

Föroreningsspredning

Tillämpning och utvärdering
av metoder

Delrapport 2
Lakning av förorenad jord
resultat och utvärdering av metoder

RAPPORT 5863 • DECEMBER 2008



Kunskapsprogrammet



Föroreningsspridning – tillämpning och utvärdering av metoder

Delrapport 2

Lakning av förorenad jord –
resultat och utvärdering av metoder

Anja Enell, Statens Geotekniska Institut
Ebba Wadstein, Statens Geotekniska Institut
David Bendz, Statens Geotekniska Institut

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

Orderfax: 08-505 933 99

E-post: natur@cm.se

Postadress: CM-Gruppen, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/bokhandeln

Naturvårdsverket

Tel 08-698 10 00, fax 08-20 29 25

E-post: natur@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-5863-0.pdf

ISSN 0282-7298

Elektronisk publikaktion

© Naturvårdsverket 2008

Tryck: CM Gruppen AB

Omslagsfoton: Mark Elert

Förord

Ett av riksdagens miljömål är Giftfri miljö, och i detta mål ingår att efterbehandla och sanera förorenade områden. Brist på kunskap om risker med förorenade områden och hur de bör hanteras har identifierats som hinder för ett effektivt saneringsarbete. Naturvårdsverket har därför initierat kunskapsprogrammet Hållbar Sanering.

Föreliggande rapport redovisar projektet ”Föroreningsspridning – tillämpning och utvärdering av metoder” som genomförts inom Hållbar sanering. I projektet har olika metoder för bedömning av lakning och föroreningsspridning testats och utvärderats genom att applicera dem på två förorenade områden.

Kemakta Konsult har varit projektledare och representanter från IVL Svenska Miljöinstitutet, KTH, Statens Geotekniska Institut (SGI) och Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) har deltagit i projektet.

Projektet redovisas genom en huvudrapport och två delrapporter enligt följande:

Föroreningsspridning – tillämpning och utvärdering av metoder –

- *Huvudrapport*. Författare har varit Mark Elert, Kemakta Konsult; Karin Eliaeson, IVL; Johan Strandberg, IVL; Sara Nilsson, IVL; Ebba Wadstein, SGI; Anja Enell, SGI; Dan Berggren Kleja, SLU och Jon Petter Gustafsson, KTH. Rapport 5834. ISBN 978-91-620-5834-0
- *Delrapport 1*. Rapport 5862. ISBN 978-91-620-5862-3
 - Del A*. Redovisning av fältarbete och analysresultat. Författare har varit Karin Eliaeson, IVL och Dan Berggren Kleja, SLU.
 - Del B*. Multivariatmodellering av mark-, lak- och grundvattendata. Författare har varit Karin Eliaeson, Sara Nilsson, Jonas Röttorp och Johan Strandberg, IVL.
- *Delrapport 2*. Utvärdering av metoder för uppskattning av lakning för organiska och oorganiska ämnen från förorenad jord. Författare har varit Anja Enell, Ebba Wadstein och David Bendz, SGI. Rapport 5863. ISBN 978-91-620-5863-0.

Delrapport 1A redovisar utfört fältarbete och analysresultat från jord-, mark- och grundvatten. Delrapport 1B utvärderar analysresultaten från jord, mark- och grundvatten samt resultaten från laktesterna med multivariatanalys. För detaljerad information om laktesterna genomförande och analysresultat hänvisas till delrapport 2. Huvudrapporten sammanfattar delrapporterna samt utvärderar hur väl teoretiska spridningsmodeller överensstämmer med erhållna faktiska resultat från markundersökningarna och laktesterna.

Tommy Hammar, Länsstyrelsen i Kalmar län, har varit Hållbar Sanerings kontaktperson för arbetet.

Naturvårdsverket har inte tagit ställning till innehållet i rapporten. Författarna svarar ensamma för innehåll, slutsatser och eventuella rekommendationer.

Naturvårdsverket i december 2008

Innehåll

SAMMANFATTNING	7
SUMMARY	8
1 INLEDNING/BAKGRUND	9
2 SYFTE	11
3 MATERIAL OCH METOD	12
3.1 Material	13
3.2 Provberedning	14
3.3 Totalhaltbestämning	14
3.3.1 Totalhalt organiskt kol, TOC	14
3.3.2 Totalhalter oorganiska ämnen	15
3.3.3 Totalhalter organiska ämnen (PAH)	15
3.4 Metoder för utlakning av oorganiska ämnen	15
3.4.1 Skaktest (tvåstegslakning) SS-EN 12457-3	15
3.4.2 Modifierat skaktest (tvåstegslakning)	16
3.4.3 Perkolationstest, SS-CEN/TS 14405	16
3.4.4 Modifierat perkolationstest	17
3.4.5 Perkolationstest med återcirkulation	17
3.5 Metoder för utlakning av organiska ämnen (PAH)	18
3.5.1 Skaktest (enstegslakning)	19
3.5.2 Perkolationstest med återcirkulation, ER-H-metoden	20
3.5.3 Förlusttester vid organisk lakning	21
3.6 pH-statisk lakning och ANC/BNC	22
3.6.1 prEN 14997, med kontinuerlig pH-kontroll	22
3.6.2 ANC/BNC	23
4 RESULTAT	24
4.1 Totalhalter	24
4.1.1 Totalhalt organiskt kol	24
4.1.2 Oorganiska ämnen	24
4.1.3 Organiska ämnen (PAH)	27
4.2 Utlakning av oorganiska ämnen	27
4.2.1 Skaktest (tvåstegslakning), SS-EN 12457-3	27
4.2.2 Perkolationstest, SS-CEN/TS 14405	31
4.2.3 Perkolationstest med återcirkulation	37
4.3 Utlakning av organiska ämnen (PAH)	38
4.3.1 Skaktest (enstegslakning)	38
4.3.2 Perkolationstest med återcirkulation	40
4.3.3 Förlusttester	42
4.4 pH-statisk lakning och ANC/BNC	44

5	UTVÄRDERING	47
5.1	Utlakning av oorganiska ämnen	47
5.1.1	Metodernas repeterbarhet	47
5.1.2	Lakbara halter med H ₂ O i jämförelse med CaCl ₂	50
5.1.3	Variation mellan olika tester	55
5.2	PH-statisk lakning och ANC/BNC	61
5.3	Utlakning av organiska ämnen (PAH)	63
5.3.1	Metodernas repeterbarhet	63
5.3.2	Utlakade halter	64
5.3.3	Uppskattningar av K_{OC}	68
5.3.4	Förluster till utrustningens väggar	73
6	SLUTSATSER	74
6.1	Lakning av oorganiska ämnen	74
6.2	Lakning av organiska ämnen (PAH)	75
	REFERENSER	76

BILAGA 1 OCH 2 (Analysprotokoll): Se separat rapport
ISBN 978-620-5865-4 i Naturvårdsverkets webb-bokhandel
www.naturvardsverket.se/bokhandeln
Obs! Endast som pdf-fil

Bilaga 1 Analysprotokoll SGI

- 1.1 Analysprotokoll SGI Grimstorp
- 1.2 Analysprotokoll SGI Töllstorp

Bilaga 2 Analysprotokoll ALS Scandinavia AB

- 2.1 Analysprotokoll ALS Grimstorp
- 2.2 Analysprotokoll ALS Töllstorp
- 2.3 Analysprotokoll ALS Övrigt

SAMMANFATTNING

I projektet ”Föroreningsspridning - tillämpning och utvärdering av metoder” har olika metoder för bedömning av lakning och föroreningsspridning studerats på två förorenade områden. De områden som studerats är ett f.d. gjuteri och ytbehandling i Töllstorp, Gnosjö kommun och en f.d. impregneringsanläggning i Grimstorp, Nässjö kommun. Ett flertal olika metoder har använts, experimentella metoder, enkla riskbedömningsmodeller (riktvärdesmodeller) samt mer komplicerade modeller (geokemiska modeller och transportmodeller). Syftet har varit att utvärdera metodernas användbarhet i praktiska situationer med tonvikt på att bedöma metodernas komplexitet, databehov samt förmåga att ge resultat med tillräcklig säkerhet och noggrannhet

I delrapport 2 ”Lakning av förorenad jord – resultat och utvärdering av metoder” utvärderas och jämförs olika metoder för att uppskatta utlakning av oorganiska och organiska ämnen från förorenad jord. I delrapporten ges detaljerad information om lakttesternas genomförande och de resultat som erhållits.

Fyra olika metoder för lakning av oorganiska ämnen har tillämpats på jordprover från de två förorenade områdena: skaktest med tvåstegslakning, perkolationstest, perkolationstest med återcirkulation samt ett pH-statiskt lakttest. På jordprover från Grimstorp har utlakning av organiska ämnen (polycykliska aromatiska kolväten, PAH) studerats med två olika metoder: en skakmetod och ett perkolationstest med återcirkulation.

I delrapporten redovisas en uppskattning av lakmetodernas repeterbarhet då de tillämpas på förorenade jordmaterial. Dessutom påvisas skillnader i lakbara halter som de olika metoderna kan ge upphov till. Undersökningar har även gjorts av hur lakbarheten av oorganiska ämnen skiljer sig då lakning sker med avjoniserat vatten respektive svag CaCl_2 -lösning. För utlakning av PAH har enbart utlakning med CaCl_2 använts.

Ett vidare syfte med studien har varit att ta fram ett dataunderlag till huvudprojektet. I huvudprojektet jämfördes laboratorieresultaten med fälldata (uppmätta halter i mark- och grundvatten på de förorenade områdena) och underlaget användes vid den kemiska modelleringen samt för att ta fram data för mobilisering och fastläggning av föroreningar genom uppskattning av fördelningsfaktorer (K_d -värden).

SUMMARY

The project “Releases from contaminated sites – Methods to assess leaching and transport” have investigated methods to estimate leaching and contaminant transport at contaminated sites. Two sites in southern Sweden have been studied, a former foundry at Töllstorp, Gnosjö, which is polluted with cadmium, copper, lead, nickel and zinc and a former wood treatment site at Grimstorp, Nässjö, polluted with arsenic, chromium, zinc and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). The aims of the project were to investigate simple and practical methods to estimate leaching and contaminant transport using field and laboratory investigations and further to evaluate how the information can be used in risk assessment models of different complexity.

Experimental measurements in the field and in the laboratory have been evaluated using theoretical modelling. Simple risk assessment models, as well as research type models, were used to explain the geochemical behaviour of the contaminants observed in the field lysimeters and the leaching tests.

This background report 2 “Leaching of contaminated soil – Results and evaluation of methods” gives detailed information on the methods and the materials used in the leaching tests and presents the results obtained. It also includes an evaluation of the test results and gives conclusions related to the use of leaching tests in risk assessments.

Four different leaching tests for inorganic contaminants have been tested on samples from both sites: a two step batch test, a percolation test, a percolation test with recirculation and a pH-static test. Leaching of organic contaminants (PAH) have been studied on the samples from Grimstorp using two different tests, a one step batch test and a percolation test with recirculation.

The report presents an estimate of the repeatability of the tests when applied to contaminated soils. Differences in leached amounts obtained with the different methods are identified. Investigations have also been made on the influence of choice of leachant, deionised water or a weak calcium chloride solution. Tests applied to assess leaching of PAH have, however, all been performed using a calcium chloride solution as leachant.

A further aim of the presented work has been to provide data for the main project. In the main project results from the laboratory investigations have been compared with field data (measured concentrations in soil water and groundwater). The leaching results have also been used as a basis for the chemical modelling and to derive estimates of the mobilization and sorption of contaminants for transport modelling, e.g. for the derivation of sorption coefficients (K_d -values).

1 Inledning/bakgrund

Avsikten med lakteter är att bedöma lakbarheten i vatten av skadliga ämnen ur ett fast material samt att bedöma ämnenas utlakningsbeteende. Ursprungligen har lakteter främst använts för att bedöma utlakning av oorganiska ämnen från avfall (t.ex. bottenaskor, blästersand, slagg, pelleterat material) eller vid riskbedömning vid användning av restprodukter. För utlakning av oorganiska ämnen från avfall finns flera standardmetoder att tillgå. Enligt nya avfallsdirektivet för EU är förorenad jord att betrakta som avfall då den grävts upp och därför är lakteter som utvecklats för andra typer av avfall nu aktuella även för jord. Lakteterna kan också vara värdefulla verktyg då jord från förorenad mark ska riskbedömas ur ett human- och ekotoxikologiskt perspektiv. Hur utlakningen sker från ett jordmaterial och vilka parametrar som påverkar lakprocessen kan dock skilja sig från oorganiska avfall. Därför arbetar t.ex. internationella standardiseringsorganet ISO, med att ta fram standardmetoder för lakning av jord och jordliknande material. Metoderna bygger på de existerande standarderna för utlakning av oorganiska ämnen från avfall men är modifierade så att de ska passa för utlakning av både organiska och oorganiska ämnen (ISO, 2007a; b; c; d). Tre av metoderna lanserades i juli 2007 som tekniska specifikationer (ISO, 2007a; b; c) medan den fjärde metoden fortfarande är under utarbetning (ISO, 2007d). För Sveriges del har dock SIS (Swedish Standards Institute) valt att inte implementera någon av metoderna och det efterlyses generellt sett en validering av befintliga metoder. När föreliggande projekt startades var ännu inte de ovan nämnda ISO-metoderna accepterade. Två av standardmetoderna för lakning av avfall (skaktest och perkolationstest) valdes därför ut för att studera utlakning av oorganiska ämnen från förorenad jord. Därtill har en perkolationsmetod med återcirkulation samt ett pH-statiskt lakförsök tillämpats på samma förorenade jordmaterial.

För utlakning av organiska ämnen från jord har ett flertal metoder föreslagits de senaste åren (Gamst et al. 2007; Enell et al. 2004; Comans et al. 2001), men även här finns ingen standardmetod ännu att tillgå. Utlakning av organiska ämnen skiljer sig från utlakning av oorganiska på ett flertal punkter och förutom att de existerande standardmetoderna för lakning av avfall måste modifieras för att passa jord måste de även anpassas så att de passar för utlakning av organiska ämnen. I projektet ”Förorenings-spridning – tillämpning och utvärdering av metoder” har två metoder, som föreslagits för utlakning av ickeflyktiga organiska ämnen, valts ut för att utvärdera utlakning av polycykliska aromatiska kolväten (PAH). Det ena testet är ett skaktest (ISO, 2007a) och det andra är ett perkolationstest med återcirkulation, utvecklat för att passa för utlakning av ickeflyktiga hydrofoba organiska ämnen (Gamst et al., 2007).

I föreliggande rapport redovisas en uppskattning av lakmetodernas repeterbarhet då de tillämpas på förorenade jordmaterial. Dessutom påvisas skillnader i lakbara halter som de olika metoderna kan ge upphov till. Lakbarheten av föroreningar kan förändras då ett laktest modifieras för att passa jord eller jordlika material. Den vanligaste modifikationen av befintliga standardlakteter för avfall är att öka jonstyrkan på lakvätskan. I standardmetoderna för utlakning av oorganiska ämnen från

avfall används avjonat vatten som lakvätska, medan ISO föreslår att lakning av jord bör ske med en tillsats av CaCl_2 . I föreliggande studie har vi därför även undersökt hur lakbarheten av oorganiska ämnen skiljer sig åt då lakning sker med destillerat vatten respektive CaCl_2 . För utlakning av PAH har enbart utlakning med CaCl_2 studerats.

2 Syfte

Avsikten med studien har varit att utvärdera och jämföra olika lakmetoder för att uppskatta utlakningsegenskaper av oorganiska och organiska ämnen från förorenad jord och föreliggande delrapport syftar till att ge svar på följande frågeställningar:

- Vilken repeterbarhet har de studerade metoderna?
- Hur skiljer sig utlakningen av oorganiska ämnen då laktestet genomförs med destillerat vatten jämfört med CaCl_2 ?
- Hur varierar resultatet mellan olika laktester då testerna utförs på samma jord?

Ett vidare syfte med den genomförda lakstudien var att ta fram ett dataunderlag till huvudprojektet. I huvudprojektet jämfördes labbresultaten med fältdata (uppmätta halter i mark- och grundvatten på de förorenade områdena) och underlaget användes vid modellering i syfte att uppskatta metodernas tillämpbarhet för uppskattning av sorptionsfördelningskoefficienter (K_d -värden).

3 Material och metod

I studien har fyra olika metoder för lakning av oorganiska ämnen tillämpats på jordprover från två förorenade områden belägna i Gnosjö respektive Nässjö kommun. De undersökta metoderna är: skaktest med tvåstegslakning, perkolations-test, perkolationstest med återcirkulation samt ett pH-statiskt laktest.

Utlakning av organiska ämnen från jordprover från Grimstorp har studerats med två olika metoder, en skakmetod och ett kolonnförsök. I tabell 1 finns en sammanställning och kort beskrivning av de tillämpade metoderna. En utförligare metodbeskrivning av respektive metod följer här nedan, men har också sammanfattats i en tidigare underlagsrapport till huvudprojektet (Enell et al. 2007).

Tabell 1 Tillämpade metoder för lakning av oorganiska och organiska ämnen.

Lakteter för	Metod	Beskrivning
oorganiska ämnen		
Skaktest (tvåstegs-lakning)	SS-EN 12457-3	Vattenlakning skaktest, L/S 2 och L/S 10 l/kg
	Modifierad SS-EN 12457-3 (anpassad till jord: 0,001M kalciumkloridlösning istället för vatten)	Vattenlakning (med CaCl ₂) skaktest, L/S 2 och L/S 10 l/kg
Perkolationstest	SS-CEN/TS 14405	Vattenlakning i kolonn, L/S 0,1 – L/S 10 l/kg
	Modifierad SS-CEN/TS 14405 (anpassad till jord: 0,001M kalciumkloridlösning istället för vatten)	Vattenlakning (med CaCl ₂) i kolonn, L/S 0,1 – L/S 10 l/kg
Perkolation med återcirkulation	Modifierad ER-H (Gamst et al. 2007)	Vattenlakning (med CaCl ₂) i kolonn med återcirkulation av lakvatten i 7 dygn, L/S ≈1l/kg
Lakteter för organiska ämnen		
Skaktest (enstegs-lakning)	ISO/TS 21268-1 (modifierad: 0,005 M CaCl ₂ används istället för 0,001 M, L/S-kvoten sätts till samma som för kolonnstestet)	Vattenlakning (med CaCl ₂ och NaN ₃) skaktest
Perkolation med återcirkulation	ER-H (Gamst et al. 2007)	Vattenlakning (med CaCl ₂ och NaN ₃) i kolonn, L/S ≈1 l/kg
pH-statiskt laktest		
	prEN 14997	Laktest där pH justeras kontinuerligt 4 ggr (mellan pH 4-10)
	ANC/BNC	Mängden syra som förbrukas i prEN 14997-testet bestäms.

3.1 Material

Två olika områden har valts ut för provtagning av jord. Det ena området, Töllstorp, beläget i Gnosjö, är förorenat av metallföroreningar som har sitt ursprung från ett metallgjuteri. Det andra området, Grimstorp, beläget söder om Nässjö, är ett gammalt impregneringsområde där impregnering med CCA och kreosot har förekommit. Marken är i huvudsak förorenad av kreosotföroreningar samt arsenik, krom och zink.

Provtagningen utfördes av IVL och genomfört fältarbete, placering av provtagningspunkter, samt områdesbeskrivning av de båda platserna finns beskrivet i Delrapport 1, del A. De jordprover som SGI har utfört laktester på samt vilka övriga analyser som utförts på respektive prov anges i tabell 2a och b.

Tabell 2a Undersökta jordprover samt vilka analyser som utförts på respektive prov.

Jordprover	Utförda tester för oorganiska ämnen					
	Totalhalt	Skak-		Perkolationstest		Perk. m. återcirk.
		H ₂ O	CaCl ₂	H ₂ O	CaCl ₂	H ₂ O
IVL Tö 1:130-140	√					
IVL Tö 2: 0-30	√	√√	√√	√√	√√	√√
IVL Tö 2: 50-70	√		√			
IVL Tö 2:100-110	√					
IVL Tö 2:130-140	√					
IVL Tö 3: 0-20	√	√	√		√	√√
IVL Tö 3:40	√		√			
IVL Tö 3: 70-80	√		√			
IVL Tö 3: 100-120	√					
IVL Tö 4:20	√					
IVL Tö 4: 60-70	√					
IVL Tö 4:120	√					
IVL Gr 1:70	√		√			
IVL Gr 2:0-15	√		√		√	
IVL Gr 2:50	√	√√ ^a	√√ ^a	√√	√√	√√

^a Skaktester på material från Gr 2:50 endast utförda som enstegslakningar (L/S=10), pga. naturfuktigt jordmaterial (hög vattenkvot).

Tabell 2b Undersökta jordprover samt vilka analyser som utförts på respektive prov.

Jordprover	Utförda tester för organiska ämnen (PAH)		
	Totalhalt	Skaktest (enstegsläkning) CaCl ₂	Perkolations med återcirk. CaCl ₂
IVL Gr 2:0-15	√	√√	√√√
IVL Gr 2:50	√	√√	
IVL Gr 3:50-70	√	√√	√√√

Jordprover	Utförda pH-statiska tester	
	pH-stat (prEN 14997)	ANC/BNC (Beräkningar från pH-statstest)
IVL Tö 2: 0-30	√	√
IVL Tö 3: 0-20	√	√
IVL Gr 1:70	√	√
IVL Gr 2:50	√	√

3.2 Provberedning

Levererade jordprover som användes till organiska analyser (PAH) förvarades i kylskåp (4±2 °C) fram till respektive analystillfälle (med undantag för provberedningen, vilken skedde i rumstemperatur). För de analyser som kräver lufttorkade prover förvarades jordprover i rumstemperatur (oorganiska analyser och ANC-test).

Samtliga jordanalyser som beskrivs i föreliggande rapport kräver en provberedning av jordmaterialet. Materialet som resulterar ur provberedningen måste vara så pass homogent att representativa delprov för de olika testerna kan tas ut. Samtliga jordprover basprovbereddes därför genom att hela provmängden hölls upp i ett tråg, okrossbart material (sten och grus) med en diameter större än 10 mm plockades bort, och därefter finfördelades och homogeniserades provet för hand innan det delades upp i delmängder för respektive analys. Tillvägagångssätt för eventuell vidare provbehandling av de framtagna delmängderna beskrivs under respektive metodbeskrivning av de olika genomförda testerna.

3.3 Totalhaltbestämning

Totalhaltsbestämning av oorganiska ämnen (As, Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mo, Mn, Ni, Pb, S, Se, Sb, Si, Zn, V, klorid, fluorid, sulfat) och organiska ämnen (16 PAH samt TOC) i jordprover utfördes av det externa laboratoriet Analytica, ALS Laboratory Group (ackrediterat av SWEDAC). Provvuttag av provberett material och provsändning till Analytica utfördes av SGI.

3.3.1 Totalhalt organiskt kol, TOC

Den totala halten organiskt kol, TOC, i de undersökta jordproverna bestämdes enligt den svenska standarden SS EN 13137. Den totala halten kol, TC, i provet bestäms genom att provet förbränns vid en temperatur över 900 °C. Halten oorganiskt kol, TIC, i provet bestäms genom att behandla ett nytt delprov med en icke oxiderande syra så att det oorganiska kolet drivs av från provet. TOC bestäms därefter som differensen mellan TC och TIC.

3.3.2 Totalhalter oorganiska ämnen

Analys av oorganiska ämnen i jordprover utfördes enligt standard angiven i bilaga 2. Metoden som använts benämns MG1 av Analytica och är en upplösningsanalys av jordprovet. Jordprovet torkas vid 50 °C och okrossbart material större än 2 mm siktas bort. Vid analys av As, Cu, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, B, Sb, Se och S blandas jordprovet med koncentrerad (7 mol L⁻¹) HNO₃ och H₂O₂ och upplösning sker där- efter i slutna teflonbehållare i mikrovågsugn. För analys av övriga grundämnen smälts det torkade provet med LiBO₂ följt av upplösning i utspädd salpetersyra.

3.3.3 Totalhalter organiska ämnen (PAH)

Analys av jordprover för totalhaltsbestämning av enskilda 16 PAH utfördes enligt standard angiven i bilaga 2. Analysmetoden benämns OJ1 av Analytica och är en mikrovågsextraktion med aceton/hexan som utförs under tryck i ca 30 min. Lös- ningsmedel pressas igenom en cell innehållandes provmaterialet (ca 20 g) och på så vis extraheras organiska föreningar från den fasta fasen till lösningsmedlet. Erhållet extrakt analyseras med GC-MS (gaskromatografi med masspektrometri).

3.4 Metoder för utlakning av oorganiska ämnen

För att undersöka lakbarheten av oorganiska ämnen från förorenad jord hämtad från Töllstorp respektive Grimstorp användes ett skaktest med tvåstegslakning (SS-EN 12457-3), ett perkolationstest (SS-CEN/TS 14405), ett perkolationstest med återcirkulation (Hansen et al. 2004) samt pH-statisk lakning med ANC/BNC bestämning (prEN 14997, PrCEN/TS 14429). Halten av As, Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Zn, klorid, fluorid, sulfat bestämdes i lak- vattnet från de olika testerna. Lakvattnen karaktäriserades även med avseende på pH, redoxpotential, ledningsförmåga, alkalinitet samt dess halt av löst organiskt kol, DOC, (på engelska: *Dissolved Organic Carbon*).

