VTI rapport 641
Utgivningsår 2009

www.vti.se/publikationer

Förutsägelse av långtidsegenskaper hos restprodukter

Teknik och miljö i vägar

Maria Arm
Pascal Suer
Håkan Arvidsson
Jan-Erik Lindqvist
Paul Frogner-Kockum
Lennart Larsson
Cecilia Toomväli

värmeforsk
VÄRMETEKNISK FORSKNING OCH UTVECKLING

Vägverket

formas
Forskningsrådet för miljö, areella näringar och samhällsbyggande, Formas

SP

vti
FINDING A BETTER WAY

SGI

Utgivare:

vti

581 95 Linköping

Publikation:
VTI rapport 641

Utgivningsår:	**Projektnummer:**	**Dnr:**
2009	60857	2005/0316-29

Projektnamn:
Förutsägelse av långtidsegenskaper hos restprodukter – teknik och miljö i vägar

Författare:
Maria Arm, Pascal Suer, Håkan Arvidsson, Jan-Erik Lindqvist, Paul Frogner-Kockum, Lennart Larsson, Cecilia Toomväli

Uppdragsgivare:
Värmeforsk, Vägverket, Formas

Titel:
Förutsägelse av långtidsegenskaper hos restprodukter – Teknik och miljö i vägar

Referat (bakgrund, syfte, metod, resultat) max 200 ord:

Trots mångårig forskning om restprodukter och deras användningsmöjligheter är kunskapen om restprodukternas långtidsegenskaper otillräcklig. Idag är det därför inte möjligt att förutspå framtida hållfasthets- och lakningsegenskaper. För att bättre förstå processerna bakom materialåldrandet och för att föreslå en laboratoriemetod för accelererat åldrande av färska restprodukter har projektet studerat två restprodukter – stålslagg från skrotbaserad tillverkning av stål i ljusbågsugn samt bottenaska från förbränning av hushållsavfall.

Naturligt åldrat material grävdes upp från förstärkningslagret i två stycken 10–15 år gamla provvägar. Materialets egenskaper jämfördes med egenskaperna hos motsvarande färska material från upplag. Materialen karakteriserades i laboratoriet med avseende på kornstorleksfördelning, vattenkvot, packningsegenskaper, deformationsegenskaper vid dynamiskt treaxialtest, mineralogi och mikrostruktur i SEM och XRD, kemisk sammansättning, pH och lakegenskaper. Bottenaskan undersöktes också med avseende på elektrisk konduktivitet och innehåll av organiskt material. Dessutom gjordes pH-kartering i båda vägarna och konduktivitetskartering i bottenaskvägen.

Undersökningsresultaten bekräftade bland annat att vägmaterial som ligger i vägkanten åldras fortare än vägmaterial som ligger i vägmitten och att detta avspeglas i lakningsegenskaperna.

Nyckelord:
Stålslagg, bottenaska, accelererad åldring, restprodukt, långtidsegenskaper

ISSN:	**Språk:**	**Antal sidor:**
0347-6030	Svenska	90 + 6 bilagor

Publisher:

vti

SE-581 95 Linköping Sweden

Publication:
VTI rapport 641

Published:	**Project code:**	**Dnr:**
2009	60857	2005/0316-29

Project:
Förutsägelse av långtidsegenskaper hos restprodukter – teknik och miljö i vägar

Author:
Maria Arm, Pascal Suer, Håkan Arvidsson, Jan-Erik Lindqvist, Paul Frogner-Kockum, Lennart Larsson, Cecilia Toomväli

Sponsor:
Värmeforsk, Swedish Road Administration, Formas

Title:
Prediction of long-term properties of by-products – Technical and environmental properties in roads

Abstract (background, aim, method, result) max 200 words:

In Sweden, use of industrial by-products is still hindered by concern for their long-term properties. This report describes a three-year research project aiming to identify the key processes of ageing related to the usefulness of by-products in roads; investigate the consequences of these processes for technical and environmental properties of the by-products, and propose a method for accelerated ageing to predict long-term properties.

The project has compared naturally aged samples of two by-products used as sub-bases in exist-ing asphalt paved roads with samples of fresh by-products from producers' piles. Steel slag of electric arc furnace type and municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash were chosen. The samples were thoroughly characterized in order to identify which ageing processes had been crucial.

The working hypothesis was that ageing processes lead to changes in pH, effective particle size and mineralogy, which in turn determine leaching, stiffness and stability of the material.

One of the conclusions from the project is that the test results confirmed that the pavement edge material is ageing faster than the road centre material is.

Keywords:
Steel slag, municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash, accelerated ageing, by-product, long-term properties

ISSN:	**Language:**	**No. of pages:**
0347-6030	Swedish	90 + 6 Appendices

Förord

”Förutsägelse av långtidsegenskaper hos restprodukter – teknik och miljö i vägar” är ett projekt som har genomförts under perioden 2006–2008 av Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) och Statens geotekniska institut (SGI) i samarbete med Sveriges tekniska forskningsinstitut (SP).

Projektet har samordnats av Karl-Johan Loorents, VTI, (2006–2007) och Gunilla Franzén, VTI, (2008) och projektgruppen har dessutom bestått av:

- fältarbeten: Håkan Arvidsson, VTI, Martin Lyth, SGI, och Kent Enkell, VTI
- vägteknik: Håkan Arvidsson, VTI, och Maria Arm, SGI
- mineralogi och mikrostruktur: Jan-Erik Lindqvist, SP, Karl-Johan Loorents, VTI, och Paul Frogner-Kockum, SGI
- kemi och åldringsmetoder: Pascal Suèr, SGI, Cecilia Toomväli, SGI, Lennart Larsson, SGI, m.fl.

Maria Arm har varit huvudförfattare och Lennart Larsson, SGI, har tillsammans med referensgruppen varit granskare av slutrapporten.

Till projektgruppen har en referensgrupp varit knuten bestående av:

Åsa Lindgren, Vägverket

Peter Flyhammar, Flyhammar Resurs & Miljö

Raul Grönholm, SYSAV Utveckling

Torbjörn Sörhuus, Ovako

Hanna Janis, Vattenfall

Ett stort tack riktas till dessa för givande synpunkter under projektets gång och även till Claes Ribbing, Värmeforsks programansvarige, som deltagit aktivt i referensgruppen.

Projektet har samfinansierats av Vägverket, Formas, Värmeforsk, Sveriges Ingenjörers Miljöfond samt SGI och VTI.

Rapporten ges även som en Värmeforskrapport (projektnummer Q6-625).

Linköping december 2008

Gunilla Franzén Maria Arm

Omslagsfoto: Kent Enkell, VTI

Kvalitetsgranskning

Ett referensgruppsmöte genomfördes i Linköping den 27 november 2008, där rapporten diskuterades och referensgruppen lämnade sina granskningskommentarer. Maria Arm, SGI, har sedan inarbetat samtliga kommentarer i rapporten, som färdigställdes 2009-01-20. Projektledaren på VTI, Gunilla Franzéns, närmaste chef, Safwat Said, har sedan godkänt för publicering 2009-01-22.

Quality review

The report was discussed and the reference group gave their comments on the report at the reference group meeting in Linköping 27th of November 2008.

Maria Arm, SGI, has made alternations to the final manuscript of the report. The research director of the project manager, Safwat Said, examined and approved the report for publication 22nd of January 2009.

Innehållsförteckning

Sammanfattning 5

Summary 7

1 Inledning 9
1.1 Bakgrund 9
1.2 Problem 10
1.3 Syfte 10
1.4 Avgränsning 10
1.5 Begrepp och definitioner 11

2 Metodik för projektet 13

3 Provtagning i väg och upplag 14
3.1 Provtagning av stålslagg i väg 14
3.2 Provtagning av ”färsk” stålslagg i upplag 17
3.3 Provtagning av bottenaska i väg 17
3.4 Provtagning av ”färsk” bottenaska i upplag 20

4 Testmetoder för karakterisering av material 22
4.1 Bestämning av mineralogi och mikrostruktur 22
4.2 Bestämning av styvhet och stabilitet 24
4.3 Bestämning av kemisk sammansättning och innehåll av organiskt material samt fältbestämning av pH och elektrisk konduktivitet 26
4.4 Bestämning av utlakningsegenskaper 27

5 Egenskaper hos stålslaggprov 29
5.1 Stålslagg från vägen 29
5.2 Stålslagg från upplag 36

6 Diskussion av stålslaggresultat 40
6.1 Skillnader i kornstorleksfördelning, packningsegenskaper, korndensitet och vattenabsorption 40
6.2 Skillnader i mineralogi och mikrostruktur 40
6.3 Skillnader i styvhet och stabilitet 41
6.4 Vattenexponering i stålslaggvägen 43
6.5 Skillnader i pH och lakning av pH-beroende metaller 44
6.6 Svavellakning från stålslaggen 46
6.7 Vägsläntens betydelse för åldringsprocessen 47

7 Snabbåldring av stålslagg 48
7.1 Utgångsmaterial 48
7.2 Genomförande 49
7.3 Resultat och verifiering 49

8 Egenskaper hos bottenaskprov 52
8.1 Bottenaska från vägen 52
8.2 Bottenaska från upplag 61

9 Diskussion av bottenaskans resultat 65
9.1 Skillnader i kornstorleksfördelning och packningsegenskaper 65
9.2 Mikrostrukturella och mikrokemiska åldringsprocesser 65
9.3 Skillnader i styvhet och stabilitet 66

9.4 Vattenexponering i bottenaskvägen 68
9.5 Skillnader i pH och utlakning av pH-beroende metaller 69
9.6 Skillnader i utlakning av organiskt material 71
9.7 Utlakning av sulfat, kalcium och aluminium från bottenaskan 71
9.8 Vägsläntens betydelse för åldringsprocessen 72
10 Snabbåldring av bottenaska 73
10.1 Utgångsmaterial och genomförande 73
10.2 Resultat 75
10.3 Diskussion och verifiering: Effekter av snabbåldring på utlakning 77
11 Slutsatser 81
12 Rekommendationer 84
13 Förslag till fortsatt forskningsarbete 85
Referenser 86

Bilagor

Bilaga A Framställningsprocess för stålslagg och bottenaska
Bilaga B Provförteckning
Bilaga C Packningsdata för treaxprovkroppar
Bilaga D Resultat från kemisk analys av stålslagg
Bilaga E Resultat från kemisk analys av bottenaska
Bilaga F Resultat från perkolationstest efter snabbåldring av bottenaska

Förutsägelse av långtidsegenskaper hos restprodukter – Teknik och miljö i vägar

av Maria Arm[*], Pascal Suèr[*] Håkan Arvidsson, Jan-Erik Lindqvist[**],
Paul Frogner-Kockum[*], Lennart Larsson[*] och Cecilia Toomväli[*]
VTI
581 95 Linköping

Sammanfattning

Trots mångårig forskning om restprodukter och deras användningsmöjligheter är kunskapen om restprodukternas långtidsegenskaper otillräcklig. Idag är det därför inte möjligt att förutspå framtida hållfasthets- och lakningsegenskaper. För att bättre förstå processerna bakom materialåldrandet och för att föreslå en laboratoriemetod för accelererat åldrande av färska restprodukter har projektet studerat två restprodukter – stålslagg från skrotbaserad tillverkning av stål i ljusbågsugn samt bottenaska från förbränning av hushållsavfall.

Naturligt åldrat material grävdes upp från förstärkningslagret i två stycken 10–15 år gamla provvägar. Materialets egenskaper jämfördes med egenskaperna hos motsvarande färska material från upplag. Materialen karakteriserades i laboratoriet med avseende på kornstorleksfördelning, vattenkvot, packningsegenskaper, deformationsegenskaper vid dynamiskt treaxialtest, mineralogi och mikrostruktur i SEM och XRD, kemisk sammansättning, pH och lakegenskaper. Bottenaskan undersöktes också med avseende på elektrisk konduktivitet och innehåll av organiskt material. Dessutom gjordes pH-kartering i båda vägarna och konduktivitetskartering i bottenaskvägen.

Undersökningsresultaten bekräftade att vägmaterial som ligger i vägkanten åldras fortare än vägmaterial som ligger i vägmitten och att detta avspeglas i lakningsegenskaperna. Dessutom konstaterades följande:

- Stålslagg från vägkanten visade spår av karbonatisering och lakning medan slagg från vägmitten hade samma egenskaper som färsk slagg
- Utlakningsegenskaperna för bottenaskan hade inte förändrats nämnvärt under de tio åren i vägen, vilket betyder att lakegenskaperna på lång sikt kan studeras med hjälp av enbart perkolationstester. För styvhets- och stabilitetsstudier behövs däremot konstgjord åldring. Bottenaska från vägkanten var mer åldrad än bottenaska från vägmitt, men ingen pH-skillnad kunde observeras utan skillnaden antogs bero på olika vattenexponering
- Vattenexponeringen för de båda förstärkningslagren efter cirka tio år i en asfaltbelagd väg uppskattades till mindre än 0,1–0,5 liter per kg material
- Eventuella bärighetspåverkande åldringsreaktioner kunde inte utläsas i materialen eftersom sådana reaktioner störs vid provkroppsinpackning och kräver att materialet har åldrats i inpackat tillstånd

[*] Statens Geotekniska Institut, SGI, Linköping

[**] Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP, Borås

- Åldringsreaktioner i stålslagg och bottenaska som lagrats på upplag före användningen ger ingen volymökning i vägen som är tillräckligt snabb eller stor för att kunna påverka ovanförliggande lager med sprickbildning eller liknande skador
- När egenskaperna hos åldrat material ska studeras, ska inte partiklarna krossas före provning och analys.

Metoden för accelererad åldring av stålslagg utformades för att uppnå den karbonatisering (sänkning av pH) och lakning som hade observerats i vägkantmaterialet. Snabbåldring genom behandling med koldioxid vid måttlig fukttillsats och 40°C värme i en vecka visade bäst resultat av de metoder som testades. Metoden kan förbättras och verifieras ytterligare före användning, till exempel med andra men liknande material.

Metoden för accelererad åldring av bottenaska utformades för att åstadkomma de puzzolana reaktioner som hade observerats vid SEM-analyser av ostörda provkroppar. Inledande försök visade vilka ämnen som kunde åstadkomma önskade reaktioner och efterföljande perkolationstest visade effekten på lakningsegenskaperna. Emellertid simulerade inte snabbåldringen med hydroxidtillsats vad som observerats i vägmaterialet. I stället för ökad fastläggning åstadkoms ökad mobilisering för de flesta spårämnena, vilket inte var en effekt av pH eller L/S. Denna reaktion gjorde att effekten av ökade puzzolana reaktioner på metallerna inte kunde observeras. Dessutom skapades nya utfällningar som hindrade utlakningen av lättlösliga ämnen, i motsats till vad som observerats i vägmaterialet.

Prediction of long-term properties of by-products – Technical and environmental properties in roads

by Maria Arm[*], Pascal Suèr[*] Håkan Arvidsson, Jan-Erik Lindqvist[**],
Paul Frogner-Kockum[*], Lennart Larsson[*] and Cecilia Toomväli[*]
VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute)
SE-581 95 Linköping Sweden

Summary

In Sweden, use of industrial by-products is still hindered by concern for their long-term properties. This report describes a three-year research project aiming to:

- identify the key processes of ageing related to the usefulness of by-products in roads
- investigate the consequences of these processes for technical and environmental properties of the by-products
- propose a method for accelerated ageing to predict long-term properties.

The project has compared naturally aged samples of two by-products used as sub-bases in existing asphalt paved roads with samples of fresh by-products from producers' piles. Steel slag of electric arc furnace type and municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash were chosen. The samples were thoroughly characterized in order to identify which ageing processes had been crucial.

The following properties were studied: grain size distribution, water content, compaction properties, deformation properties according to cyclic load triaxial tests, mineralogy and micro structure according to SEM and XRD, chemical composition, pH and leaching properties. For the bottom ash also organic content and electric conductivity were studied. Furthermore the pH was mapped in both roads and the conductivity was mapped in the bottom ash road.

The working hypothesis was that ageing processes lead to changes in pH, effective particle size and mineralogy, which in turn determine leaching, stiffness and stability of the material. The test results confirmed that the pavement edge material is ageing faster than the road centre material is. In addition it was concluded that:

- Steel slag from the pavement edge showed traces of carbonation and leaching processes, whereas slag from the road centre was identical to fresh slag.
- Bottom ash from the pavement edge was more aged than bottom ash from the road centre. However, no difference in pH was found, instead the differences were said to be caused by differences in water exposure.
- Water exposure to the subbase materials after ten years in an asphalt paved road was calculated to less than 0,1–0,5 litres per kg.

---

[*] Swedish Geotechnical Institute, SGI, Linköping

[**] SP Technical Research Institute of Sweden, Borås

- Ageing reactions in the subbase of steel slag and MSWI bottom ash were too small to be verified on laboratory prepared specimens by measurement of deformation properties under loaded conditions.
- When properties of aged material are studied, particles should not be crushed before test or examination.

The accelerated ageing test for steel slag was set up to achieve the carbonation (decrease in pH) and leaching that was observed in the pavement edge material. The best result (lowest pH values) were achieved with exposure to carbon dioxide for seven days at moderate moisture content and 40°C. The effects on leaching were reproduced for all macro elements except sulphur, including the calcium depletion of calcium silicates. Most trace elements, for example copper, vanadium and led, but not chrome, could also be reproduced.

The accelerated ageing test for bottom ash was set up to achieve the pozzolan reactions that were observed in SEM analyses of in-situ specimens. Initial tests showed which additives could create the reactions and column tests showed the effect on leaching properties. However, the chosen treatment with hydroxide addition did not simulate the observed leaching properties. Most trace elements were mobilised in stead of immobilised which hid the effect of aluminium oxidation and pozzolan reactions. Besides, precipitates were created hindering the leaching of soluble elements observed in the road material.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Trots mångårig forskning om restprodukter och deras användningsmöjligheter är kunskapen om restprodukternas långtidsegenskaper otillräcklig. Idag är det därför inte möjligt att förutspå framtida hållfasthets- och lakegenskaper.

Forskningen har hittills ägnats åt att studera antingen mekaniska eller miljömässiga egenskaper var för sig. Det har visats att restprodukter såsom krossad betong, masugnsslagg och askor är mer nedbrytnings- och lakningsbenägna än naturballast som normalt används i Sverige [13].

Flera europeiska länder har en lång och bred erfarenhet av restproduktsanvändning i vägar och en del länder, till exempel Danmark, Tyskland och Nederländerna, har fastställt nationella regler för användningen. Reglerna föreskriver provning av den färska produktens mekaniska och miljömässiga egenskaper. För de mekaniska egenskaperna används samma europastandardiserade testmetoder som används för naturballast, men dessa metoder tar inte hänsyn till åldringsprocesser hos restprodukterna, till exempel karbonatisering eller nedbrytning till finmaterial som inte är tjälfarligt.

Under årens lopp har man upptäckt att lagring förbättrar restprodukternas tekniska och miljömässiga egenskaper. Därför brukar de lagras en tid före användning så att vissa åldringsreaktioner hinner uppträda, till exempel minskar problemen med svällning och lakning av metaller med lagringstiden.

En viktig egenskap som påverkar lakning och geotekniska egenskaper är kornstorleken. En minskning av kornstorleken på grund av att porösa partiklar krossas ned under packning har observerats hos krossad betong och askor [1]. Karbonatisering av bottenaska ökar fixeringen av flera mineral, vilket tillsammans med mineralinnehållet och pH har stor inverkan på askans lakegenskaper [32], [16], [27].

Kända kritiska processer, såsom höjd temperatur och ökat tryck, kan användas för att efterlikna och accelerera materialförändringar. Behandling med luft har föreslagits för att uppnå karbonatisering med syfte att förbättra deponeringsförutsättningarna [25]. Karbonatisering av bottenaska och effekterna av karbonatisering på lakningsegenskaper har beskrivits i flera studier [21], [8], [12], [31].

På senare tid har forskningen ägnats åt att utveckla metoder för accelererad åldring i laboratoriet. Hittills har arbetet koncentrerats på lakningsegenskaper utan hänsyn till tekniska egenskaper. Mostbauer m.fl. testade åldring genom att behandla aska med vatten som mättats med koldioxid, syrgas och kvävgas och även genom upprepad vätning och torkning [22]. Carter m.fl. kom fram till att en kombination av karbonatisering och konstgjord åldring genom höjd temperatur och ökat tryck minskade blylakningen mer än de båda metoderna var för sig [7]. Polettini och Pomi fann att fyra dagars luftbehandling av bottenaska gav samma buffringsegenskaper som hos naturligt åldrad aska [26]. Van Gerven m.fl. noterade att karbonatisering av fuktig aska med 10 % koldioxid vid 50°C gav bäst lakningsresultat – minskad koppar- och bariumlakning, men ökad kromlakning [33].

Flera provsträckor med restprodukter i de obundna lagren har byggts för att jämföra de tekniska och miljömässiga egenskaperna med motsvarande hos naturballast, till exempel i Umeå [19]. Oftast följs provsträckorna bara i två eller tre år efter byggandet, men några sträckor har följts upp under en längre tid och är därför värdefulla vid studier av åldringsegenskaper.

Materialprov har också tagits upp från gamla provvägar [28], [10], [6]. I dessa studier har lakningsegenskaperna studerats genom laktester på uppgrävt material, men för att verkligen förstå åldringsprocesserna måste en omfattande undersökning göras på varje provväg. Även om ett sådant projekt vore önskvärt skulle det inte göra det möjligt att förutspå långtidsegenskaperna hos dagens restprodukter, eftersom dessa skiljer sig från vad som användes i gamla provvägar. Förändringar i produktionsprocessen har påverkat materialegenskaperna. Detta gäller både för stålslagg och för bottenaska från sopförbränning.

Slutligen, eftersom de tekniska och miljömässiga egenskaperna hos de flesta restprodukter förändras under åldringen finns det ett stort behov av en metod som kan simulera dessa effekter.

1.2 Problem

Användningen av industriella restprodukter såsom stålslagg och förbränningsaskor kräver mer kunskap om materialens långtidsegenskaper.

1.3 Syfte

Syftet med projektet är

- att öka kunskapen om och förstå processerna bakom restprodukters långtidsegenskaper
- att föreslå en laboratoriemetod för accelererat åldrande för att kunna förutsäga långtidsegenskaper hos färska restprodukter

1.4 Avgränsning

I projektet har två restprodukter studerats, stålslagg av LB-typ, dvs. slagg från skrotbaserad tillverkning av stål i ljusbågsugn, samt bottenaska från förbränning av hushållsavfall.

1.5 Begrepp och definitioner

I rapporten används flera begrepp som kanske inte är allmänt kända. Här beskrivs projektgruppens definitioner av använda begrepp.

Begrepp	**Definition**
Alkalinitet	Den sammanlagda koncentrationen av hydroxid och karbonater i en lösning. I ett fast material är det ett mått på buffringsförmågan.
Bottenaska	Restmaterial som tas ut i botten av pannan vid förbränning av fasta bränslen. I denna rapport avses enbart bottenaska från förbränning av fast hushållsavfall, s.k. slaggrus.
Buffringsförmåga	Förmåga att motstå en pH-sänkning.
Deviatorspänning	Skillnaden mellan den största och den minsta huvudspänningen som verkar på ett material.
DOC	Dissolved organic content, dvs. löst organiskt material.
Ettringit	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26\ H_2O$. Ett mineral som bildas i portlandcement när denna hydreras. Mineralet bildar stavformade kristaller som ger en volymökning vid bildandet. Ettringit bildas vid kanterna på mikroporer, där mindre rörliga ämnen som aluminium och svavel kan komma i kontakt med kalcium och hydroxidjoner.
Finmaterialhalt	Halt av material med kornstorlek mindre än 0,063 mm, dvs. mineraljordsfraktionerna ler och silt. Anges i viktprocent.
Gips	Ett vanligt namn på mineralet kalciumsulfat, $CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$. Det skulle också kunna vara andra kalciumsulfatmineral såsom anhydrit, $CaSO_4$, metoderna skiljer inte på dessa två.
Graderingstal	Beskrivning av en kornstorleksfördelning. Kvoten mellan d_{60} och d_{10}. D_{60} innebär maskvidden på den sikt genom vilken 60 viktprocent av det siktade materialet passerar. Betecknas med c_u.
Huvudelement	Element (ämnen) som finns i stora mängder i materialet. I aska eller lakvatten från aska är det t.ex. natrium, kalcium, kalium, klorid och sulfat. Kallas även makroelement.
Huvudspänning	Den största spänning som verkar på ett prov i x-, y respektive z-led. I denna studie beräknades summan av huvudspänningarna vid treaxialtester som den maximala vertikalspänningen plus tre gånger det omgivande trycket i treaxialkammaren.
Karbonatisering	Påverkan av koldioxid, CO_2, på oxider och hydroxider som finns i aska och slagg. En vanlig åldringsmetod där CO_2 reagerar med t.ex. kalciumoxid CaO och kalciumhydroxid $Ca(OH)_2$ och bildar karbonater t.ex. kalciumkarbonat $CaCO_3$. Karbonaterna fälls ut som ett svagt kalkbruk som kan höja hållfastheten i ett material och samtidigt sänks pH.
Kon- och kvadreringsmetoden	Metod för att ta representativa prov ur ett upplag. Materialet blandas om och läggs upp i en kon som sedan delas i fyra ”tårtbitar”. Motstående tårtbitar slås ihop till ett prov som sedan delas vidare på samma sätt.
L/S	Kvoten mellan den volym lakvatten (Liquid) i liter som varit i kontakt med ett visst material och detta materials vikt (Solid) i kg.
Makroämnen	Se huvudelement.
Milli-Q vatten	Rent vatten för laboratoriebruk som framställs genom avjonisering följd av omvänd osmos. Vattnet är så rent (fritt från joner) att det elektriska motståndet är större än 18 Ω.
Optimal vattenkvot	Den vattenkvot som ger störst skrymdensitet. Bestäms vid standardiserad tung laboratoriepackning och anges i viktprocent.

Packningsgrad	Kvoten mellan uppnådd densitet, t.ex. i fält, och maximal torrdensitet bestämd vid tung laboratoriepackning.
Puzzolan reaktion	En kemisk reaktion där löst kalcium reagerar med kisel och bildar en hydrerad kalcium–kiselgel (kallas CSH i cementnomenklatur).
Redoxpotential	Potential för oxidations- och reduktionsreaktioner. Hög redoxpotential tyder på en oxidativ miljö. Betecknas med Eh.
Resilientmodul	Samband mellan spänning och elastisk töjning som ger ett mått på motståndet mot elastiska deformationer. Betecknas ibland med M_r. Anges i MPa. Se även styvhet.
Slaggrus	Sorterad och lagrad bottenaska från förbränning av hushålls- och industriavfall i en rosterpanna. Sorteringen innebär bland annat att partiklar med större diameter än ca 45 mm samt magnetiska (järn) och allt mer även elektriskt ledande (koppar, aluminium, rostfritt) partiklar avskiljs. Lagringen innebär utomhuslagring i minst sex månader.
SS-EN	Svensk standard – Europanorm.
Stabilitet	Ett materials eller ett lagers förmåga att motstå sättningar och omlagringar. Anges som permanent deformation (mm) eller permanent töjning (%) vid en viss belastning.
Styvhet	Ett materials eller ett lagers lastspridningsförmåga. Anges som resilientmodul (E-modul) med enheten MPa. Se även resilientmodul.
Stålslagg	I denna rapport avses den biprodukt som, genom tillsats av slaggbildarna kalk och dolomit, skapas vid skrotbaserad stålframställning i ljusbågsugn. Stålslaggens uppgift är att hjälpa till att skydda ugnens infodring, ge ett bättre energiutnyttjande samt ge en viss rening av stålet. Slaggen tippas ur ugnen strax innan stålet tappas.
Torrdensitet	Kvoten mellan ett materials fasta massa och dess totala volym. Anges i Mg/m^3, men i denna rapport används ton/m^3.
Treaxprov	Ett prov avsett för dynamiskt treaxialtest.
Vattenkvot	Kvoten mellan det ingående vattnets vikt och den vattenfria massans vikt (i en viss materialmängd). Anges i viktprocent.
Välgraderat material	Material med graderingstal större än 15, dvs. med lång och flack kornstorleksfördelningskurva, vilket tillsammans med optimal vattenkvot ger bäst förutsättningar för ett bra packningsresultat.

2 Metodik för projektet

För att se vilka åldringsprocesser som ägt rum studerades restprodukter som åldrats naturligt i en väg och deras egenskaper jämfördes med egenskaperna hos motsvarande färska material. Aktuella restprodukter var stålslagg av LB-typ, dvs. slagg från skrotbaserad tillverkning av stål i ljusbågsugn, samt bottenaska från förbränning av hushållsavfall. De valdes därför att de uppkommer i relativt stora volymer varje år, men framför allt därför att det fanns gamla provvägar som var byggda med dessa restprodukter och som har undersökts och dokumenterats i andra projekt [15], [1], [10], [3].

Följande metodik användes i projektet:

- De naturligt åldrade materialen anskaffades genom provtagning i gamla dokumenterade provvägar. Vid provtagningen gjordes även kartering av pH i vägkroppen. I bottenaskvägen gjordes dessutom kartering av elektrisk konduktivitet och mätning av askans skrymdensitet. Provtagningen beskrivs i avsnitt 3.1 och 3.3 medan fältmätningarnas resultat beskrivs i avsnitt 5.1.5 och 8.1.5
- Vägproven karakteriserades i laboratoriet för att identifiera vilka åldringsprocesser som varit kritiska för respektive material. Förutom kornstorleksfördelning, vattenkvot och packningsegenskaper studerades mineralogi och mikrostruktur, styvhet och stabilitet, kemisk sammansättning samt utlakningsegenskaper inklusive pH. Dessutom bestämdes stålslaggens korndensitet och vattenabsorption liksom bottenaskans organiska halt. Testmetoderna beskrivs i kapitel 4, resultaten för stålslagg i kapitel 5 och resultaten för bottenaska i kapitel 8
- Även för bärlagret och terrassmaterialet i de båda provvägarna bestämdes kornstorleksfördelning och vattenkvot
- De färska materialen provtogs från materialproducenternas upplag (beskrivs i avsnitt 3.2 och 3.4)
- Bottenaska från upplaget karakteriserades med avseende på kornstorleksfördelning och packningsegenskaper, styvhet och stabilitet samt kemisk sammansättning, organisk halt och utlakningsegenskaper inklusive pH. Stålslaggen i producentens upplag var för färsk för att vara aktuell som vägmaterial. Den lagrades därför ungefär ett halvår innan den karakteriserades på samma sätt som askan. Eftersom det var känt att flera kemiska reaktioner äger rum i riktigt färsk slagg [13] karakteriserades stålslaggen med avseeende på kemisk sammansättning och utlakningsegenskaper inklusive pH även före halvårslagringen. Testmetoderna beskrivs i kapitel 4, resultaten för stålslagg i avsnitt 5.2 och resultaten för bottenaska i avsnitt 8.2
- Resultaten från karakteriseringarna analyserades och egenskaperna hos de naturligt åldrade och färska materialen jämfördes. Detta beskrivs i kapitel 6 för stålslagg och i kapitel 9 för bottenaska
- Två laboratoriemetoder för snabbåldring utvecklades genom att de färska materialen preparerades i laboratoriet för att åstadkomma reaktioner som liknade de kritiska åldringsprocesser som hade identifierats i vägmaterialet. För stålslagg användes karbonatisering och oxidation. För bottenaska valdes pH-ökning för att stimulera bildning av sekundära kalciumsilikater och aluminiumföreningar. Metodutvecklingen beskrivs i kapitel 7 för stålslagg och i kapitel 10 för bottenaska.

3 Provtagning i väg och upplag

Före fältprovtagningarna ordnades kommunala tillstånd för att gräva i provvägarna och lokala entreprenörer anlitades för skylthjälp, grävarbete och återställning. Väl på plats vid respektive provväg lokaliserades en lämplig provyta. Ytan dokumenterades före grävning med fotografering av omgivningen samt höjdavvägning av en tvärsektion. Asfaltbeläggningen från vägkant till vägmitt och cirka 3 m i längdled avlägsnades och prov togs i samtliga lager inklusive beläggning och terrass, dock utfördes inga analyser på beläggningsmaterialet. En förteckning över alla prov upprättades (bilaga B).

3.1 Provtagning av stålslagg i väg

Provtagning av stålslagg utfördes 27–28 september 2006 i vägen som går mot Smedjebackens återvinningsstation. Vägen byggdes 1996, är cirka 6 m bred och har stålslagg från Fundia i förstärkningslagret [15]. Inga förstärkningsarbeten har gjorts sedan vägen byggdes.

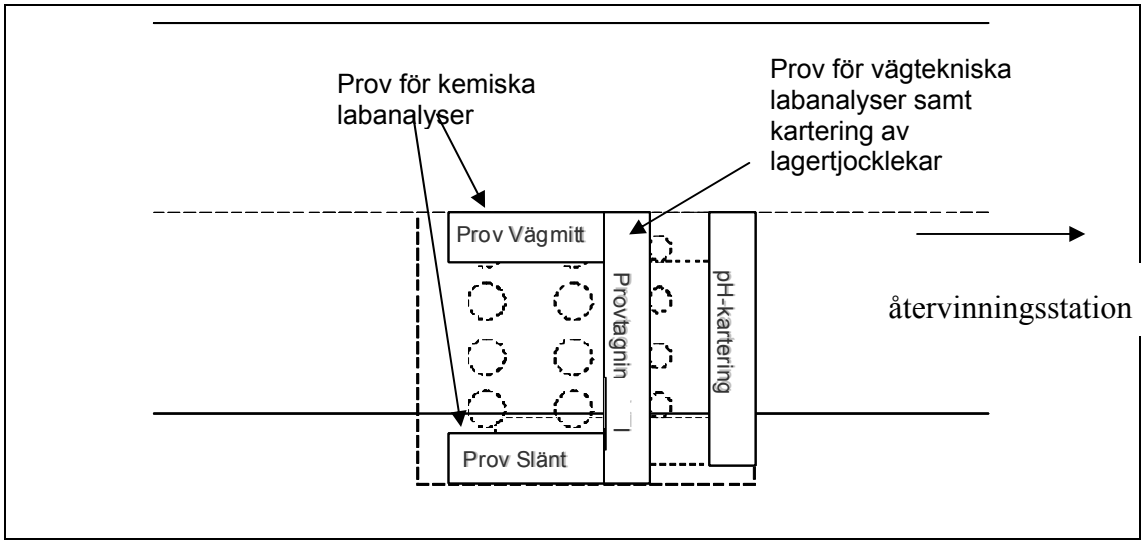
Den valda provtagningsytan låg ungefär mitt på vägsträckan i anslutning till en parkeringsficka (figur 1). Det körfält som går mot återvinningsstationen valdes eftersom det antogs att en större andel tungt lastade fordon hade trafikerat detta körfält (figur 2).

Figur 1 Väg mot återvinningsstationen i Smedjebacken.

Figure 1 The road in Smedjebacken before sampling.

Figur 2 Borttagning av asfalt- och bärlager ovanför förstärkningslagret av stålslagg.
Figure 2 Removal of layers above the subbase of steel slag.

Provtagningsplanen innehöll både ostörda och störda prov från vägmitt och vägsläntt, samt kartering av lagertjocklekar och pH (figur 3). Som grävhjälp användes en traktorgrävare utrustad med skärtrissa, skopor av olika storlek samt packningsutrustning.



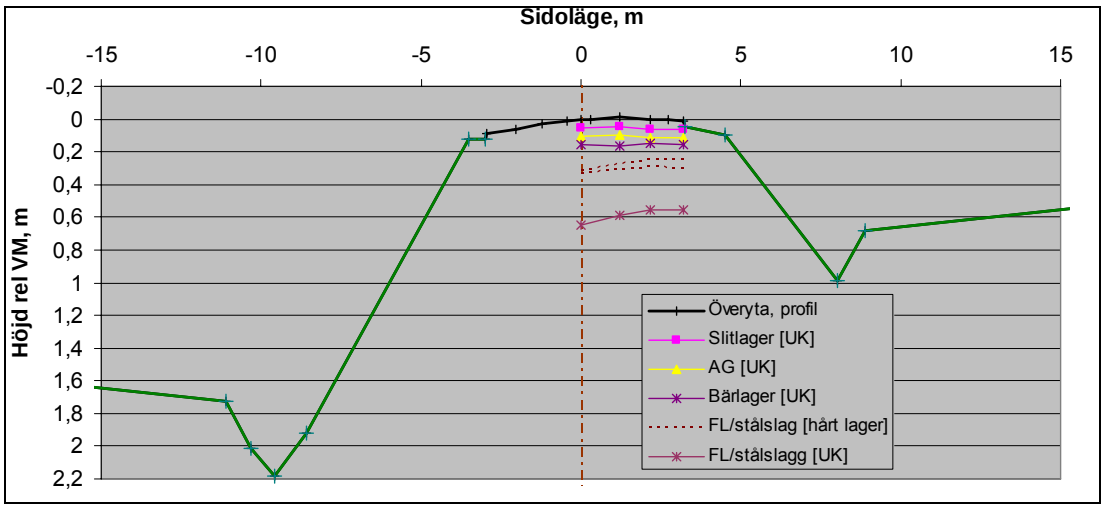
Figur 3 Översikt över provtagning av stålslagg i vägen. Cirklarna markerar planerade ostörda prov.
Figure 3 Sampling of steel slag in the road. The circles indicate planned in-situ specimens.

Tvärprofilen avvägdes (figur 4) och lagertjocklekarna karterades (figur 5). Dessutom togs ett stort samlingsprov för olika vägtekniska analyser. Lagerkarteringen bekräftade tidigare uppgifter om att närmast över stålslaggen ligger ett bärlager av krossat berg och närmast under ligger en geotextil som skiljer stålslaggen från terrassmaterialet av grusmorän. Vägsträckan kan beskrivas som väldränerad med bankdiken på båda sidor. Den har en delvis bevuxen stödremsa samt vegetationsklädda slänter (figur 6).

Figur 4 Markeringar för avvägning av tvärprofil på stålslaggvägen.

Figure 4 Measuring points for cross profile of the steel slag road.

Figur 5 Kartering av lagertjocklekar och provtagning i schaktvägg i stålslaggvägen.
Figure 5 Inspection and sampling of unbound layers in the steel slag road.



Figur 6 Profil för provgrop i stålslaggvägen.
[UK] = underkant, AG = asfaltbundet bärlager, FL = förstärkningslager.
Grön linje anger vegetation.
Figure 6 Cross profile of the steel slag road with layers in test pit.
[UK] = bottom, AG = bitumen bound base, FL = subbase.
Green line means surface covered by vegetation.

I ena änden av provtagningsytan gjordes pH-kartering i schaktväggen. Dessutom togs materialprov för de olika kemiska laboratorieanalyserna. Dessa togs som samlingsprov från vägmitt respektive vägkant och förvarades i toppfyllda plasthinkar med tättslutande lock (figur 7).

*Figur 7 Upptagning av **störda** prov från stålslaggvägen.*
*Figure 7 Sampling of **disturbed** samples from the steel slag road.*

För att få ostörda provkroppar till treaxialprovning och mikroskopering gjordes provtagning med en speciell borrutrustning (figur 8). Meningen var att ett foderrör skulle borra ut en kärna av stålslagg som skulle hamna i ett icke roterande innerrör. Tyvärr hamnade även en del av borrkaxet i innerröret, så att de ”ostörda” proven innehöll omkring 70 cm material trots att lagret bara var 42 cm tjockt. Projektet fick därför inga ostörda stålslaggprov att studera och en annan metod för ostörd provtagning av bottenaskan började sökas.

*Figur 8 Upptagning av **ostörda** prov från stålslaggvägen.*
*Figure 8 Sampling of **in-situ** specimens from the steel slag road.*

3.2 Provtagning av ”färsk” stålslagg i upplag

En dag gammal stålslagg med kornstorlek cirka 0–40 mm provtogs 27 september 2006 ur ett nytt upplag på Fundias deponi i Smedjebacken. Ett antal skopor togs ut med lastmaskin från olika platser i högen (figur 9 vänster). Med lastmaskinens hjälp homogeniserades det uttagna materialet och ett representativt prov om ungefär 0,5 m^3 lastades på en pall med presenning för att skickas till VTI/SGI i Linköping. På SGI delades materialet ner med kon- och kvadreringsmetoden.

Eftersom stålslaggen var för färsk för att vara aktuell för vägbyggnad bestämdes att den skulle lagras utomhus ett halvår innan den karakteriserades med avseende på olika egenskaper. Den placerades därför på en ny pall med presenning i botten för utomhuslagring på SGI:s lysimeterfält.

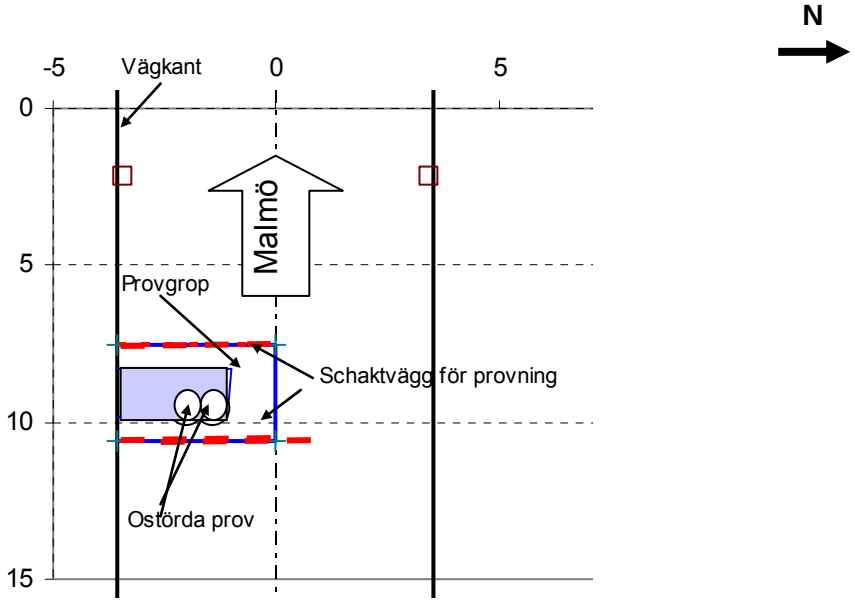
Figur 9 Till vänster: Provtagning av stålslagg från upplag i Smedjebacken.
Till höger: Provtagning av stålslagg som lagrats utomhus i sju månader i Linköping.
Figure 9 Left: Sampling of steel slag from pile at Fundia in Smedjebacken.
Right: Sampling of steel slag stored outdoor for seven months.

Efter lagring i ungefär sju månader delades stålslaggen ned på samma sätt som tidigare och åtta prov togs ut (figur 9 höger). På ett av dessa utfördes analys av kemisk sammansättning samt perkolationstest medan övriga förvarades i hinkar med tättslutande lock i SGI:s kylrum för eventuella framtida tester.

3.3 Provtagning av bottenaska i väg

Provtagning av bottenaska gjordes 14–15 november 2006 i Törringevägen i samhället Oxie som ligger i utkanten av Malmö. Törringevägen byggdes 1997 och har inte byggts om sedan dess. Den består av flera provsträckor med olika restprodukter i förstärknings-

lagret. Den sträckan som är aktuell i det här projektet har bottenaska från SYSAV (Sydskånes avfallsaktiebolag) i förstärkningslagret. Provtagning gjordes i vänster körfält i riktning mot Malmö (figur 10). En konventionell grävmaskin med gummihjul användes som grävutrustning (figur 11).



Figur 10 Översikt över provtagning av bottenaska i Törringevägen.
Figure 10 Sampling of bottom ash in the test road.

Figur 11 Borttagning av asfalt och bärlager ovanför förstärkningslagret av botten-aska.
Figure 11 Removal of layers above the subbase of bottom ash.

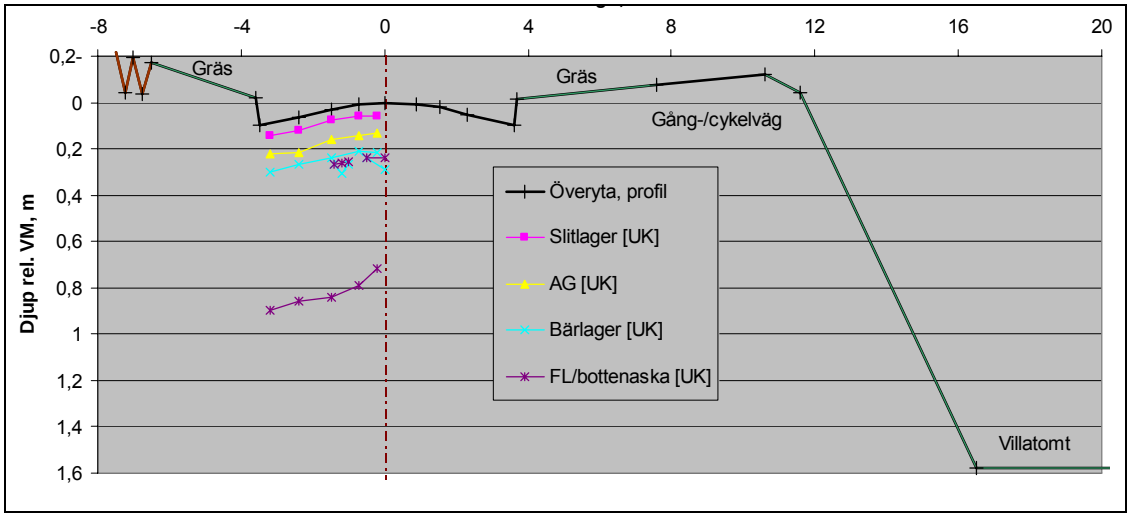
Ett stort samlingsprov togs för olika vägtekniska laboratorieanalyser och lagertjock-lekarna karterades (figur 12 och 13). För att kunna tillverka treaxprov i laboratoriet med samma packning som i vägen bestämdes skrymdensiteten hos vägens bottenasklager med isotopmätare.

Figur 12 Provtagning och kartering av lagertjocklekar i schaktvägg i bottenaskvägen.
Figure 12 Inspection and sampling of unbound layers in the bottom ash road.

Figur 13 Lagertjocklekar i bottenaskvägens schaktvägg.

Figure 13 Layers in test pit wall of bottom ash road.

Lagertjocklekarna sammanställdes med den avvägda tvärprofilen, som visar att Törringevägen inte har några diken utan är utrustad med täckt dränering och kantsten mot omgivande mark (figur 14). Dräneringen ligger längs vägkanten under kantstenen.



Figur 14 Profil för provgrop i Törringevägen, schaktvägg i riktning mot Malmö. [UK] = underkant, AG = asfaltbundet bärlager, FL = förstärkningslager. Grön linje anger gräs, brun linje anger åker.
Figure 14 Cross profile with layers in test pit in Törringevägen, western test pit wall. [UK] = bottom, AG = bitumen bound base, FL = subbase. Green line means grass-covered surface, brown line means field.

En ny teknik provades för att ta ostörda prov för mineral- och strukturkartering. Genom försiktig grävning frilades två stycken ”pelare” av bottenaska. Dessa penslades med epoxi, armerades med hönsnät och bakades in med gips (figur 15). Efter transport till laboratoriet frystes provkropparna in för senare analys.

Figur 15 Upptagning av ostörda prov av bottenaska i Törringevägen. Konservering med gips och nät och transport till laboratoriet.
Figure 15 Sampling of in-situ specimens of bottom ash by means of plaster and net.

I provgropens östra del gjordes pH-kartering i schaktväggen och materialprov togs för olika kemiska laboratorieanalyser (figur 16).

*Figur 16 Upptagning av **störda** prov av bottenaska i Törringevägen.*
*Figure 16 Sampling of **disturbed** samples of bottom ash.*

3.4 Provtagning av ”färsk” bottenaska i upplag

Bottenaska som legat ungefär sex till åtta månader på SYSAV:s upplag i Malmö provtogs av SYSAV i november 2006. Det upplag som bottenaskan hämtades ur hade rörts om ordentligt genom att en bandschaktare schaktat ner upplaget så att askan kunde lastas på dumprar med grävmaskin.

En hjullastare tog ut cirka tolv skopor med ungefär fem ton i varje från olika platser i upplaget. Materialet blandades och delades ned med kon- och kvadreringsmetoden tills

det var ungefär fem ton kvar. Ur det tog hjullastaren en liten skopa och hällde i en pall, som plastades in och skickades med lastbil till Linköping. Transporten tog cirka 1–2 dagar.

SGI och VTI gjorde sedan en gemensam provtagning i pallen. Materialet för de kemiska analyserna förvarades i förslutna plasthinkar i väntan på laboratorieprovningar och övrigt material förvarades i pallen på VTI i rumstemperatur fram till testperioden i augusti 2007.

4 Testmetoder för karakterisering av material

Följande testmetoder har använts:

- Kornstorleksfördelning bestämdes genom siktning enligt SS-EN 933-1
- Vattenkvot bestämdes genom torkning till konstant vikt i 110°C enligt SS-EN 1097-5
- Packningsegenskaper bestämdes med modifierad Proctor enligt SS-EN 13286-2
- Korndensitet och vattenabsorption för stålslaggen bestämdes genom vägning över och under vatten i ”trådkorg” enligt SS-EN 1097-6, avsnitt 7 och bilaga A
- Skrymdensitet i fält bestämdes med isotopmätare enligt VVMB 605
- Mineralogi och mikrostruktur studerades med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM) och pulverröntgendiffraktion (XRD)
- Styvhet och stabilitet undersöktes med hjälp av dynamiskt treaxialtest
- Kemisk sammansättning bestämdes som totalhalter av oorganiska ämnen, främst metaller samt pH och innehåll av organiskt material
- Utlakningsegenskaper studerades med hjälp av perkolationstest.

Testmetoderna i de fyra sista strecksatserna beskrivs närmare i följande avsnitt.

4.1 Bestämning av mineralogi och mikrostruktur

Kvantitativ makroanalys av bottenaskan gjordes på följande sätt: Sammansättningen hos planpolerade prov med en yta på cirka 40x20 cm^2 bestämdes genom punkträkning med hjälp av stereomikroskop. Partiklar med diameter över 2 mm räknades.

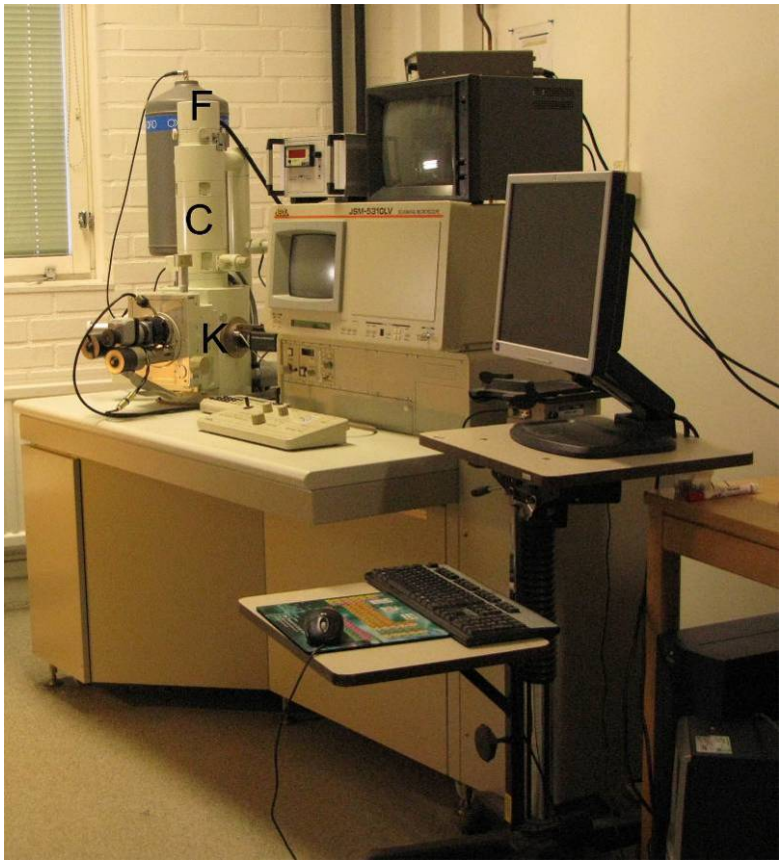
Grundämnessammansättning och morfologi hos de uppgrävda vägproven analyserades med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM) och punkträkning (EDS). Stålslaggen analyserades både på partikelytor och på polerade snitt genom partiklarna. Bottenaskproven valdes ut från en av de epoxyimpregnerade planpolerade plattorna som användes för makroanalys.

SEM-analyserna gjordes som mikrokartor av olika grundämnens fördelning i provet. Den använda utrustningen var ett lågvakuumsvepelektronmikroskop, Jeol 5310LV, försett med energidispersiv analysutrustning för mikrokemisk analys, Link Inca (figur 17). Analyserna utfördes i lågvakuum vid 20 kV accelerationsspänning. Med denna metod går det att analysera element med atomvikter från kol och uppåt. SEM-foton togs upp digitalt med hjälp av programmet Semafor med hjälp av återspridda elektroner.

Principen för instrumentet är att elektroner genereras med hjälp av ett upphettat tungstensfilament (figur 17). Elektronerna accelereras ned i en kolonn där de fokuseras och den fokuserade elektronstrålen sveper över provet i en kammare. Elektronstrålen gör att elektroner i provets atomer kan lyftas till en högre energinivå och när de sedan återgår till den lägre energinivån avges fotoner med en energi som är karaktäristisk för respektive ämne. Dessa fotoner kan därmed användas för mikrokemisk analys. Eftersom elektronerna bara tränger in några mikrometer i det analyserade materialet blir den undersökta provvolymen några enstaka till ett tiotal kubikmikrometer. I det här projektet betyder det att de mest finkorniga partiklarna i bottenaskan, som utgjorde en stor del av

materialet, inte kunde analyseras som enskilda partiklar utan analysen återspeglade kemin i ett antal partiklar tillsammans.

I detta projekt har även en annan typ av signal använts – de elektroner som efter att ha träffat atomkärnor i provet sprids tillbaka. Dessa elektroner ger en bild där gråskalan svarar mot medelatomvikten i det avbildade området. Högre atomvikt ger ljusare område i bilden. Samtliga elektronmikroskopibilder i rapporten är tagna med denna teknik.



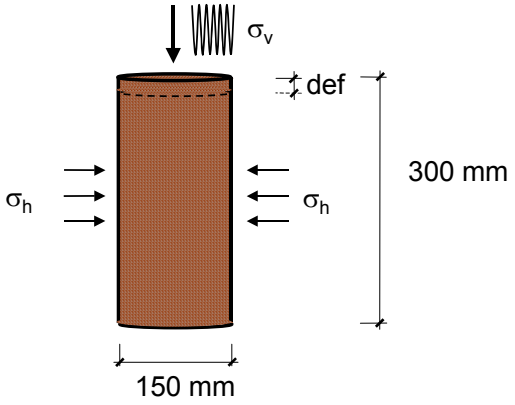
Figur 17 Utrustning för svepelektronmiskroskopi. F = tungstensfilament, C = kolonn, K = kammare.
Figure 17 Equipment for scanning electron microscopy. Electrons are generated by a tungsten filament (F) and accelerated and focussed in the column (C). The beam scans the sample in the chamber (K). Electrons that are spread back after collisions with atoms in the sample were used for imaging in this case (BSE images). Photons generated by the electron collision were used for microchemical analysis.

Förekomsten av de dominerande kristallina föreningarna i proven analyserades kvalitativt med hjälp av pulverröntgendiffraktion (XRD). Med XRD-teknik kan man ta reda på vilket ursprung ett material har, vilka de primära mineralfaserna är samt vilka kristallina utfällningar som har ägt rum i materialet. Röntgenstrålningen sprids eller diffrakteras vid kontakten med kristallint material i en speciell vinkel, theta, i förhållande till ingångsstrålningen. Den diffrakterade strålningen kan sedan fångas upp med hjälp av en fotografisk film eller en detektor. Eftersom varje kristall har en karakteristisk atomstruktur har de sitt eget unika röntgenmönster och man kan identifiera vilka mineral ett prov innehåller genom att jämföra aktuella diffraktogram med en diffraktionsdatabas.

För att minimera bakgrundsinterferensen monterades proven på en kiselplatta innan tvärsnitten analyserades. De fixerades i epoxy och slipades med kiselkarbidpapper. Prov av bottenaska gröptes ur från olika delar av den planpolerade epoxyimpregnerade plattan med hjälp av en nålformad spatel. Proven maldes i en agatmortel tillsammans med etanol och analyserades sedan med pulverröntgendiffraktion (XRPD). Mätutrustningen var en Philips PW 1710 diffraktometer utrustad med en monokromator kopplad till en dator för att få X-ray data. Cu Kα-strålning (50kV, 25mA; λ = 1.5418Å) användes. Mineralfaserna identifierades med hjälp av X-ray diffraktogram som jämfördes mot en diffraktionsdatabas.

4.2 Bestämning av styvhet och stabilitet

Bestämning av styvhet och stabilitet gjordes med dynamiskt treaxialtest enligt SS-EN 13286-7. Vid ett dynamiskt treaxialtest undersöks ett materials deformationsegenskaper under simulerade trafikförhållanden. Materialets styvhet eller lastspridningsförmåga kan bestämmas och resultatet beskrivs som en resilientmodul vid olika spänningsförhållanden. Den permanenta deformationen som uppstår i materialet vid en viss belastning kan också bestämmas och användas som ett mått på dess stabilitet. Testmetoden innebär att ett cylindriskt, stående prov utsätts för en dynamisk vertikal last och ett omgivande stödjande tryck i en tryckkammare (figur 18). De vertikala och horisontella lasterna representerar trafiklasten och det omgivande jordtrycket.



Figur 18 Princip för dynamiskt treaxialtest. σ_v är vertikalspänning och σ_h är horisontalspänning.
Figure 18 Principle of cyclic load triaxial test. σ_v is vertical stress and σ_h is horizontal stress.

