

Skumbitumenstabilisering av bottenaska från avfallsförbränning

David Bendz, Torbjörn Jacobsson, Mikael Svensson och Peter Flyhammar



värmeforsk
VÄRMEFORSKNING FÖREKÖRNING OCH UTVECKLING

Skumbitumenstabilisering av bottenaska från avfallsförbränning

Foamed bitumen stabilization of MSWI bottom ash

David Bendz, Torbjörn Jacobsson, Mikael Svensson och Peter
Flyhammar

Q4-215

Abstract

Genom skumbitumenstabilisering av bottenaska kan ett material med förbättrade hållfasthetsegenskaper erhållas. Bottenaska blandat med 4,5 % skumbitumen uppfyller gällande krav för styvhet och stabilitet på bärlagermassor vid kall återvinning enligt ATB Väg. För de flesta element så ger skumbitumenstabiliseringen ingen effekt på utlakningen vid askans (i granulär form) egen pH. Däremot ger skumbitumenbehandlingen en positiv effekt vid extrema pH för många element, vilket indikerar att utlakningen vid egen-pH är löslighetsstyrd och övergår till att kontrolleras av tillgänglig yta hos askpartiklarna vid extrema pH. Kolonnlaktesterna visar en något förhöjd utlakning av bl.a Mn och Cu för de skumbitumenbehandlade askorna. Ytutlakningsförsöken (askan i monolitisk form) visar däremot en positiv påverkan av skumbitumenbehandlingen för Mn och Cu. Resultaten från ytutlakningsförsöken bedöms vara mer relevanta än kolonnlakförsöken för att beskriva en fältsituation.

Förord

Detta projekt har utförts av:

David Bendz (Statens Geotekniska Institut)

Torbjörn Jacobsson (Statens väg-och transportforskningsinstitut)

Peter Flyhammar och Mikael Svensson (Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola)

Projekt har samfinansierats av Värmeforsk och Statens Geotekniska Institut

Projekthandläggare på Värmeforsk har varit Claes Ribbing. En referensgrupp har varit knuten till projektet och bestått av Henrik Bristav (Umeå Energi), Erik Nordström Vattenfall Utveckling och Kenneth Strandljung (Ragnsells) .

Jag vill tacka Claes Ribbing och referensgruppen för stort engagemang, stöd och tålamod.

Detta projekt hade inte varit möjligt att genomföra utan det stöd och hjälp som vi fått från Ulf Lillbroända, Paul Landa och Derk Goos på NYNAS Bitumen. Jag vill rikta ett speciellt tack till Paul Landa och hans kolleger på NYNAS lab i Antwerpen som behandlade bottenaskan med skumbitumen och tillverkade provkroppar.

Jag vill också tacka Ildiko Farkas för hjälp med labarbete.

Malmö mars 2006

David Bendz, projektledare

Sammanfattning

Skumbitumen är en blandning av bitumen, vatten och luft. Genom att injektera kallt vatten och luft i smält bitumen expanderar den varma bitumen kraftigt till cirka 10-30 gånger dess ursprungliga volym. Genom att exponera ett granulärt material för skummet beläggs de enskilda partiklarna med en bitumenhinna vilket ger partiklarna kohesiva och hydrofoba egenskaper. Skjuvhållfasten ökar och samtidigt bevaras materialets flexibilitet och motståndskraft mot utmattnings. Behandlingen kan utföras både offsite och insitu. Den övergripande målsättningen i detta projekt har varit att undersöka möjligheterna att stabilisera bottenaska från avfallsförbränning med skumbitumen för att uppnå förbättrade utlaknings- och geotekniska egenskaperna.

Följande lakttester har utförts på obehandlad bottenaska och två skumbitumenbehandlade askor med 2 respektive 4,5 % bitumeninblandning: Skakförsök (EN12457-4), kolonnförsök (EN 14405), pH statisk lakttest (prEN14997) och ytutlakningsförsök (NEN 7345) på två cylindriska provkroppar. Vidare har ett urval av partiklar karakteriserats med BET-analys. Resultaten visar att den specifika ytan reducerats med 50 för askan med 4,5 % skumbitumenbehandling, vilket manifesterar sig i en lägre syra- och basbuffringskapacitet genom att tillgängligheten på buffrande mineral minskar. När det gäller lakegenskaper så är resultatet inte helt entydigt utan beroende av lakttestmetoden. Skumbitumenbehandlingen visar ingen signifikant effekt vid skaktest, med undantag för de lättlösliga ämnen Cl, S, SO₄, NO₃, Sb, och Ca där skumbitumenbehandlingen hade en positiv effekt. Kolonnlakttesterna visar en något förhöjd utlakning för Mn och Cu, men även av Zn, Co, Cd och Hg för de skumbitumenbehandlade askorna. Ytutlakningsförsöken visar däremot en positiv påverkan av skumbitumenbehandlingen för Mn och Cu. Resultaten från ytutlakningsförsöken bedöms vara mer relevanta än kolonnlakförsöken för att beskriva en fältsituation. Skumbitumenbehandlingen uppvisar en signifikant positiv effekt vid extrema pH för många element. Resultaten indikerar att utlakningen vid pH 8 (≈ egen pH) är löslighetsstyrd och övergår till att kontrolleras av tillgänglig yta vid låga pH. För Sb och Se så uppvisar skumbitumenbehandlingen en positiv effekt över hela pH-intervallet, vilket indikerar att utlakningen styrs av tillgänglig yta hos askpartiklarna.