3.4.1 Skaktest (tvåstegslakning) SS-EN 12457-3

Skaktestet utfördes enligt standard SS-EN 12457-3, som är ett skaktest som sker i två steg vid L/S 2 och L/S 8. Den ackumulerade L/S-kvoten blir således 10.

Provberedda och lufttorkade prover siktades för att avskilja okrossbara partiklar större än 4 mm. Prov från partikelfraktion < 4 mm vägdes in och blandades med avjoniserat vatten till en L/S-kvot på 2 l/kg. I detta första steg skakades provet i 6 timmar (skonsam skakning i vändapparat) (figur 1). Lakvattnet avlägsnades från jorden och filtrerades (cellulosanitratfilter med porstorlek på 0,45µm). Nytt avjoni- serat vatten blandades därpå i jorden till en L/S-kvot på 8 l/kg. Prover skakades på nytt i 18 timmar varpå filtrering skedde. Analys av oorganiska ämnen samt DOC i filtrerade lakvatten vid respektive L/S-kvot utfördes av Analytica enligt standard- metod (bilaga 2).



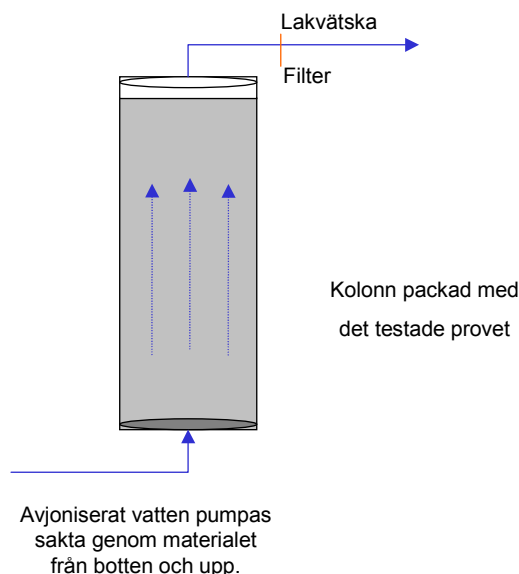
Figur 1 Skaktest med tvåstegslakning där provet skakas med avjoniserat vatten i två steg.

3.4.2 Modifierat skaktest (tvåstegslakning)

Skaktestet utfördes enligt metodbeskrivningen för SS-EN 12457-3, men istället för destillerat vatten användes 0,001 M CaCl_2 som lakvätska.

3.4.3 Perkolationstest, SS-CEN/TS 14405

Perkolationstestet utfördes enligt den tekniska specifikationen SS-CEN/TS 14405. Det lufttorkade och provberedda materialet (avsnitt 3.2) packades i en kolonn med diametern 5 cm varpå kolonnen fick stå vattenmättad i 3 dygn för att jämvikt skulle inställa sig. Därefter lakades materialet kontinuerligt med avjoniserat vatten. Vattnet pumpades försiktigt in från botten av kolonnen med en hastighet på ca 15 cm dygn^{-1} ($10\text{-}20 \text{ mL h}^{-1}$). Utgående vatten filtrerades genom ett cellulosa nitratfilter med en porstorlek på $0,45 \mu\text{m}$. I figur 2 visas en schematisk bild över försöksupställningen.



Figur 2 Schematisk beskrivning av perkolationsstest(SS-CEN/TS 14405) för bestämning av utlakning av oorganiska ämnen.

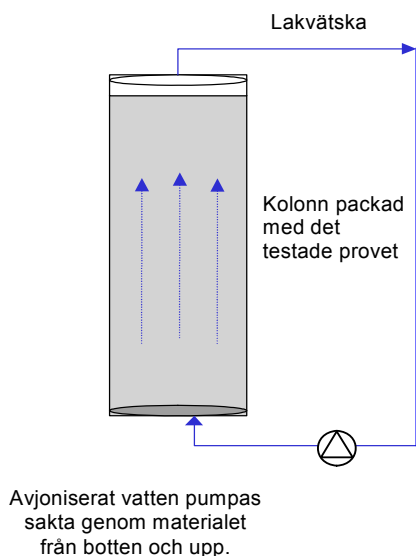
Enligt den tekniska specifikationen ska 7 lakvätskefraktioner tas ut för analys vid L/S kvoterna 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 och 10,0 L kg⁻¹. Avsteg med mindre antal lakvätskefraktioner förekommer ofta och i föreliggande studie skedde uttag vid L/S 0,1; 2,0 och 10,0 L kg⁻¹.

3.4.4 Modifierat perkolationsstest

Perkolationsstestet utfördes enligt metodbeskrivningen för SS-CEN/TS 14405 och som beskrivet i 3.4.3, men istället för destillerat vatten användes 0,001 M CaCl₂ som lakvätska. Provet mättades även med CaCl₂-lösning och fick stå i 3 dygn innan lakningen påbörjades. Uttag av lakvatten skedde vid L/S 0,1; 2,0 och 10,0 L kg⁻¹.

3.4.5 Perkolationsstest med återcirkulation

Perkolationsstestet med återcirkulation som tillämpats för lakning av oorganiska ämnen inom föreliggande projekt är ingen standardmetod eller teknisk specifikation. Grunden till metoden har hämtats från en metod föreslagen för bestämning av lakbarheten av icke-flyktiga organiska ämnen (Gamst et al. 2007), men anpassats så att resultaten ska bli jämförbara med det första steget i ett skaktest med tvåstegslakning (SS-EN 12457-3). På samma sätt som vid skaktestet sker utlakningen vid ett konstant L/S-förhållande under en bestämd tid, men provmaterialet ligger immobilt i en kolonn och omströmmas av lakvätskan (figur 3).



Figur 3 Perkolationstest med återcirkulation; Vatten återcirkuleras i 7 dygn genom en kolonn packad med provmaterial, vid $L/S = 2 \text{ L kg}^{-1}$.

Testet utfördes med lufttorkat och provberett material där partikelfractionen $>4 \text{ mm}$ siktats bort. Testet dimensionerades så att L/S -kvoten blev 2 L kg^{-1} . Som lakvätska användes destillerat vatten. Provvattnet filtreras ej innan analys då återcirkulationen genom kolonnen ansågs motsvara den självfiltrering av kolloider som sker i fält. För lakning av organiska ämnen har återcirkulationstiden satts till 7 dygn med en flödes hastighet på 20 ml h^{-1} . Detta har vid andra experiment bedömts vara tillräckligt för att nå jämvikt (Hansen et al. 2004). Då information om flödes hastigheter och återcirkulationstid för jämviktsinställande för oorganiska ämnen saknas för detta test har referensen ovan fått ligga till grund för dessa parametrar.

3.5 Metoder för utlakning av organiska ämnen (PAH)

Ett flertal olika metoder för att uppskatta lakning av organiska ämnen från förorenad jord har föreslagits och finns beskrivna i litteraturen (t.ex. Enell et al. 2004; Gamst et al. 2003), dock finns inga standardmetoder att tillgå ännu. En metod som SGI bedömer har god potential att i framtiden införas som svensk standard är ett perkolationstest med återcirkulation; ER-H-metoden (på engelska: chemical Equilibrium Recirculation column test for Hydrophobic organic chemicals). Testet har utvecklats av Danmarks tekniske universitet, DTU, (Gamst et al., 2003, 2007) och utvärderats med avseende på repeterbarhet och reproducerbarhet av DHI, VTT, NGI och SGI (Hansen et al., 2004; Hemström, 2007; Enell et al., 2008). ER-H-metoden användes för att undersöka utlakning av PAH från två jordmaterial från Grimstorp.

Parallellt med ER-H-metoden användes ytterligare en lakmetod, ett så kallat skaktest utfört som enstegslakning (ISO, 2007a), för att studera utlakning av PAH från jordprover från Grimstorp.

3.5.1 Skaktest (enstegslakning)

Skaktest med enstegslakning utfördes i duplikat (A och B) på tre provmaterial från Grimstorp (Gr 2:0-15, Gr 2:50 och Gr 3:50-70). För två av dessa prover (Gr 2:0-15 och Gr 3:50-70) utfördes även perkolationstest med återcirkulation (ER-H-metoden) där materialet och dimensionen på lakutrustningen ger ett specifikt L/S-värde. För dessa båda prover utfördes skaktestet vid samma L/S som det erhållna specifika L/S vid kolonnförsöket. För det tredje provet (Gr 2:50) utfördes skaktestet vid L/S=10. Detta, relativt höga L/S-värde, valdes på grund av provmaterialets naturfuktighet; provet hade en vattenkvot på 129%. I övrigt utfördes skaktestet enligt den metod som den Internationella Organisationen för Standardisering, ISO, föreslagit för karaktärisering av lakning av organiska ämnen från förorenad jord, ISO/TS 21268-1, (ISO, 2007a).

För Gr 2:0-15 och Gr 3:50-70 (som även testades med ER-H-lakning) användes lufttorkade jordprover. Lufttorkade prover är lättare att sikta och ger ett mer homogent prov vilket förenklar tolkningen av lakresultaten och jämförelsen mellan de två testmetoderna.

Det tredje provet som enbart lakades med skaktest lufttorkades ej, utan naturfuktigt material (där partiklar större än 4 mm plockats bort) användes direkt. Detta för att undvika att lättflyktiga föroreningar skulle avdunsta allt för mycket under provberedningen och därmed omintetgöra en jämförelse mellan lakvatten och markvatten som insamlats.

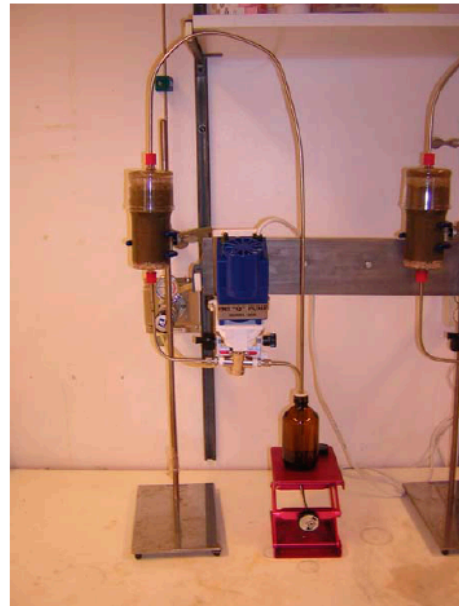
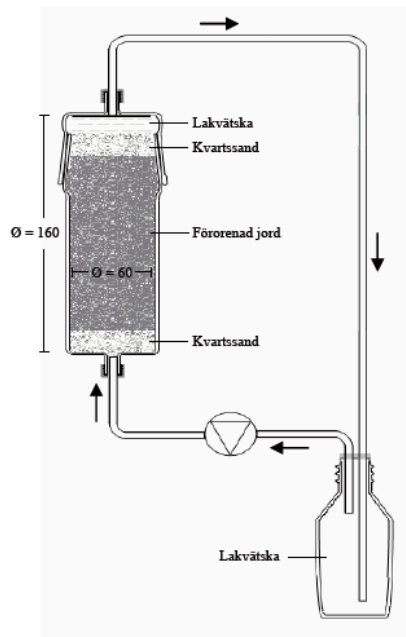
Prov från partikelfractionen < 4 mm vägdes in och blandades med lakvätska bestående av 0,005 M CaCl₂ med en tillsats av 500 mg L⁻¹ NaN₃ för att förhindra mikrobiell nedbrytning av utlakande organiska ämnen. Som provkärl användes rostfria 500mL behållare. Provet skakades i 24 timmar (skonsam skakning i vändapparat) (figur 1) varpå den rostfria behållaren centrifugerades i 5h vid 2000 g för att separera lakvattnet (eluatet) från jorden. Enligt ISO/TS 21268-1 ska supernatanten (vätskan ovanför det fasta materialet) efter en kortare sedimentation överförs till centrifugeringsrör eller glasbehållare som sedan centrifugeras. I föreliggande studie utfördes centrifugeringen direkt i de rostfria cylindrarna för att undvika att lakvätskan skulle komma i kontakt med ytterligare en ny yta, till vilken utlakade PAH:er skulle kunna adsorbera.

För att erhålla en tillräckligt stor eluatvolym för analys av PAH-koncentrationer utfördes samtliga skakförsök på jordprover genom att två prover från parallella skakförsök (A1 och A2) slogs samman till ett samlingsprov (A) före analys. Analys av 16 enskilda PAH samt DOC i samlingsprovet utfördes av Analytica enligt standardmetod (bilaga 2). PAH-analysen kallas av Analytica för OV1 och är en vätskeextraktion där vattenprovet blandas med ett opolärt lösningsmedel för att extrahera de organiska föreningarna från vattenfasen till lösningsmedelfasen. Erhållet extrakt analyseras med GC-MS.

3.5.2 Perkolationstest med återcirkulation, ER-H-metoden

Testet syftar till att uppskatta lakbara jämviktskoncentrationer av icke flyktiga organiska ämnen vid ett relativt lågt L/S-förhållande. Lakvätskan (bestående av 0.005 M CaCl₂ och 500 mg L⁻¹ NaN₃ löst i destillerat vatten) tillåts sakta infiltrera genom en kolonn som packats med testmaterialet (20 ml h⁻¹). Vattnet pumpas in genom botten av kolonnen för att undvika kanalbildning i materialet. Utflödet av lakvätskan i toppen av kolonnen återförs till kolonnens botten och cirkuleras på så vis igenom kolonnen under 7 dygn (figur 4). Testet syftar till att beskriva utlakningsförloppet då fördelningsjämvikt råder mellan det fasta materialet och lakvattnet vid en L/S-kvot på ca 1 L kg⁻¹ (dimensionen på lakutrustningen och materialets porositet bestämmer den exakta L/S-kvoten). Efter 7 dygns lakning analyseras lakvattnet med avseende på PAH. Analys av lakvatten utfördes av Analytica (OV1) enligt standardmetod (bilaga 2).

Lakvattnet filtreras ej innan analys eftersom de partiklar och kolloider som följer med lakvattnet då det pumpas genom kolonnen antas ”självfiltreras” i kolonnen pga. lakvattnets återcirkulation. Medföljande partiklar i lakvattnet betraktas som en partikelfraktion som även hade varit mobil under naturliga lakförhållanden. Den bestämda jämviktskoncentrationen blir således ett resultat av både lösta och partikelbundna föroreningar och speglar den maximala koncentrationen som skulle kunna uppmätas i markvatten i fält vid L/S ≈ 1. En utförlig metodbeskrivning finns att läsa som bilaga till rapport författad av Hansen et al. (2004) eller i artikel av Gamst et al. (2007).



Figur 4 Schematisk beskrivning av perkolationsstest med återcirkulation för att uppskatta utlakning av PAH från förorenad jord.

Jordprover som användes för test med ER-H-metoden provbereddes på samma sätt som beskrivet under Skaktest med enstegslakning, dvs. materialen lufttorkades och okrossbart material större än 4 mm, siktades bort. Lakutrustningen kläddes in med aluminiumfolie för att undvika fotokemisk nedbrytning av organiska föroreningar.

3.5.3 Förlusttester vid organisk lakning

För att undersöka hur stor andel av utlakad mängd PAH som adsorberat till lakutrustningens väggar utfördes ett förlusttest. Lakutrustningen (rostfria cylindrar till skaktestet och glaskolonner samt rostfria rör till ER-H-testet) sköljdes med ett opolärt lösningsmedel (heptan) för att extrahera de PAH:er som adsorberats till väggarna. Lösningsmedelsfasen indunstades därefter till ca 2 ml. De indunstade proverna skickades till Analytica för analys. För att kontrollera att lösningsmedlet inte innehöll några spår av PAH:er indunstades en volym ren heptan på samma sätt som extraktionsproverna till en slutvolym på ca 2 ml. Den indunstade mängden rent lösningsmedel var i samma storleksordnings som den mängd som användes till ett förlusttest. Två olika flaskor (A och B) med lösningsmedel användes totalt till förlusttesterna. Renheten testades med ett indunstningsprov per flaska. Dessa båda ”blankprov” skickades tillsammans med övriga prover till Analytica för analys.

3.6 pH-statisk lakning och ANC/BNC

3.6.1 prEN 14997, med kontinuerlig pH-kontroll

Ett pH-statiskt lakttest baserat på metoden beskriven i prEN 14997 utfördes på två av materialen från Töllstorp (Tö 2:0-30 och Tö 3:0-20) och två från Grimstorp (Gr 1:70 och Gr 2:50).

Enligt prEN 14997, lakas det krossade materialet vid konstant pH och en L/S-kvot på 10L/kg. Testet beskriver utlakning av metaller vid en bestämd surhetsgrad. Eftersom pH mäts kontinuerligt i provet kan syra/bas automatiskt tillsättas så att pH-värdet hålls stabilt. Justering av pH görs under hela testet. Utlakningen sker i tre stadier: först en syra/basreglering i 4 timmar där de största pH-regleringarna sker, sedan en jämviktsperiod i 40 timmar och sist en verifieringsperiod i 4 timmar, där endast marginell mängd syra/bas får tillsättas. Lakvätska från samtliga delprov, för respektive analys, analyseras.

För den pH-statiska testen krävs ytterligare siktning och krossning av jordprover ned till 1 mm. Stora partiklar som inte kunde krossas siktades ifrån provet.

Det lufttorkade och provberedda materialet blandades med avjoniserat vatten i en bägare till en L/S-kvot på 10 L kg⁻¹. pH i vätskan justerades kontinuerligt (automatiskt) under omrörning så det låg vid det önskade värdet. Enligt prEN 14997 ska metallakning mätas vid 8 olika pH, men metoden kan anpassas så att lakning vid enstaka pH mäts. Prover från Töllstorp och Grimstorp lakades vid pH 4, 6, 8 och 10.



Figur 5 pH-statisk lakning där pH mäts kontinuerligt i provet. Syra/bastillsatsen sker automatisk så att ett konstant pH erhålls.

3.6.2 ANC/BNC

ANC/BNC (syra- eller basneutraliserande kapacitet eller på engelska Acid/Base Neutralising Capacity) är ett mått på hur pH i ett material ändras när det utsätts för en syra eller en bas. Beroende på materialets buffringsförmåga kan en syratillsats leda till stora eller små förändringar i pH, och pH förändringar har i sin tur stor påverkan på metallakning och Kd-värden. Syraförbrukningen eller basförbrukningen för att nå olika pH kan också fås från pH-statiska tester, så som prEN14997, genom att mäta mängden syra eller bas som förbrukas i testet.

För att bestämma jordprovernans ANC/BNC kapacitet utnyttjades resultaten från de utförda pH-stat-försöken.

4 Resultat

Nedan redovisas i text, tabell- och diagramform resultat från de analyser som ingått i testprogrammet för de utvalda jordmaterialen från Grimstorp och Töllstorp.

Analysprotokoll för totalhalter, halter i lakvatten och ANC-bestämning redovisas i bilaga 1-2.

4.1 Totalhalter

4.1.1 Totalthalt organiskt kol

Halten organiskt kol per kg torr substans (TS) visas i tabell 3 för de olika jordproverna.

Tabell 3 Totalhalt organiskt kol (TOC) i undersökta jordprover.

Jordprover	TOC (% av TS)	TS (%)
<i>Töllstorp</i>		
Tö 1:130-140	<0,1	99,7
Tö 2: 0-30	10,6	98,3
Tö 2: 50-70	0,6	99,1
Tö 2:100-110	0,3	97,9
Tö 2:130-140	0,1	99,3
Tö 3: 0-20	2,3	98,1
Tö 3:40	0,4	99,5
Tö 3: 70-80	0,1	99,8
Tö 3: 100-120	0,1	97,9
Tö 4:20	0,8	98,8
Tö 4: 60-70	<0,1	99,8
Tö 4:120	<0,1	99,8
<i>Grimstorp</i>		
Gr 1:70	0,6	94,6
Gr 2:0-15	27,8	89,5
Gr 2:50	18,2	60,2
Gr 3:50-70	1,4	95,3

4.1.2 Oorganiska ämnen

I tabell 4a och b redovisas resultat från analys av totalhalter av enskilda oorganiska ämnen i jordproverna från Töllstorp respektive Grimstorp.

Tabell 4a. Initiala halter, C_{S_i} , av oorganiska ämnen i jordprover från Töllstorp (halter angivna i $\text{mg kg}^{-1}\text{TS}$)

Prov	Tö 1:130-140	Tö 2:0-30	Tö 2:50-70	Tö 2:100-110	Tö 2:130-140	Tö 3:0-20	Tö 3:40	Tö 3:70-80	Tö 3:100-120	Tö 4:20	Tö 4:60-70	Tö 4:120
	C_S [$\text{mg kg}^{-1}\text{TS}$]											
Al	50700	58700	51700	54000	50900	47700	52300	50100	51000	57700	52200	53500
As	0,229	24,3	< 0,2	0,255	< 0,1	2,98	0,47	0,466	0,304	0,457	< 0,1	0,111
Ba	655	792	695	706	675	645	645	657	666	717	690	678
Be	1,91	4,11	1,87	2,06	1,91	1,71	1,91	1,89	1,91	2,27	1,94	2,12
Ca	9150	8360	7360	8930	8220	9150	9360	8600	8650	8720	8650	9720
Cd	0,0157	18,3	0,9	0,0761	0,0384	3,69	0,23	0,0311	0,0306	0,123	0,0311	0,0507
Co	1,37	9,22	0,64	1,03	0,882	2,42	1,57	1,83	1,96	2,99	0,991	1,76
Cr	22,5	59,2	17,4	15,2	16	26,4	18,6	18,6	19,1	26,2	16,5	20,6
Cu	7,85	40500	9,96	9,07	6,82	2510	13,6	9,7	8,72	389	34,5	39,6
Fe	18300	39700	9160	15500	12900	22000	21 100	16400	16600	24100	14300	18500
Hg	< 0,04	1,48	< 0,05	< 0,04	< 0,04	0,217	< 0,05	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
K	25600	19300	27000	27000	26000	22900	24000	25200	26100	25600	26200	26600
La	23	24,7	13,6	20,6	14,6	11,6	10,6	14,1	16,6	16,9	13,7	14,2
Mg	2500	3650	1380	2300	2100	2660	2770	2180	2400	3160	2270	3190
Mn	420	693	265	284	275	499	407	383	393	494	348	524
Mo	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6
Na	20000	12900	20300	21100	20400	17600	19600	20100	20700	19700	20900	21100
Nb	8,49	< 6	10,4	6,76	< 6	< 6	7,21	< 6	6,57	10,5	6,19	6,1
Ni	3,14	217	61,6	6,63	3,41	12,3	3,46	4,14	3,65	4,56	1,88	3,43
P	424	842	91,2	401	347	729	399	321	307	278	371	430
Pb	2,52	2260	4,72	1,51	1,38	240	2,51	1,96	2,12	7,17	3,48	4,58
S	11,1	807	45,2	51,9	35,7	205	45,9	16,9	24	118	8,81	16
Sc	4,49	10,5	3,55	4,43	3,73	3,86	4,31	3,38	3,77	5,47	4,01	4,53
Si	374000	244000	352000	359000	366000	342000	350000	369000	367000	335000	370000	366000
Sn	< 20	701	< 20	< 20	< 20	124	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Sr	160	187	163	164	157	154	161	157	162	167	166	169
Ti	2300	2370	2780	1910	1680	2420	2690	2100	2090	3010	1860	2370
V	31,9	98,9	27,1	26	21,7	36,6	36,3	27,4	30,2	42	24,2	32,2
W	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60
Y	23,5	25,9	13,2	24,9	18,8	18,2	21,3	19,6	19,3	19,8	18,9	23,7
Zn	12,8	32300	658	85,2	42,2	2510	317	12,1	21,4	103	23,5	24,7
Zr	432	182	405	276	232	365	380	281	320	435	283	353

Tabell 4b. Initiala halter av oorganiska ämnen i jordprover från Grimstorp (halter angivna i mg kg⁻¹TS)

Prov:	Gr 1: 70	Gr 2: 0-15	Gr 2: 50	Gr 3: 50-70
Ämne	C _s [mg kg ⁻¹ TS]			
Al	69900	49000	36500	69000
As	14,1	4990	72	737
Ba	744	1490	372	751
Be	1,8	10,4	1,08	2,1
Ca	15800	31600	11000	16500
Cd	0,0759	4,85	0,241	0,105
Co	6,65	12,9	4,34	8,64
Cr	84,4	793	178	245
Cu	5,24	129	12,8	16,9
Fe	23400	71300	17800	32700
Hg	< 0,04	0,69	0,151	< 0,04
K	26000	8800	11500	26000
La	17,8	36,8	44,2	26,9
Mg	9350	12800	3230	8320
Mn	469	1420	309	502
Mo	< 6	< 6	< 6	< 6
Na	22400	7490	8460	24000
Nb	9,58	< 6	< 6	7,34
Ni	15,2	39,4	9,73	17
P	816	1600	1170	838
Pb	4,39	305	19	12,8
S	94,2	3320	4570	386
Sc	8,11	9,35	7,46	7,94
Si	320000	122000	227000	311000
Sn	< 20	27,1	< 20	< 20
Sr	352	657	170	377
Ti	4720	2240	3520	3330
V	52,4	85,7	55,8	55,7
W	< 60	< 60	< 60	< 60
Y	17,4	32,7	20,1	20,1
Zn	37,8	8060	3000	87,9
Zr	219	106	172	194

4.1.3 Organiska ämnen (PAH)

I tabell 5 redovisas resultat från totalanalyserna av enskilda PAH i provberedda (homogeniserade) jordprover från Grimstorp efter provberedning. Angivet i tabellen finns även summakoncentrationen av cancerogena PAH och summa 16PAH i respektive prov.