I den här studien var provens diameter 150 mm och deras höjd 300 mm, vilket gav en provvolym av cirka 5,3 dm³. Provkropparna av stålslagg packades in med målvärdena 95 % packningsgrad och vattenkvoten 60 % av den optimala bestämd vid packningsförsök. För bottenaskan söktes samma packningsgrad som uppmättes vid fältmätningen med isotopmätare, 89 %, och en vattenkvot som stämde med fältproven. Före packning siktades partiklar större än 31,5 mm bort. De färdiga provkropparna med önskad densitet och vatteninnehåll försågs med metallplattor i ändarna och kläddes med ett gummimembran (figur 19 vänster).

Figur 19 Till vänster: Treaxprov med gummimembran och ändplattor. Till höger: Instrumenterat treaxprov i testrigg.
Figure 19 Left: Specimen for cyclic load triaxial test equipped with a fitted rubber membrane. Right: Triaxial pressure chamber in the test rig.

Provkropparna belastades enligt SS-EN 13286-7, kapitel 8 ”Test procedures for the study of permanent deformation”, stycke 8.3 “Multi-stage loading” och ”low stress level”. Testet består av fem sekvenser om vardera sex dynamiska laststeg (tabell 1). För varje sekvens används ett konstant omgivande kammartryck och för varje laststeg används en varierande axiell last (deviatorspänning) utöver det omgivande trycket. Minimideviatorspänningen är konstant 3 kPa. Varje laststeg består av 10 000 pulser med en frekvens av 10 Hz. För att mäta krafter för styrning av testet och dokumentering av laster användes en lastcell placerad inne i tryckkammaren.

Tabell 1 Belastningsförhållanden vid de dynamiska treaxialtesterna.
Table 1 Stresses utilised at the cyclic load triaxial tests.

Sekvens nr	Omgivande tryck	Antal laststeg	Lägsta maximala deviatorspänning	Högsta maximala deviatorspänning
1	20 kPa	6	20 kPa	120 kPa
2	45 kPa	6	60 kPa	210 kPa
3	70 kPa	6	80 kPa	280 kPa
4	100 kPa	6	100 kPa	350 kPa
5	150 kPa	6	100 kPa	600 kPa

Provkropparna instrumenterades med lägesgivare för att mäta elastiska (resilienta) och permanenta töjningar[1]. EN-standarden förespråkar tre axiella lägesgivare fästa på mellersta tredjedelen av provkroppens höjd och medelvärdet av de tre värdena anges som resultat.

I denna studie användes även en extern givare som mäter över hela provkroppen och resultat från både extern och intern deformationsmätning redovisas. Fördelen med att mäta på den mellersta delen av provkroppen är att man slipper randeffekter från inpackningen av provkroppen, då packningen kanske kan vara sämre i toppen av provet. Fördelen med den externa givaren är att den är bättre fixerad och därmed ger ett säkrare och stabilare resultat. VTI har störst erfarenhet av treaxialtester utförda med extern lägesgivare. Generellt brukar mätning av den elastiska töjningen med interna givare ge lägre värden än mätning med extern givare, vilket ger högre resilientmodul (E-modul). Den permanenta töjningen är oftare relativt lika med extern och interna givare.

Styvheten (resilientmodulen) beräknades efter 100 pulser på varje spänningsnivå och redovisas som funktion av den totala huvudspänningen som verkar på provet. Stabiliteten beräknades som ackumulerad permanent trycktöjning, dvs. relativ hoptryckning, och redovisas som funktion av ackumulerat antal pulser.

4.3 Bestämning av kemisk sammansättning och innehåll av organiskt material samt fältbestämning av pH och elektrisk konduktivitet

Kemisk sammansättning och innehåll av organiskt material bestämdes på delprov av materialen. Analyserna utfördes av ALS Scandinavia. Halten av följande ämnen analyserades:

Aluminium Al	Bly Pb	Kalium K	Kvicksilver Hg	Natrium Na	Strontium Sr	Wolfram W
Antimon Sb	Järn Fe	Kisel Si	Lantan La	Nickel Ni	Svavel S	Yttrium Y
Arsenik As	Fosfor P	Kobolt Co	Magnesium Mg	Niob Nb	Tenn Sn	Zink Zn
Barium Ba	Kadmium Cd	Koppar Cu	Mangan Mn	Scandium Sc	Titan Ti	Zirkonium Zr
Beryllium Be	Kalcium Ca	Krom Cr	Molybden Mo	Selen Se	Vanadin V	

Före metallanalys preparerades materialet genom krossning och malning med knivkvarn i stålfat till kornstorlek < 125 µm. För analys av As, Cd, Cu, Co, Hg, Ni, Pb, Sb, Se och S torkades proven i 50°C och upplöstes i syra i sluten teflonbehållare i mikrovågsugn enligt ASTM D 3683 (modifierad). Elementhalterna TS-korrigerades till 105°C. Övriga ämnen bestämdes efter smältning med litiummetaborat följt av upplösning i utspädd salpetersyra enligt ASTM D3682. Analyserna följde sedan de amerikanska EPA-metoderna 200.7 och 200.8.

Innehållet av organiskt material bestämdes som glödgningsförlust eller Loss on ignition, LOI, enligt ALS egen metod. Den anger viktminskningen efter glödgning i 1 000°C och mäter förutom oförbränt organiskt material även kemiskt och kristallbundet vatten samt koldioxid från karbonater.

pH mättes i fält enligt standarden för pH-bestämning i jordprov (SS-ISO 10390). Elektrisk konduktivitet betämdes enligt SS-ISO 11265 på samma prov som användes för

[1] Töjning är en relativ deformation.

pH-bestämningen i fält, men det gjordes först vid återkomsten till Linköping. Det betyder att standarden inte följdes helt eftersom mängden vatten och material var för liten (samma som vid pH-bestämning) och proven fick stå i berett tillstånd ett par dygn före provning.

4.4 Bestämning av utlakningsegenskaper

För att undersöka utlakningsegenskaperna hos de båda restprodukterna användes en modifierad variant av perkolationstest (SIS-CEN/TS 14405). Modifieringen bestod i att inget material krossades och att förhållandet mellan den största partikeldiametern och kolonndiametern var bara 1:5.

Anledningen till att inget material krossades var att det befintliga materialet i vägen skulle studeras och krossning skulle ha gett upphov till färska partikelytor med andra egenskaper än det befintliga materialet [30]. Bottenaskan i vägen hade partikelstorlek 0–40 mm och stålslaggen 0–300 mm. Den största kolonnen som beskrivs i provningsstandarden har diametern 200 mm. För att kunna göra perkolationsförsök på så stor andel som möjligt av materialet utan att krossa ned det valdes maximal partikelstorlek till 40 mm. På så sätt blev förhållandet 1:5 mellan den största partikeldiametern och kolonndiametern. Faktorn 5 används även i andra sammanhang exempelvis vid perkolationstest enligt NT envir 002 och dynamiskt treaxialtest enligt SS-EN 13286-7.

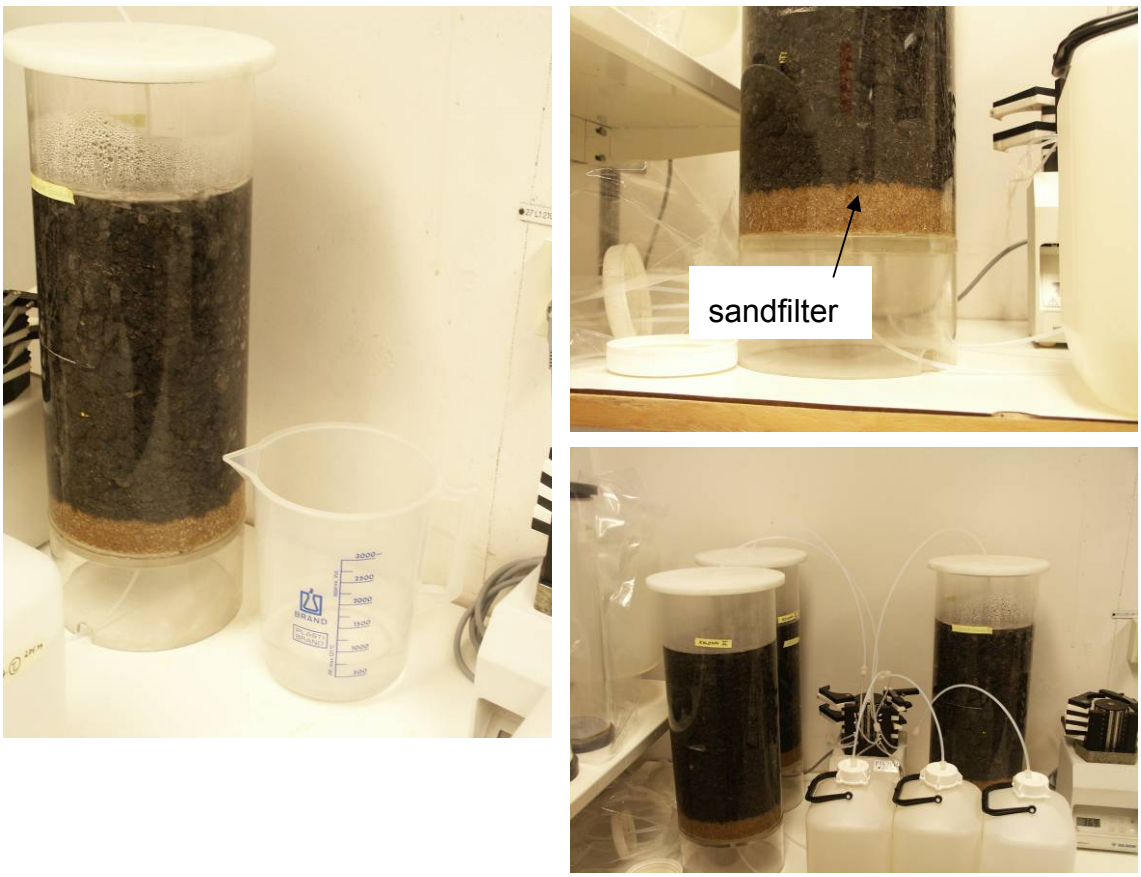
Perkolationstesterna utfördes alltså på material där partiklar med diametern > 40 mm hade siktats bort. Kolonnerna var av plexiglas med diametern 200 mm och hade ett sandfilter i botten för att få en bra vätning av materialet (figur 20). Materialet packades i fem lager till en höjd av cirka 300 mm. Efter detta vattenmättades provet genom att Milli-Q vatten pumpades in i kolonnen underifrån och sedan fick kolonnen stå i ungefär fem dygn för att jämvikt skulle inställa sig. Därefter pumpades Milli-Q vatten upp genom kolonnen med en viss hastighet och uttag av lakvatten gjordes vid fem tillfällen[2], L/S 0,1; 0,3; 0,5; 1 och 2 l/kg (ackumulerat). Lakvattnen filtrerades och analyserades med avseende på pH, elektrisk konduktivitet, redoxpotential och DOC samt innehåll av klorid, fluorid, sulfat, makroelement och metaller. Halten av följande ämnen analyserades:

Aluminium	Bly	Kalcium	Kobolt	Kvicksilver	Natrium	Svavel
Antimon	Fluorid	Kalium	Koppar	Magnesium	Nickel	Vanadin
Arsenik	Järn	Kisel	Krom	Mangan	Selen	Zink
Barium	Kadmium	Klorid	Krom, sexvärt	Molybden	Sulfat	DOC

Mättnadsindices för lakvattnen beräknades genom geokemisk modellering med hjälp av LeachXS och tillhörande databas[3]. Ett mättnadsindex visar om vattnet är mättat, undermättat eller övermättat med avseende på ett visst mineral. Komplexbildning med DOC i vattenfas beräknades enligt NICA-Donnan [9], [34].

[2] Vid perkolationstest på den färska stålslaggen innan halvårslagringen gjordes uttag av tre lakvatten, vid L/S 0,1; 0,3 och 0,5 l/kg.

[3] Minteq daterad 2007-09-13 och utökad med framförallt cementmineral.



Figur 20 Uppställning av lakförsök, stålslagg.
Figure 20 Percolation test of steel slag.

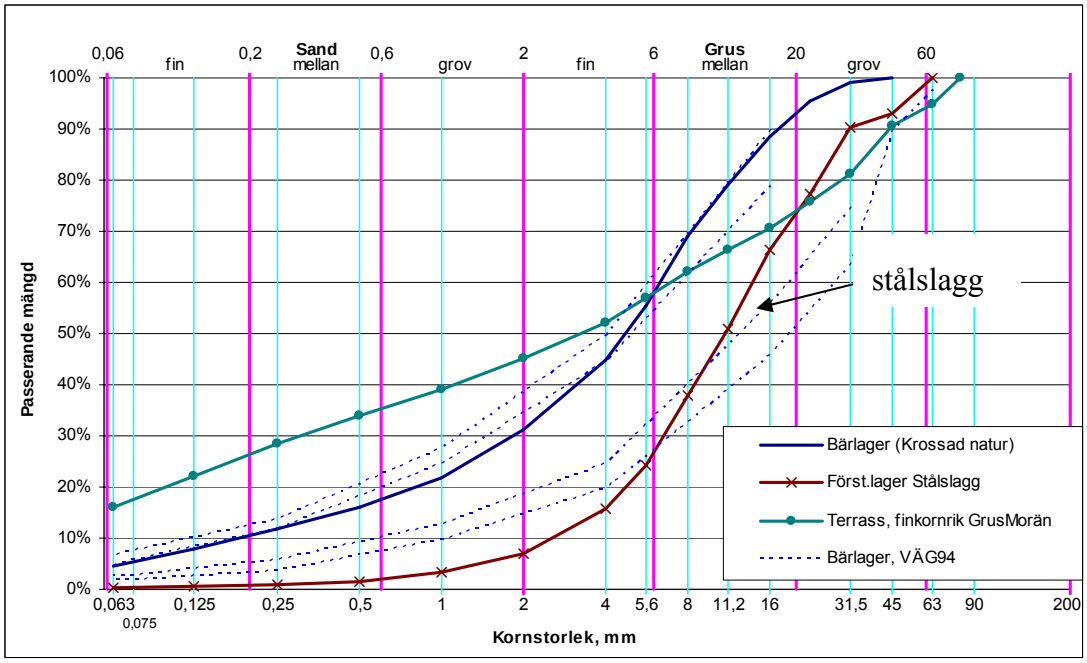
5 Egenskaper hos stålslaggprov

5.1 Stålslagg från vägen

Från provvägen i Smedjebacken togs prov på bärlager, förstärkningslager och terrassmaterial. Förstärkningslagret av stålslagg analyserades i laboratoriet med avseende på kornstorleksfördelning, vattenkvot, packningsegenskaper, korndensitet och vattenabsorption. Dessutom analyserades mineralogi och mikrostruktur, styvhet och stabilitet, kemisk sammansättning och pH samt utlakningsegenskaper. Bärlagret och terrassmaterialet analyserades endast med avseende på kornstorleksfördelning och vattenkvot.

5.1.1 Stålslaggens kornstorleksfördelning, vattenkvot och packningsegenskaper samt korndensitet och vattenabsorption

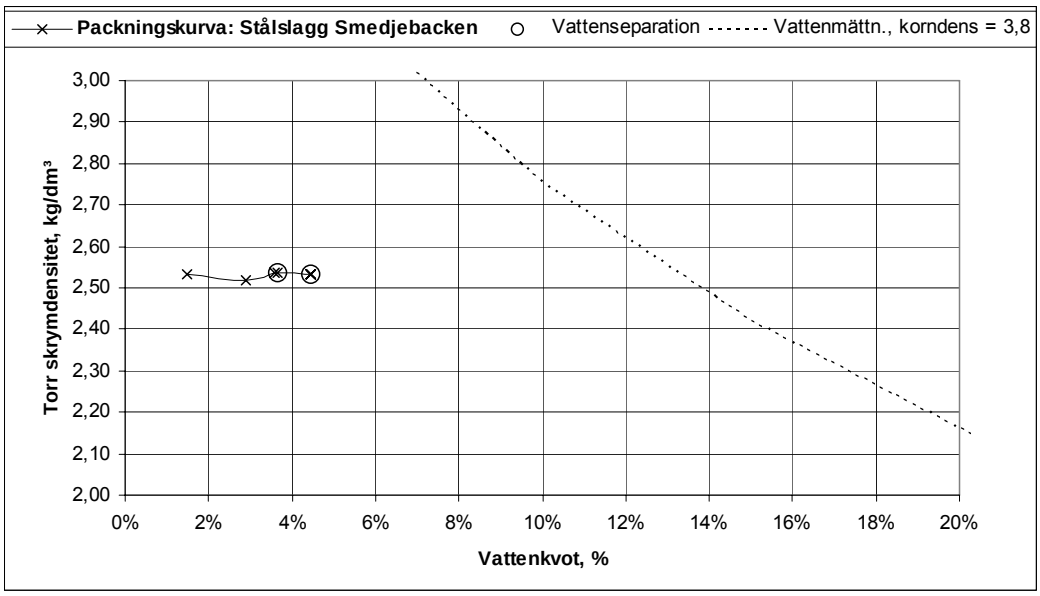
Siktningsanalysen av stålslaggen visade att materialet innehöll lite finmaterial och hade en brant kornstorleksfördelningskurva inom grusregistret – mer än 90 viktprocent av partiklarna var större än 2 mm (figur 21). Vattenkvoten i stålslaggslagret var 2,3 %. Stålslaggens korndensitet, ρ_{rd}, bestämdes till 3,8 ton/m³ och vattenabsortionen efter 36 timmar var 0,7 %.



Figur 21 Kornstorleksfördelning hos obundna material från vägen i Smedjebacken. (Gränskurvor för bärlager från VÄG 94[4]).
Figure 21 Particle size distribution of unbound materials from test site Smedjebacken.

Packningstesterna i laboratoriet visade att stålslaggen var ganska okänslig för vattenkvotsvariationer under packningen (figur 220). Den optimala vattenkvoten bestämdes till 3,6 % och den maximala torra skrymdensiteten som uppnåddes var 2,54 ton/m³.

[4] VÄG 94 var Vägverkets kravskrift när vägen byggdes.



Figur 22 Packningskurva för stålslagg från provvägen.
Figure 22 Proctor curve for steel slag from test pit in road.

5.1.2 Övriga obundna väglagers kornstorleksfördelning och vattenkvot

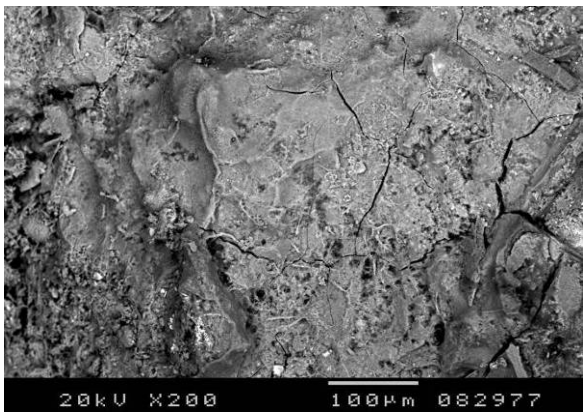
Bärlagrets kornstorleksfördelning följde ganska väl den övre gränskurvan för bärlager i VÄG 94 (figur 21) och vattenkvoten uppmättes till 4,7 %. Vid provtagningen var vattenkvoten troligen något högre än normalt på grund av ett lätt regn på den öppna provgropen under natten innan. Terrassmaterialet bestod av grusmorän (figur 21) med vattenkvoten 5,4 %.

5.1.3 Stålslaggens mineralogi och mikrostruktur

SEM/EDS-analys

SEM-fotona visade att stålslaggpartiklar från vägen hade uppspruckna korngränser. Det fanns rikligt med mikrosprickor längs mineralkornens gränser och i mindre utsträckning även större sprickor tvärs över mineralkornen (figur 23).

På partikelytorna fanns utfällningar av gips och järnsulfat (figur 24). Kristallerna syntes redan vid torkning av provet och gipskristallerna kan ha bildats vid provberedningen. Även kalciumsilikater syntes på partikelytorna (figur 23). Slagg från vägkanten hade mer kalciumsulfater och silikater på partikelytorna än slagg från vägmitt. Även ett slaggskikt i vägmitt som hade trafikerats under byggnadstiden innehöll mer kalciumsulfater och silikater.



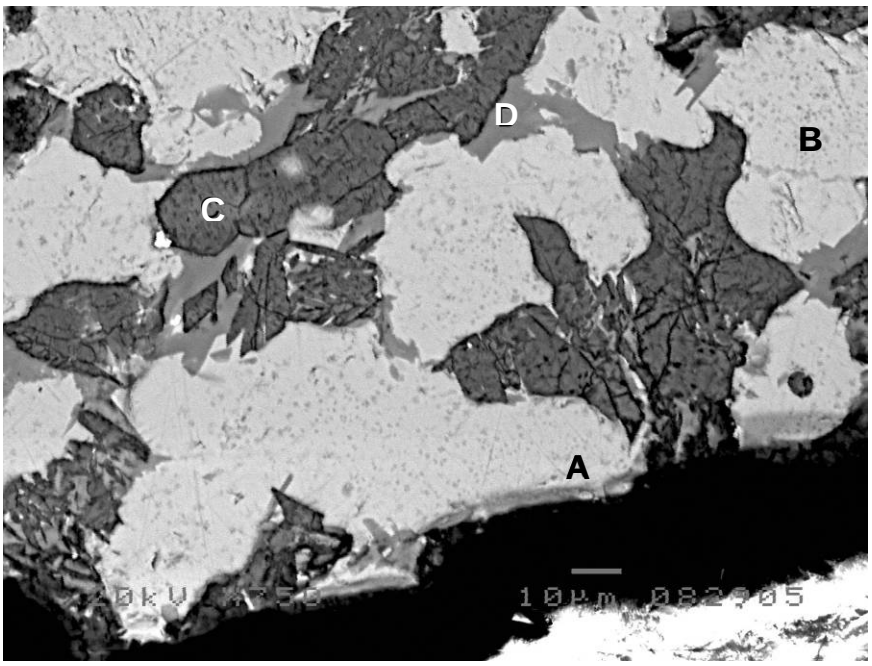
*Figur 23 Ytan på en stålslaggpartikel från **vägmitt**. Mörka steck är sprickor längs eller tvärs mineralkornen. SEM-foto med förstoring 200 gånger.*
*Figure 23 Surface of steel slag particle from **road centre**. Dark lines are cracks along or across mineral grains. SEM image with instrumental magnification 200 times.*

Figur 24 Gipskristaller som har bildats som en sekundär produkt på stålslaggens ytor.
Figure 24 Crystals of gypsum precipitated at the surface of a steel slag the particle.

SEM-fotona och EDS-analysen visade ingen variation i kemisk sammansättning med djupet från partikelytan (bortsett från utfällningarna på partikelytorna), varken i slaggpartiklar från vägmitt (tabell 2) eller vägkant (figur 25 och tabell 3).

*Tabell 2 Fördelning av grundämnen i en stålslaggpartikel från **vägmitt**. Resultat från EDS-punktanalyser. Profil från punkt 1 på partikelytan till punkt 9 på ca 40 µm djup. Halter av olika ämnen är angivna i viktprocent av atomvikten.*
*Table 2 Amounts of elements in a steel slag particle from the **road centre**. Results from EDS point analysis. Profile from point 1 at the particle surface to point 9 at a depth of about 40 µm. Amounts are given in atom percent.*

	Halt i punkt								
Grundämne	1 = partikelytan	2	3	4	5	6	7	8	9 = 40 µm från ytan
Mg	0,6	0,5	0,6	0,6	0,8	0,5	0,5	1	0,6
Al	0,9	1	0,9	0,8	0,9	0,8	0,7	–	1,1
Si	16	14	14	14	13	13	14	12	14
P	0,9	1	0,9	1	1	1,2	0,9	0,7	0,7
Ca	38	38	38	38	37	35	38	35	38
Ti	0,4	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,6	0,3
Mn	0,9	0,9	0,9	1,1	1,3	0,9	1	1,3	1
Fe	6	7	7	7	9	7	7	13	8



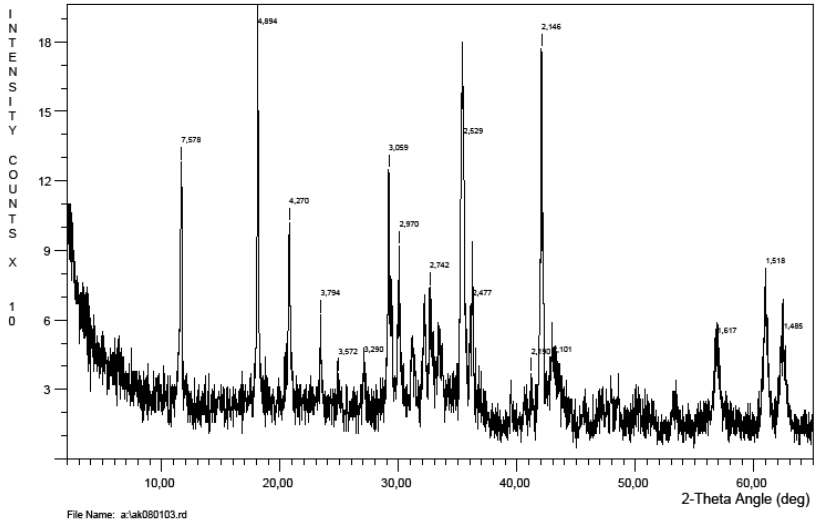
*Figur 25 Tvärsnitt genom en typisk stålslaggpartikel från **vägkanten**.*
SEM-foto med förstoring 350 gånger. Kemisk sammansättning i punkt A, B, C och D anges i tabell 3.
*Figure 25 Cross section through a typical steel slag particle at the **pavement edge**.*
SEM image with instrumental magnification 350 times. Chemical composition in positions A, B, C and D is reported in Table 3.

Tabell 3 Kemiska sammansättningen i punkterna A, B, C och D på stålslaggpartikeln i figur 24. Resultat från EDS-punktanalyser. Halter av olika ämnen är angivna i viktprocent av atomvikten.
Table 3 Chemical composition in the positions A, B, C and D marked on the steel slag particle in Figure 24. Results from EDS point analysis. Amounts are given in atom percent.

	Halt i punkt nr			
Grundämne	A = partikelytan	B	C	D
Mg	10	11	0,8	0,4
Al	0,5	0,8	8	0,8
Si	0,8	1,1	1,5	15
P	–	–	–	0,8
Ca	1,8	2	31	41
Ti	–	–	0,5	–
V	–	–	0,4	0,3
Cr	1,5	2	2	–
Mn	8	8	1,3	0,7
Fe	51	48	24	4

XRPD-analys

Den mineralogiska undersökningen med pulverröntgendiffraktion koncentrerades till att studera vad som hade nybildats på ytan av partiklarna. Resultatet bekräftade SEM-undersökningens resultat om sulfatutfällningar. Identifiering med hjälp av en diffraktionsdatabas visade att två stycken utfällningsprodukter, gips $CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$ och melanterit $Fe^{2+}(SO_4) \cdot 7(H_2O)$, fanns närvarande på partikelytorna (0). Däremot kunde inte kalciumsilikaterna som hittats vid SEM-analysen detekteras.

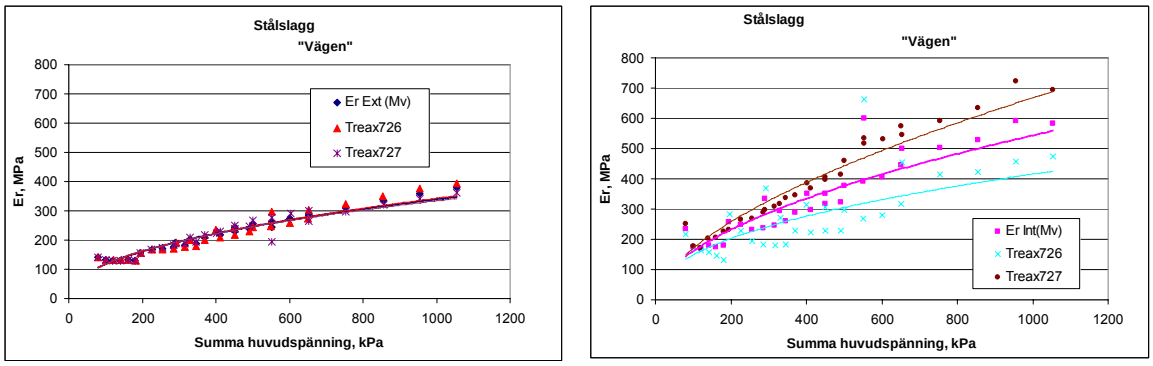


Figur 26 Diffraktogram av ytan på en stålslaggpartikel från Smedjebacken. Gips och melanterit kan identifieras.
Figure 26 Proctor curve for steel slag from test pit in road.

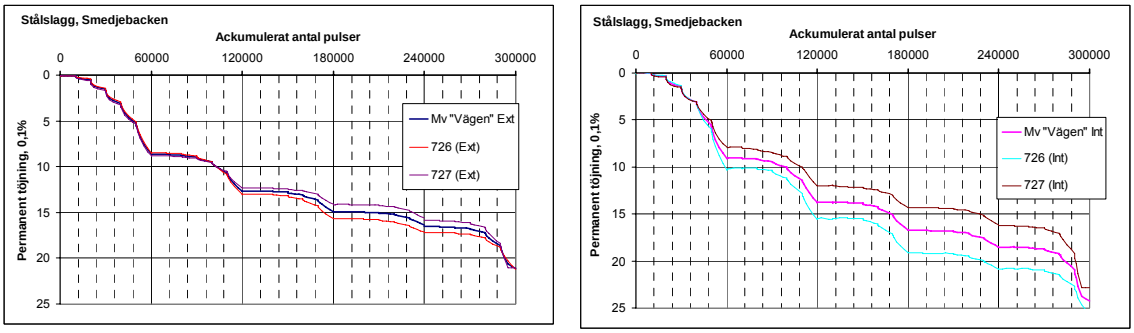
5.1.4 Stålslaggens styvhet och stabilitet

De båda provkropparna som packats in med stålslagg från vägen inför treaxialtesterna fick något högre densitet än vad som avsetts, 2,46 ton/m^3 i stället för 2,41 ton/m^3, och de blev något torrare än planerat, vattenkvoten var 1,9 % i stället för 2,1 %. Fullständiga data för provkropparna redovisas i bilaga C.

Styvheten för provkropparna angiven som resilientmodul, E_r, varierade mellan 100 och 550 MPa beroende på spänningsnivå och sättet att mäta deformation (figur 27). Stabiliteten angiven som uppnådd deformation efter avslutat försök var cirka 2 % (figur 28).



Figur 27 Resilientmodul vid dynamiskt treaxialtest på stålslagg från vägen. Två delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 27 Resilient modulus in cyclic load triaxial test of steel slag from the road. Two specimens and mean value. Left: Calculated from "external" length gauge. Right: Calculated from "internal" length gauges.

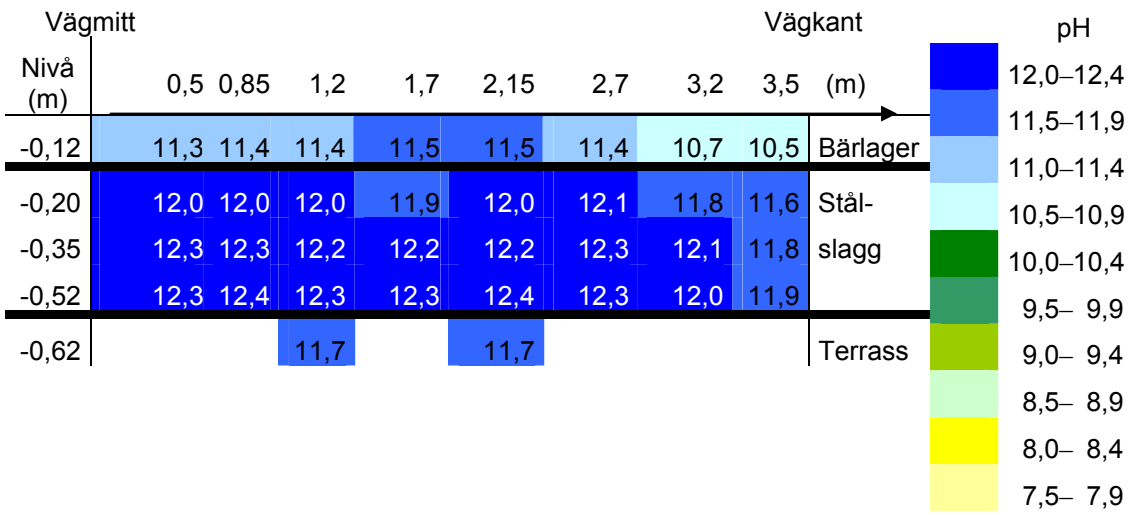


Figur 28 Ackumulerad permanent hoptryckning vid dynamiskt treaxialtest på stålslagg från vägen. Två delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 28 Ackumulated permanent compressive strain in cyclic load triaxial test of steel slag from the road. Two specimens and mean value. Left: Calculated from "external" length gauge. Right: Calculated from "internal" length gauges.

5.1.5 Stålslaggens kemiska sammansättning samt pH-profil för vägen

Stålslaggen från vägen bestod i huvudsak av järn (34 viktprocent) och kalcium (19 viktprocent). Kisel, magnesium, mangan och aluminium ingick med 2–5 viktprocent vardera. Huvudsakliga spårelement var krom, fosfor, titan, vanadin och svavel (bilaga D.1).

pH-karteringen i vägen visade att stålslagglagrets pH varierade mellan 11,6 och 12,4 med lägst värden vid vägkanten. Också i överkanten direkt under bärlagret var pH något lägre (figur 29). pH i bärlagrets underkant varierade mellan 10,5 och 11,5 och i terrassmaterialets överkant under stålslaggen var pH 11,7.



Figur 29 pH-profil i stålslaggvägen.
Figure 29 pH-profile in the steel slag road.

5.1.6 Stålslaggens utlakningsegenskaper

Enligt perkolationstesterna lakades främst kalcium, sulfat och natrium ut från stålslaggen i vägen (bilaga D.3). Anmärkningsvärt var att sulfatlakningen från vägmittproven var högre än den totala halten svavel i lakvattnet. Till exempel uppmättes i första lakvattnet ur kolonnen 8,3 mg[5] svavel per liter som sulfat men bara 3,0 mg svavel per liter när alla svavelformer räknades. Lakningen från vägkantproven hade samma mönster men med mindre extrema värden. Detta tyder på onoggrannhet i analyserna – sulfatsvavel och svavel mäts med två olika metoder, men mängden svavel som sulfat kan aldrig vara större än den totala mängden svavel i lakvattnet.

Redoxpotentialen var 146–172 mV för stålslaggen från vägmitt och 180–231 mV för stålslaggen från vägkant. pH i lakvattnet varierade mellan 11,6 och 12,4 med de lägre värdena för vägkantmaterialet. Under testet sjönk den elektriska konduktiviteten från 771 till 474 för vägmittmaterialet och från 153 till 104 mS/m för vägkantmaterialet (tabell 4).

[5] Andelen svavel (S) i sulfat (SO_4) är 32 / (32 + 4 x 16) = 0,33. 0,33 x 25 000 µg/l = 8,3 mg/l.

Tabell 4 pH, konduktivitet och redoxpotential för stålslagg från vägen. Resultat från perkolationstest.
Table 4 pH, conductivity and redox potential of steel slag from the road. Results from percolation test.

	provnr	L/S	pH	Konduktivitet	Redoxpotential
				mS/m	mV
vägmitt	*06196*	0,1	12,40	771	146
	06197	0,3	12,40	725	156
	06198	0,5	12,40	590	161
	06199	1	12,20	519	172
	06200	2	12,40	474	159
vägkant	*06201*	0,1	11,60	153	180
	06202	0,3	11,70	149	203
	06203	0,5	11,70	137	204
	06204	1	11,60	125	231
	06205	2	11,70	104	208

5.2 Stålslagg från upplag

Här beskrivs resultat från karakterisering av färsk stålslagg som provtagits direkt från Fundias upplag i Smedjebacken samt efter transport och sju månaders lagring i Linköping.

5.2.1 Färsk stålslagg från Fundias upplag

Direkt efter provtagning i Fundias upplag gjordes enbart bestämning av kemisk sammansättning och utlakningsegenskaper inklusive pH. Vid perkolationstestet analyserades endast tre vatten, vid L/S 0,1; L/S 0,3 och L/S 0,5 l/kg.

Den färska stålslaggen bestod i huvudsak av järn (31 viktprocent) och kalcium (20 viktprocent). Kisel, magnesium, mangan och aluminium ingick med 3–5 viktprocent vardera. Huvudsakliga spårelement var krom, fosfor, titan, vanadin och svavel (bilaga D.1).

Vid perkolationstestet var kalcium och hydroxid de huvudsakliga ämnena i lakvattnet. Krom i form av Cr(VI) detekterades i lakvattnet men var nära detektionsgränsen (bilaga D.3). Lakvattnet innehöll totalt 2,5–13,7 mg svavel per liter och samtidigt var koncentrationen av svavel i form av sulfat mindre än 3,0 mg/L. Detta tyder på att en del svavel förekom i annan form än som sulfat. Men eftersom det fanns några tveksamheter med analysen (avsnitt 5.1.6) och sulfathalten låg nära detektionsgränsen, vilket brukar leda till större osäkerheter, måste denna slutsats betraktas som osäker.

Redoxpotentialen varierade mellan 138 och 203 mV och pH var 12,2. Den elektriska konduktiviteten sjönk från 457 till 277 mS/m mellan första och tredje lakvattnet (tabell 5).

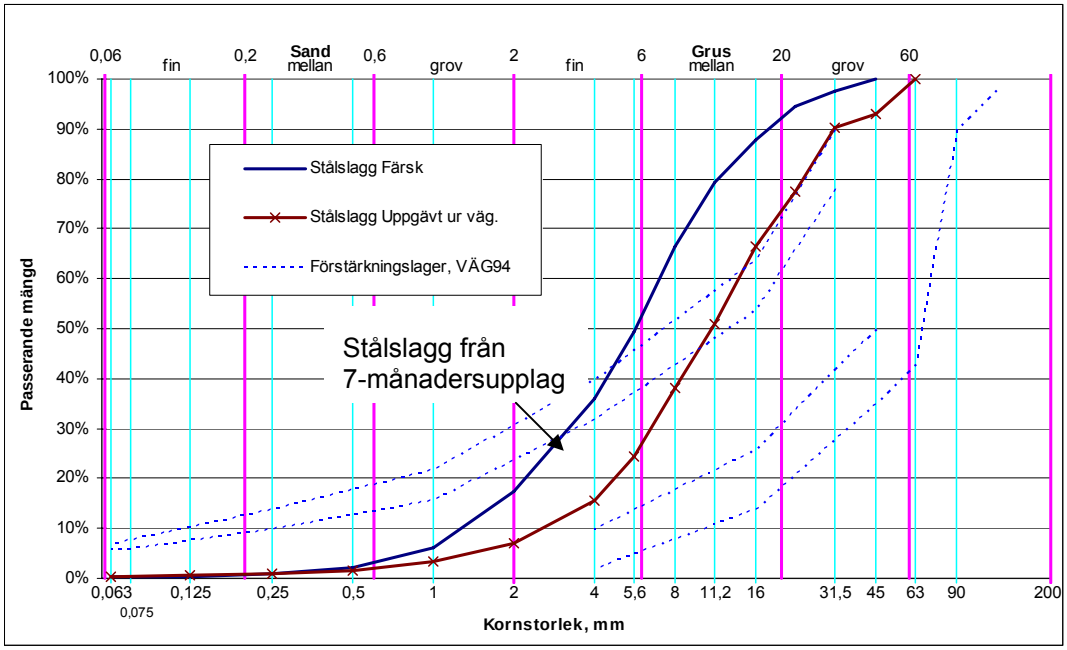
Tabell 5 pH, konduktivitet och redoxpotential för färsk stålslagg (en dag gammal). Resultat från perkolationstest.
Table 5 pH, conductivity and redox potential of fresh steel slag (one day old). Results from percolation test.

provnr	L/S	pH	Konduktivitet	Redoxpotential
			mS/m	mV
06193	0,1	12,20	457	197
06194	0,3	12,20	341	203
06195	0,5	12,20	277	138

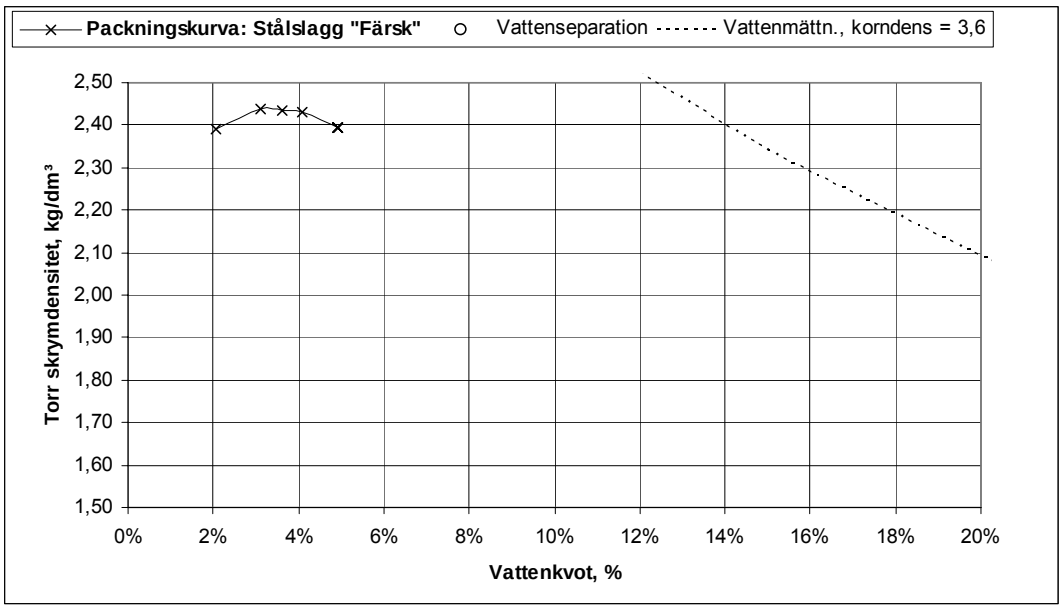
5.2.2 Färsk stålslagg som lagrats i sju månader

Efter lagringen i sju månader i Linköping karakteriserades stålslaggen med avseende på kornstorleksfördelning och packningsegenskaper, styvhet och stabilitet samt kemisk sammansättning och utlakningsegenskaper inklusive pH.

Stålslaggen från 7-månadersupplaget hade kornstorlek cirka 0–40 mm, lite finmaterial och brant kornstorleksfördelningskurva i grusregistret (figur 30). Enligt packningstesterna var den optimala vattenkvoten 3,1 % och den maximala torra skrymdensiteten 2,44 ton/m³ (figur 31). Korndensiteten, ρ_p, var 3,6 ton/m³.



Figur 30 Kornstorleksfördelning för stålslagg från Smedjebacken. Jämförelse mellan färsk slagg (7 mån.) och material uppgrävt från vägen.
Figure 30 Particle size distribution of "fresh" steel slag and steel slag from test pit.

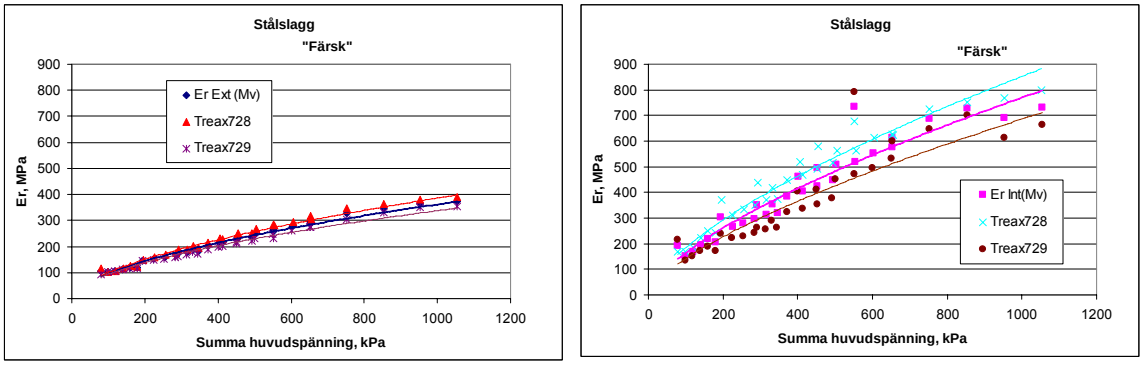


Figur 31 Packningskurva för färsk (7 månader) stålslagg.
Figure 31 Proctor curve for fresh steel slag.

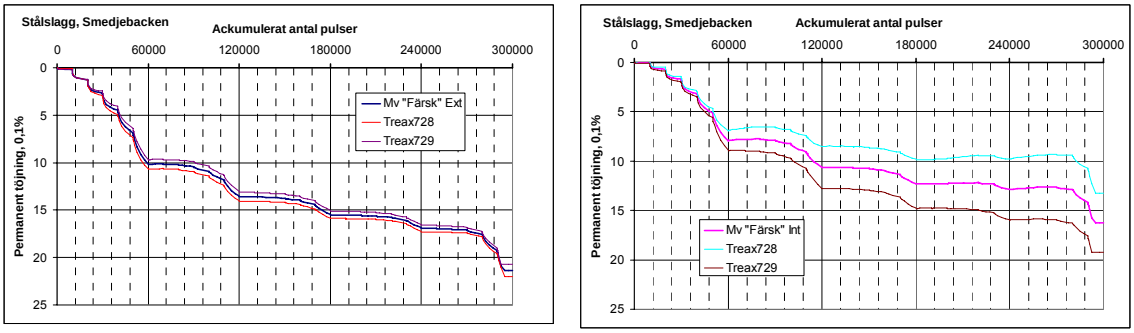
Styvhet och stabilitet på "färsk" stålslagg från 7-månadersupplaget

De båda provkropparna som packades in för treaxialtest fick något högre densitet än vad som avsetts, 2,39 ton/m^3 istället för 2,32 ton/m^3, och de blev något våtare än planerat (bilaga C).

Styvheten angiven som resilientmodul, E_r, varierade mellan 100 och 800 MPa beoende på spänningsnivå och sättet att mäta deformation (figur 32). Stabiliteten angiven som uppnådd deformation vid avslutat test var cirka 2 % (figur 33).



Figur 32 Resilientmodul vid dynamiskt treaxialtest på stålslagg från 7-månaders-upplaget. Två delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 32 Resilient modulus in cyclic load triaxial test of steel slag from 7 months pile. Two specimens and mean value. Left: Calculated from "external" length gauge. Right: Calculated from "internal" length gauges.



Figur 33 Ackumulerad permanent hoptryckning vid dynamiskt treaxialtest på stålslagg från 7-månadersupplaget. Två delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 33 Ackumulated permanent compressive strain in cyclic load triaxial test of steel slag from 7 months pile. Two specimens and mean value. Left: Calculated from "external" length gauge. Right: Calculated from "internal" length gauges.

Kemisk sammansättning och utlakningsegenskaper inklusive pH för "färsk" stålslagg från 7-månadersupplaget

Stålslaggen i 7-månadersupplaget bestod i huvudsak av järn (40 viktprocent) och kalcium (19 viktprocent). Kisel, magnesium, mangan och aluminium ingick med 3–5 viktprocent vardera. Huvudsakliga spårelement var krom, titan, fosfor, vanadin och svavel (bilaga D.1).

Vid perkolationstestet lakades främst kalcium, kisel, klorid, sulfat och natrium ut (bilaga D.3). pH i lakvattnet ökade med L/S från 10,7 till 11,1 medan den elektriska konduktiviteten varierade mellan 47 och 57 mS/m. Redoxpotentialen varierade mellan 131 och 206 mV (tabell 6).

Tabell 6 pH, konduktivitet och redoxpotential för färsk stålslagg från 7-månaders-upplaget. Resultat från perkolationstest.
Table 6 pH, conductivity and redox potential of fresh steel slag from the 7 month pile. Results from percolation test.

provnr	L/S	pH	Konduktivitet	Redoxpotential
			mS/m	mV
07241	0,1	10,74	57	206
07242	0,3	10,86	53	198
07243	0,5	10,93	50	149
07244	1	11,05	47	184
07245	2	11,06	51	131

6 Diskussion av stålslaggresultat

Här jämförs och diskuteras resultatet för vägmaterial och upplagsmaterial, både helt färskt och från 7-månadersupplaget. I vissa fall jämförs även prov tagna i vägkant och vägmitt. När det gäller kemisk sammansättning och lakegenskaper jämförs resultaten dessutom med data för stålslagg från Smedjebacken som producerades och analyserades 1992 [13] och sedan har legat utomhus exponerat för väder och vind i en öppen lysimeter hos SGI i Linköping [29]. Hänsyn har då tagits till att perkolationstestet på 1992-materialet gjordes på krossad stålslagg och i den här studien på okrossat material.

6.1 Skillnader i kornstorleksfördelning, packningsegenskaper, korndensitet och vattenabsorption

Visuellt upplevdes ingen skillnad mellan stålslagg från vägen och stålslagg från 7-månadersupplaget. Siktningsanalysen visade att upplagsmaterialet var mer ”sandigt” än vägmaterialet även om hänsyn tas till att korn större än 40 mm hade siktats bort innan den färska slaggen lades i upplaget (figur 30). Detta avspeglas i packningsförsöken där upplagsmaterialet var mer vattenkänsligt, vilket framgår av packningskurvorna. Vidare hade upplagsmaterialet lägre skrymdensitet och korndensitet än vägmaterialet.

Stålslaggens skrymdensitet låg mellan 2,3 och 2,5 ton/m^3, vilket är normalt för stålslagg. Det är mycket högre än för krossat berg, som brukar ha värden mellan 1,8 och 2,0 och beror på att stålslagg innehåller över 30 viktprocent järn. Även korndensiteten visar på innehållet av ”tunga” mineral. Stålslaggens korndensitet 3,6 (upplag) och 3,8 (väg) kan jämföras med 2,6 ton/m^3 för granit. Det låga värdet på vattenabsorptionen, 0,7 %, kan tolkas som att materialet är kompakt utan porer eller på att de porer som finns är slutna utan kontakt med omgivningen.

6.2 Skillnader i mineralogi och mikrostruktur

SEM- och EDS-analys utfördes enbart på stålslagg från vägen och här jämförs resultatet för partiklar från vägmitt och vägkant.

Även om inga helt ostörda prov kunde tas i stålslaggvägen hade de provtagningsrör med material som togs upp sparats och förvarats förseglade sedan provtagningen. När stålslagg från vägkantrör och vägmittrör jämfördes kunde man med blotta ögat se att vägkantmaterialet var mer påverkat. Partiklarna hade en gråblå vittringshud medan materialet från vägmitt hade en i stort sett oförändrad gråsvart färg.

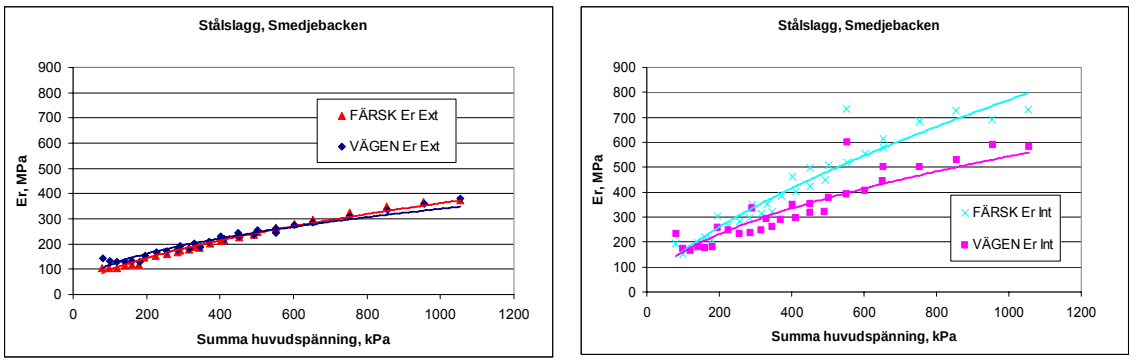
När ytan på enskilda partiklar studerades i svepelektronmikroskop kunde gipsbildning konstateras. Den fanns på alla partiklar, men har troligen ägt rum i samband med provtagning och provberedning och förekommer normalt sett inte i vägen. På partikelytorna fanns också utfällningar av kalciumsulfat och kalciumsilikat. Partiklar från vägkanten hade mer sådana utfällningar än partiklar från vägmitt. Dessutom hade partiklar från ett tydligt skikt i vägmitt mer utfällningar. Detta skikt antogs sammanfalla med en nivå där extra packning eller trafikering med byggtrafik ägt rum (figur 6). Troligen hade trafiken krossat ned slaggpartiklarna och ökat takten för åldringsreaktionerna och åldringen resulterade i sin tur i utfällningar av kalciumsilikater på partikelytorna.

Tvärsnittsanalyser av stålslaggpartiklarna visade ingen variation i kemisk sammansättning från partikelytan och inåt (bortsett från utfällningarna på partikelytorna). Det fanns alltså inga spår av någon kemisk reaktionsfront, varken i partiklar från vägmitt eller i partiklar från vägkant.

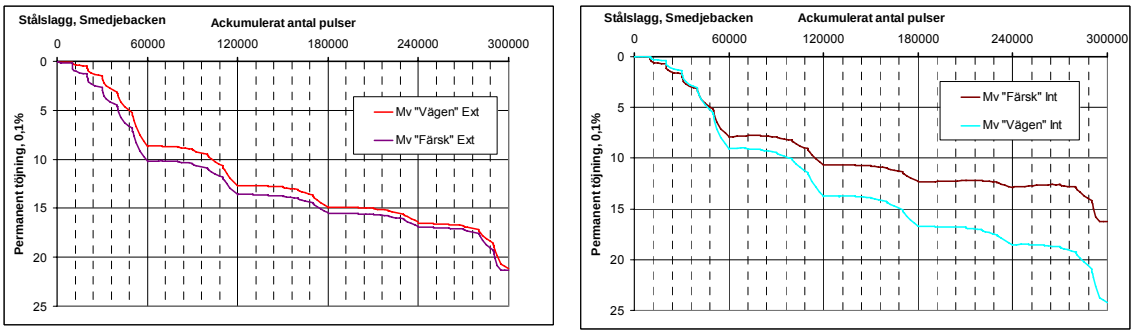
6.3 Skillnader i styvhet och stabilitet

Här jämförs egenskaperna hos stålslagg som grävts upp från vägen och stålslagg från 7-månadersupplaget. Eftersom treaxialtesterna på stålslagg från vägen gjordes på ett samlingsprov kan inte eventuella skillnader mellan material från vägmitt och material från vägkant utläsas.

En hypotes var att i analogi med vad som gäller för bituminösa material skulle åldrad stålslagg vara hårdare och mindre seg och därmed styvare, men samtidigt sprödare och mindre stabil. Tanken var då att materialet i vägen skulle vara styvast på grund av tio års åldring jämfört med det färska med bara sju månaders åldring. En annan hypotes var att åldrat material skulle vara mindre hållfast på grund av nedbrytning eller utlakning av olika mineral. Treaxialtesterna visade emellertid att materialen var lika styva och stabila och när deformationen mättes med de interna deformationsgivarna var upplagsmaterialet styvast och stabilast (figur 34 och 35).



Figur 34 Resilientmodul vid dynamiskt treaxialtest på stålslagg. Medelvärde för vägmaterialet respektive upplagsmaterialet. Till vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Till höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 34 Resilient modulus in cyclic load triaxial test of steel slag. Mean value of road material and pile material respectively. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.



Figur 35 Ackumulerad permanent hoptryckning vid dynamiskt treaxialtest på stålslagg. Medelvärde för vägmaterialet respektive upplagsmaterialet. Till vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Till höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 35 Ackumulated permanent compressive strain in cyclic load triaxial test of steel slag. Mean value of road material and pile material respectively. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.

Det är många parametrar som påverkar styvhet och stabilitet i ett treaxprov. Här diskuteras vilken roll följande parametrar har för skillnaderna mellan upplags- och vägmaterial:

- materialens kornstorleksfördelning
- provkropparnas relativa densitet
- vattenkvot
- deformationsmätningen vid själva treaxförsök.

Inför treaxialtestningen siktades korn större än 32 mm bort från båda materialen. Det betyder att upplagsprovkropparna innehöll mer material i intervallet 0,6–3 mm (bättre stabilitet) och mindre i intervallet 16–32 mm (mindre styvt). Upplagsprovkropparna var dessutom lite bättre packade och hade gynnsammare vattenkvot (tabell 7), vilket pekar på högre styvhet och stabilitet.

Tabell 7 Packningsdata för treaxprovkroppar av stålslagg.
Table 7 Compaction data for specimens of steel slag in cyclic load treaxial tests.

Prov	Packningsgrad	Torr skrymdensitet	Relativ vattenkvot (av optimal)	Faktisk vattenkvot (efter test)
Målvärde	*95 %*	–	*60 %*	–
Från vägen	97 %	2,46 t/m³	53 %	1,9 %
Från 7-mån.upplaget	98 %	2,39 t/m³	64 %	2,0 %

När det gäller deformationsmätningen brukar mätning av den elastiska töjningen med interna lägesgivare ge lägre värden än mätning med extern givare, vilket innebär högre styvhet (avsnitt 4.2). Så var det även vid treaxialtesterna på stålslaggen, men styvhetshöjningen var dubbelt så stor för upplagsmaterialet. Det har alltså deformerats mycket mindre i provkroppens mittparti än i övriga delar av provkroppen, men någon tydlig krossning i provkroppens topp observerades inte.

Oberoende av sättet att mäta deformation framgår det tydligt att stålslaggens styvhet är spänningsberoende så att styvheten ökar ju större last som materiallagret utsätts för (figur 34). Stålslagg är alltså ett friktionsmaterial, där den inre hållfastheten byggs upp med hjälp av friktion mellan partiklarna.

