



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT  
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



## **Kreosotimpregnerade sliprars inverkan på spridning av kreosot i mark – Ytutlakning av PAH från kreosotimpreg- nerade sliprar**

YVONNE ANDERSSON-SKÖLD

CECILIA TOOMVÄLI

LENNART LARSSON

PAULA NILSSON

KRISTIAN HEMSTRÖM

ANJA ENELL

Varia 587

LINKÖPING 2008

Banverkets uppdrag  
**”Kreosotimpregnerade sliprars inverkan  
på spridning av kreosot i mark”**

Dnr Banverket S 05-3053/AL50

omfattar  
SGI Varia 581  
SGI Varia 587  
SGI Varia 588



**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**  
**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

Varia **587**

**Kreosotimpregnerade slibrars inverkan  
på spridning av kreosot i mark**  
– Ytutlakning av PAH från kreosotimpreg-  
nerade slibrar

YVONNE ANDERSSON-SKÖLD  
CECILIA TOOMVÄLI  
LENNART LARSSON  
PAULA NILSSON  
KRISTIAN HEMSTRÖM  
ANJA ENELL

Dnr Banverket S 05-3053/AL50

---

LINKÖPING 2008

<b>Varia</b>	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI – Informationstjänsten Tel: 013–20 18 04 Fax: 013–20 19 09 E-post: <a href="mailto:info@swedgeo.se">info@swedgeo.se</a> Internet: <a href="http://www.swedgeo.se">www.swedgeo.se</a>
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--08/587--SE
Dnr SGI	1-0509-0529
Proj.nr SGI	12914

## Innehållsförteckning

<b>SAMMANFATTNING .....</b>	<b>4</b>
<b>1 INLEDNING .....</b>	<b>6</b>
1.1 SYFTE MED STUDIEN .....	6
1.2 BAKGRUND .....	6
1.3 YTUTLAKNINGSTESTER FRÅN FAST MATERIAL .....	8
1.3.1 NEN 7345 .....	6
1.4 DESORPTION (PSEUDO FÖRSTA ORDNINGENS UTLAKNING) .....	7
<b>2 MATERIAL OCH METOD .....</b>	<b>8</b>
2.1 MATERIAL .....	8
2.2 METOD .....	9
2.2.1 Duschning .....	11
<b>3 RESULTAT .....</b>	<b>12</b>
3.1 ANALYSRESULTAT AV UPPMÄTTA HALTER I LAKVATTEN .....	12
3.2 ADSORPTIONSTEST .....	14
3.3 RESULTAT FRÅN DUSCHNING .....	15
<b>5 UTVÄRDERING AV RESULTAT OCH DISKUSSION .....</b>	<b>17</b>
5.1 UTLAKADE MÄNGDER I GAMMAL RESPEKTIVE NY SLIPER .....	17
5.2 ADSORPTION TILL VÄGGAR .....	18
5.3 UTVÄRDERING AV DESORPTION (PSEUDO FÖRSTA ORDNINGENS UTLAKNING) .....	19
5.4 BEDÖMNING AV MÄNGDER SOM KAN NÅ MARKEN .....	22
<b>6 SLUTSATSER .....</b>	<b>24</b>
<b>REFERENSER .....</b>	<b>25</b>

### **BILAGA 1**

Analysprotokoll från SGI:s miljölab.

### **BILAGA 2**

Analysprotokoll från Analytica, ALS Laboratory Group.

Bilagorna redovisas i Bilagor till: SGI Varia 587.

## SAMMANFATTNING

Föreliggande delstudie ingår i ett projekt vars syfte är att ge kunskap om kreosotimpregnerade sliprars inverkan på spridning av föroreningar i mark. Framförallt avser studien de processer som sker vid användandet av impregnerade sliprar, dvs. utlakning av kreosotföreningar från sliper till banvall och vidare transport i banvallen. Tidigare studier, sammanfattningar och fältförsök har identifierat ett flertal frågeställningar kring kreosots miljöpåverkan vid användandet av impregnerade sliprar. En övergripande fråga är om spridningen av föroreningar som härstammar från kreosot i banvallar är sådan att den har en negativ effekt på människors hälsa och omgivande miljö.

Laboratoriestudien innefattar två studier. Den ena studerar i vilken omfattning det sker en utlakning av polycykliska aromatiska kolväten, PAH, (på engelska: polycyclic aromatic hydrocarbons) från kreosotimpregnerade sliprar. Den andra studerar hur PAH från lakvätskan som erhållits betar sig i morän med olika mängd organiskt material. I denna rapport redovisas studien av utlakning av PAH från kreosotimpregnerade sliprar.

För att undersöka i vilken grad PAH kan utlakas från en sliper, för att på det sättet nå marken, har ytutlakningstest av gammal respektive nykreosotimpregnerade sliprar gjorts. Metoden som ytutlakningen baseras på är standardtest NEN 7345, vilket är utvecklat för att studera metallutlakning. Den metod som används i föreliggande studie baseras på de ytutlakningsstudier som tidigare utförts på SGI från PAH utlakning för monoliter av bitumenstabiliserad tjärasfalt (Larsson, 2000, Larsson, 2004). En stor avvikelse är dock att i föreliggande studie har avsikten varit att försöka göra en bedömning av den totala mängden PAH som kan nå marken, dvs både den vattenlösliga och den partikulärt bundna andelen (NEN 7345 syftar till att enbart uppskatta den mängd som är vattenlöslig). Föreliggande studie anger därför maximal mängd som kan lämna slipern i kontakt med vatten inklusive partikelbundet PAH.

Sliprar tillhandahölls av Banverket och utgjordes av utsågade ändbitar. En sliper var äldre och har tidigare varit i bruk, den andra var nyimpregnerad med kreosot och hade inför själva lakstudien förvarats i vanlig luft i några månader.

Enligt föreliggande studie fanns det en mätbar utlakning av PAH från kreosotimpregnerade sliprar. Utlakningen var betydligt större från den nyligen impregnerade slipern än från den äldre slipern som varit i bruk. Från ytutlakningsförsöken framgick även att ämnen med låg molekylvikt återfanns i betydligt lägre koncentration i lakvätskan från den äldre slipern än från den nyimpregnerade slipern, vilket kan förklaras med att dessa ämnen förångats och/eller utlakats då den äldre slipern varit i bruk. Därtill kan tiden hypotetiskt orsakat starkare sorption till slipermaterial.

Även vid duschning av den nyimpregnerade slipern var de uppmätta halterna i samma storleksordning som de halter som uppmätts för motsvarande sliperbitar vid uttagen för ytutlakningen. Detta tyder på att det är en snabb process som dominerar utlakningen av PAH från kreosotimpregnerade sliprar.

Beräkning baserad på konservativa antagen och resultaten av denna studie visar på att gällande riktvärden för känslig mark inte överskreds till följd av de utlakade mängder som når marken. Adsorptionstesterna i denna studie tyder på att upp till ca 22 % av utlakad mängd summa 16-PAH adsorberas på lakkärlens väggar och även större andel för de tyngre PAH föreningarna. Med konservativ bedömning avses därmed att bedömningen baseras på att hänsyn tagits till denna adsorption. Analysen av utlakad mängd PAH innefattar även partikulärt bundna PAH vilket därmed även ingår i bedömningen. Beräkningen har gjorts för att beskriva kumulativt utlakade mängder på lång sikt utan hänsyn till nedbrytning i marken. Vidare har vid beräkning-

en antagits att en slipers samtliga ytor är tillgängliga för nederbörd eller annan kontakt med vatten. Den beräknade halten av summa 16-PAH i marken längs en banvall föreligger enligt denna beräkning under gällande riktvärde för känslig markanvändning vid ett ansatt djup av 5 cm och koncentrationen avtar då större spridningsdjup antas. Vid jämförelse med riktvärde för mindre känslig markanvändning reduceras spridningsdjupet som krävs till hälften för att riktvärdet inte skall överskridas. Utlakningen av cancerogena PAH är mycket låg och även ett spridningsdjup av mindre än 3 cm respektive 2 mm ger halter lägre än gällande riktvärde för känslig respektive mindre känslig mark.

Denna studie har utförts för att bedöma hur mycket PAH som kan nå marken i samband med vattenkontakt. Fastläggning och desorption av PAH i mark, då lakvatten från den nyimpregnerade slipern infiltrerar en morän, beskrivs i rapporten av Enell m.fl. (2008a).

## 1 INLEDNING

### 1.1 Syfte med studien

Föreliggande delstudie ingår i ett projekt vars syfte är att ge kunskap om kreosotimpregnerade sliprars inverkan på spridning av föroreningar i mark. Framförallt avser studien de processer som sker vid användandet av impregnerade sliprar, dvs. utlakning av kreosotföroreningar från sliper till banvall och vidare transport i banvallen. Tidigare studier, sammanfattningar och fältförsök har identifierat ett flertal frågeställningar kring kreosots miljöpåverkan vid användandet av impregnerade sliprar. En övergripande fråga är om spridningen av föroreningar som härstammar från kreosot i banvallar är sådan att den har en negativ effekt på människors hälsa och omgivande miljö.

Projektets mål är att genom litteraturstudie, laboratorie- samt en enkel fältstudie ta fram kompletterande underlag som tillsammans med tidigare studier och sammanfattningar skall användas för att kartlägga och bedöma risker förknippade med spridning av kreosot från sliprar och transport i och från banvallar.