Tabell 5. Initiala totala halter av PAH i jordprover, C_S , [mg kg^{-1}] efter provberedning.

PAH	Gr 2: 0-15	Gr 2: 50	Gr 3: 50-70
Naftalen	3,4	0,068	0,23
Acenaftylen	1,8	0,096	0,34
Acenaften	1,3	0,111	0,34
Fluoren	1,7	0,023	0,4
Fenantren	11	0,128	0,91
Antracen	19	0,089	2,2
Fluoranten	47	0,49	8,6
Pyren	56	0,461	4,8
bens(a)antracen*	27	0,444	3
krysen*	34	0,511	3
bens(b)fluoranten*	61	0,74	4,2
bens(k)fluoranten*	39	0,666	2,8
bens(a)pyren*	37	0,949	4,1
dibens(ah)antracen*	3,8	0,21	0,57
benso(ghi)perylene	15	0,399	1,3
indeno(123cd)pyren*	19	0,409	1,7
summa 16 PAH	380	5,79	38
*PAH cancerogena	220	3,93	19
PAH övriga	160	1,86	19

4.2 Utlakning av oorganiska ämnen

Resultat från utförda lakteter redovisas här som eluathalter med enheten mg L^{-1} . För resultat i enheten mg kg^{-1} (TS) hänvisas läsaren till bilaga 1.

4.2.1 Skaktest (tvåstegslakning), SS-EN 12457-3

Skaktestet utfördes som en lakning vid L/S 2 och ytterligare en vid L/S 8 så att ackumulerat L/S för den totala lakningen av provet blev 10 L kg^{-1} (se metodbeskrivning i avsnitt 3.4.1). I tabell 6 och 7 redovisas de uppmätta eluathalterna (mg L^{-1}) i lakvattnet från Töllstorp respektive Grimstorp vid L/S 2 (tabell 6a och 7a) och L/S 8 (tabell 6b och 7b) samt resultat från analys av lakvattnets pH, ledningsförmåga, redoxförhållande, alkalinitet och halt av DOC. För resultat angivet som ackumulerad utlakad mängd i mg kg^{-1} (TS) vid L/S 10 hänvisas läsaren till bilaga 1.

Tabell 6a. Utlakning från jordprover från Töllstorp från skaktest vid L/S=2.

L/S=2 Eluathalt: mg/L	Lakning med H ₂ O			Lakning med CaCl ₂					
	Tö 2:0-30		Tö 3:0-20	Tö 2:0-30		Tö 2:50-70	Tö 3:0-20	Tö 3:40	Tö 3: 70-80
	Replikat A	Replikat B		Replikat A	Replikat B				
Al	0,498	0,435	0,459	0,00661	0,00403	0,247	0,0288	0,0416	0,0213
As	0,00294	0,00341	<0,001	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,003	<0,004
Ba	0,192	0,199	0,0525	0,496	0,482	0,0432	0,218	0,0487	0,0173
Ca	10,6	11,4	6,74	32,1 ^a	31,7 ^a	27,5 ^a	31,9 ^a	37 ^a	40,4 ^a
Cd	0,0144	0,0142	0,00253	0,0391	0,0358	0,0131	0,0107	0,00117	6,61E-05
Co	0,00118	0,00116	0,00027	0,00198	0,00179	0,00529	0,000198	0,000645	0,000789
Cr	0,00136	0,00146	0,0028	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Cu	2,31	2,27	0,937	0,931	0,835	0,0315	0,389	0,0123	0,00397
Fe	0,368	0,325	0,331	0,0092	0,0073	0,119	0,026	0,0073	<0,004
Hg	0,00015	0,000134	2,97E-05	3,87E-05	4,88E-05	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
K	3,51	3,71	3,13	4,84	4,46	2,35	4,25	1,99	0,809
Mg	0,902	0,957	0,604	1,96	1,9	1,28	2,01	0,841	0,35
Mn	0,0845	0,0899	0,0272	0,144	0,153	0,0249	0,0529	0,039	0,0632
Na	4,18	4,51	0,522	4,67	4,31	3,45	0,526	0,339	0,546
Ni	0,13	0,132	0,0141	0,268	0,267	0,885	0,0273	0,00593	0,000777
Pb	0,112	0,1	0,0143	0,019	0,0167	0,000959	0,00294	<0,0002	<0,0002
S	5,35	5,68	1	3,41	3,47	0,448	0,613	0,522	0,174
Zn	8,99	9,28	3,23	18,1	17,1	12	10	2,81	0,0316
Alkalinitet	36	37	17	22	23	<1,0	6,6	1,2	<1,0
DOC	10	9,9	21	8,5	7,1	6	9,3	6,2	<1,0
Fluorid	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
Klorid	1,9	2,2	<0,60	68 ^b	67 ^b	72 ^b	68 ^b	69 ^b	70 ^b
Sulfat	15	15	2,5	9,9	9,6	1,1	1,5	1,3	0,59
pH	7,1	7,2	6,7	7	7,2	4,6	6,5	5,7	5,1
Ledningsförmåga (mS/m 25°C)	11,7	11,8	5,94	31,5	30,5	26,7	27,4	26,1	25,8
Redox Eh (mV)	450	449	333	407	420	465	386	442	447

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹

Tabell 6b. Utlakning från jordprover från Töllstorp med skaktest vid L/S 8 (från L/S=2 till ackumulerat L/S=10).

L/S=2-10 Eluathalt: mg/L	Lakning med H ₂ O			Lakning med CaCl ₂					
	Tö 2:0-30		Tö 3:0-20	Tö 2:0-30		Tö 2:50-70	Tö 3:0-20	Tö 3:40	Tö 3: 70-80
	Replik A	Replik B		Replik A	Replik B				
Al	0,266	0,143	3,61	<0,002	<0,002	0,147	0,0215	0,0207	0,0169
As	0,00108	<0,001	0,00306	<0,003	<0,003	<0,003	<0,002	<0,002	<0,004
Ba	0,196	0,193	0,0446	0,505	0,498	0,0339	0,165	0,0341	0,0111
Ca	8,01	7,85	3,14	38,3 ^a	38,5 ^a	35,3 ^a	31,2 ^a	39,6 ^a	41,3 ^a
Cd	0,00787	0,00761	0,00312	0,0295	0,0285	0,0104	0,00834	0,001	6,69E-05
Co	0,0008	0,000719	0,000668	0,00134	0,00138	0,00343	0,00012	0,000557	0,000419
Cr	0,00098	0,000544	0,00331	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Cu	0,907	0,68	1,42	0,449	0,444	0,0143	0,177	0,00454	0,00136
Fe	0,174	0,102	1,53	<0,004	<0,004	0,0942	0,0154	0,0072	<0,004
Hg	5,3E-05	5,22E-05	0,000155	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
K	1,1	1,02	0,835	1,69	1,59	0,734	1,07	0,532	<0,5
Mg	0,475	0,444	0,29	0,856	0,825	0,455	0,776	0,18	<0,09
Mn	0,0636	0,0571	0,0725	0,144	0,148	0,0176	0,0422	0,0348	0,0345
Na	0,708	0,712	0,229	0,748	0,695	0,439	<0,1	<0,1	<0,1
Ni	0,0694	0,0591	0,0124	0,173	0,171	0,562	0,0181	0,00372	0,000673
Pb	0,044	0,0303	0,129	0,0139	0,0139	0,000589	0,00186	<0,0002	<0,0002
S	2,57	2,53	0,22	1,85	1,77	<0,2	0,207	0,242	<0,2
Zn	5,02	4,37	2,87	12	11,6	7,12	6,43	1,92	0,0149
Alkalinitet	31	32	7,3	20	19	<1,0	5,2	2,2	<1,0
DOC	3,3	<1,0	6,2	<1,0	<1,0	<1,0	1,6	1,1	<1,0
Fluorid	<0,15	<0,15	<0,2	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
Klorid	<0,60	<0,60	<1,0	71 ^b	70 ^b	70 ^b	69 ^b	72 ^b	72 ^b
Sulfat	6,4	6,2	<5,0	4,9	4,9	0,25	<1,0	0,61	0,37
pH	7,3	7,3	6,7	7,2	7,2	5,3	6,5	6	5,9
Ledningsförmåga (mS/m 25°C)	6,53	6,31	2,56	29,2	29,1	25,9	25,9	26,1	25,9
Redox Eh (mV)	420	412	323	412	422	411	395	395	383

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹

Tabell 7a. Utlakning från jordprover från Grimstorp från skaktest vid L/S 2.

L/S=2 Eluathalt: mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O	Lakning med CaCl ₂		
	Gr 2:50	Gr 1: 70	Gr 2: 0-15	Gr 2: 50
Al		0,27	0,0447	
As		0,00463	2,41	
Ba		0,11	0,186	
Ca		24,2 ^a	54,7 ^a	
Cd	Ej utförd lakning vid	0,000552	0,000237	Ej utförd lakning vid
Co	L/S=2 på prov Gr 2:50	0,00381	0,000496	L/S=2 på prov Gr 2:50
Cr		0,00169	0,0204	
Cu		0,008	0,0123	
Fe		0,088	0,0692	
Hg		<0,00002	<0,00002	
K		2,58	2,15	
Mg		6,21	8,72	
Mn		0,217	0,00664	
Na		2,67	1,24	
Ni		0,021	0,00317	
Pb		0,00046	0,00176	
S		0,973	7,29	
Zn		0,058	0,798	
Alkalinitet		<1,0	59	
DOC		3,5	19	
Fluorid		0,18	0,2	
Klorid		72 ^b	68 ^b	
Sulfat		3,8	22	
pH		5,1	7,4	
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)		26,9	39,2	
Redox Eh (mV)		193	214	

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹

Tabell 7b. Utlakning från jordprover från Grimstorp från skaktest med tvåstegslakning med L/S 8, från L/S=2 till ackumulerat L/S=10, (Gr 1:70 och Gr 2:0-15) och enstegslakning vid L/S 10 (prov Gr 2:50).

Eluathalt: mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O		Lakning med CaCl ₂			
	L/S=10		L/S=2-10		L/S=10	
	Gr 2:50		Gr 1: 70	Gr 2: 0-15	Gr 2: 50	
	Replik A	Replik B			Replik A	Replik B
Al	0,0897	0,0873	0,144	0,087	0,1	0,0867
As	0,00856	0,00632	0,00314	2,37	0,0112	0,00854
Ba	0,0445	0,0439	0,0875	0,221	0,0485	0,0547
Ca	87,1	85,4	34,1 ^a	45,1 ^a	112 ^a	109 ^a
Cd	<0,00005	<0,00005	0,000467	0,000273	<0,00005	5,64E-05
Co	0,00234	0,00234	0,00374	0,000359	0,00303	0,00277
Cr	0,00259	0,00271	<0,0005	0,027	0,00264	0,00257
Cu	0,00164	0,00151	0,00303	0,00898	0,0019	0,0049
Fe	0,0438	0,0459	0,0117	0,165	0,0467	0,0348
Hg	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
K	0,933	0,898	1,61	1,03	1,16	0,944
Mg	13,3	13,2	3,6	5,65	15,4	15,1
Mn	0,181	0,183	0,178	0,0127	0,241	0,218
Na	0,857	0,838	0,652	0,547	0,856	0,828
Ni	0,00503	0,00477	0,0169	0,00307	0,00662	0,0059
Pb	0,00025	<0,0002	<0,0002	0,0043	0,000301	0,000481
S	86,3	84	0,162	1,64	86,4	83,7
Zn	3,1	2,97	0,0313	0,823	3,74	3,56
Alkalinitet	<1.0	<1.0	<1.0	38	<1.0	<1.0
DOC	13	12	<1.0	8,1	12	12
Fluorid	0,15	<0.15	0,16	0,19	<0.75	<0.75
Klorid	0,81	0,74	72 ^b	71 ^b	65 ^b	65 ^b
Sulfat	319	295	0,86	5,5	320	312
pH	5,4	5,4	4,6	7,5	5,3	5,4
Lednings- förmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	66	64	27,9	34,2	83,7	82,9
Redox Eh (mV)	459	473	298	266	439	442

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvåtska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvåtska på 71 mg L⁻¹

4.2.2 Perkolationstest, SS-CEN/TS 14405

Perkolationstest utfördes som en kontinuerlig utlakning där lakvatten togs ut för analys vid ackumulerad L/S kvot på 0,1, 2 och 10. I tabell 8 och 9 redovisas de uppmätta eluathalterna (mg L⁻¹) i lakvattnet från Töllstorp respektive Grimstorp vid L/S 0,1 (tabell 8a och 9a), L/S 2 (tabell 8b och 9b) och L/S 10 (tabell 8c och 9c). I tabellerna visas även resultat från analys av lakvattnets pH, ledningsförmåga, redoxförhållande, alkalinitet och halt av DOC.

Tabell 8a. Utlakning från jordprover från Töllstorp från perkolationstest vid ackumulerat L/S=0,1.

Ack. L/S=0,1 Eluathalt mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O		Lakning med CaCl ₂		
	Tö 2: 0-30		Tö 2: 0-30		Tö 3: 0-20
	Exakt L/S per provuttag	0,1	0,1	0,11	0,1
	Replikat A	Replikat B	Replikat A	Replikat B	
Al	0,00581	0,00582	0,00592	0,00212	0,0239
As	<0,001	0,00297	0,00198	0,00341	<0,001
Ba	0,369	0,376	0,472	0,504	0,383
Ca	18,4	19,3	25,8 ^a	26,2 ^a	51,9 ^a
Cd	0,0223	0,0248	0,0326	0,0357	0,0164
Co	0,00133	0,00196	0,00226	0,00245	0,000355
Cr	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Cu	0,599	0,804	0,698	0,821	0,442
Fe	0,0045	0,005	<0,004	<0,004	0,0087
Hg	2,54E-05	2,14E-05	2,77E-05	<0,00002	<0,00002
K	7,98	8,39	10,1	10	14,2
Mg	1,86	1,97	2,65	2,65	4,66
Mn	0,197	0,364	0,313	0,299	0,149
Na	19,6	21,2	26,5	25,3	4
Ni	0,16	0,202	0,259	0,256	0,0413
Pb	0,0152	0,0156	0,0131	0,0185	0,00426
S	12,3	13	10,7	10,2	4,12
Zn	11,7	13,6	18,1	18,1	16,8
Alkalinitet	_{-b}	_{-b}	_{-b}	_{-b}	_{-b}
DOC	16	19	21	22	43
Fluorid	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	0,28
Klorid	16	18	51 ^c	52 ^c	58 ^c
Sulfat	37	40	39	33	13
pH	7,8	7,8	7,7	7,8	7,7
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	26,6	28,3	38,3	43,4	38,8
Redox Eh (mV)	341	346	330	341	329

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bEj analyserad, pga. för liten provvolym

^cLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹

Tabell 8b. Utlakning från jordprover från Töllstorp från perkolationstest vid ackumulerat L/S=2.

Ack. L/S=2 Eluathalt mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O		Lakning med CaCl ₂		
	Tö 2: 0-30		Tö 2: 0-30		Tö 3: 0-20
	Exakt L/S per provuttag	2,2	2,2	2,4	2,1
	Replikat A	Replikat B	Replikat A	Replikat B	
Al	0,0035	0,00299	<0,002	<0,002	0,00988
As	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ba	0,282	0,301	0,52	0,543	0,254
Ca	15	16,5	29,7 ^a	30,4 ^a	33,9 ^a
Cd	0,0178	0,0198	0,0397	0,0399	0,0121
Co	0,00183	0,00206	0,00436	0,00433	0,00508
Cr	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Cu	0,237	0,243	0,29	0,259	0,23
Fe	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0,0056
Hg	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
K	4,91	5,15	6,54	6,98	8,26
Mg	1,44	1,62	3,04	3,09	2,85
Mn	0,378	0,415	0,83	0,87	2,32
Na	5,71	5,3	5,61	6,33	0,839
Ni	0,138	0,153	0,291	0,281	0,0293
Pb	0,00731	0,00727	0,00655	0,00681	0,0014
S	7,73	8,78	6,46	7,05	1,2
Zn	7,98	8,36	18,4	17,6	9,44
Alkalinitet	56	59	45	46	53
DOC	4,1	5,1	4,3	4	6,5
Fluorid	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Klorid	1,5	1	59 ^b	58 ^b	60 ^b
Sulfat	23	27	19	21	<5,0
pH	7,8	7,8	7,6	7,6	7,7
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	15,4	16,4	31,5	31,8	30,3
Redox Eh (mV)	374	374	396	387	373

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 m

Tabell 8c. Utlakning från jordprover från Töllstorp från perkolationstest vid ackumulerat L/S=10

Ack. L/S=10 Eluathalt mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O		Lakning med CaCl ₂		
	Tö 2: 0-30		Tö 2: 0-30		Tö 3: 0-20
	Exakt L/S per provuttag	7,7	7,7	7,5	7,8
	Replikat A	Replikat B	Replikat A	Replikat B	
Al	0,00961	0,00771	0,0492	0,0738	0,0166
As	<0,001	<0,001	<0,005	<0,005	<0,001
Ba	0,23	0,224	0,537	0,561	0,228
Ca	10,6	12,1	35,4 ^a	36 ^a	32,1 ^a
Cd	0,0126	0,0134	0,0428	0,0421	0,0127
Co	0,00338	0,00305	0,00962	0,0105	0,0103
Cr	<0,0005	<0,0005	<0,003	<0,003	<0,0005
Cu	0,265	0,244	0,264	0,309	0,224
Fe	0,029	0,006	0,0658	0,0353	0,0142
Hg	3,72E-05	0,000027	<0,00002	<0,00002	<0,00002
K	1,66	1,65	1,79	1,91	1,47
Mg	0,743	0,829	1,09	1,15	1,73
Mn	0,659	0,66	1,69	1,76	3,69
Na	0,832	0,68	0,699	0,683	<0,1
Ni	0,0908	0,097	0,265	0,269	0,0278
Pb	0,00837	0,00805	0,00706	0,00854	0,00105
S	2,95	3,16	2,24	2,41	0,167
Zn	6,68	6,45	18,8	19	9,63
Alkalinitet	41	43	30	33	21
DOC	1,7	2	<1	1,3	2,1
Fluorid	0,21	0,21	0,16	<0,75	<0,75
Klorid	<0,60	<0,60	69 ^b	70 ^b	70 ^b
Sulfat	7,9	8,6	6	5,5	<2,5
pH	7,6	7,7	7,2	7,4	7,2
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	9,08	9,58	30,7	30,1	27,3
Redox Eh (mV)	293	296	285	350	378

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹

Tabell 9a. Utlakning från jordprover från Grimstorp från perkolationstest vid ackumulerat L/S=0,1.

Ack. L/S=0,1 Eluathalt mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O		Lakning med CaCl ₂		
	Gr 2:50		Gr 2: 0-15	Gr 2: 50	
	Exakt L/S per provuttag	0,1	0,11	0,18	0,11
	Replikat A	Replikat B	Replikat A Replikat B		
Al	0,259	0,228	0,0468	0,283	0,274
As	0,00929	0,00845	2,89	0,0104	0,0109
Ba	0,106	0,103	0,311	0,0983	0,101
Ca	658	654	120 ^a	616 ^a	630 ^a
Cd	8,51E-05	<0,00005	0,000379	7,97E-05	7,72E-05
Co	0,0194	0,0202	0,00155	0,0189	0,0205
Cr	0,00854	0,00551	0,00918	0,00905	0,00987
Cu	0,00705	0,00262	0,0245	0,0035	0,00308
Fe	0,143	0,0999	0,0153	0,167	0,197
Hg	4,37E-05	2,91E-05	<0,00002	3,36E-05	4,91E-05
K	8,25	7,98	5,22	7,81	8,02
Mg	124	124	21,8	120	123
Mn	3,34	3,2	0,0143	3,19	3,28
Na	9,47	9,25	3,67	8,91	9,24
Ni	0,0224	0,0208	0,00501	0,0199	0,0225
Pb	0,00106	0,000846	0,000479	0,000992	0,000978
S	703	697	41,6	673	683
Zn	16,4	14	1,18	13,3	13,8
Alkalinitet	17	18	- ^c	56	18
DOC	79	71	44	73	74
Fluorid	<0,75	<0,75	<0,15	<0,75	<0,75
Klorid	15	14	56 ^b	17 ^b	17 ^b
Sulfat	1780	1850	124	1810	1820
pH	- ^c	- ^c	8	- ^c	- ^c
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	- ^c	- ^c	75,8	- ^c	- ^c
Redox Eh (mV)	- ^c	- ^c	239	- ^c	- ^c

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹. Att lakvattnet från prov Gr 2:50 hade betydligt lägre Cl-halt än ingående lakvätska beror sannolikt på att Gr 2:50 var ett naturfuktigt material med mycket hög vattenkvot.

^cEj analyserat på grund av för liten provmängd

Tabell 9b. Utlakning från jordprover från Grimstorp från perkolationstest vid ackumulerat L/S=2.

Ack. L/S=2,0 Eluathalt mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O		Lakning med CaCl ₂		
	Gr 2:50		Gr 2: 0-15	Gr 2: 50	
	1,8	1,9	1,8	1,9	1,8
Exakt L/S per provuttag	Replikat A	Replikat B	Replikat A	Replikat B	Replikat B
Al	0,145	0,176	0,0553	0,0971	0,0766
As	0,00972	0,0121	3,05	0,0087	0,0141
Ba	0,0772	0,0732	0,221	0,0902	0,0848
Ca	416	388	76,6 ^a	407 ^a	426 ^a
Cd	<0,00005	<0,00005	0,00019	<0,00005	<0,00005
Co	0,0371	0,0349	0,000388	0,0376	0,0401
Cr	0,00822	0,0103	0,00686	0,00659	0,00579
Cu	0,00313	0,00258	0,0144	0,00177	0,00146
Fe	0,361	0,322	0,0169	0,188	0,287
Hg	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
K	5,7	5,55	3,61	5,8	6,01
Mg	78,2	74,5	14,1	76,8	79,3
Mn	3,96	3,69	0,00545	3,95	4,23
Na	5,21	4,97	2,38	5,02	5,13
Ni	0,0134	0,0138	0,00378	0,0142	0,016
Pb	0,00021	0,000231	0,000473	<0,0002	<0,0002
S	466	441	8,62	429	448
Zn	8,6	7,9	0,686	8,14	8,42
Alkalinitet	15	17	140	14	14
DOC	44	45	22	34	35
Fluorid	<0,75	<0,75	<0,15	<0,75	<0,75
Klorid	3,3	3,2	70 ^b	61 ^b	58 ^b
Sulfat	1340	1020	23	954	975
pH	6,7	6,8	8,2	6,8	6,7
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	206	197	52,4	207	215
Redox Eh (mV)	234	217	244	265	249

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹

Tabell 9c. Utlakning från jordprover från Grimstorp från perkolationstest vid ackumulerat L/S=10.

Ack. L/S=10 Eluathalt mg L ⁻¹	Lakning med H ₂ O		Lakning med CaCl ₂		
	Gr 2:50		Gr 2: 0-15	Gr 2: 50	
	Exakt L/S per provuttag	8,0	8,0	8,0	8,0
	Replikat A	Replikat B	Replikat A Replikat B		
Al	0,543	0,589	0,0248	0,208	0,203
As	0,334	0,344	3,07	0,126	0,125
Ba	0,0216	0,0199	0,199	0,0582	0,0541
Ca	16,3	15,7	52,4 ^a	39 ^a	38,7 ^a
Cd	<0,00005	<0,00005	0,000242	<0,00005	<0,00005
Co	0,00312	0,00358	0,000176	0,00575	0,00575
Cr	0,0183	0,0197	0,00614	0,0098	0,0103
Cu	0,00361	0,00298	0,00916	0,0016	0,00158
Fe	1,05	1,31	0,0141	0,464	0,534
Hg	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002	<0,00002
K	1,09	1,05	2,28	2,01	1,86
Mg	2,46	2,32	9,24	5,81	5,84
Mn	0,159	0,175	0,0131	0,415	0,413
Na	0,256	0,291	1,09	0,291	0,286
Ni	0,00382	0,00418	0,00278	0,00324	0,00401
Pb	0,000621	0,000824	0,000302	<0,0002	<0,0002
S	8,25	6,38	2,05	5,32	5,51
Zn	0,498	0,489	0,717	0,841	0,907
Alkalinitet	16	16	71	8,8	9,5
DOC	38	44	10	21	22
Fluorid	<0,75	0,18	0,22	<0,75	<0,75
Klorid	<3,0	<0,60	69 ^b	70 ^b	71 ^b
Sulfat	18	13	3,9	12	12
pH	6,9	6,9	7,8	6,7	6,7
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	10,1	8,68	38	30,4	30,3
Redox Eh (mV)	352	353	301	263	370

^aLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Ca-halter i ingående lakvätska på 40 mg L⁻¹

^bLakning med 0,001 M CaCl₂ medför Cl-halter i ingående lakvätska på 71 mg L⁻¹

4.2.3 Perkolationstest med återcirkulation

Perkolationstest med återcirkulation utfördes som ett kolonntest med konstant L/S på 2 L kg⁻¹ där lakvatten togs ut för analys efter 7 dygns återcirkulation. I tabell 10 redovisas de uppmätta eluathalterna av oorganiska ämnen (mg L⁻¹) i lakvattnet från jordprover från Töllstorp respektive Grimstorp. I tabellen visas även resultat från analys av lakvattnets pH, ledningsförmåga, redoxförhållande, alkalinitet och halt av DOC.