Det brukar inte vara så stor skillnad mellan stabiliteten beräknad från extern och interna lägesgivare. På provkroppar med ”öppet” material där hålrummet mellan de stora partiklarna inte fylls helt av finmaterial kan det vara svårare att fixera de interna lägesgivarna än på mer jämnkornigt material. Risken är då att givarna kasar och ger för stora eller för små värden. För stålslaggen kan man notera att stabiliteten för upplagsmaterialet blev större när den beräknades från de interna lägesgivarna medan det var tvärtom för vägmaterialet. De interna lägesgivarna brukar ge större spridning mellan provkroppsresultaten och så var fallet för stålslaggen också, både för vägmaterialet och för upplagsmaterialet.

Hypotesen om förändring i styvhet och stabilitet på grund av åldring kunde alltså inte bekräftas. Det troliga är att deformationsegenskaperna förändras så lite att det inte ger utslag vid treaxialprovning av inpackade prov.

6.4 Vattenexponering i stålslaggvägen

Här jämförs stålslagg från upplag, vägmitt och vägkant samt stålslagg från 1992. För stålslaggen från 1992 finns en mätserie för perioden 1992–2005 [13], [29].

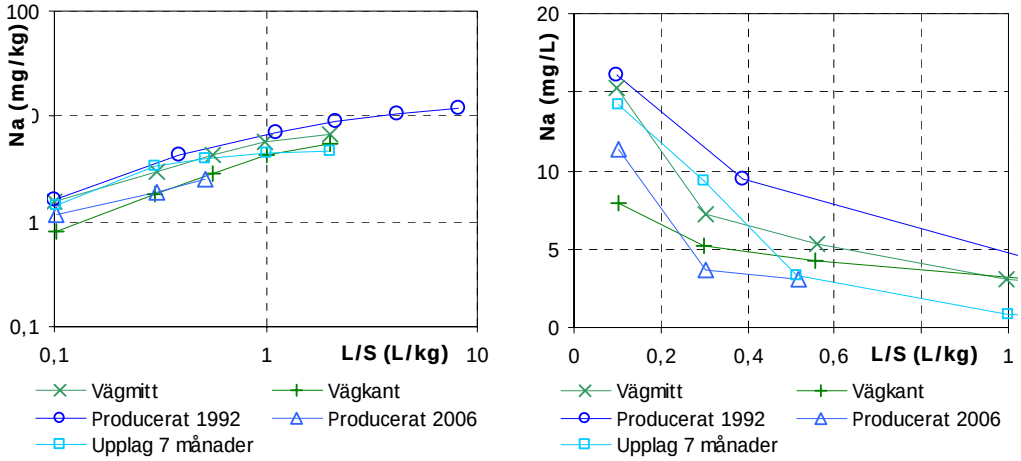
Genom att jämföra tidsförloppet för lakningen av några lättlakade ämnen från de olika stålslaggproven kan man uppskatta mängden vatten som materialen har varit i kontakt med. Ämnen som brukar användas för detta ändamål är klor, kalium och natrium. Eftersom kloridhalten i vägproven låg under detektionsgränsen diskuteras bara natrium och kalium. För båda dessa syntes en avklingning av koncentrationerna under perkolationstestet för samtliga material. Det visar att det var salternas tillgänglighet i stålslaggen som kontrollerade utlakningens förlopp.

Av de stålslaggmaterial som ingår i jämförelsen kan man anta att det färska materialet och 7-månadersmaterialet skulle ha högst halt kvar av olika ämnen och därmed störst koncentration i det första lakvattnet. Man kan också anta att vägkantmaterialet skulle ha lägst halter kvar på grund av långvarig påverkan från nederbörd m.m.

Om man jämför natriumkoncentrationerna i det första lakvattnet, vid L/S 0,1 L/kg, dvs. när 0,1 liter vatten per kg stålslagg har passerat igenom kolonnen, kan följande konstateras: Råmaterialet (1992), stålslaggen från vägmitt och stålslaggen från 7-månadersupplaget hade de högsta mängderna lakbart natrium kvar (figur 36 höger). Det kan tolkas som att dessa material hade varit i kontakt med en mindre mängd vatten före provtagningen än vägkantmaterialet och det färska materialet. Även klorutlakningen för dessa två tyder på en liten vattenexponering. Den stora skillnaden i natriumlakning mellan färsk slagg från 2006 och färsk slagg från 1992 är anmärkningsvärd. Möjligen orsakas skillnaden av att det färska materialet från 2006 var bara en dag gammalt, medan materialet 1992 hade legat på upplaget vid fabriken ett tag, och de allra tidigaste åldringsprocesserna hade inte hunnit göra natrium lika tillgängligt i slaggen från 2006 som i slaggen från 1992.

Lakresultaten bekräftar hypotesen att stålslaggen från vägkanten hade utsatts för störst vattenpåverkan av de fem materialen före testet. Natriumkoncentrationen i det första perkolationsvattnet var bara hälften av den för stålslaggen från vägmitt och råmaterialet 1992. Minskningen motsvarade ett L/S mindre än 0,1 L/kg för vägkanten, vilket är lågt.

Vattenexponeringen sedan 1996 för stålslaggen i vägmitt kan alltså antas vara högst 0,1 liter vatten per kg material.



Figur 36 Lakning av natrium vid perkolationstester på stålslagg. Till vänster: Ackumulerad utlakad mängd. Till höger: Koncentration i de fyra första lakvattnen.
Figure 36 Leaching of sodium in percolation tests on steel slag. Left: Cumulative leaching. Right: Concentration in the first four leachates.

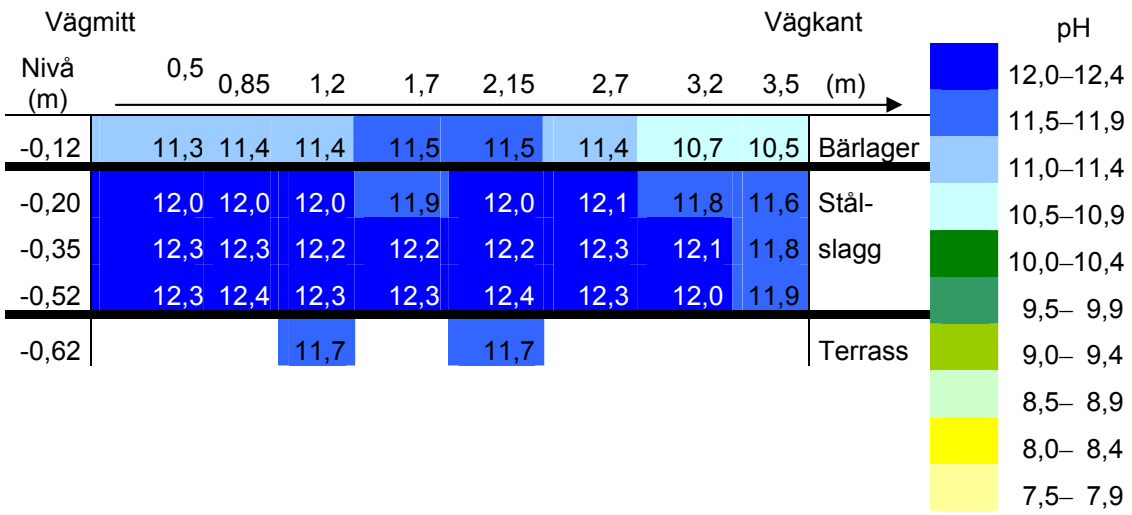
6.5 Skillnader i pH och lakning av pH-beroende metaller

Stålslaggen från vägen hade pH-värden mellan 11,6 (vägkant) och 12,4 (vägmitt), vilket överensstämde med pH-värdena i perkolationstesterna (figur 37 och 38).

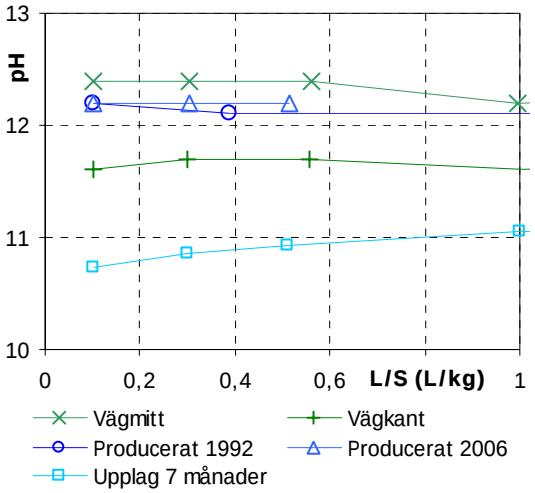
pH-minskningen i vägkanten kan ha orsakats av karbonatisering, oxidation och/eller utlakning. Vid karbonatisering reagerar luftens koldioxid med (kalcium)hydroxider i stålslaggen och bildar kalcit. Detta ökar karbonathalten och sänker pH. Vid oxidation av sulfider i slaggen sänks också pH och vid utlakning av hydroxider och karbonater sänks buffringsförmågan och pH. Det som talar emot utlakning som pH-sänkande process var att 7-månadersupplaget hade ett betydligt lägre pH och samtidigt en liten utlakningsbenägenhet efter sju månader (avsnitt 6.4). Det troliga är därför att karbonatisering eller oxidation har varit den dominerande processen.

Vägmittmaterialets pH-värde var mycket likt den färska stålslaggens och även pH för råmaterialet som analyserades 1992 och har alltså inte påverkats så mycket under åren. pH för färskt material verkar inte heller ha förändrats så mycket (figur 38).

Enligt pH-karteringen hade naturmaterialen i lagren ovanför och under stålslagglagret relativt högt pH – mellan 10,5 och 11,5 i bärlagret och 11,7 i terrassmaterialet. pH runt 10 är normalt för ett nykrossat bergmaterial där mineralvittring inte har påbörjats, men pH över 9 i grusmorän är anmärkningsvärt [50]. Troligtvis har stålslaggen påverkat det underliggande lagret, även om en fiberduk skiljde lagren åt.



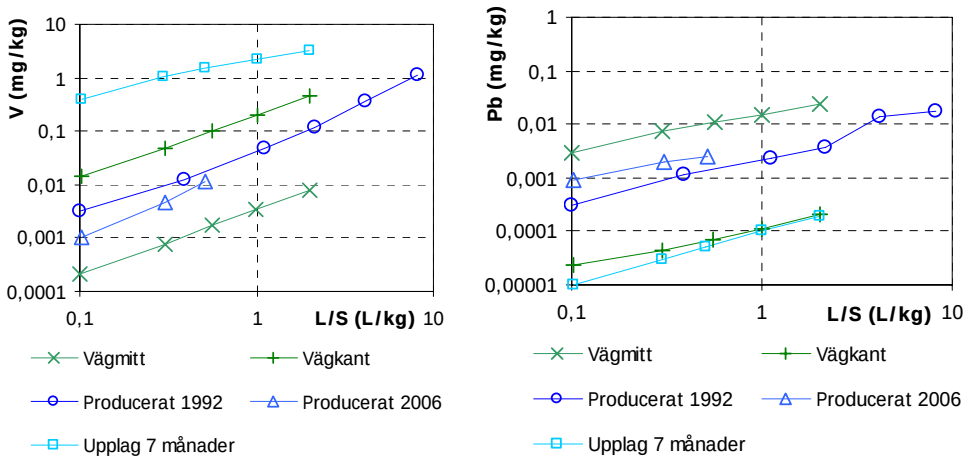
Figur 37 pH-profil i stålslaggvägen.
Figure 37 pH profile in the steel slag road.



Figur 38 pH i lakvattnet från perkolationstester på stålslagg.
Figure 38 pH in leachate from percolation tests on steel slag.

Effekten av pH på lakresultaten syntes tydligt för vanadin (V) som lakas ut mer när pH sjunker. Materialet med lägst pH (7-månadersupplaget) lakade ut mest vanadin och de andra materialen följde samma mönster (figur 39 vänster). Utlakningen av vanadin var löslighetsbegränsad, troligen av kalciumvanadat. Vissa tecken på avklingning eller tillgänglighetsbegränsning i lakningen syntes för 7-månadersupplaget vid L/S större än 0,5.

Även blylakningen var pH-beroende, med mindre lakning för material som hade lägre pH (figur 39 höger). Det stämmer med observationerna för en annan provväg med stålslagg, dock utan asfaltbundna lager i ytan [15]. Troligen är blyhydroxid det begränsande mineralet.



Figur 39 Ackumulerad utlakning av vanadin (V) och bly (Pb) i perkolationstester på stålslagg.
Figure 39 Cumulative release of vanadium and lead in percolation tests on steel slag.

6.6 Svavellakning från stålslaggen

V (vägkant), vilket visar att materialen var ganska oxiderade. Den lägre redoxpotentialen för vägmittmaterialet berodde troligen på pH-effekter. Det färska materialet med redoxvärdena 150–300 mV 1992 och cirka 140–200 mV 2006 var också oxiderat.

Svavel som lakades från det färskaste materialet (2006) var eventuellt inte oxiderat eftersom sulfat svarade för mindre än 34 % av totalsvavelinnehållet. I vägmaterialen däremot var sulfatlakning lika stor eller till och med större än totalsvavellakningen (avsnitt 5.1.6), vilket betyder att allt svavel från vägmaterialen torde vara sulfat. Detta innebär att oxidationen kan ha ägt rum antingen i vägen eller i upplaget.

Sulfat, kalcium och barium uppvisade löslighetsbegränsad lakning i perkolationstesterna. Halterna i lakvattnen motsvarade lösligheten för bariumsulfater och ettringit[6] för både vägmaterialen och det färska materialet, men lakvattnen var inte mättade med avseende på gips (kalciumsulfat), trots att mineralet observerats vid den mineralogiska undersökningen (avsnitt 5.1.3). Den mineralogiska tolkningen av detta var att gipsutfällningarna på partikelytorna inte hade avsatts i vägen utan när provet torkat vid provtagningen.

Laktester och pH-mätningar utförs vid vattenmättade förhållanden, men slaggen i vägen var inte vattenmättad och har troligen inte utsatts för omfattande vattenmängder (avsnitt 6.4). Bristen på vatten kan ha underlättat en utveckling av mikromiljöer med annorlunda geokemi, till exempel lägre pH, genom att de normalt mycket rörliga vätejonerna inte har kunnat transporteras. Vid oxidation av sulfider på ytan av slaggpartiklarna bildas både sulfat- och vätejoner (alternativt uttryckt förbrukas hydroxidjoner). Vid karbonatisering av kalciumhydroxid bildas kalciumkarbonat och vätejoner. Vätejoner är normalt mycket mobila, men vattenbrist kan ha hindrat vätejonerna från att transporteras och därmed har ett lokalt lägre pH skapats. Vid detta lägre pH fälls inte ettringit ut, utan kombinationen av sulfat och lägre pH orsakar utfällning av gips och järnsulfater. När slaggen vattenmättas för att mäta pH eller genomföra perkolationstest

[6] Ettringit = $Ca_6Al_2[(OH)_4SO_4]_3 \cdot 26H_2O$

störs denna mikromiljö och pH-värdet ökar, vilket orsakar upplösning av gips och utfällning av ettringit.

Samma stålslagg som studeras här har också sedan 1992 åldrats utomhus, exponerat för väder och vind i en öppen lysimeter, hos SGI i Linköping [29]. pH i lakvattnet från denna lysimeter sjönk från 9 till 8 under perioden 1992–2005, men var 11,7 när det mättes på krossat material under mättade förhållanden [30]. Detta bekräftar förekomsten av mikromiljöer med lägre pH, som sedan buffras av omgivande mineral när transport möjliggörs genom vattentillsats.

6.7 Vägsläntens betydelse för åldringsprocessen

Stålslagg, som lades ut som förstärkningslager i vägens mitt 1996 hade tio år senare ett pH-intervall i samma storleksordning som råmaterialet undersökt 1992 och färsk stål-slagg som producerats och undersökts 2006. Det visar att stålslagg som placeras i en relativt tät omgivning i en väg karbonatiseras bara marginellt under tio års tid. Lak-resultaten visar samma sak.

Efter tio år hade stålslaggen i vägkant annorlunda lakkaraktäristik än slaggen i vägens mittdel. Vägsläntен bedöms ha gett större åldringspotential, genom karbonatisering, till vägkantmaterialet än till material i vägens mittdel.

För vägens omgivningspåverkan betyder bristen på pH-sänkning i vägmitt att potentialen för en förändrad utlakning som följd av djup karbonatisering kvarstår även tio år efter utplacering. Minskning av pH från högt värde ned mot neutralt innebär bland annat ökad utlakning av vanadin och minskad utlakning av bly.

7 Snabbåldring av stålslagg

Metodutvecklingen grundade sig på de jämförelser mellan väg- och upplagsmaterial som har redovisats i kapitel 6 och de åldringsprocesser som har observerats.

Perkolationsresultaten tydde på att materialet i stålslaggvägen hade varit i kontakt med mycket små vattenmängder, motsvarande ett L/S mindre än 0,1 L/kg (avsnitt 6.4). Någon större utlakning från vägmaterialet hade alltså inte ägt rum och därför utformades snabbåldringstesterna så att stålslaggens kontakt med vatten skulle minimeras. Provmaterialet hölls endast fuktigt för att underlätta de kemiska reaktionerna.

Stålslaggen i vägkant och 7-månadersupplaget hade utsatts för karbonatisering eller oxidation. Det framgick av de låga pH-värdena – vägkantmaterialet hade pH 11,6 enligt både perkolationstestet och pH-karteringen i vägen, medan 7-månadersupplaget hade pH 11 (figur 37 och 38). Det syntes också på utlakningen av vanadin och bly som båda påverkas av ett sänkt pH. Stålslaggen i vägmitt visade däremot inga tecken på karbonatisering (avsnitt 6.5). I snabbåldringstesterna har därför stålslaggen utsatts för karbonatisering.

Oxidation har troligen ägt rum i det färska materialet eftersom det lakade både svavel och sulfat och det gjorde inte något av de lagrade materialen. Det fanns dock ingen skillnad mellan vägmitt, vägkant och 7-månadersupplaget vad gäller lakningen av krom och svavel eller redoxpotential. Den högre redoxpotentialen i 7-månadersupplaget kan förklaras med det (relativt) låga pH-värdet (avsnitt 6.5). I snabbåldringstesterna har därför stålslaggen även utsatts för oxidation.

De mineralogiska analyserna visade inte på några åldringsprocesser inuti partiklarna. På partikelytorna observerades gipskristaller och järnsulfater och i mindre omfattning kalciumsilikater (avsnitt 5.1.3).

7.1 Utgångsmaterial

Den slutliga snabbåldringsmetoden är tänkt att tillämpas på material som är färdigt att användas och ska spegla förändringen i vägen på ungefär 10–20 års sikt. Startmaterialet för snabbåldringstesterna skulle alltså motsvara material som läggs i vägen från ett upplag.

Det purfärska råmaterialet var mindre lämpligt som startmaterial eftersom både krom och svavel bör ha oxiderats före användning. 7-månadersupplaget hade pH 10,7 enligt perkolationstestet medan det mest påverkade provet i vägen hade pH 11,6 (figur 37 och 38). Därmed var 7-månadersupplaget klart mer påverkat än vägmaterialet. Därför var 7-månadersupplaget inte heller någon lämplig utgångspunkt för snabbåldring. Detta är intressant eftersom det lagrades just med tanke på att utgöra startmaterial för åldringstester.

Vägmittmaterialet hade däremot bara varit utsatt för små eller långsamma åldringsprocesser, vilket framgick av att dess lakegenskaper var mycket lika råmaterialets. Därför utfördes snabbåldringstesterna på stålslagg från vägmitten, med syfte att jämföra materialet efter snabbåldring med material från vägkanten där åldringsprocessen hade kommit längre.

7.2 Genomförande

Karbonatisering och oxidation av stålslaggen genomfördes på följande sätt:

- Material från stålslaggvägens vägmitt siktades till < 4 mm
- 16 g naturfuktigt material vägdes in i 50 ml plastflaska med skruvlock
- 0,6 g; 1,25 g eller 2,5 g avjoniserat vatten droppades in i flaskorna, motsvarande lite, måttlig och mycket vatten
- Flaskorna fylldes med gas, som fuktades genom att den fick strömma igenom en tvättflaska med avjoniserat vatten. Koldioxid, syrgas och kvävgas användes, där provet med kvävgas utgjorde ”referens”
- Flaskorna förslöts med skruvkork och placerades i vändskakapparat som ställdes på lägsta hastighet
- Vändskakapparaten placerades i värmeugn, 40ºC, i en vecka.

Dessutom placerades prov med måttlig vattentillsats i rumstemperatur i en vecka och i 40ºC i två veckor. Duplikat gjordes på samtliga prov (tabell 8).

Effekten av de olika behandlingarna mättes genom att pH bestämdes enligt följande: 50 ml vatten tillsattes till flaskan som skakades i fem minuter och fick stå i minst två timmar innan pH avlästes med hjälp av en pH-elektrod.

Tabell 8 Översikt över snabbåldringstest på stålslagg.
Table 8 Accelerated ageing of steel slag, overview.

	Fukt:	Liten	Måttlig	Måttlig	Måttlig	Mycket
	Temp:	40°C	40°C	40°	Rumstemp.	40°C
Gas	Tid:	1 vecka	1 vecka	2 veckor	1 vecka	1 vecka
Koldioxid		2 prov	2 prov	2 prov	2 prov	2 prov
Syrgas		2 prov	2 prov	2 prov	2 prov	2 prov
Kvävgas		2 prov	2 prov	2 prov	2 prov	2 prov

7.3 Resultat och verifiering

Resultaten visade att syrgas och kvävgas inte hade någon effekt på pH. Behandlingarna resulterade i pH 12,2, dvs. samma pH som uppmättes i vägmittmaterialet vid pH-karteringen i vägen. Tillsats av koldioxid sänkte pH med en halv till en pH-enhet. Störst sänkning uppnåddes vid måttlig fukttillsats och 40ºC, som ledde till pH 11,3. Övriga varianter med koldioxid ledde till pH 11,4–11,6 (tabell 9).

Tabell 9 Resultat av snabbåldring av stålslagg. pH-värde efter behandling.
Table 9 Results of accelerated ageing of steel slag. pH after treatment.

	Fukt:	Liten	Måttlig	Måttlig	Måttlig	Mycket
	Temp:	40ºC	40ºC	40ºC	Rumstemperatur	40ºC
Gas	Tid:	1 vecka	1 vecka	2 veckor	1 vecka	1 vecka
koldioxid		11,5	11,3	11,8	11,5	11,6
koldioxid		11,6	11,3	11,6	11,4	11,4
syrgas		12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
syrgas		12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
kvävgas		12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
kvävgas		12,2	12,1	12,2	12,2	12,1

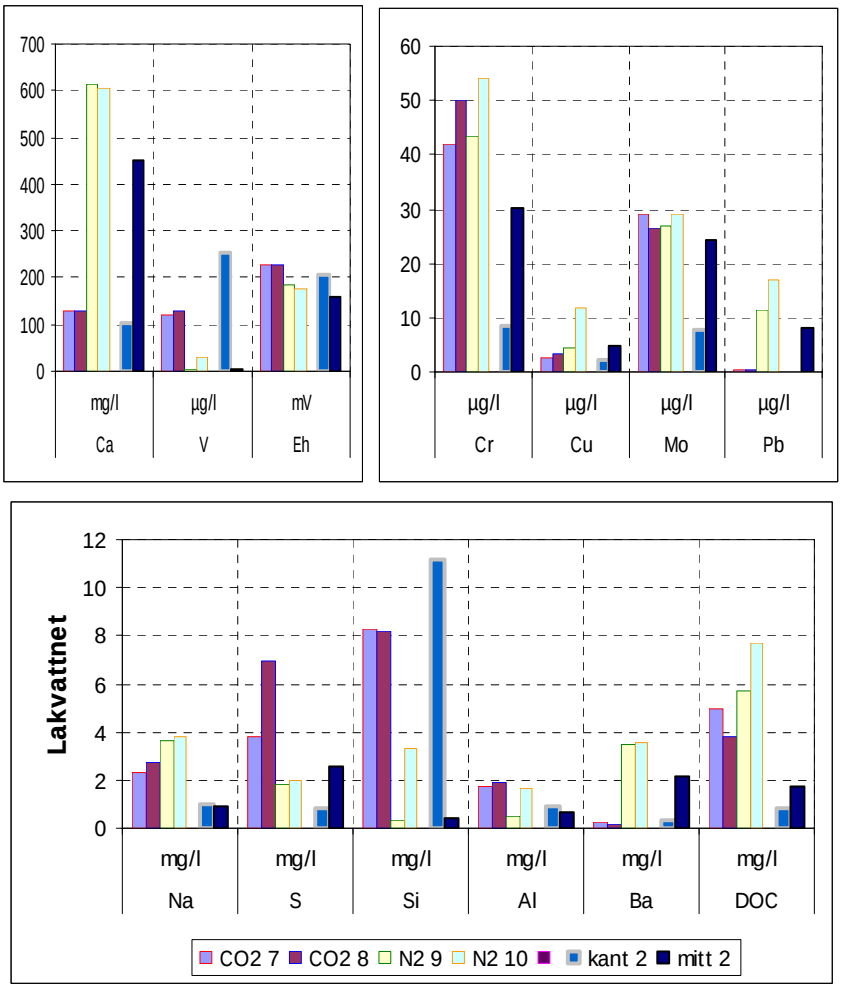
Att koldioxid och inte syrgas ledde till sänkt pH visar att vägmittmaterialet påverkades mer av karbonatisering än oxidation. Det gör troligt att pH-sänkningen i vägkant orsakades av karbonatisering och inte av oxidation.

För att verifiera effekten av koldioxidbehandling skakades de snabbåldrade proven med vattnet som tillsattes för pH-mätning och den resulterande lakvätskan analyserades med avseende på metaller, makroämnen och salter. Vattenmängden motsvarade L/S 3,4 och analysresultaten jämfördes med lakresultaten för vägmaterialen vid L/S 1 och 2 L/kg.

I lakresultaten visade koncentrationen av makroämnen att koldioxidbehandlingen påverkade lakningen på samma sätt som vägåldringen gjort (figur 40). Redoxpotentialen (Eh) samt koncentrationerna av kalcium (Ca), barium (Ba) och kisel (Si) var desamma som i lakvattnet från vägkantmaterialet. Efter kvävgasbehandlingen var däremot Eh och koncentrationerna desamma som i vägmittmaterialets lakvatten. Natriumkoncentrationen ökade med ökande L/S, vilket var väntat (avsnitt 5.1.6 och 6.4).

Åldringseffekten fångades bra för de pH-beroende spårämnena bly (Pb) och vanadin (V), där behandlingen med koldioxid efterliknade åldringseffekten i vägkant och kvävgasbehandlingen efterliknade effekten i vägmitt. Däremot kunde koldioxidbehandlingen inte spegla åldringseffekten för krom (Cr) och selen (Se) – båda snabbåldringsproven hade mer än dubbelt så höga kromkoncentrationer som vägkantproven (figur 40).

Den använda snabbåldringsmetoden kunde alltså simulera de uppmätta pH-värdena samt lakningsbeteendet för makroämnena och de pH-beroende ämnena, men inte lakningsbeteendet för krom och selen.



Figur 40 Jämförelse mellan koncentrationer efter snabbåldring av stålslagg med koldioxid (CO_2) respektive kvävgas (N_2) samt vägåldring (i vägkant och vägmitt). Koncentrationer efter snabbåldring enligt skaktest med L/S 3,4 L/kg och koncentrationer efter vägåldring enligt perkolationstest med L/S 1–2 L/kg.
Figure 40 Comparison of concentrations in leachate from accelerated ageing of steel slag (CO_2 and N_2 respectively at 40ºC for one week, followed by batch leaching at L/S 3.4 L/kg) and natural ageing in the road (kant = pavement edge and mitt = road centre). Concentrations in percolation leachate are L/S 1–2 L/kg.)

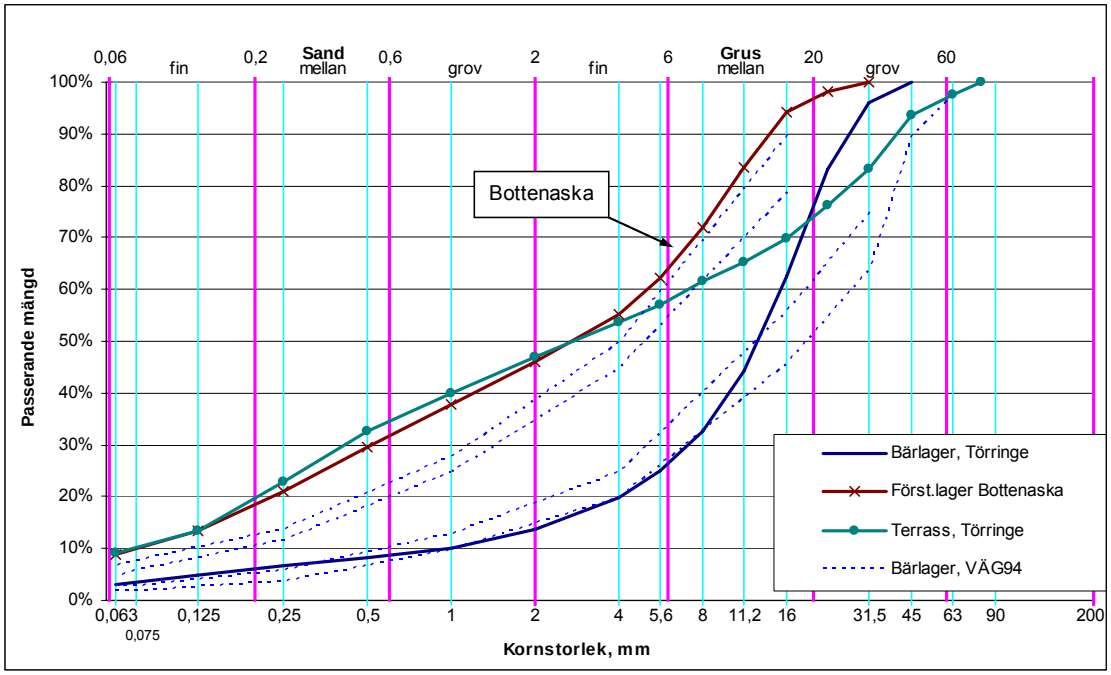
8 Egenskaper hos bottenaskprov

8.1 Bottenaska från vägen

Från provsträckan i Törringevägen togs prov på bärlager, förstärkningslager och terrassmaterial. Förstärkningslagret av bottenaska analyserades i laboratoriet med avseende på kornstorleksfördelning, vattenkvot och packningsegenskaper. Dessutom analyserades mineralogi och mikrostruktur, styvhet och stabilitet, kemisk sammansättning och organisk halt samt utlakningsegenskaper inklusive pH. Bärlagret och terrassmaterialet analyserades endast med avseende på kornstorleksfördelning och vattenkvot.

8.1.1 Bottenaskans kornstorleksfördelning, vattenkvot och packningsegenskaper samt densitet i fält

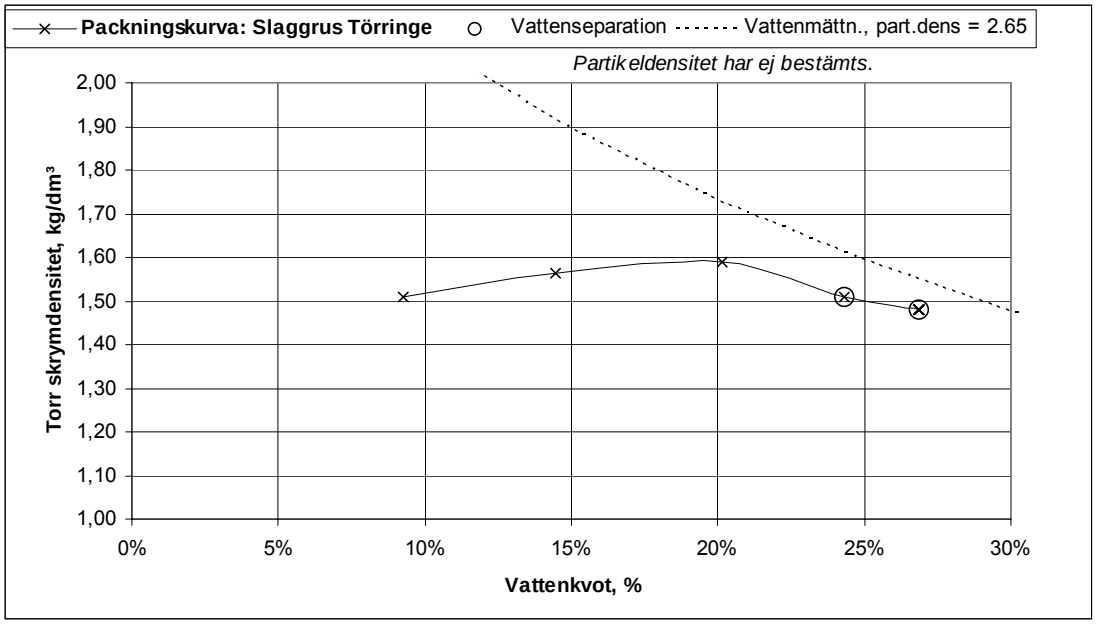
Enligt siktningsanalysen var bottenaskan från vägen välgraderad med cirka nio viktprocent finmaterial (0) och vattenkvoten var 24 %.



Figur 41 Kornstorleksfördelning hos obundna material från Törringevägen. (Gränskurvor för bärlager från VÄG 94[7].)
Figure 41 Particle size distribution of unbound materials from test site Törringevägen.

Vid packningstesterna bestämdes den optimala vattenkvoten till 20 % och den maximala torra skrymdensiteten som uppnåddes var 1,59 ton/m^3 (0). Fältmätningen med isotopmätare visade att våt skrymdensitet i vägen, för de översta 30 cm av bottenaskan, var 1,77 ton/m³ och torr skrymdensitet var 1,42 ton/m³.

[7] VÄG 94 var Vägverkets kravskrift när vägen byggdes.



Figur 42 Packningskurva för bottenaska uppgrävd ur Törringevägen.
Figure 42 Proctor curve for bottom ash from test pit in road.

8.1.2 Övriga obundna väglagers kornstorleksfördelning och vattenkvot

Bärlagret hade låg finmaterialhalt och en kornstorleksfördelning som var på gränsen till underkänd i fraktionen 1–8 mm (figur 41). Vattenkvoten var bara 2 %, vilket kan förklaras av den låga finmaterialhalten. Terrassmaterialet bestod av grusmorän med samma kornstorleksfördelning som bottenaskan i intervallet 0–4 mm. Vattenkvoten var 6,2 %.

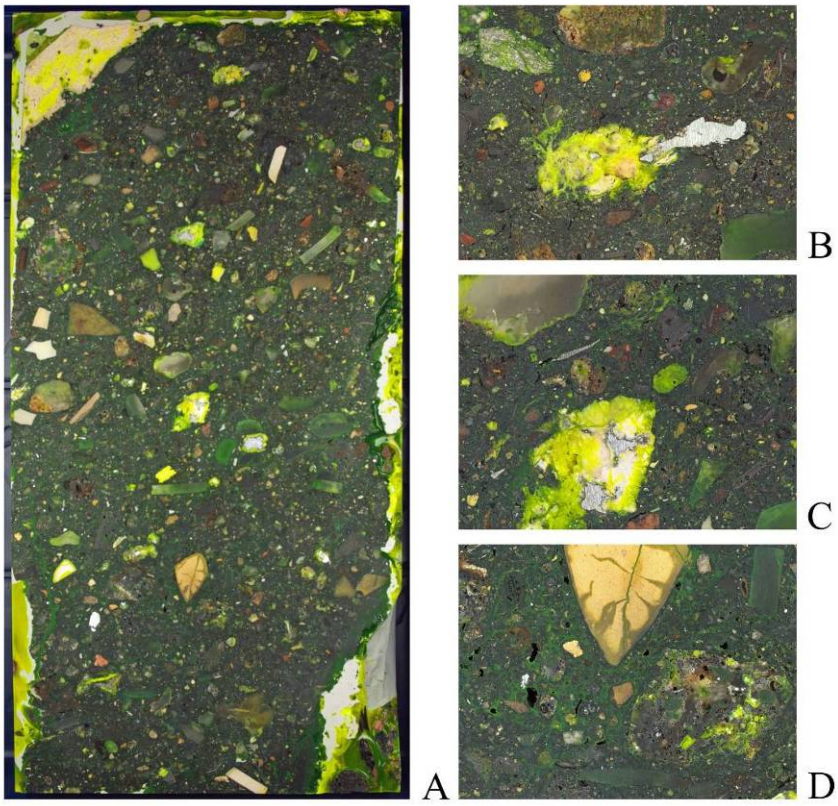
8.1.3 Bottenaskans mineralogi och mikrostruktur

Kvantitativ makroanalys

Den kvantitativa makroanalysen av tre preparat visade att bottenaskan bestod i huvudsak av finkorniga partiklar med kornstorlek under 2 mm (tabell 10). En stor del av de större partiklarna hade kvar sin ursprungskaraktär. De bestod av kantiga bitar av glas, porslin och kakel samt bergartsfragment och partiklar av järn och stål. Dessutom fanns partiklar som bildats vid förbränningen men sedan behållit sin karaktär i askmaterialet. Dit hör rundade svarta kolpartiklar och porösa silikatslaggpartiklar som blivit delvis uppsmälta vid förbränningen. Dessutom fanns partiklar som även makroskopiskt visade att de reagerat i vägen, till exempel aluminium- och sulfatpartiklar (figur 43). Det var ingen signifikant skillnad mellan preparat som var tagna från olika djup i vägkonstruktionen.

Tabell 10 Resultat från makroskopisk punkträkning på bottenaskprov från vägen.
Table 10 Results from point analysis of bottom ash sample from the road.

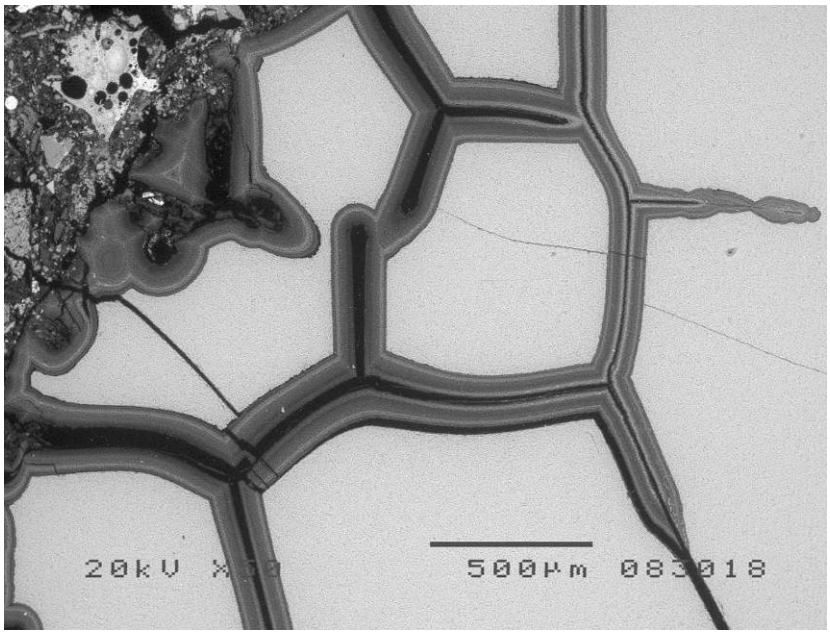
	Antal punkter	Volymprocent	Precision ±
Partiklar < 2 mm	568	75	3,1
Glas	57	8	1,9
Kol	35	5	1,5
Porös silikaslagg	30	4	1,4
Porslin och kakel	25	3	1,3
Sulfatpartiklar	13	2	0,9
Aluminium + aluminiumhydroxid	21	3	1,2
Bergpartiklar	11	1	0,8
Övrig metall	6	1	0,6
Total	760	100	



Figur 43 SEM-foton av bottenaskpartikel från Törringevägen. Partikeln är epoxyimpregnerad och planpolerad där gul färg är fluorescensen i epoxy-limmet.
B och C: Detalj där aluminiummetall har reagerat och bildat vit aluminiumhydroxid.
D: Detalj med beige sulfatpartikel.
Figure 43 SEM photos of bottom ash particle from Törringevägen. Epoxy impregnated polished plates, where yellow colour is fluorescence in the epoxy glue.
B and C: Detail where aluminium has reacted and white aluminium hydroxide is produced. D: Detail with beige sulphate particle.

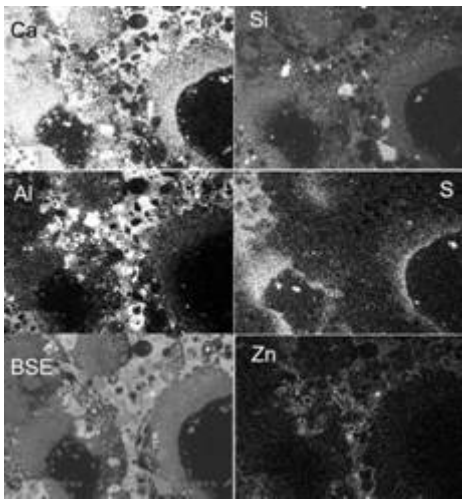
SEM/EDS-analys

SEM-analysen visade att bottenaskan innehöll kantiga upp till centimeterstora glaspartiklar. Dessa hade vanligen reaktionskanter där glaset brutits ned och spruckit upp och där kalciumhalten var lägre än i övriga delar. Reaktionerna bedömdes ha pågått även i vägen och nybildade sprickor gick i vissa fall från glaset in i omgivande material (figur 44).



Figur 44 SEM-foto av glaspartikel i bottenaska från Törringevägen. Bilden visar sönderfall i glaskanterna och expansionsreaktioner i glaset i väggkonstruktionen.
Figure 44 SEM photo of glass particle in bottom ash from Törringevägen. Edge reactions and expansions are shown.

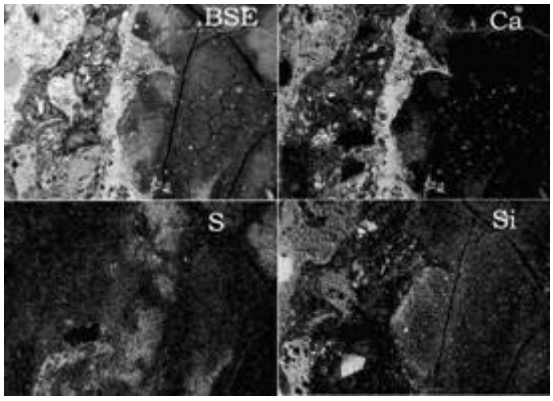
Bottenaskan innehöll också upp till centimeterstora porslins- och kakelfragment som inte hade några reaktionsspår. Dessutom kunde mikrometer- till centimeterstora porösa silikatslaggpartiklar ses i komplexa reaktionsmönster med kemisk zonering där sammansättningen nära partikelytan skiljde sig från sammansättningen djupare in i partikeln (figur 45). Även i den finkorniga omgivningen avvek den kemiska sammansättningen nära dessa partiklar.



Figur 45 Kemisk zonering i och runt en bottenaskpartikel enligt SEM-analys. Fördelning av kalcium, kisel, aluminium, svavel och zink. BSE-bilden är tagen med hjälp av återspridda elektroner.
Figure 45 Chemical zonation in and close to a bottom ash particle. The distribution of calcium, silica, aluminium, sulphur and zink are shown. The SEM image in the bottom left is taken in the BSE mode.

Kolpartiklar observerades som upp till centimeterstora rundade porösa korn med hög andel små mineralinneslutningar. Eftersom EDS-metoden inte kan detektera väte var det inte möjligt att skilja på rent kol och kolväten. Kolpartiklarna hade i vissa fall komplex kemi och EDS-spektrat visade förekomst av fosfor, klorid, svavel, zink och koppar förutom kol och de vanliga huvudelementen i silikatinneslutningarna, till exempel kisel, aluminium, kalium och kalcium.

Sulfat uppträdde både som partiklar och i låg koncentration utspritt i askan. Sulfatrika partiklar visade ofta komplexa kemiska reaktionsmönster. I flera av de analyserade sulfatpartiklarna skar dessa reaktionsmönster över partiklarnas ursprungliga gränsytor och fortsatte ut i den finkorniga omgivningen. Partikeln var då tydligt avgränsad i bilden som togs med återspridda elektroner, men var delvis upplöst i bilderna som visar den kemiska sammansättningen (figur 46).



Figur 46 Kemiska reaktionsmönster i och runt en bottenaskpartikel enligt SEM-analys. Fördelning av kalcium, svavel och kisel. BSE-bilden är tagen med hjälp av återspridda elektroner.
Figure 46 Chemical zonation in and close to a bottom ash particle. The distribution of calcium, sulphur and silica are shown. The SEM image in the top left is taken in the BSE mode.

Järn och aluminium var de vanligaste metallpartiklarna i bottenaskan. De större järnpartiklarna hade vanligen behållit den form som de hade före förbränningen medan de små varierade i form från rundade partiklar till oregelbundna skorpor som bildats på plats i vägen. Aluminium uppträdde som mikrometer- till centimeterstora fragment med mycket oregelbunden form och omgivna av en halo av aluminiumhydroxider och ofta låga halter av koppar.

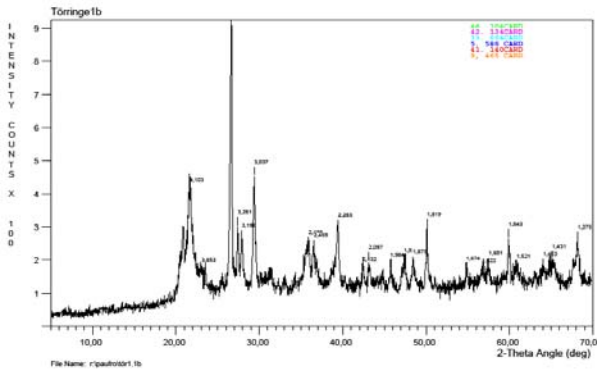
En stor del av bottenaskan utgjordes av partiklar som var upp till några få mikrometer stora. De bestod i huvudsak av kalcium, kisel, aluminium, kalium och natrium och var huvudsakligen silikater. Kalcium uppträdde som karbonater och tillsammans med svavel som gips. Volymen av dessa enskilda partiklar var för liten för att kunna studeras i detalj med EDS-analys.

XRD-analys

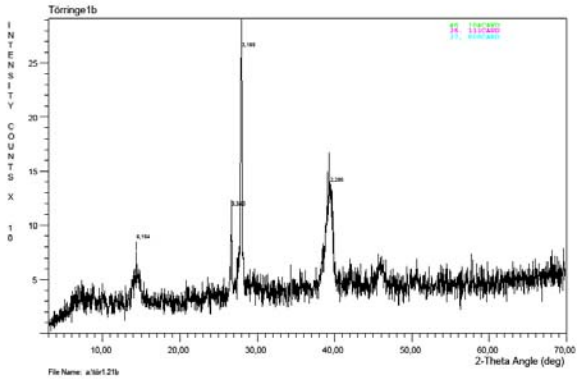
Den mineralogiska undersökningen med hjälp av pulverröntgendiffraktion bekräftade SEM-undersökningens resultat om förekomst av glas i bottenaskan. Glasförekomsten framgår av den förhöjda bakgrunden runt 36 och 64° 2-theta i diffraktogrammen (figurerna 47, 49 och 50). En antydan till peak runt 7° 2-theta i några diffraktogram (figurerna 47, 49 och 50) samt den breda peaken omkring 7° 2-theta i ett diffraktogram (figur 48) visar att lermineral troligen förekommer i provet.

Följande mineral kunde identifieras med hjälp av diffraktionsdatabas:

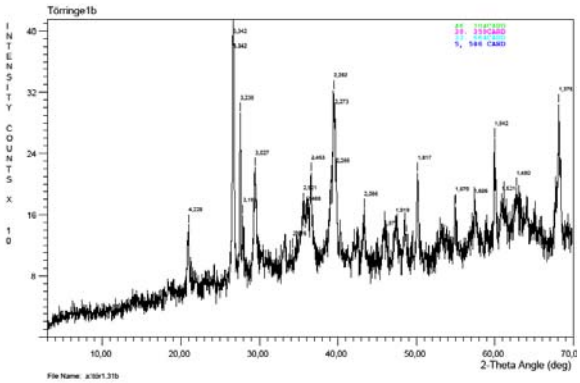
Anortit $CaAl_2Si_2O_8$	Hematit Fe_2O_3	Korund Al_2O_3
Augit $(Ca,Mg,Fe)SiO_3$	Kalcit $CaCO_3$	Kvarts SiO_2
Fältspat $(Na, K)AlSi_3O_8$	Kaminit $Mg_7(SO_4)_5(OH)_4 \cdot (H_2O)$	Pyrit FeS_2



Figur 47 Diffraktogram av bottenaska från Törringevägen. Kvarts, pyrit, hematit, kalcit och anortit kan identifieras.
Figure 47 Diffractogram of bottom ash from Törringevägen. Quartz, pyrite, hematite, kalcite and anortite can be identified.

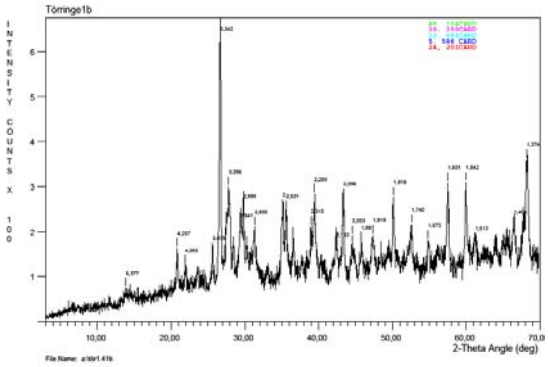


Figur 48 Diffraktogram av bottenaska från Törringevägen. Kvarts och fältspat kan identifieras.
Figure 48 Diffractogram of bottom ash from Törringevägen. Quartz and feldspar can be indentified.



Figur 49 Diffraktogram av bottenaska från Törringevägen. Hematit, kalcit och kvarts kan identifieras.

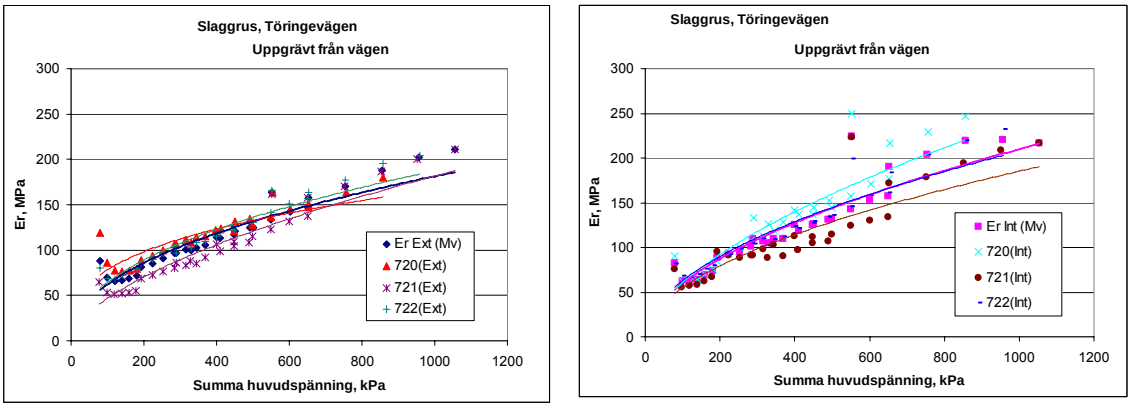
Figure 49 Diffractogram of bottom ash from Törringevägen. Hematite, kalcite and quartz can be identified.



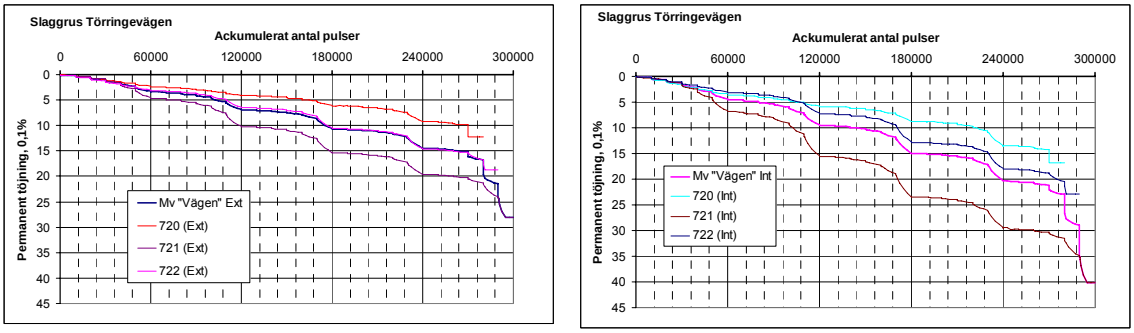
Figur 50 Diffraktogram av bottenaska från Törringevägen. Augit, hematit, kalcit, kaminit, korund och kvarts kan identifieras.
Figure 50 Diffractogram of bottom ash from Törringevägen. Augite, hematite, kalcite, kaminite, korund and quartz can be identified.

8.1.4 Bottenaskans styvhet och stabilitet

Bottenaskans styvhet angiven som resilientmodul, E_r, varierade mellan 50 och 250 MPa beroende på spänningsnivå och sättet att mäta deformation (figur 51). Bottenaskans stabilitet angiven som uppnådd deformation efter avslutat test var cirka 2,7 eller 4 % beroende på sättet att mäta deformation (figur 52).



Figur 51 Resilientmodul vid dynamiskt treaxialtest på bottenaska från vägen. Tre delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 51 Resilient modulus in cyclic load triaxial test of bottom ash from the road. Three specimens and mean value. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.

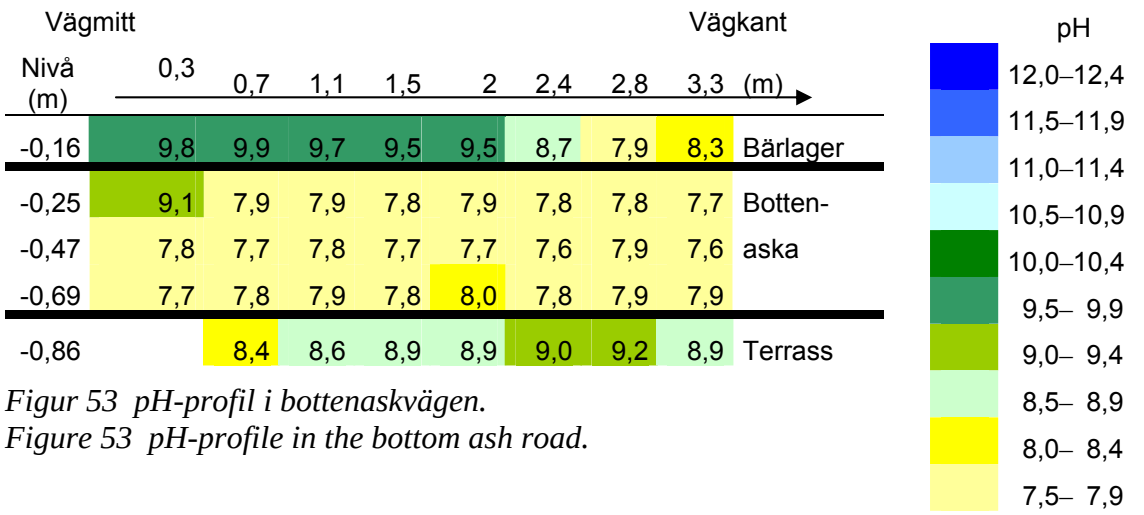


Figur 52 Ackumulerad permanent hoptryckning vid dynamiskt treaxialtest på bottenaska från vägen. Tre delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 52 Ackumulated permanent compressive strain in cyclic load triaxial test of bottom ash from the road. Three specimens and mean value. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.

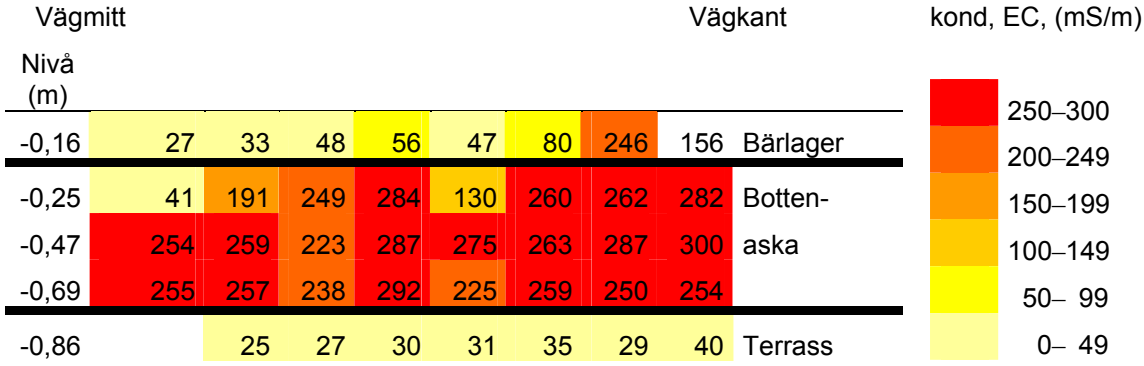
8.1.5 Bottenaskans kemiska sammansättning och organiska halt samt pH- och konduktivitetsprofil för vägen

Bottenaskan i vägen bestod i huvudsak av kisel (22 viktprocent), kalcium, järn och aluminium (6–9 viktprocent vardera). Natrium, kalium och magnesium ingick med 1–3 viktprocent vardera. Spårelement med hög halt var koppar med upp till 7 g/kg, zink med 2–3 g/kg och bly med cirka 1 g/kg. Den organiska halten bestämd som glödgningsförlust var 8,6 % i vägmitt och 7,3 % i vägkant (bilaga E.1).

Karteringen av pH och konduktivitet i askvägen visade att bottenaskan var väl karbonatiserad med pH 7,6–8,0 och elektrisk konduktivitet 130–300 mS/m (figur 53 och 54). För ett av askproven närmast vägmitt var pH- och konduktivitetsvärdena sådana att man kan misstänka inblandning av bärlagermaterial.



Figur 53 pH-profil i bottenaskvägen.
Figure 53 pH-profile in the bottom ash road.