Laboratoriestudien innefattar två studier. Den ena studerar i vilken omfattning det sker en utlakning av PAH från kreosotimpregnerade sliprar. Syftet med denna studie har varit att bedöma hur mycket PAH som kan följa lakvattnet för att därefter kunna bedöma hur detta lakvatten beter sig i marken. Den andra studerar hur PAH från lakvätskan som erhållits från kreosotimpregnerade sliprar beter sig i morän med olika mängd organiskt material. I denna rapport redovisas utlakningsstudien av kreosotimpregnerade sliprar.

### 1.2 Bakgrund

I dagsläget tillför Banverket varje år omkring 180 000 kreosotimpregnerade träsliprar till järnvägen i Sverige. Moderna impregneringsanläggningar kan anses slutna och emissioner skall inte förekomma när anläggningen är i bruk. Trots att dropp och urlakning ha minskat markant på senare tid uppstår det fortfarande frågor kring hur mycket av kreosoten som kan läcka ut framförallt i samband med lagring och då sliprarna används på banvall.

Kreosot är ett produktnamn för en blandning av flera hundra föreningar vars inbördes fördelning kan variera, men som huvudsakligen utgörs av olika PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons) och varianter av dessa såsom aromatiska alkoholer och heterocykliska föreningar. Huvudkomponenterna i kreosot bidrar till de vanligaste kännetecknande egenskaperna hos kreosot, dvs. det är en relativt trögflytande vätska, tyngre än vatten och har till stora delar låg vattenlöslighet. Den stora mängden komponenter i kreosot gör att dess spridning är komplex och kan ske genom avdunstning (naftalen och andra relativt flyktiga föreningar), spridning av fri fas och genom utlakning och fortsatt spridning med vatten samt genom partikeltransport av förorenade sediment- och jordpartiklar.

Hur stor exponeringen av PAH från kreosotimpregnerade sliprar är beror på hur mycket som avgår till luft, mark och vatten och hur den fortsatta spridningen ser ut. Avgörande för riskerna med spridning av kreosot från dagens kreosotbehandlade sliprar är om det sker en utlakning i samband med lagring samt användning i banvall. Om det sker en utlakning är det också av betydelse att bedöma i vilken omfattning och, om den är betydande, på vilket sätt den urlakade kreosotkomponenterna sprids vidare i samt från banvallen.

För att undersöka i vilken grad PAH kan utlakas från en sliper för att på det sättet nå marken har ytutlakningstest av en gammal respektive en nyimpregnerad sliper gjorts. Analyser av lakvatten har gjorts för 16 enskilda PAH-föreningar. Metoden baseras på standardtest NEN 7345 vilken är utvecklad för att studera metallutlakning. Den metod som används nedan baseras på de ytutlakningsstudier som tidigare utförts för utlakning av PAH från monoliter av bitumenstabiliserad tjärasfalt (Larsson, 2004, Larsson, 2002). Fastäggningsmetoden baseras på tidigare använd me-



tot inom SGI (Wadstein m.fl., 2007; Enell m. fl. 2008b) och utförligare metodbeskrivning finns i delrapport i föreliggande projekt (Enell m.fl., 2008a).

För att bedöma farligheten av utlakad PAH är det viktigt att förstå de utlakade föreningarnas fortsatta beteende i marken. Syftet med denna del av studien har därför också varit att få fram ett lakvatten till fastläggningstest av PAH till olika jordar för att studera fastläggning (sorption) och vidare lakbarhet (desorption) i jord av PAH som ursprungligen lakats från en fast kropp. En sådan fast kropp kan vara en kreosotimpregnerad trätrall, sandlåda o.s.v. eller som i föreliggande fall sliprar för banvall. Resultat av fastläggningstest och därefter fortsatt lakbarhet finns presenterat i Enell m.fl. (2008a).

## 2 YTUTLAKNINGSTESTER FRÅN FAST MATERIAL

Ytutlakning är ett statiskt test (prov i stillastående vatten), i motsats till t ex kolonnlakning som är ett dynamiskt test (vatten strömmar genom/förbi provet). Målsättningen med ytutlakningstest är att undersöka den tidsberoende utlakningen av PAH från ytan av fast matris ut i bulkvattenfasen. Därtill kan även undersökas om erhållen ytutlakning är diffusionsstyrd eller ej. Metoden är lämplig att användas om man vill studera utlakning från hela material, t.ex. en hel väggyta eller impregnerat trä, i motsats till kolonnlakning som lämpligen används för t.ex. uppbrutet/krossat materials utlakning såsom krossat vägmateriel vid mellanlagring (Larsson, 2004). Vid bedömning av utlakad mängd görs analys av utlakad mängd vid ett urval tidpunkter under den totala lakperioden och den kumulativt utlakade mängden beräknas.

En etablerad metod för ytutlakning är det Nederländska testet NEN 7345. Denna metod är emellertid designad för utlakning av oorganiska ämnen. Någon etablerad ytutlakningsmetod för organiska ämnen föreligger inte ännu, men modifierad variant av NEN 7345 har använts för att studera ytutlakning av PAH från tjärasfalt (Larsson, 2002 & 2004) samt andra vägbeläggingsmaterial (Bowen m.fl., 2000, Beuving m.fl., 1996, Engbers och Smallegange, 1996). Målsättningen med den modifierade varianten var att reducera eventuella förluster av organiska ämnen under testets utförande så som t ex. adsorptionsförluster, nedbrytningsförluster och eventuell avgång av PAH i gasfas (Larsson, 2002 & 2004).

### 2.1 Material

Sliprar tillhandahölls av Banverket och utgjordes av utsågade ändbitar. En sliper var äldre och har tidigare varit i bruk, den andra var nyimpregnerad med kreosot och hade inför själva lakstudien förvarats i vanlig luft i några månader. Träsliprar består av ek och de aktuella sliprarna var kreosotimpregnerade. Sliprar oavsett ålder efter impregnering är mycket hårda, skrovliga samt har flera sprickor i materialet. Försöken utfördes på dubbelprov av respektive ny och äldre sliper. Proven benämns Ny A respektive Ny B för de nyimpregnerade sliperbitarna och Gammal A respektive Gammal B för de sliprar som varit i bruk innan denna studie.

Bitarna som erhållits från Banverket (Kenneth Ahl, Banverket, Göteborg) för den aktuella lakstudien var tillsågade vid tillhandahållandet och relativt stora. Vid tillsågning är det mycket lätt att materialet förstörs, varvid de tillhandahållna bitarna ansågs vara de bäst lämpliga för att utföra studien. De äldre tillhandahållna bitarna var större än de nyimpregnerade. De äldre bitarna vägde knappt 3 kg och de nyimpregnerade vägde ca en tiondel av detta, dvs. knappt 0,3 kg. Ytan av bitarna uppmättes grovt med linjal och var för nya sliperbitar knappt 0,05 m<sup>2</sup> och för de äldre ca 0,09 m<sup>2</sup>. I Bilaga 1 redovisas uppmätt yta samt vikt av de sliperbitar som använts vid ytutlakningsförsöken.

Såväl de nyimpregnerade som de äldre bitarna hade en nysågad yta. För de större äldre bitarna verkade impregneringen inte ha nått denna yta, vilket däremot var fallet på de nyimpregnerade bitarna beroende på att dessa bitar var sågade på betydligt mindre avstånd från kanten än de äldre.

Vid ett av försöken gjordes även test av hur mycket av utlakad PAH som fastnat på lakkärl, en så kallad adsorptionstest. Liknande adsorptionstest har tidigare också utförts vid lakstudier av kreosotförorenad jord (Wadstein m.fl., 2007; Enell m.fl. 2008b) och vägbeläggingsmaterial (Larsson, 2002).

Lakvattnet från de nyimpregnerade sliperbitarna användes också för fastläggningstest som finns beskrivet i Enell m.fl. (2008a).

## 2.2 Metod

Den metod som användes är en modifiering av NEN 7345. NEN 7345 är utvecklad för att studera metallutlakning. Metoden har tidigare varit basen för att studera ytutlakning av PAH föreningar från återvunnen tjärasfalt (Larsson, 2004, Larsson, 2002). I denna studie används metoden som bas för att studera ytutlakning av organiska parametrar, mer specifikt PAH, från fasta provkroppar. Den fasta provkroppen är i detta fall en utsågad kantdel av kreosotimpregnerad sliper. Lakningen utfördes i kärl av rostfritt stål som förutom vanlig laboratediskning sköljdes med aceton.

Principen för NEN 7345 är att en fast provkropp med känd yta lakas i en bestämd mängd vatten som byts efter bestämda tidsintervaller. De erhållna lakvattnen analyseras sedan med avseende på valda organiska parametrar, i föreliggande fall 16-PAH. Resultaten som beaktas är framförallt den kumulativt utlakade mängden av de aktuella ämnena per ytenhet,  $\text{mg/m}^2$ , över en tidsperiod, i detta fall 64 dygn.

Med hänsyn till att de tillhandahållna sliperbitarna lätt spricker vid nytillsågning, anpassades studien med avseende på tillgängligt material. Anpassning gjordes med hänsyn till skillnaderna mellan de nya och äldre bitarna, vilket krävde att försöksupställningen skiljde sig åt. Det som var viktigt var att de impregnerade ytorna kom i kontakt med lakvattnet.

För de äldre bitarna med en nysågad yta gjordes lakningen på så sätt att bitarna vilade på ett rostfritt galler av stål så att den nysågade ytan var ovan vätskeytan (se figur 1 nedan). De nya bitarna var helt nedsänkta i lakvätskan med hjälp av en tyngd med så liten yta som möjligt (se Figur 2 nedan).