Geoteknisk undersökning utfördes på cylindriska prover av bottenaska stabiliserade med skumbitumen, bitumenemulsion och cement (total 6 olika blandningar). Provningarna utfördes enligt den standard som finns för asfaltmaterial (FAS-metoder eller ASTM) och cementgrus (SS). De cylindriska provkroppar av bitumenbunden bottenaska uppvisade hög hålrums halt, 26-30 vol%, och låg skrymdensitet, 1,7-1,8 (kg/dm³). Den högsta styvhetsmodulen och den högsta stabiliteten uppvisade blandningen med 4,5 % skummat bitumen, styvhetsmodul: 2800 Mpa och stabilitet: 27 KN. På dessa punkter uppfyller blandningen gällande krav på bärlagermassor vid kall återvinning enligt ATB Väg: >2000 MPa respektive >7 KN. Skrymdensiteten låg på 1,80-1,85 kg/dm³ för cementbunden bottenaska. Den cementstabiliserade bottenaskan uppfyller kraven i ATB VÄG för CBÖ-konstruktioner med avseende på tryckhållfasthet. Skumbitumenstabiliserad aska bedöms vara fördelaktig ur dammsynpunkt eftersom de minsta partiklarna häftar ihop och bildar större aggregat som inte är benägna att spridas som damm.

Nyckelord: bottenaska, bitumen, lakegenskaper, styvhet, stabilitet

Summary

Foamed bitumen is a mixture of bitumen, water and air. Bitumen that is heated to 175°C expands about 10-30 times compared to its original volume when injecting small amounts of water and air under high pressure. By exposing a granulate material to foamed bitumen the particles will be covered with a bitumen film. This will give the particles hydrophobic properties, as well as a smaller specific surface. At the same time the mechanical properties of the material are expected to improve due to the cohesive properties of the bitumen covered particles. The treatment can be made both offsite and insitu.

The objective of this project was to investigate the possibility to treat municipal solid waste bottom ash with foamed bitumen to achieve improved leaching and mechanical properties.

The following leaching tests have been performed on the original bottom ash and two foamed bitumen treated ashes with 2 and 4.5 % bitumen, respectively: one-stage batch test (EN 12457-4), pH-static test (prEN 14997), column test (prEN 14405) and monolithic leaching test (NEN 7345). In addition, the specific surface and intra-particle porosity were determined by BET N₂ adsorption experiments on selected fractions of bottom ash. The results showed that the specific surface decreased with more than 50 % and manifested itself in a lower buffer capacity at both low and high pH.

For most elements no difference in leaching behavior were found when comparing the results from the leaching tests for the three materials at their own pH. This is thought to be due to that sufficient specific area available for leaching exists despite the foam bitumen treatment. The results from the one-stage batch test show a reduced leaching for Cl, S, SO₄, NO₃, Sb, and Ca for the foamed bitumen treated ashes. The results from the column test of the foamed bitumen stabilized ashes showed an increased leaching of some elements, especially Mn and Cu, but also Zn, Co, Cd and Hg. In contrary, the results from the monolithic leaching test show a lower leaching of Mn and Cu as the content of bitumen gets higher. The results from the monolithic leaching test are regarded to be more relevant for a field scenario. The pH-static test showed a lower buffering capacity and less leaching of most pH-dependent elements at extreme pH-values for bottom ash treated with foamed bitumen. The results show a positive effect for Sb and Se over the whole pH-interval, which indicate that the leaching is governed by the available surface.

A geotechnical investigation was conducted on cylindrical samples of bottom ash stabilized with foamed bitumen, bitumen emulsion and cement (in total 6 mixtures). The bitumen-stabilized samples show a high porosity 26-30 vol%, and low bulk density. The mixture with 4.5% foamed bitumen show the highest stiffness module and the highest stability: 2800 Mpa and stability: 27 KN. Here, the mixture fullfills the requirements set by the Swedish road administration (ATB Väg): >2000 MPa and >7kN, respectively. The bulk density of cement stabilized bottom ash is 1,80-1,85 kg/dm³. The cement stabilized bottom ash fulfills the requirement in ATB VÄG with respect to pressure strength.

Since the smallest particles are covered preferentially with bitumen the treated bottom ash is probably less likely to form dust, which is favorable from health risk perspective.