Figur 54 Konduktivitetsprofil i bottenaskvägen.
Figure 54 Conductivity (EC) profile in the bottom ash road.

Bärlagrets pH varierade mellan 7,9 och 9,9 och konduktiviteten mellan 27 och 246 mS/m. Bärlagerproven närmast vägkanten hade lägst pH och högst konduktivitet, vilket kan bero på att de möjligen innehöll lite bottenaska. Terrassmaterialet hade pH 8,4–9,2 och konduktivitet 25–40 mS/m. Samtliga mätvärden för pH och konduktivitet finns i bilaga bilaga E.2 och E.3.

8.1.6 Bottenaskans utlakningsegenskaper

Enligt perkolationstestet lakade bottenaskan från vägen huvudsakligen ut sulfat, natrium, klorid och kalcium. Lakningen från vägmittaskan och vägkantaskan var lika stor utom för klor, kobolt, kalium, magnesium, natrium, selen, svavel och sulfat (bilas.4).

I det första lakvattnet hade aska från vägmitt och vägkant pH 8,1 respektive 8,0 och pH sjönk marginellt med tilltagande L/S. Konduktiviteten sjönk också med ökande L/S, från 1 060 till 333 mS/m för vägmittmaterialet och från 522 till 264 för vägkantmaterialet. Redoxpotentialen varierade mellan 313 och 358 mV för vägmittmaterialet medan den steg med ökande L/S för vägkantmaterialet från 328 till 375 mV. DOC ökade med L/S, från 0,7 till 14 mg/kg TS för vägmittmaterialet och från 0,4 till 11 mg/kg TS för vägkantmaterialet (tabell 11).

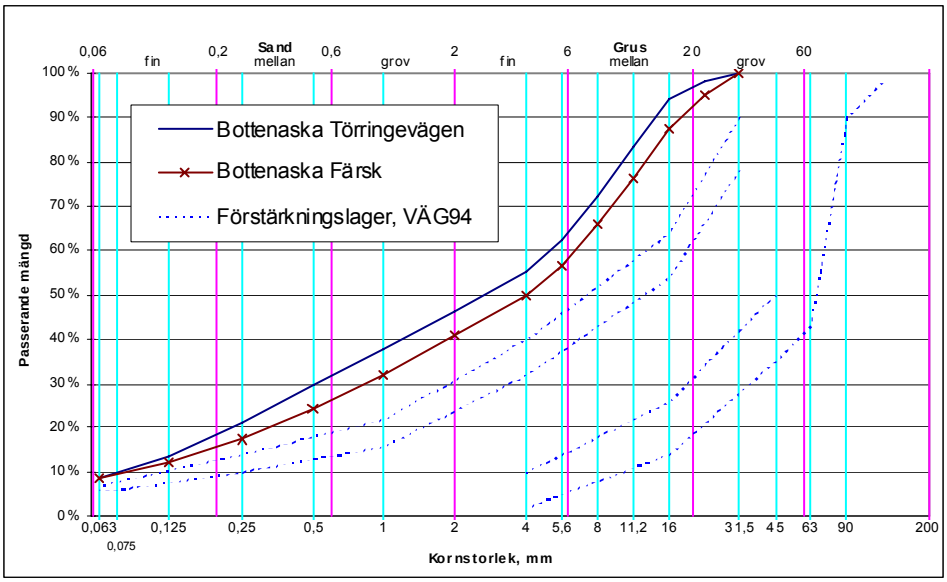
Tabell 11 pH, konduktivitet, redoxpotential och ackumulerad utlakning av DOC för bottenaska från väg. Resultat från perkolationstest.
Table 11 pH, conductivity, redox potential and cumulative leaching of DOC of bottom ash from the road. Results from percolation test.

	Provnr	L/S	pH	Konduktivitet	Redoxpotential	DOC
				mS/m	mV	mg/kg TS
Vägmitt	*06227*	0,1	8,1	1 060	336	0,7
	06228	0,2	8,1	977	358	1,4
	06229	0,5	8,0	737	313	3,9
	06230	1	8,0	476	331	8,8
	06231	2	7,9	333	347	14,0
Vägkant	*06232*	0,1	8,0	522	328	0,4
	06233	0,2	8,0	518	334	0,9
	06234	0,5	7,9	470	349	2,4
	06235	1	7,9	383	353	3,9
	06236	2	7,9	264	375	11,0

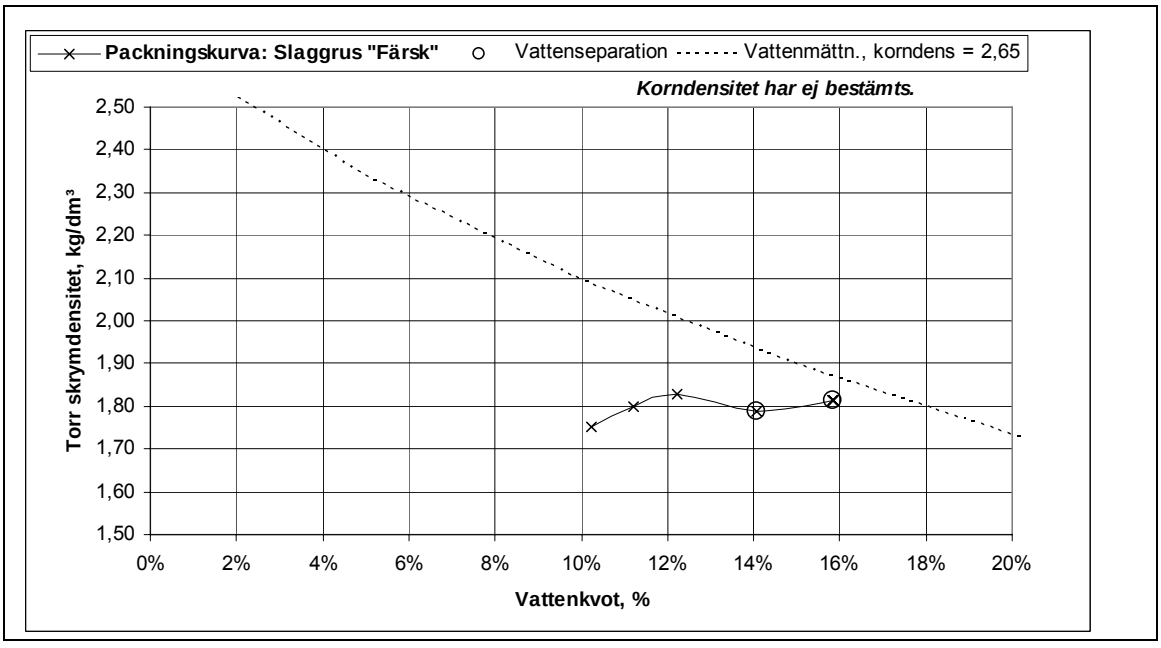
8.2 Bottenaska från upplag

På bottenaskan som hade lagrats sex till åtta månader på SYSAV:s upplag bestämdes kornstorleksfördelning och packningsegenskaper, styvhet och stabilitet samt kemisk sammansättning, organisk halt och utlakningsegenskaper inklusive pH.

Siktningsanalysen visade att den färska bottenaskan var välgraderad med cirka 9 % finmaterial (figur 55). Vid packningstesterna bestämdes den optimala vattenkvoten till 12 % och den maximala torra skrymdensiteten som uppnåddes var 1,83 ton/m^3 (figur 56).



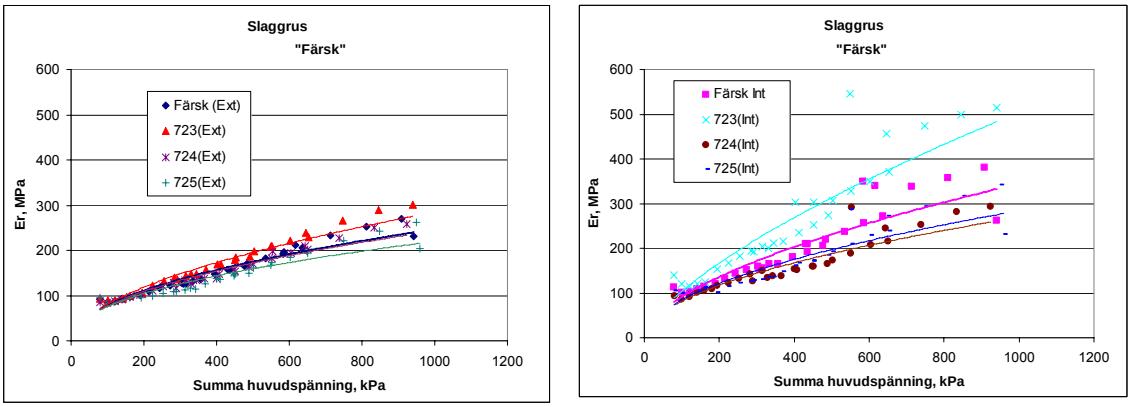
Figur 55 Kornstorleksfördelning för bottenaska från SYSAV. Jämförelse mellan färsk aska (6–8 mån.) och material uppgrävt från väg.
Figure 55 Particle size distribution of "fresh" bottom ash from pile and material from test pit.



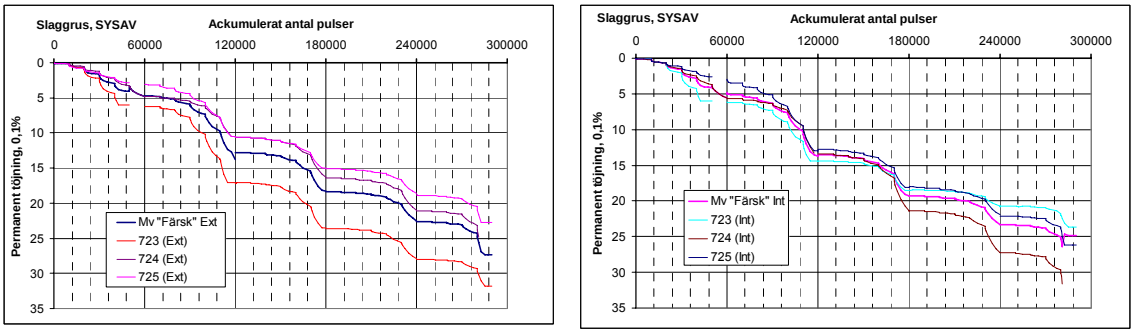
Figur 56 Packningskurva för färsk bottenaska från upplag.
Figure 56 Proctor curve for fresh bottom ash from pile.

Styvhet och stabilitet på "färsk" bottenaska från SYSAV:s upplag

Den färska bottenaskans styvhet angiven som resilientmodul, E_r, varierade mellan 90 och 340 MPa beoende på spänningsnivå och sättet att mäta deformation (figur 57). Stabiliteten angiven som uppnådd deformation vid avslutat test var cirka 2,6 % (figur 58).



Figur 57 Resilientmodul vid dynamiskt treaxialtest på bottenaska från upplag. Tre delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 57 Resilient modulus in cyclic load triaxial test of bottom ash from pile. Three specimens and mean value. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.



Figur 58 Ackumulerad permanent hoptryckning vid dynamiskt treaxialtest på bottenaska från upplag. Tre delprov och medelvärde. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 58 Ackumulated permanent compressive strain in cyclic load triaxial test of bottom ash from pile. Three specimens and mean value. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.

Kemisk sammansättning och organisk halt samt utlakningsegenskaper inklusive pH hos “färsk” bottenaska från SYSAV:s upplag

Bottenaskan som provtogs i SYSAV:s upplag bestod i huvudsak av kisel (22 viktprocent), kalcium och järn (8–9 %) samt aluminium och natrium (3–6 viktprocent). Innehållet av organiskt material var 3,2 % mätt som glödgningsförlust vid 1 000°C (bilaga E.1).

Enligt perkolationstestet lakades främst klorid, natrium, sulfat och kalcium ut (bilaga E.4). pH i lakvattnet sjönk med ökande L/S från 7,6 till 7,3. Även den elektriska konduktiviteten sjönk mellan det första och sista lakvattnet, från 2070 till 276 mS/m. Redoxpotentialen varierade mellan 305 och 342 mV medan DOC ökade med L/S från 14 till 78 mg/kg TS (tabell 12).

Tabell 12 pH, konduktivitet, redoxpotential och ackumulerad utlakning av DOC för bottenaska från SYSAV:s upplag. Resultat från perkolationstest.
Table 12 pH, conductivity, redox potential and cumulative leaching of DOC of bottom ash from the pile. Results from percolation test.

Provnr	L/S	pH	Konduktivitet	Redoxpotential	DOC
			mS/m	mV	mg/kg TS
06222	0,1	7,6	2 070	330	14,0
06223	0,2	7,5	2 070	342	28,6
06224	0,5	7,3	1 300	305	43,0
06225	1	7,4	603	310	57,0
06226	2	7,3	276	310	78,0

9 Diskussion av bottenaskans resultat

Här jämförs och diskuteras resultatet för bottenaskan som grävdes upp från Törringevägen och bottenaskan från det ungefär 6–8 månader gamla SYSAV-upplaget. Eftersom egenskaper hos bottenaska från avfallsförbränning beror på avfallet, förbränningsprocessen och även efterbehandlingen med sortering och lagring så finns det vissa inbyggda skillnader mellan de båda materialen. Det är främst rökgasreningen vid förbränningen samt sorteringen av askan som har utvecklats sedan 1990-talet. Rökgasreningen har blivit effektivare och i sorteringen ingår numera avskiljningssteg även för elektriskt ledande metallpartiklar och lätta partiklar såsom trä, plast och papper.

9.1 Skillnader i kornstorleksfördelning och packningsegenskaper

Visuellt var det stor skillnad mellan bottenaska från vägen och bottenaska från upplaget. Upplagsmaterialet verkade vara mer ”mineralogiskt” och sandigt (figur 59 och 60). Även packningsegenskaperna var mycket olika. Vägmaterialets maximala skrymdensitet var 1,59 ton/m^3 och den optimala vattenkvoten var 20 %, vilket är normala värden för den här typen av bottenaska, medan upplagsmaterialet hade högre densitet, 1,83 ton/m^3, och mycket lägre optimal vattenkvot, 12 %. Det faktum att upplaget som askan hämtades från hade schaktats ner av en bandschaktare kan ha gjort att annat material, till exempel naturmaterial i form av grus från underlaget, följt med askan.

Figur 59 Bottenaska från vägen. Torkat prov efter treaxtest.
Figure 59 Bottom ash from the road. Dried material after cyclic load triaxial test.

Figur 60 Bottenaska från upplaget. Torkat prov efter packningsförsök.
Figure 60 Fresh bottom ash. Dried material after compaction test.

Kornstorleksfördelningen visade att upplagsmaterialet hade en något gynnsammare kurva än vägmaterialet med samma finmaterialhalt men i övrigt något grövre partiklar och med högre graderingstal (figur 55).

9.2 Mikrostrukturella och mikrokemiska åldringsprocesser

Här diskuteras de spår av olika åldringsprocesser som observerades i vägmaterialet. Det var endast en av de två uttagna ostörda provkropparna som analyserades med avseende på mineralogi och mikrostruktur. Därför kan inga jämförelser göras mellan upplagsmaterial och vägmaterial eller mellan vägkant och vägmitt.

SEM-bilderna av bottenaska från Törringevägen visar inga sprickor som tyder på rörelser i materialet eller rotation av partiklar. Exempelvis ligger i samtliga fall reaktionsprodukter kvar i ostört läge runt större kraftigt nedbrutna partiklar (figur 43). Detta visar både att provet är ostört av provtagningen och att det inte har inträffat några större rörelser i materialet i vägen. Det innebär att det går att studera de kemiska och strukturella förändringar som har ägt rum i vägen från makro- till mikroskala.

De elektronmikroskopiska analyserna visar att de flesta partiklarna i större eller mindre grad har reagerat medan de låg i vägen. De varierar från kraftigt nedbrutna sulfatpartiklar till stålpartiklar med bara en svag ökning av järn och krom i den direkta omgivningen. Partiklar av klinkerplattor, porslin och bergartsfragment utgör ett undantag och visar i dessa analyser inga tecken på reaktion. De reaktioner som har ägt rum innebär förmodligen att reaktionsprodukterna har större volym än det ursprungliga materialet. Den mikrostrukturella analysen visar dock att detta inte har inneburit någon störning i form av sprickbildning eller omrörning av materialet. Det finns några enstaka undantag så som den nybildade mikrosprickan i figur 44. Dessa enstaka mikrosprickor saknar dock betydelse för vägmaterialets struktur och vägens funktion. Tolkningen är att expansionen har tagits upp i allt väsentligt som plastisk deformation resulterande i en minskad porvolym utan att vägbankens volym eller form har påverkats. Aluminiumnedbrytningen är av särskilt intresse eftersom vätgas är en av reaktionsprodukterna. Denna studie visar att reaktionen har varit mycket långsam och ofullständig så att bildad vätgas har haft gott om tid att diffundera ut utan risk för att kritiska vätgaskoncentrationer skulle bildas.

XRD-resultatet visar att bottenaskan innehåller bland annat hematit, lera och kalcit. Hematit bildas troligen under förbränningsprocessen medan närvaron av lera överensstämmer med begynnande långtidsvittring och närvaron av kalcit visar att askan har nått ett vittringsstadium för askor som har åldrats 1,5 till 12 år.

9.3 Skillnader i styvhet och stabilitet

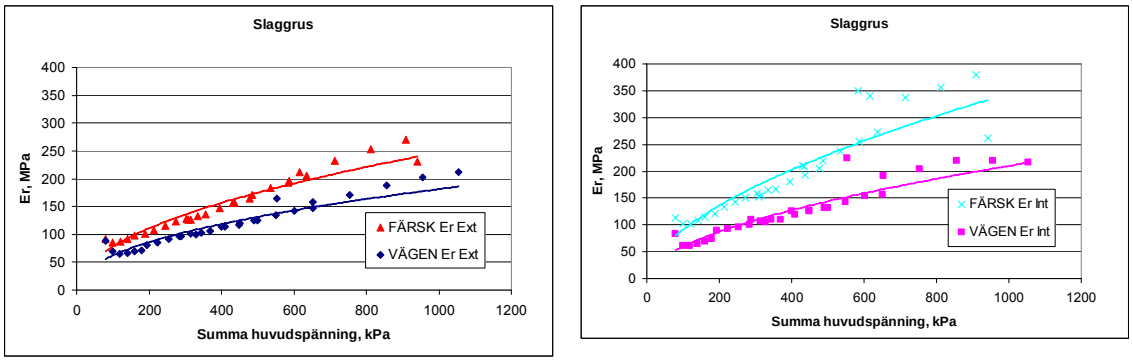
Här diskuteras skillnader mellan vägmaterial och upplagsmaterial. Eftersom treaxialtesterna på bottenaska från vägen gjordes på ett samlingsprov, kan inte eventuella skillnader mellan material från vägmitt och material från vägkant utläsas.

När bottenaskan från väg och upplag skulle packas in till provkroppar var målet att de skulle få samma packningsgrad och relativa vattenkvot som hade uppmätts i vägen (avsnitt 4.2 och 8.1.1). Det resulterade i att packningsdata för bottenaska från vägen och upplaget blev ganska lika vad gäller de relativa värdena, dvs. packningsgrad och relativ vattenkvot. Däremot skiljde de faktiska resultaten för skrymdensitet och vattenkvot en hel del (tabell 13), vilket beror på att de båda askorna hade så olika packningsegenskaper (avsnitt 9.1).

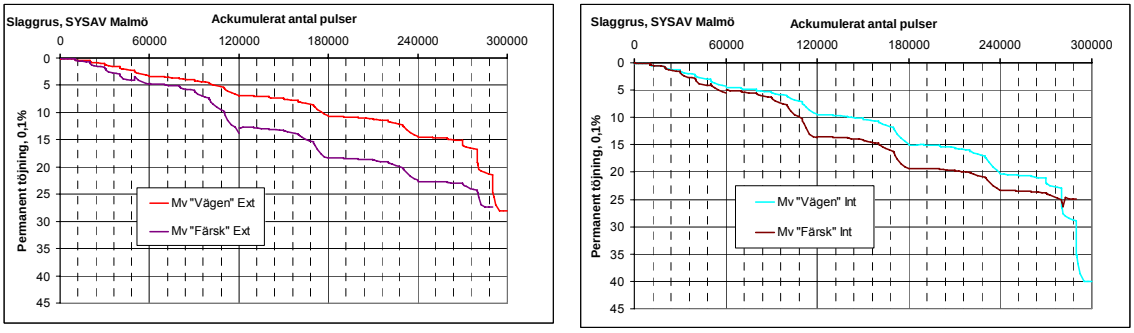
Tabell 13 Packningsdata för treaxprovkroppar av bottenaska.
Table 13 Compaction data for specimens of bottom ash in cyclic load treaxial tests.

Prov	Packningsgrad	Torr skrymdensitet	Relativ vattenkvot (av optimal)	Faktisk vattenkvot (efter test)
Från vägen	88 %	1,40 t/m³	111 %	22 %
Färskt	88 %	1,61 t/m³	119 %	14 %

Treaxialtesterna visade att upplagsmaterialet var styvare än vägmaterialet oberoende av deformationsmätmetod och skillnaden mellan mätmetoderna var relativt liten (figur 61). Däremot var vägmaterialet stabilare än upplagsmaterialet, dvs. de permanenta töjningarna var mindre, och även här var skillnaden mellan mätmetoderna relativt liten (figur 62).



Figur 61 Resilientmodul vid dynamiskt treaxialtest på bottenaska. Medelvärde för vägmaterialet respektive upplagsmaterialet. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 61 Resilient modulus in cyclic load triaxial test of bottom ash. Mean value for road material and pile material respectively. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.

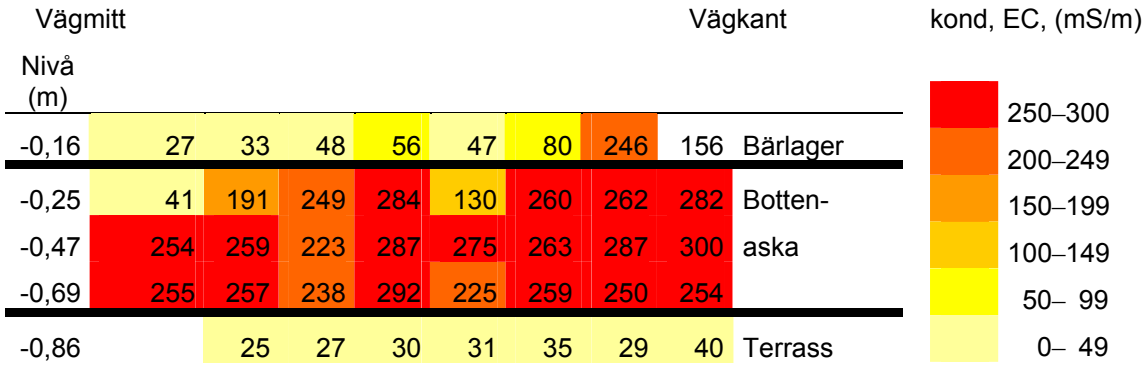


Figur 62 Ackumulerad permanent hoptryckning vid dynamiskt treaxialtest på bottenaska. Medelvärde för vägmaterialet respektive upplagsmaterialet. Vänster: Beräknad från extern lägesgivare. Höger: Beräknad från interna lägesgivare.
Figure 62 Ackumulated permanent compressive strain in cyclic load triaxial test of bottom ash. Mean value for road material and pile material respectively. Left: Calculated from ”external” length gauge. Right: Calculated from ”internal” length gauges.

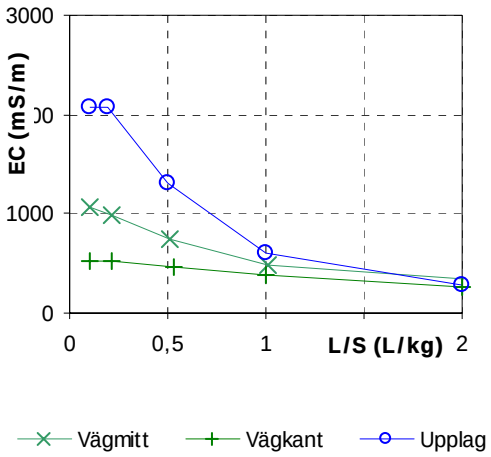
9.4 Vattenexponering i bottenaskvägen

Resultaten från konduktivitetsmätningen i vägen visade att den elektriska konduktiviteten i askan var som högst 300 mS/m, med det högsta värdet vid vägkanten och avtagande värden in mot vägmitt (figur 63). Detta antyder att kontakten med vatten skulle ha varit högre vid vägmitten än vid vägkanten. Skillnaderna var dock inte särskilt stora. Det extra låga värdet i överkanten av vägmitt beror troligen på inblandning av bärlagermaterial.

I perkolationstestet, som mäter på större provvolym och flera L/S, syntes ett mera väntat mönster (figur 64). Vid samtliga L/S hade lakvattnet från upplagsmaterialet högst konduktivitet, vägkantmaterialets lakvatten hade lägst konduktivitet och konduktiviteten för vägmittmaterialets lakvatten låg däremellan. Dessa konduktivitetsvärden motsvarar värdena för en annan askprovväg, Vändöravägen [6].



Figur 63 Konduktivitetsprofil i bottenaskvägen.
Figure 63 Conductivity (EC) profile in the bottom ash road.



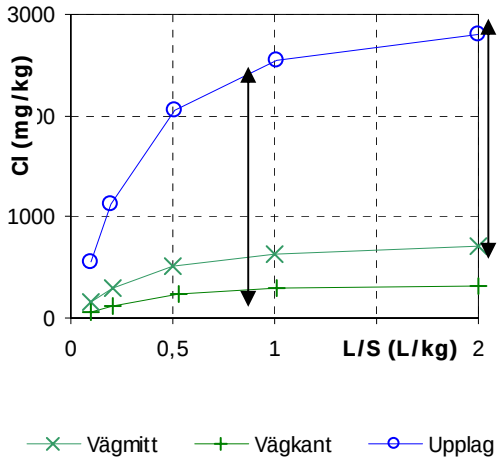
Figur 64 Elektrisk konduktivitet i lakvattnet från perkolationstester på bottenaska.
Figure 64 Electrical conductivity in the leachate from percolation tests of bottom ash.

Perkolationstesterna visade också att lakningen av klor, natrium och kalium från bottenaskan avklingade med tilltagande L/S. Detta var väntat och var ett tecken på att lakningen inte styrdes av mineralernas löslighet utan av hur snabbt jonerna lösgör sig från

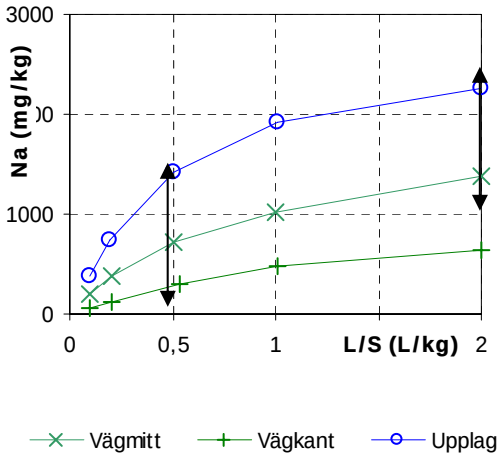
det fasta materialet. Utlakningen var störst för upplagsmaterialet, mindre för vägmitt-materialet och minst för vägkantmaterialet. Ett mönster som stämmer med att vägkanten har varit mest utsatt för vatten och upplagsmaterialet minst, så att vägkanten har minst utlakbart natrium kvar och upplagsmaterialet mest utsatt.

Från lakningsresultatet för lättlösliga salter som klor och natrium kan mängden vatten som påverkat vägen före provtagningen uppskattas till 0,5 L/kg på följande sätt. Vid L/S 2 var den ackumulerade utlakningen av klor från upplagsmaterialet 2 800 mg/kg aska (figur 65). Lakningen från vägmitt var 710 och från vägkant 310 mg klor/kg aska. Det tyder på att cirka 2 000–2 500 mg klor/kg aska har försvunnit under tiden i vägen, vilket motsvarar utlakningen vid L/S 0,5 eller 1 för upplagsmaterialet. Med ett liknande resonemang för natrium kan L/S i vägen skattas till ungefär 0,5 L/kg (figur 66).

Vattenexponeringen sedan 1997 för bottenaskan i vägmitt bedöms alltså ha varit cirka 0,5 liter vatten per kg material.



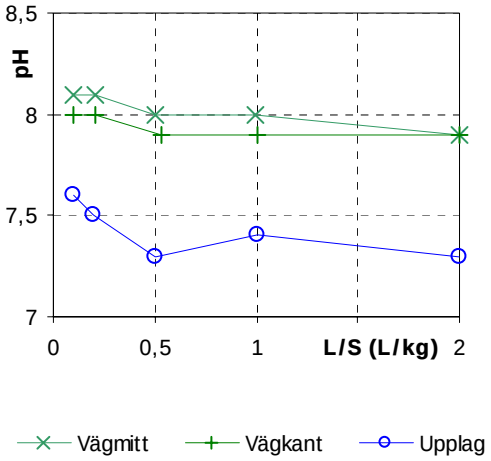
Figur 65 Ackumulerad utlakning av klor i perkolationstester på bottenaska. Pilarna illustrerar L/S-beräkningen.
Figur 66 Cumulative release of chloride in percolation tests of bottom ash. Arrows illustrate the calculation of L/S for the time in the road.



Figur 66 Ackumulerad utlakning av natrium i perkolationstester på bottenaska. Pilarna illustrerar L/S-beräkningen.
Figure 66 Cumulative release of sodium in percolation tests of bottom ash. Arrows illustrate the calculation of L/S for the time in the road.

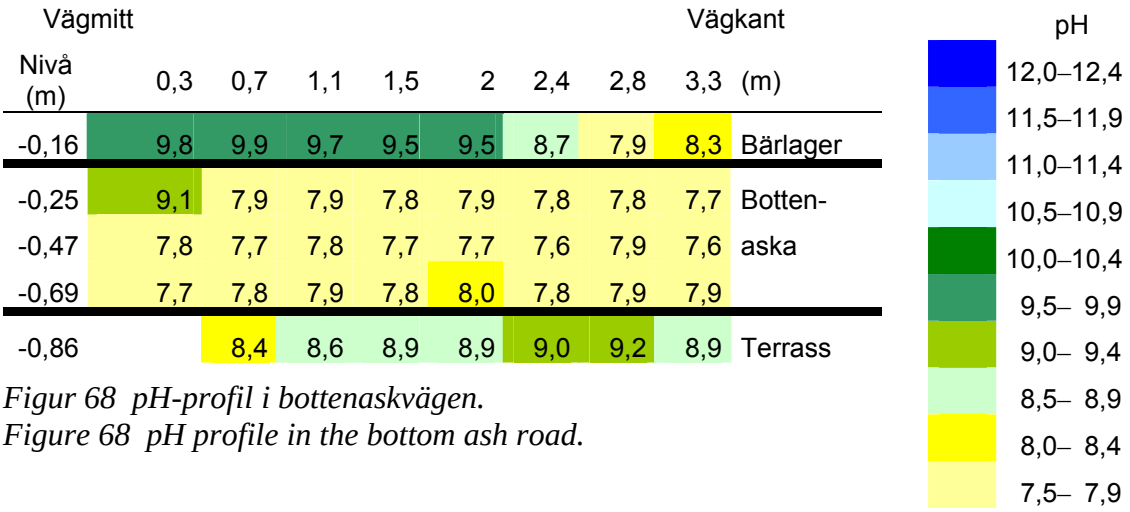
9.5 Skillnader i pH och utlakning av pH-beroende metaller

Bottenaskans låga pH tyder på att den var kraftigt karbonatiserad. Det gäller både upplagsmaterialet och vägmaterialen. I lakvattnet från perkolationstestet var upplagsmaterialets pH lägre än vägmaterialens – 7,6 i stället för 8,0 resp 8,1 – och pH sjönk kraftigare med tilltagande vattenmängd (figur 67).



Figur 67 pH i i lakvattnet från perkolationstester på bottenaska.
Figure 67 pH in the leachate from percolation tests of bottom ash.

I vägens pH-profil syntes att pH i bottenasklagret var i det närmaste konstant, mellan 7,7 och 7,9 utan tydlig gradient (figur 68). För ett av askproven närmast vägmitt var pH-värdena sådana att man kan misstänka inblandning av bärlagermaterial. Frånvaron av pH-gradient är en stor skillnad mot en annan bottenaskväg, Vändöravägen i Linköping [6], som hade lägre pH i vägkanterna. pH-värdena i Vändöravägen varierade mellan 10 i vägmitt och 7,5–8 i vägkanten. Skillnaden mellan den här studien och Vändöravägen beror antagligen på att askan som användes i Vändöravägen fortsatte att karbonatiseras i vägen medan den här aktuella bottenaskan troligen var fullständigt karbonatiserad redan när den lades ut.



Figur 68 pH-profil i bottenaskvägen.
Figure 68 pH profile in the bottom ash road.

Skillnaden mellan den här bottenaskan och askan i Vändöravägen kan även utläsas av fallviktsmätningar som gjorts på de båda askvägarna inom andra projekt [1], [3]. Fallviktsmätning, som görs genom att vägytan provbelastas i det högra hjulspåret på vägen, kan användas för att avläsa styvhetsökningar i vägkroppen. Eftersom karbonatisering i ett vägmaterial ger upphov till svaga bindningar mellan partiklar kan den avläsas som högre styvhet vid små och medelstora belastningar. Resultaten från fallviktsmätningarna

visar att styvheten för Vändöravägen ökade kraftigt under det första året efter byggandet, medan styvheten för Törringevägen inte har ökat alls.

Enligt pH-karteringen var pH i bärlagret ovanför och i terrassmaterialet under asklagret högre än i själva asklagret, vilket är anmärkningsvärt men kan förklaras av askans karbonatisering och därav mycket låga pH-värden. Bärlagerproven närmast vägkanten hade lägst pH och även högst konduktivitet, vilket kan bero på att de möjligen innehöll lite bottenaska. För övrigt är pH runt 10 normalt för ett nykrossat bergmaterial där mineralvittring inte har påbörjats och pH mellan 8 och 9 i grusmorän är också normalt [50].

Bottenaskans pH har haft ett synligt inflytande på utlakningen av nickel. För de flesta andra metallerna var utlakningen större från upplagsmaterialet än från vägmaterialen, men nickellakningen visade samma mönster som pH och var större från vägmaterialen. Nickelkoncentrationerna i vägproverna låg i närheten av mättnad för Ni_2SiO_4 vars löslighet är beroende av pH.

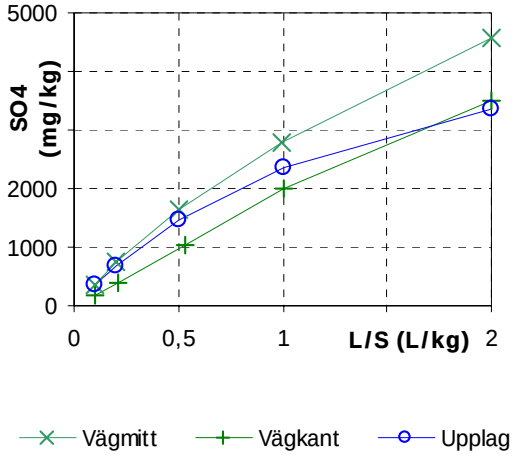
9.6 Skillnader i utlakning av organiskt material

Bottenaskan från vägen lakade mycket mindre mängd löst organiskt material, DOC, än bottenaskan från upplaget (tabell 11 och 12). Med samma resonemang som för klor i avsnitt 9.4 kan utlakningen i vägen före provtagning beräknas till 40 mg DOC /kg (= upplagsutlakningen vid L/S 0,5 L/kg). Under de efterföljande 0,5 L/kg lakade upplagsmaterialet ytterligare 20 mg DOC per kg medan vägmaterialen lakade mindre än 4 mg/kg vid L/S 0,5. Till detta kan finnas flera förklaringar, antingen hade vägens ursprungsmaterial lägre halt av utlakningsbenäget organiskt material eller så har karaktären hos det organiska materialet ändrats så att lakbenägenheten har minskat. Andra förklaringar är att mer DOC har försvunnit ut ur bottenaskan under de tio åren i vägen än under månaderna i upplaget, antingen genom lakning eller genom biologisk nedbrytning.

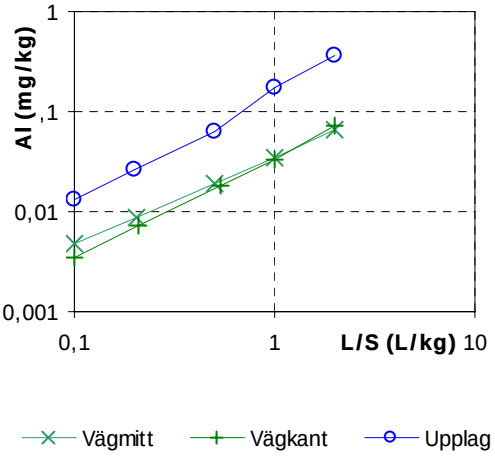
Lakningen av koppar följde samma mönster som DOC, vilket inte är förvånande eftersom koppar ofta binds till det lösta organiska materialet i lakvatten från aska [24] och troligen gjorde det här också.

9.7 Utlakning av sulfat, kalcium och aluminium från bottenaskan

Vid åldring av aska är lakning av sulfat, kalcium och aluminium vanliga processer. I den här studien visade lakresultaten för samtliga askmaterial att sulfatkoncentrationerna var i överensstämmelse med löslighet för bariumsulfat ($BaS_{0,96}Cr_{0,04}O_4$), medan kalciumhalterna kontrollerades av gips eller anhydrit (kalciumsulfat) och aluminium av $Al(OH)_3$ (bilaga E.4). Ettringit var starkt undermättat i lakvattnen. Troligen löstes ettringit upp och gips fälldes ut under perkolationstestet. Detta tyder på att åldringsreaktioner fortfarande pågår i alla askmaterialen.



Figur 69 Ackumulerad utlakning av sulfat i perkolationstester på bottenaska.
Figure 69 Cumulative release of sulphate in percolation tests of bottom ash.



Figur 70 Ackumulerad utlakning av aluminium i perkolationstester på bottenaska.
Figure 70 Cumulative release of aluminium in percolation tests of bottom ash.

9.8 Vägsläntens betydelse för åldringsprocessen

Tidigare studier av askvägar, exempelvis Vändöravägen i Linköping [6], har visat att nederbörd och luft diffunderar in till materialen i vägkroppen via vägslänten och åstadkommer åldringsreaktioner i form av en karbonatiseringsfront som rör sig in från slänten. Hypotesen var därför att Törringevägen, som är byggd som en stadsgata utan vägslänter, skulle ge andra förutsättningar för åldring i vägen, framför allt ingen utpräglad front.

pH-karteringen och utlakningsresultaten visade inga spår av karbonatiseringsskillnader mellan vägmitt och vägkant vilket stöder hypotesen, men tyvärr var uppmätt pH lägre än normalt för bottenaska. Karbonatisering av partikelytorna hade troligen ägt rum redan på upplaget (så att pH blev 8) och eventuell fortsatt karbonatisering påverkade inte utlakningen. Därför gick det inte att avgöra om bristen på vanlig vägslänt hade någon inverkan på luftintrånget och därmed åldringen i vägen.

Vattenexponeringen hittills i bottenaskvägen beräknades motsvara L/S 0,5 L/kg (avsnitt 9.4). Det är mer än det L/S 0,1 som beräknades för stålslaggvägen, både i vägmitt och i vägkant. Vattenkvoten var också betydligt högre i askan än i stålslaggen, 22 viktprocent jämfört med 2 viktprocent, men dessa värden är normala för respektive material oavsett vägutformning. Det ger därför ingen ledtråd om släntutformningens eventuella inverkan.

10 Snabbåldring av bottenaska

I tidigare forskningsprojekt om åldring av aska har man studerat upplagsmaterial, där det är karbonatiseringsprocessen som styr åldringen, men i det här projektet är det situationen i vägen som studeras och därför inte samma process som är intressant.

Enligt jämförelserna mellan bottenaskan i vägen och bottenaskan i upplaget är de åldringsprocesser som har ägt rum i vägen utlakning kombinerad med oxidation av till exempel aluminium samt glasreaktioner av puzzolan karaktär (kapitel 9). Karbonatisering av partikelytor har ägt rum på upplaget, styrkt till exempel av upplagsmaterialets låga pH, och är därmed mindre intressant för en snabbåldringsmetod som ska spegla åldringseffekter på lång sikt.

Aluminiumoxidationen och de puzzolana silikatreaktionerna tyder på att det lokalt har förekommit högt pH i bottenaskan. Sådana lokala pH-värden går inte att uppmäta med de metoder som användes för att snabbåldra stålslaggen, eftersom materialet mättas och samtliga lakytor påverkar resulterande pH-värden. Snabbåldringsmetoden för bottenaskan inriktades därför på att skapa förutsättningar för de observerade oxidations- och puzzolanreaktionerna.

10.1 Utgångsmaterial och genomförande

Bottenaskan från SYSAV:s upplag användes som utgångsmaterial. Testerna utfördes i två steg med inledande försök för att bestämma vilka ämnen som kunde åstadkomma puzzolanreaktionerna och därefter perkolationstest för att se effekten på lakningen.

De puzzolana reaktioner som kan åstadkommas förväntades vara så små att de inte skulle ge någon hållfasthetsökning. Därför kunde inte vanliga hållfasthetstester användas för att detektera uppnådd puzzolanitet. De inledande försöken utformades istället utgående från EN 196-5, ”Methods of testing cement – Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement”. Puzzolaniteten testas då genom att man tillsätter en mättad kalciumhydroxidlösning till ett cementprov och undersöker om kalciumhydroxid har förbrukats efter en vecka i 40ºC. Förbrukningen av kalciumhydroxid tas som bevis för puzzolana reaktioner.

Askan siktades först till < 4 mm för att få tillräcklig repeterbarhet för att kunna göra tester i liten skala. Efter siktningen minimerades kontakt med luft eftersom koldioxiden reagerar med kalciumhydroxid och ger upphov till kalcit – en åldringsprocess som inte är direkt kopplad till puzzolanitet och som inte hade observerats i vägmaterialet. Proven delades ner inför de inledande försöken och vattenhalten mättes på två delprov. Kalcium, hydroxid och aluminium tillsattes för att undersöka om de var begränsande, dvs. nödvändiga, för de puzzolana reaktionerna. Natrium och klorid användes som motjoner. Saltsyra tillsattes i ett prov för att undersöka om kalcium som var tillgängligt genom buffringsreaktioner kunde bidra till reaktionerna (tabell 14).

De inledande försöken genomfördes på följande sätt:

- 20 g siktad bottenaska vägdes in i 130 ml provflaska
- kalciumklorid, kalciumhydroxid, natriumhydroxid, saltsyra, aluminiumklorid, och/eller aluminiumhydroxid tillsattes direkt i flaskan
- 130 ml kokt avjoniserat vatten tillsattes, flaskan förseglades med skruvlock, lades i försluten plastpåse och placerades i vändskak i värmeugn, 40ºC, i 7 dagar

- Flaskan fick sedan stå i rumstemperatur i 18 timmar för sedimentering
- 50 ml lösning sögs upp ur flaskan, sprutfiltrerades genom 0,45 µm och titrerades för kalcium och alkalinitet. Det gjordes enligt EN 196-5, förutom att kemikalierna inte torkades och andra ämnen än kalciumhydroxid tillsattes.

Vattenkokningen och förslutningen avsåg att minimera kontakt med luftens koldioxid. pH blev tyvärr bortglömt initialt men mättes direkt i flaskorna efter någon vecka.

Tabell 14 Snabbåldring av bottenaska, översikt över inledande försök.
Table 14 Accelerated ageing of bottom ash, overview of initial tests.

Prov nr	Tillsats	Prov nr	Tillsats
1	$CaCl_2$	8	$Al(OH)_3$ + NaOH
2	$Ca(OH)_2$ + $Al(OH)_3$	9	$AlCl_3$
3	$CaCl_2$ + NaOH	10	$CaCl_2$ + $Al(OH_3)$ + NaOH
4	$Ca(OH)_2$	11	$Ca(OH)_2$ + NaOH
5	HCl	12	$Ca(OH)_2$ + $Al(OH)_3$
6	H_2O (referensprov)	13	$CaCl_2$ + $AlCl_3$ + NaOH
7	NaOH		

Utvärderingen av de inledande försöken visade att hydroxid (pH) var begränsande i första hand, vilket betyder att högre pH var nödvändigt för att få snabba puzzolana reaktioner och oxidation av aluminium. Kalcium var också begränsande, men en viss mängd kalcium fanns tillgänglig i askan. Aluminium och sulfat fanns i tillräcklig mängd. Aluminiumtillgången garanterades genom oxidation orsakad av det ökade pH-värdet.

Utifrån dessa resultat inleddes nästa steg, perkolationstest med liten eller stor bastillsats vid 40°C, för att se effekten på lakningen. Lakförsöken utfördes som perkolationstest i stället för skakförsök eftersom L/S mindre än 1 skulle studeras.

Perkolationstesterna genomfördes på följande sätt:

- Fuktig bottenaska (vattenkvot 4,92 %) packades i en kolonn
- Kolonnen mättades med natriumhydroxidlösning (NaOH) i liten eller stor tillsats
- Kolonnen placerades i vändskakapparat i värmeugn, 40ºC, i en vecka
- Efter tiden i värmeugnen pumpades Milli-Q vatten genom kolonnen. Utgående vatten samlades upp och provtogs efter en kolonnvolym, vilket motsvarar L/S 0,3–0,4, och efter ytterligare L/S 0,5 l/kg, dvs. totalt L/S 0,8 (tabell 15)
- Vattenprov skickades till ALS Scandinavia för analys av metaller, makrokatjoner, DOC, DIC, sulfat, klor, fluor, alkalinitet och fenoler.

Som referens användes en annan kolonn med aska, som mättades med Milli-Q vatten i stället för natriumhydroxidlösning.

Tabell 15 Snabbåldring av bottenaska, data för kolonntest.
Table 15 Accelerated ageing of bottom ash, data for percolation test.

Prov:	Vatten	Lite NaOH	Mycket NaOH
Vikt fuktigt prov (g)	824	852	824
Koncentration NaOH (M)	0	0,375	3
Mängd lösning (l)	0,305	0,270	0,303
L/S för uttag (l/kg, ackumulerat)	0,39 och 0,84	0,33 och 0,78	0,39 och 0,84

Figur 71 Snabbåldring av bottenaska, perkolationstest.
Figure 71 Accelerated ageing of bottom ash, percolation test.

Genom geokemisk modellering[8] beräknades mättnadsindices för vanliga mineral och ettringit i utgående vatten från de inledande försöken. Värden för kalcium och alkalinitet togs från uppmätta värden efter de inledande försöken. Aluminium, natrium och klor skattades utifrån resultatet av perkolationstestet på upplagsaskan innan snabbåldringen (bilaga E.4). Mättnadsindices i utgående vatten från samtliga perkolationstester efter snabbåldringen beräknades med hjälp av LeachXS. Alla uppmätta ämnen inkluderades, men inte DOC-komplex eftersom det stötte på numeriska problem.

10.2 Resultat

Den geokemiska modelleringen efter de inledande försöken visade att vattnen från prov nr 1–6 var mättade med avseende på kalciumsulfat (gips) och kalciumkarbonat och att prov nr 1–3 och 5–6 var mättade med avseende på AlOOH och $Al(OH)_3$. Vidare var vattnen från prov nr 2 och 4 mättade med ettringit, men det var inte vattnen från nr 1, 3, 5 och 6. Modelleringen för lakvattnet från kolonnen i det andra försökssteget (pH < 9) visade att inte heller det var mättat med avsende på ettringit.

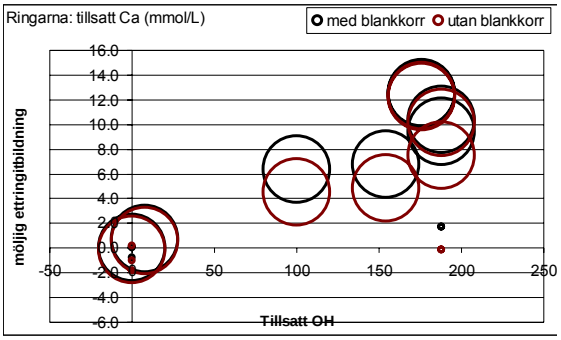
[8] med hjälp av PhreeqC, databaser Phreeqc.dat och llnl.dat.

För att få ett mått på de puzzolana reaktionerna beräknades möjlig ettringitbildning i de olika blandningarna. Den beräknades som förbrukning av kalcium och hydroxid (ur mätningen av alkalinitet) under de inledande försöken. Förutom tillsatsen av kalcium och hydroxid räknades också med det bidrag från askan som uppmättes i referensprovet (tabell 16).

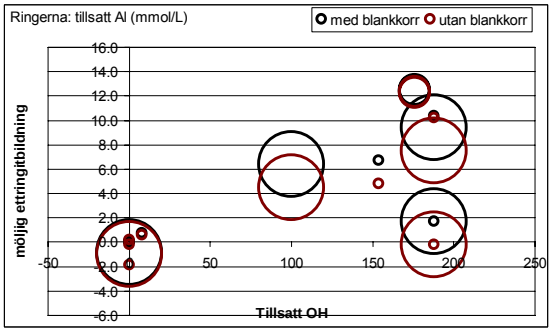
Tabell 16 Resultat efter inledande försök med snabbåldring av bottenaska. Förändring i kalciumhalt och alkalinitet.
Table 16 Results from initial tests in accelerated ageing of bottom ash. Change in calcium content and alkalinity.

			Tillsatt mängd (mmol/L)		Mängd från askan (mmol/L)		Förändring efter en vecka	
Prov nr	Tillsats	pH	Ca	OH	Ca	OH	Ca	OH
1	$CaCl_2$	7,7	76,77	0	11,4	2,3	-40,6	-0,26
2	$Ca(OH)_2 + Al(OH)_3$	12	76,77	176,31	11,4	2,3	-85,2	-149,18
3	$CaCl_2 + NaOH$	8,1	76,77	7,67	11,4	2,3	-48,93	-8,85
4	$Ca(OH)_2$	12	76,77	153,34	11,4	2,3	-40,6	-90,14
5	HCl	8,2	0	-0,001	11,4	2,3	0,49	-0,009
6	H_2O (referensprov)	8	0	0	11,4	2,3	11,4	2,3
7	NaOH	13	0	187,68	11,4	2,3	-10,69	39,46
8	$Al(OH)_3 + NaOH$	12	0	187,68	11,4	2,3	-10,8	-126,25
9	$AlCl_3$	7,2	0	0	11,4	2,3	32,89	9,26
10	$CaCl_2 + Al(OH_3) + NaOH$	10	76,77	187,68	11,4	2,3	-56,61	-181,15
11	$Ca(OH)_2 + NaOH$	12	76,77	187,68	11,4	2,3	-87,4	-123,97
12	$Ca(OH)_2 + Al(OH)_3$	12	76,77	176,31	11,4	2,3	-85,38	-150,63
13	$CaCl_2 + AlCl_3 + NaOH$	8,6	76,77	100	11,4	2,3	-37,88	-100,5

Det lägsta värdet på kalcium- och hydroxidförbrukningen omräknades till ettringitmängd och användes som möjlig ettringitbildning, både med och utan korrektion för bidrag från referensen (figur 72 och 73).



Figur 72 Möjlig ettringitbildning i bottenaska som funktion av tillsatt hydroxid och kalcium. (Blank = referens).
Figure 72 Possible precipitation of ettringite from bottom ash as a function of added hydroxide and calcium.



Figur 73 Möjlig ettringitbildning i bottenaska som funktion av tillsatt hydroxid och aluminium. (Blank = referens).
Figure 73 Possible precipitation of ettringite from bottom ash as a function of added hydroxide and aluminium.

Observera att beräkningen av möjlig ettringitutfällning inte tar hänsyn till kalciumbidrag orsakat av pH-höjning. Vid högre pH kan gips (kalciumsulfat) lösas upp och både kalcium och sulfat från gipset kan fällas ut som ettringit (avsnitt 10.3).

Resultat från perkolationstesterna redovisas i bilaga F.

Vattenförbrukning observerades under både de inledande försöken och perkolationstestet, till exempel var materialet helt torrt när det togs ut ur ugnen vid de inledande försöken och torrt efter ett strömavbrott som inträffade i rumstemperatur vid slutet av perkolationstestet. När nytt vatten tillsattes i kolonnen observerades svällning i de översta 10 cm så att den fyllda höjden på kolonnen ökade från 34 till 36,5 cm. Bubblor och skumbildning observerades också. Initialt var lakvattnet orange, senare brunt med vita partiklar.

10.3 Diskussion och verifiering: Effekter av snabbåldring på utlakning

Begränsande faktorer

Vid perkolationstestet före åldringsförsöken var aluminiumlakningen mycket liten (figur 70), men under de inledande försöken påskyndades aluminiumoxidationen av högt pH. Det framgick av det övertryck som observerades i flaskorna med högt pH. Övertrycket tyder på gasbildning och berodde troligen på att vid högt pH kan metalliskt aluminium i askan oxidera och bilda joniskt aluminium och vätgas [2].

Utfällning av ettringit har använts som en utvärderingsmetod för att se om puzzolana reaktioner har ägt rum. Ettringitbildning är en vanlig reaktion vid höga pH och lättare att utvärdera än ändringar i kalciumsilikater. Utfällning av ettringit begränsades av pH: utan hydroxidtillsats var pH mindre än 9, lösningen efter det inledande försöket var undermättad med avseende på ettringit. Med hydroxidtillsats blev ettringitutfällning möjlig, motsvarande mängd alkalinitet försvann från lösningen och lösningen efter de inledande försöken var mättad med avseende på ettringit.

Prov nr 7, med tillsats av hydroxid men utan kalciumtillsats, verkade visa att kalcium var begränsande i andra hand, eftersom hydroxid var högt men möjlig ettringitbildning låg. Den möjliga ettringitbildningen i figur 72 och 73 tar dock inte hänsyn till kalciumtillskott från askan som orsakas av högt pH och det kan inte uteslutas att mer ettringit har bildats än som syns i figurerna. Vid pH över 10 kan nämligen gips lösa upp sig och kalcium och sulfat från gipset fälla ut tillsammans med hydroxid och aluminium som ettringit (se också avsnitt 6.6 om sulfat i stålslagg).

Sammanfattningsvis konstaterades att högt pH var nödvändigt för att uppnå snabb aluminiumoxidation och snabba puzzolana reaktioner. Kalcium var också nödvändigt, men en del kalcium i askan var tillgängligt för reaktionerna. Snabbåldringen gjordes därför genom att fylla en kolonn med aska och vatten med högt pH, som åldrades i en vecka och sköljdes ut efteråt.

pH i lakvattnet

pH i lakvattnet från den snabbåldrade vattenkolonnen var 8, en halv pH-enhet högre än i upplagsmaterialet som var utgångsmaterial för åldringen. Detta kan ha orsakats av den mindre kornstorleken eller av värmen under åldringen. 0,375M NaOH påverkade inte pH i utvattnet eftersom upplagsmaterialet buffrade. När kolonnen fylldes med 3M natriumhydroxid blev pH i utvattnet 12,9. pH ökade mellan första och andra vattenuttaget i de åldrade kolonnerna.

pH i vägmaterialens lakvatten var ungefär 8, också det en halv pH-enhet högre än upplagsmaterialet. Troligen har vägens ursprungsmaterial haft högre pH än upplagsmaterialet som analyserats i denna studie. Dock sjönk pH för upplagsmaterial och vägmaterial med tilltagande vattenmängd.

Utlakning av lättlösliga salter

Mängden lättlösliga ämnen som har sköljts ut var större i åldringstesterna än i testerna på vägmaterial och upplagsmaterial. Detta kan vara en effekt av att åldringstesterna använde mindre kornstorlek och därmed har större total partikelyta för utlakning i kolonnen. Skillnaden fanns i det första vattenuttaget, vid andra vattenuttaget var klorkoncentrationerna för labåldrade prov i nivå med väg- och upplagsprov.

Vid L/S 2 var den ackumulerade utlakningen från upplagsmaterialet 2 800 mg klor per kg, från vägmitt 710 och från vägkant 310 mg klor per kg (avsnitt 9.4). I andra lakningssteget för labåldrade prov lakade 765–185 mg klor per kg ut (ej ackumulerat). Det högsta värdet gällde för kolonnen med vatten och det lägsta för kolonnen med 3M natriumhydroxid. Klorutlakning med det andra åldringsutvattnet motsvarade alltså klorutlakningen i vägen och skillnaden mellan den mest påverkade kolonnen (3M NaOH) och den minst påverkade (H_2O) påminner om skillnaden mellan vägkant och vägmitt. I bästa fall har den ökade specifika ytan påverkat första kolonnvattnet, medan lakningen i andra uttaget speglar åldringens effekter på den fasta fasen. Nya utfällningar ovanpå askpartiklar (på grund av NaOH-tillsatsen) kan hindra partiklarna från att bidra med klor till lakvätskan.

För flera andra ämnen var utlakningen efter åldring med vatten också högre än i perkolationstestet för upplagsmaterialet. Krom och järn var undantagen, där den labåldrade vattenkolonnen lakade mindre än upplagsmaterialet. Kalcium, kisel, barium, kadmium, antimon, bly och vanadin uppvisade ungefär samma utlakning i upplagskolonnen som i

den vattenåldrade. Dessa ämnen styrdes i högre grad av lösligheten och begränsades av vattenfasen, inte av materialytan.

Övrig utlakning

DOC-utlakningen i de labåldrade proven var högre än i upplagsmaterialet. Det är inte nödvändigtvis en följd av större specifik yta. DOC-lakning är starkt pH-beroende och upplagsmaterialet hade lägre pH än de andra proven. Askan med 0,4 M NaOH lakade något mer DOC än den vattenåldrade askan, vilket tyder på att det organiska materialet kan buffra detta prov.

Vägmaterialen hade lägre DOC-utlakning än upplagsmaterial eller labåldrade prov (avsnitt 9.6). Ändringarna i DOC-utlakningen har inte reproducerats av labåldringen. Koppar, som är känt för sina DOC-komplex, följde samma mönster, men inget av de andra spårämnena.