Provbitarna mättes och vägdes innan de placerades i lakkärnen. En bestämd volym milli-Q vatten tillsattes (drygt två liter för nyimpregnerade sliperbitar och cirka fyra liter för de äldre). Denna volym beräknades med utgångspunkt från provkroppens yta. Kärnen täcktes med aluminiumfolie och tätades sedan med para-film. Täckningen gjordes för att förhindra avdunstning, men också för att förhindra nedbrytning pga ljus.

Efter att proven varit 6 timmar i lakvätskan lyftes de över till ett nytt lakkärl, vägdes och samma volym nytt vatten tillsattes. Den uttagna mängden lakvatten vägdes och delades upp på mörka glasflaskor för analyser samt för prov till fastläggningstesten vilka vidare beskrivs i en separat delrapport av detta projekt (Enell m.fl., 2008a).

Detta förfarande upprepades med vissa intervall så att de kumulativa tiderna blev 6 timmar, 1 dygn, 2 dygn, 3 dygn, 7 dygn, 16 dygn, 31 dygn samt 64 dygn. Lakförsöken utfördes under perioden juni-augusti och utfördes vid rumstemperatur,  $26 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Uttag av vätska för fastläggningstest togs för lakvattnen från 6 timmar, 1 dygn, 2 dygn, 3 dygn samt 7 dygn från Ny sliper A samt B (sammanslagingsprov). Fastläggningstestet startade dag 7 av ytutlakningstestet. Samtliga lakkärl tvättades efter respektive lakuttag.

Till lakvattnen som sparades för fastläggningstest samt de som analyserades på organiska ämnen tillsattes natriumazid ( $\text{NaN}_3$ ) för att förhindra mikrobiell nedbrytning. Avsikten med lakstudien var att analysera hur mycket PAH som kan nå marken via utlakning från slipern och inte för att bedöma toxiciteten av själva lakvätskan. Därför analyserades provet utan att avskilja partiklar från lakvätskan.



*Figur 1. Beskrivning av ytulakningstest: Gammal sliper.*



*Figur 2. Beskrivning av ytulakningstest: Ny sliper.*

Lakvattnen analyserades med avseende på PAH (OV1-analys) av ALS Analytica AB. OV1-analysen innefattar 16 PAH föreningar varav 7 klassats som cancerogena. SGI miljölaboratorium bestämde pH (SS 028122), elektrisk ledningsförmåga (SS-EN 27888) samt redox (SGI-metod) i lakvattnen. Samtliga analysresultat finns redovisade i Bilaga 1. Lakvattnet från nya sliperbitar hade ca 1 enhet lägre pH än motsvarande vatten från de äldre sliperarna. pH för Ny sliper A uppmättes till  $5,3 \pm 0,2$  och Ny B  $5,4 \pm 0,2$ . pH för sliper Gammal A uppmättes till  $6,3 \pm 0,2$  och sliper Gammal B  $6,2 \pm 0,2$ . Redox varierade något mellan uttagen. För Ny A, Gammal A och B, sjönk redox under de första 7 lakdygnen för att därefter åter öka. För Gammal sliper A uppmättes redox 356 Eh efter 6 timmars lakning för att därefter sjunka vid respektive uttag för att efter 7 dygn vara 266 Eh och därefter återigen öka till 324 Eh vid 64 dygn. Även ledningsförmågan varierade mellan uttagen (se Bilaga 1).

För att uppskatta adsorption av PAH till utrustningen gjordes förlusttest på ett av kärnen som använts för urlakning av den nya slipern (A). Efter att lakvattnet tagits ut sköljdes kärlet med milli-Q vatten. Därefter torkades eventuella partiklar bort med Kleenex. Kärlet torkades och sköljdes sedan med heptan. Heptanen samlades upp och indunstades med hjälp av kvävgas till ca 2 ml. Den totala volymen indunstat lösningsmedel bestämdes och skickades sedan på analys av PAH (OV-1) hos ALS Analytica AB. Metoden för adsorptionstest finns beskriven i Wadstein m.fl. (2007).

Efter avslutad lakning, och efter att provkropparna har fått torka till lite, bestämdes ytan mer exakt på dessa. Då ytorna var relativt ojämna och det var sprickbildningar i provkroppen gick det inte att enkelt mäta dessa utan ytan fick bestämmas på ett annat sätt. Detta gick till så att varje yta som varit i kontakt med lakvatten ritades av på mm-rutat papper för att sedan klippas ut och vägas. För att korrelera vikten mot ytan så ritades det upp tre kvadrater med ytan  $0,01 \text{ m}^2$  som klipptes ut och vägdes. Medelvärde av dessa användes sedan för att räkna om vikten på pappret till yta. Den uppmätta ytan för nyimpregnerad sliper med beteckningen Ny A var  $0,043 \text{ m}^2$  och för motsvarande Ny B  $0,050 \text{ m}^2$ . För äldre sliprar var den uppmätta ytan för Gammal A  $0,088 \text{ m}^2$  och  $0,093 \text{ m}^2$  för sliper Gammal B.

### 2.2.1 Duschning

Som ett komplement till ytutlakningen utfördes även ett mycket snabbt och enkelt test, där den nyligen impregnerade slipern duschades. Avsikten var att bedöma om det kräver viss kontakttid, eller inte, för att uppnå en hög utlakning. Duschning gjordes med handdusch och vanligt kranvatten vid rumstemperatur. Duschning gjordes på en sliperbit som vägde 775 g och pågick från 1 minut, test D1, två minuter (D2) upp till 4 minuter (D3). med ett vattenflöde av ca 1 liter per minut för D1 och ca 300 ml per minut för D2 och D3. Detta är betydligt mer vatten än vad som förekommer i samband med regn per tidsenhet men försöket utfördes för att få en uppfattning om lakbarhet med rinnande istället för stillastående vatten. Analyser gjordes på 16-PAH enligt samma metod som använts för analys vid ytutlakning enligt ovan. Som kontroll gjordes även en analys av duschvatten utan sliperbit. Den uppmätta vattentemperaturen var efter duschning i D1  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , D2  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ , D3  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  och rent vatten  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3 RESULTAT

#### 3.1 Analysresultat av uppmätta halter i lakvatten

Halten av enskilda PAH i vattenfasen för respektive uttag visas i Tabell 1 – 4, i Bilaga 1 och de därifrån, motsvarande, beräknade kumulativt utlakade mängderna redovisas i Tabell 1 – 4 och i Figur 3.

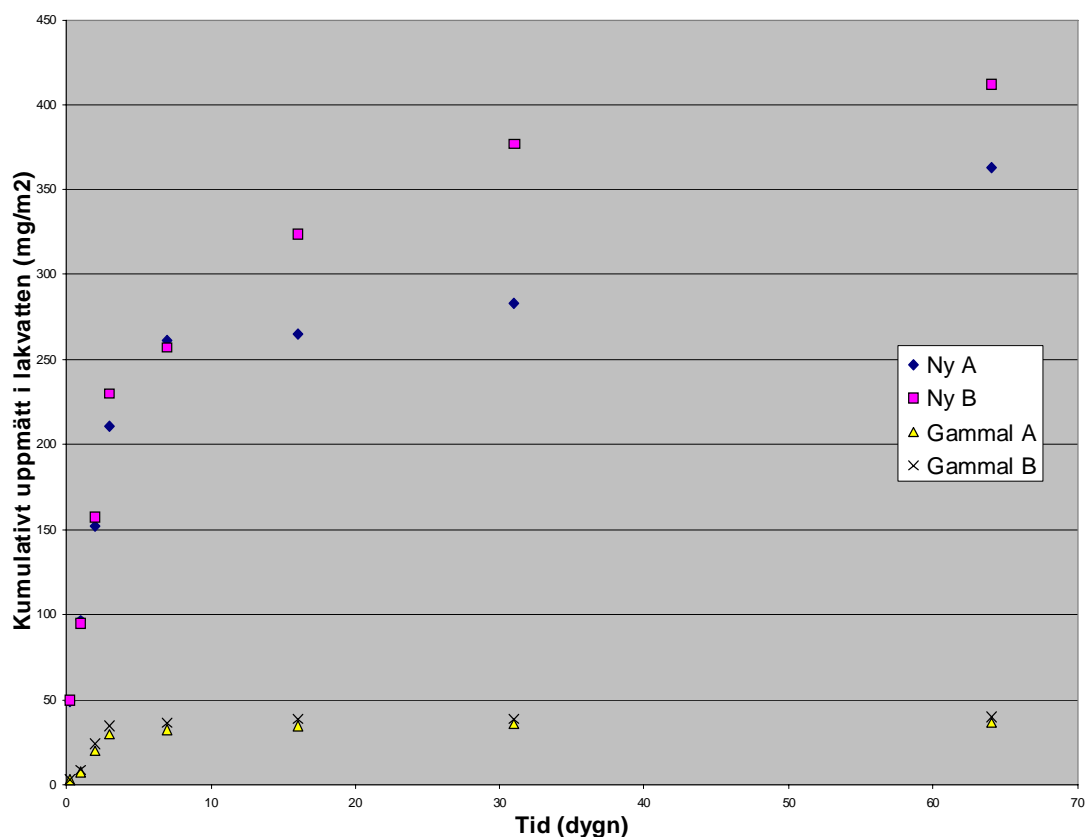
Som framgår av Tabell 1 – 4 förekommer flera ämnen i halter som understiger analyslaboratoriets rapporteringsgräns. För dessa ämnen är de kumulativt beräknade halterna beräknade baserat på en halt densamma som rapporteringsgränsen. Dock vid beräkning av PAH16 (PAH, summan av samtliga 16 PAH som analyserats) så ingår endast de föreningar för vilka kvantifierbara halter uppmätts. Detta gäller även vid beräkning av summan av de PAH som klassas som cancerogena (PAH summa canc) och resterande (PAH summa övriga). Även de kumulativt utlakade mängder som redovisas i Figur 3 innefattar enbart de ämnen som förekom i halter som var kvantifierbara. Av de PAH föreningar som klassas som cancerogena var samtliga under rapporteringsgränsen för nyimpregnerade sliprar (Ny A och Ny B) och endast bens(a)antracen och krysen förekom i kvantifierbara mängder i lakvattnen från båda de äldre sliperbitarna.