Tabell 10. Utlakning av jordprover från Töllstorp och Grimstorp med perkolationstest med återcirkulation vid L/S=2.

L/S=2		Lakning med H ₂ O					
Eluathalt mg L ⁻¹	TÖLLSTORP				GRIMSTORP		
	Tö 2: 0-30		Tö 3: 0-20		Gr 2: 50		
Exakt L/S	2	2	2	2	2	2	
	Replikat A	Replikat B	Replikat A	Replikat B	Replikat A	Replikat B	
Al	0,00428	0,00322	0,027	0,0442	0,218	0,137	
As	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,00736	0,0711	
Ba	0,316	0,311	0,12	0,1	0,0919	0,0799	
Ca	17	17,7	15,3	13,3	506	534	
Cd	0,0208	0,02	0,00528	0,00464	8,98E-05	<0,00005	
Co	0,00118	0,00125	0,000682	0,00102	0,0662	0,0771	
Cr	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,000516	0,00438	0,00348	
Cu	0,505	0,487	0,35	0,394	<0,001	<0,001	
Fe	<0,004	<0,004	0,0219	0,0375	0,0605	7,28	
Hg	<0,00002	<0,00002	2,98E-05	0,000025	<0,00002	<0,00002	
K	3,93	4,04	4,34	3,99	5,3	5,2	
Mg	1,39	1,45	1,2	1,04	74,4	79,4	
Mn	0,166	0,17	0,236	0,376	4,9	5,29	
Na	5,63	5,94	1,38	1,33	5,12	5,05	
Ni	0,16	0,163	0,0154	0,015	0,0266	0,0245	
Pb	0,00288	0,00189	0,00168	0,00135	0,000796	0,00106	
S	6,71	6,81	1,72	1,63	558	583	
Zn	10,9	11,2	5,14	4,48	19,8	20,8	
Alkalinitet	51	51	45	49	1,5	<1	
DOC	4,9	4,8	12	12	27	22	
Fluorid	0,19	0,19	<0,15	<0,15	<0,15	<0,75	
Klorid	2,6	2,5	<0,60	0,61	3,9	4,1	
Sulfat	21	20	4,3	4,2	1700	1630	
pH	7,6	7,5	7,1	7	5,4	4,4	
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	18	18,2	12	10,6	240	247	
Redox Eh (mV)	402	318	394	344	334	497	
Flödes hastighet (ml h ⁻¹)	21,8	21,8	23,7	23,7	23	23	
Recirkulationstid (dygn)	7	7	7	7	7	7	

4.3 Utlakning av organiska ämnen (PAH)

4.3.1 Skaktest (enstegslakning)

I tabell 11a redovisas resultat från skaktest med enstegslakning som utfördes på tre jordprover i duplikat; Gr 2:0-15 A, B och Gr 2:50 A, B samt Gr 3:50-70 A, B. Medelvärden och standardavvikelser i tabell 11a för dessa tester är således beräknat endast från n=2. I lakvatten från Gr 2:50 A och B var samtliga PAH-halter under Analyticas rapporteringsgräns och därför saknas medelvärden och standardavvikelser för utlakade halter för detta jordprov.

Tabell 11a. Halter av PAH i lakvatten, C_W , från skaktest med enstegslakning

Tabell 11a. Halter av PAH i lakvatten, C_W , från skaktest med enstegslakning

Halter, C_W , ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Gr 2:0-15 (duplikat)				Gr 2:50 (duplikat)				Gr 3:50-70 (duplikat)			
	A	B	Medel	Stdav (%)	A	B	Medel	Stdav (%)	A	B	Medel	Stdav (%)
Ämnen:												
naftalen	0,57	0,67	0,62	11	<0.1	<0.1	-	-	1,5	1,5	1,5	0
acenaftylen	0,73	0,35	0,54	50	<0.1	<0.1	-	-	0,32	0,38	0,35	12
acenaften	0,75	1,0	0,88	20	<0.1	<0.1	-	-	0,99	1,2	1,1	14
fluoren	1,4	1,9	1,7	21	<0.1	<0.1	-	-	0,65	0,76	0,71	11
fenantren	3,4	4,6	4,0	21	<0.1	<0.1	-	-	0,43	0,49	0,46	9
antracen	18	23	21	17	<0.1	<0.1	-	-	1,6	1,6	1,6	0
fluoranten	10	15	13	28	<0.1	<0.1	-	-	3	3,8	3,4	17
pyren	13	20	17	30	<0.1	<0.1	-	-	1,3	1,5	1,4	10
bens(a)antracen*	4,3	6,5	5,4	29	<0.05	<0.05	-	-	0,65	0,89	0,77	22
krysen*	13	17	15	19	<0.05	<0.05	-	-	2,1	2,9	2,5	23
bens(b)fluoranten*	20	30	25	28	<0.05	<0.05	-	-	1,9	2,6	2,3	22
bens(k)fluoranten*	7,1	10	8,6	24	<0.05	<0.05	-	-	0,9	1,2	1,1	20
bens(a)pyren*	17	24	21	24	<0.05	<0.05	-	-	2,2	3,1	2,7	24
dibens(ah)antracen*	2,1	2,4	2,3	9	<0.05	<0.05	-	-	0,093	0,13	0,11	23
benso(ghi)perylen	8,1	12	10	27	<0.1	<0.1	-	-	1,1	1,6	1,4	26
indeno(123cd)pyren*	8,0	10	9,0	16	<0.05	<0.05	-	-	0,71	0,99	0,85	23
summa 16 EPA-PAH	130	180	155	23	<1.3	<1.3	-	-	19	25	22	19
*PAH cancerogena	72	100	86	23	<0.18	<0.18	-	-	8,6	12	10	23
PAH övriga	56	79	68	24	<0.45	<0.45	-	-	11	13	12	12

I tabell 11b redovisas resultat från pH-, turbiditets- och konduktivitetmätningar och analysresultat av DOC i de olika lakvattnen efter avslutat skakförsök. Angivet i tabell 11b är även den specifika L/S-kvoten som använts i respektive försök.

Tabell 11b. Karaktäristika för lakvatten från skaktesterna; Koncentrationen av löst organiskt kol (DOC), pH, konduktiviteten och turbiditeten i lakvatten efter avslutad lakning. Angivet finns också den specifika L/S kvoten för respektive test.

Prov		Konduktivitet mS m^{-1}	DOC mg L^{-1}	Turbiditet FNU	pH	L/S L kg^{-1}
Skaktest (enstegslakning)						
Gr 2: 0-15	A	190	32	Ej analys	7,4	1,6
	B	191	38	Ej analys	7,5	1,6
Gr 2: 50	A	175	18	21	5,9	10
	B	173	17	19	5,9	10
Gr 3: 50-70	A	181	32	2,3*	6,1	0,9
	B	182	32	0,57*	6,1	0,9

*Analysresultat från filtrerade vattenprover

4.3.2 Perkolationstest med återcirkulation

Två utlakningsförsök med ER-H-metoden genomfördes på två prover från Grims-
torp i triplikat; Gr 2:0-15 A, B, C och Gr 3:50-70 A, B, C. Resultat från dessa
perkolationstest med återcirkulation i 7 dygn för utlakning av PAH:er redovisas i
tabell 12a tillsammans med medelvärdet av de tre replikaten för varje PAH och
dess standardavvikelse. För de ämnen som förekom i halter under Analyticas
rapporteringsgräns i lakvattnen (acenaftylen och dibens(ah)antracen) saknas
medelvärden och standardavvikelse.

Tabell 12a Halter av PAH i lakvatten, C_w , från lakförsök utfört med ER-H-metoden

Halter, C_w, ($\mu\text{g L}^{-1}$)		Gr 2: 0-15 (triplikat)				
Ämnen:	A	B	C	MEDEL	STDAV (%)	
naftalen	0,73	1,2	0,57	0,83	39	
acenaftylen	<0,25	<0,25	<0,25	-	-	
acenaften	0,75	0,46	0,28	0,50	48	
fluoren	0,53	0,31	0,21	0,35	47	
fenantren	0,92	0,57	0,34	0,61	48	
antracen	2,3	1,5	1	1,60	41	
fluoranten	0,73	0,4	0,35	0,49	42	
pyren	0,7	0,4	0,35	0,48	39	
bens(a)antracen*	0,059	0,035	0,035	0,04	32	
krysen*	0,13	0,08	0,048	0,09	48	
bens(b)fluoranten*	0,18	0,12	0,084	0,13	38	
bens(k)fluoranten*	0,071	0,044	0,03	0,05	43	
bens(a)pyren*	0,16	0,094	0,069	0,11	44	
dibens(ah)antracen*	0,017	<0,012	<0,012	-	-	
benso(ghi)perylen	0,075	0,039	0,033	0,05	46	
indeno(123cd)pyren*	0,071	0,036	0,03	0,05	48	
summa 16 EPA-PAH	7,4	5,3	3,4	5,37	37	
*PAH cancerogena	0,69	0,41	0,3	0,47	43	
PAH övriga	6,7	4,9	3,1	4,90	37	

Halter, C_w, ($\mu\text{g L}^{-1}$)		Gr 3:50-70 (triplikat)				
Ämnen:	A	B	C	MEDEL	STDAV (%)	
naftalen	1,60	1,60	1,60	1,60	0	
acenaftylen	0,35	<0,25	<0,25	-	-	
acenaften	0,55	0,46	0,29	0,43	30	
fluoren	0,39	0,34	0,19	0,31	34	
fenantren	0,28	0,29	0,19	0,25	22	
antracen	0,36	0,30	0,23	0,30	22	
fluoranten	0,97	1,10	0,70	0,92	22	
pyren	0,32	0,35	0,25	0,31	17	
bens(a)antracen*	0,03	0,04	0,03	0,03	26	
krysen*	0,09	0,09	0,08	0,08	8	
bens(b)fluoranten*	0,06	0,06	0,05	0,06	13	
bens(k)fluoranten*	0,03	0,02	0,02	0,02	9	
bens(a)pyren*	0,07	0,06	0,05	0,06	12	
dibens(ah)antracen*	<0,012	<0,012	<0,012	-	-	
benso(ghi)perylen	0,03	0,03	0,02	0,03	31	
indeno(123cd)pyren*	0,02	0,02	0,02	0,02	6	
summa 16 EPA-PAH	5,10	4,80	3,70	4,53	16	
*PAH cancerogena	0,29	0,29	0,24	0,27	11	
PAH övriga	4,90	4,50	3,50	4,30	17	

I tabell 12b redovisas resultat från pH-, turbiditets- och konduktivitetmätningar och analysresultat av DOC i de olika lakvattnen efter avslutat ER-H-försök. Angivet i tabell 12b är även den specifika L/S-kvoten som använts i respektive försök.

Tabell 12b Karaktäristika för lakvatten från ER-H-testerna; Koncentrationen av löst organiskt kol (DOC), pH, konduktiviteten och turbiditeten i lakvatten efter avslutad lakning. Angivet finns också den specifika L/S kvoten för respektive test.

Prov		Konduktivitet mS m ⁻¹	DOC mg L ⁻¹	Turbiditet FNU	pH	L/S L kg ⁻¹
ER-H-metoden						
Gr 2: 0-15	A	213	31	1,2*	7,6	1,6
	B	211	31	1,8*	7,5	1,6
	C	203	43	1,2*	7,5	1,6
Gr 3: 50-70	A	183	23	0,59*	6,2	0,9
	B	185	22	0,61*	6,3	0,9
	C	186	19	0,51*	6,2	0,9

*Analysresultat från filtrerade vattenprover

4.3.3 Förlusttester

I tabell 13 visas resultat från förlusttesterna där lakutrustningen sköljdes med ett opolärt lösningsmedel för att extrahera PAH:er som adsorberat till utrustningens väggar. Resultatet är redovisat som mängden (µg) extraherad PAH från utrustningen. I de fall där halten PAH i lösningsmedelsfasen understeg Analyticas rapporteringsgräns har värdet för denna gräns använts för att beräkna den största mängd som möjligen skulle kunna ha adsorberats till utrustningen. Dessa värden föregås av ”mindre än”-tecken i tabellen. Resultat från renhetstesten av lösningsmedlet från flaska A och B redovisas även i tabell 13 som mängden (µg) PAH i indunstad volym lösningsmedel (120 mL). Detekterbara halter av relativt lättflyktiga PAH:er (naftalen, acenaften, fluoren) återfanns i lösningsmedel från flaska A men ej i flaska B.

I tabell 14 redovisas den procentuella förlusten (eller adsorptionen) av PAH:er i de olika testerna, beräknade som andelen adsorberad PAH av total utlakad mängd (total utlakad mängd har beräknats som summan av mängden adsorberad PAH och mängden PAH i systemets vattenfas).

Tabell 13. Extraherade mängder av PAH (µg) från undersökta lakustrustningar. Angivet finns även resultat från analys av indunstad ren heptan, redovisat som mängden PAH i den indunstade volymen

Mängd PAH µg	Skaktest	ER-H-metoden			Test av heptan (renhet)	
		Gr 2: 0-15(A) ^a	Gr 2: 0-15(C) ^b	Gr 3: 50-70(B) ^a	Flaska A	Flaska B
naftalen	1,64	0,10	0,21	1,13	<0,02	
acenaftylen	0,95	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	
acenaften	0,08	0,03	<0,02	0,02	<0,02	
fluoren	0,17	<0,02	<0,02	0,06	<0,02	
fenantren	0,16	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
antracen	2,79	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	
fluoranten	0,50	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
pyren	0,87	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	
bens(a)antracen	0,35	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
krysen	0,33	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
bens(b)fluoranten	1,47	0,02	0,03	<0,02	<0,02	
bens(k)fluoranten	0,80	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
bens(a)pyren	1,21	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
dibens(ah)antracen	0,15	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
benso(ghi)perylene	0,58	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
indeno(123cd)pyren	0,73	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	

^aExtraktion utförd med heptan från flaska A.

^bExtraktion utförd med heptan från flaska B.

Tabell 14. Procentuella förluster vid skaktest respektive kolontest. I tabellen visas mängden PAH som adsorberats till lakustrustningens väggar som andel av total utlakad mängd (adsorberad mängd + mängd i vattenfasen) i procent.

Andel adsorberad mängd av totalt utlakad mängd %	Skaktest	ER-H-metoden	
		Gr 2: 0-15 (A) ^a	Gr 2: 0-15 (C) ^b
naftalen	82	26	21
acenaftylen	68	-	-
acenaften	14	20	<8
fluoren	16	<16	<11
fenantren	7	12	<13
antracen	20	7	<12
fluoranten	7	10	<4
pyren	10	15	<11
bens(a)antracen	12	<54	<51
krysen	4	<46	<33
bens(b)fluoranten	11	35	53
bens(k)fluoranten	15	<57	<63
bens(a)pyren	10	35	<42
dibens(ah)antracen	10	-	-
benso(ghi)perylene	10	<55	<59
indeno(123cd)pyren	13	<57	<69

^aExtraktion utförd med heptan från flaska A.

^bExtraktion utförd med heptan från flaska B.

4.4 pH-statisk lakning och ANC/BNC

I tabell 15 redovisas resultat från pH-statförsök med jordprover från Töllstorp (tabell 15a) och Grimstorp (tabell 15b).

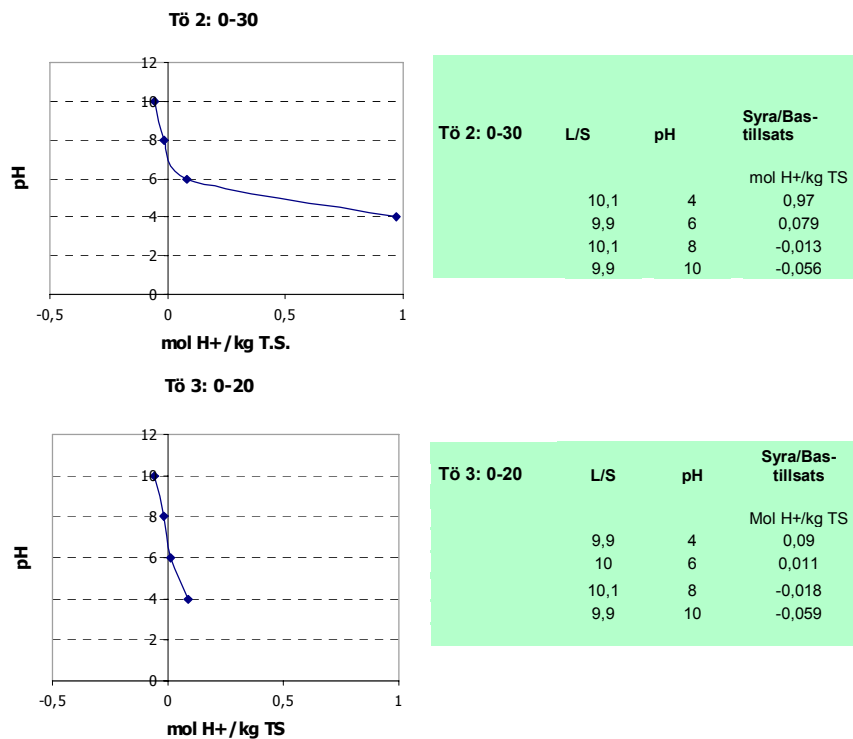
Tabell 15a. Resultat från pH-stattest av jordprover från Töllstorp; lakning med vatten vid olika pH vid L/S 10.

L/S=10 Eluathalt (mg L ⁻¹) pH	Tö 2: 0-30				Tö 3: 0-20			
	4	6	8	10	4	6	8	10
Exakt L/S	10,1	9,9	10,1	9,9	9,9	10	10,1	9,9
Al	10,7	0,00516	0,265	1,15	2,27	0,158	1,09	10
As	<0,02	<0,002	0,00286	0,0174	<0,005	0,00176	0,00671	0,0207
Ba	5,03	1,71	0,0671	0,0174	2,29	0,178	0,0129	0,0199
Ca	97,9	52,5	2,43	0,445	71,1	15,3	0,62	0,982
Cd	1,41	0,267	0,00221	0,00207	0,235	0,00972	0,0012	0,00167
Co	14,7	0,0635	0,000925	0,00107	9,11	0,000481	0,00175	0,000188
Cr	<0,01	<0,001	0,00349	0,015	<0,003	0,00103	0,00216	0,00255
Cu	679	9,26	1,41	3,67	35,5	0,301	0,968	2,62
Fe	39,2	0,0113	0,695	0,877	27,7	0,22	1,27	0,805
Hg	7,11E-05	0,000043	0,000356	0,00203	<0,00002	2,31E-05	0,000203	<0,00002
K	25,7	36,6	16,2	4,95	26,1	27,8	9,58	3,33
Mg	9,25	1,73	0,205	<0,09	4,69	0,874	<0,09	<0,09
Mn	21,4	1,21	0,0427	0,0453	8,93	0,131	0,0335	0,0235
Na	3	2,34	27,1	76,6	1,18	0,295	20,7	56,4
Ni	11,6	1,23	0,0284	0,0334	4,11	0,0257	0,00626	0,00836
Pb	22,1	0,156	0,0819	0,184	0,753	0,0118	0,0776	0,0869
S	6,53	1,84	5,69	9,15	0,23	0,274	0,47	0,865
Zn	1590	162	1,9	2,54	153	9,01	1,09	0,948
DOC	33	10	43	47	225	54	17	66
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	774	104	20	41,3	141	27,3	18,7	29
Redox Eh (mV)	-116	-101	201	186	466	415	363	291

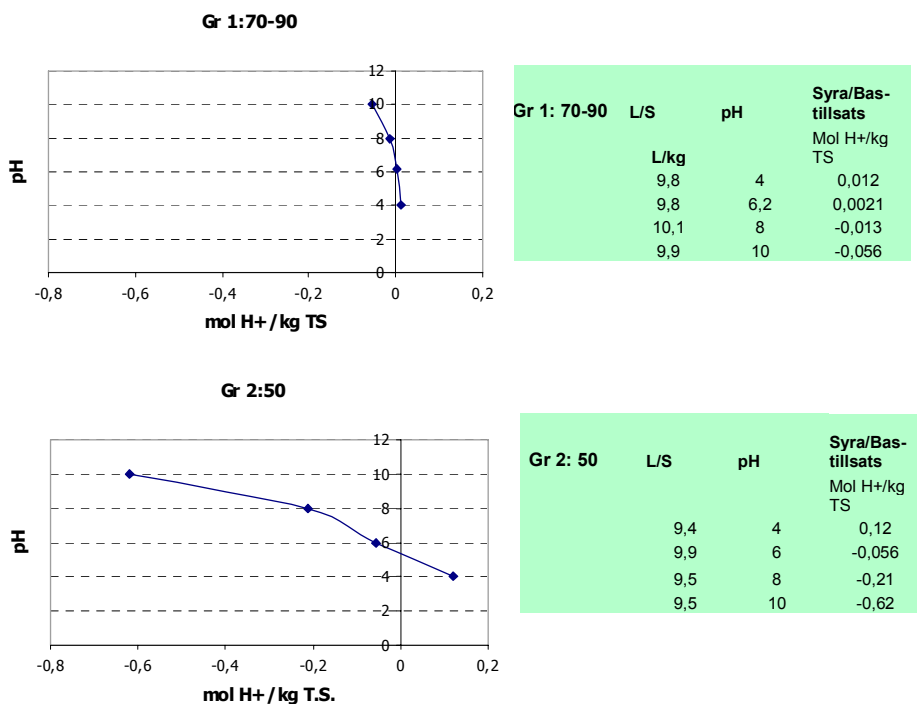
Tabell 15b. Resultat från pH-stattest av jordprover från Grimstorp; lakning med vatten vid olika pH vid L/S 10.

L/S=10 Eluathalt (mg L ⁻¹) pH	Gr 1:70- 90				Gr 2:50			
	4	6,2	8,0	10	4	6	8	10
Exakt L/S	9,9	9,8	10	10,3	9,9	10,4	10	10,1
Al	0,469	1,32	2,79	11,3	1,26	0,0822	1,71	47,1
As	0,00529	0,0298	0,106	0,4	0,0232	0,00606	0,0805	0,461
Ba	0,385	0,0383	0,0605	0,125	0,171	0,0421	0,0172	0,127
Ca	14,6	0,956	1,13	3,76	303	49,6	6,46	33,7
Cd	0,000954	7,88E-05	0,000125	0,000296	<0,0001	<0,00005	<0,00005	0,000291
Co	0,0237	0,127	0,00897	0,00632	0,0651	0,000534	0,00139	0,00591
Cr	0,00146	0,00376	0,0113	0,0447	0,00705	0,00159	0,0224	0,142
Cu	0,00378	0,023	0,0263	0,0822	0,00283	0,00148	0,0114	0,0602
Fe	0,0312	1,24	1,74	2,55	0,106	0,075	2,41	9,13
Hg	<0,00002	2,79E-05	8,26E-05	0,000344	5,11E-05	<0,00002	2,39E-05	0,000269
K	23,5	3,66	1,87	1,32	67,4	22	6,97	9,82
Mg	4,47	0,441	0,44	0,858	31,8	8,73	0,874	3,58
Mn	0,732	0,082	0,124	0,147	3,78	0,0477	0,012	0,0941
Na	2,1	5,01	22,3	50,8	1,28	96,3	226	401
Ni	0,0373	0,0791	0,0167	0,0222	0,0478	0,00231	0,00706	0,0391
Pb	<0,0002	0,00245	0,00432	0,0083	0,00161	<0,0002	0,00435	0,0211
S	0,455	0,595	0,671	0,939	127	107	112	94,2
Zn	0,135	0,0199	0,0331	0,0677	46,5	1,03	0,886	3,7
DOC	2	5,2	20	105	17	27	100	1160
Ledningsförmåga (mS m ⁻¹ 25°C)	27,9	7,33	11,5	23	221	87,3	117	264
Redox Eh (mV)	374	427	325	300	534	496	383	146

I figur 6 visas resultat från ANC/BNC-beräkningar för Töllstorp (figur 6a) och Grimstorp (figur 6b). Jordmaterialens eget-pH-värde ses i figuren vid tillsats av 0 mol H⁺ kg⁻¹ TS, dvs. kurvans skärning med y-axeln.