Lakningen från kolonnen med 3M NaOH (pH 12,9) skiljde sig väsentligt från alla andra prov. Kalcium och magnesium lakades ut i mycket mindre mängder, barium i ungefär samma mängder, men alla andra ämnen lakades ut i större mängder från den basiska kolonnen. Detta var det motsatta resultatet till åldringen i vägen, där de flesta ämnena lakades ut mindre efter vägåldring. Detta gäller även när hänsyn tas till att vägmaterialen också har utsatts för lakning under sin ”vägtid”. Labåldringsmetoden gav upphov till lakningseffekter åt rätt håll för kalcium, kisel, nickel och zink. Nickel- och zinkutlakning bestäms troligen av pH, och pH var högre i både vägmaterialen och labåldrade prov än i upplagsmaterialet. Det är dock mycket tveksamt om detta motsvarar en vanlig åldrings-effekt. Det kan snarare hänföras till en mer långt gången åldring i upplagsmaterialet.

Kalcium lakades ut i mindre mängder och kisel i större mängder från kolonnen med 3M NaOH än från kolonnen med vatten. Lakvattnets kalciumhalt var nära mättnad för kalciumsilikater, -aluminater och -karbonater efter 3M NaOH-åldring, medan den var nära jämvikt med gips (kalciumsulfat) för samtliga övriga prov. Troligen har gips lösts upp och sulfat och kalcium har deltagit i bildningen av sekundära silikater, såsom avsetts.

Genom snabbåldringen med hydroxidtillsats hoppades följande uppnås:

- Ökad oxidation av aluminium. Det skulle göra aluminium tillgängligt för puzzolana reaktioner och öka mängden aluminumoxider i den åldrade askan, som i sin tur kunde fastlägga metaller genom sorption. (I den åldrade askan var aluminium i jämvikt med $Al(OH)_3$)
- Upplösning av gips (kalciumsulfat) och utfällning av kalciumsulfathydroxider eventuellt med inblandning av aluminium (som ettringit[9]). Ettringit är känt för sin förmåga att innesluta spårmetaller såsom antimon och krom, så bildade ettringitutfällningar skulle kunna fastlägga spårmetaller i askan
- En viss pH-ökning, som skulle mobilisera nickel och fastlägga bly.

Avsikten var att dessa processer skulle leda till ökad fastläggning av spårämnen, men istället observerades ökad mobilisering för de flesta ämnena. Detta var inte en effekt av pH, eftersom askan buffrade så att pH i kolonnen med 0,4 M natriumhydroxid var det-samma som i kolonnen med endast vatten. Det var inte heller en effekt av L/S, eftersom

[9] Ettringit = $Ca_6Al_2[(OH)_4SO_4]_3 \cdot 26H_2O$

L/S i 0,4 M natriumhydroxidkolonnen var aningen lägre än för kolonnen med endast vatten. Tiden med vattenmättnad var också densamma för de båda kolonnerna.

Sammanfattningsvis har alltså snabbåldringsmetoden påverkat lakningen av lättlösliga ämnen såsom klorid, troligen genom att utfällningar på partikelytorna har hindrat utlakningen. Tillsatsen av 0,4 M natriumhydroxid mobiliserade överraskande många ämnen och även tillsatsen av 3 M natriumhydroxid påverkade lakningen starkt, men inte åt rätt håll. Effekten av pH-ökningen var för stor för att ökad aluminiumoxidation och ökade puzzolana reaktioner på metallerna skulle kunna observeras. Dessa doldes av pH-effekten direkt på metallerna.

11 Slutsatser

I projektet antogs att stålslagg och bottenaska som legat ungefär 10–15 år i en väg har åldrats och att denna åldring ger upphov till mätbart förändrade egenskaper som framgår vid en jämförelse med färskt upplagsmaterial. Det antogs också att vägmaterial som ligger i vägkanten åldras fortare än vägmaterial som ligger i vägmitten och att detta avspeglas i lakningsegenskaperna. Vidare antogs att de förändrade egenskaperna kan återskapas genom en snabb lämplig behandling i laboratoriet.

Följande slutsatser kan dras från projektresultaten när det gäller skillnader mellan väg- och upplagsmaterial:

- Stålslaggen i vägen hade varit mycket mindre exponerad för vatten än stålslaggen i upplaget – vattenmängden uppskattades till mindre än 0,1 liter per kg – och hade utsatts för oxidation och karbonatisering. Detta skapade pH-sänkningar vilket medförde koncentrationsändringar för vissa metaller, till exempel vanadin och bly
- Egenskaperna hos stålslaggen i vägmitt var mycket lika den färska slaggens egenskaper
- Eftersom stålslaggen i 7-månadersupplaget var mer karbonatiserad än stålslaggen i vägen var vägmaterialet (i vägmitt) mer lämpligt än upplagsmaterialet att utgå ifrån när snabbåldringsmetoden skulle utvecklas
- Det fanns tydliga skillnader mellan bottenaskan i vägen och bottenaskan från SYSAV:s upplag, vilket bara delvis kan förklaras av att askan i vägen hade varit mindre exponerad för vatten under årens lopp. Bottenaskan i upplaget såg mer mineralogisk, grusliknande och brun ut jämfört med bottenaskan från provvägen. Det verifierades även kemiskt
- Utlakningsegenskaperna för bottenaskan hade inte förändrats nämnvärt under de tio åren i vägen, vilket betyder att lakegenskaper på lång sikt kan studeras med hjälp av enbart perkolationstester. För styvhets- och stabilitetsstudier behövs däremot konstgjord åldring
- Några skillnader i styvhet och stabilitet på grund av eventuella bärighetspåverkande reaktioner kunde inte utläsas eftersom sådana reaktioner störs vid provkroppsinpackning.

Skillnader mellan material i vägkant och material i vägmitt:

- Materialet i vägkant hade påverkats mer än materialet i vägmitt. Det bekräftades både för stålslagg- och bottenaskvägen
- I stålslaggvägen berodde skillnaderna mellan vägkant och vägmitt i huvudsak på större lufttillgång i vägkant. Det framgick av pH-skillnaderna och visade att karbonatisering eller oxidation var den dominerande åldringsprocessen
- I bottenaskvägen orsakades skillnaderna mellan vägkant och vägmitt i huvudsak av skillnader i vattenkontakt. Vattenexponeringen för bottenaskan i vägkant uppskattades till ungefär 1 L/kg och i vägmitt till ungefär 0,5 L/kg.

Simulerad åldring i laboratoriet:

- Snabbåldringen av stålslagg som utfördes i två steg – först karbonatisering via koldioxidbehandling och därefter lakning – fungerade bra eftersom utlakning inte var en viktig process i vägen. Karbonatisering simulerade bra de uppmätta pH-värdena samt lakningsbeteendet för makroämnena och de pH-beroende ämnena, men inte lakningsbeteendet för krom och selen. Oxidation påverkade inte pH, vilket visade att karbonatisering och inte oxidation var den dominerande processen
- Snabbåldring av stålslagg genom behandling med koldioxid vid måttlig fukttillsats och 40°C värme i en vecka visade bäst resultat av de metoder som testades
- Snabbåldringen av bottenaska med hydroxidtillsats simulerade inte vad som observerats i vägmaterialet. I stället för ökad fastläggning åstadkoms ökad mobilisering för de flesta spårämnena, vilket inte var en effekt av pH eller L/S. Denna reaktion gjorde att effekten av ökad aluminiumoxidation och ökade puzzolana reaktioner på metallerna inte kunde observeras. Dessutom skapades nya utfällningar som hindrade utlakningen av lättlösliga ämnen, i motsats till vad som observerats i vägmaterialet.

Dessutom kan följande slutsatser dras om provtagningen:

- Okrossat material skall användas när man vill studera material som har åldrats. Vid studier av lakningsegenskaper hos grovkornigt åldrat material kan därför vissa avsteg behöva göras från lakningsstandarderna. I detta projekt kunde inte visas om det avsteg som gjordes – utökad kornstorlek i förhållande till kolonndiametern vid lakning – hade någon effekt eller inte
- Det är svårt att ta ostörda prover av stålslagg i väg med hjälp av borrning eftersom materialet mals sönder
- Metoden som användes för att ta ostörda prov av bottenaskan borde fungera även för andra material som ”binder ihop”
- Om det inte går att ta upp ostörda prov till belastningsförsök i laboratoriet kan man använda sig av inpackade prov som packats till samma densitet som uppmätts för materialet i fält. Detta är dock ingen bra metod när det aktuella materialet har fått förbättrad styvhet och stabilitet på grund av bindningsreaktioner under årens lopp.

Materialens egenskaper:

- De åldringsreaktioner som observerades vid de mikroskopiska analyserna ger en volymökning, men det är i huvudsak långsamma reaktioner som i första hand resulterar i att porositeten minskar och därför påverkas inte vägen med sprickbildning och liknande skador. Observera att detta gäller stålslagg och aska som lagrats på upplag före användningen som vägmaterial
- Både stålslagg och bottenaska har spänningsberoende styvhet, som väntat.

Vägsläntens betydelse för åldring:

- Provvägen med bottenaska hade inte någon tydlig pH-profil med lägre pH vid vägkanten, så som hade observerats i en annan askväg. Emellertid gick det inte att säga om bristen på karbonatiseringsfront berodde på frånvaron av en öppen vägslänt eller på att askan som använts var karbonatiserad i förväg
- Provvägen med stålslagg hade både vägslänt och pH-sänkning vid vägkanten, men vattenkontakten vid vägkant var liten, vilket var förvånande eftersom vatten borde ha runnit från asfalten och ner i vägslänten. Kanske vägsläntens ytegenskaper har förhindrat infiltrationen på något sätt.

12 Rekommendationer

Snabbåldringsmetoden för stålslagg är lovande. Den är enkel och ger bra resultat, men för att kunna användas mer utbrett skulle den behöva testas på några fler material med liknande egenskaper.

För bottenaskan var utlakning en viktigare process än pH-förändring. Därför skulle det första lakvattnet i snabbåldringskolonnen ha tagits ut vid det L/S som observerades i vägmitt (cirka 0,5 L/kg) i stället för efter en kolonnvolym. Nästa lakvatten skulle ha tagits ut efter ytterligare L/S 0,5. Då kunde det första lakvattnet simulera lakningen i vägen och det andra lakvattnet kunde simulera lakningen från vägmaterialet vid perkolationstestet.

När man ska ta upp ostörda provkroppar på vägmaterial för att använda i belastnings-försök är det lämpligt att samtidigt mäta skrymdensitet och vattenkvot i materiallagret i fält. Lämplig fältutrustning är isotopmätare. Om provtagningen skulle misslyckas kan det störda materialet packas in till provkroppar med samma densitet och vattenkvot som materialet i vägen har.

13 Förslag till fortsatt forskningsarbete

I samband med projektrapporteringen har nedanstående fortsatta forskningsbehov identifierats:

- Studier av de geotekniska parametrarna efter snabbåldring av stålslagg
- Jämförelse av mineralogi och mikrostruktur hos aska från vägmitt och vägkant med hjälp av SEM-analyser
- En metod för accelererad åldring av provkroppar avsedda för styvhets- och stabilitetsstudier i laboratorium
- Vidareutveckling och förenkling av snabbåldringsmetoden som användes för stålslagg, exempelvis test vid rumstemperatur och optimering av tiden för testet
- Verifiering av snabbåldringsmetoden som användes för stålslagg även på liknande material. För detta behövs flera material där både färska och åldrade prov är tillgängliga
- Snabbåldring av bottenaska med andra metoder än pH-ökning för att uppnå metalloxidation, glasreaktioner och lerbildning
- Studier av effekten av slänter på vattenflödet i en väg.

Referenser

[1] Arm, M: "*Mechanical properties of residues as unbound materials – experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag*", doktorsavhandling TRITA-LWR PhD 1007, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm 2003.

[2] Arm, M. och Lindeberg, J: "Gas generation in incinerator ash", I: Wascon 2006 – *6th Int Conf on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials*, Belgrade, Serbia & Montenegro 2006, sid. 629–637.

[3] Arm, M., Larsson, L., Tiberg, C., Lind, B. och Arvidslund, O:"*Uppföljning av slaggrusprovvägar – provsträckor på Törringevägen utanför Malmö och Dåvamyran utanför Umeå*", Rapport 1081 från projekt Q4-271 och Q6-604, Värmeforsk Service AB, Stockholm 2009.

[4] Arvidsson, H: "*Dynamiska treaxialförsök på VTI*", VTI notat 21-2006, Statens väg- och transportforskningsinstitut, Linköping 2006.

[5] Arvidsson, H. och Loorents, K-J: "*Askors materialtekniska funktion – VTI:s materialdatabas*", Rapport 930, Värmeforsk Service AB, Stockholm 2005.

[6] Bendz, D., Arm, M., Flyhammar, P., Westberg, G., Sjöstrand, K., Lyth, M. och Wik, O: "*Projekt Vändöra: En studie av långtidsegenskaper hos vägar anlagda med bottenaska från avfallsförbränning*" Rapport 964, Värmeforsk Service AB, Stockholm 2006.

[7] Carter, R., Gardner, K.H., Shimaoka, T., Miyawaki, K: "Mechanisms for reduction of heavy metal leaching by natural chemical weathering reactions", *Int conf on beneficial use of recycled materials in transportation applications*, Arlington, VA, November 13–15, 2001. Proc 2003, sid 335–344.

[8] Ecke, H: "*Sequestration of metals in carbonated municipal solid waste incinerations (MSWI) fly ash*", Waste Management, vol. 23 2003, sid. 631–640.

[9] ECN, Vanderbilt University och DHI. "*Leaching eXpert System – A new environmental impact assessment tool*" <http://www.leaching.org/LeachXSFlyer.pdf> tillgänglig 2008-07-03.

[10] Flyhammar, P. och Bendz, D: "*Vatten- och masstransporter i en dränerad vägkropp med asfaltsbeläggning*", LUTVDG/TVTG-7028, Lunds universitet, Lund 2004.

[11] Flyhammar, P. och Bendz, D: "*Leaching of different elements from subbase layers of alternative aggregates in pavement constructions*", Journal of Hazardous Materials, vol. 137, sid. 603–611, September 2006.

[12] François, D. och Legret, M: "*An approach for the assessment of by-products ecocompatibility in road construction*", Int. conf. on environmental geotechnics, Rio de Janeiro, sid 567–572, 2002.

[13] Fällman, A-M: "*Characterisation of residues – Release of contaminants from slags and ashes*", doktorsavhandling, Linköpings universitet, Linköping 1997.

[14] Fällman, A-M. och Hartlén, J: "Leaching of slags and ashes – controlling factors in field experiments versus in laboratory tests", I: Goumans, van der Sloot och Aalbers, eds. *WASCON 1994 Int conf on environmental implications of construction materials and technology developments*, Maastricht, The Netherlands, June 1994, Elsevier, Proceedings, sid. 39–53.

[15] Fällman, A-M. och Hartlén, J: "*Utilisation of electric arc furnace slag in road construction*", I: M Kamon, ed. Environmental Geotechnics, Balkema, Rotterdam 1996, sid. 703–708.

[16] Fällman, A-M., Eighmy, T.T. och Salaneck, W.R: "*Aging reactions in residues*", AFR rapport 252, AFR, 1999.

[17] Johnson, C.A., Kaeppeli, M., Brandenberger, S., Ulrich, A. och Baumann, W: "Hydrological and geochemical factors affecting leachate composition in municipal solid waste incinerator bottom ash, Part II The geochemistry of leachate from Landfill Lostorf", Switzerland" *Journal of Contam Hydr*, 40 1999, sid. 239–259.

[18] Kitazume, M: "State of practice report – Field and laboratory investigations, properties of binders and stabilized soil", I: B. Rydell, G. Westberg och K.R. Massarsch, eds. *Deep Mixing '05 – Int Conf on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances*, Statens geotekniska institut, Linköping 23–25 maj 2005, sid. 660–684.

[19] Lind, B., Larsson, L., Gustafsson, J.P., Gustafsson, D., Ohlsson, S.Å., Norrman, J., Arvidson, O., Arm, M: "*Energiaska som vägbyggnadsmaterial – utlakning och miljöbelastning från en provväg*", SGI. Varia 557 Statens geotekniska institut, Linköping, 2005.

[20] Meima, J.A. och Comans, R.N.J: "Reducing Sb-leaching from municipal solid waste incinerator bottom ash by addition of sorbent minerals", *Journal of Geochemical Exploratio*n, 62 1998, sid. 299–304.

[21] Meima, J.A., van der Weijden, R.D., Eighmy, T.T. och Comans, R.N.J: "Carbonation processes in municipal solid waste incinerator bottom ash and their effect on the leaching of copper and molybdenum", *Applied Geochemistry*, vol. 17 December 2002, sid. 1503–1513.

[22] Mostbauer, P., Riegler, H. och Lechner, P: "Artificial weathering of inorganic waste – evaluation of laboratory weathering and leaching methods", *Sardinia 2003: 9th Int. Waste Management and Landfill Symposium*, CISA, Environmental Sanatary Engineering Centre, Italy, Cagliari 2003.

[23] Ochs, M., Lothenbach, B. och Giffaut, E: "Uptake of oxo-anions by cements through solid-solution formation: experimental evidence and modelling", *Radiochimica Acta*, 90(9-11) 2002, sid. 639–646.

[24] Olsson, S., van Schaik, J.W.J., Gustafsson, J.P., Berggren, Kleja D., van Hees, P.A.W: "Copper(II) binding to dissolved organic matter fractions in municipal solid waste incinerator bottom ash leachate", *Environmental Science & Technology* Vol. 41 No 12 2007, sid. 4286–4291.

[25] Polettini, A., Pomi, R., Lo, Mastro S. och Piacente, E: "Accelerated ageing of incinerator bottom ash as a tool for landfill management optimization", *Sardinia 2003: 9th Int. Waste Management and Landfill Symposium*, CISA, Environmental Sanatary Engineering Centre, Italy, Cagliari 2003.

[26] Polettini, A. och Pomi, R: "The leaching behavior of incinerator bottom ash as affected by accelerated ageing", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 113 September 2004, sid. 211–217.

[27] Reid, J.M., Evans, R.D., Holnsteiner, R., Wimmer, B., Gaggl, W., Berg, F., Pihl, K.A., Milvang-Jensen, O., Hjelmar, O., Rathmeyer, H., Francois, D., Raimbault, G., Johansson, H.G., Håkansson, K., Nilsson, U. och Hugener, M: "*ALT-MAT: Alternative materials in road construction*", European project, Deliverable D7 Final report for publication", 2001.

[28] Steketee, J.J. och Keve, M: ”Leaching MSWI bottom ash in laboratory tests, a lysimeter and a field application “, I: Urbina och Goumans (ed) *WASCON 2003 5th Int conf on the environmental and technical implications of construction with alternative materials,* San Sebastian, Spain, 3–5 June 2003, sid. 197–206.

[29] Suer, P., Toomväli, C. och Wadstein, E: ”*Jämförelse av lakning från naturmaterial och restprodukter – ett tioårigt perspektiv*”, Statens geotekniska institut, Linköping 2005.

[30] Suer, P., Farkas, I., Toomväli, C. och Bendz, D: ”*Accelerated ageing to resemble open outdoor conditions*”, Statens geotekniska institut, Linköping 2008.

[31] Todorovic, M. och Ecke, H: "Demobilisation of critical contaminants in four typical waste-to-energy ashes by carbonation", *Waste Management*, vol. 26 2006, sid. 430–441.

[32] Van der Sloot, H.A., Comans, R.N.J. och Hjelmar, O: ”Similarities in the leaching behaviour of trace contaminants from waste, stabilised waste, construction materials and soils”, *Science of the Total Environment*, vol. 178 1996, sid. 111–126.

[33] Van Gerven, T., Van Keer, E., Arickx, S., Jaspers, M., Wauters, G. och Vandecasteele, C: ”Carbonation of MSWI-bottom ash to decrease heavy metal leaching, in view of recycling”, *Waste Management*, vol. 25 2005, sid. 291–300.

[34] Zomeren, A v., Berg, P v d., Bleijerveld, R. och Sloot, H.A v d: “Identification of in-situ processes controlling emissions of a stabilised waste landfill by field measurements and geochemical modelling”, *Sardinia 2007, 11th Int. Waste Managem. and Landfill Symposium*, CISA, Cagliari 2007.

Standarder och metodbeskrivningar

[35] ASTM D3682. Standard Test Method for Major and Minor Elements in Combustion Residues from Coal Utilization Processes.

[36] ASTM D3683. Standard Test Method for Trace Elements in Coal and Coke Ash by Atomic Absorption.

[37] EPA metod 200.7. Determination of Metals and Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. Revision 4.4. US Environmental protection Agency EPA. 1994.

[38] EPA metod 200.8. Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. Revision 5.4. US Environmental protection Agency EPA. 1994.

[39] NT envir 002. Solid waste, granular inorganic material: Column test, NordTest Metod 002, 1995. http://www.nordicinnovation.net/nordtest.cfm

[40] SS-EN 196-5. Methods of testing cement – Part 5: Pozzolanicity test for pozzolanic cement.

[41] SS-EN 933-1/A1:2005 Ballast – Geometriska egenskaper – Del 1: Bestämning av kornstorleksfördelning – Siktning.

[42] SS-EN 1097-5:2000 Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 5: Bestämning av fuktkvot genom torkning i ett torkskåp.

[43] SS-EN 1097-6/A1:2005 Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 6: Bestämning av korndensitet och vattenabsortion.

[44] SS-EN 13286:2004 Obundna och hydrauliskt bundna vägmaterial – Del 2: Provningsmetod för laboratoriemässig bstämning av referensdensitet och vatteninnehåll – Proctorinstampning.

[45] SS-EN 13286-7:2004 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures.

[46] SS-ISO 10390 Markundersökningar – Bestämning av pH.

[47] SS-ISO 11265 Markundersökningar – Bestämning av den elektriska konduktiviteten, 1996.

[48] SIS-CEN/TS 14405:2004 Karaktärisering av avfall – Bestämning av lakegenskaper – Uppströms perkolationstest (under bestämda förhållanden).

[49] VVMB 605 Bestämning av densitet och vattenkvot med isotopmätare, VV Publ. 1993:026, Vägverket, Borlänge 1993.

Muntlig kommunikation/E-mail

[50] Andersson, Madelen: SGU, 2008.

A Framställningsprocess för stålslagg och bottenaska

A.1 Hur uppstår stålslagg?

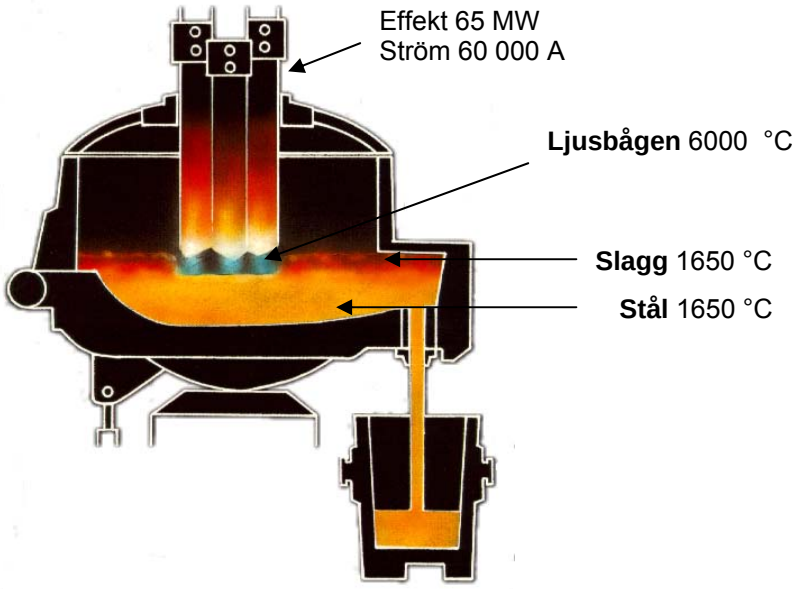
Råvaran för stålframställningen i Smedjebacken är i huvudsak skrot som förvaras på en skrotgård där det är uppdelat efter kvalitet och klassat efter innehåll och styckestorlek.

Skrotet smälts ner av ljusbågar från en 95 MVA transformator som matar tre grafitelektroder i en 125 tons ljusbågsugn. Ljusbågsugnen har en diameter på 6 meter och är 3–4 meter hög. Ugnen är infodrad med eldfast material i den nedre delen där det flytande stålet finns. Skrotet tillförs ugnen via skrotkorgar efter olika recept beroende på vilken stålsort som ska tillverkas.

1 sats (128 ton stål)

Input
140 ton skrot
2,5 ton Kalk
2,5 ton Dolomit
1 ton Skummkol
2 600 m3 Syrgas

Output
128 ton stål
14 ton EAF-slagg
2 ton Stoft



EAF Electric arc furnace (ljusbågsugn), Ovako, Smedjebacken

Ugnen laddas med skrot i två omgångar. I första skrotkorgen tillsätts slaggbildare i form av kalk och dolomit. Slaggbildare tillförs dessutom genom transportrör i ugnsvalvet medan kol och syrgas sprutas in med rör genom slaggluckan på ugnen. Kol och syrgas bildar koloxid (och koldioxid) som finns som små gasblåsor i slaggen och får den att jäsa till en s.k. skummande slagg vilket hjälper till att skydda ugnsinfodringen samtidigt som ett bättre energiutnyttjande uppnås. Syrgas tillförs också som extra energitillskott. När skrotet från den första skrotkorgen smält tillräckligt mycket för att skrotet i nästa korg ska rymmas lyfts ugnsvalvet av och den andra korgen laddas.

När allt skrot är smält avskiljs slaggen genom att ugnen tippas så att slaggen rinner ut genom en lucka och ner på golvet under ugn. Då slaggen är avskiljd, vickas ugnen åt andra hållet och stålsmältan tappas genom ett hål i botten av ugnen till en skänk.

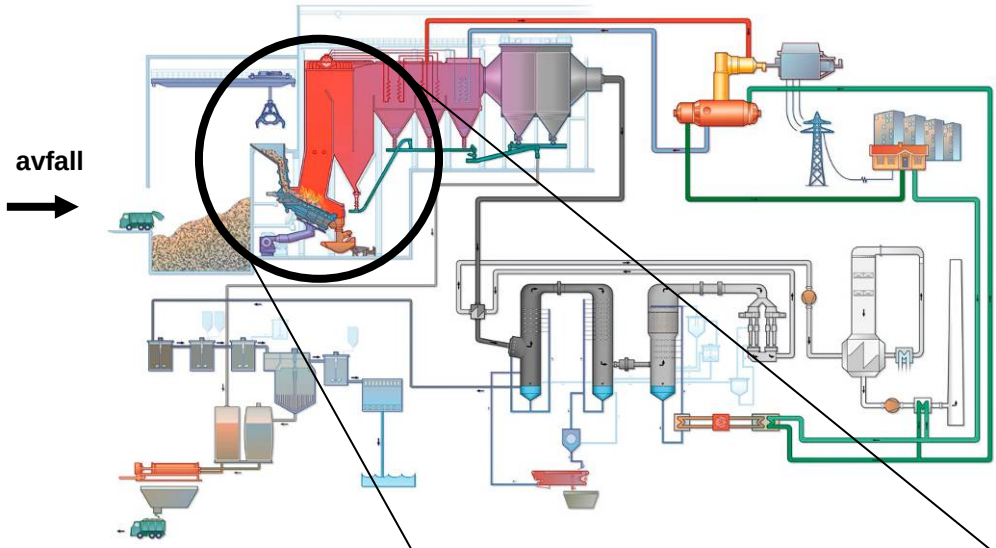
Slaggen hämtas efter varje tappning med hjälp av en bandtraktor som gräver ur slaggen och tömmer den på en lastväxlare varefter den transporteras till slagghanteringområdet. Där vattenkyls slaggen, magnetsepareras (reststål tas ur) och sorteras i olika fraktioner. Slaggen transporteras sedan till ett deponiområde för vidare behandling innan eventuell avyttring sker.

Källa: Torbjörn Sörhus och Tommy Örtlund, Ovako Bar AB Smedjebacken

A.2 Hur uppstår bottenaska från avfallsförbränning?

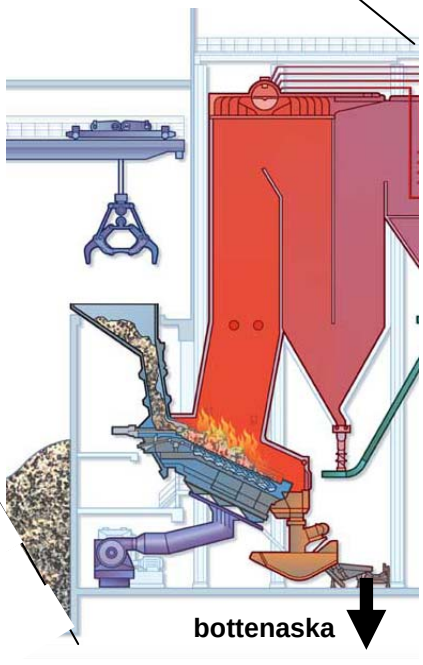
Sysav förfogar över två stycken anläggningar i Malmö som behandlar brännbart avfall från hushåll och företag i södra Skåne. Tillsammans kan anläggningarna ta hand om cirka 400 000 ton avfall per år och producera mer än 1 TWh energi, varav 850 000 MWh som hetvatten och 145 000 MWh som elkraft.

Före förbränning vägs och kontrolleras avfallet och brännbart avfall dirigeras vidare. Blandat avfall passerar först en försorteringsanläggning där återvinningsbart och inert material sorteras ut och brännbart material går vidare till förbränning. Båda anläggningarna har två rosterpannor med förbränning vid cirka 1000 °C. Den gamla anläggningen har kapaciteten 2x13 t/tim och den nya 2x25 t/tim. Figuren nedan visar principen för de nya pannorna (byggda 2003).



Sysavs avfallskraftvärmeverk i Malmö, principskiss. Inom cirkeln visas eldstaden med roster och askutmatning. Utanför cirkeln visas arrangemang för rökgasreningen.

Avfallet tippas i bunkern och lyfts upp till pannans inmatningstratt med hjälp av en gripskopa. Sedan glider det nedåt i tratten och trycks in i eldstaden av en så kallad pusher. Botten i eldstaden, den så kallade rostern, har en yta på cirka 100 kvadratmeter. Avfallet rör sig nedåt på den lutande rostern där det torkas, förgasas och förbränns. Den rörliga rostern är en så kallad återskjutsrost, vilket innebär att rosterstavarna skjuter avfallet uppåt, varvid det blandas om, vilket gynnar förbränningen. För att förbränningen ska bli effektiv och fullständig blåses luft in i ugnen.



Vid slutet av rostern är avfallet helt utbränt. Slaggen/bottenaskan, som är kvar, består av sten, skrot, glas och annat material som inte är brännbart. Den faller ner i ett vattenfyllt tråg. Ungefär 15–25 viktprocent av avfallet blir kvar som slagg/bottenaska. Via slaggutmatarna matas den ut i en bunker för vidare transport till det närbelägna avfallsupplaget Spillepeng. Där sorteras järnskrot och andra metaller ut för återvinning och den återstående bottenaskan, s.k. slaggrus, kan användas som anläggningsmaterial.

Källa: Raul Grönholm, SYSAV

B Provförteckning

Långtidsegenskaper

Provtagning: Smedjebacken: 2006-09-27 -- 2006-09-28
Törringe: 2006-11-14 -- 2006-11-15
Antal 79

Lokal	Beteckning	Mtrl	Beskrivning	Syfte	Läge	Djup	Övrigt	Finns
Smedjebacken		Beläggn.prov	1 kaka ca 1 dm², 5 cm tjock	Dokumentation				VTI
Smedjebacken		Bärlager	Från uppgrävd hög, 060928	Dokumentation				VTI
Smedjebacken	Södra 1	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	0 från VM	nivå 1	Vägmitt	VTI
Smedjebacken	Södra 1	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	0 från VM	nivå 2	Vägmitt	VTI
Smedjebacken	Södra 1	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	0 från VM	nivå 3	Vägmitt	VTI
Smedjebacken	Södra 2	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	1,2 från VM	nivå 1	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken	Södra 2	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	1,2 från VM	nivå 2	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken	Södra 2	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	1,2 från VM	nivå 3	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken	Södra 3	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	2,15 från VM	nivå 1	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	Södra 3	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	2,15 från VM	nivå 2	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	Södra 3	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	2,15 från VM	nivå 3	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	Södra 4	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	3,2 från VM	nivå 1	Bel. Kant	VTI
Smedjebacken	Södra 4	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	3,2 från VM	nivå 2	Bel. Kant	VTI
Smedjebacken	Södra 4	Stålslagg	Schakt 1 060927	Back-up Φ100	3,2 från VM	nivå 3	Bel. Kant	VTI
Smedjebacken	1B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	0 från VM	nivå 1	Vägmitt	VTI
Smedjebacken	1B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	0 från VM	nivå 2	Vägmitt	VTI
Smedjebacken	1B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	0 från VM	nivå 3	Vägmitt	VTI
Smedjebacken	2B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	1,2 från VM	nivå 1	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken	2B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	1,2 från VM	nivå 2	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken	2B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	1,2 från VM	nivå 3	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken	3B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	2,15 från VM	nivå 1	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	3B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	2,15 från VM	nivå 2	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	3B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	2,15 från VM	nivå 3	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	4B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	3,2 från VM	nivå 1	Bel. Kant	VTI
Smedjebacken	4B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	3,2 från VM	nivå 2	Bel. Kant	VTI
Smedjebacken	4B	Stålslagg	Schakt 2 060928	Back-up Φ100	3,2 från VM	nivå 3	Bel. Kant	VTI
Smedjebacken	Φ100 (rör 1)	Stålslagg	Borrprov - finns på SP	Mikroskopi	0 från VM	Först.lager	Vägmitt	SP
Smedjebacken	Φ100 (rör 1B)	Stålslagg	Borrprov - finns på SP	Mikroskopi	0 från VM	Först.lager	Vägmitt	SP
Smedjebacken	Φ100 (rör 2)	Stålslagg	Borrprov - finns på SP	Mikroskopi	1,2 från VM	Först.lager	mellan hjulspår	SP
Smedjebacken	Φ100 (rör 3)	Stålslagg	Borrprov - finns på SP	Mikroskopi	2,15 från VM	Först.lager	Hjulspår	SP
Smedjebacken	Φ100 (rör 4)	Stålslagg	Borrprov - finns på SP	Mikroskopi	3,2 från VM	Först.lager	Bel. Kant	SP
Smedjebacken	Φ150 (rör 1)	Stålslagg	Borrprov	Treax	2,15 från VM	Först.lager	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	Φ150 (rör 2)	Stålslagg	Borrprov	Treax	2,15 från VM	Först.lager	Hjulspår	VTI
Smedjebacken	Φ150 (rör 3)	Stålslagg	Borrprov	Treax	1,2 från VM	Först.lager	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken	Φ150 (rör 4)	Stålslagg	Borrprov	Treax	1,2 från VM	Först.lager	mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken		Stålslagg	Borrväggsmtrl, fint mtrl	Dokumentation	Φ150 hål nr 4			VTI
Smedjebacken		Stålslagg	Från uppgrävd hög, 060927	Back-up Φ150	mot vägkant		Tunna ca 60 l	VTI
Smedjebacken		Stålslagg	Från uppgrävd hög, 060927	Vattenkvot	mot vägkant			VTI
Smedjebacken		Stålslagg	Från uppgrävd hög, 060927	Back-up Φ150	mot vägmitt		Tunna ca 60 l	VTI
Smedjebacken		Stålslagg	Från uppgrävd hög, 060927	Vattenkvot	mot vägmitt			VTI
Smedjebacken		Stålslagg	Färsk slagg (0/40mm) tillv 060926	Färsk/åldrad provning	Ovako		Pall ca 0,5 m³	SGI
Smedjebacken		Terrass	Morän	Dokumentation	1,2 från VM		mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken		Terrass	Bottenmtrl från Φ100 rör 1B	Dokumentation	0 från VM		Vägmitt	VTI
Smedjebacken		Terrass	Bottenmtrl från Φ100 rör 2	Dokumentation	1,2 från VM		mellan hjulspår	VTI
Smedjebacken		Terrass	Bottenmtrl från Φ100 rör 3	Dokumentation	2,15 från VM		Hjulspår	VTI
Smedjebacken		Terrass	Bottenmtrl från Φ100 rör 4	Dokumentation	3,2 från VM		Bel. Kant	VTI
Törringe		Beläggn.prov	Slitlager	Dokumentation				VTI
Törringe		Beläggn.prov	AG	Dokumentation				VTI
Törringe		Bärlager	Uppgrävt under bel.rivning	Dokumentation		ca 13-20 cm		VTI
Törringe	T1a	Slaggrus		Back-up ostörda prov	3,1 m från VM	20-27 cm	Överkant FL	VTI
Törringe	T1b	Slaggrus		Back-up ostörda prov	3,1 m från VM	49-57 cm		VTI
Törringe	T1c	Slaggrus		Back-up ostörda prov	3,1 m från VM	72-80 cm	Underkant FL	VTI
Törringe	T2a	Slaggrus		Back-up ostörda prov	2,0 m fr VM	19-28 cm	Överkant FL	VTI
Törringe	T2b	Slaggrus		Back-up ostörda prov	2,0 m fr VM	48-60 cm		VTI
Törringe	T2c	Slaggrus		Back-up ostörda prov	2,0 m fr VM	70-79 cm	Underkant FL	VTI
Törringe	T3a	Slaggrus		Back-up ostörda prov	0,2 m fr VM	41-46 cm	Överkant FL	VTI
Törringe	T3b	Slaggrus		Back-up ostörda prov	0,2 m fr VM	53-60,5 cm		VTI
Törringe	T3c	Slaggrus		Back-up ostörda prov	0,2 m fr VM	73-78 cm	Underkant FL	VTI
Törringe	I	Slaggrus	"Gipsmonolit" -ostört prov; SP	Mikroskopi	1,5 m fr VM	Först.lager		SP
Törringe	II	Slaggrus	"Gipsmonolit" -ostört prov	Mikroskopi	2,0 m fr VM	Först.lager		VTI
Törringe		Slaggrus	Från "SGI-hög"	Vattenkvot				VTI
Törringe		Slaggrus	Från "mitt-pall"	Vattenkvot		"djupt"		VTI
Törringe		Slaggrus		Treax, mm			2 x 60 l	VTI
Törringe		Terrass	Morän	Dokumentation	1,5 m fr VM	81-105 cm		VTI
SYSAV		Slaggrus	Färsk slaggrus	Färsk/åldrad provning			Pall	VTI
Smedjebacken	Vägmitt	Stålslagg	Taget fr upplagd hög, sikt < 40 mm	Kolonntest+totalhalt+*	Ca 0,5 m fr VM	Hela stålslagg	4 hinkar à 10 L	SGI
Smedjebacken	Vägkant	Stålslagg	Taget fr upplagd hög, sikt < 40 mm	Kolonntest+totalhalt+*	Ca 3,3 m fr VM	Hela stålslagg	4 hinkar à 10 L	SGI
Smedjebacken	Prov 11-84	Stålslagg	Från schakt mot deponi	Kartering av pH	0,5-3,0 m fr VM	Varierande er	34 prov, analys i fält	Kastat
Ovaco	Färskt prov	Stålslagg	Färsk slagg (0/40mm) tillv 060926	Kolonntest+totalhalt+*	Upplag industri	Prov m frontla	Pall ca 0,5 m³, delat på SGI	SGI
Ovaco	Åldrad slagg	Stålslagg	Åldrad färsk slagg (ovan) 6 mån	Kolonntest+totalhalt+*	Lysimeterfält	Uttag K&K-m	Test påbörjas mars-april	SGI
Ovaco	Åldring 1	Stålslagg	Åldrad slagg (ovan) + metod 1	Kolonntest+totalhalt+*	Lysimeterfält	Uttag K&K-m	Åldring påbörjas mars-april	SGI
Ovaco	Åldring 2	Stålslagg	Åldrad slagg (ovan) + metod 2	Kolonntest+totalhalt+*	Lysimeterfält	Uttag K&K-m	Åldring påbörjas mars-april	SGI
Törringe	Vägmitt	Slaggrus	Taget fr upplagd hög, < 40 mm	Kolonntest+totalhalt+*	Ca 0,3 m fr VM	Hela slaggrus	4 hinkar à 10 L	SGI
Törringe	Vägkant	Slaggrus	Taget fr upplagd hög, < 40 mm	Kolonntest+totalhalt+*	Ca 3,3 m fr VM	Hela slaggrus	4 hinkar à 10 L	SGI
Törringe	Prov 11-85	Slaggrus	Från västra schaktet, västra väggen	Kartering av pH	0,3-3,3 m fr VM	Varierande er	39 prov, analys i fält	Kastat
Törringe	Prov 11-85	Slaggrus	Från västra schaktet, västra väggen	Kartering av el. kond.	0,3-3,3 m fr VM	Varierande er	39 prov, analys på lab dan efter	Kastat
SYSAV	Åldrad b-aska	Slaggrus	Åldrad > 6 mån, sorterad	Kolonntest+totalhalt+*	Delad pall			SGI
SYSAV	Åldring 1	Slaggrus	Åldrad (ovan) + metod 1	Kolonntest+totalhalt+*	Delad pall			SGI
SYSAV	Åldring 2	Slaggrus	Åldrad (ovan) + metod 2	Kolonntest+totalhalt+*	Delad pall			SGI

C Packningsdata för treaxprovkroppar

Tabell C1 Packningsegenskaper för treaxprovkroppar av stålslagg från provvägen.

Prov	Packningsgrad	Torr skrymdensitet	Relativ vattenkvot (av optimal)	Faktisk vatten-kvot (efter test)
Målvärde	*95 %*	*2,41* t/m³	*60 %*	*2,1 %*
Treax 726	97 %	2,47 t/m³	49 %	1,8 %
Treax 727	96 %	2,44 t/m³	57 %	2,0 %
Medelvärde	**97 %**	**2,46 t/m³**	**53 %**	**1,9 %**

Tabell C2 Packningsegenskaper för treaxprovkroppar av stålslagg från 7-månadersupplaget.

Prov	Packningsgrad	Torr skrymdensitet	Relativ vattenkvot (av optimal)	Faktisk vatten-kvot (efter test)
Målvärde	95 %	2,32 t/m³	60 %	1,9 %
Treax 728	98 %	2,40 t/m³	63 %	2,0 %
Treax 729	98 %	2,39 t/m³	64 %	2,0 %
Medelvärde	**98 %**	**2,39 t/m³**	**64 %**	**2,0 %**

Tabell C3 Packningsegenskaper för treaxprovkroppar av bottenaska från provvägen.

Prov	Packningsgrad	Torr skrymdensitet	Relativ vatten-kvot (av optimal)	Faktisk vatten-kvot (efter test)
Målvärde	*89 %*	*1,42 t/m³*	*139 %*	*28 %*)*
Treax 720	88 %	1,40 t/m³	117 %	24 %
Treax 721	88 %	1,41 t/m³	108 %	22 %
Treax 722	88 %	1,40 t/m³	108 %	22 %
Medelvärde	**88 %**	**1,40 t/m³**	**111 %**	**22 %**

*) naturfuktigt

Tabell C4 Packningsegenskaper för treaxprovkroppar av bottenaska från SYSAV:s upplag.

Prov	Packnings-grad	Torr skrymdensitet	Relativ vattenkvot (av optimal)	Faktisk vatten-kvot (efter test)
Målvärde	*89 %*	*1,63 t/m³*	*124 %*	*15 %*)*
Treax 723	92 %	1,68 t/m³	116 %	14 %
Treax 724	86 %	1,57 t/m³	116 %	14 %
Treax 725	86 %	1,57 t/m³	126 %	15 %
Medelvärde	**88 %**	**1,61 t/m³**	**119 %**	**14 %**

*) därefter uppnås vattenmättnad

D Resultat från kemisk analys av stålslagg

Här redovisas data från totalhaltsanalyser, pH-bestämningar och perkolationstester på stålslagg. Det är stålslagg från vägen i Smedjebacken, från upplaget i Smedjebacken och från utomhuslagringen i Linköping som har analyserats.

D.1 Totalhalter av oorganiska ämnen i stålslaggen

Enhet mg/kg, om inget annat anges.

	Smedjeback-en vägkant *nr: 060195*	**Smedjeback-en vägmitt** *nr: 060194*	**Smedjeback-en färskt upplag** *nr: 060196*	**SGI-lagrat ute 7 mån** *nr: 070090*
Al	17 400	17 600	25 700	25 900
Ca	189 000	190 000	197 000	192 000
Fe	341 000	341 000	306 000	396 000
K	< 900	< 900	< 900	< 900
Mg	45 600	46 800	49 800	48 700
Mn	41 100	39 000	43 000	44 300
Na	684	838	< 500	< 500
P	3 220	3 110	2 320	2 350
Si	52 800	54 700	51 900	53 300
Ti	2 190	2 190	2 720	2 580
As	2,92	< 3	7,12	4,29
Ba	710	721	648	635
Be	< 0,7	< 0,7	< 0,7	< 0,6
Cd	0,16	0,22	0,16	0,197
Co	3,73	4,91	8,55	4,95
Cr	8 450	8 530	12 200	12 300
Cu	158	158	233	195
Hg	< 0,02	< 0,02	< 0,010	< 0,01
La	7,48	< 6	14,1	15,7
Mo	27,7	30	47,1	43,9
Nb	107	95,6	186	188
Ni	21	25,9	73,5	52,6
Pb	7,86	15	8,42	6,36
S	1 040	1 150	901	1 070
Sb	1,11	1,14	1,97	1,09
Sc	< 1	< 1	< 1	< 1
Se	0,9	1,51	0,57	0,796
Sn	< 20	< 20	< 20	< 20
Sr	145	145	219	220
V	1 310	1 260	1 710	1 590
W	195	233	244	304
Y	8,19	8,1	7,15	4,3
Zn	165	214	321	364
Zr	91,6	89,9	134	126
TS (%)	99,1	98,9	97,6	96
LOI (%)	< 2,5	< 2,3	< 3,0	-2,2

D.2 pH-profil för stålslaggsvägen i Smedjebacken

Avst fr vägmitt:	0,5		0,85		1,2		1,7 m	
Nivå (m)	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**
-0,12	11,31	-0,11	11,38	-0,11	11,41	-0,11	11,46
-0,20	12,01	-0,22	11,99	-0,21	11,96	-0,20	11,92
-0,35	12,32	-0,34	12,29	-0,34	12,17	-0,31	12,22
-0,52	12,33	-0,52	12,35	-0,50	12,31	-0,48	12,27
				-0,62	11,65		

Avst fr vägmitt:	2,15		2,7		3,2		3,5 m	
Nivå (m)	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**
-0,1	11,49	-0,11	11,44	-0,08	10,74	-0,06	10,54
-0,2	11,97	-0,20	12,05	-0,17	11,79	-0,16	11,59
-0,3	12,16	-0,30	12,30	-0,29	12,06	-0,28	11,80
-0,49	12,35	-0,47	12,25	-0,45	11,97	-0,46	11,86
-0,56	11,73						

D.3 Resultat från perkolationstest på stålslagg från Smedjebacken

Halt i µg/l

	vägkant					vägmitt					färskt upplag 2006			7-månadersupplag				
L/S:	0,1	0,3	0,5	1	2	0,1	0,3	0,5	1,0	2	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	1	2
	nr: 06201	*06202*	*06203*	*06204*	*06205*	*06196*	*06197*	*06198*	*06199*	*06200*	*06193*	*06194*	*06195*	*07241*	*07242*	*07243*	*07244*	*07245*
Ca	151 000	146 000	134 000	128 000	103 000	762 000	725 000	586 000	496 000	453 000	437 000	318 000	268 000	93 300	82 500	78 900	76 300	74 300
Fe*)	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	5,1	6,3	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
K	1 530	1 170	1 010	927	<500	3 630	1 800	1 310	844	<500	3 680	1 370	1 180	2 600	2 250	1 780	1 280	618
Mg	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90	<90
Na	7 940	5 160	4 210	3 220	1 030	15 300	7 180	5 310	3 070	929	11 400	3 690	3 050	14 200	9 380	3 340	849	254
S	1 830	1 500	1 390	1 280	789	2 980	1 500	1 420	1 770	2 560	2 490	9 030	13 700	10 400	4 150	1 230	874	750
Si	5 820	6 450	7 820	9 340	11 200	182	217	307	363	403	912	1 330	1 860	68 200	67 700	65 800	63 600	61 500
Al	1 020	1 050	1 080	1 080	916	200	240	367	459	651	1 360	1 780	2 720	17,7	21,5	29,7	35,8	43,4
As	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ba	588	523	465	453	324	8 570	5 530	3 780	3 130	2 130	4 100	2 060	1 340	190	159	129	143	124
Cd	0,0808	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,241	0,0533	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,216	<0,05	<0,05
Co	0,123	0,069	<0,05	<0,05	<0,05	0,125	0,0744	0,0896	<0,05	0,313	0,124	<0,05	<0,05	0,0629	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr	30,2	20,9	18,7	13	8,54	45,1	38,1	33,1	32,5	30,1	44,2	37,8	47,2	39,8	16,3	9,7	10,1	9,45
Cr^{6+}*)	<20	21	17	<20	<20	43	42	39	30	30	50	20	30	<100	<100	<20	<20	
Cu	10,1	7,68	6,61	4,21	2,07	15,1	10,7	9,78	6,79	4,67	30,1	17,6	14,8	9,49	4,32	1,76	1,31	<1
Hg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Mn	0,644	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	1,31	2,26	0,436	<0,2	0,269	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Mo	38,6	25,5	22,5	16	7,84	40	31,5	28,8	28,1	24,4	95,5	86,5	92,5	190	77,2	39,9	14,3	11,3
Ni	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,3	2,06	1,39	<0,5	<0,5	0,628	<0,5	<0,5	0,652	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Pb	0,226	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	28,9	22,2	13	9,52	8,17	9,11	5,1	2,96	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Sb	0,109	<0,1	<0,1	0,295	0,191	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,136	0,213	0,275	0,295	0,614	0,473	0,552	0,419	0,292
Se	0,962	0,763	0,632	0,484	0,255	1,28	1,11	0,957	0,699	0,609	0,961	0,93	1,1	1,73	0,706	0,241	0,184	0,122
V	140	177	205	219	252	2,07	2,89	3,92	4,03	4,49	10,3	18,4	30,1	3 920	3 290	2 170	1 390	952
Zn	2,53	<2	<2	<2	<2	7,45	6,05	4,75	2,7	2,35	25,3	19,7	10	<2	<2	<2	<2	<2
DOC	640	1 100	340	800	860	7 000	4 900	3 100	2 200	1 700	2 300	1 200	3 100	9 600	4 800	<1 000	1 900	470
SO_4	14 000	8 900	7 400	<5 000	1 800	25 000	21 000	13 000	<5 000	5 200	<5 000	<5 000	9 000	29 000	12 000	3 570,80	<5 000	<5 000
F	<200	220	230	230	<200	<200	<200	220	<200	<200	760	590	490	450	450	1 500	300	200
Cl	<5 000	<5 000	<5 000	2 800	<5 000	<5 000	<5 000	<5 000	7 900	<5 000	19 000	11 000	<5 000	23 000	9 300	2 400	1 400	<1 000

*) Värdena ligger under eller nära detektionsgränsen.

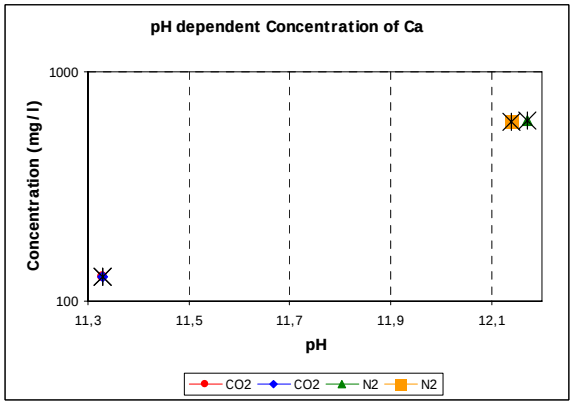
Lakdata från tabellen på föregående sida har sammanställts i 118 st grafer. Graferna innehåller uppgifter för stålslagg från vägmitt och vägkant i Smedjebacken, från upplaget i Smedjebacken (Produced 2006) och från utomhuslagringen i Linköping (7 månaders upplag).

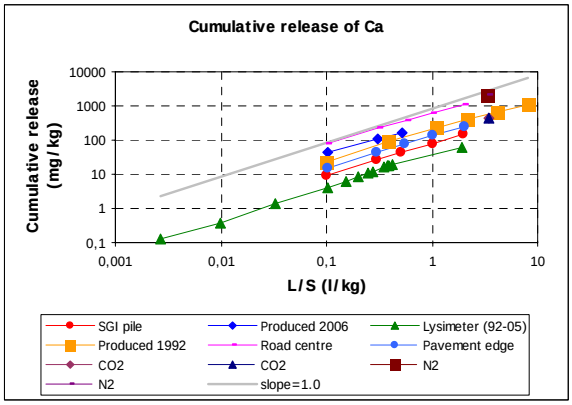
Dessutom finns data för färsk stålslagg från Smedjebackens upplag som provtogs och perkolationstestades 1992 (Produced 1992) [14]. Observera att perkolationstestet 1992 gjordes på krossat material med pH 4 i invattnet, vilket är en liten skillnad jämfört med detta projekts tester som gjordes på okrossat material 0–20 mm med rent vatten som invatten (avsnitt 4.4).

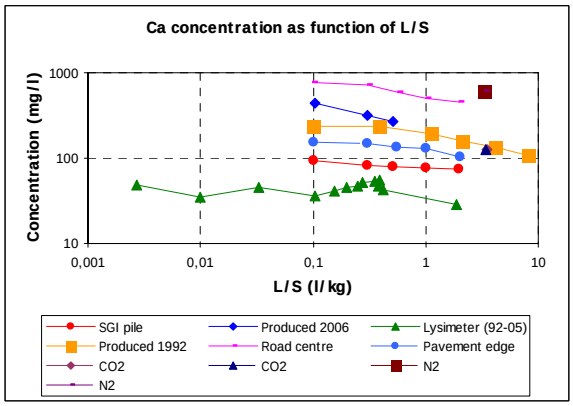
Slutligen finns flera års resultat för stålslagg som producerades och provtogs 1992 och därefter har legat i SGI:s utomhuslysimeter, exponerat för regn och vind (Lysimeter 92–05) [29].

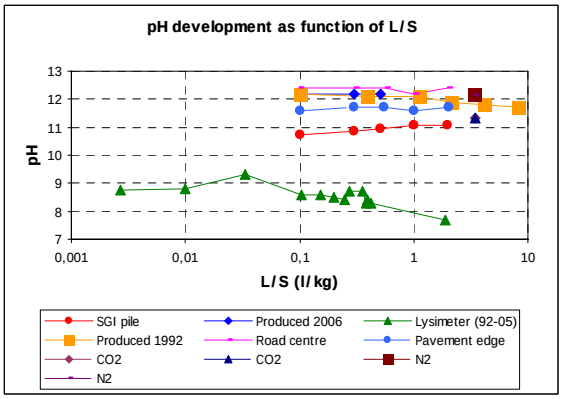
Graferna är grupperade ämnesvis med samma ordningsföljd som i tabellen på föregående sida.
Observera att prover under detektionsgräns visas som ½ tånger detektionsgräns.