Som framgår av Tabell 1 – 4 ändrades rapporteringsgränsen efter det andra uttaget. Till exempel, som framgår av Tabell 1 nedan, var gränsen för bens(b)fluoranten och bens(k)fluoranten 0,4 µg/l vid de två första uttagen (efter 6 timmar respektive 1 dygn) för att därefter sjunka till 0,021 för bens(k)fluoranten och 0,012 för bens(k)fluoranten vid det tredje uttaget (dag 3) för att därefter fortsätta vara i denna storleksordning för resterande uttag.

**Tabell 1. Kumulativt utlakade mängder PAH i lakvattnet från sliper Ny A.**

Tid (dygn)	0,25	1	2	3	7	16	31	64
<b>ÄMNE</b>	<b>Kumulativt utlakad mängd (mg/m<sup>2</sup>)</b>							
naftalen	1,53	3,55	6,63	9,55	11,5	12,4	14,0	18,9
acenaftylen	0,464	1,00	2,25	4,95	5,02	<5,02	<5,65	<6,56
acenaften	13,0	27,6	42,1	58,9	72,4	72,8	77,5	93,6
fluoren	6,79	14,6	22,2	30,3	37,4	37,7	40,7	49,8
fenantren	21,5	38,3	62,2	84,4	107	109	118	158
antracen	2,38	5,46	6,53	10,2	11,4	11,4	11,5	13,2
fluoranten	2,21	4,84	7,60	10,5	13,1	13,5	14,9	20,6
pyren	0,622	1,35	2,03	2,90	3,51	3,58	3,87	5,23
^bens(a)antracen	<0,023	<0,045	<0,048	<0,062	<0,066	<0,067	<0,068	<0,069
^krysen	<0,023	<0,045	<0,056	<0,066	<0,078	<0,080	<0,083	<0,107
^bens(b)fluoranten	<0,023	<0,045	<0,046	<0,048	<0,049	<0,050	<0,052	<0,053
^bens(k)fluoranten	<0,023	<0,045	<0,046	<0,047	<0,048	<0,048	<0,049	<0,050
^bens(a)pyren	<0,023	<0,045	<0,046	<0,047	<0,048	<0,048	<0,049	<0,050
^dibens(ah)antracen	<0,023	<0,045	<0,046	<0,047	<0,048	<0,048	<0,049	<0,050
benso(ghi)perylen	<0,023	<0,045	<0,046	<0,047	<0,048	<0,048	<0,049	<0,050
^indeno(123cd)pyren	<0,023	<0,045	<0,046	<0,047	<0,048	<0,048	<0,049	<0,050
PAH, summa 16	48,7	96,9	152	211	261	265	283	363
^PAH, summa canc.	<0,08	<0,16	<0,17	<0,20	<0,21	<0,22	<0,22	<0,25
PAH, summa övriga	48,7	96,9	152	211	261,1	264,9	283,1	362,9

^klassad som cancerogen



Figur 3. Kumulativt uppmätt utlakad mängd 16-PAH i lakvatten.

Tabell 2. Kumulativt utlakade mängder PAH i lakvattnet från sliper Ny B.

Tid (dygn)	0,25	1	2	3	7	16	31	64
<b>ÄMNE</b>	<b>Kumulativt utlakad mängd (mg/m<sup>2</sup>)</b>							
naftalen	3,44	7,20	12,18	18,32	20,3	26,5	<28,7	<29,1
acenaftylen	0,361	0,789	1,726	4,185	4,23	<4,24	<4,56	<4,74
acenaften	13,5	26,6	43,0	63,6	71,0	89,2	105	115
fluoren	6,20	12,47	20,85	29,79	33,5	42,47	50,0	54,9
fenantren	20,86	37,57	64,52	90,23	102	130	154	170
antracen	2,09	4,80	6,00	9,85	10,4	10,8	11,2	11,6
fluoranten	2,59	4,42	7,29	10,2	11,4	15,4	19,4	22,0
pyren	0,73	1,26	1,89	2,73	3,00	3,74	4,57	5,46
^bens(a)antracen	<0,023	<0,043	<0,046	<0,057	<0,058	<0,062	<0,064	<0,067
^krysen	<0,023	<0,043	<0,051	<0,060	<0,064	<0,076	<0,095	<0,107
^bens(b)fluoranten	<0,023	<0,043	<0,045	<0,046	<0,047	<0,048	<0,050	<0,050
^bens(k)fluoranten	<0,023	<0,043	<0,044	<0,046	<0,046	<0,047	<0,048	<0,048
^bens(a)pyren	<0,023	<0,043	<0,044	<0,046	<0,046	<0,047	<0,047	<0,048
^dibens(ah)antracen	<0,023	<0,043	<0,044	<0,046	<0,046	<0,047	<0,048	<0,048
benso(ghi)perylen	<0,0233	<0,043	<0,044	<0,046	<0,046	<0,047	<0,047	<0,048
^indeno(123cd)pyren	<0,023	<0,043	<0,650	<0,651	<0,652	<0,652	<0,653	<0,653
PAH, summa 16	49,6	95,1	157	230	257	324	377	412
^PAH, summa canc.	<0,079	<0,15	<0,16	<0,18	<0,19	<0,20	<0,22	<0,24
PAH, summa övriga	49,6	95,1	157	230	257	324	377	412

^klassad som cancerogen

Tabell 3. Kumulativt utlakade mängder PAH i lakvattnet från sliper Gammal A.

Tid (dygn)	0,25	1	2	3	7	16	31	64
ÄMNE	Kumulativt utlakad mängd (mg/m <sup>2</sup> )							
naftalen	<0,015	<0,030	<0,090	<0,092	<0,105	<0,158	<0,296	<0,312
acenaftylen	0,025	0,068	0,150	0,306	0,342	<0,346	<0,366	<0,401
acenaften	1,02	2,71	7,37	11,5	12,5	12,8	12,8	<12,8
fluoren	0,051	<0,066	<2,39	<3,60	<3,87	<3,87	<3,87	<3,88
fenantren	0,062	0,090	0,440	0,444	0,457	0,458	0,468	<0,513
antracen	0,058	0,172	0,658	1,11	1,24	1,26	1,26	1,26
fluoranten	0,906	2,36	4,43	6,06	6,94	7,59	7,86	7,88
pyren	0,580	1,52	2,87	3,89	4,47	5,29	5,93	6,28
^bens(a)antracen	0,062	0,191	0,387	0,580	0,646	0,701	0,742	0,776
^krysen	0,116	0,372	0,569	0,657	0,709	0,761	0,801	0,830
^bens(b)fluoranten	0,015	0,074	0,186	0,319	<0,375	<0,409	<0,458	<0,493
^bens(k)fluoranten	<0,015	<0,058	<0,119	<0,191	<0,218	<0,235	<0,257	<0,272
^bens(a)pyren	<0,015	<0,030	<0,078	<0,139	<0,161	<0,179	<0,200	<0,217
^dibens(ah)antracen	<0,015	<0,030	<0,039	<0,051	<0,055	<0,057	<0,058	<0,059
benso(ghi)perylene	<0,015	<0,030	<0,059	<0,095	<0,109	<0,116	<0,126	<0,131
^indeno(123cd)pyren	<0,015	<0,030	<0,071	<0,132	<0,151	<0,159	<0,170	<0,175
PAH, summa 16	2,88	7,48	16,87	24,55	27,30	29,21	30,23	30,74
^PAH, summa canc.	0,18	0,56	0,96	1,24	1,35	1,46	1,54	1,61
PAH, summa övriga	2,70	6,92	15,92	23,31	25,95	27,74	28,68	29,13

Tabell 4. Kumulativt utlakade mängder PAH i lakvattnet från sliper Gammal B.