Figur 6a. Jordens buffringskapacitet, ANC, i jordprover från Töllstorp



Figur 6b. Jordens buffringskapacitet, ANC, i jordprover från Grimstorp

5 Utvärdering

5.1 Utlakning av oorganiska ämnen

5.1.1 Metodernas repeterbarhet

En förutsättning för att en metod skall kunna användas vid rutinkontroller är att den har en acceptabel reproducerbarhet (variationen mellan laboratorium) och repeterbarhet (variationen inom ett laboratorium). I den här studien har samtliga tester utförts av samma laboratorium och det är därför ej möjligt att göra en uppskattning av de enskilda metodernas reproducerbarhet.

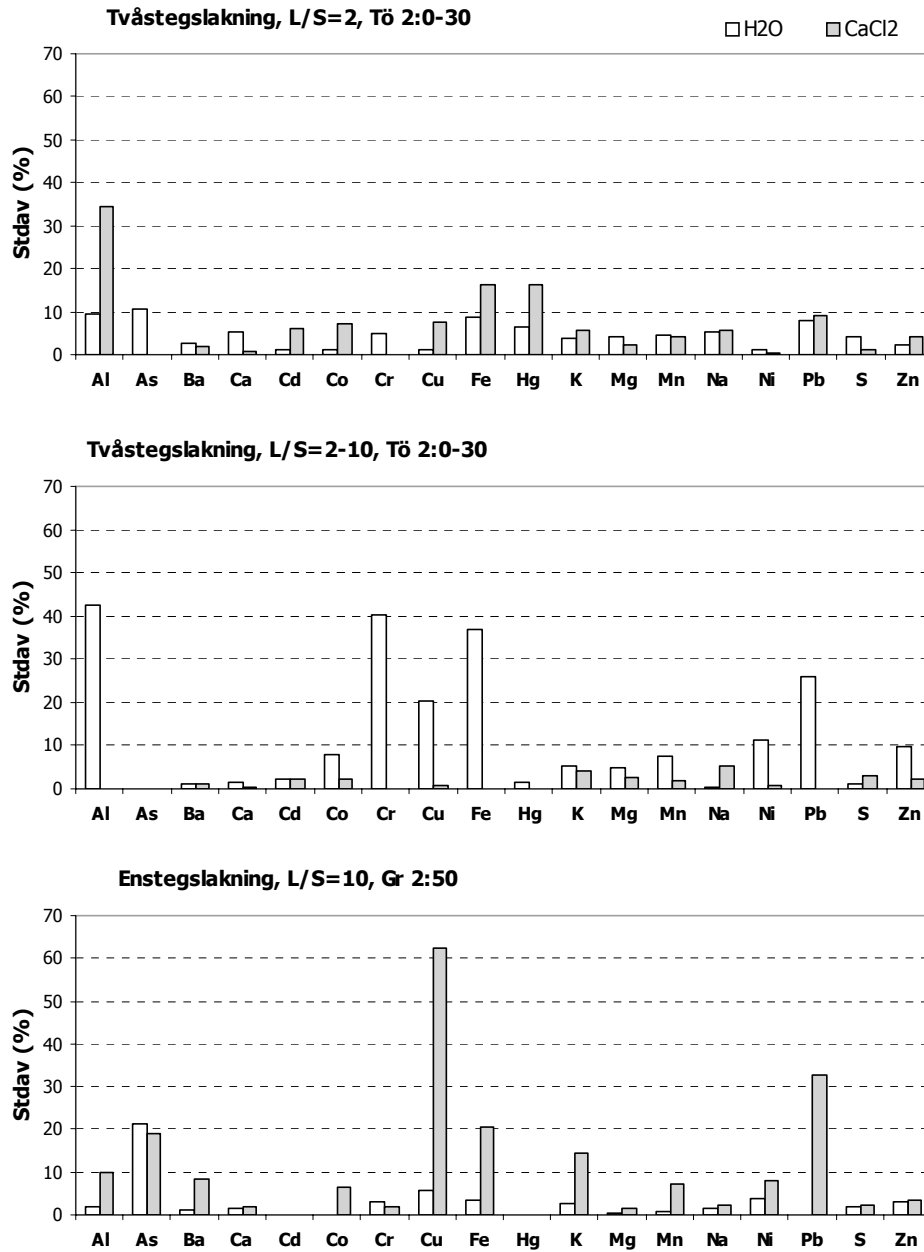
För att få en korrekt värdering av en metods repeterbarhet bör ett stort antal tester på olika jordmaterial, i olika föroreningsgrad, utföras. Därtill bör testerna utföras i tillräckligt många replikat. I föreliggande rapport har en uppskattning gjorts av metodernas repeterbarhet utifrån uppmätta eluathalter genom att beräkna den relativa standardavvikelsen utifrån $n=2$ (repeterbarheten visas som den procentuella standardavvikelsen av medelvärdet i Figur 7a-7c). Procentsatserna i figur 7a-7c ska därför ses som en grov första uppskattning av de enskilda metodernas repeterbarhet, vilken antingen skulle kunna försämrats eller förbättras om beräkningarna baserades på ett större underlag.

Generellt sett var repeterbarheten mycket god för skaktestet både vid enstegslakning och vid tvåstegslakning (figur 7a). För flertalet studerade ämnen var den relativa standardavvikelsen mindre än 10%. För ämnen som lakar ut i mycket små mängder kan man förvänta sig en högre standardavvikelse då eluathalten ligger nära analysmetodens detektionsgräns. Om man bortser från dessa fall hade endast aluminium, järn, koppar och bly standardavvikelser >20% (men inget av dessa ämnen hade en standardavvikelse som översteg 62%).

Enstegslakning med CaCl_2 verkade ge upphov till en sämre repeterbarhet än då samma prov lakades enbart med vatten, medan det omvända förhållandet verkade råda för tvåstegslakningen vid L/S 8. Med tanke på det mycket begränsade underlaget till de uppskattade repeterbarheterna är det svårt att dra några slutsatser om huruvida lakning med CaCl_2 skulle kunna förbättra metodernas repeterbarhet eller ej och fler analyser rekommenderas för att utreda frågan.

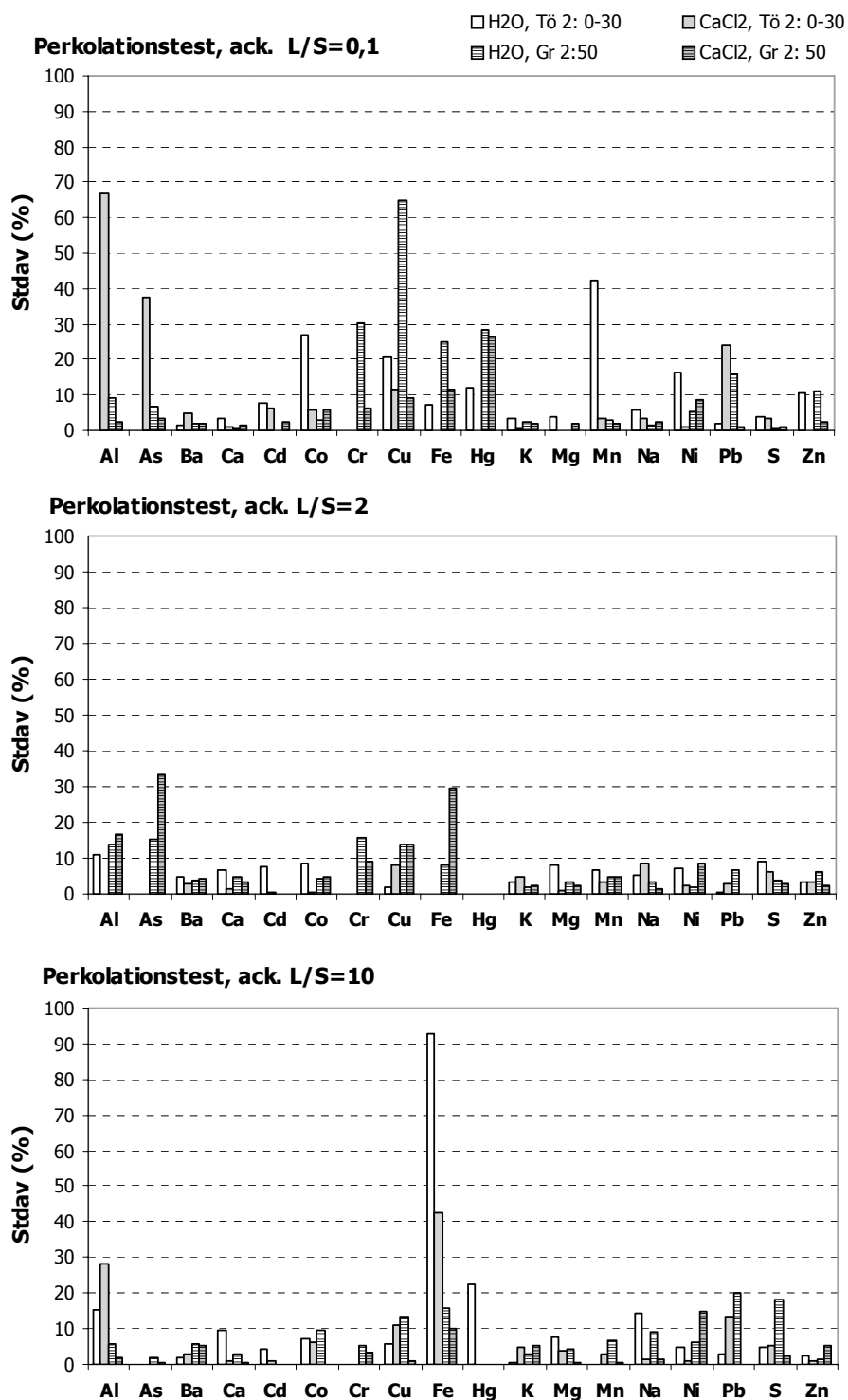
Repeterbarheten för eluathalter uppmätta med perkolationstestet vid L/S=0,1 var sämre än repeterbarheten för eluathalter vid de högre L/S uttagen (figur 7b). Hälften av de studerade ämnena hade en standardavvikelse som översteg 20 % vid L/S=0,1 medan endast arsenik, aluminium och järn översteg 20% vid L/S 2 och 8. Liksom vid skaktestet fanns ingen uppenbar trend mellan förbättrad repeterbarhet vid användandet av CaCl_2 istället för vatten som lakvätska.

Perkolationstestet med återcirkulation hade liksom de andra metoderna en relativt god repeterbarhet (figur 7c). Detta trots att vattenproverna ej filtrerades innan analys (övriga testade metoder har ett filtreringssteg av lakvattnet innan det analyseras). Sex av ämnena hade dock standardavvikelser som var över 20%. Av dessa hade eluathalten av järn och arsenik från provet Gr 2:50 vardera en standardavvikelse som översteg 100 %.

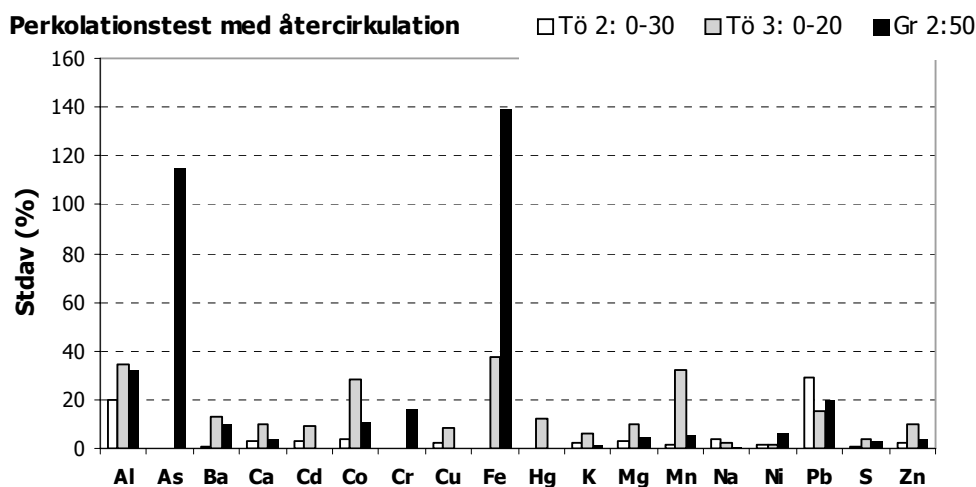


Figur 7a Repeterbarheten (som den procentuella standardavvikelsen av medelvärdet baserat på två replikat) för skaktesten vid tvåstegslakning (L/S=2 och L/S=2-10) och enstegslakning vid L/S=10.

Figur 7b Repeterbarheten (som den procentuella standardavvikelsen av medelvärdet baserat



på två replikat) för perkolationsstest vid de tre uttagen vid ackumulerat L/S=0,1; 2 och 10.



Figur 7c Repeterbarheten (som den procentuella standardavvikelsen av medelvärdet baserat på två replikat) för perkolationsstest med återcirkulation utförd på tre jordprover med H₂O som lakvätska.

5.1.2 Lakbara halter med H₂O i jämförelse med CaCl₂

För att studera hur utlakade halter kan skilja sig åt då lakvätskans jonstyrka ökar utfördes ett antal laktester med destvatten respektive kalciumklorid. För perkolationsstestet utfördes lakningar i duplikat på provet Tö 2:0-30. I tabell 16 redovisas kvoten mellan de utlakade medelhalterna då kalciumklorid, respektive destvatten, användes som lakvätska.

För flera av kationerna i tabell 16 är kvoten >1, dvs. det fanns ett samband mellan ökad eluathalt av oorganiska ämnen och ökad halt joner i lakvätskan. För ämnena Ba, Cd, Co, Cu, K, Mg, Mn, Ni, och Zn var de utlakade halterna högre då CaCl₂ användes som lakvätska. För ämnena Al, As, Hg, Cr och Fe kunde ej en jämförelse genomföras eftersom eluathalterna var för låga (halterna var under eller nära rapporteringsgränsen) eller på grund av att den relativa standardavvikelsen var för stor för att avgöra om det verkligen förelåg en skillnad (det senare gällde Al och Fe). Svavel var det enda ämnet som lakades ut i lägre halt med CaCl₂ än med vatten medan de lakbara halterna av natrium och bly verkade oberoende av lakvätskans jonkoncentration. De högre halterna av kationer i lakvattnet då kalciumklorid används som lakvätska orsakas troligen av två processer: 1) Ca²⁺-jonerna konkurrerar med övriga kationer om jordpartiklarnas ytor och 2) Cl-joner kan bilda komplex med metalljoner och öka deras löslighet.

Tabell 16. Kvoten mellan utlakad halt då lakvätskan innehöll kalciumklorid respektive destillerat vatten. Kvoterna är beräknade från bestämda medelvärden från lakresultat från perkolationstest.

Tö 2:0-30 Ack. L/S	Perkolationstest		
	0,1	2	10
Eluathalt (CaCl ₂) / Eluathalt (destvatten)			
Al	0,7	<0,6	7,1
As	>2,0	- ^a	- ^a
Ba	1,3	1,8	2,4
Ca	1,4	1,9	3,1
Cd	1,5	2,1	3,3
Co	1,4	2,2	3,1
Cr	- ^a	- ^a	- ^a
Cu	1,1	1,1	1,1
Fe	- ^a	- ^a	2,9
Hg	- ^a	- ^a	- ^a
K	1,2	1,3	1,1
Mg	1,4	2,0	1,4
Mn	1,1	2,1	2,6
Na	1,3	1,1	0,9
Ni	1,4	2,0	2,8
Pb	1,0	0,9	1,0
S	0,8	0,8	0,8
Zn	1,4	2,2	2,9
Alkalinitet mg/L	- ^b	0,8	0,8
DOC mg/L	1,2	0,9	<0,62
Fluorid	- ^a	- ^a	- ^a
Klorid	3,0	47	>115
Sulfat	0,9	0,8	0,7

^aBeräkning av kvot ej möjlig eftersom någon eller samtliga halter understeg Analyticas rapporteringsgräns.

^bEj analyserat pga. för liten provmängd.

Ett jordprov från samma provgrop (Tö2:0-30) lakades även med skakttest med vatten respektive CaCl₂ (tabell 17). Skillnaden mellan utlakade halter från dessa skakförsök då lakvätskan bestod av vatten respektive CaCl₂ överensstämde väl med de resultat som erhöles från perkolationstestet. Vid L/S=2, då lakvattnet innehöll ca 30 gånger högre kloridhalt, lakades ämnena Ba, Cd, Co, Mg, Mn, Ni och Zn ut med 1,6-2,9 gånger högre halt. Vid ackumulerat L/S=10 var kloridkoncentrationen i försöken där kalciumklorid tillsatts lakvätskan >117 gånger högre än i försöken med destvatten. I dessa lakvatten var halten av ovan uppräknade katjoner ca 1,8-3,7 gånger högre.

För ämnena Cu, Hg, Pb och S erhöles lägre halter (ca 20-80%) i lakvattnet än i de försök där kalciumklorid tillsatts lakvätskan. För Na sågs ingen skillnad och för K var halten något större i försöken med kalciumklorid. Utlakade halter av Al, As, Cr och Fe var låga och i flera fall under kvantifieringsgränsen vilket gör svårt att genomföra en jämförelse. Resultaten antyder dock att lägre halter av Al, As, Cr och Fe lakas ut då lakvätskan består av kalciumklorid.

Tabell 17. Kvoten mellan utlakad halt då lakvätskan innehöll kalciumklorid respektive destillerat vatten. Kvoterna är beräknade från bestämda medelvärden från lakresultat från skaktest (vid L/S=2 och L/S=2-10).

Tö 2:0-30 L/S	Skaktest (tvåstegslakning)	
	2	2-10
	Eluathalt (CaCl₂) / Eluathalt (destvatten)	
Al	- ^a	- ^a
As	<0,63	- ^a
Ba	2,5	2,6
Ca	2,9	4,8
Cd	2,6	3,7
Co	1,6	1,8
Cr	<0,35	<0,66
Cu	0,4	0,6
Fe	0,02	<0,03
Hg	0,3	<0,38
K	1,3	1,5
Mg	2,1	1,8
Mn	1,7	2,4
Na	1,0	1,0
Ni	2,0	2,7
Pb	0,2	0,4
S	0,6	0,7
Zn	1,9	2,5
Alkalinitet mg/L	0,6	0,6
DOC mg/L	0,8	- ^a
Fluorid	- ^a	- ^a
Klorid	33	>117
Sulfat	0,7	0,8

^aBeräkning av kvot ej möjlig eftersom någon eller samtliga halter understeg Analyticas rapporteringsgräns.

Skakförsök (tvåstegslakning) med CaCl₂ som lakvätska respektive destillerat vatten utfördes på ytterligare ett prov från Töllstorp, men från en annan provgrupp (Tö 3:0-20). Även här lakade vissa katjoner ut i högre halt då lakvätskan innehöll kalciumklorid. Kvoten mellan utlakad halt i försök med kalciumklorid respektive vatten som visas i tabell 18 är dock endast baserade på ett enskilt värde (dvs. ej medeltal av duplikat). Vid L/S=2, då lakvattnet innehöll >110 gånger högre kloridhalt än lakvattnet i försöket med destvatten, lakades Ba, Cd, K, Mg, Ni och Zn ut med 1,4-4,2 gånger högre halt. Vid L/S=2-10 var kloridkoncentrationen i försöken där kalciumklorid tillsatts lakvätskan >69 gånger högre än i försöken med destvatten. I dessa lakvatten var halten av ovan uppräknade katjoner ca 1,3-3,7 gånger högre. För Al, Co, Cu, Fe, Pb och S erhöles lägre halter i lakvattnet där kalciumklorid använts. För Na sågs ingen skillnad och för Mn erhöles både högre och lägre halter. Utlakade halter av As, Cr och Hg var låga och i flera fall under kvantifieringsgränsen vilket gör det svårt att genomföra jämförelsen. Resultaten antyder dock att lägre halter av dessa ämnen lakas ut då lakvätskan består av kalciumklorid.

Tabell 18. Kvoten mellan utlakad halt då lakvätskan innehöll kalciumklorid respektive destillerat vatten. Kvoterna är beräknade från lakresultat (singelprover) från skaktest (vid L/S=2 och L/S=2-10).

Tö 3:0-20	Skaktest (tvåstegslakning)	
	L/S	2
	Eluathalt (CaCl ₂) / Eluathalt (destvatten)	
Al	0,06	0,01
As	- ^a	<0,65
Ba	4,2	3,7
Ca	4,7	9,9
Cd	4,2	2,7
Co	0,7	0,18
Cr	<0,18	<0,15
Cu	0,42	0,12
Fe	0,08	0,01
Hg	<0,67	<0,13
K	1,4	1,3
Mg	3,3	2,7
Mn	1,9	0,58
Na	1,0	<0,44
Ni	1,9	1,5
Pb	0,21	0,01
S	0,61	0,94
Zn	3,1	2,2
Alkalinitet mg/L	0,39	0,71
DOC mg/L	0,44	0,26
Fluorid	- ^a	- ^a
Klorid	>110	>69
Sulfat	0,60	- ^a

^aBeräkning av kvot ej möjlig eftersom någon eller samtliga halter understeg Analyticas rapporteringsgräns.

Försök med kalciumklorid som lakvätska utfördes även på jordprov från Grimstorp, Gr 2:50 med perkolationstest och skaktest. Resultat från dessa försök (tabell 19) visar på samma trender som de ovan beskrivna för Töllstorp, men skillnaden var inte lika markant. En förklaring till detta är att prov Gr 2:50 var ett naturfuktigt material med mycket hög vattenkvot. Tillsatsen av kalciumklorid blev därför ej ”synlig” i perkolationstestet förrän vid L/S >2 (se resultat i tabell 9). I dessa lakvatten var halterna av Ba, Co, Mg, Mn och Zn 1,7-2,7 gånger högre då kalciumklorid tillsatts lakvätskan (Tabell 19). Utlakningen av ämnena Al, As, Cr, Cu och Fe minskade med ökad kloridhalt medan K, Na, och S verkade relativt oberoende av om CaCl₂ tillsatts lakvätskan eller ej. Halterna av Cd och Hg var för låga för att en jämförelse för dessa ämnen skulle kunna göras. Halterna av Pb var också låga men indikerade att lägre halter lakades ut med ökad klorid.

Tabell 19 Kvoten mellan utlakade halter då lakvätskan innehöll kalciumklorid respektive destillerat vatten. Kvoterna är beräknade från medelvärdena av eluathalterna (n=2).

Gr 2:50 CaCl ₂ /destvatten Ack. L/S	Perkolationsstest			Skaktest (enstegslakning)
	0,1	2	10	10
Al	1,1	0,5	0,4	1,1
As	1,2	1,0	0,4	1,3
Ba	1,0	1,2	2,7	1,2
Ca	0,9	1,0	2,4	1,3
Cd	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
Co	1,0	1,1	1,7	1,2
Cr	1,3	0,7	0,5	1,0
Cu	0,7	0,6	0,5	2,2
Fe	1,5	0,7	0,4	0,9
Hg	1,1	- ^a	- ^a	- ^a
K	1,0	1,0	1,8	1,1
Mg	1,0	1,0	2,4	1,2
Mn	1,0	1,1	2,5	1,3
Na	1,0	1,0	1,1	1,0
Ni	1,0	1,1	0,9	1,3
Pb	1,0	<0,9	<0,3	>1,6
S	1,0	1,0	0,7	1,0
Zn	0,9	1,0	1,8	1,2
Alkalinitet mg/L	2,1	0,9	0,6	- ^a
DOC mg/L	1,0	0,8	0,5	1,0
Fluorid	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
Klorid	1,2	18,3	>100	83,9
Sulfat	1,0	0,8	0,8	1,0

^aBeräkning av kvot ej möjlig eftersom någon eller samtliga halter understeg Analyticas rapporteringsgräns.

Skaktestet som utfördes som enstegslakning vid L/S=10 gav 1,2-1,3 gånger högre halterna av As, Ba, Co, Mg, Mn, Ni och Zn då kalciumklorid tillsattes lakvätskan (tabell 19). Till skillnad från perkolationsstestet utfört på samma jord (och även skakförsöken med jord från Töllstorp) var halten av Cu markant högre i lakvattnet från enstegslakningen med kalciumklorid jämfört med försök med destillerat vatten (2,2 gånger). Detta kan bero på en heterogen spridning av Cu trots provberedning av materialet. Standardavvikelsen beräknad från de två försöken med CaCl₂ var hela 62% medan de två lakförsöken med vatten bara hade en standardavvikelse på 6%. Utlakningen av ämnena Al, Cr, Fe, K, Na, och S verkade oberoende av om CaCl₂ tillsatts lakvätskan eller ej. Halterna av utlakad Cd och Pb var låga eller under kvantifieringsgränsen. För bly verkar dock högre halter erhållas med CaCl₂.