Kalcium

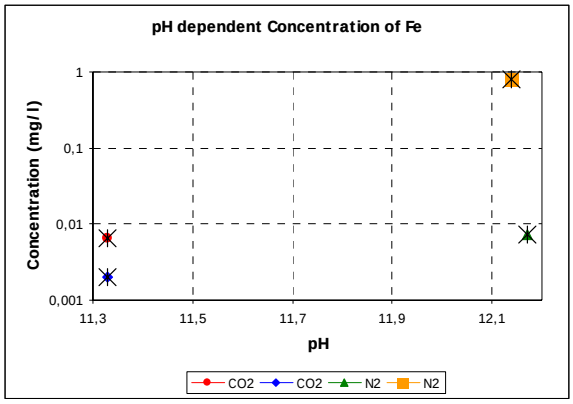


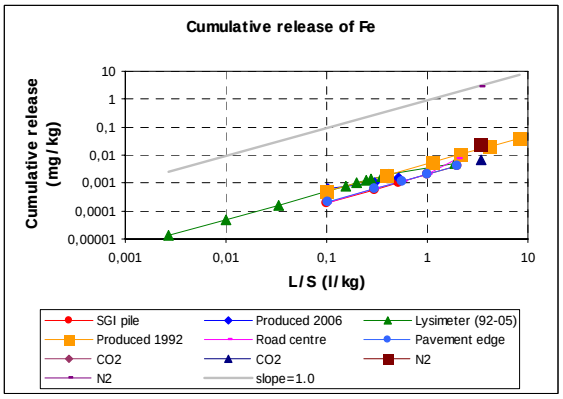


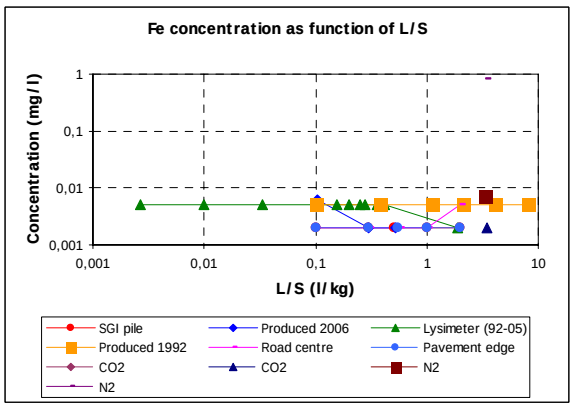


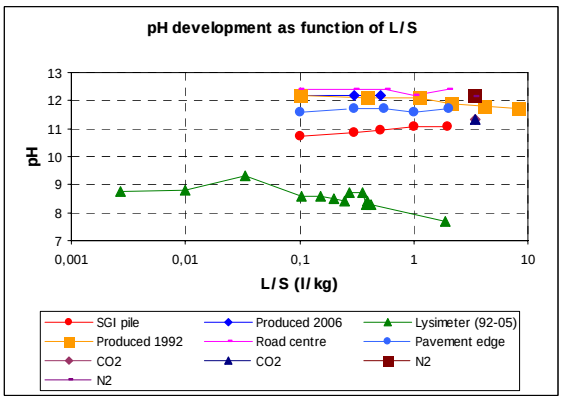


Järn

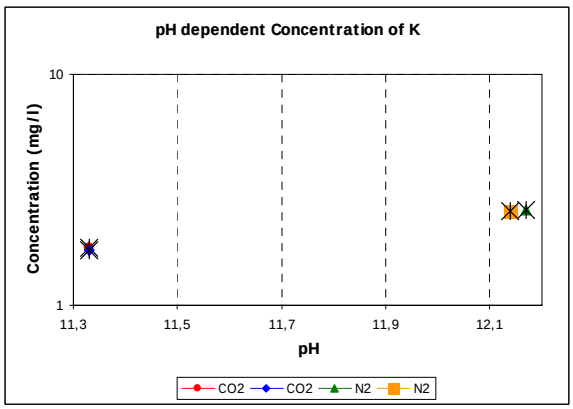

pH dependent Concentration of Fe
Concentration (mg/l)
1
0,1
0,01
0,001
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

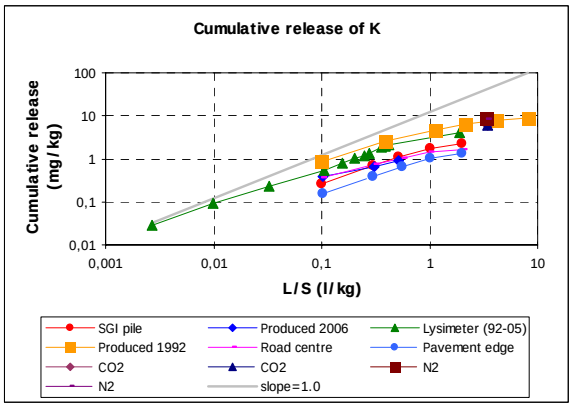

Cumulative release of Fe
Cumulative release (mg/kg)
10
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

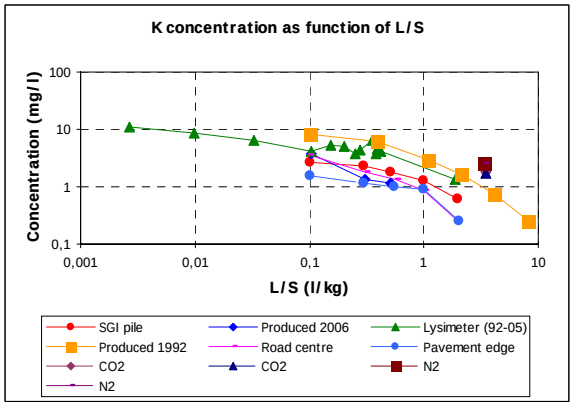

Fe concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
1
0,1
0,01
0,001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

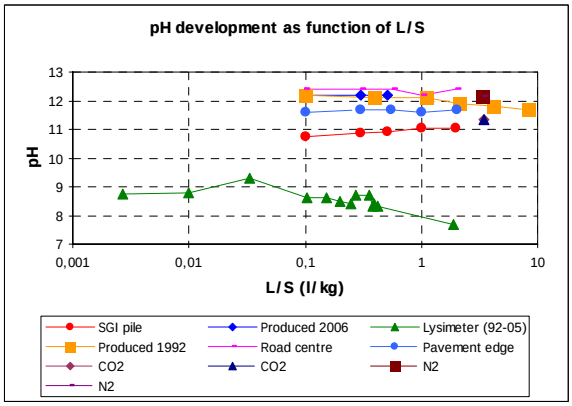

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Kalium

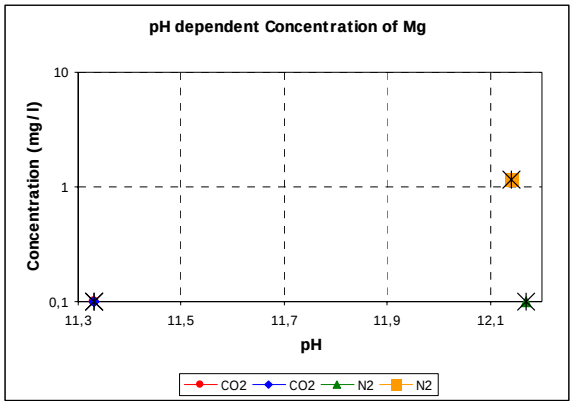

pH dependent Concentration of K
Concentration (mg/l)
10
1
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

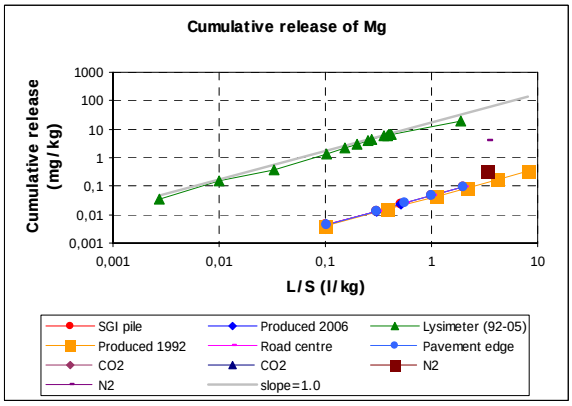

Cumulative release of K
Cumulative release (mg/kg)
100
10
1
0,1
0,01
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

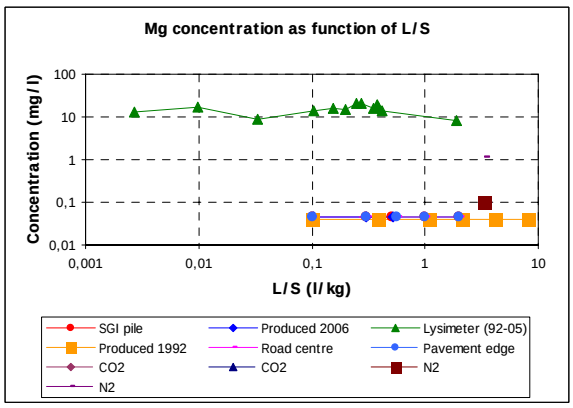

K concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
100
10
1
0,1
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

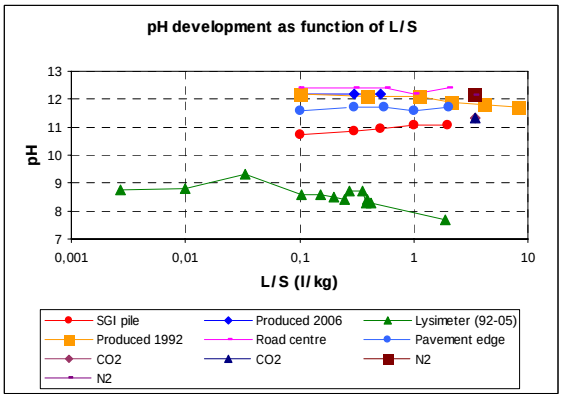

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Magnesium

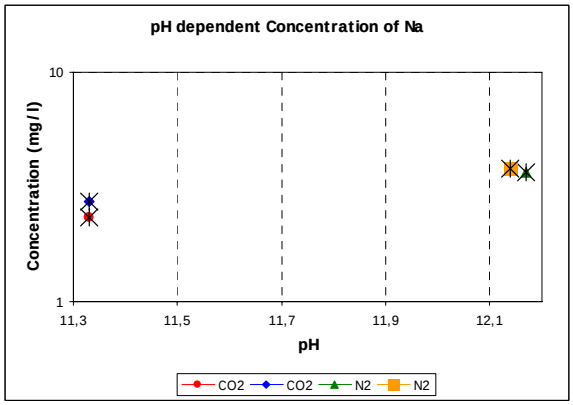


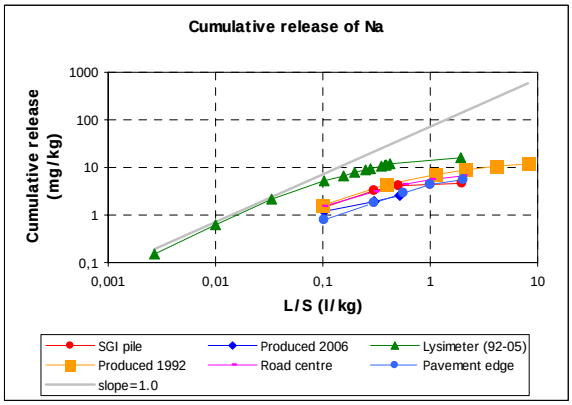


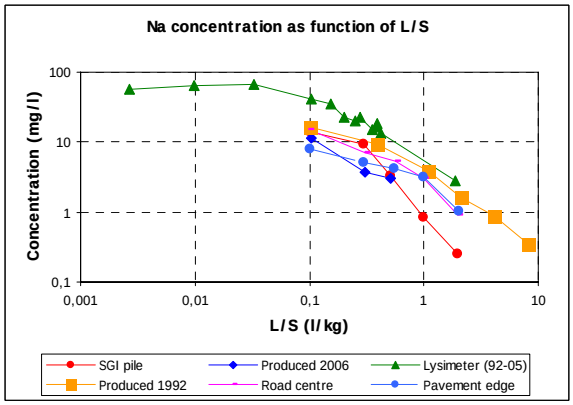


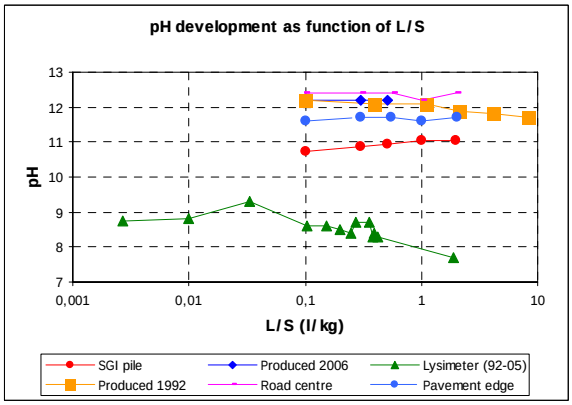


Natrium

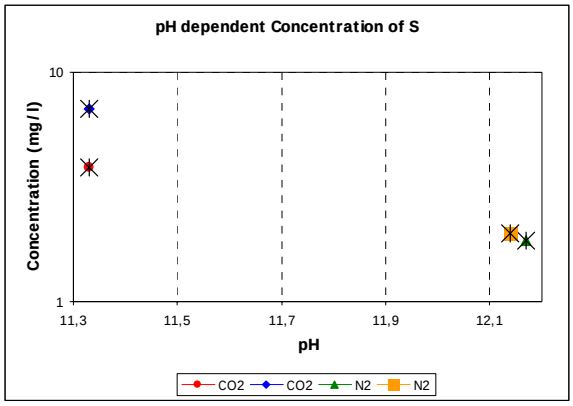


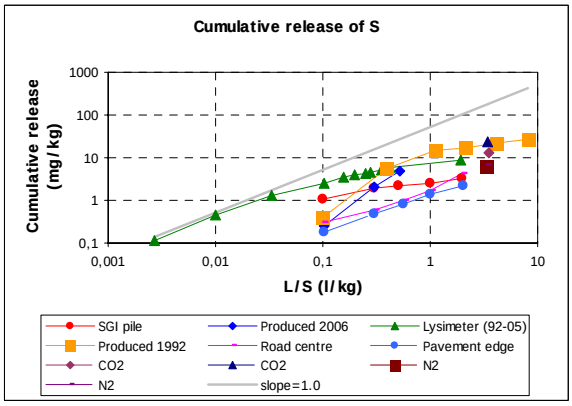


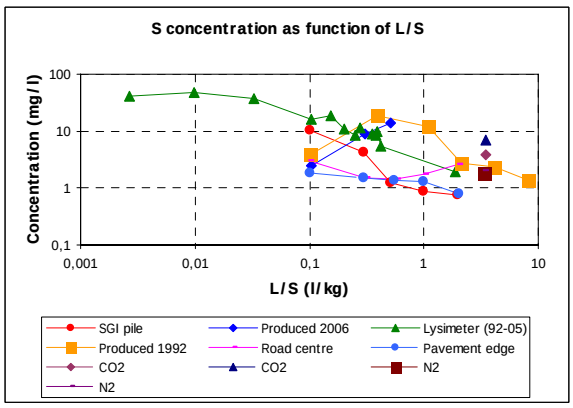


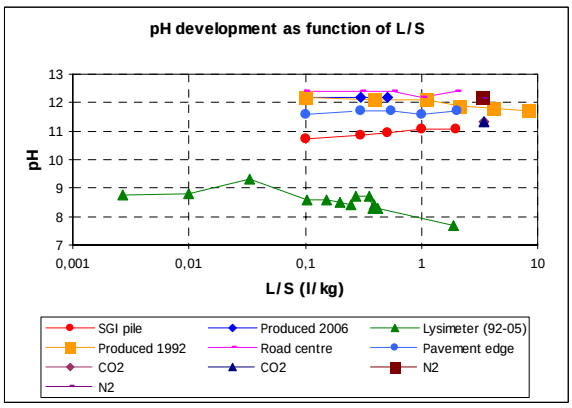


Svavel

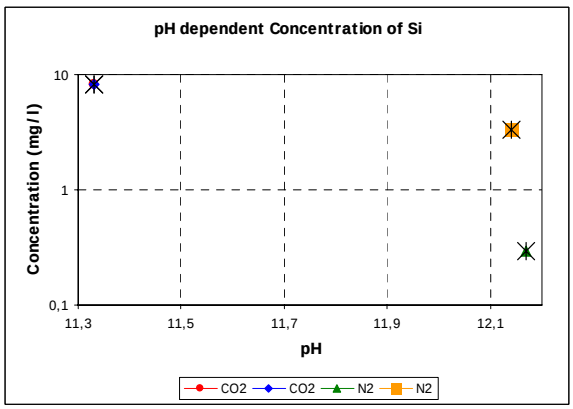


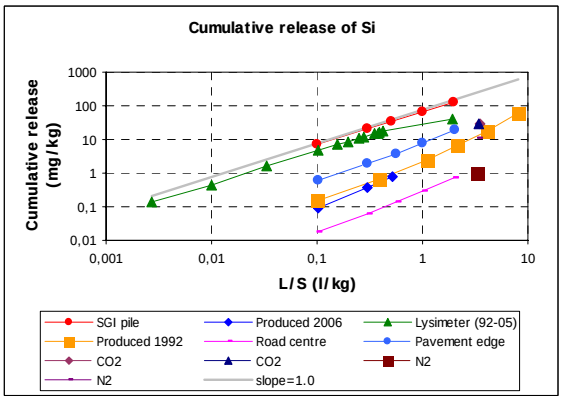


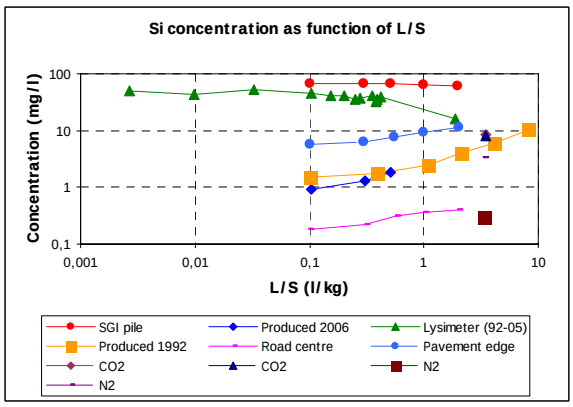


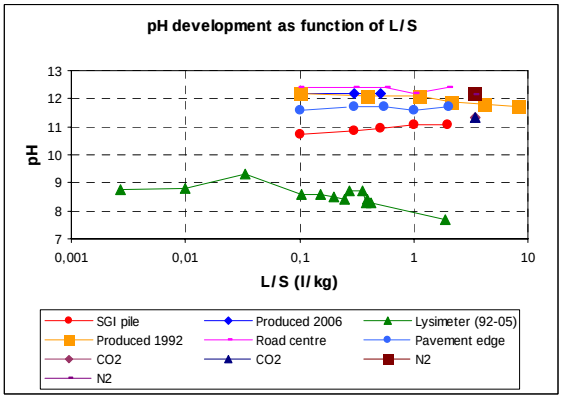


Kisel

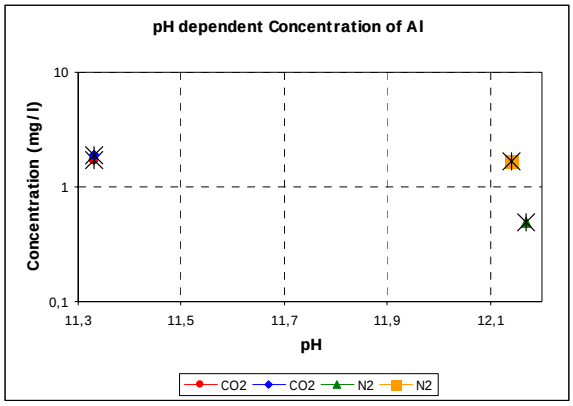


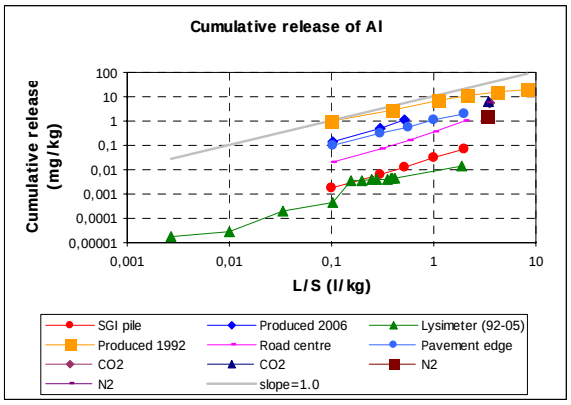


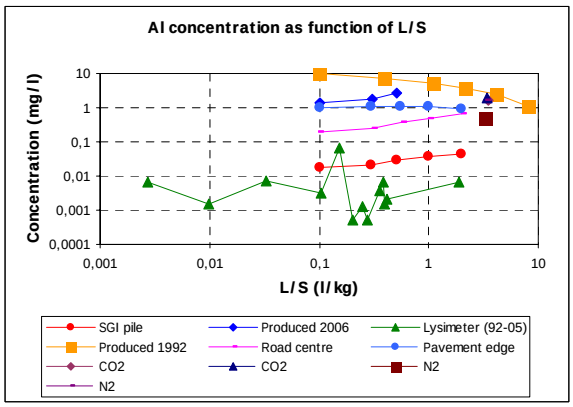


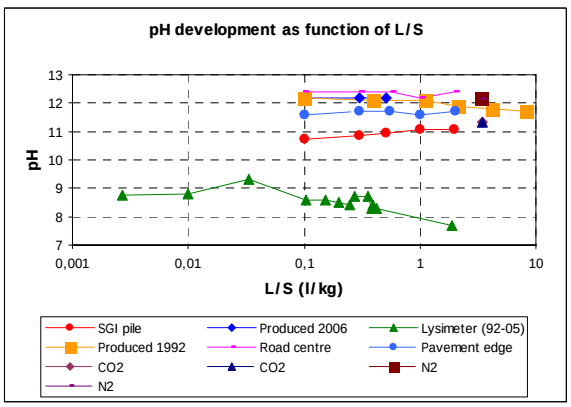


Aluminium

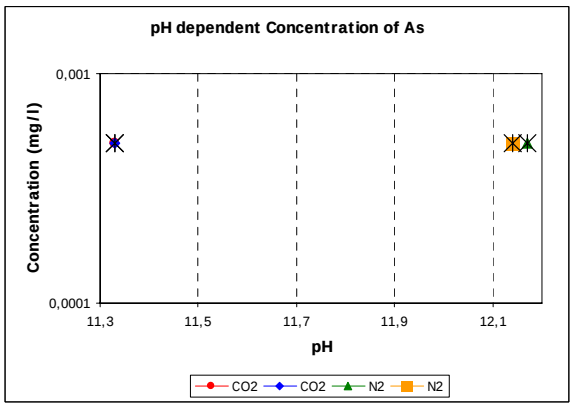


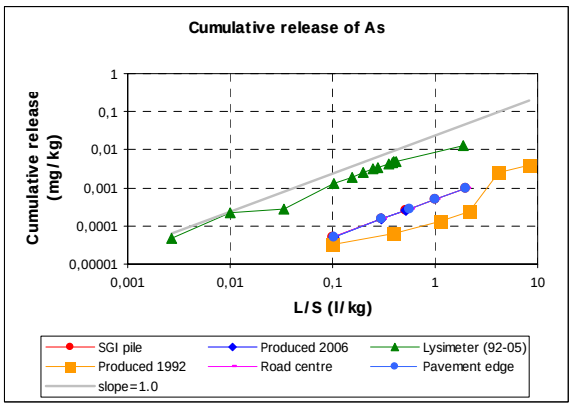


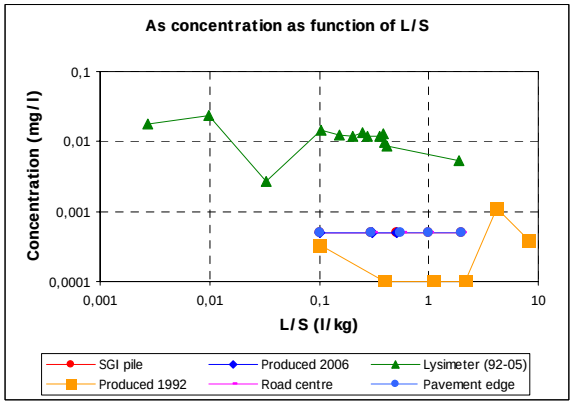


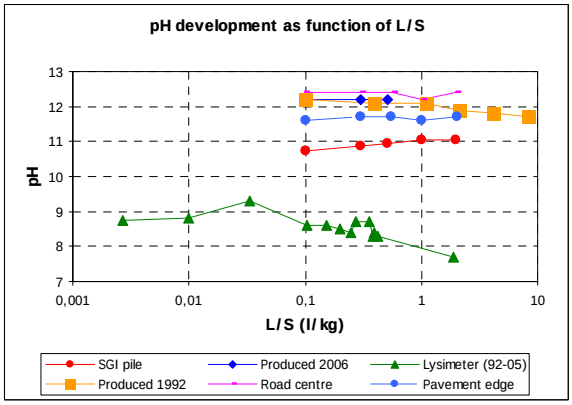


Arsenik

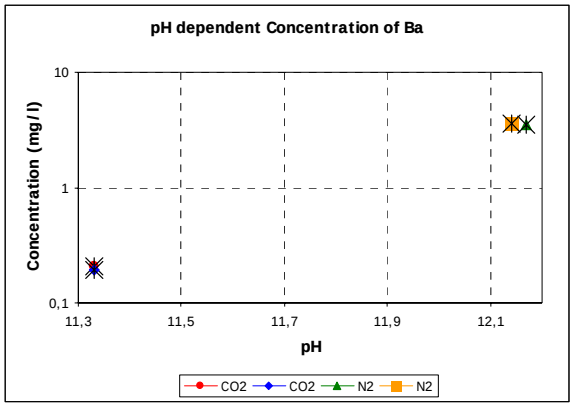


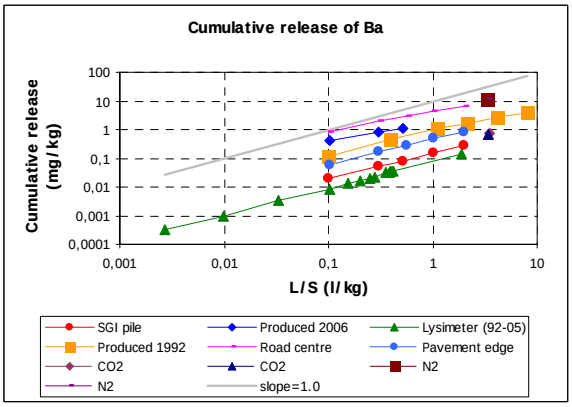


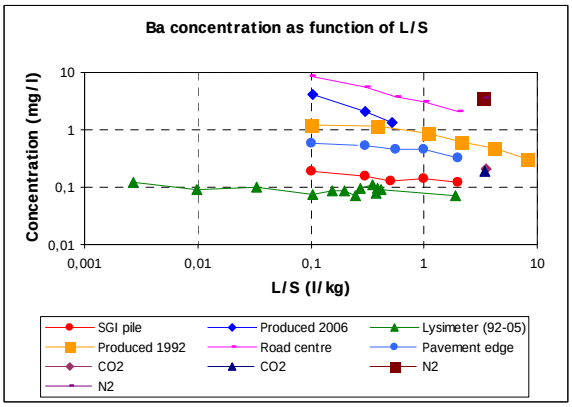


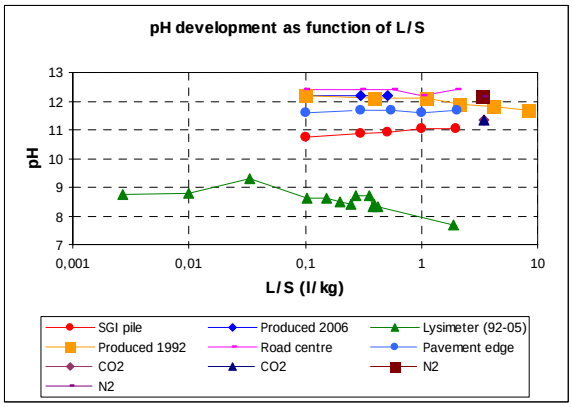


Barium

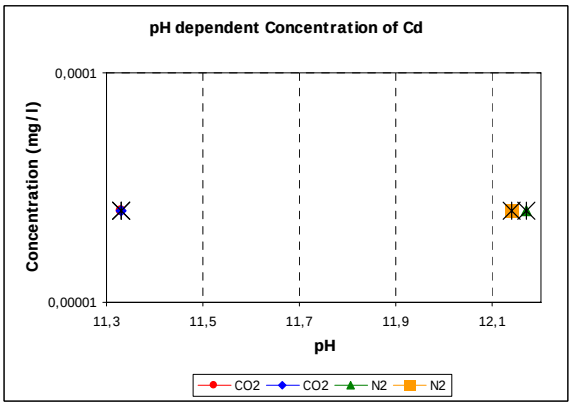


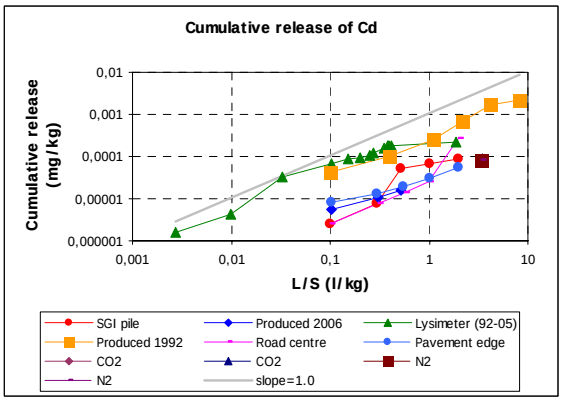


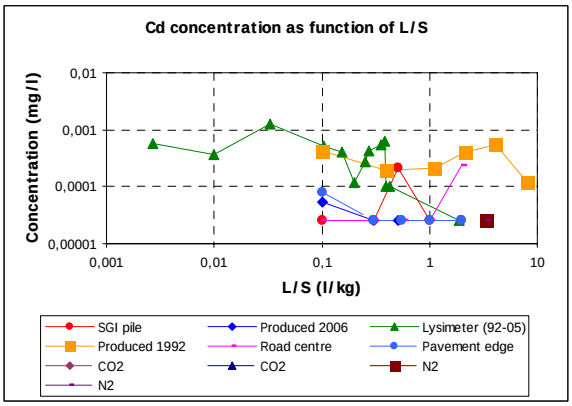


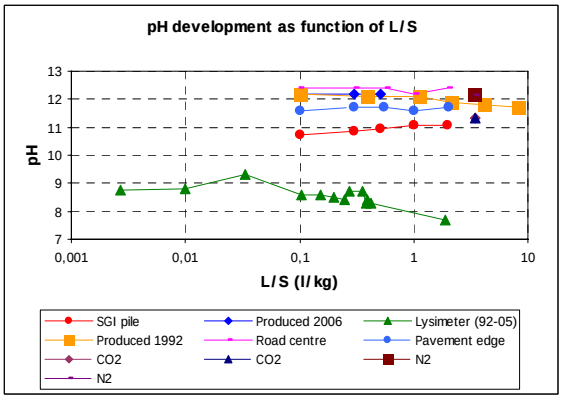


Kadmium

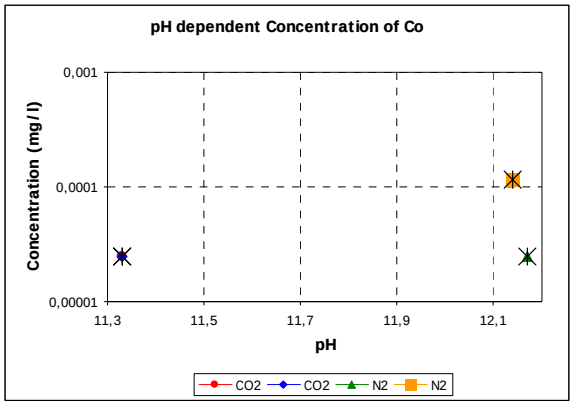


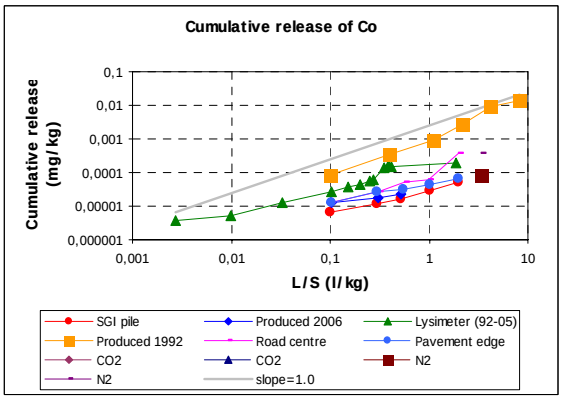


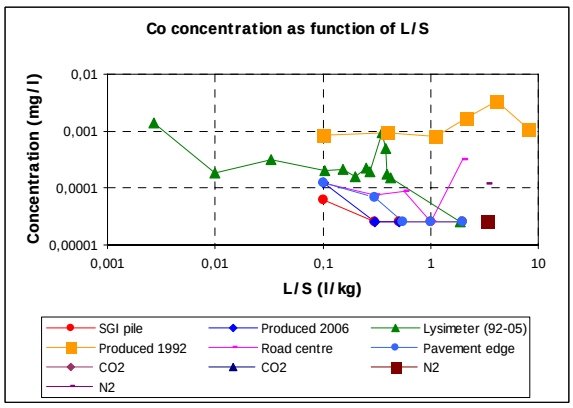


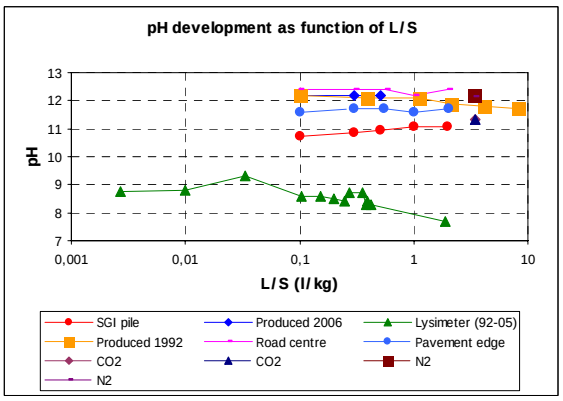


Kobolt

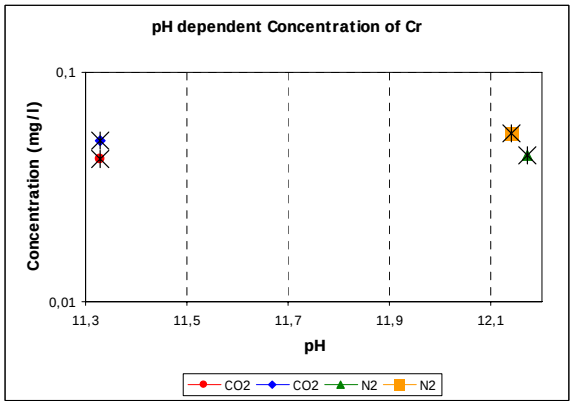

pH dependent Concentration of Co
Concentration (mg/l)
0,001
0,0001
0,00001
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

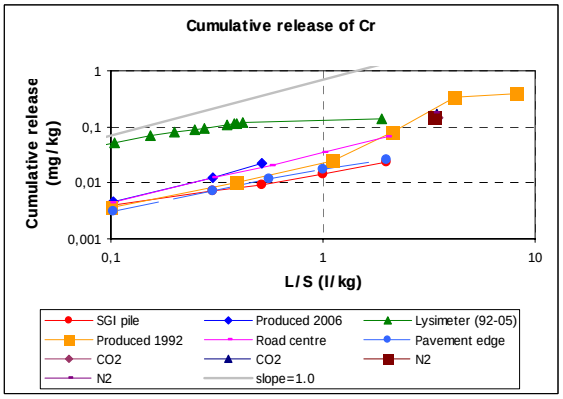

Cumulative release of Co
Cumulative release (mg/kg)
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,000001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

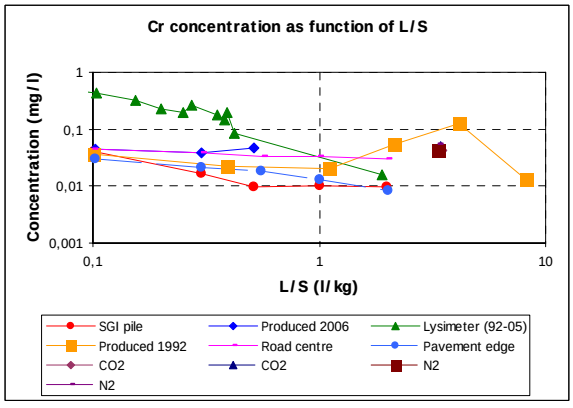

Co concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

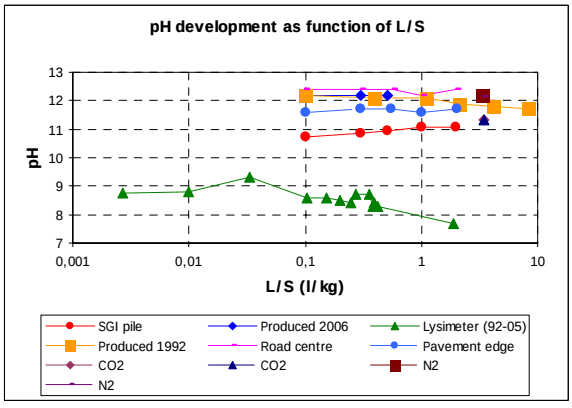

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Krom

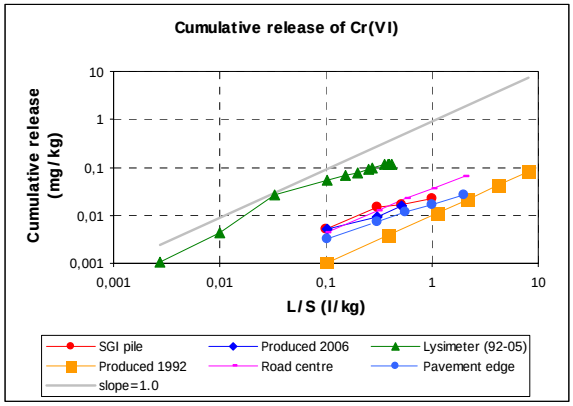

pH dependent Concentration of Cr
Concentration (mg/l)
0,1
0,01
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

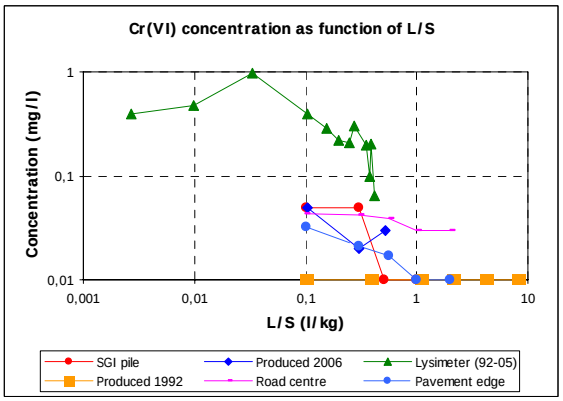

Cumulative release of Cr
Cumulative release (mg/kg)
1
0,1
0,01
0,001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

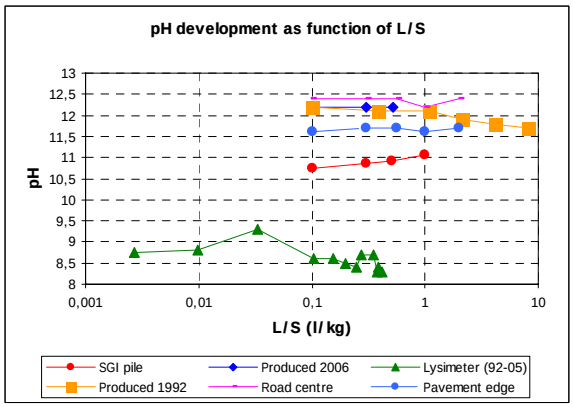

Cr concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
1
0,1
0,01
0,001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

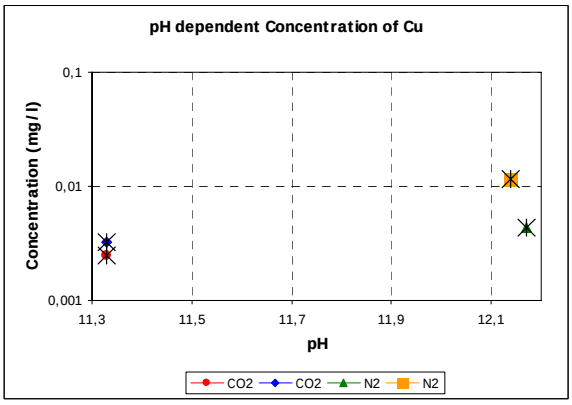
Krom^{6+}

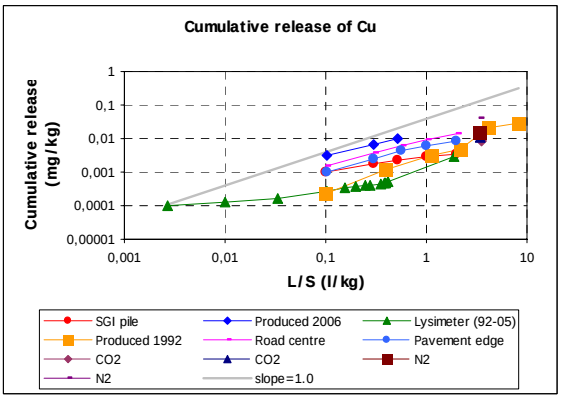


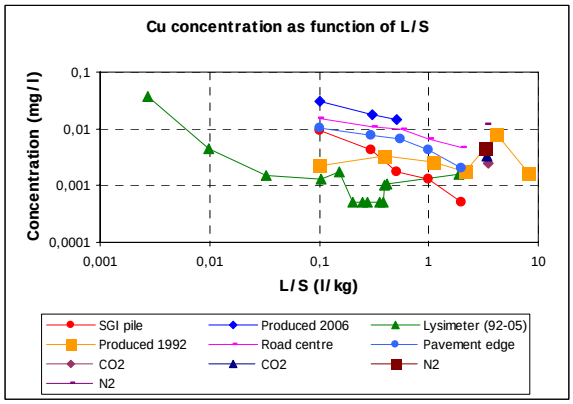


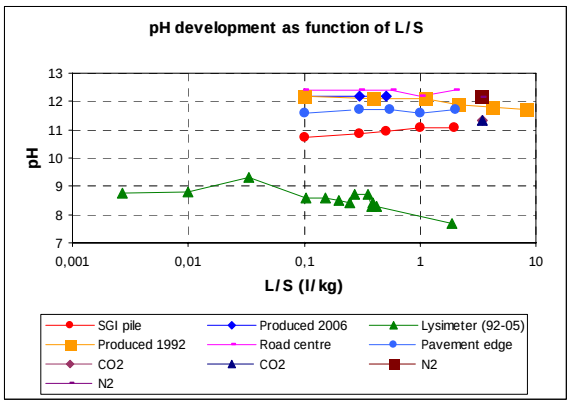


Koppar

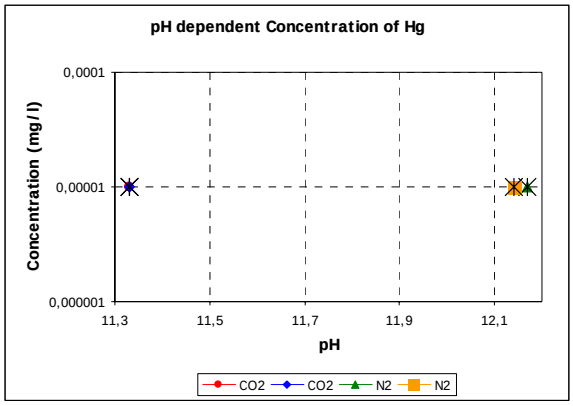


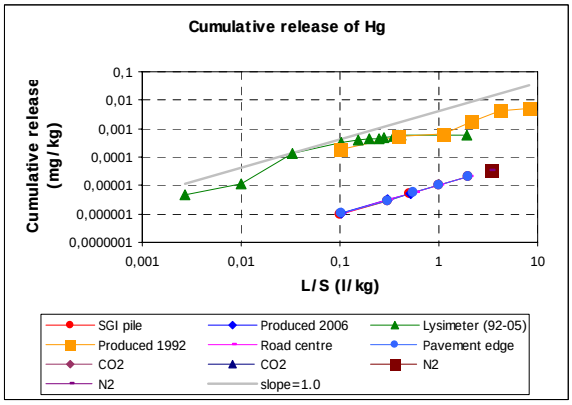


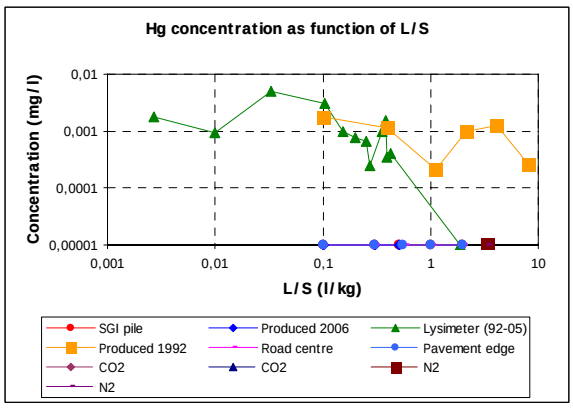


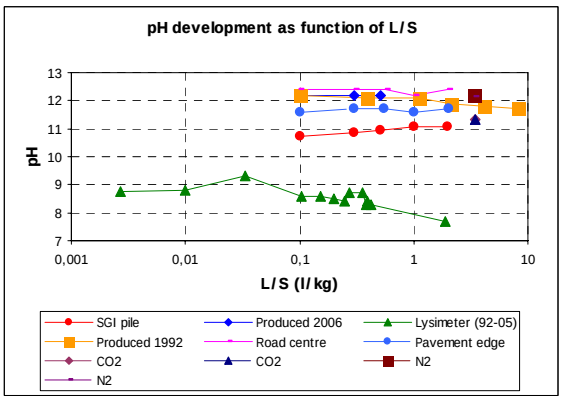


Kvicksilver

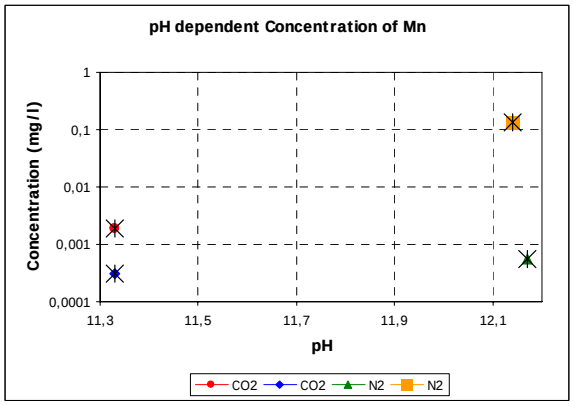


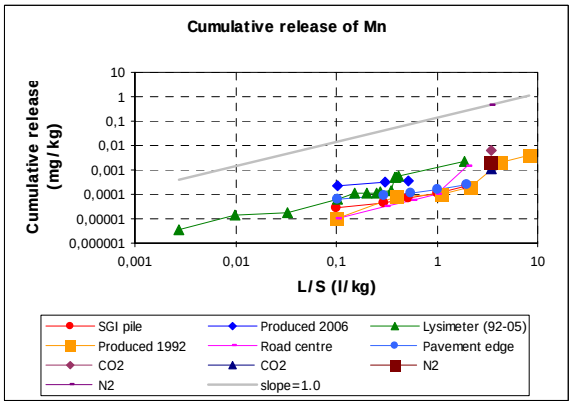


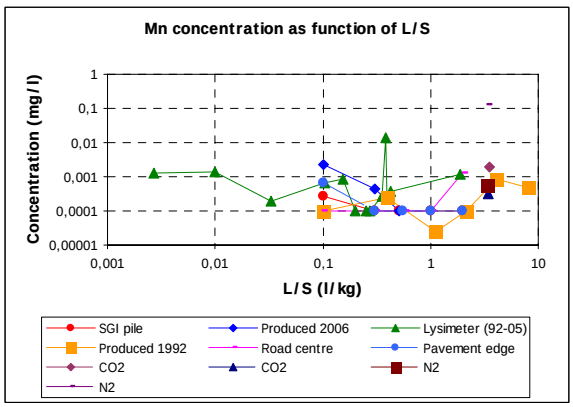


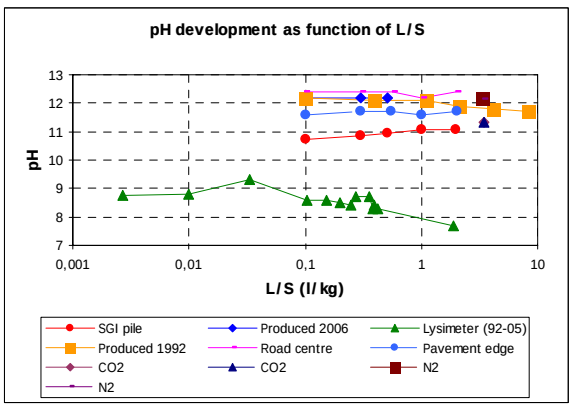


Mangan

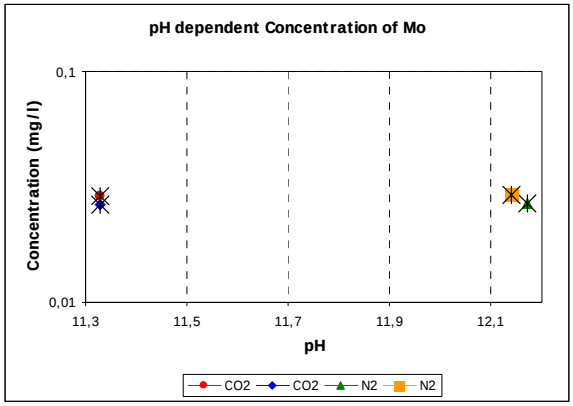


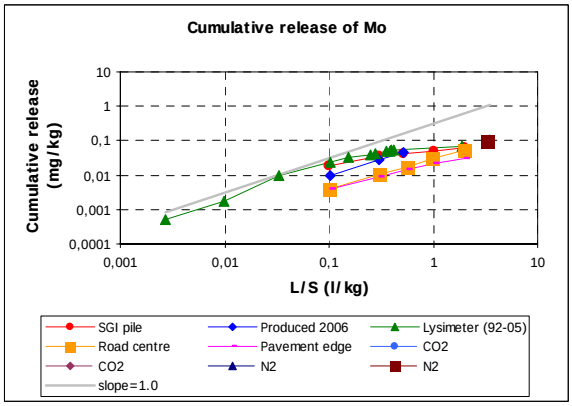


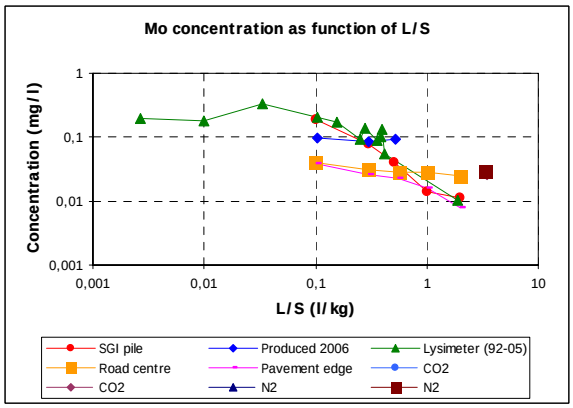


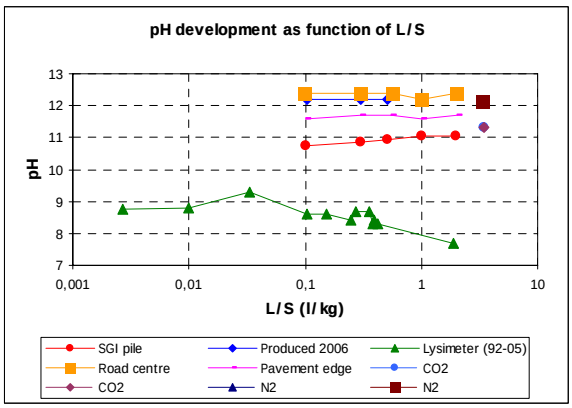


Molybden

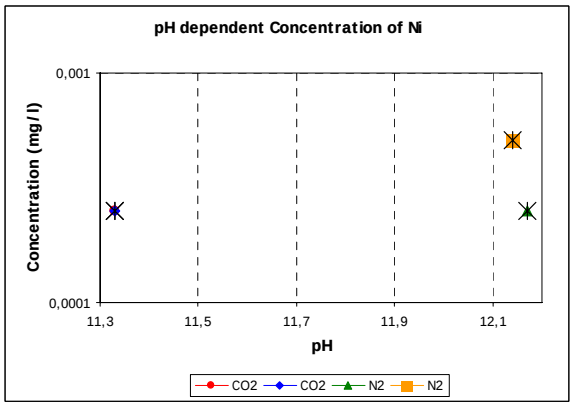


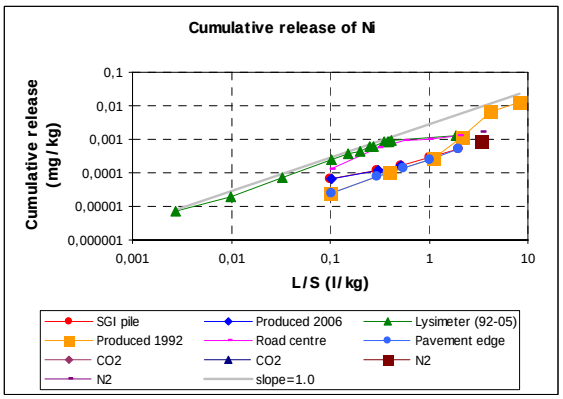


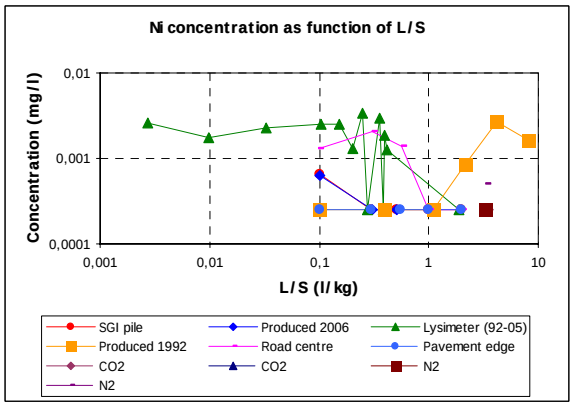


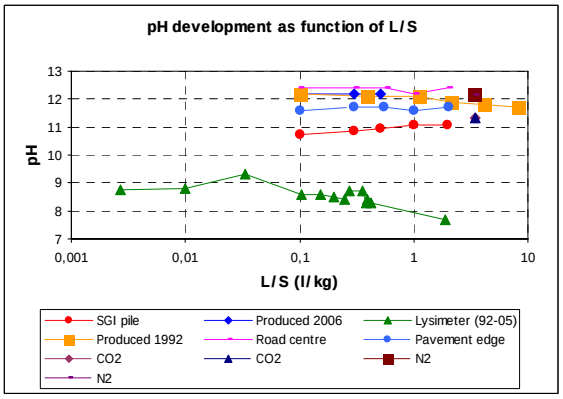


Nickel

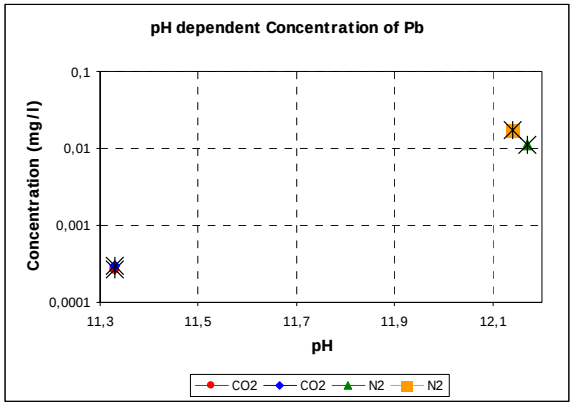


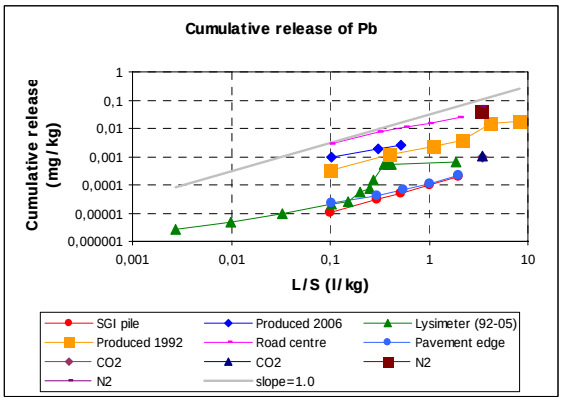


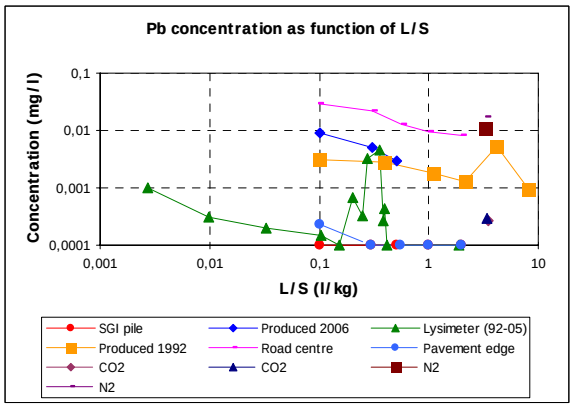


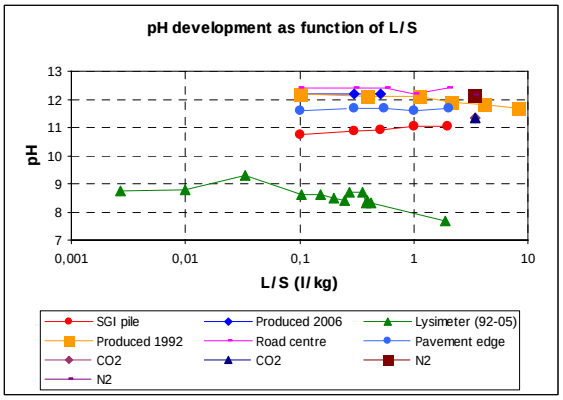


Bly

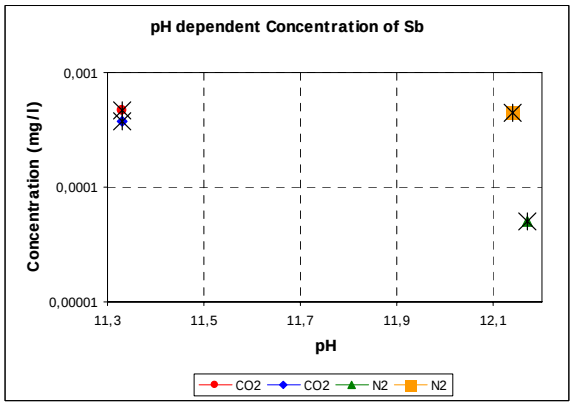

pH dependent Concentration of Pb
Concentration (mg/l)
0,1
0,01
0,001
0,0001
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

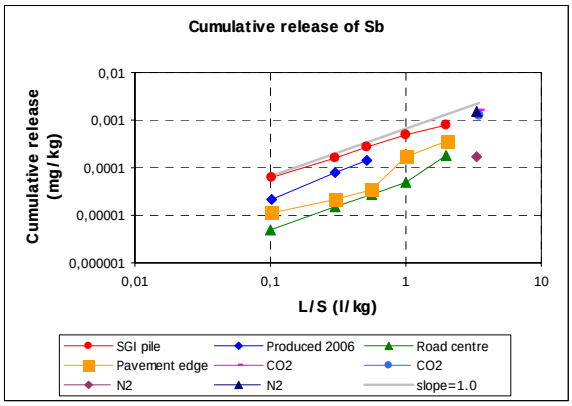

Cumulative release of Pb
Cumulative release (mg/kg)
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,000001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