Tid (dygn)	0,25	1	2	3	7	16	31	64
ÄMNE	Kumulativt utlakad mängd (mg/m <sup>2</sup> )							
naftalen	<0,018	<0,038	<0,120	<0,122	<0,148	<0,250	<0,323	<0,352
acenaftylen	0,025	0,063	0,135	0,279	0,317	<0,322	<0,340	<0,410
acenaften	1,04	2,95	7,42	11,1	11,6	11,6	11,6	<11,7
fluoren	<0,018	<0,194	<3,14	<5,09	<5,17	<5,17	<5,17	<5,19
fenantren	0,019	0,088	1,94	3,18	3,19	3,19	3,20	<3,33
antracen	0,063	0,230	0,79	1,37	1,37	1,39	1,39	1,39
fluoranten	0,904	2,812	5,31	7,12	7,72	8,53	8,57	8,75
pyren	0,587	1,81	3,31	4,41	4,77	5,56	5,66	6,03
^bens(a)antracen	0,059	0,215	0,392	0,516	0,541	0,616	0,632	0,654
^krysen	0,199	0,620	0,945	1,031	1,057	1,136	1,159	1,191
^bens(b)fluoranten	<0,018	<0,087	<0,198	<0,284	<0,302	<0,355	<0,399	<0,441
^bens(k)fluoranten	<0,018	<0,066	<0,126	<0,168	<0,177	<0,203	<0,223	<0,243
^bens(a)pyren	<0,018	<0,038	<0,086	<0,117	<0,124	<0,150	<0,167	<0,187
^dibens(ah)antracen	<0,018	<0,038	<0,046	<0,054	<0,055	<0,058	<0,059	<0,060
benso(ghi)perylene	<0,018	<0,038	<0,064	<0,087	<0,090	<0,101	<0,110	<0,117
^indeno(123cd)pyren	<0,018	<0,038	<0,075	<0,114	<0,119	<0,131	<0,140	<0,147
PAH, summa 16	2,90	8,79	20,24	29,01	30,56	32,34	32,55	33,45
^PAH, summa canc.	0,26	0,83	1,34	1,55	1,60	1,75	1,791	1,84
PAH, summa övriga	2,64	7,95	18,90	27,46	28,97	30,59	30,76	31,61

### 3.2 Adsorptionstest

Vid ytutlakningsförsöket med sliper A bestämdes även hur mycket av respektive PAH som fanns på lakkärlets väggar vid uttag av respektive lakvattnet för vidare analys samt för att användas för fastläggningstest på morän med olika organiskt innehåll (Enell m.fl., 2008a). De på kärlets väggar uppmätta halterna finns angivna i Bilaga 1. Mängderna har därefter beräknats till mängd per lakad ytenhet av sliper A. Den totala utlakningen har därefter beräknats som summan



av den mängd av respektive PAH som vid lakutttaget fanns i vattenfas samt den mängd som uppmätts på lakkärlets kant per lakad ytenhet av sliper A.

I Tabell 5 nedan anges total adsorberad mängd (återfunnen på lakustrutningens väggar efter utlakning av sliper Ny A, efter respektive uttag) per lakad ytenhet av sliper Ny A.

**Tabell 5.** Uppmätt mängd PAH som adsorberats på lakkärlet från sliper Ny A vid respektive uttag. Mängden är angiven per ytenhet sliper.

Tid (dygn)	0,25	1	2	3	7	16	31	64
<b>ÄMNE</b>	<b>Adsorberad mängd (mg/m<sup>2</sup>)</b>							
naftalen	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002
acenaftilen	0,013	0,029	0,024	0,028	0,034	0,094	0,073	0,314
acenaften	0,004	0,014	0,003	0,008	0,025	0,060	0,218	0,797
fluoren	0,007	0,033	0,007	0,018	0,061	0,175	0,444	1,845
fenantren	0,276	1,362	0,207	0,636	2,096	3,885	6,061	25,583
antracen	0,033	0,0817	0,049	0,068	0,096	0,196	0,404	1,761
fluoranten	0,561	1,362	0,487	0,835	1,441	2,775	4,849	18,453
pyren	0,192	0,428	0,170	0,278	0,437	0,939	1,576	7,130
^bens(a)antracen	0,007	0,013	0,008	0,010	0,010	0,032	0,057	0,226
^krysen	0,008	0,015	0,010	0,013	0,013	0,037	0,069	0,285
^bens(b)fluoranten	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,009	0,037
^bens(k)fluoranten	0,0006	0,001	0,0009	0,0009	0,0009	0,002	0,005	0,021
^bens(a)pyren	0,0005	0,0009	0,0005	0,0007	0,0006	0,002	0,004	0,017
^dibens(ah)antracen	<0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0006	0,003
benso(ghi)perylene	<0,0004	0,0007	0,0004	0,0005	0,0005	0,001	0,002	0,008
^indeno(123cd)pyren	0,0005	0,001	0,0007	0,0007	0,0008	0,002	0,003	0,012
<b>PAH, summa 16</b>	1,106	3,350	0,974	1,90	4,223	8,196	13,778	56,619
<b>^PAH, summa canc.</b>	0,016	0,035	0,020	0,028	0,026	0,081	0,147	0,604
<b>PAH, summa övriga</b>	1,090	3,315	0,954	1,873	4,197	8,110	13,618	56,200

### 3.3 Resultat från duschning

Nedan ges resultaten från vattnen som duschat en bit av en ny sliper. Halterna är angivna i µg/l. De uppmätta halterna är av samma storleksordning som de halter som uppmätts för de nya sliperbitarna vid uttagen för ytutlakningen i respektive lakutttag (se Bilaga 1). Även om detta var ett lågbudget- och ett snabbtest så tyder resultaten på att även med rinnande vatten, och vid kort kontakttid mellan sliper och vatten, fås en kraftig utlakning (Tabell 6).

**Tabell 6.** Uppmätt koncentration( $\mu\text{g/l}$ )i vatten vid duschning av ny sliper.

Ämne	Rent vatten	1D	2D	4D
naftalen	<0,34	38	23	33
acenaftylen	<0,25	5,8	1,4	2
acenaften	0,089	600	250	330
fluoren	<0,040	250	100	130
fenantren	0,12	920	300	400
antracen	<0,018	63	11	15
fluoranten	0,034	140	41	55
pyren	<0,037	37	9,8	14
^bens(a)antracen	<0,010	1	0,2	0,29
^krysen	<0,016	1,7	0,35	0,5
^bens(b)fluoranten	<0,027	0,26	0,04	0,063
^bens(k)fluoranten	<0,012	0,11	0,017	0,027
^bens(a)pyren	<0,026	0,13	<0,026	0,031
^dibens(ah)antracen	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012
benso(ghi)perylen	<0,010	0,076	0,011	0,019
^indeno(123cd)pyren	<0,010	0,079	<0,010	0,019
PAH, summa 16	0,24	2100	740	980
^PAH, summa canc.	<0,056	3,4	0,61	0,92
PAH, summa övriga	0,24	2100	740	980

## 4 UTVÄRDERING AV RESULTAT OCH DISKUSSION

### 4.1 Utlakade mängder i gammal respektive ny sliper

I Tabell 7 redovisas en sammanställning av genomsnittligt uppmätta kumulativt utlakade mängder i lakvattnen för ett urval tidsintervall från ändbitar av den nyimpregnerade slipern, Ny A samt Ny B, respektive den äldre slipern, Gammal A och Gammal B, baserad på de värden som finns presenterade för varje uttagningstillfälle i Tabell 1 – 4 i avsnitt 3.1 ovan. Som framgår från Tabell 1 – 4 och 6 är det flera av de analyserade PAH-föreningarna som förekommer i halter under analyslaboratoriets rapporteringsgräns. Vid analys av lakvatten från nya sliprar är det framförallt de cancerogena (bens(a)antracen, krysen, bens(b)fluoranten, bens(k)fluoranten, bens(a)pyren, dibens(ah)antracen, indeno(123cd)pyren) samt benso(ghi)perylene som inte förekommer i halter som överstiger rapporteringsgränsen. Detta gäller för samtliga lakvatten som analyserats. Även acenaftilen förekommer vid uttaget efter 16 dagar, samt därefter, i halter som underskrider rapporteringsgränsen. Även för de äldre sliprarna föreligger flera ämnen i halter under rapporteringsgränsen. Sammansättningen av ämnen skiljer sig delvis från utlakade ämnen från den nyimpregnerade slipern, och de ämnen som förekommer i halter under rapporteringsgränsen utgörs för de äldre sliprarna vid samtliga uttag av naftalen, fluoren, bens(b)fluoranten, bens(k)fluoranten, bens(a)pyren, dibens(ah)antracen, indeno(123cd)pyren samt benso(ghi)perylene. Vid uttag efter 64 dagar uppgår inte heller fenantren till halter som överstiger rapporteringsgränsen.

Som framgår av Figur 3 och Tabell 1 – 4 var den totala PAH utlakningen (PAH16) i början av testet nästan 20 gånger högre från ändbitar från den nyimpregnerade slipern än från den äldre. Mot slutet av testet, efter 64 dagar var utlakningen mer än tio gånger större för den nyimpregnerade slipern i förhållande till den äldre. Den högre utlakningen av nyimpregnerad sliper relativt äldre, redan brukade, kan hypotetiskt förklaras med att utlakning redan skett i full skala och att de lättare PAH-föreningarna till stor del har ångat av från den äldre slipern. I Tabell 7 redovisas ångtryck vid 25 °C för de enskilda PAH-föreningarna som analyserats. Avångning är framförallt att förvänta för naftalen, acenaftilen och acenaften. De låga halter som uppmättes av dessa ämnen från äldre sliprar i förhållande till de nyimpregnerade är helt i överensstämmelse med en hög avdunstning med tiden som slipern varit i bruk.

För de tyngre PAH-föreningarna, dvs. för de av 16-PAH-föreningar som klassats som cancerogena föreningar (Naturvårdsverket, 2002), var förhållandet annorlunda. För dessa föreningar var utlakningen störst för ändbitar från den äldre slipern i förhållande till den nyimpregnerade, vilket framgår av Tabell 7. Utlakningen från den äldre slipern i förhållande till nyimpregnerad ökade med tiden. Det är framförallt tydligt att halterna av bens(a)antracen och krysen var betydligt högre i lakvattnen från ändbitar från den äldre slipern jämfört med den nyimpregnerade. Skillnaden kan hypotetiskt bero på förändringar i den kreosot, dvs. i kreosotformuleringen, som används för impregnering idag jämfört med tidigare. Det kan också bero på att gamla sliprar släpper mer fibrer i lakvatten som innehåller dessa PAH-föreningar.

