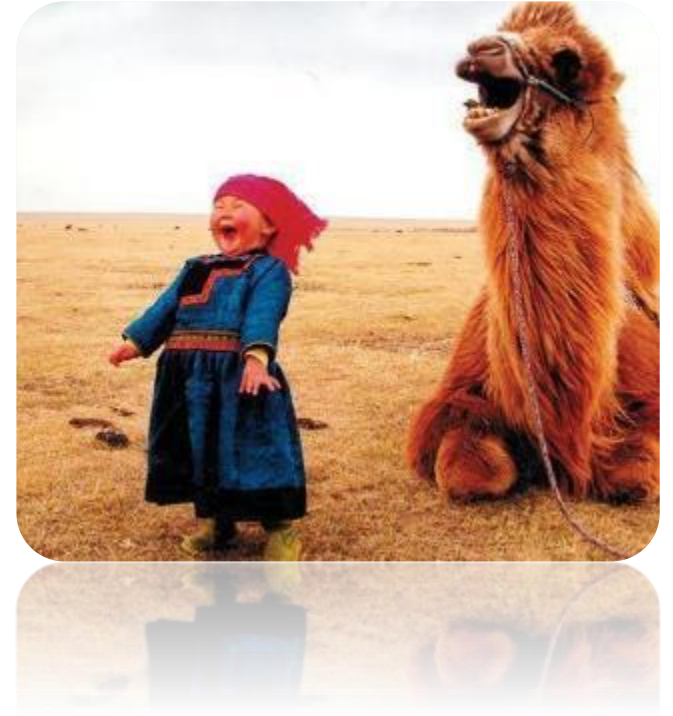
Kirletici buharının eve girmesinin önlenmesi

Betonarme/ahşap/çelik döşeme (tabliye) altı basınç giderme sistemi ile kirletici buharının eve girmesi önlenerek çatıdan tahliye sağlanır



Source: EPA91A

Figure 2-3. Theory of Operation of a Sub-slab Depressurization System



Teşekkürler... ↗