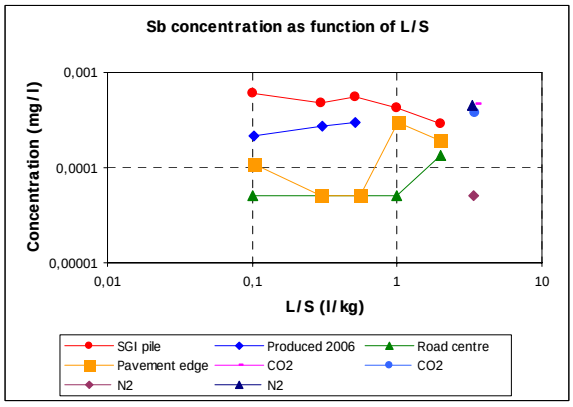

Pb concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

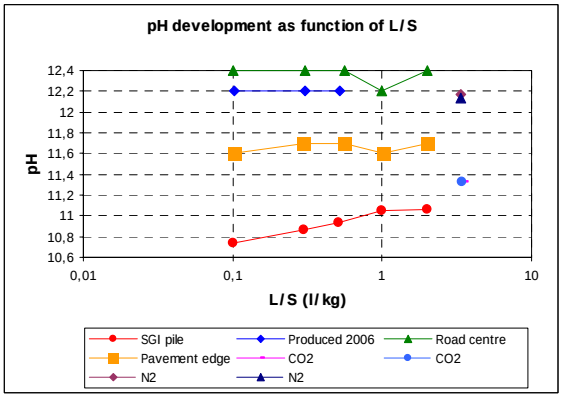

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Antimon

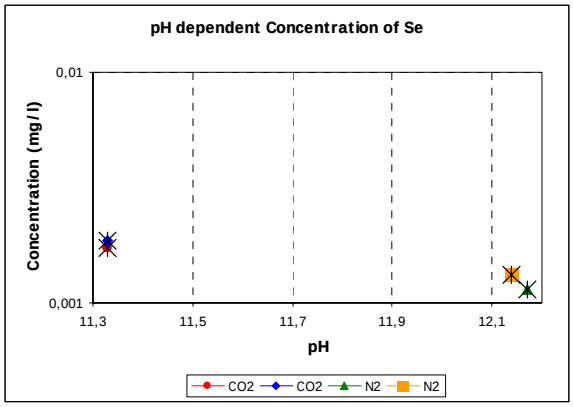

pH dependent Concentration of Sb
Concentration (mg/l)
0,001
0,0001
0,00001
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

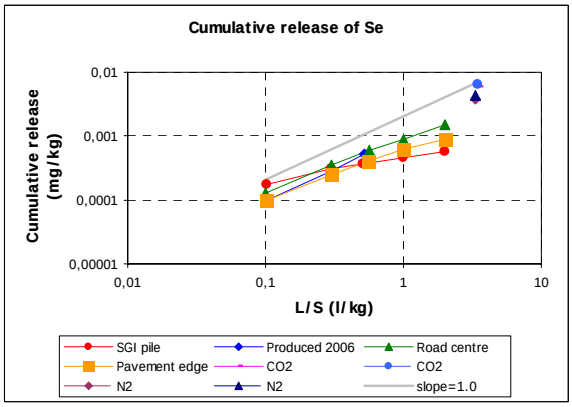

Cumulative release of Sb
Cumulative release (mg/kg)
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,000001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

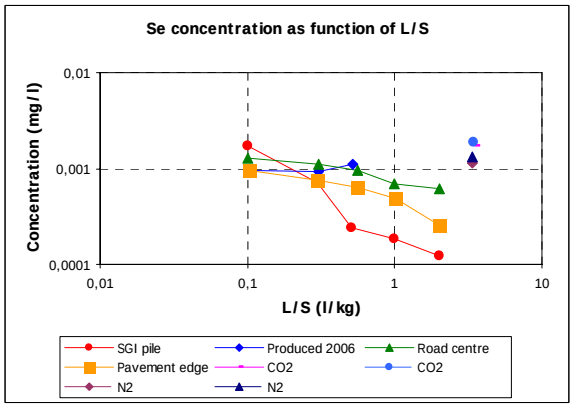

Sb concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
0,001
0,0001
0,00001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

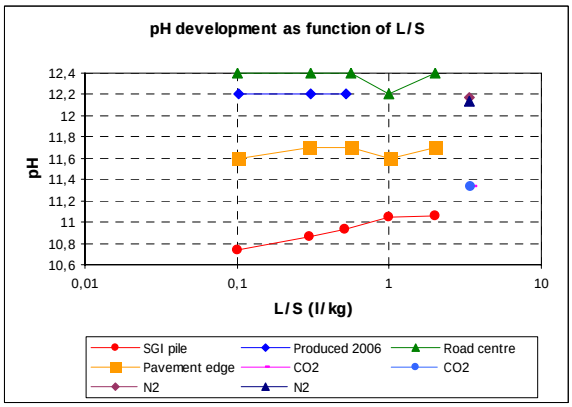

pH development as function of L/S
pH
12,4
12,2
12
11,8
11,6
11,4
11,2
11
10,8
10,6
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Selen

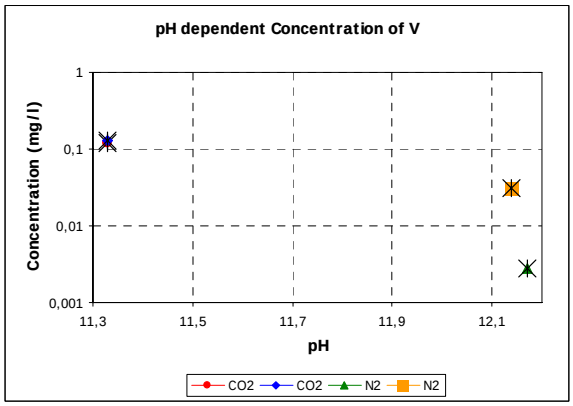


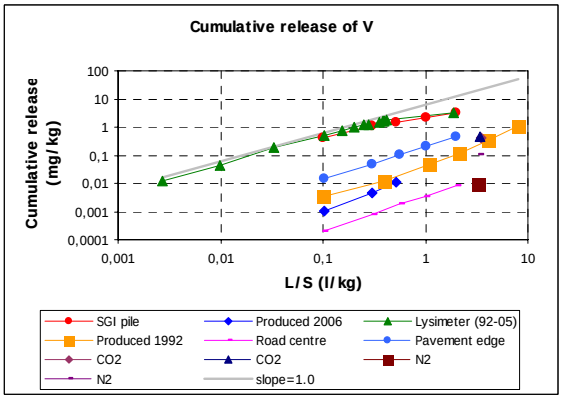


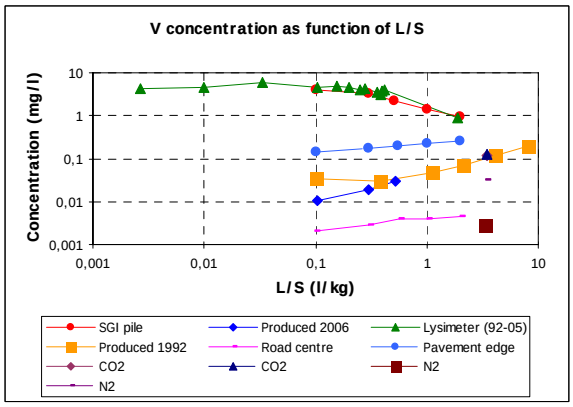


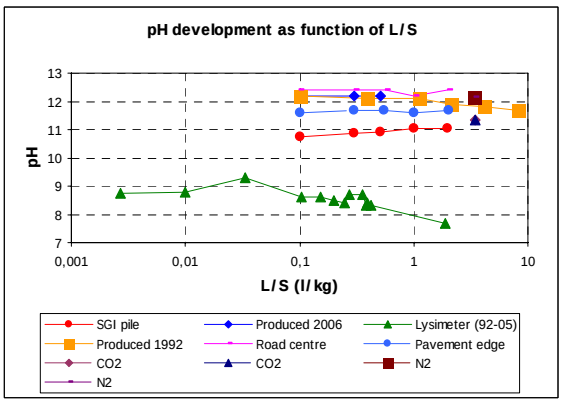


Vanadin

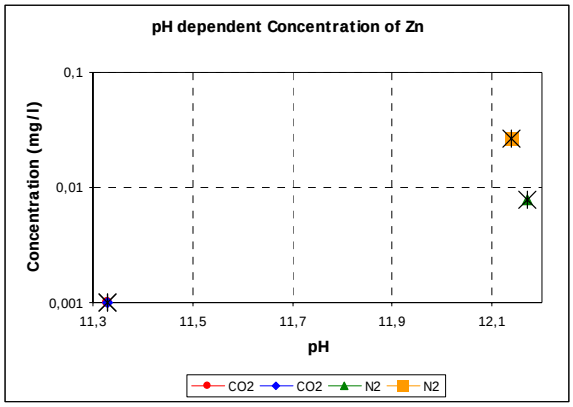


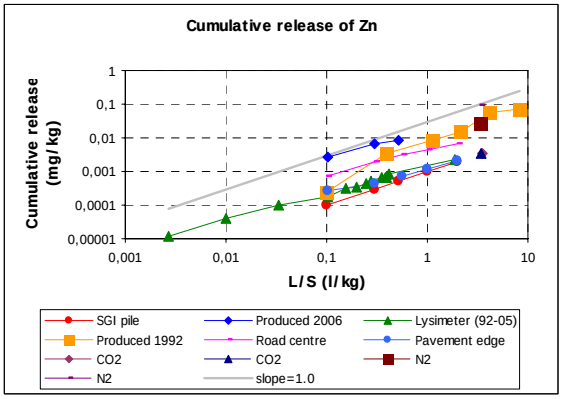


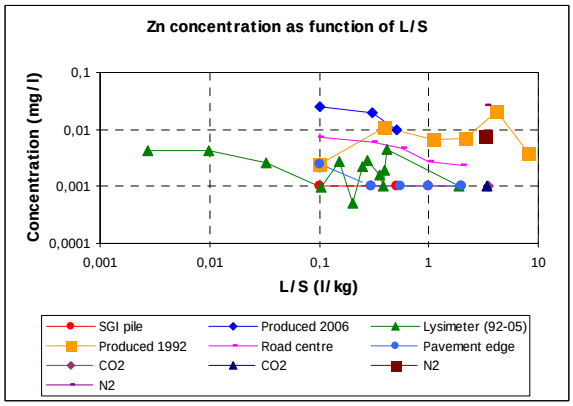


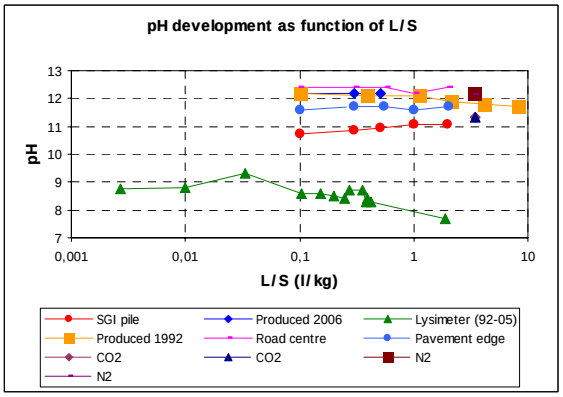


Zink

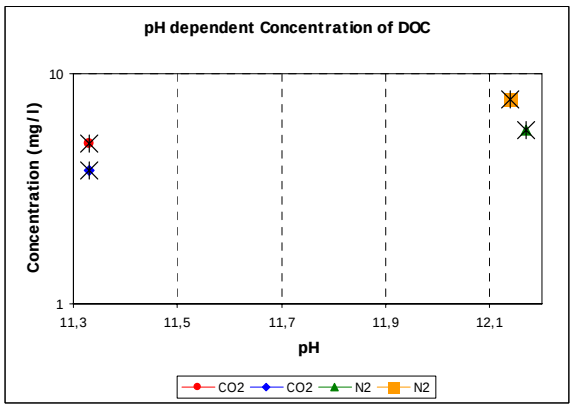

pH dependent Concentration of Zn
Concentration (mg/l)
0,1
0,01
0,001
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

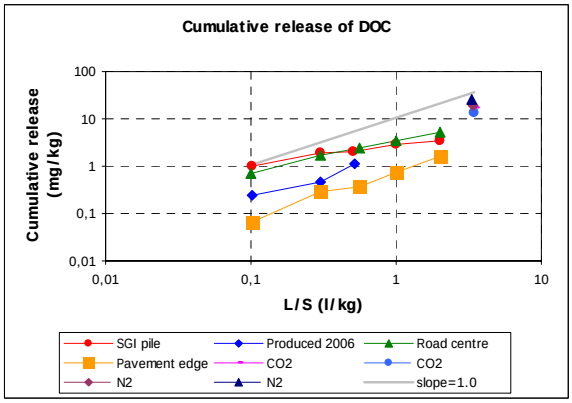

Cumulative release of Zn
Cumulative release (mg/kg)
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

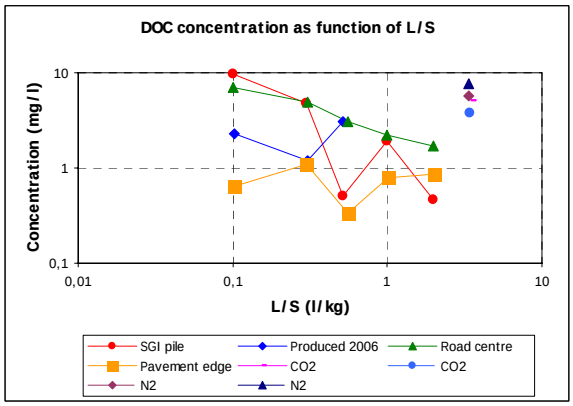

Zn concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

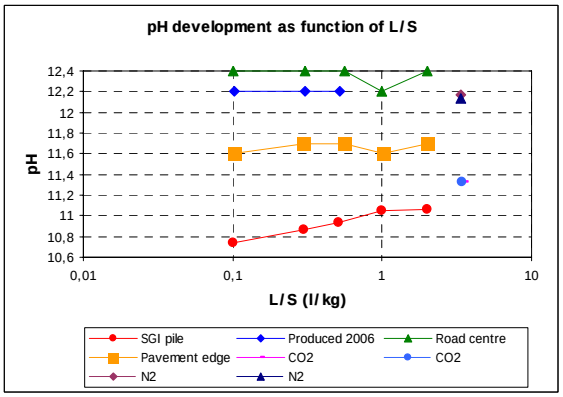

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

DOC

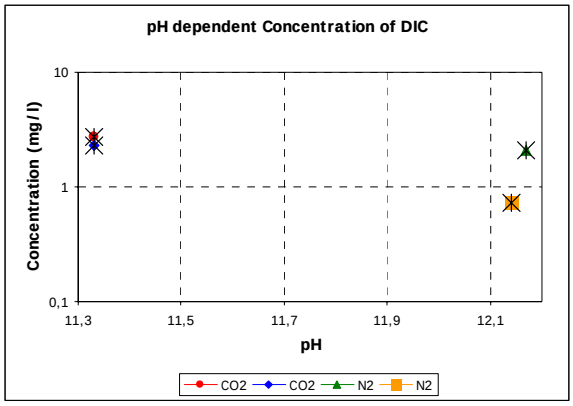

pH dependent Concentration of DOC
Concentration (mg/l)
10
1
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

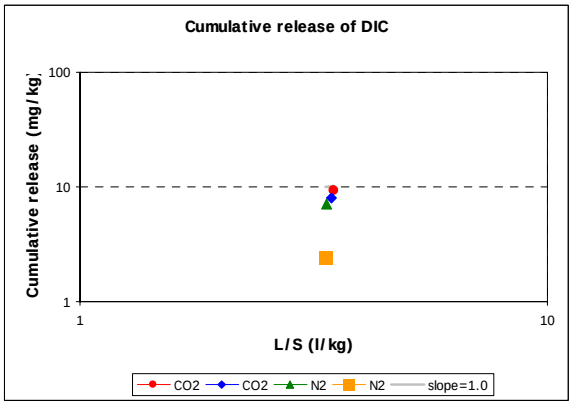

Cumulative release of DOC
Cumulative release (mg/kg)
100
10
1
0,1
0,01
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

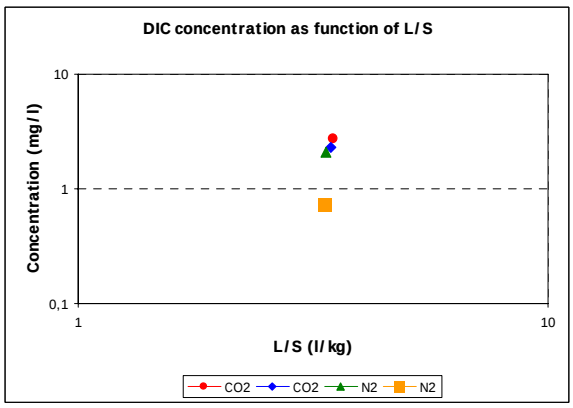

DOC concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
10
1
0,1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

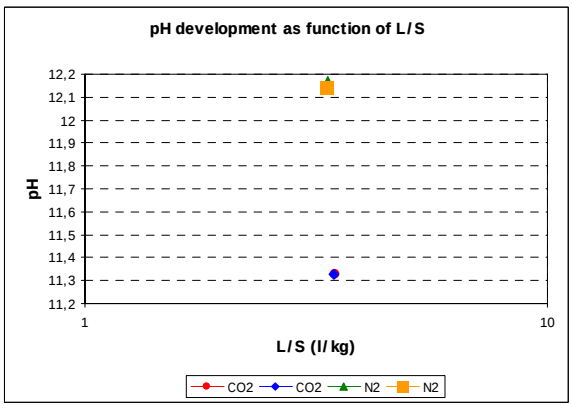

pH development as function of L/S
pH
12,4
12,2
12
11,8
11,6
11,4
11,2
11
10,8
10,6
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

DIC

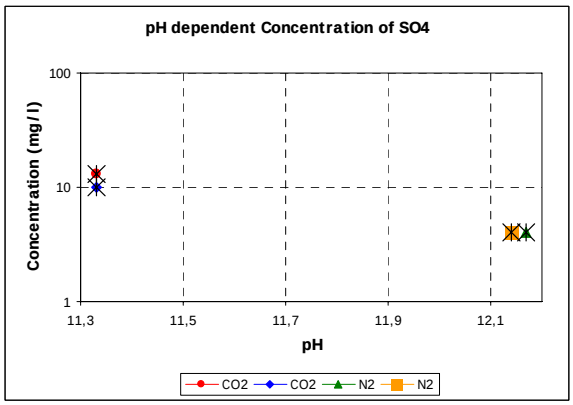

pH dependent Concentration of DIC
Concentration (mg/l)
10
1
0,1
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

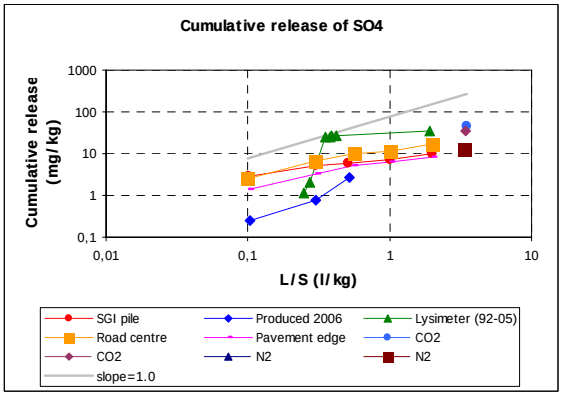

Cumulative release of DIC
Cumulative release (mg/kg)
100
10
1
1
10
L/S (l/kg)
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

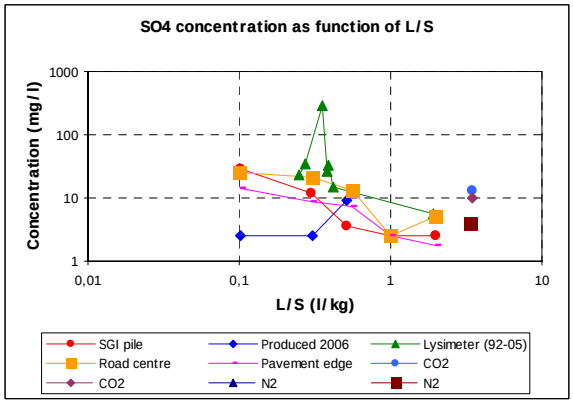

DIC concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
10
1
0,1
1
10
L/S (l/kg)
CO2
CO2
N2
N2

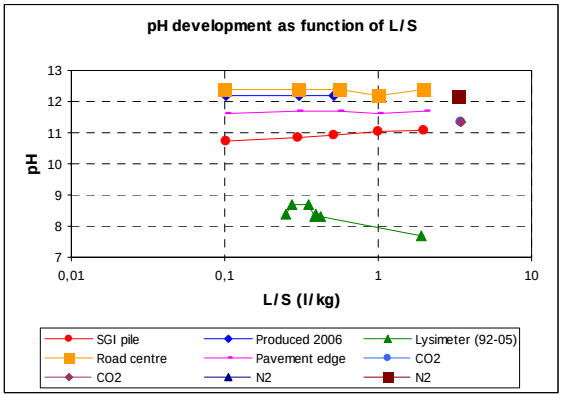

pH development as function of L/S
pH
12,2
12,1
12
11,9
11,8
11,7
11,6
11,5
11,4
11,3
11,2
1
10
L/S (l/kg)
CO2
CO2
N2
N2

Sulfat

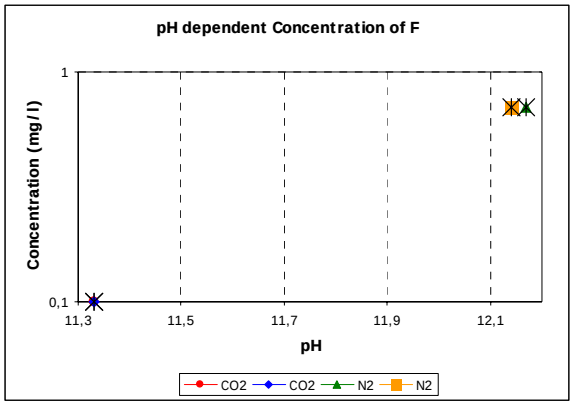

pH dependent Concentration of SO4
Concentration (mg/l)
100
10
1
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

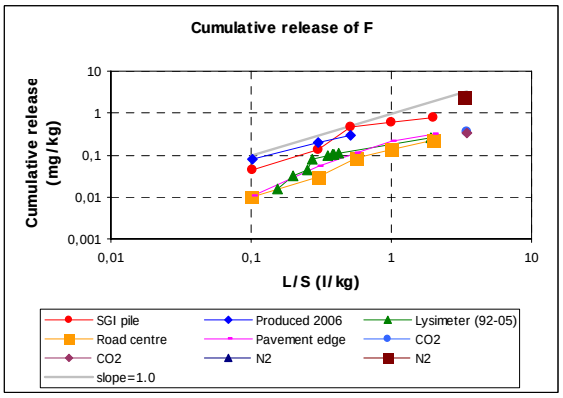

Cumulative release of SO4
Cumulative release (mg/kg)
1000
100
10
1
0,1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

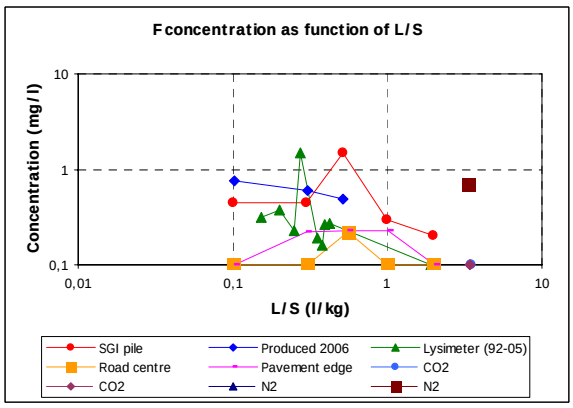

SO4 concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
1000
100
10
1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

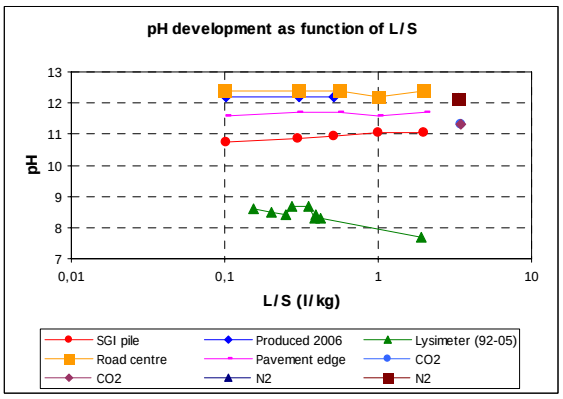

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Fluor

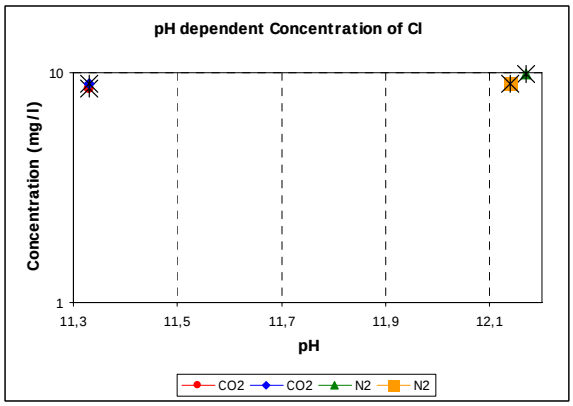

pH dependent Concentration of F
Concentration (mg/l)
1
0,1
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

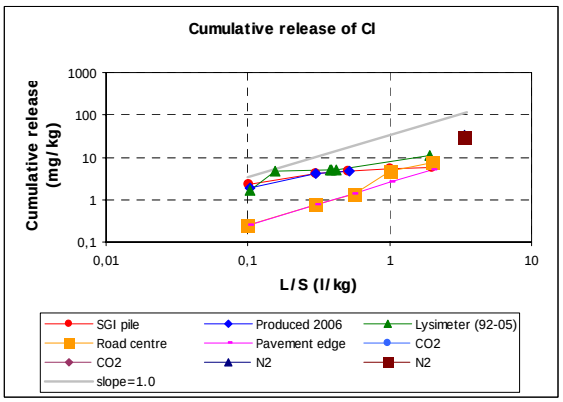

Cumulative release of F
Cumulative release (mg/kg)
10
1
0,1
0,01
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

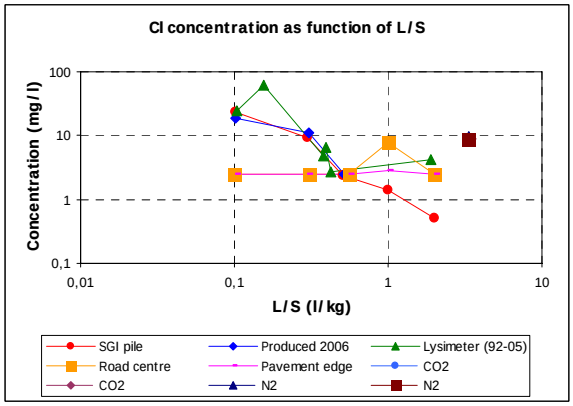

F concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
10
1
0,1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

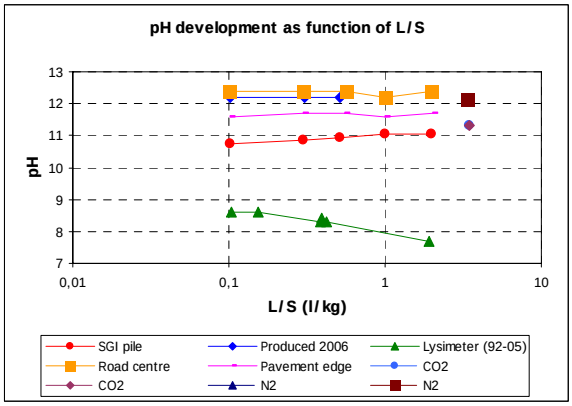

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Klor

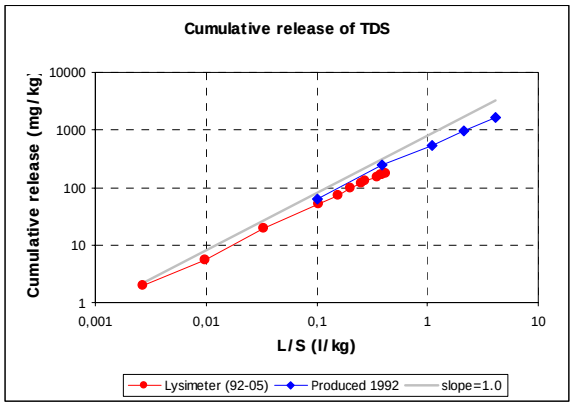

pH dependent Concentration of Cl
Concentration (mg/l)
10
1
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

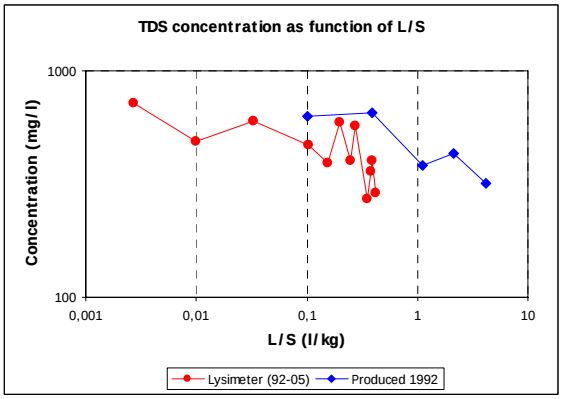

Cumulative release of Cl
Cumulative release (mg/kg)
1000
100
10
1
0,1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
slope=1.0

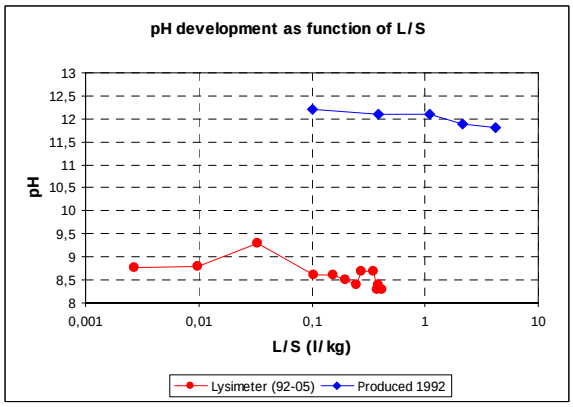

Cl concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
100
10
1
0,1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

TDS


Cumulative release of TDS
Cumulative release (mg/kg)
10000
1000
100
10
1
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
slope=1.0


TDS concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
1000
100
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
Lysimeter (92-05)
Produced 1992


pH development as function of L/S
pH
13
12,5
12
11,5
11
10,5
10
9,5
9
8,5
8
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
Lysimeter (92-05)
Produced 1992

E Resultat från kemisk analys av bottenaska

Här redovisas data från totalhaltsanalyser, pH- och konduktivitetsbestämningar samt perkolationstester på bottenaska. Det är bottenaska från Törringevägen och från SYSAV:s upplag som har analyserats.

E.1 Totalhalter av oorganiska ämnen i bottenaskan

Enhet mg/kg, om inget annat anges.

	Törringevägens vägkant *nr: 060243*	**Törringevägens vägmitt** *nr: 060242*	**SYSAV:s upplag** *nr: 060241*
Al	56 600	56 600	64 600
Ca	86 500	77 200	86 000
Fe	70 600	82 500	85 300
K	11 700	12 200	10 000
Mg	11 200	11 800	13 400
Mn	790	821	1 210
Na	25 700	25 400	32 800
P	3 670	3 350	3 290
Si	220 000	218 000	222 000
Ti	5 330	6 600	6 770
As	20,8	20,2	18,2
Ba	1 560	1 400	1 680
Be	1,14	1,17	0,9
Cd	3,45	3,81	1,94
Co	18,7	17	19,2
Cr	541	453	493
Cu	7 230	2 340	5 070
Hg	0,14	0,13	0,036
La	17,2	15,7	12,8
Mo	25,8	13	15,1
Nb	6,94	11,7	8,82
Ni	482	163	144
Pb	1 100	1 220	826
S	5 510	4 860	3 350
Sb	61	51,9	68,5
Sc	2,11	2,77	1,63
Se	0,67	0,75	0,52
Sn	69	63,3	135
Sr	271	244	293
V	36,6	45	56,8
W	< 60	< 60	< 60
Y	14,5	18,6	13,9
Zn	2 940	1970	2 490
Zr	143	178	176
TS (%)	76,9	76,2	94,6
LOI (%)	8,6	7,3	3,2

E.2 pH-profil för Törringevägen

Avst fr vägmitt:	0,3	0,7		1,1		1,5 m	
Nivå (m)	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**
-0,16	9,8	-0,2	9,9	-0,2	9,7	-0,2	9,5
-0,25	9,1	-0,2	7,9	-0,3	7,9	-0,2	7,8
-0,47	7,8	-0,5	7,7	-0,5	7,8	-0,5	7,7
-0,69	7,7	-0,7	7,8	-0,7	7,9	-0,7	7,8
-0,86		-0,9	8,4	-0,9	8,6	-0,9	8,9

Avst fr vägmitt:	2	2,4		2,8		3,3 m	
Nivå (m)	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**	**Nivå**	**pH**
-0,2	9,5	-0,2	8,7	-0,2	7,9	-0,2	8,3
-0,3	7,9	-0,4	7,8	-0,4	7,8	-0,3	7,7
-0,5	7,7	-0,6	7,6	-0,5	7,9	-0,5	7,6
-0,7	8,0	-0,7	7,8	-0,7	7,9	-0,6	7,9
-0,9	8,9	-0,9	9,0	-0,9	9,2	-0,8	8,9

E.3 Elektrisk konduktivitet i Törringevägen

Avst fr vägmitt:	0,3	0,7		1,1		1,5 m	
Nivå (m)	**kond**	**Nivå**	**kond**	**Nivå**	**kond**	**Nivå**	**kond**
-0,16	27	-0,2	33	-0,2	48	-0,2	56
-0,25	41	-0,2	191	-0,3	249	-0,2	284
-0,47	254	-0,5	259	-0,5	223	-0,5	287
-0,69	255	-0,7	257	-0,7	238	-0,7	292
-0,86		-0,9	25	-0,9	27	-0,9	30

Avst fr vägmitt:	2,0	2,4		2,8		3,3 m	
Nivå (m)	**kond**	**Nivå**	**kond**	**Nivå**	**kond**	**Nivå**	**kond**
-0,2	47	-0,2	80	-0,2	246	-0,2	156
-0,3	130	-0,4	260	-0,4	262	-0,3	282
-0,5	275	-0,6	263	-0,5	287	-0,5	300
-0,7	225	-0,7	259	-0,7	250	-0,6	254
-0,9	31	-0,9	35	-0,9	29	-0,8	40

E.4 Resultat från perkolationstest på bottenaska från SYSAV

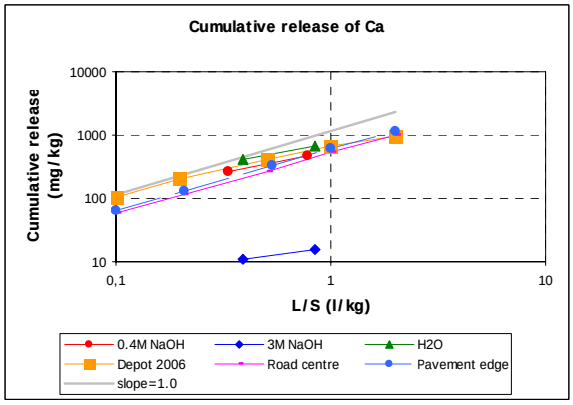
Halt i µg/l

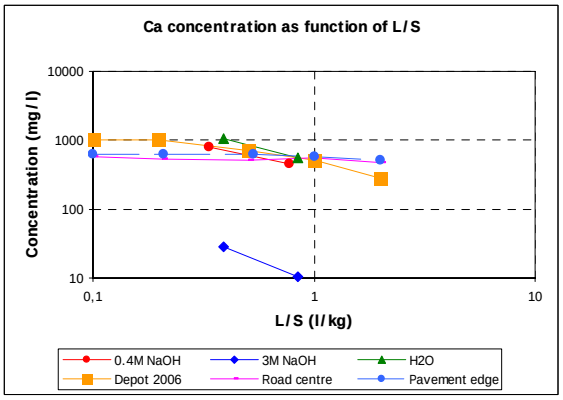
	vägkant					vägmitt					SYSAV:s upplag				
L/S:	0,1	0,2	0,5	1	2	0,1	0,2	0,5	1	2	0,1	0,2	0,5	1	2
	nr: 06232	*06233*	*06234*	*06235*	*06236*	*06227*	*06228*	*06229*	*06230*	*06231*	*06222*	*06223*	*06224*	*06225*	*06226*
Ca	631 000	626 000	618 000	581 000	522 000	589 000	543 000	516 000	560 000	468 000	1 030 000	1 030 000	702 000	503 000	278 000
Fe	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	294	250	33	23,1	14,3
K	99 200	98 100	89 400	74 200	45 100	197 000	165 000	129 000	80 600	53 400	462 000	470 000	316 000	154 000	63 700
Mg	35 000	33 700	29 700	25 500	13 700	167 000	142 000	108 000	62 200	38 100	76 900	77 800	48 900	26 500	12 300
Na	597 000	593 000	516 000	384 000	167 000	1 990 000	1 640 000	1 190 000	601 000	357 000	3 730 000	3 780 000	2 220 000	976 000	349 000
S	733 000	719 000	740 000	727 000	522 000	1 290 000	1 220 000	1 040 000	868 000	690 000	1 220 000	1 230 000	996 000	701 000	400 000
Si	5 410	5 720	5 740	5 360	5 530	5 510	5 490	5 520	5 350	5 070	3 930	4 070	2 940	2 400	1 850
Al	34,1	34,8	33,4	33,1	38,4	47,1	37	33,7	31,5	31,5	134	138	122	227	179
As	2,96	<3	<3	<1	<1	<2	<2	<3	<2	<1	28,1	27	15,1	7,62	3,44
Ba	21,1	21,2	21	18,6	19,6	18,3	15,2	13	15	16	70,9	72	46,9	39,1	33,9
Cd	0,949	0,821	0,907	0,774	0,265	1,2	1,07	0,916	0,751	0,199	0,511	0,536	0,499	0,316	<0,05
Co	2,48	2,34	2,2	1,75	1,46	0,474	0,497	0,475	0,4	0,294	1,87	1,81	0,948	0,623	0,472
Cr	3,39	2,22	1,97	2,23	0,568	3,28	1,8	1,04	<0,5	1,08	3,68	3,33	1,4	0,712	<0,5
Cr^{6+}	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Cu	75,9	74,5	80,7	72	55,7	99,3	103	99,3	70,8	53,2	1640	1750	1170	576	174
Hg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,247	0,271	0,0633	0,0314	0,0216
Mn	6,63	2,75	1,47	0,533	2,32	2,95	2,62	3,51	4,68	3,42	977	1030	722	442	125
Mo	86,3	86,9	80,4	82,8	53	140	126	99,1	68,4	49,4	339	350	302	214	129
Ni	46,5	46,9	47	42,4	37,7	41,5	45,3	41,1	39,8	29,5	28,3	31	22,1	17,8	14,3
Pb	2,81	2,6	2,44	2,08	0,939	4,23	3,63	2,62	1,77	0,431	7,81	6,86	3,27	1,76	0,383
Sb	37,3	39,7	39,4	37,3	31,2	51,4	51,1	43,7	34,9	28,9	69,8	68,6	63,4	52,7	43,5
Se	0,756	0,674	0,547	0,413	0,234	2,38	1,98	1,21	0,542	0,321	10,8	11,9	7,42	3,5	1,32
V	1,08	1,12	1,28	1,25	1,03	1,27	1,44	1,19	1,14	0,971	2,02	1,91	1,51	1,25	0,624
Zn	260	226	313	278	419	251	240	289	265	177	91,4	89,7	43,6	33,8	27,5
DOC	4 500	4 500	4 400	3 200	6 900	7 400	5 900	8 400	10 000	4 900	140 000	150 000	45 000	29 000	21 000
klorid	540 000	530 000	360 000	130 000	25 000	1 600 000	1 300 000	700 000	240 000	83 000	5 600 000	5 800 000	3 000 000	990 000	250 000
fluorid	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
sulfat	1 900 000	1 900 000	2 000 000	2 000 000	1 500 000	3 700 000	3 500 000	3 000 000	2 300 000	1 800 000	3 400 000	3 300 000	2 600 000	1 800 000	1 000 000

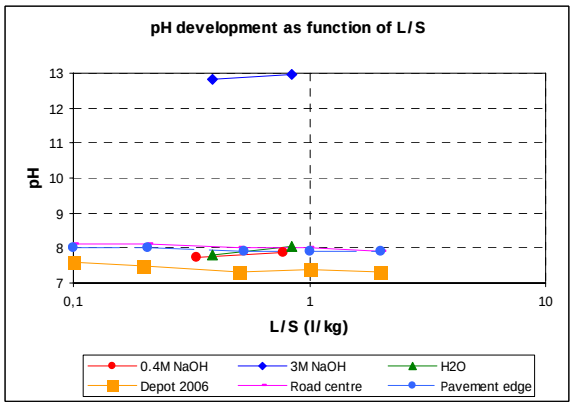
Lakdata från tabellen på föregående sida har sammanställts i 87 stycken grafer. Graferna innehåller uppgifter för bottenaska från vägmitt och vägkant i Törringevägen och från SYSAV:s upplag.

Graferna är grupperade ämnesvis med samma ordningsföljd som i tabellen på föregående sida.
Observera att prover under detektionsgräns visas som ½ gånger detektionsgräns.

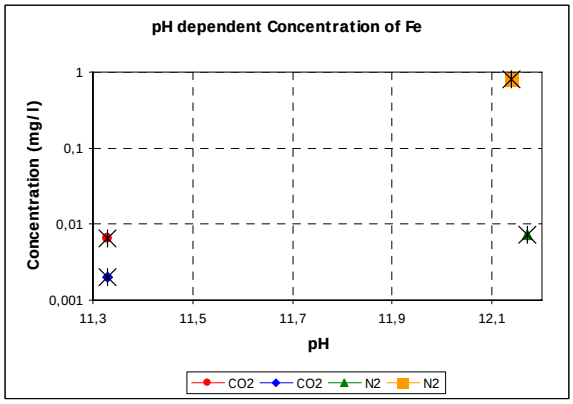
Kalcium

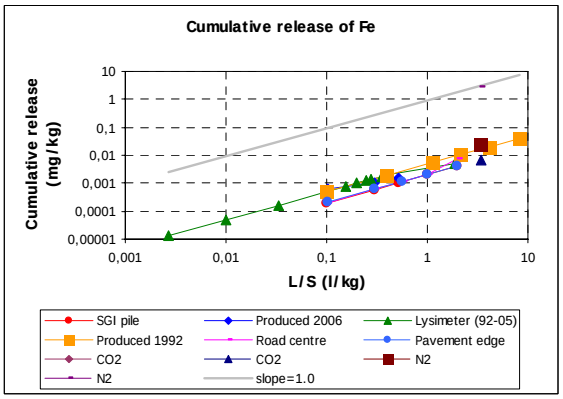


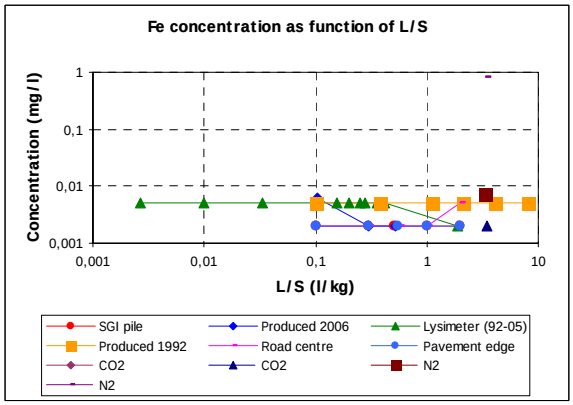


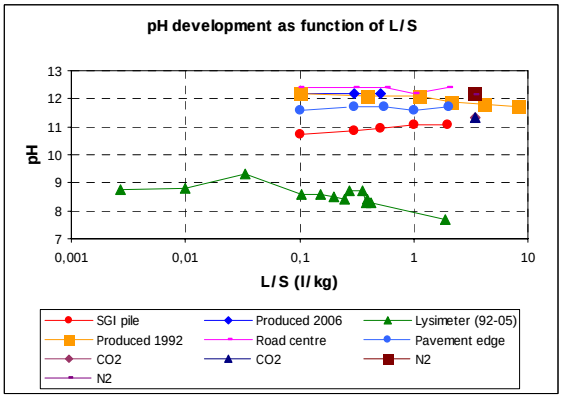


Järn

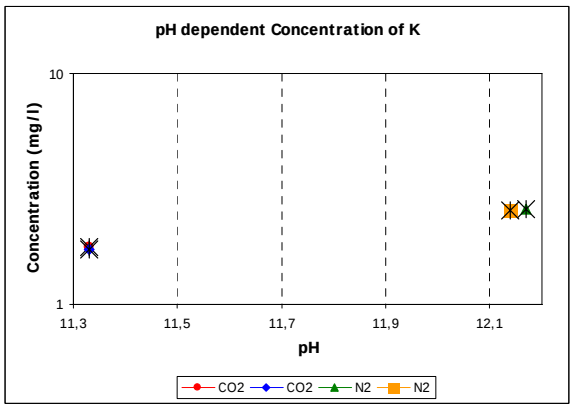

pH dependent Concentration of Fe
Concentration (mg/l)
1
0,1
0,01
0,001
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

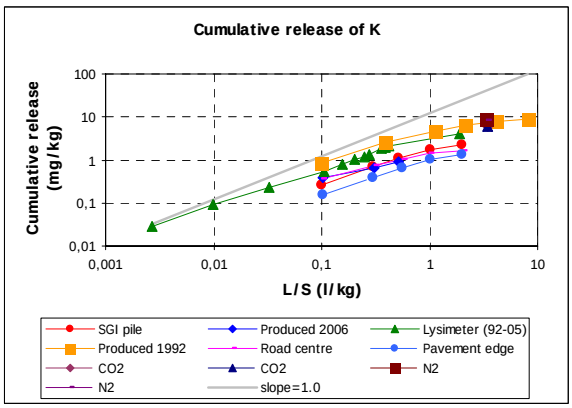

Cumulative release of Fe
Cumulative release (mg/kg)
10
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
N2
slope=1.0

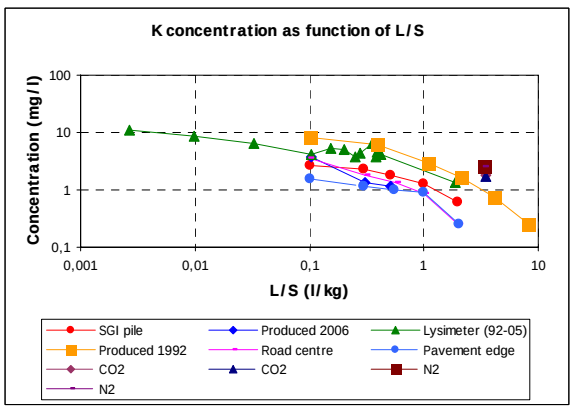

Fe concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
1
0,1
0,01
0,001
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

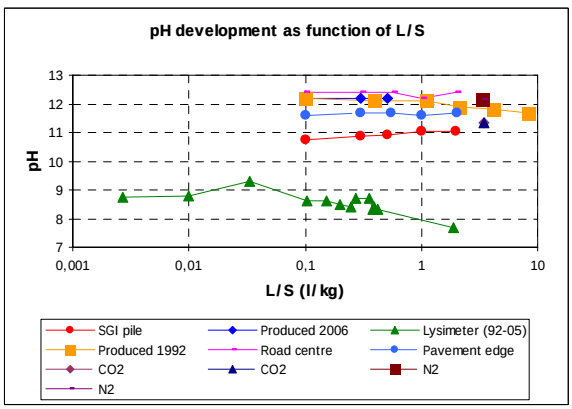

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Kalium

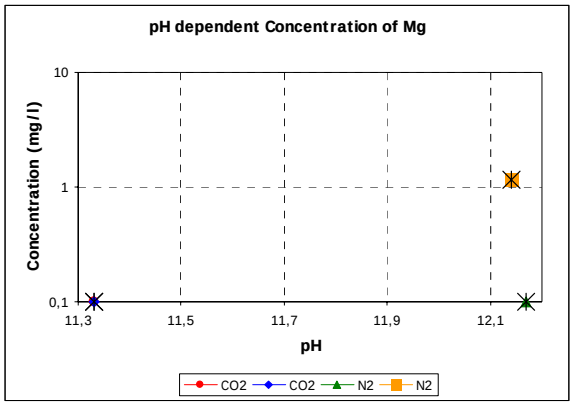

pH dependent Concentration of K
Concentration (mg/l)
10
1
11,3
11,5
11,7
11,9
12,1
pH
CO2
CO2
N2
N2

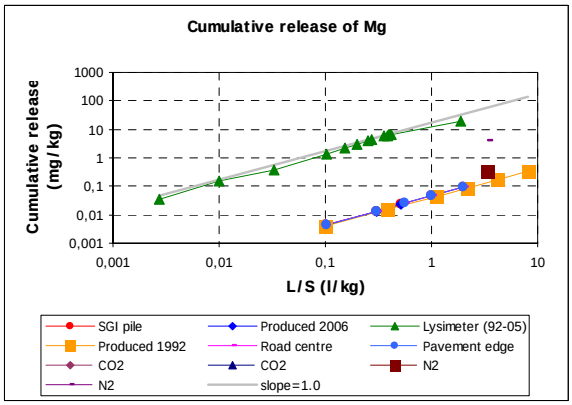

Cumulative release of K
Cumulative release (mg/kg)
100
10
1
0,1
0,01
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2
N2
slope=1.0

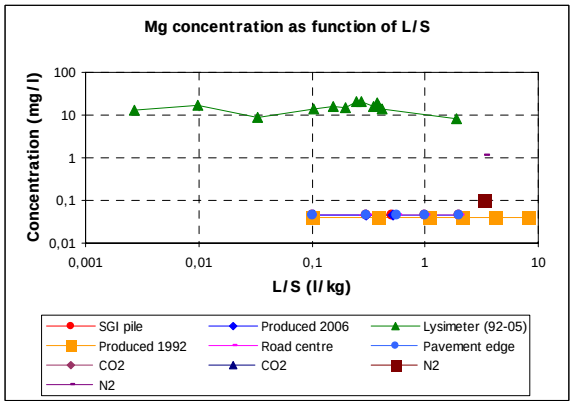

K concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
100
10
1
0,1
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

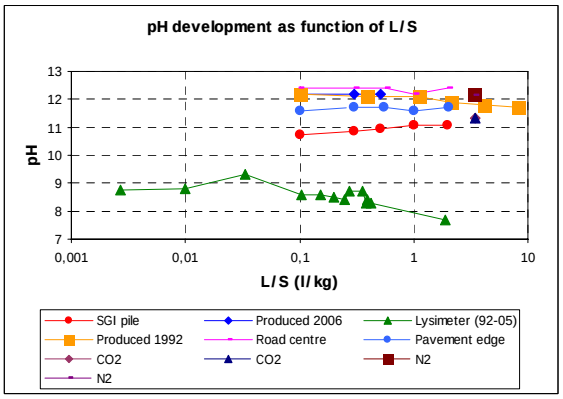

pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,001
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
SGI pile
Produced 2006
Lysimeter (92-05)
Produced 1992
Road centre
Pavement edge
CO2
CO2
N2
N2