För övriga PAH föreningar kan skillnaderna bero på avdunstning och att utlakning skett med tiden och/eller att det var skillnader i kreosotformulan som använts för impregneringen.

**Tabell 7.** Kumulativt utlakade mängder PAH i lakvattenuttag vid 6 timmar, 7 dygn samt 64 dygn för ny impregnerade sliprar respektive äldre. I tabellen anges också de olika föreningarnas mättnadstryck vid 25 °C.

	Genomsnittligt kumulativt utlakad mängd (mg/m <sup>2</sup> )						Pa
	Ny A samt Ny B			Gammal A samt Gammal B			
Tid (dygn)	0,25	7	64	0,25	7	64	
ÄMNE	Kumulativt utlakad mängd (mg/m <sup>2</sup> )						
naftalen	2,485	15,9	< 24,4	< 0,017	< 0,127	< 0,332	10,9
acenaftilen	0,4125	4,625	< 5,65	0,025	0,3295	< 0,406	-
acenaften	13,25	71,7	104,3	1,03	12,05	< 12,3	0,5
fluoren	6,495	35,45	52,35	< 0,035	< 4,35	< 4,53	0,0886
fenantren	21,18	104,5	164	0,0405	1,8235	< 1,92	0,018
antracen	2,235	10,9	12,4	0,0605	1,305	1,325	7,5 · 10 <sup>-4</sup>
fluoranten	2,4	12,25	21,3	0,905	7,33	8,315	0,254
pyren	0,676	3,255	5,345	0,5835	4,62	6,155	8,86 · 10 <sup>-4</sup>
^bens(a)antracen	< 0,023	< 0,062	< 0,068	0,0605	0,5935	0,715	7,30 · 10 <sup>-6</sup>
^krysen	< 0,023	< 0,071	< 0,107	0,1575	0,883	1,0105	5,70 · 10 <sup>-7</sup>
^bens(b)fluoranten	< 0,023	< 0,048	< 0,0515	< 0,0165	< 0,3385	< 0,467	-
^bens(k)fluoranten	< 0,023	< 0,047	< 0,049	< 0,0165	< 0,1975	< 0,2575	-
^bens(a)pyren	< 0,023	< 0,047	< 0,049	< 0,0165	< 0,1425	< 0,202	8,40 · 10 <sup>-7</sup>
^dibens(ah)antracen	< 0,023	< 0,047	< 0,049	< 0,0165	< 0,055	< 0,0595	3,7 · 10 <sup>-10</sup>
benso(ghi)perylene	< 0,023	< 0,047	< 0,049	< 0,0165	< 0,0995	< 0,124	1,6 · 10 <sup>-8</sup>
^indeno(123cd)pyren	< 0,023	< 0,35	< 0,3515	0,0165	< 0,135	< 0,161	-

## 4.2 Adsorption till väggar

Från tabell 5 kan man avläsa hur mycket som utlakats till vägg vid respektive lakvattenuttag för sliper Ny A. I Tabell 8 anges andelen som uppmäts i vatten i relation till den totalt utlakade mängden (mängd i vatten samt mängd som adsorberats på vägg). Som framgår av Tabell 8 är mängden som i genomsnitt adsorberats på väggarna signifikant. För summa 16 PAH uppgår den till 22 % och för pyren, fluoranten och de av 16-PAH som klassas som cancerogena är det betydligt mer. För vissa av dessa tyngre PAH-föreningar uppgår den till ca 60 %. Naftalen är det ämne som minst adsorberats i relation till vad som återfinns i vattnet vilket kan förklaras med dess höga löslighet och ångtryck.

**Tabell 8.** Andel PAH som finns löst i lakvattnet i förhållande till totalt utlakad mängd.

Tidsperiod	Medelvärde för		
	mängd i vatten/totalt utlakat		
	0 -3 dagar	0 – 7 dagar	0 – 64 dagar
naftalen	0,998	0,998	0,998
acenaftylen	0,97	0,91	0,78
acenaften	1,00	1,00	0,97
fluoren	1,00	1,00	0,92
fenantren	0,97	0,96	0,79
antracen	0,97	0,96	0,71
fluoranten	0,77	0,75	0,54
pyren	0,74	0,71	0,49
^bens(a)antracen	0,56	0,50	0,32
^krysen	0,58	0,55	0,37
^bens(b)fluoranten	0,70	0,63	0,44
^bens(k)fluoranten	0,75	0,67	0,46
^bens(a)pyren	0,79	0,72	0,50
^dibens(ah)antracen	0,85	0,79	0,66
benso(ghi)perylen	0,82	0,76	0,55
^indeno(123cd)pyren	0,77	0,69	0,49
PAH summa 16	0,97	0,96	0,78
^PAH. summa canc.	0,60	0,55	0,36
PAH. summa övriga	0,97	0,96	0,78

### 4.3 Utvärdering av desorption (pseudo första ordningens utlakning)

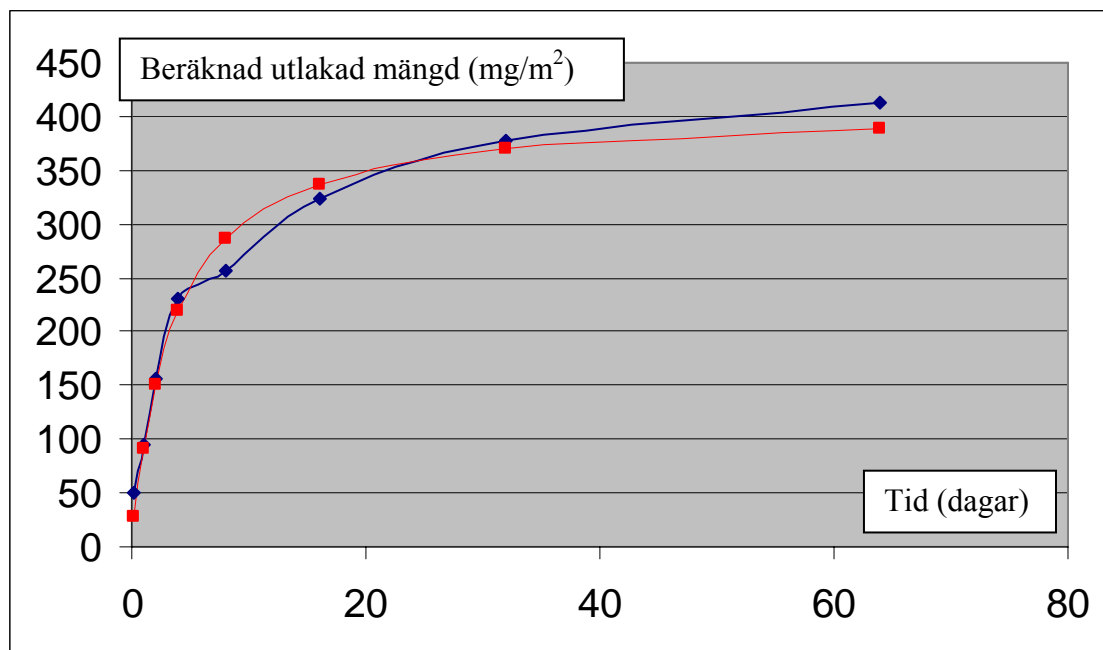
I föreliggande studie filtreras inte vattenprovet eftersom avsikten med studien är att bedöma hur mycket som kan nå marken till följd av nederbörd eller annan kontakt med vatten. Detta gör att det inte går att urskilja om utlakningen är diffusionsstyrd eller ej.

Vid utvärdering av utlakning som kan beskrivas genom pseudo första ordningens utlakning, (dvs det kan förklaras med en desorption från ytan) kan även de ämnen som är partikelbundna i vattnet ingå i analysen. Vid tidigare studier av tjärhaltiga asfaltsmonoliter har man funnit att vid utlakning som kan beskrivas enligt första ordning kan den kumulativt utlakade mängden i lakvattnet,  $C_i(t)$ , vid en viss tid,  $t$ , beräknas enligt ekvation (1) nedan (Larsson, 2004). I denna ekvation är A och B material- och ämnesspecifika konstanter.

$$C_i(t) = A \times t / (B + t) \quad (1)$$

En grov bedömning har här gjorts genom att kurvanpassa uppmätta kumulativt utlakade mängder till ekvation (1) för att ta fram konstanterna A och B för samtliga 16-PAH och samtliga sliprar (Ny A, Ny B, Gammal A, Gammal B). I Tabell 9 redovisas de erhållna värdena på dessa konstanter, tillsammans med kumulativt uppmätt respektive beräknad utlakad mängd enligt ekvation (1). Beräknad mängd har tagits fram med ekvation (1) baserad på de erhållna värdena för konstanterna A respektive B.

I Figur 4 visas motsvarande uppmätt samt beräknad utlakad mängd för summa 16-PAH som funktion av tiden. Beräkningen baseras på den uppmätta utlakade mängden av summa 16-PAH från sliper Ny B. För nya sliprar är utlakad mängd summa 16-PAH densamma som utlakad mängd summa övriga PAH, eftersom det inte fanns några detekterbara halter av cancerogena PAH i lakvattnen från dessa sliprar.