Sammanfattningsvis, då kalciumklorid användes som lakvätska erhöles högre halter (mellan 1,1 och 4,2 ggr) av Ba, Cd, K, Mg, Ni, och Zn i lakvattnet från samtliga undersökta jordmaterial. För två av de tre studerade jordmaterialen ökade även halterna av Co och Mn för system med kalciumklorid som lakvätska. Omvänt förhållande rådde för Cu, Pb och S. Utlakade halter av dessa ämnen minskade generellt sett då kalciumklorid tillsattes lakvätskan. En jämförelse av halter av Al, As,

Hg, Cr och Fe mellan de olika försöken var svår på grund av för låga halter i lakvattnet.

5.1.3 Variation mellan olika tester

För tre av jordproverna (Tö 2:0-20, Tö 3:0-20 och Gr 2:50) utfördes lakförsök med samtliga lakmetoder för att skapa ett underlag till jämförelsen av de olika metoderna. Från detta underlag har vi gjort en uppskattning av hur stora skillnader i lakbarheten det kan vara beroende på vilken testmetod man väljer för att studera utlakning.

Perkolation med återcirkulation vs skaktest

För att resultaten från två olika tester skall kunna vara jämförbara med varandra måste testen vara likartat utformade och uttaget av lakvatten till eluathaltsanalysen bör ske vid samma L/S-kvot. Skaktestet då det utförs som enstegslakning och perkolationstestet med återcirkulation är så kallade statistiska laktester där resultatet syftar till att spegla jämviktskoncentrationen av lakbara ämnen vid en fix L/S-kvot. De jordprover som lakats med dessa två tester, vid samma L/S-kvot, är därför direkt jämförbara med varandra.

I figur 8a jämförs eluathalten av enskilda ämnen i lakvatten från perkolationsförsök med återcirkulation med lakvattnet från skakförsök för följande prover:

- Tö 2:0-30 lakning m. H₂O vid L/S=2 *perk. m. återcirk.:skaktest* (figur 8a)
- Tö 3:0-20 lakning m. H₂O vid L/S=2 *perk. m. återcirk.:skaktest* (figur 8a)

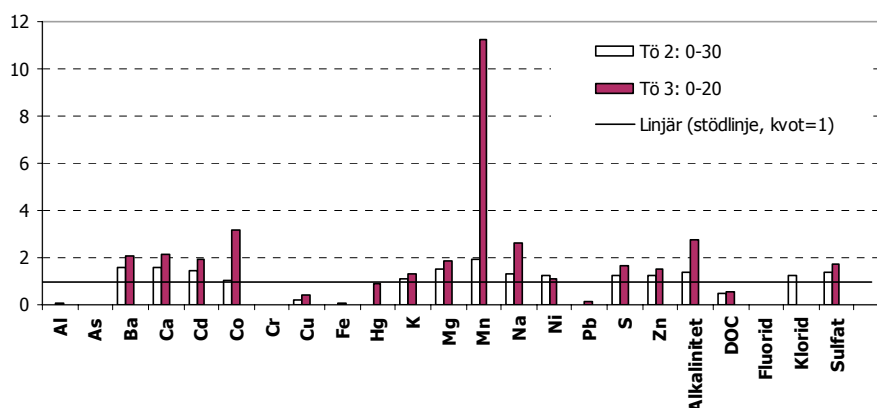
Resultaten från de båda laktesterna på jordprover från Töllstorp visade på stor samstämmighet mellan proven. För både Tö 2:0-30 och Tö 3:0-20 lakade samma grupp av ämnen ut i högre halter vid perkolationstestet med återcirkulation jämfört med skaktestet. Dessa ämnen var Ba, Ca, Cd, Co, K, Mg, Mn, Na, Ni, S och Zn. För Tö 2:0-30 var eluathalterna för ovan uppräknade ämnen ca 1,1-1,6 gånger högre i perkolationstestet med återcirkulation än i skaktestet (med undantag för halten av Mn som var nästan dubbelt så hög). För provet Tö 3:0-20 var halterna ännu något högre; från ca 1,3-3 gånger högre i perkolationstestet med återcirkulation jämfört med skaktestet. För Mn var halten dock mer än 11 gånger så hög. Halten av sulfat samt lakvattnets alkalinitet var också högre för båda proverna i perkolationstestet med återcirkulation jämfört med skaktestet.

De ämnen som återfanns i lägre halter i lakvattnet från perkolationstestet med återcirkulation var Al, Cu och Pb. Detta gällde för lakvatten från Tö 2:0-30 såväl som Tö 3:0-20. För båda proverna var halten DOC ca 50 % lägre i lakvattnet från perkolationstestet, vilket delvis kan förklara de lägre halterna av Cu och Pb eftersom dessa ämnen gärna associerar till organiskt material. Samma förklaringsmodell kan dock inte tillämpas på aluminium som istället med fördel återfinns på lerpartiklar. Troligtvis innehöll lakvattnet från perkolationstestet med återcirkulation en något högre andel partiklar än lakvattnet från skaktestet. Detta på grund av att lakvattnet från skakförsöket filterades genom ett 0,45µm filter, medan så kallad "självfiltrering" utnyttjades i återcirkulationsförsöket. Eventuellt föreligger det ett

samband mellan andel partiklar i lakvattnet och den ökade halten av utlakade ämnen, men detta kan inte bevisas eftersom lakvattnet ej analyserats med avseende på tex. turbiditet. En ökad mängd partiklar i lakvatten från återcirkulationstestet stämmer ej heller överens med den lägre halten Al i detta försök jämfört med filtrerade skakförsök, såvida inte en högre andel lerpartiklar skavts av under skaktestet och följt med den filtrerade vätskan.

Halterna av As, Cr, Hg, Fe, fluorid och klorid var i de flesta fall under kvantifieringsgränsen och att jämföra utlakade halter av dessa ämnen med de olika metoderna är därför vanskligt.

Perk. m. återcirk./skakförsök



Figur 8a. Jämförelse mellan eluathalter erhållna med perkolationstest med återcirkulation respektive skaktest. Staplarna visar kvoten mellan eluathalten från perkolationsförsök med återcirkulation (medelvärden från två replikat) och eluathalten från skakförsök vid L/S=2 (medelvärden från två replikat med undantag för skakförsök på Tö 3:0-20 där endast ett replikat utfördes).

Perkolationstest vs skaktest

Det studerade perkolationstestet är ett dynamiskt laktest som syftar till att ge en bild av hur lakbarheten förändras med ökad L/S-kvot. Det går därför inte att rakt av göra en jämförelse av t.ex. erhållna eluathalter vid L/S=2 med uppmätta eluathalter från skaktestet vid L/S=2 eftersom uttag redan skett i perkolationstestet. Om man vill jämföra resultat från ett statistiskt test med ett dynamiskt test är det därför bättre att titta på den ackumulerade utlakade mängden av ämnet då testmetoderna har samma kumulativa L/S-kvot.

En jämförelse av ackumulerade utlakade mängder av enskilda ämnen har därför gjorts för följande prover och laktester:

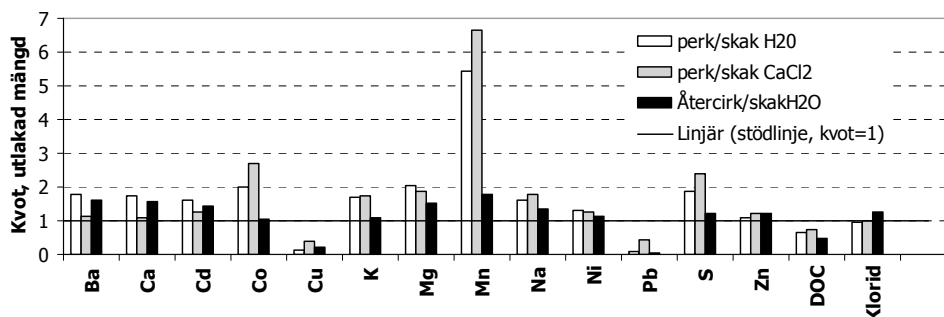
- Tö 2:0-30 lakning m. H₂O vid L/S=2 *perkolationstest:skaktest: (figur 8b)*
- Tö 2:0-30 lakning m. CaCl₂ vid L/S=2 *perkolationstest:skaktest (figur 8b)*
- Tö 2:0-30 lakning m. H₂O vid L/S=10 *perkolationstest:skaktest (figur 8c)*
- Tö 2:0-30 lakning m. CaCl₂ vid L/S=10 *perkolationstest:skaktest (figur 8c)*

- Tö 3:0-20 lakning m. CaCl₂ vid L/S=2 *perkolationstest:skaktest (figur 8d)*
- Tö 3:0-20 lakning m. CaCl₂ vid L/S=10 *perkolationstest:skaktest (figur 8e)*

- Gr 2:50 lakning m. H₂O vid L/S=2 *perk. m. återcirk perkolationstest (figur 8f)*
- Gr 2:50 lakning m. H₂O vid L/S=10 *perkolationstest:skaktest (figur 8g)*
- Gr 2:50 lakning m. CaCl₂ vid L/S=10 *perkolationstest:skaktest (figur 8g)*

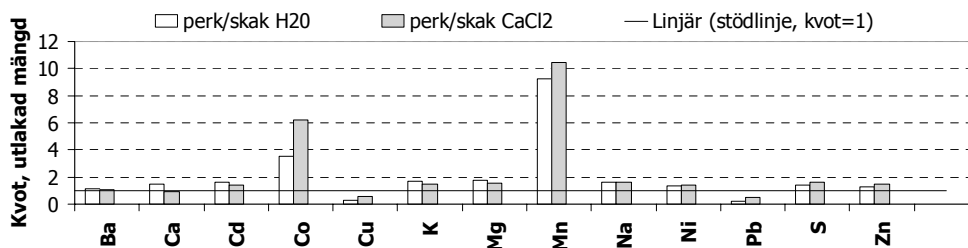
I figur 8b-e visas kvoten mellan den utlakade ackumulerade mängden i utförda perkolationstester och skaktester vid samma L/S för prover från Töllstorp. I figur 8b visas även, som en jämförelse, kvoten mellan perkolation med återcirkulation och skaktest för Tö2:0-30.

Jämförelse testresultat Tö 2: 0-30, L/S 2

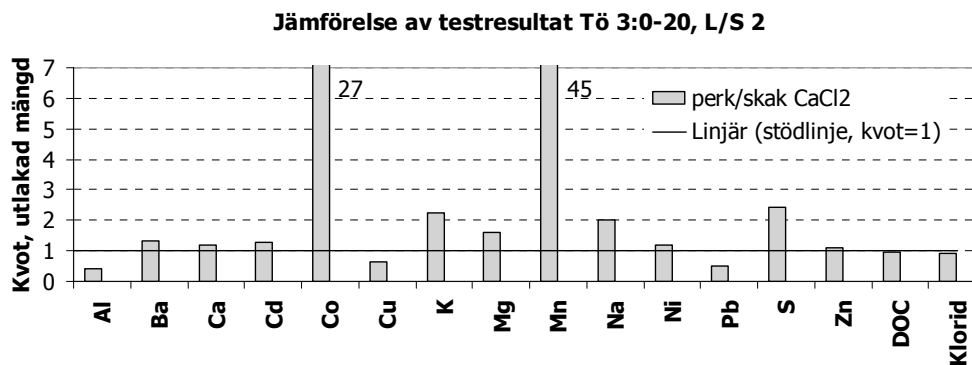


Figur 8b. Kvoter för ack. utlakning mellan olika tester vid L/S 2 för Tö 2:0-30. För värden under 1 är utlakningen med skaktest högre än perkolationstest. För ämnen med resultat under detektionsgräns har ingen kvot räknats ut. Som jämförelse visas även kvoten mellan perkolationstestet med återcirkulation och skaktestet för Tö 2:0-30 (tidigare presenterad i figur 8a).

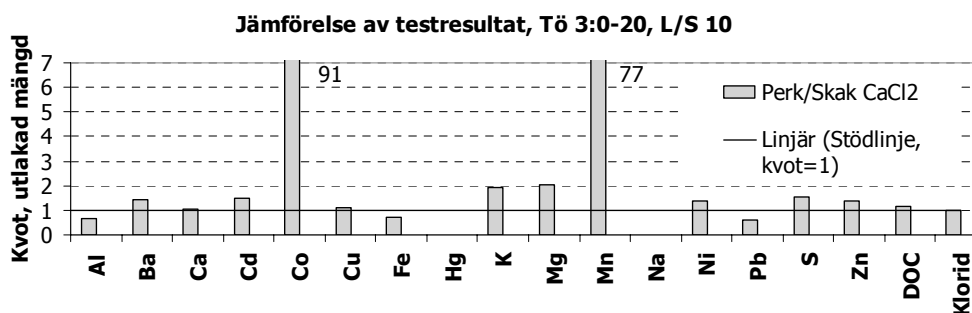
Jämförelse testresultat Tö 2: 0-30, L/S 10



Figur 8c. Kvoter för utlakade ackumulerade mängder mellan perkolationstest och skaktest vid L/S 10 för Tö 2:0-30. Vid kvoter under 1 är utlakningen från skaktest högre än perkolationstesterna.



Figur 8d. Kvoten för ack. utlakning mellan perkolationstest och skakttest vid L/S 2 för Tö 3:0-20. För värden under 1 är utlakningen med skakttest högre än perkolationstest. Vid resultat under detektionsgräns har ingen kvot räknats ut. Kvoterna för Co och Mn var betydligt högre än övriga ämnens (större än den visade y-axelns maxvärde) och kvotens värde är utskrivet jämte respektive stapel.



Figur 8e. Kvoter för ackumulerad utlakning mellan perkolationstest och skakttest vid L/S 10 för Tö 3:0-20. För värden under 1 är utlakningen med skakttest högre än perkolationstest. Vid resultat under detektionsgräns har ingen kvot räknats ut. Kvoterna för Co och Mn var betydligt högre än övriga ämnens (större än den visade y-axelns maxvärde) och kvotens värde är utskrivet jämte respektive stapel.

Högre halter av Ba, Ca, Cd, Co, K, Mg, Mn, Na, Ni, S och Zn lakades ut vid samtliga L/S med perkolationstest jämfört med skaktestet. Detta gällde för båda jordproverna. För Co och Mn var skillnaden betydligt större än för övriga ämnen. Den ackumulerade utlakade mängden av Co och Mn från perkolationstestet (med kalciumklorid) var 27 respektive 45 gånger högre än från skaktestet vid L/S 2. Vid L/S 10 hade kvoten mellan utlakade mängder stigit till 91 respektive 77. För övriga ämnen översteg aldrig kvoten 2,5.

Cu, Pb och DOC förekom i lägre halter i lakvatten från perkulationsförsök jämfört med skakförsök. Som tidigare diskuterats är både koppar och bly ämnen som med fördel associerar till organiskt material och de lägre halterna kan därför delvis förklaras med den lägre halten DOC i dessa prover. En möjlig förklaring är att mer DOC kan ”skaka loss” under ett skaktest än då provet genomströmmas i en kolonn.

Svårare är det hitta en orsak till de högre utlakade halterna av övriga ämnen. Lakvattnet från både skak- och perkulationsförsök filterades genom 0,45 µm

cellulosafilter. Det är föga troligt att det filtrerade perkolationslakvattnet innehöll en högre andel partiklar i förhållande till skaktestlakvatten. Det omvända vore snarare mer troligt då tidigare studier av skak- och perkolationstester för organiska ämnen har visat att skakförsök kan genererar fler finpartiklar då jordaggregat skavs och nöts mot varandra (tex. Bergendahl et al. 2005). Eftersom turbiditetsmätningar saknas går det ej att uppskatta om det förelåg någon skillnad i andel partiklar i de filtrerade lakvattnen. De högre halterna i perkolationstestet kan således inte förklaras med en högre andel partiklar i perkolationslakvattnet.

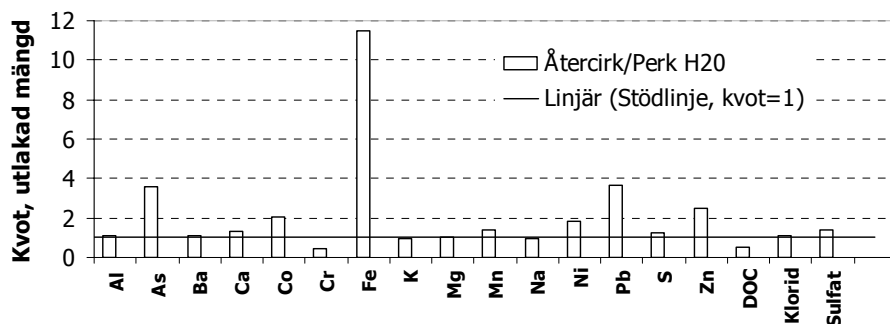
Skaktester skapar i allmänhet bättre förutsättningar för inställandet av kemisk jämvikt av oorganiska ämnen mellan den fasta och den lösta fasen. Detta eftersom skaktestet borgar för en god omrörning av lakvätskan där den fasta fasens alla ytor kommer i kontakt med vätskan. Vid $L/S=2$ är skaktestets hydrauliska uppehållstid, HRT, (eng: *hydraulic retention time*) 6 timmar. Katjonbytesreaktioner (elektrostatiska interaktioner) och adsorptionsprocesser är relativt snabba reaktioner och bör vara ganska nära jämvikt efter 6 timmar. Utgående lakvatten från en väl genomströmmad packad kolonn, med längre HRT borde dock också ha relativt goda förutsättningar att nå jämviktshalter. Perkolationstestet hade en genomsnittlig HRT på ca 12-26 h (uppskattat HRT baseras på ett medelflöde på 15 ml h^{-1} och en porositet på ca 0,3-0,6).

En process som påverkas av tiden är vittring. I Töllstorp fanns slaggprodukter i de förorenade skikten och vittringen av dessa borde vara beroende av HRT. Högre halter av Ca och Mg i perkolationsförsöken jämfört med skaktesten skulle kunna bero på att vittringsprocessen får längre tid på sig i dessa tester. Indirekt kan mer Ca och Mg i lakvattnet leda till högre utlakade halter av t ex Cd på grund av jonbyteskonkurrens. I figur 8b finns även kvoten mellan perkolationstestet med återcirkulation och skakförsöket med. Uppehållstiden för vattnet i återcirkulationsförsöket var 7 dygn, dvs. ca 7 gånger så lång tid som i perkolationsförsöket. Trots att uppehållstiden är betydligt längre är de beräknade kvoterna mellan detta test med skaktestet lägre än kvoterna beräknade för perkolation/skak, vilket talar emot ovanstående resonemang. Dessutom filtrerades inte lakvattnet från perkolationstestet med återcirkulation varför de borde innehålla mer partiklar och därmed högre utlakad ackumulerad mängd av vissa ämnen än det filtrerade lakvattnet från perkolationstestet. Någon orsak till de lite högre utlakade ackumulerade mängderna med perkolationstestet jämfört med perkolation med återcirkulation för Tö2:0-30 kan därför inte ges inom ramen för den här utvärderingen.

I figur 8f och 8g visas kvoter av utlakade ackumulerade mängder från försök med prov från Grimstorp. I figur 8f visas kvoten mellan perkolationstest med återcirkulation och perkolationstest för Gr2:50. Här var den utlakade mängden större med perkolation med återcirkulation jämfört med enbart perkolation för de flesta ämnen. Särskilt större mängder av As, Fe och Pb återfanns i perkolationstestet med återcirkulation (3,8-11 gånger högre). De högre halterna skulle delvis kunna förklaras med den längre uppehållstiden som skapas med återcirkulationen i kombination med att lakvattnet från detta test inte filtrerades. Det bör även noteras att Pb lakades ut i en större mängd då lakvattnet återcirkulerades trots att den utlakade mängden DOC var lägre i detta försök jämfört med enbart perkolation. Den längre

uppehållstiden i försöket med återcirkulation skulle kunna ha medfört lägre syrehalt i vattnet och därmed lägre redoxpotential, vilket i sin tur skulle kunna ha en positiv effekt på upplösning av järnhydroxider. Med ökad upplösning av järn följer ofta även ökad utlakning av arsenik.

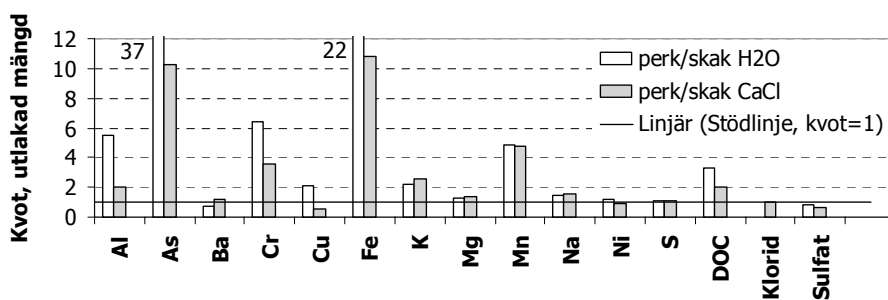
Jämförelse av testresultat Gr 2:50, L/S 2



Figur 8f. Kvoter för utlakade mängder mellan perkolationstest och perkolationstest med återcirk. vid Gr 2:50 vid L/S 2. Ingen skaktest kunde utföras vid L/S 2. Vid kvoter under 1 är utlakningen från återcirkulation högre än perkolationstesterna. OBS att återcirk. endast utförts med H₂O som lakvätska.

För Gr 2:50, vid L/S 10 jämförs perkolationstest och skaktest med H₂O respektive CaCl₂ som lakvätska (figur 8g). Återigen erhöles större ackumulerade utlakade mängder för flertalet av de studerade ämnena då utlakningen skedde med perkolationstest jämfört med skaktest. Särskilt höga kvoter erhöles för As (37 ggr högre) och Fe (22 ggr högre).

Jämförelse av testresultat Gr 2:50, L/S 10



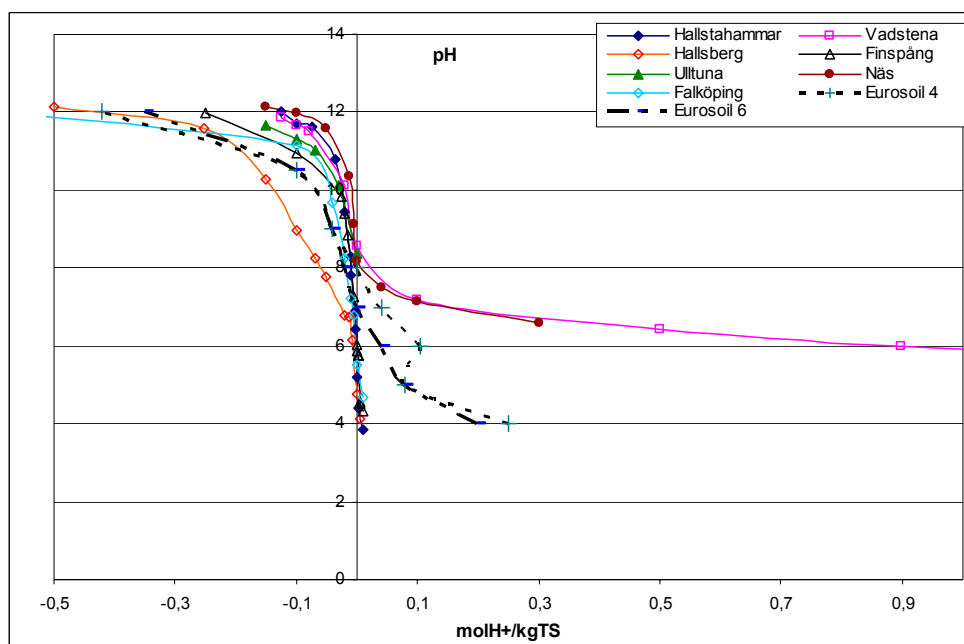
Figur 8g. Kvoter för ack. utlakning mellan perkolationstest och skaktest vid L/S 10 för Gr 2:50. För värden under 1 är utlakningen från skaktest högre än perkolationstest. Vid ämnen med resultat under detektionsgräns har ingen kvot räknats ut.

5.2 PH-statisk lakning och ANC/BNC

ANC/BNC testet ger ett mått på hur pH i ett material ändras när det utsätts för syra eller bas. Resultatet för ANC/BNC redovisas för två jordar från Töllstorp i figur 6a och två jordar från Grimstorp i figur 6b (se avsnitt 4.4).

I ett pågående SGI-projekt har man testat några svenska naturliga moräner med avseende på ANC/BNC. I projektet har man använt sig av en annan, men likvärdig, pH-statisk metod med initialt tillförsel av syra eller bas istället för kontinuerlig kontroll. För att veta hur mycket syra eller bas som ska tillsättas bestäms materialets neutralisationskapacitet genom en titrerkurva. Metoden använder vändskakning istället för blandning med omrörare (Wik et al., 2007).

I figur 9 visas resultat från det ovan beskrivna projektet. För hälften av de undersökta jordarna behövdes det endast mycket lite syra ($< 0,1 \text{ mol H}^+$) för att pH skulle sjunka till pH 4 (Wik et al., 2007).