Magnesium

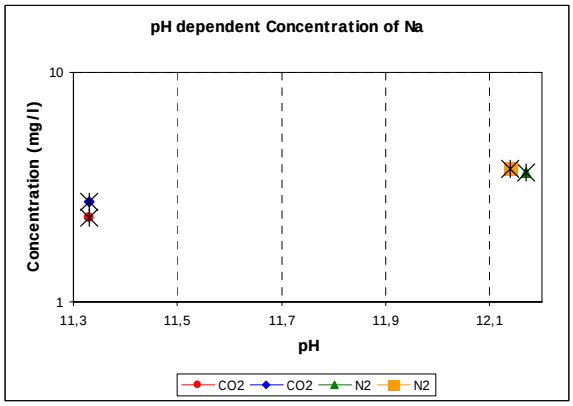


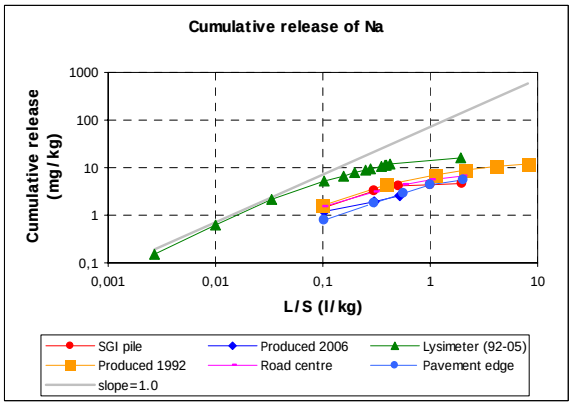


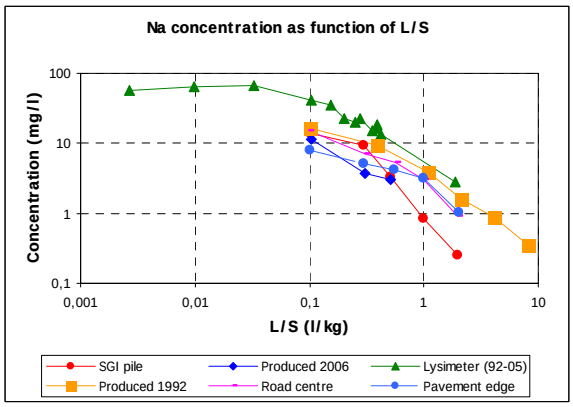


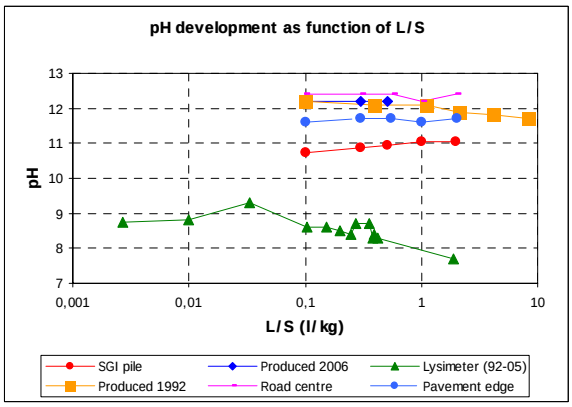


Natrium

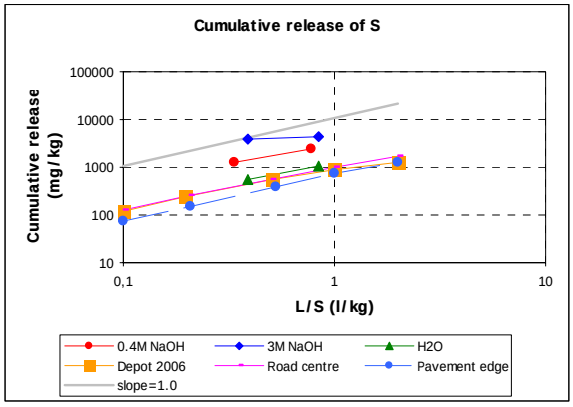


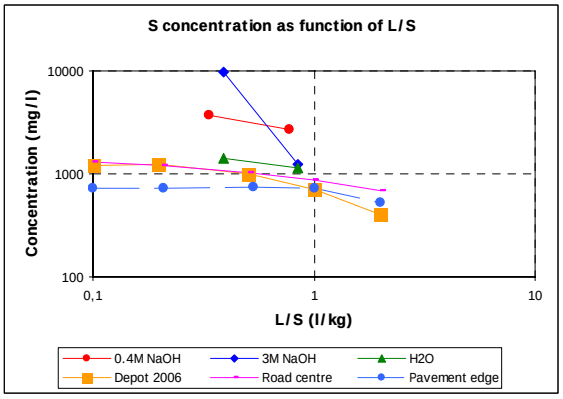


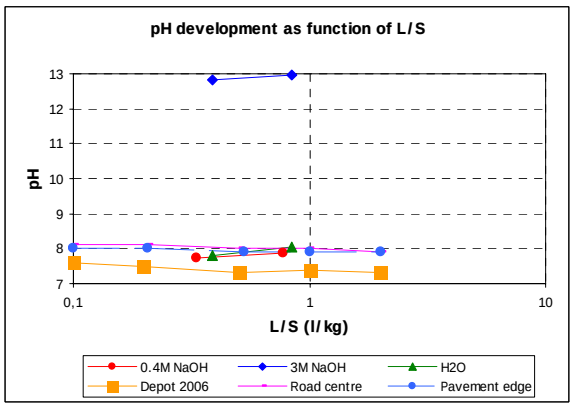




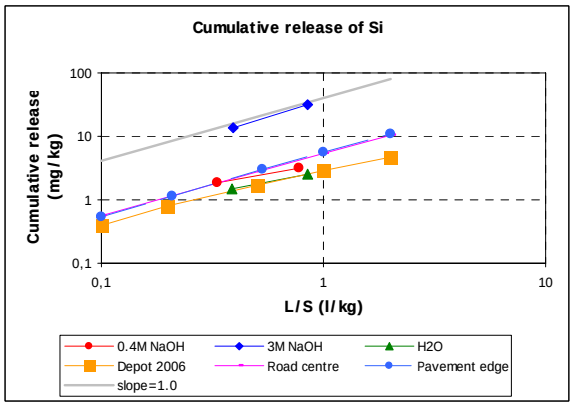
Svavel

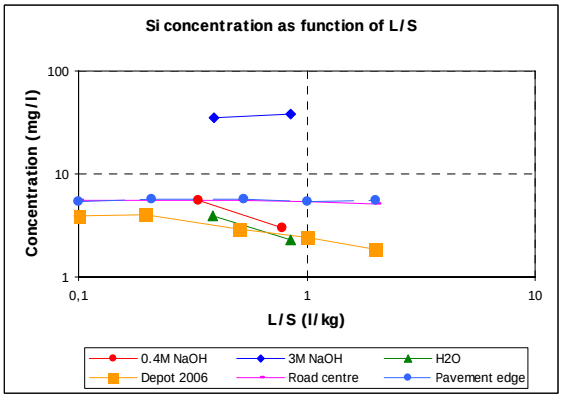


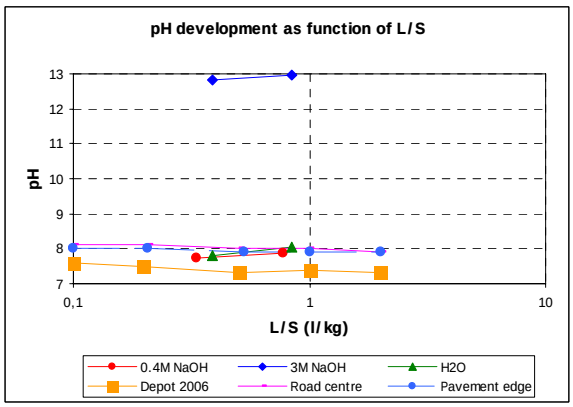




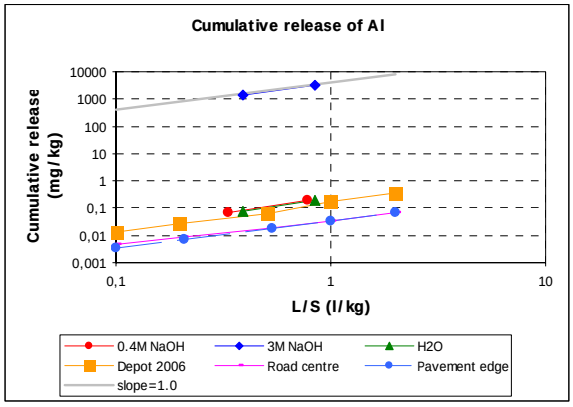
Kisel

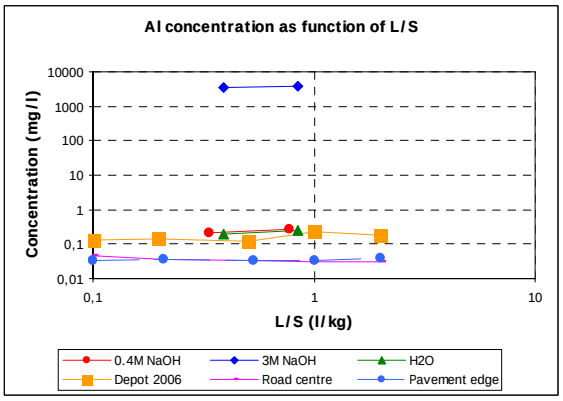


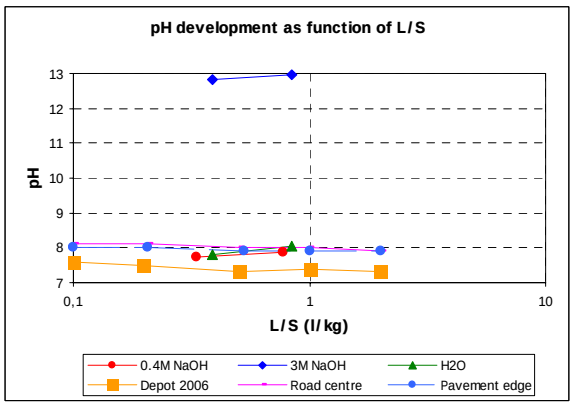




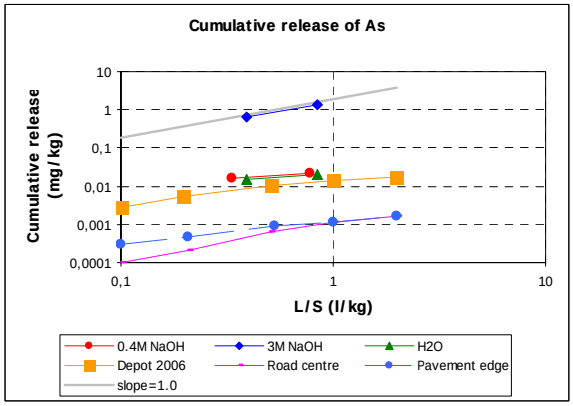
Aluminium

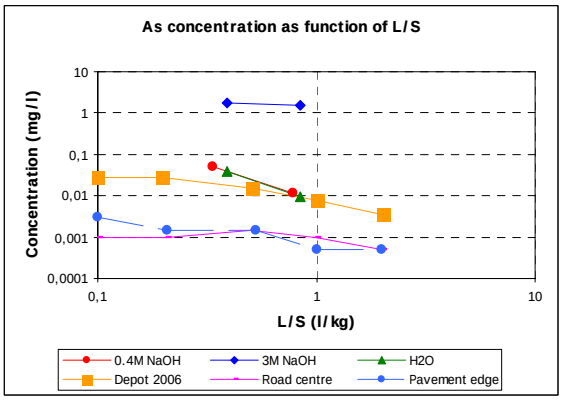


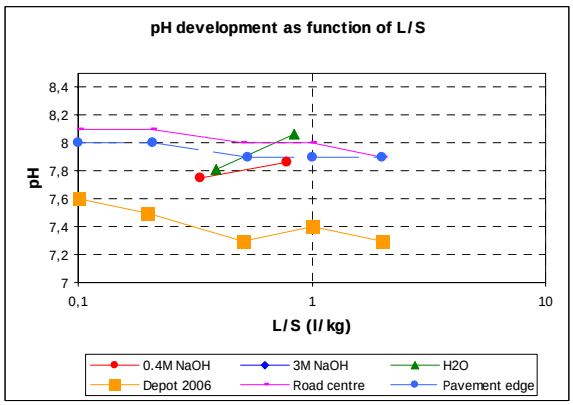




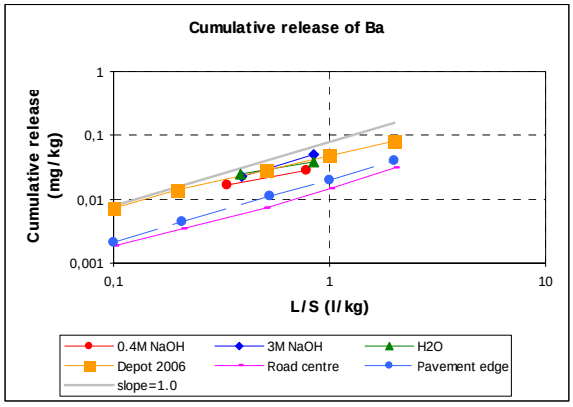
Arsenik

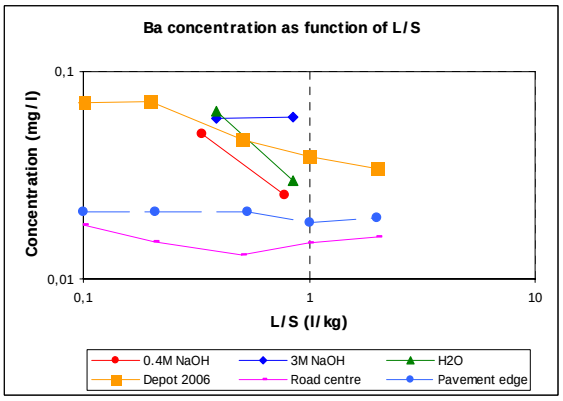


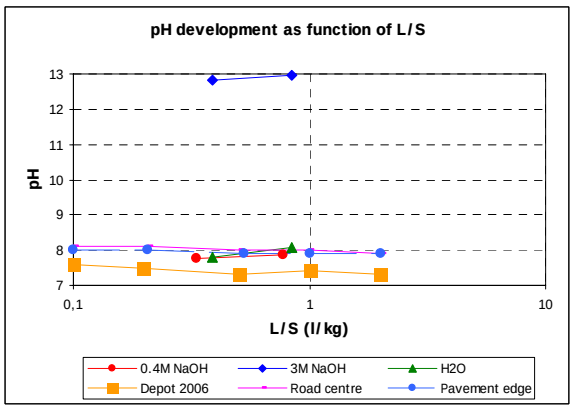




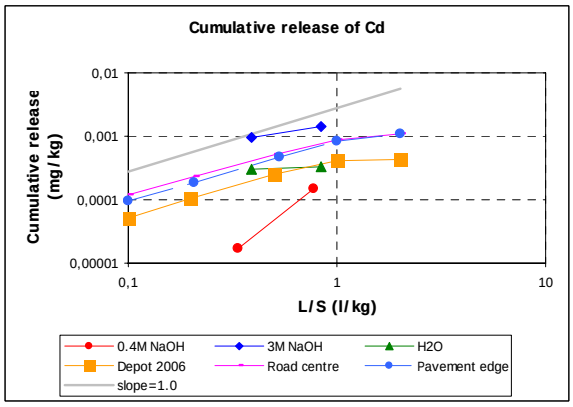
Barium

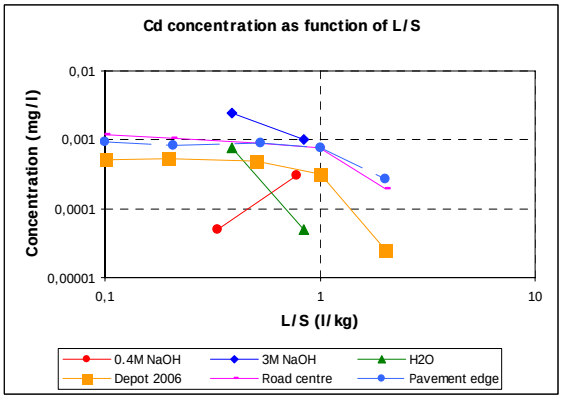


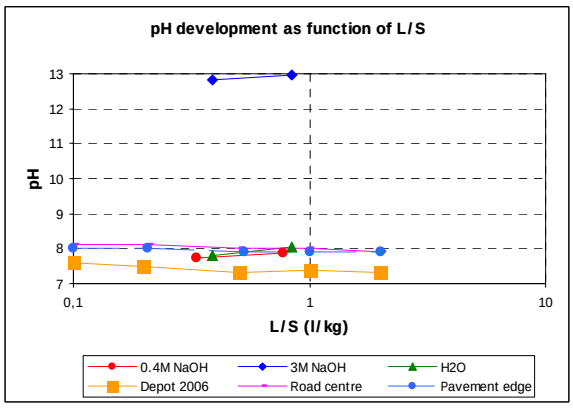




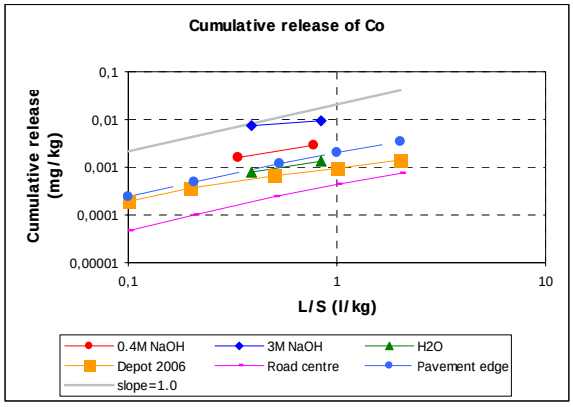
Kadmium

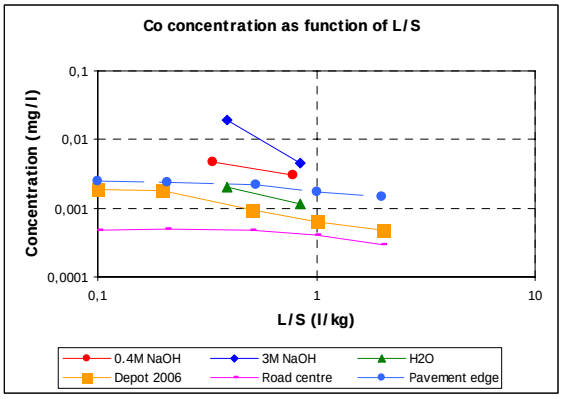


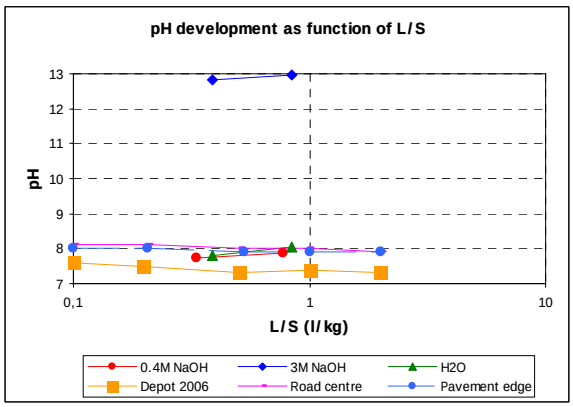




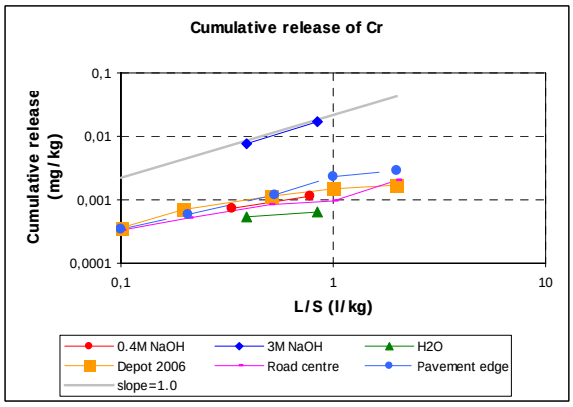
Kobolt

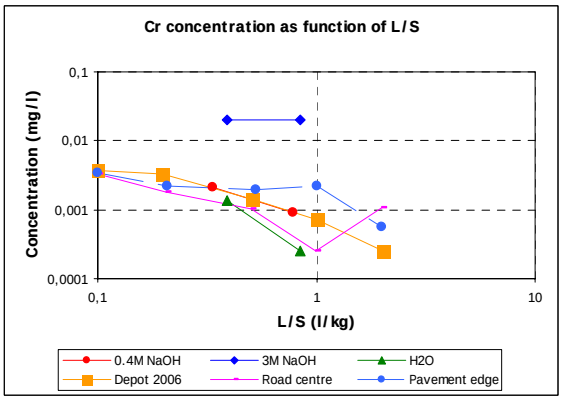

Cumulative release of Co
Cumulative release (mg/kg)
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,00001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge
slope=1.0

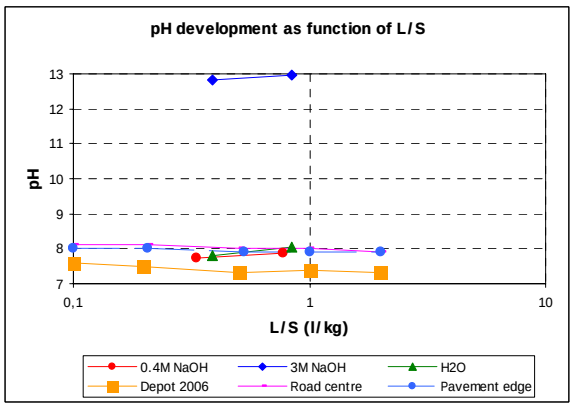

Co concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge

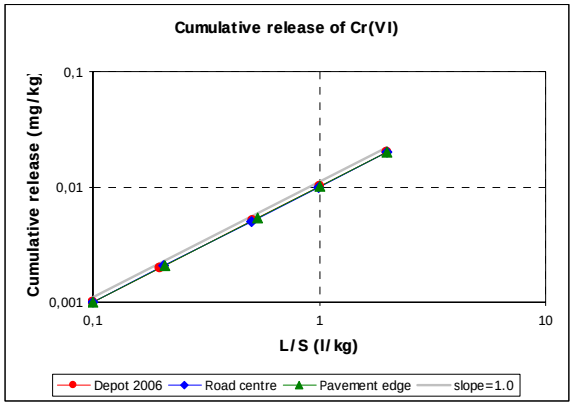
Krom

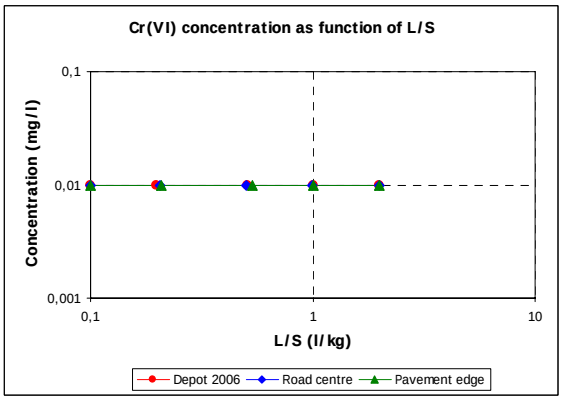

Cumulative release of Cr
Cumulative release (mg/kg)
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge
slope=1.0

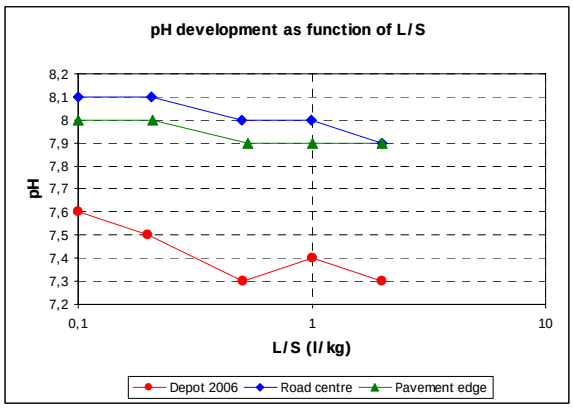

Cr concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge

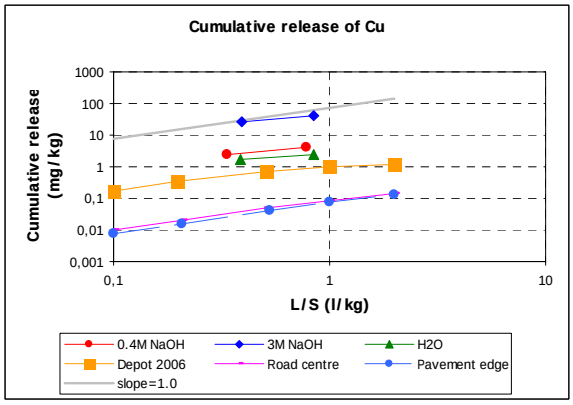
Krom^{6+}

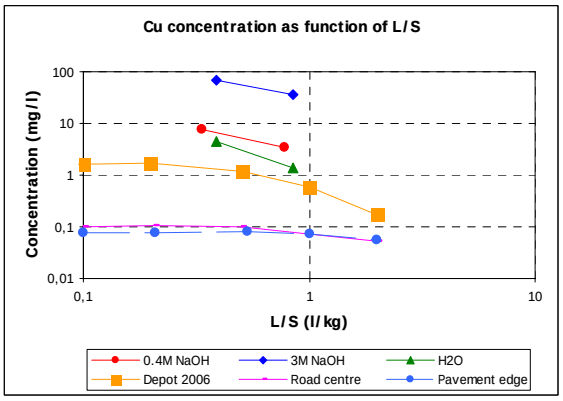


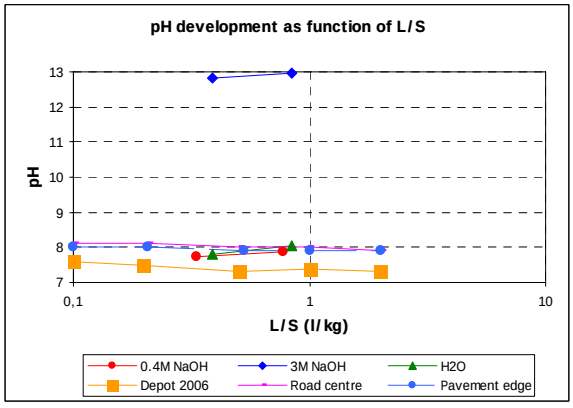




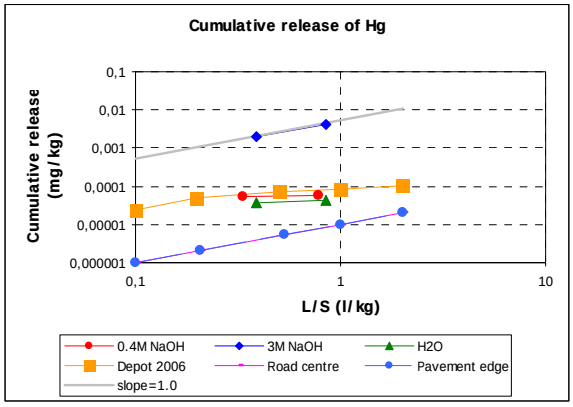
Koppar

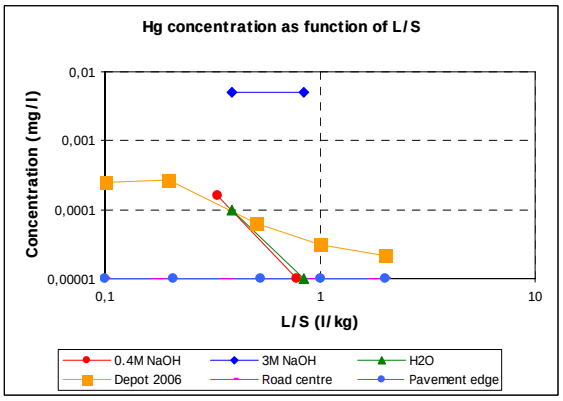


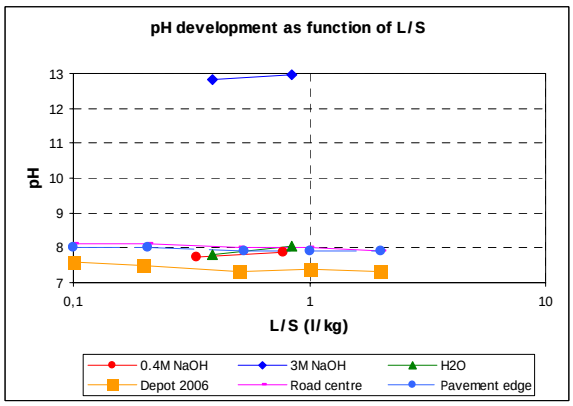




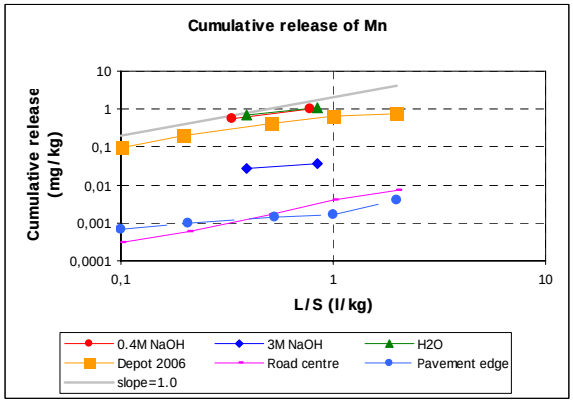
Kvicksilver

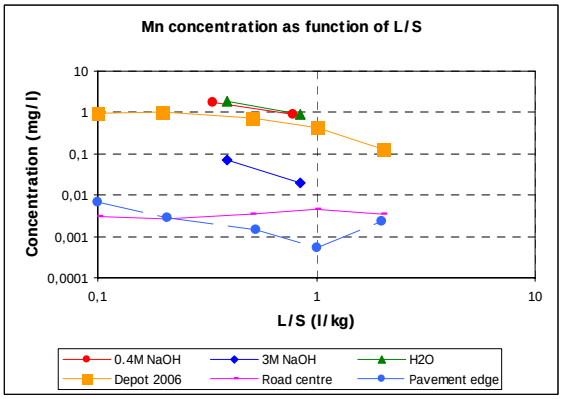


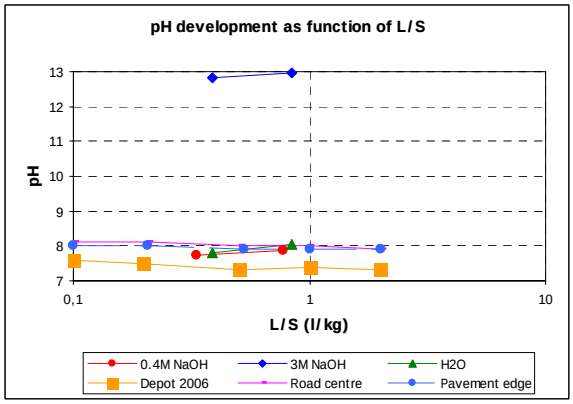




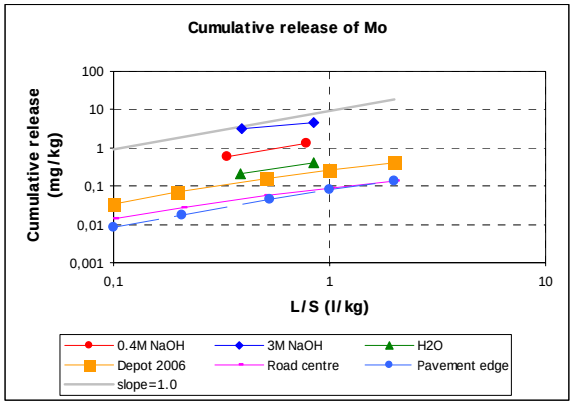
Mangan

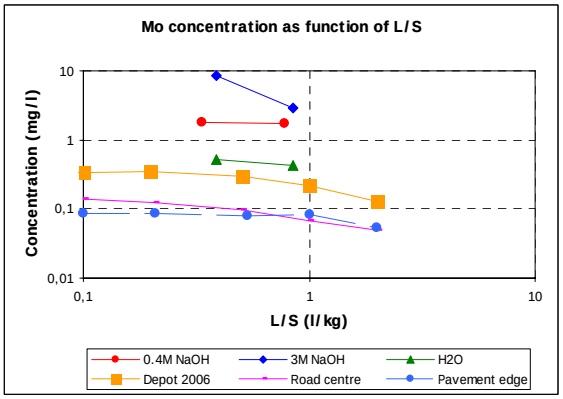


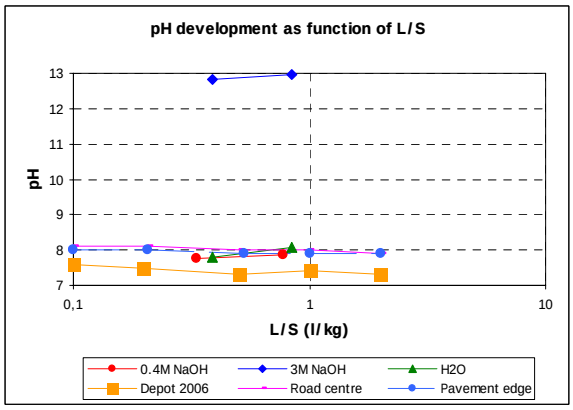




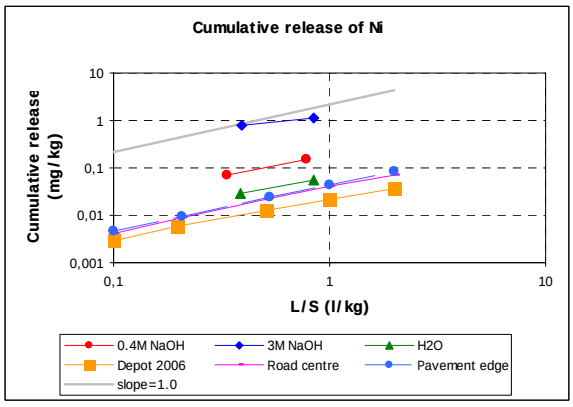
Molybden

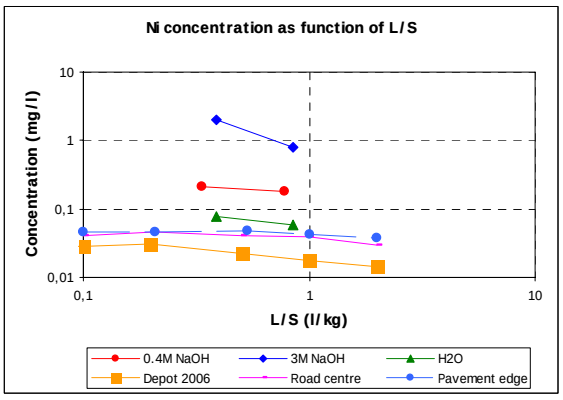


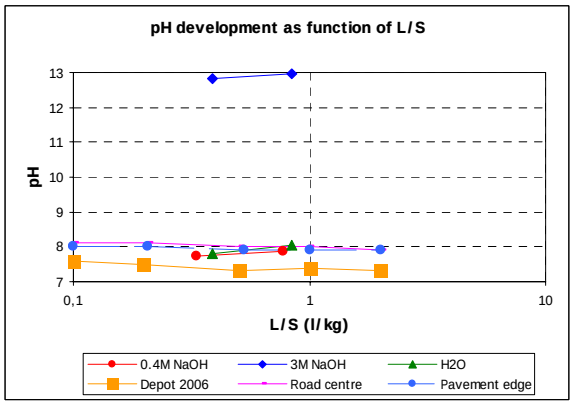




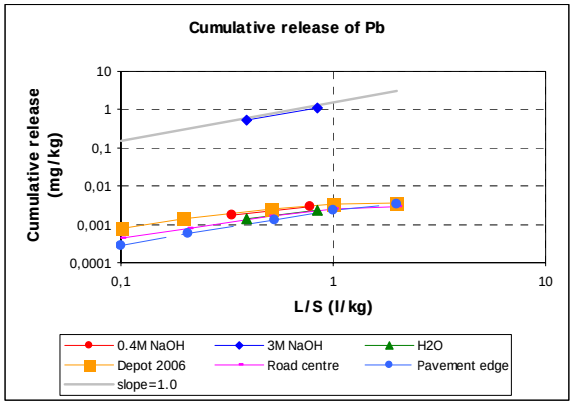
Nickel

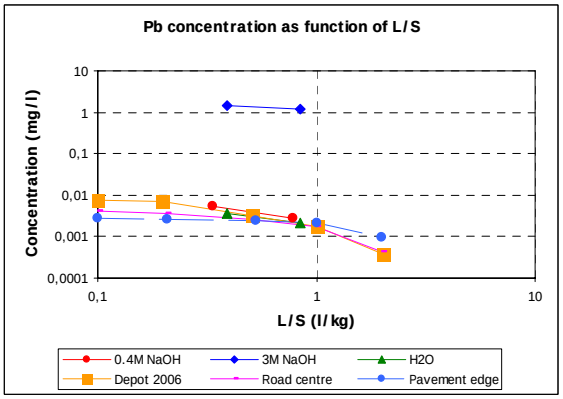


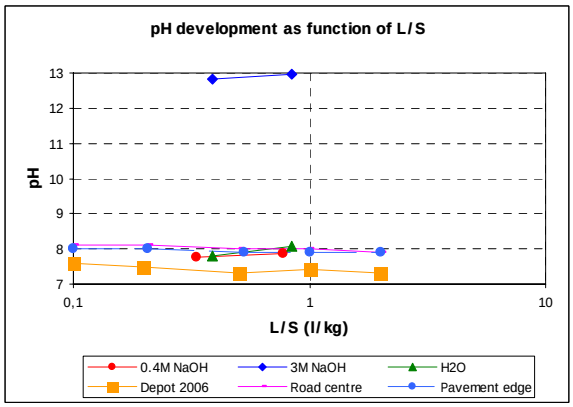




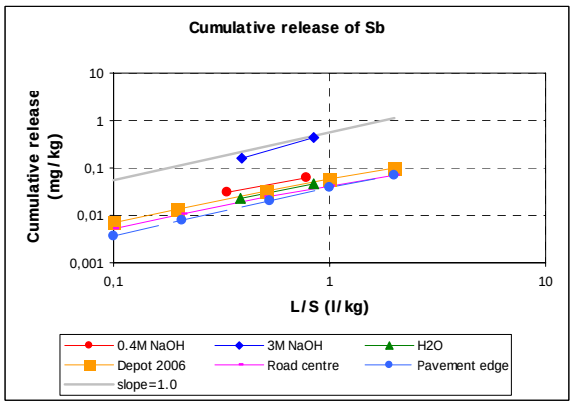
Bly

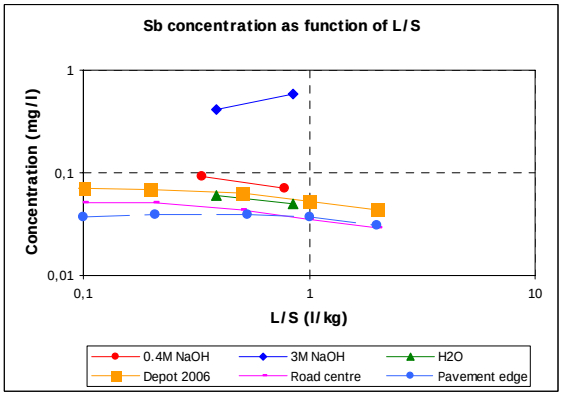

Cumulative release of Pb
Cumulative release (mg/kg)
10
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge
slope=1.0

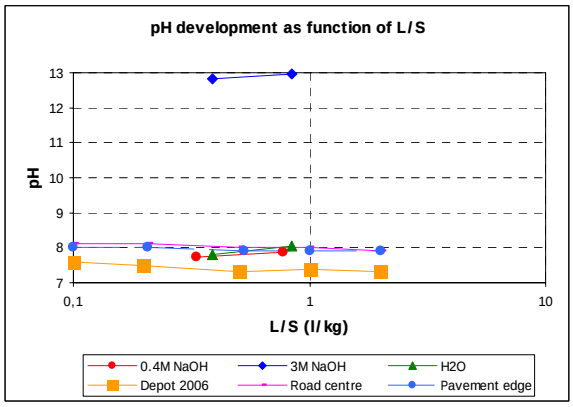

Pb concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
10
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge

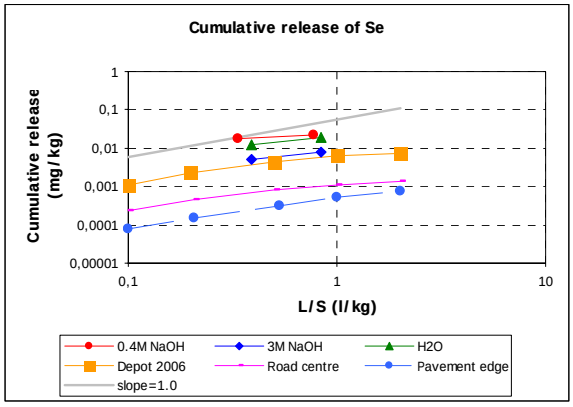
Antimon

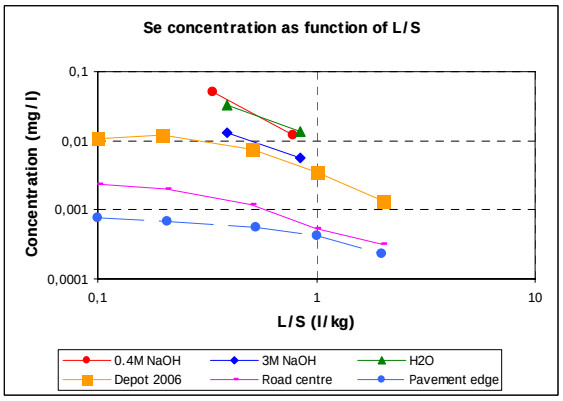

Cumulative release of Sb
Cumulative release (mg/kg)
10
1
0,1
0,01
0,001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge
slope=1.0

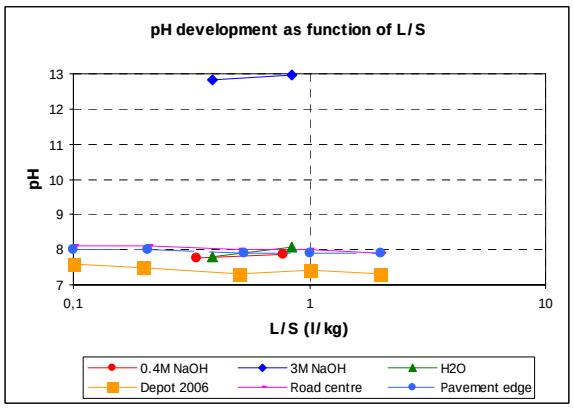

Sb concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
1
0,1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge

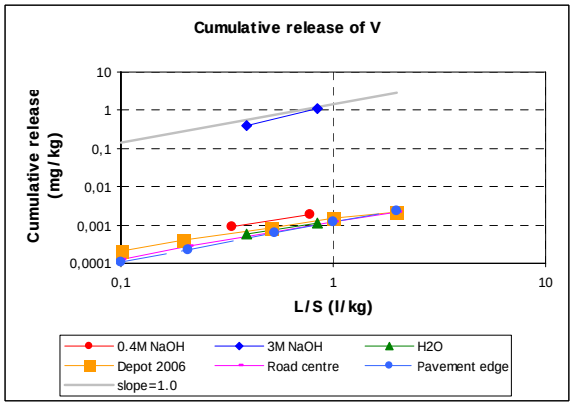
Selen

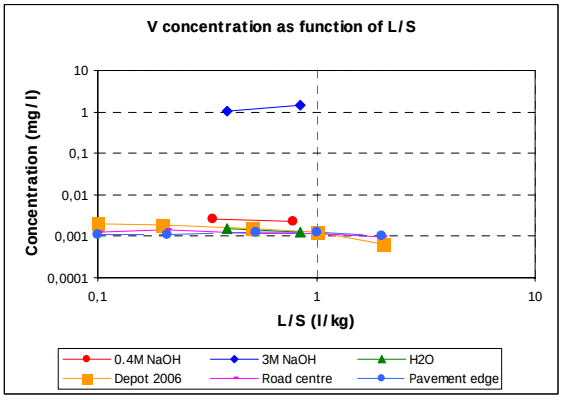


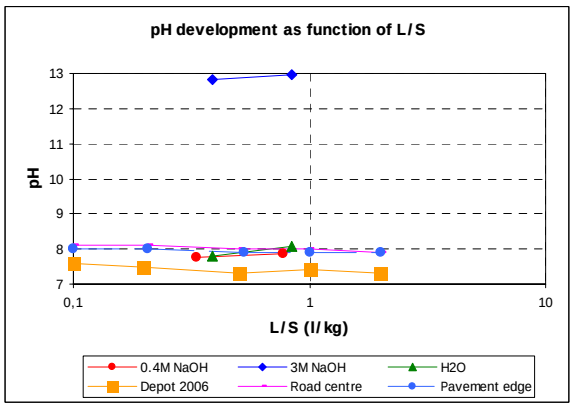




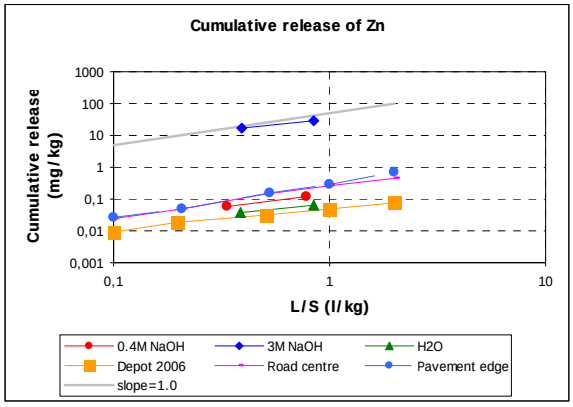
Vanadin

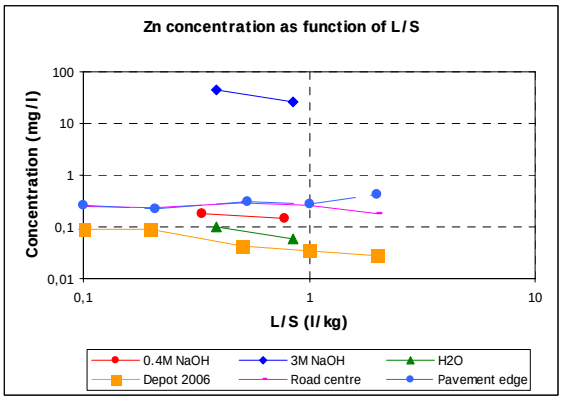


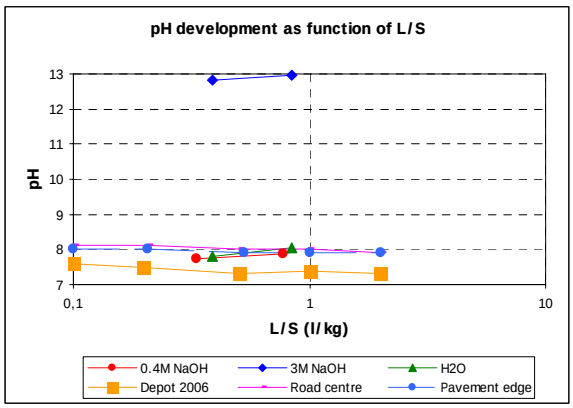




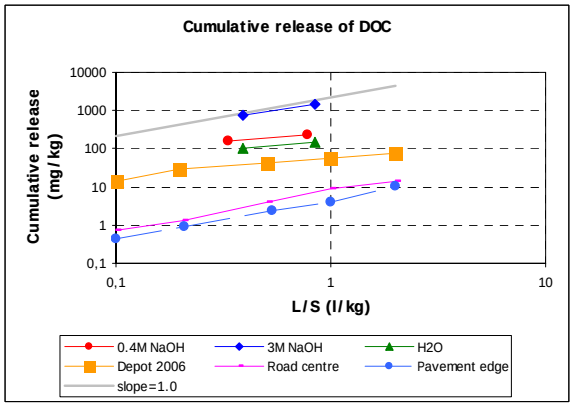
Zink

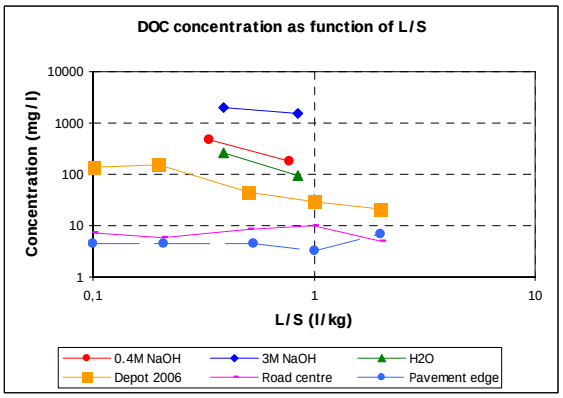

Cumulative release of Zn
Cumulative release (mg/kg)
1000
100
10
1
0,1
0,01
0,001
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge
slope=1.0

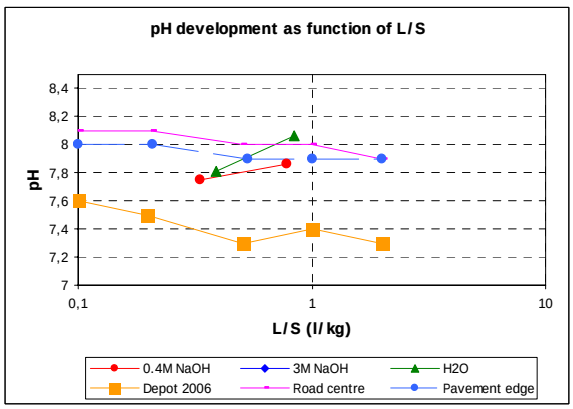

Zn concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
100
10
1
0,1
0,01
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge

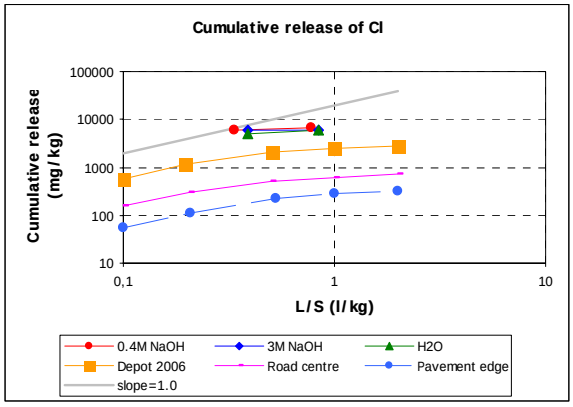
DOC

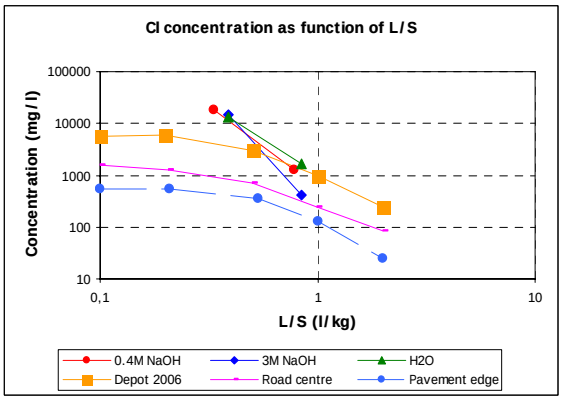

Cumulative release of DOC
Cumulative release (mg/kg)
10000
1000
100
10
1
0,1
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge
slope=1.0

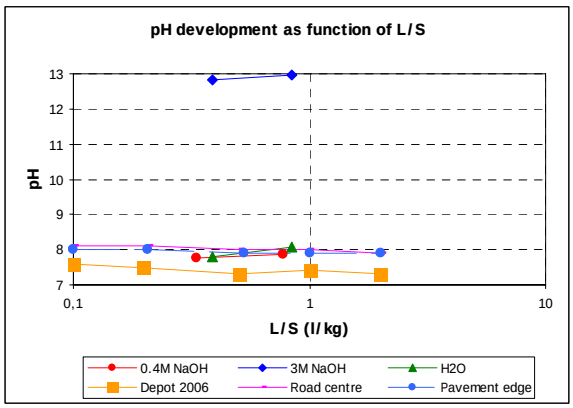

DOC concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
10000
1000
100
10
1
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge


pH development as function of L/S
pH
8,4
8,2
8
7,8
7,6
7,4
7,2
7
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge

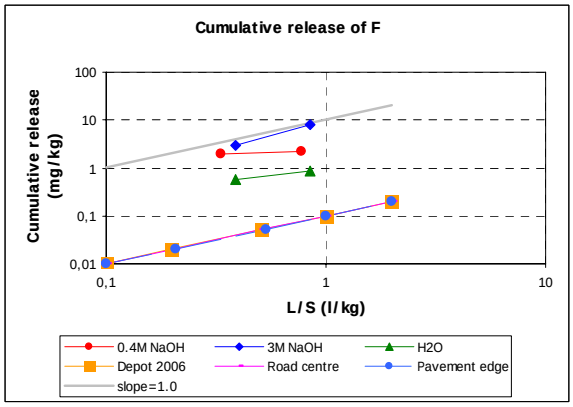
Klorid

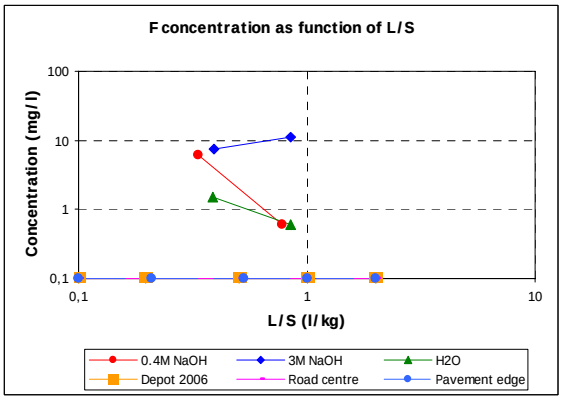


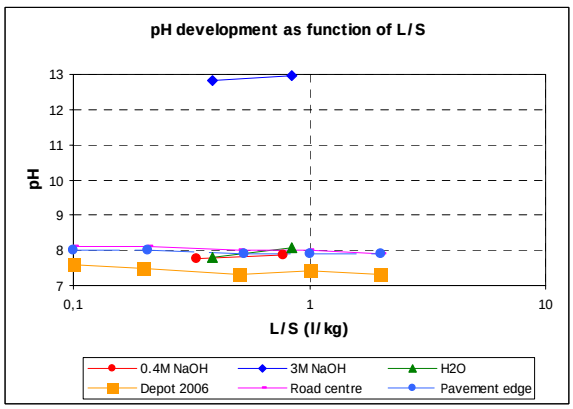




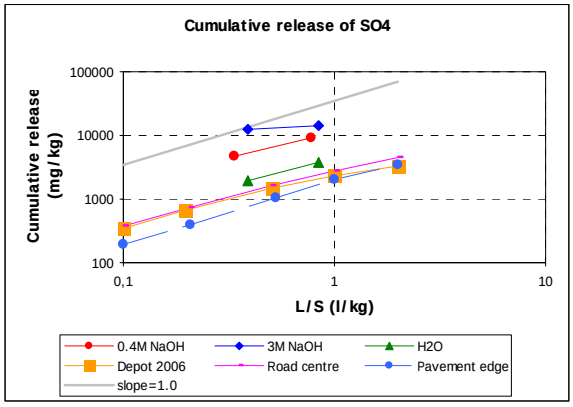
Fluorid

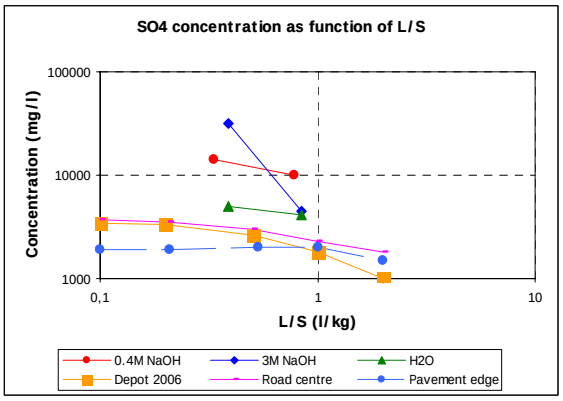


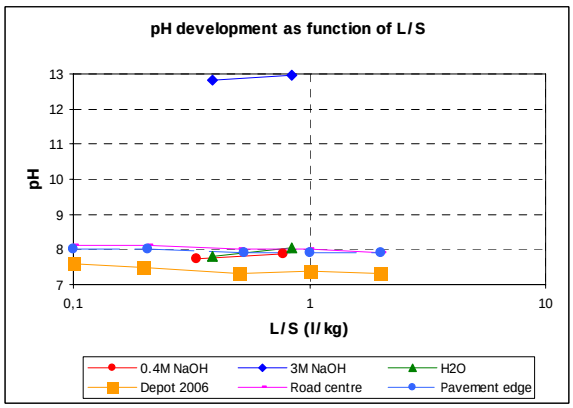




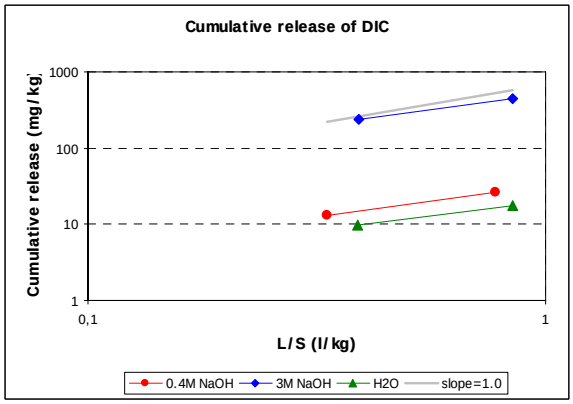
Sulfat

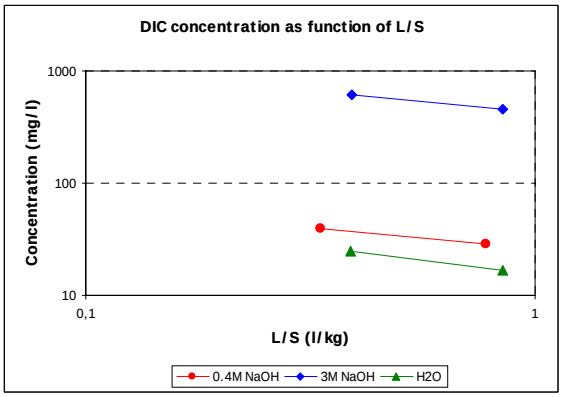

Cumulative release of SO4
Cumulative release (mg/kg)
100000
10000
1000
100
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge
slope=1.0

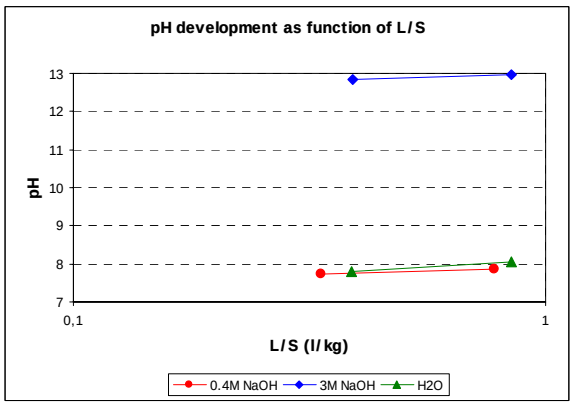

SO4 concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
100000
10000
1000
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,1
1
10
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
Depot 2006
Road centre
Pavement edge

DIC


Cumulative release of DIC
Cumulative release (mg/kg)
1000
100
10
1
0,1
1
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O
slope=1.0


DIC concentration as function of L/S
Concentration (mg/l)
1000
100
10
0,1
1
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O


pH development as function of L/S
pH
13
12
11
10
9
8
7
0,1
1
L/S (l/kg)
0.4M NaOH
3M NaOH
H2O

F Resultat från perkolationstest efter snabbåldring av bottenaska

Halt i µg/l

	Bottenaska från SYSAV					
	Kolonn med vatten		Kolonn med natriumhydroxid, liten tillsats		Kolonn med natriumhydroxid, stor tillsats	
L/S:	0,39	0,84	0,33	0,78	0,39	0,84
	nr 08161	*nr 08162*	*nr 08154*	*nr 08155*	*nr 08207*	*nr 08208*
Al	202	247	214	269	3 600 000	3 810 000
As	39,8	9,28	49,5	11,9	1 710	1 520
Ba	64,4	29,7	50,1	25,5	59,4	60,3
Cd	0,779	< 0,1	< 0,1	< 0,6	< 5	< 2
Co	2	1,17	4,69	2,98	19,1	< 9
Cr	1,37	< 0,5	2,15	0,908	< 40	< 40
Cu	4 370	1 390	7 490	3 340	67 600	36 500
Hg	0,0975	< 0,02	0,158	< 0,02	< 10	< 10
Mn	1 820	899	1 730	923	69,6	< 40
Mo	525	432	1 790	1 720	8 420	2 930
Ni	76,5	59,1	211	183	2 010	808
Pb	3,61	2,14	5,25	2,8	1 410	1 190
Sb	59,9	50,3	92,3	69,8	408	590
Se	32,2	13,7	51,7	11,9	13	5,65
V	1,52	1,22	2,69	2,26	1 030	1 470
Zn	101	58	177	148	45 500	26 500
Ca	1 060 000	546 000	790 000	457 000	27 900	10 300
Fe	10,4	4,5	18,6	10,5	< 900	< 900
K	884 000	270 000	1 320 000	442 000	2 220 000	550 000
Mg	152 000	63 500	149 000	66 000	< 7 000	< 7 000
Na	6 870 000	1 710 000	11 300 000	3 700 000	29 300 000	12 100 000
S	1 400 000	1 140 000	3 730 000	2 720 000	9 790 000	1 250 000
Si	3 890	2 300	5 570	2 970	35 100	38 600
DOC	260 000	95 000	480 000	180 000	2 000 000	1 500 000
Cl	13 000 000	1 700 000	18 000 000	1 300 000	15 000 000	410 000
F	0	0	0	0	0	11 000
SO4	5 000 000	4 100 000	14 000 000	9 900 000	32 000 000	4 500 000
DIC	24 900	16 800	39 800	28 800	610 000	453 100
HCO3	200 000	140 000	370 000	230 000	0	0
Phenols	300	8	340	240	340	84

www.vti.se
vti@vti.se

VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut som arbetar med forskning och utveckling inom transportsektorn. Vi arbetar med samtliga trafikslag och kärnkompetensen finns inom områdena säkerhet, ekonomi, miljö, trafik- och transportanalys, beteende och samspel mellan människa-fordon-transportsystem samt inom vägkonstruktion, drift och underhåll. VTI är världsledande inom ett flertal områden, till exempel simulatorteknik. VTI har tjänster som sträcker sig från förstudier, oberoende kvalificerade utredningar och expertutlåtanden till projektledning samt forskning och utveckling. Vår tekniska utrustning består bland annat av körsimulatorer för väg- och järnvägstrafik, väglaboratorium, däckprovnings-anläggning, krockbanor och mycket mer. Vi kan även erbjuda ett brett utbud av kurser och seminarier inom transportområdet.

VTI is an independent, internationally outstanding research institute which is engaged on research and development in the transport sector. Our work covers all modes, and our core competence is in the fields of safety, economy, environment, traffic and transport analysis, behaviour and the man-vehicle-transport system interaction, and in road design, operation and maintenance. VTI is a world leader in several areas, for instance in simulator technology. VTI provides services ranging from preliminary studies, highlevel independent investigations and expert statements to project management, research and development. Our technical equipment includes driving simulators for road and rail traffic, a road laboratory, a tyre testing facility, crash tracks and a lot more. We can also offer a broad selection of courses and seminars in the field of transport.

vti

HUVUDKONTOR/HEAD OFFICE
LINKÖPING
POST/MAIL SE-581 95 LINKÖPING
TEL +46(0)13 20 40 00
www.vti.se

BORLÄNGE
POST/MAIL BOX 760
SE-781 27 BORLÄNGE
TEL +46 (0)243 446 860

STOCKHOLM
POST/MAIL BOX 55685
SE-102 15 STOCKHOLM
TEL +46 (0)8 555 770 20

GÖTEBORG
POST/MAIL BOX 8077
SE-402 78 GÖTEBORG
TEL +46 (0)31 750 26 00