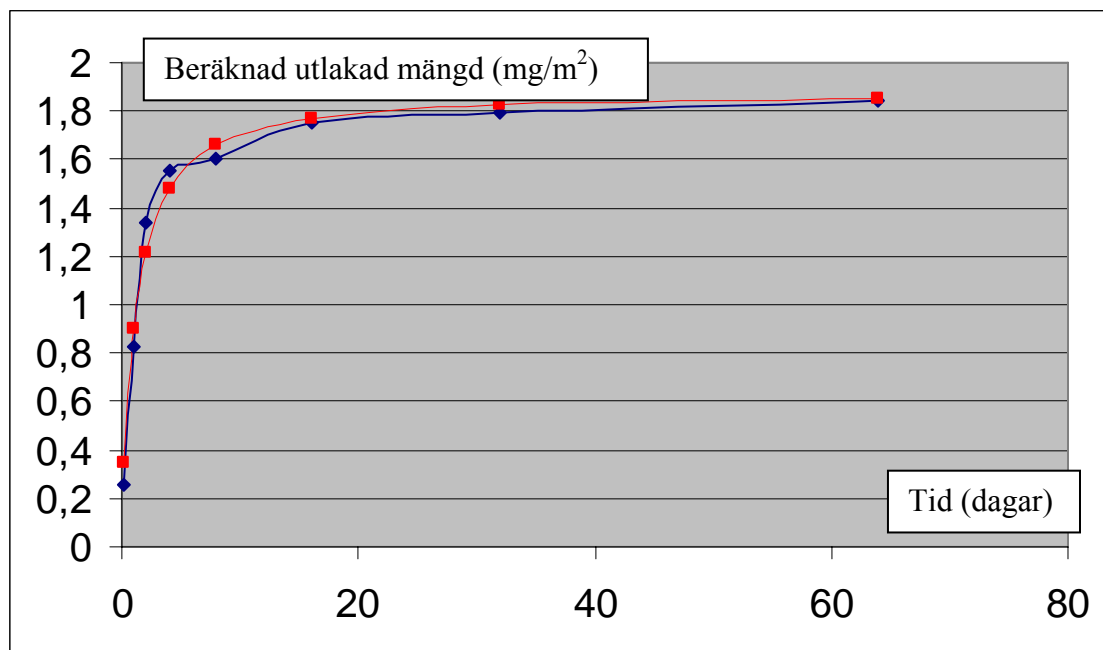


**Figur 4.** Kumulativt uppmätt samt beräknad halt summa övriga 16-PAH för sliper Ny B som funktion av utlakningstid (dygn).

I Figur 5 och Tabell 9 redovisas uppmätta samt beräknade kumulativt utlakade halter för cancerogena PAH tillsammans med erhållna konstanter A och B för cancerogena PAH. Den senare beräkningen baseras på den uppmätta utlakade mängden av dessa PAH från sliper Gammal B.

**Tabell 9.** Uppmätta samt beräknade halter och värden av konstanterna A och B. Till grund för beräkningen är summa 16-PAH för sliper Ny B och summa cancerogena PAH för sliper Gammal B.

Tid för uttag (dygn)	PAH summa 16 Ny B (mg/m <sup>2</sup> )		Cancerogena PAH Gammal B (mg/m <sup>2</sup> )	
	Uppmätt	Beräknad	Uppmätt	Beräknad
0,25	49,6	27,60	0,26	0,35
1	95,1	91,85	0,83	0,90
2	157	150,04	1,34	1,22
4	230	219,61	1,55	1,48
8	257	285,90	1,6	1,66
16	324	336,71	1,75	1,77
32	377	369,55	1,791	1,82
64	412	388,50	1,84	1,85
Beräknande konstanter				
A	409,49		A	1,89
B	3,458		B	1,096



**Figur 5.** Kumulativt uppmätt samt beräknad halt summa cancerogena PAH för sliper Gammal B som funktion av utlakningstid (dygn).

Som framgår av Tabell 9, Figur 4 och 5 finns även enligt denna studie en mycket god korrelation mellan den kurva som beskrivs enligt ekvation (1) och uppmätta halter. De framräknade konstanterna för summa 16-PAH (vilket för ny sliper är samma värden för summa övriga PAH) är 409,493 för A och 3,458 för B. De framräknade konstanterna för cancerogena PAH är för A 1,886 och B 1,096 baserat på utlakning av sliper Gammal B.

Dessa värden har använts i ekvation (1) för att beräkna (prediktera) utlakad mängd som kan förväntas vid en viss tid, även mycket längre tid än den aktuella lakstudien. Beräkningar har gjorts för att uppskatta utlakad mängd 1 år, 10 år och vidare upp till en miljon år. För att beräkna den mängd av 16-PAH som kan komma att lakas ut har A 409,493 samt B 3,458 använts och för cancerogena PAH har A 1,886 och B 1,096 använts i ekvation (1). De på detta sätt uppskattade utlakade mängder visas i Tabell 10. I Tabell 10 visas också hur mycket mer (den procentuella ökningen) som enligt dessa beräkningar kan förväntas ha lakats ut efter ett år, upp till en miljon år, jämfört med efter avslutat lakstudie (64 dygn). Ur Tabell 10 framgår det att den beräknade utlakning är drygt 5 % högre än efter 64 dygn för summa 16-PAH och för de cancerogena PAH föreningarna är ökningen knappt 2 % efter såväl 10 som 10 000 år.

**Tabell 10.** Beräknad utlakad mängd vid utlakningstider från 64 dygn till miljoner år och relativ ökning (%) i förhållande till den mängd som lakats ut efter 64 dygn.

Tid (år)	Beräknad utlakad mängd (mg/m <sup>2</sup> )	Procentuell ökning jämfört med efter 64 dygn	Beräknad utlakad mängd (mg/m <sup>2</sup> )	
			Summa övriga PAH	Summa cancerogena PAH
(64 dygn)	388,499	0	1,855	0
1	405,649	4,4	1,881	1,4
10	409,105	5,3	1,886	1,7
1000	409,489	5,4	1,886	1,7
10 000	409,492	5,4	1,886	1,7
1 000 000	409,493	5,4	1,886	1,7

#### 4.4 Bedömning av mängder som kan nå marken

Ekvation (1) kan användas som en beskrivning för utlakning som en funktion av tiden. Fördelen med att använda ekvation (1) är att den går att använda för alla utlakningsprocesser som kan beskrivas med pseudo första ordnings utlakningsprocess. Det pågår dock sannolikt flera processer än utlakning till lakvätskan från det aktuella materialet. Parallella processer kan vara adsorption (fastläggning) till lakkärlets väggar, avdunstning samt resorption. I verkligheten är således ekvation (1) inte helt adekvat för att uppmätta halter skall beskriva hela systemet utan för att beskriva detta system bör även övriga processer tas hänsyn till såsom avdunstning, väggsorption, resorption, kemisk och fotokemisk nedbrytning

Som framgår av Tabell 8 är mängden som i genomsnitt adsorberats på väggarna signifikant. För summa 16-PAH uppgår den till 22 % och för pyren, fluoranten och de av 16-PAH som klassas som cancerogena är den dessutom större. Kärlet var täckt med plast och aluminiumfolie för att minimera avdunstning samt fotokemiska reaktioner. Viss avdunstning kan ha förekommit som bland annat kan ha resulterat i adsorption på täckfolien.

En bedömning av totalt utlakbart är av betydelse för att bedöma hur mycket förorening som kan nå marken. Enligt beräkning baserad på ekvation (1) i avsnitt 4.3 fås att den beräknade kumulativa utlakning av summa 16-PAH är drygt 5 % högre än efter 64 dygn efter såväl 10 som 10 000 år (se Tabell 10).

Som en konservativ och grov uppskattning av vilka utlakade mängder som kan förväntas för sliprar i bruk utomhus används som räkneexempel resultaten från lakningar av ändbitar av den nyimpregnerade slipern som studerats här. Baserat på maximalt uppmätt utlakad mängd summa 16-PAH per ytenhet i lakvattnet efter 64 dygn (412 mg per kvadratmeter sliper Ny B), att 30 % (uppmätt < 22 %) av totalt utlakad mängd PAH adsorberas på väggarna och att mindre än 10 % (beräknad < 5,4%) kan förväntas ytterligare laka ut med tiden, fås en potentiellt utlakad mängd av 589 mg per kvadratmeter nyimpregnerad sliper för summa 16-PAH.

För nya sliprar var vattenmängden ca 3 liter per lakuttag, och sliperbitarna vägde ca 0,3 kg. Detta ger L/S (mängden vätska, mätt i liter, per mängd fast material, mätt i kg, material från vilken lakningen studeras) av 10 efter första uttaget och av 80 vid sista uttaget efter 64 dygn. Om en sliper vid banvall är ca 1,5 m lång samt har en höjd av 0,15 m och bredd 0,22 m ger detta en total yta av 1,18 m<sup>2</sup>. En sliper antas väga 50 – 75 kg, om densitet 1,4 fås en vikt av 69 kg. Om man ansätter en nederbörds mängd av 600 mm/m<sup>2</sup> och år motsvarar detta ett L/S av 2,9 per år. Det innebär ca 28 år för att uppnå motsvarande L/S som för uttaget efter 64 dygn.