Figur 9 ANC/BNC mätt på naturliga jordar, främst moräner samt eurosoil, europastandardiserade jordar(Wik et al., 2007)

I de här studerade jordproverna var jordens buffringskapacitet överlag låg. Gr 2:50 hade lägst ursprungspH men bättre buffringskapacitet än moräner i Gr 1:70-90 (se tabell 20). I skaktestet med kalciumklorid hade Gr 1:70-90 ett pH-värde på 4,6 vid L/S 10 medan det fick tillsättas syra för att få ner pH till pH 6 vid de pH-statiska testerna. Detta visar på att materialet är mycket känsligt för syra och pH-skillnaden kan bero på variationer i provet eller möjligen att syradiskat laboriematerial kan ha påverkat materialet.

Det finns inte så mycket data, för ANC/BNC i fasta material, att tillgå i litteraturen. I CEN-standarden (European committee for standardization) för ANC-test (CEN/TC 292, N552) ges dock exempel på syra- och basneutraliserande kapaciteter för avfall, jord, sediment och byggmaterial. För dessa material tillsattes ca 0,2-4 mol H⁺/kg TS för att nå pH 4. I jämförelse med dessa material så har de här studerade jordmaterialen relativt låg buffertkapacitet (tabell 20).

Tabell 20 Mängd tillsatt syra för att sänka pH i materialet till pH 4 samt uppgifter om proven.

	Tö 2: 0-30	Tö 3: 0-20	Gr 1:70-90	Gr 2:50
Ursprungs-pH enl pH-stat	ca 7	ca 7	ca 6,5	ca 5,5
pH i skaktest	6,4	6,5	4,6*	5,4
Beskrivning av jord	Fyllnadsjord	Fyllnadsjord	Morän under svart lager, svag kreo-sotlukt	Brunt ler/siltskikt
mol H⁺/kg TS för att sänka jorden till pH 4	0,97	0,09	0,012	0,12

* Skaktest med CaCl₂

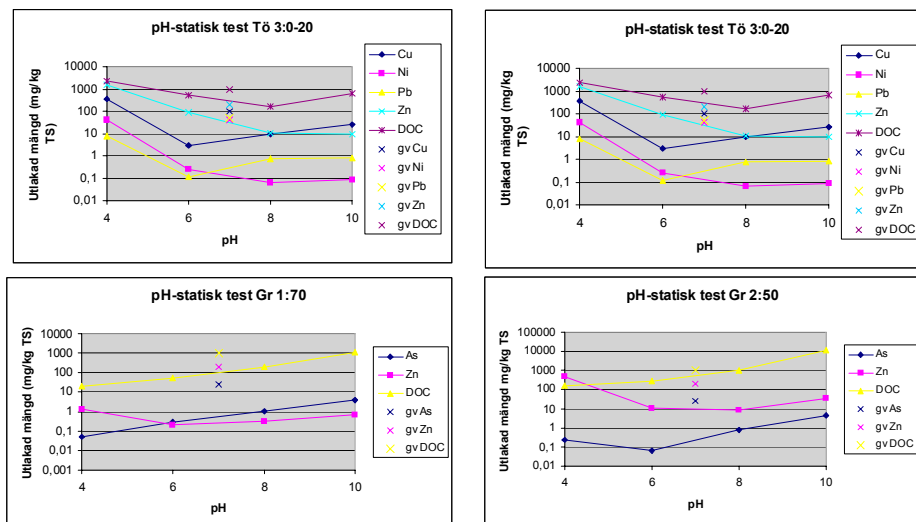
Tabell 21 Totalhalter för ämnen som visas i utlakningsdiagrammen i figur 10.

Ämne		Tö 2:30	Tö 3:0-20	Gr 1:70-90	Gr 2:50
As	mg kg ⁻¹ TS			14,1	72
Cu	mg kg ⁻¹ TS	40 500	2510		
Ni	mg kg ⁻¹ TS	217	12,3		
Pb	mg kg ⁻¹ TS	2260	240		
Zn	mg kg ⁻¹ TS	32 300	2510	37,8	3000
TOC	% av TS	10,6	0,4	0,6	18,2

Resultat från samtliga ämnen från de pH-statiska testerna redovisas i tabell 15 a och 15b. I figur 10 redovisas utlakningen av några utvalda ämnen som funktion av pH. Som bakgrundsdata redovisas även totalhalterna för respektive ämne i ursprungsproverna i tabell 21. I graferna syns tydligt att metaller som är positivt laddade vid neutralt och surt pH, dvs. koppar, nickel, bly och zink, har högst utlakning vid pH 4 och lägst utlakning vid neutrala pH. Fastläggning i form av sorption styrs till hög grad av pH. Det innebär att positivt laddade joner adsorberas bäst vid höga pH då ytorna är negativt laddade av hydroxidjoner medan fastläggning är låg vid låga pH när ytorna är positivt laddade av vätejoner. Notera att y-skalan är logaritmisk vilket innebär att för t.ex. Zn är utlakningen 1000 ggr högre vid pH 4 i Tö 2:30 jämfört med utlakningen vid pH 8. För material som Gr 1:70-90 som knappt har någon buffringkapacitet är utlakningen vid pH 4 ett scenario som inte är långt borta.

I figur 10 syns också att arsenik, som oftast förekommer som negativt laddade joner vid neutral och sura pH, har störst utlakning vid mer basiska förhållande,

pH 10. Det är dock allmänt känt att för arsenik har fastläggningen till järnoxid eller manganoxid större inverkan på utlakning än pH. Även DOC lakar mer vid höga pH.



Figur 10 Utlakad mängd för utvalda ämnen vid olika pH. Som jämförelse har gränsvärdet (gv) för deponi av farligt avfall för respektive ämne markerats.

5.3 Utlakning av organiska ämnen (PAH)

Det finns idag inga standardmetoder att tillgå för att uppskatta utlakning av organiska ämnen från fasta material. I den här studien har vi testat två metoder; en perkolationstest med återcirkulation och ett skaktest. Resultaten från båda metoderna antas representera fördelningen av ett ämne mellan den fasta fasen och lakvatten vid jämvikt vid en fix L/S-kvot. För att möjliggöra en jämförelse av metoderna utfördes lakningar på proverna Gr 2:0-15 och Gr 3:50-70 vid samma L/S-kvot i skaktestet som vid lakningen med ER-H-metoden.

För Gr 2:0-15 och Gr 3:50-70 användes lufttorkade jordprover eftersom det ej var möjligt att sikta de fuktiga jordmaterialen. Siktningen gör att provet blir mer homogent vilket förenklar jämförelsen mellan de två testmetoderna. Å andra sidan kan lufttorkningen orsakat en förändring av sammansättningen av PAH i provet då PAH:er med låg molekylvikt är mer lättflyktiga än högmolekylära PAH:er. Denna eventuella påverkan har inte behandlats i utvärderingen.

Nedan följer en uppskattning av testernas repeterbarhet och hur utlakade halter och uppskattade K_{OC} -värden kan skilja sig för ett jordmaterial beroende på vilken test som tillämpas.

5.3.1 Metodernas repeterbarhet

I den här utvärderingen och en tidigare utvärdering av ER-H-metoden av Hansen et al. (2004) uppskattades repeterbarheten utifrån den relativa standardavvikelsen. Utvärderingen av ER-H-metoden utförd av Hansen et al. (2004) visade att repeterbarheten låg mellan 21 och 59% (uppskattat från triplikat). I studien av Hansen et al. (2004) verkade ett samband föreligga mellan den uppskattade standardavvikelsen och storleken på PAH:erna; sämre repeterbarhet erhöles för PAH:er med

fler ringar i sin struktur jämfört med ämnen med färre ringar. Repeterbarheten i denna studie (uppskattad från triplikat) visar på ett något bättre resultat än det tidigare rapporterade; 32-48% för Gr 2:0-15 och 0-34% för Gr 3:50-70. I lakförsöken med ER-H-metoden med jord från Grimstorp kunde inte någon trend påvisas mellan ringstorlek och repeterbarhet.

Skaktestet uppvisade en lika god eller bättre repeterbarhet för lakning av PAH i jämförelse med ER-H-metoden. För Gr 2:0-15 erhöles standardavvikelser på 9-50% medan resultaten från lakförsök med Gr 3:50-70 gav upphov till standardavvikelser på 0-26%. Skakförsöken utfördes dock bara i duplikat (standardavvikelsen alltså beräknad från n=2) och varje prov var ett samlingsprov från två parallella utförda lakningar vilket kan ha påverkat repeterbarheten. I den tekniska specifikationen ISO/TS 21268-1 anges det att ingen validering av testet genomförts ännu eftersom det inte finns data att tillgå vad gäller metodens robusthet, repeterbarhet eller reproducerbarhet. I andra studier av utlakning av PAH från jord där skakförsök har tillämpats har repeterbarheten uppskattats ligga mellan 10-43% (uppskattat från n=3) (Hansen et al. 2004).

Sammanfattningsvis visar den här studien, tillsammans med tidigare rapporterade uppgifter om metodernas repeterbarhet, att både ER-H-metoden och enstegsskaktest är metoder som har tillräckligt god repeterbarhet för att kunna tillämpas vid uppskattning av utlakning av PAH från förorenad jord.

5.3.2 Utlakade halter

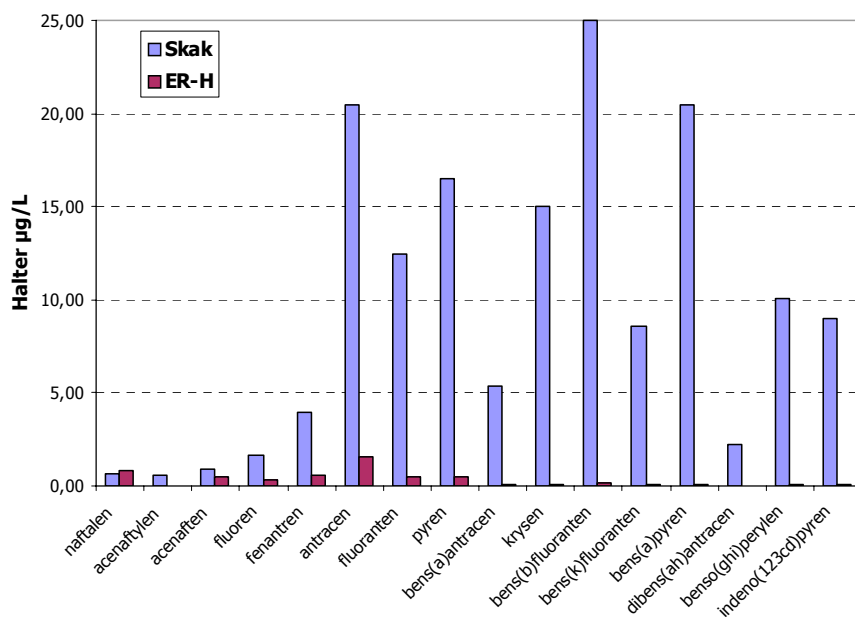
För samtliga analyserade PAH med undantag för naftalen erhöles högre halter med skaktestet jämfört med ER-H-metoden (Tabell 10 och 11). I lakvattnet från skakförsök med jordprov Gr 2:0-15 uppmättes ca 190 gånger högre halter av högmolekylära eller så kallade tunga¹ PAH jämfört med i lakvatten från ER-H-metoden. Halten av medeltunga² PAH var dock endast ca 15 gånger högre i lakvatten från skaktestet jämfört med ER-H-metoden medan halten lätta³ PAH i de båda försöken var ungefär likvärdig. För Gr 3:50-70 var skillnaden i utlakbara halter med de två olika testerna inte lika markant; halten tunga PAH var i lakvatten från skaktestet ca 40 gånger högre än från ER-H-metoden medan halten av medeltunga PAH var endast 4 gånger högre. För lätta PAH var halterna i de båda försöken likvärdiga. I figur 11 visas uppmätta halter av PAH i lakvattnet från kolonntestet (ER-H-metoden) och enstegsskakförsöket, beräknat som medelvärdet från de analyserade replikaten.

¹ Tunga PAH=bens(a)antracen, krysen, bens(b)fluoranten, bens(k)fluoranten, bens(a)pyren, gi-bens(ah)antracen, benso(ghi)perylene, indeno(123cd)pyren

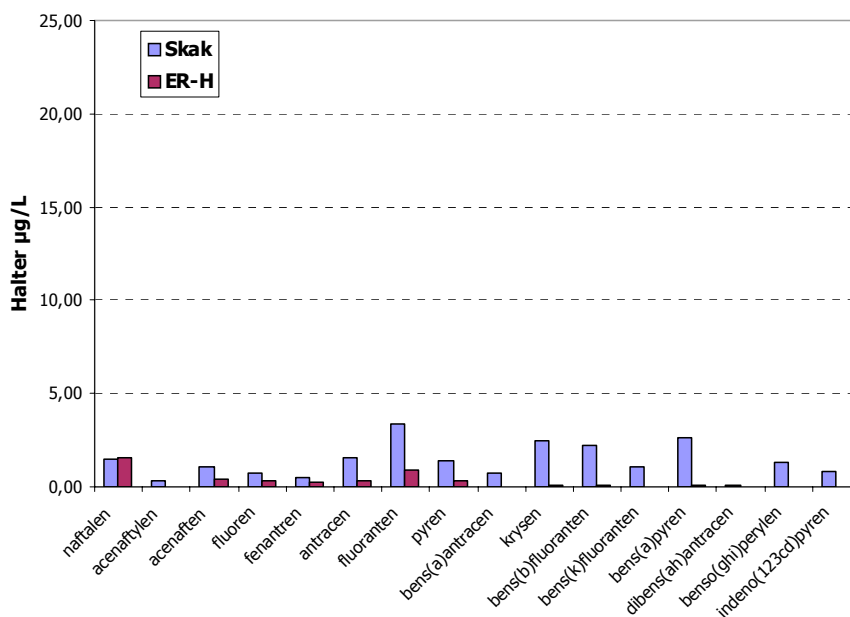
² Medeltunga PAH=fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, pyren

³ Lätta PAH=naftalen, acenaftylen, acenaften

Gr 2:0-15

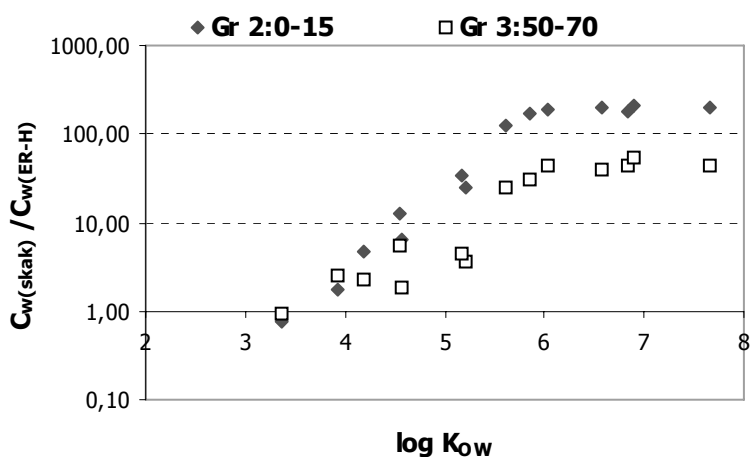


Gr 3:50-70



Figur 11 Utlakade halter (medelvärde) av PAH från jordprover lakade med ER-H-metoden (n=3) och skaktest (n=2).

Skillnaden i utlakade halter mellan de två lakmetoderna ökade med molekylvikten av de studerade ämnena vilket kan utläsas från figur 12 där kvoten mellan de utlakade medelhalterna med skakmetoden och med ER-H-metoden plottats mot respektive ämnes $\log K_{OW}$ -värde (K_{OW} är fördelningskoefficienten för ämnets fördelning mellan oktanol och vatten, dvs. ett mått på ämnets hydrofobicitet).



Figur 12 Kvoten mellan utlakad medelhalt med enstegs-skakmetoden och med ER-H-metoden versus $\log K_{OW}$ för de studerade ämnena.

Grafen i figur 12 visar att utlakning med skaktestet generellt sett ger högre halter i lakvattnet än om samma material utsätts för lakning med ER-H-metoden. Enda undantaget är utlakningen av naftalen, som är den PAH som har störst vattenlöslighet av de studerade ämnena. För detta ämne erhöles en något högre halt i lakvattnet från ER-H-metoden för båda de studerade jordproverna. I figur 12 syns tydligt ett samband mellan utlakade halter och ämnens hydrofobicitet; skillnaden mellan utlakade halter med skaktestet och med ER-H metoden blir allt större då de studerade ämnens hydrofobicitet stiger (dvs. ju mer vattenskyende ämnena är). En trolig förklaring till detta fenomen är att PAH-er transporterades med hjälp av kolloider och små partiklar i lakvattnet samt att lakvattnen från skaktestet innehöll en högre andel finpartikulärt material i förhållande till lakvatten genererade från den självfiltrerande återcirkulationsmetoden (ER-H-metoden). I figur 12 kan man också utläsa att för ämnen som har $\log K_{OW}$ -värden >6 uppnås ett maximum i skillnaden mellan de två metoderna; det vill säga skillnaden mellan utlakad halt med skakmetoden och ER-H-metoden ökar bara med ämnens hydrofobicitet upp till en viss gräns.

Då kolloider finns närvarande i vattenmättade jordmaterial finns det tre faser som alla påverkar transporten och utlakningen av föroreningar; en mobil vätskefas, en mobil kolloidfas och en immobil fast fas. Eftersom kolloider har en stor ytareal i förhållande till sin volym har de också en relativt stor kapacitet att adsorbiera organiska föreningar vilket kan öka den skenbara lösligheten av framförallt hydrofoba föreningar (Sen och Khilar, 2006; Bergendahl, 2005). Kolloider kan bestå av alla

slags partiklar som finns i jordprovet dvs. både mineralpartiklar och partiklar av organiskt material (definitionen på en kolloid är att den håller sig svävande i en lösning). Kolloider kan därmed göra hydrofoba organiska ämnen mer mobila än väntat utifrån deras löslighet eftersom de kan transporteras med markvattnet sorberade till kolloider (de Jonge et al., 2004; Persson et al., 2007).

Turbiditetsmätningar direkt efter avslutat lakförsök på ofiltrerade vattenprover skulle kunna ge en uppskattning av den relativa förekomsten av partiklar i de olika lakvatten. Tyvärr utfördes turbiditetsmätningar på filtrerade prover (standard för oorganiska analyser) och därför kan inte en ökad partikelförekomst i skaktestet styrkas utifrån dessa mätresultat. För prov Gr 2:0-15 var det dock helt visuellt uppenbart att lakvattnet från skaktestet innehöll betydligt mer partiklar än lakvattnet från ER-H-metoden då skaktestet gav upphov till en svart grumlig vätska (efter centrifugering) medan lakvattnet från ER-H bestod av en klar lösning (figur 13). För Gr 3:50-70 var den visuella skillnaden mellan de båda metoderna inte lika uppenbar. Resultaten i figur 12 visar också att skillnaden mellan uppmätta PAH-halter med de båda metoderna var mindre för detta jordprov. Det var även stor skillnad på halten organiskt material mellan de två jordproverna. Gr 2:0-15 innehöll mer än 20% organiskt material och räknas därför som en organisk jord medan Gr 3:50-70 är en mineral jord med bara 1% organiskt kol. En stor andel av de kolloider och partiklar i lakvattnet från Gr 2:0-15 som ej gick att avskilja med centrifugering bestod därför troligtvis av organiskt material. Eftersom PAH:er med fördel associerar sig till organiskt material kan detta ha påverkat de uppmätta halterna i eluatet. Halterna av DOC i proverna från skaktestet och ER-H-metoden var dock likvärdiga för Gr 2:0-15. För prov Gr 3:50-70 erhöles något högre halter av DOC i lakvatten från skaktestet än från ER-H-metoden.

Hansen et al. (2004) rekommenderar att lakvattnet från ER-H-metoden inte filtreras före analys då metoden syftar till att uppskatta lakbarheten av såväl helt lösta föroreningar i vattenfasen så som föroreningar bundna till kolloider som transporteras med lakvattnet. Metodens återcirkulation är tänkt att fungera som en självfiltrering och testet skall på så vis bättre spegla en verklig fältsituation. I den föreslagna tekniska specifikationen av skaktestet (ISO/TS 21268-1) anges att supernatanten av lakvattnet skall centrifugeras för att avskilja partiklar. Som enda angivna orsaken till detta förfarande nämns upprätthållandet av god reproducerbarhet samt repeterbarhet. Enligt metodbeskrivningen kan två olika förslag på centrifugering väljas; centrifugering av eluatet i 30 min vid 20 000 g till 30 000 g eller centrifugering i 5 timmar vid 2000 g till 2500 g. Vad som ligger till grund för dessa valda tider och krafter specificeras ej. Vid centrifugeringen av lakvatten från de utförda skaktesterna av prov från Grimstorp tillämpade SGI:s miljölab den sistnämnda metoden; centrifugering i 5h vid 2000 g. Trots denna relativt långa centrifugeringstid innehöll supernatanten synliga partiklar i samtliga prover. Särskilt grumlig var eluatet från prov Gr 2:0-15 (figur 13).



Figur 13. I bägarna (bilden till vänster) syns lakvatten från skakförsök med Gr 2:0-15 efter centrifugering. Trots centrifugering i 5 h var supernatanten som en svart grumlig lösning. Till höger syns klart lakvatten i toppen av en ER-H-kolonn som återcirkulerats i 7 dygn genom samma provmaterial.

Eftersom hydrofoba organiska ämnen så som PAH kan transporteras med kolloider bör en riskbedömning rörande transport och mobilitet av dessa ämnen från förorenade områden förutom verkligt lösta halter även inkludera inverkan av kolloider på föroreningstransporten. Det är därför viktigt att den lakmetod som väljs på ett bra sätt simulerar andelen kolloider som skulle varit mobila i fält. Baserat på de här erhållna resultaten förefaller ER-H-metoden bäst beskriva verkligheten. Med ett skaktest riskerar man att överskatta de lakbara halterna av PAH och särskilt halterna av de mer hydrofoba ämnena.

5.3.3 Uppskattningar av K_{oc}

Fördelningskoefficienten, K_d , som beskriver hur ett ämne fördelar sig mellan den fasta fasen och lakvätskan efter ett utfört laktest uppskattas ofta från följande linjära samband:

$$K_d = \frac{C_S}{C_W} \quad (1)$$

där C_S och C_W är koncentrationen av PAH i jorden [$\mu\text{g kg}^{-1}$] respektive i vattnet [$\mu\text{g L}^{-1}$] vid jämvikt (efter avslutad lakning). Då en mycket liten andel av den initiala totalhalten av PAH lakar ut från jorden antas C_S vara lika med den initialt uppmätta koncentrationen. Värdet på K_d är således ett mått på jordens

sorptionsförmåga eller sorptionskapacitet och ger en bild av hur väl en jord kan hålla kvar föroreningar då den förorenade jorden kommer i kontakt med vatten.

Organiska föroreningar sorberas huvudsakligen till jordens organiska material och följande samband antas därför råda:

$$K_d = f_{OC} * K_{OC} \quad (2)$$

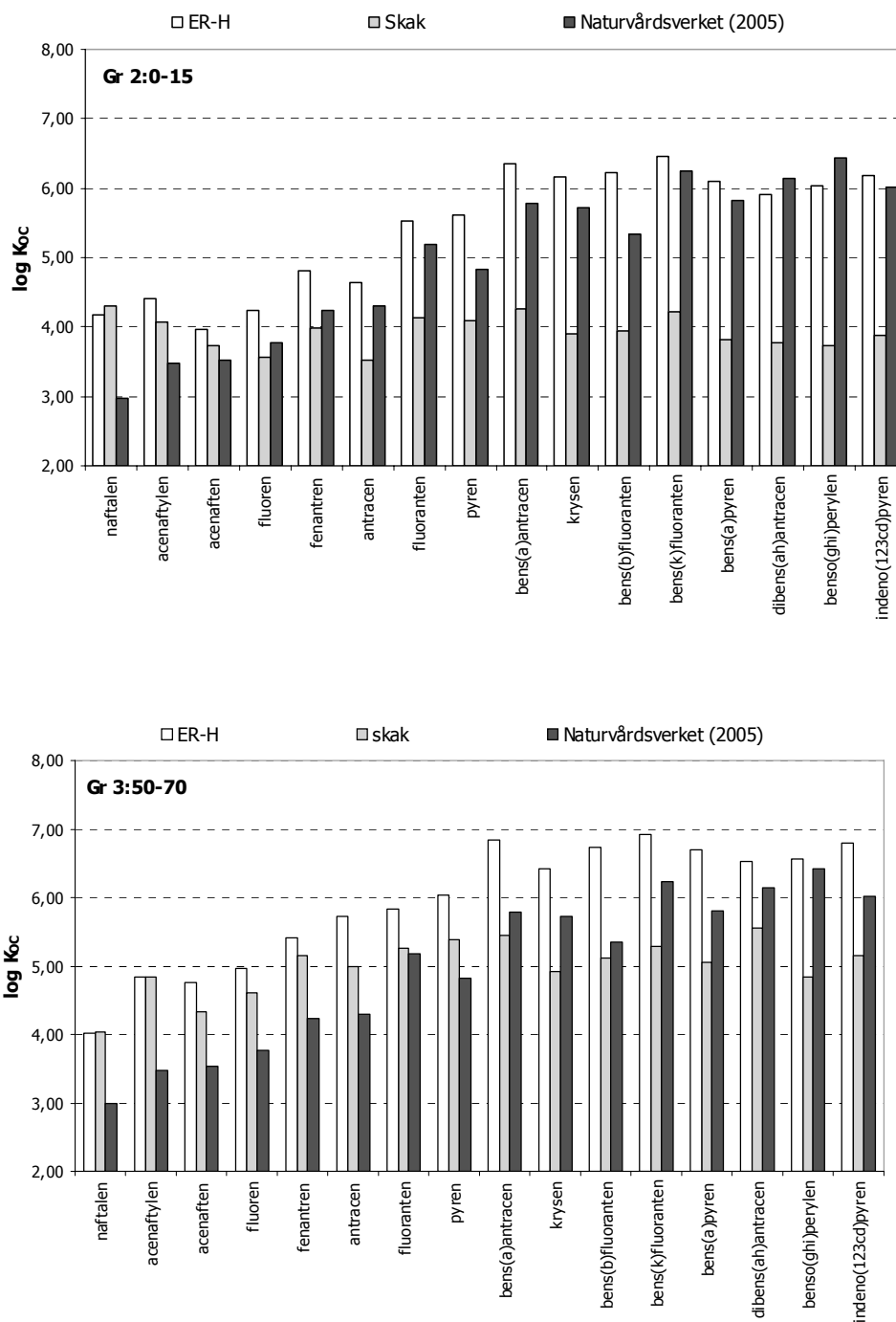
där f_{OC} är fraktionen organiskt kol i jordprovet och K_{OC} är fördelningen av föroreningen mellan vattenfasen och jordens organiska kol.