Lakbar ytenhet sliper är 1,18 m<sup>2</sup> per sliper alternativt 1,57 m<sup>2</sup> sliper per kvadratmeter banvall (vid antagandet av 2 sliprar per meter banvall) om samtliga sliperytor antas kunna komma i kontakt med vatten. En antagen utlakad mängd av 589 mg per kvadratmeter sliper ger då att mängden utlakad summa PAH uppgår till 695 mg per sliper, vilket motsvarar mindre än 3 g (2,1 g) per kvadratmeter markyta under slipern. Detta kan vara relevant för fall då en yta är täckt av sliprar för lagring eller liknande. För sliprar på banvall motsvarar denna utlakning 930 mg/kvadratmeter banvall. Denna maximalt utlakade mängd uppnås efter något eller några år och kommer, enligt denna studie, därefter inte att öka nämnvärt.

Om man antar att de utlakade massorna når grus eller sand med en densitet av 1,6 fås att genomsnitthalten i marken kommer att vara under gällande riktvärde för känslig mark (20 mg/kg TS, Naturvårdsverket 2002) om utlakade mängder fördelas på ett djup av 1 dm på en markyta motsvarande den längre sliperytan (till exempel vid lagring). Motsvarande djup uppgår till knappt 4 cm om man betraktar genomsnittlig halt per ytenhet banvall (2 sliprar per meter banvall).



**Tabell 11.** Beräknade halter för olika djup som den kumulativa utlakade mängden kan antas sprida sig.

Djup	Beräknad halt per kvadrater banvall	Beräknad halt per kvadratmeter yta täckt av sliprar
1 cm	57,7 mg/kg TS	192,5 mg/kg TS
1 dm	5,8 mg/kg TS	19,2 mg/kg TS
1 m	0,6 mg/kg TS	1,9 mg/kg TS

Det måste påpekas att denna beräkning är mycket konservativ. Beräkningen baseras på att utlakningen är högre än beräknad efter 1000-tals år (10 % ansatt istället för 5,4 %), hänsyn har tagits till den mängd som vid utlakningsförsöket finns adsorberat till väggar (30 % ansatt istället för 22 %) och även de utlakade PAH som är partikulärt bundna ingår i bedömningen. Vidare är beräkningen gjord för antagandet att samtliga sliperitor är tillgängliga för utlakning (även de som är riktade nedåt marken). Trots detta fås beräknade halter som redan vid ett spridningsdjup av 1 dm underskrider gällande riktvärde för summa övriga PAH vid känslig markanvändning (per sliper) och vid ett djup av ca 5 cm om man betraktar genomsnittlig halt per ytenhet banvall. Om jämförelse istället görs för mindre känslig markanvändning, där accepterade halt är dubbelt så hög än för känslig markanvändning, krävs endast halva spridningsdjupet för att gällande riktvärden inte skall överskridas.

För bedömning av de cancerogena PAH-föreningarna har utlakning från äldre sliprar använts som beräkningsgrund. L/S i lakförsök med de äldre sliperbitarna är mycket lägre än för nya sliperbitar. L/S max för de äldre är ca 13. En bedömning av utlakad mängd som funktion av mängd lakvatten, istället för som funktion av tiden, ger andra konstanter A' samt B' (3,482 respektive 9,659). Den beräknade maximala utlakningen av cancerogena PAH kan därmed uppgå till 3,48 mg/m<sup>2</sup> vilket uppnås efter mer än 3000 år baserat på en nederbörds mängd av 600 mm/m<sup>2</sup> och år. Om hänsyn tas till adsorption och att alla ytor antas kunna komma i kontakt med vatten ansätts därför en största utlakad mängd av 5 mg/m<sup>2</sup> sliper vilket ger att gällande riktvärde för känslig markanvändning (0,3 mg/kg TS) uppnås vid ett spridningsdjup av 3 cm. För större djup minskar koncentrationen. För mindre känslig markanvändning är riktvärdet 7 mg/kg TS. Under i övrigt samma beräkningar innebär detta att det endast krävs ett spridningsdjup av ca 2 mm för att riktvärdet inte skall överskridas.

## 5 SLUTSATSER

Det finns en mätbar utlakning av PAH från kreosotimpregnerade sliprar. Utlakningen är betydligt större från nyimpregnerade sliprar än från äldre sliprar som varit i bruk. Från ytutlakningsförsöken framgår också att lätta ämnen är av betydligt lägre koncentration i lakvätskan från äldre sliper än från nyimpregnerad sliper vilket kan förklaras med att dessa ämnen förångats samt utlakats då slipern varit i bruk. Därtill kan tiden hypotetiskt orsakat starkare sorption till slipermateriallet.

Även vid duschning är de uppmätta halterna av samma storleksordning som de halter som uppmäts för motsvarande sliperbitar vid uttagen för ytutlakningen. Detta tyder på att det är en snabb process som dominerar utlakningen av PAH från kreosotimpregnerade sliprar. Adsorptionstesterna i denna studie tyder på att upp till 22 % av utlakad mängd av summa 16-PAH adsorberas på lakkärlens väggar, men att för de tyngre PAH-föreningarna kan en ännu större andel adsorberas.

Beräkning baserad på konservativa antaganden och resultaten av denna studie, där även partikulärt bundet utlakade PAH analyserats, visar på att mängderna som når marken från kreosotimpregnerad sliper i banvall inte innebär att gällande riktvärden för känslig mark överskrids till följd av utlakningen. Beräkningen har gjorts för att beskriva kumulativt utlakade mängder på lång sikt utan hänsyn till nedbrytning i marken. Den beräknade halten av summa övriga PAH i marken längs en banvall föreligger enligt denna beräkning under gällande riktvärde för känslig markanvändning vid ett ansatt spridningsdjup av 5 cm. Koncentrationen avtar om ett större djup antas. Utlakningen av cancerogena PAH är mycket låg och även ett spridningsdjup av mindre än 3 cm respektive 2 mm ger halter lägre än gällande riktvärde för känslig respektive mindre känslig mark.

Denna studie har utförts för att bedöma hur mycket PAH som kan nå marken i samband med vattenkontakt. Fastläggning och desorption av PAH i mark beskrivs i rapporten av Enell m.fl. (2008a).

## REFERENSER

- Andersson-Sköld, Y., Göransson, G., Enell, A., Larsson, L. (2007). Kreosotimpregnerade sli-prars inverkan på spridning av kreosot i mark- litteraturstudie, Statens geotekniska institut, SGI, Varia 577, Linköping.
- Beuving, E., Veenstra, S., van der Zwn, J. (1996). Reuse of tar bearing asphalt in the Nether-lands, Proceedings Eurasphalt & Eurobitume Congress. E& E.3.042.
- Bowen, C., de Groot, P., Brandt, C. (2000). Health safety and the environment – Aqueous leach- ing of PAC's from bitumen. Porecoedings 2<sup>nd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelo- na.
- Elert, M. (2006). Riktvärden föreslagna för grundvatten vid bensinstationer, Kemakta AR 2005- 31, Kemakta, Stockholm.
- Engbers, G. och Smallegange, J. (1996). The development of emulscement®: A subbase mate- rial with a future. Proceedings Eurasphalt & Eurobitume Congress. E& E.3.043.
- Enell, A., Hemström, K., Nilsson, P., Andersson-Sköld, Y., Larsson, L. (2008a). Delrapport av FoU-projekt Banverket (Banverket, S 05-3053/AL50), Fastläggnings- och desorptionstest av PAH. Statens geotekniska institut, SGI Varia 588, Linköping.
- Enell, A., Hemström, K., Larsson, L., Bendz, D. (2008b). Laktest för ickeflyktiga organiska föroreningar -Utvärdering och rekommendationer. Preliminär titel. Under bearbetning. Dnr. 1-0405-0380. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Kiilerich, O. and Arvin, E. (1996). Ground water contamination from creosote sites. Water Mo- nitoring Review, 6 (1), 112-117.
- Larsson, L. (2002). Ytutlakning av återvunnen asfalt innehållande stenkols tjära – Lägesrapport 2001, Statens geotekniska institut, SGI, Dnr 1-0009-0590, Linköping.
- Larsson, L. (2004) Ytutlakning av återvunnen asfalt innehållande stenkols tjära – Lägesrapport 2003, Statens geotekniska institut, SGI, Varia 542, Linköping.
- Naturvårdsverket (2002). Bedömning av föroreningsnivå – sammanställning av följande doku- ment: Naturvårdsverket, 1996 (Development of generic guideline valus, Report 4639), Na- turvårdsverket, 1998, Förslag till riktvärde för förorenade bensinstationer, Report 4889, Na- turvårdsverket, 1999, Bedömningsgrunder för miljö kvaliteten – Grundvatten, Report 4915 (in Swedish), [www.naturvardsverket.se\(dokument/lagar/bedgrund/foromr/, 2006-09-22](http://www.naturvardsverket.se(dokument/lagar/bedgrund/foromr/, 2006-09-22).
- Wadstein, E., Enell, A., Carlsson, C., Bendz, D. (2007). Karaktärisering av förorenat jordmate- rial från Åsbro. Rapport på uppdrag åt Vattenfall Power Consultant AB. Statens geotekniska institut.
- WHO (2004). Coal tar creosote. Concise international chemical assessment document 62. First draft prepared by Melber, CH., Kielhorn, J. och Mangelsdorf, I., Fraunhofer institute of Toxicology and Experimental Medicine, Hanover, Germany.



Statens geotekniska institut  
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: [sgi@swedgeo.se](mailto:sgi@swedgeo.se) Internet: [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)