En kombination av ekvation (1) och (2) ger:

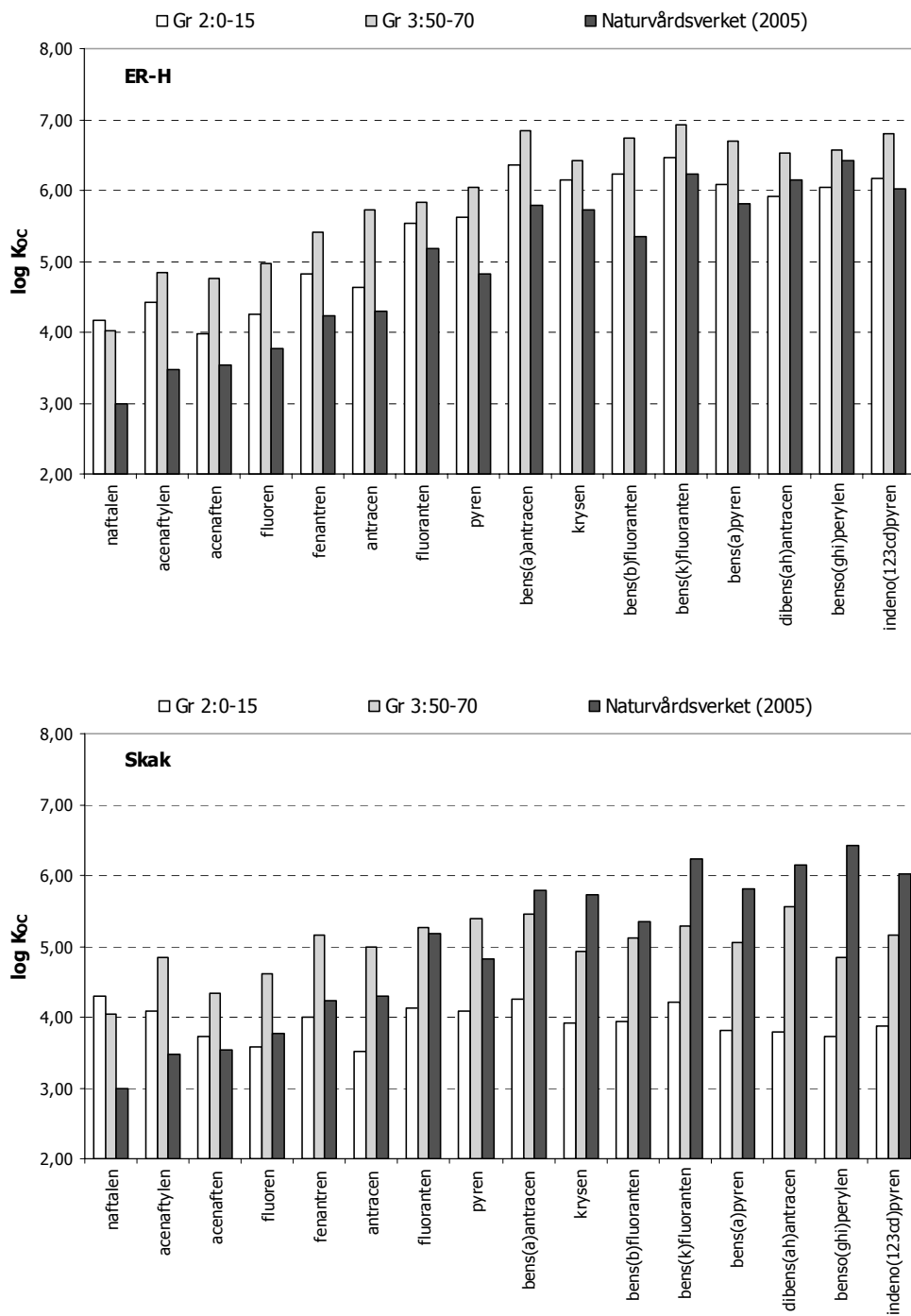
$$K_{OC} = \frac{C_s}{C_w * f_{OC}} \quad (3)$$

Genom att utnyttja ovanstående samband och uppskattade värden på C_s , C_w och f_{OC} beräknades värden på K_{OC} för de utlakade ämnena (figur 14).

I remissversionen av *Beräkningsmodell för riktvärden för mark* (Naturvårdsverket 2007) har Naturvårdsverket uppdaterat den ämnesdatabas som ingår i den platsspecifika modellen för riktvärden för förorenad mark med ny fysikalisk-kemiska data. Bland annat har nya värden för K_{OC} tagits fram för PAH. Dessa värden finns angivna i figur 14 som en jämförelse till de beräknade värdena för de två undersökta materialen från Grimstorp.



Figur 14a. Jämförelse mellan log K_{OC} -värden uppskattade utifrån lakhalter bestämda med ER-H-metoden respektive skaktest. Angivet är även de av Naturvårdsverket föreslagna log K_{OC} -värden i NVs remissversion av "beräkningsmodell för riktvärden för mark" (Naturvårdsverket 2007).



Figur 14b. Jämförelse mellan uppskattade log K_{OC} -värden för jordproverna som hämtats från två provgropar på impregneringstomten i Grimstorp. Angivet är även de av Naturvårdsverket föreslagna log K_{OC} -värden i NV:s remissversion av beräkningsmodellen för riktvärden för mark (Naturvårdsverket 2007).

Eftersom K_{OC} -värdena är omvänt proportionella mot utlakade eluathalter får man vid en jämförelse av värden som uppskattats med de båda metoderna samma trender som då man jämför eluathalterna från skaktestet med resultaten från ER-H-metoden (avsnitt 5.3.4, figur 13). Det vill säga för PAH:er med låg molekylvikt ger de båda lakttesterna upphov till liknande resultat (K_{OC} -värden i samma storleksordning) men med ökad ringstorlek och hydrofobicitet ökar skillnaden mellan de uppskattade värdena. Detta syns tydligt i figur 14a, där de beräknade K_{OC} -värdena med ER-H-metoden och skaktestet är i samma storleksordning för de lätta ämnena. För de tyngre ämnena blir skillnaden betydligt större och upp till två tiopotenser högre värden på K_{OC} erhöles med ER-H-metoden än med skaktestet. Störst skillnad erhöles för jordprovet Gr 2:0-15 som var det prov som innehöll högst organisk kolhalt (27,8%) och en större andel finkornigt material. Som redan nämnt i tidigare avsnitt är den troliga förklaringen till denna trend att PAH:er transporteras bundna till partiklar. Eftersom den uppmätta eluathalten är en summaparameter av både verkligt lösta PAH:er och partikelbundna får man en skenbart större löslighet av tyngre PAH:er då dessa har en stor benägenhet att associera till kolloider och övriga partiklar.

I 14b är samma data som redovisas i figur 14a plottad igen, men med de olika jordprovernans resultat från ER-H-lakningen (överst) respektive skaktestet (nederst) i samma stapeldiagram. I figur 14b kan man se att skillnaden mellan uppskattade K_{OC} -värden för de båda jordmaterialen blir större med skaktestet jämfört med ER-H-metoden. Detta beror sannolikt på att centrifugeringen fungerade olika bra på de testade jordmaterialen medan ER-H-metodens självfiltrering gav upphov till lakvatten med mer likartad partikelsammansättning. I skaktestet för Gr 2:0-15 var supernatanten efter avslutad centrifugering betydligt grumligare än för Gr 3:50-70. Skillnaden mellan uppskattade värden från skaktestet jämfört med ER-H-metoden är något mindre för PAH:er med låg molekylvikt. Dessa ämnen har en relativt sett högre vattenlöslighet, vilket förmodligen gör att andelen verkligt lösta ämnen är relativt stor jämfört med den bundna fraktionen och därmed påverkas inte K_{OC} -bestämningen i lika stor utsträckning av mängden partiklar i eluatet.

I förhållande till de K_{OC} -värden som föreslagits av Naturvårdsverkets i remissionen av beräkningsmodellen för riktvärden för mark, (Naturvårdsverket, 2007) ger ER-H-metoden upphov till högre K_{OC} -värden för 13 av de 16 studerade ämnena. För en fem-ringad och två sex-ringade PAH:er var de uppskattade värdena i samma storleksordning som NV:s värden. Med skaktestet, däremot, erhöles lägre K_{OC} -värden för hälften av de studerade ämnena (samtliga med $\log K_{OW} > 5,6$) för de båda testade jordmaterialen. För de mest hydrofoba ämnena var skillnaden mer än två tiopotenser gentemot från Naturvårdsverkets föreslagna värden.

Då ett jordmaterials förmåga att hålla kvar (sorbera) organiska föroreningar beror av flera faktorer (typ av organiskt material, föroreningssammansättning, föroreningarnas ålder, pH, temperatur etc.) kan dock värdet på K_{OC} för ett ämne variera stort (upp till två tiopotenser) mellan olika jordar (Krauss och Wilcke, 2001).

5.3.4 Förluster till utrustningens väggar

Eftersom PAH:er är vattenskyende ämnen och därmed försöker att undvika vattenfasen i så stor utsträckning som möjligt sker alltid en mindre eller större förlust genom adsorption till försöksutrustningens väggar vid lakförsök. I existerande förslag på metoder till lakning av organiska ämnen rekommenderas glas eller rostfritt stål framför plastmaterial.

Tyngre PAH:er (mer hydrofoba) borde teoretiskt ha en större adsorptionsbenägenhet och därmed större procentuella förluster jämfört med lättare ämnen. Resultatet från adsorptionstestet av stålcyldern som användes för skaktestet visade inte på någon sådan trend. Vid en första anblick av resultaten verkade snarare motsatta samband råda med höga procentuella förlusterna av lätta ämnen som tex. naftalen och acenaftylen. Lågmolekylära PAH:er är dock relativt lättflyktiga och uppmätta halter i det indunstade heptanet kan därför ha sitt ursprung från luften och inte från stålcylderns väggar. Halter av lättflyktiga ämnen återfanns också i ett av de indunstade ”rena” heptanproven. De båda ”rena” heptanproven dunstades in vid olika tillfällen men i det prov där spår av PAH:er återfanns skedde indunstningen tillsammans med övriga prover. I anslutning till dessa indunstningar torkades de förorenade jordproverna från Grimstorp (inför de oorganiska testerna) i ett annat dragskåp på labbet och detta skulle eventuellt kunna ha gett upphov till att indunstningsproverna kontaminerades. Att heptanet i sig skulle vara förorenat förefaller mindre troligt då den var av p.a. kvalitet.

Om man bortser från de mer lättflyktiga ämnena uppgick förlusterna i skaktestet till ca 10-20% av utlakade ämnen vilket får anses acceptabelt. Resultaten från ER-H-metoden är mer svårtolkade då låga halter och hög rapporteringsgräns begränsar utvärderingen. Utifrån de ämnen som hade mängder som kunde kvantifieras verkar det som om den procentuella förlusten ökar till glasväggarna med ökad hydrofobicitet. Förlusten av PAH:er med tre eller fyra ringar var 7-20% medan för femringade PAH:er så som bens(b)fluoranten och bens(a)pyren var förlusten 35%-53%. Resultaten indikerar alltså att rostfritt stål skulle vara ett bättre material att använda än glas för att minska förlusten av utlakade ämnen till utrustningens väggar.

6 Slutsatser

6.1 Lakning av oorganiska ämnen

SGI bedömer att samtliga testade metoder har en tillräckligt god repeterbarhet för att kunna tillämpas vid uppskattning av utlakning av oorganiska ämnen oavsett om lakvätskan består av enbart vatten eller tillsats av kalciumklorid. Det bör dock noteras att uppskattning gjorts utifrån ett starkt begränsat underlag med endast två replikat för varje utfört prov.

För samtliga tre testade jordmaterial sågs en ökning av lakbarheten med 10-320 % av Ba, Cd, K, Mg, Ni och Zn då kalciumklorid användes som lakvätska. Även högre halter av Co och Mn återfanns i lakvatten från två av de tre studerade jordmaterialen i system med kalciumklorid. Skillnaden i utlakad halt av ovan uppräknade katjoner ökade med skillnad av Cl-joner i metodernas lakvatten. Ju större skillnad i kloridkoncentration desto större ökning av utlakade katjoner i försöken med kalciumklorid. De högre halterna av katjoner i lakvattnet då kalciumklorid används som lakvätska orsakas troligen av två processer: 1) Ca^{2+} -jonerna konkurrerar med övriga katjoner om jordpartiklarnas ytor och 2) Cl-jonerna bildar komplex med metalljonerna och ökar på så vis deras löslighet.

Halterna av Al, As, Hg, Cr och Fe var i flera av försöken för låga för att genomföra en jämförelse. För de fall där halten kunde kvantifieras var den oftast lägre i försök med kalciumklorid jämfört med vatten. Den utlakade halten av Na verkade oberoende av tillsatts av kalciumklorid medan halten av S förblev oförändrad eller minskade något (ca 30-40%). Halten av Cu och Pb minskade i lakvattnet då lakningen utfördes med kalciumklorid. Detta gällde för samtliga försök med undantag för enstegslakningen av Gr2:50 vid L/S=10. De minskade halterna korrelerade med minskad halt DOC i lakvattnet.

Generellt sett gav perkolationstesterna (med eller utan återcirkulation) en större ackumulerad utlakad mängd av Ba, Ca, Cd, Co, K, Mg, Mn, Na, Ni, S och Zn än då utlakningen skedde med skaktest. Detta gällde oavsett om kalciumklorid tillsatts lakvätskan eller inte. För jord från Töllstorp utmärkte sig särskilt ämnena Co och Mn. Utlakade mängder av dessa ämnen var upp till 91 respektive 77 ggr större med perkolationstest. För övriga uppräknade ämnen var skillnaden generellt sett aldrig större än en faktor 2.

För Gr 2:50 erhöles även större mängder av As, Cr och Fe då utlakningen skedde med perkolationstest jämfört skaktest (utlakade mängder av dessa ämnen var 36 respektive 22 ggr högre).

För flertalet av de testade jordproverna gav skaktestet upphov till högre utlakad mängd Cu och Pb än vid perkolationstest. I vissa fall korrelerade detta med en högre utlakad mängd DOC.

Resultaten från ANC/BNC-testerna och pH-statiska testerna visar att dessa tester ger en mycket betydelsefull information om den förorenade jorden som för många metaller är styrande för den framtida utlakningen från jorden. De undersökta jordarnas buffringskapacitet var i vissa fall nästan obefintlig varför pH visade sig kunna sjunka snabbt. Utlakningen av många metaller, t.ex. Zn, Cu och Ni,

ökade med en faktor 100 eller för vissa fall 1000 från neutralt pH till pH 4. Utlakningen av arsenik och DOC var inte lika pH-beroende.

6.2 Lakning av organiska ämnen (PAH)

Repetierbarheten hos de undersökta metoderna förefaller vara likvärdig och SGI gör bedömningen att både skaktestet och ER-H-metoden har tillräckligt god repetierbarhet för att kunna tillämpas vid uppskattning av utlakning av PAH från förorenad jord. Det bör dock noteras att uppskattning gjorts utifrån ett starkt begränsat underlag (n=3 för ER-H-metoden och n=2 för skaktest).

Flera av de studerade PAH:erna är starkt vattenskyende ämnen och det är svårt att undvika att det inte sker en viss förlust av dessa från lakvattnet i form av adsorption till försöksutrustningens väggar. Förlusttesterna i denna studie antyder att rostfritt stål skulle kunna vara ett bättre material till vilket en mindre adsorption sker än till glas. För små adsorberade mängder i förhållande till eluathalter och analysmetodens detektionsgräns gör dock att det är svårt att dra några vidare slutsatser.

Denna studie har visat att det föreligger en risk för överskattning av mobiliteten och lakbara halter av PAH då lakningen uppskattas med hjälp av skaktest. Detta gäller särskilt halterna av de mer hydrofoba ämnena. De högre uppmätta halterna i lakvatten från skaktest berodde sannolikt på den stora mängd partiklar som fanns i lakvattnet efter utförd lakning och centrifugering. Resultaten från de utförda skakförsöken visar på svårigheten att skilja lakvätskan från den fasta fasen. Därmed blir den analyserade halten PAH ett resultat av både verkligt lösta föroreningar och partikelbundna. I fält förekommer en naturlig självfiltrering av partiklar då lakvatten transporteras genom jorden. På liknande sätt självfiltreras mobila partiklar i ER-H-metoden då lakvattnet återcirkuleras genom provmatrisen och andelen partiklar i lakvattnet bör därför bättre representera den andel som skulle följt med ett lakvatten i fält. I perkolationstestet (ER-H-metoden), där provmaterialet ligger stilla, utsätts jordprovet inte heller för nötning på samma sätt som i skaktestet.

Om jämviktsfördelningskoefficienter så som K_d - och K_{OC} -värden beräknas utifrån överskattade eluathalter kommer jordens verkliga sorptionskapacitet att underskattas. Detta kan leda till en felaktig riskbedömning av föroreningarna då onödigt stora säkerhetsmarginaler ansätts. Utifrån redovisade resultat och ovanstående resonemang gör SGI bedömningen att av de två testade metoderna förefaller ER-H-metoden vara den bäst lämpade metoden för att uppskatta icke-flyktiga hydrofoba organiska ämnens lakbarhet och mobilitet i en förorenad jord.

Referenser

- Bergendahl, J., 2005. Batch leaching tests: Colloid release and PAH leachability. *Soil Sediment Contam.* 14, 527-543.
- Comans, R. N. J., Roskam, G., Oosterhoff, A., Shor, L., Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Pihlajaniemi, M., Ojala, M., Broholm, K., Villholth, K., Hjelmar, O., Daly, P., Woodhead, R., Higgins, J., Heimovaara, T., Keijzer, J., Keijzer, H. 2001. Development of standard leaching tests for organic pollutants in soils, sediments and granular waste materials. Final Report. R.N.J. Comans (editor): 1-180.
- Enell, A., Hemström, K., Larsson, L., Bendz, D., 2008. Laktest för ickeflyktiga organiska föroreningar -Utvärdering och rekommendationer. Preliminär titel. Under bearbetning. Diar. nr. 1-0405-0380. Statens geotekniska institut.
- Enell, A., Suèr, P., och Wadstein, E. 2007. Metodbeskrivningar för oorganiska och organiska laktester. Underlag till projektet inom Kunskapsprogrammet Hållbar Sanering med titel ”Föroreningsspridning –tillämpning och utvärdering av metoder”. 2007-02-26.
- Enell, A., Reichenberg, F., Warfvinge, P., and Ewald, G. 2004, A column method for determination of leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from aged contaminated soil, *Chemosphere*, vol. 54, pp. 707-715.
- Gamst, J., Kjeldsen, P., Christensen, T. H., 2007. Determination of Solute Organic Concentration in Contaminated Soils Using a Chemical-equilibrium Soil Column System, *Water Air and Soil Pollution. In press*
- Gamst, J., Kjeldsen, P., Hansen, J. B., Broholm, K., Christensen, T. H., 2003. Leaching of PAH's from soil: Comparison of two conceptually different column tests and a batch tests. Proceedings of the 2nd International Workshop on Groundwater Risk Assessment at Contaminated Sites (GRACOS) and Integrated Soil and Water Protection (SOWA), Tübingen, Germany, Center for Applied Geosciences.
- Hansen, J. B., Grön, C., Hjelmar, O., Asmussen, O., Klem, S., Mizutani, S., Gamst, J., Wahlström, M., Håkkanson, K., and Breedweld, G. 2004, Leaching tests for non-volatile organic compounds - Development and testing Nordtest 1643-03.
- Hemström, K., 2007. Utvärdering av ett laktest för jordar kontaminerade med icke-flyktiga organiska föroreningar, Avdelningen för kemisk ekologi och ekotoxikologi Lunds universitet, Lund, pp. 1-53.
- ISO, 2007a. Soil quality -Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials -Part 1: Batch test using a liquid to solid ratio of 2 l/kg dry matter. ISO/TS 21268-1:2007, Technical specification. International Organisation for Standardization

ISO, 2007b. Soil quality -Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials -Part 2: Batch test using a liquid to solid ratio of 10 l/kg dry matter. ISO/TS 21268-2:2007, Technical specification. International Organisation for Standardization.

ISO, 2007c. Soil quality -Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials -Part 3: Up-flow percolation test. ISO/TS 21268-3:2007, Technical specification. International Organisation for Standardization.

ISO, 2007d. Soil quality -Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials -Part 4: Influence of pH on leaching with initial acid/base addition. DRAFT. International Organisation for Standardization.

Krauss, M., Wilcke, W., 2001. Predicting soil-water partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls by desorption with methanol-water mixtures at different temperatures. Environ. Sci. Technol. 35, 2319-2325.

Naturvårdsverket, 2007, Riktvärden för mark – Modellbeskrivning och vägledning, REMISSVERSION, 2007-10-19, Kontaktperson NV Helena Fürst

Persson Y. 2007. Chlorinated organic pollutants in soils and groundwater at chlorophenol-contaminated sawmill sites. Dissertation. Department of Chemistry, Umeå University.

Sen T.K., Khilar K.C., 2006, Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media, Advances in Colloid and Interface Science 119, 71-96

Wik O, Suer P, Bendz D, 2007. ANC/BNC in Swedish soils – implications for contaminant mobility. Consoil 2008, Milano, Italy. *In press*.

Föroreningsspredning

RAPPORT 5863

Tillämpning och utvärdering
av metoder

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 91-620-5863-0
ISSN 0282-7298

Delrapport 2
Lakning av förorenad jord
resultat och utvärdering av metoder

Risken för att föroreningar sprids från förorenade områden och påverkar grundvatten och ytvatten i omgivningarna är i många efterbehandlingsprojekt styrande för vilka åtgärder som krävs. Bra metoder för att bedöma risken för mobilisering och spridning av föroreningar är därför nödvändiga. I projektet har olika metoder för bedömning av lakning och föroreningsspredning testats och utvärderats genom att de applicerats på två olika förorenade områden. På detta sätt har man kunnat jämföra resultat mellan fältmätningar och laboratorietester med de man fått genom beräkningar med olika modeller.

Naturvårdsverket har inte tagit ställning till innehållet i rapporten. Författarna svarar ensamma för innehåll, slutsatser och eventuella rekommendationer.

Rapporten ges ut i tre delar:

- Huvudrapport (Rapport 5834. ISBN 978-91-620-5834-0)
- Delrapport 1A och B (Rapport 5862. ISBN 978-91-620-5862-3)
- Delrapport 2 (Rapport 5863. ISBN 978-91-620-5863-0)

Kunskapsprogrammet Hållbar Sanering samlar in, bygger upp och sprider kunskap om förorenade mark- och vattenområden. Genom Hållbar Sanering kan myndigheter, forskare och företag söka bidrag för utredningar, seminarier och utvecklingsprojekt som täcker kunskapsluckor på kort och lång sikt. Hållbar Sanering styrs av en programkommitté som består av representanter från Banverket, Göteborgs stad, KTH, Linköpings Universitet, Länsstyrelsen i Kalmar, Naturvårdsverket, Norges Teknisk- Naturvetenskaplige Universitet; SGI, SLU, Sydkraft SAKAB och Umeå Universitet.