Keywords: bottom ash, bitumen, leaching, stiffness, stability.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET	1
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	2
1.4	MÅL.....	3
2	BITUMEN OCH SKUMBITUMEN	4
2.1	ALLMÄNT	4
2.2	KEMISK KOMPOSITION BITUMEN	4
2.3	LAKEGENSKAPER BITUMEN.....	5
2.4	SKUMBITUMENTEKNOLOGIN	6
2.5	EKONOMI	7
3	METOD.....	8
3.1	PROVTAGNING AV BOTTENASKA.....	8
3.2	BEHANDLING MED SKUMBITUMEN.....	9
3.3	PARTIKELYTA OCH PARTIKELPOROSITET	10
3.4	KARAKTERISERING AV LAKEGENSKAPER.....	11
3.5	GEOTEKNISK UNDERSÖKNING	11
4	RESULTAT UNDERSÖKNING AV KORN.....	13
4.1	KORNSTORLEKSFÖRDELNING	13
4.2	BET-YTA OCH POROSITET.....	13
4.3	OKULÄRT INTRYCK.....	14
5	RESULTAT KARAKTERISERING AV LAKEGENSKAPER	16
5.1	SKAKFÖRSÖK	16
5.2	PH STATISKA FÖRSÖK.....	18
5.3	KOLONNFÖRSÖK	23
5.4	YTUTLAKNINGSFÖRSÖK	28
5.5	SUMMERING UTLAKADE MÄNGDER I SKAK-, PH-STAT OCH KOLONNLAKTEST	32
6	RESULTAT GEOTEKNISK UNDERSÖKNING AV PROVKROPPAR.....	33
6.1	SKRYMDENSITET OCH HÅLRUMSHALT	33
6.2	STYVHETSMODUL	34
6.3	STABILITET	35
6.4	TRYCKHÅLLFASTHET PÅ CEMENTSTABILISERAD BOTTENASKA	36
7	DISKUSSION	37
7.1	MILJÖTEKNISK UNDERSÖKNING	37
7.2	GEOTEKNISK UNDERSÖKNING	38
8	SLUTSATS	40
9	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE.....	42
10	LITTERATURREFERENSER	43

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Med målsättningen att finna kostnads- och energieffektiva tekniker för att stabilisera obundna lager i befintliga vägar och att förbättra hållfasthetsegenskaperna hos ballast av låg kvalité så har ett antal innovativa tekniker utvecklats. En av dessa tekniker är stabilisering med skumbitumen. Tekniken är mer än 40 år gammal men är vanlig endast i ett begränsat antal länder.

Det finns etablerade tekniker för markinblandning av skumbitumen i befintligt väg (bärlagergrus eller returafalt) eller för verksblandning av återvinningsafalt och nytillverkade massor av naturmaterial. Även vid inkapsling av stenkolsolja i återvinningsmassor, där syftet är att förhindra utlakning av skadliga ämnen, kan skumbitumen, bitumenemulsion användas (tekniken används utomlands och har testats i Sverige). Lakförsök av inkapslad tjärafalt har visat att halten av 16PAH markant kan reduceras (framför allt halten av cancerframkallande PAH) genom inblandning av emulsion [1]. Stabiliserade massor används vanligtvis till bärlager men ibland även till slitlager.

Skumbitumenstabilisering är en resurssnål teknik eftersom ballasten inte behöver värmas upp. Genom att blandningsverken är lätta att flytta minskar transportbehoven. Det innebär att tekniken lämpar sig väl för småskalig verksamhet genom att uppställning kan ske nära vägobjektet eller upplagsplatsen. Halten av inblandat bindemedel varierar beroende på syftet med åtgärden och typen av material. Vid återvinning av afalt brukar halten restbitumen ligga mellan 1-3 % medan den vid nytillverkning är något högre, 3-5 %. Vid cementstabilisering tillsätts 4-6 % cement beroende på önskvärd hållfasthet.

Bottenaska från avfallsförbränning har en stor potential som alternativt anläggningsmaterial. Denna studie är inriktad på att modifiera bottenaskans tekniska och miljömässiga egenskaper genom skumbitumenbehandling.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Skumbitumen är en blandning av bitumen, vatten och luft. Genom att injektera kallt vatten i smält bitumen expanderar den varma bitumen kraftigt till cirka 10-30 gånger dess ursprungliga volym. Det bildade skummet är stabilt under 20-50 s vilket är tillräckligt för att kunna exponera ett granulärt material för skummet. Behandlingen kan utföras både offsite och insitu. Vid kontakten med skummet beläggs de enskilda partiklarna med en bitumenhinna vilket ger partiklarna kohesiva och hydrofoba egenskaper. För att öka bitumens vidhäftning vid partiklarna används ibland speciella tillsatsmedel. Bitumenstabiliseringen ger följande positiva effekter för ett ballastmaterial:

- Skjuvhållfasten ökar och samtidigt bevaras materialets flexibilitet och motståndskraft mot utmattning. Bitumenskummet bildar tillsammans med de minsta partiklarna ett kitt som håller ihop de stora partiklarna i en matris. För att uppnå hög skjuvhållfasthet fungerar metoden bäst för välgraderade granulära material [2][3][4].
- Små partiklar bildar aggregat och bitumen ger dessa aggregat och partiklar hydrofoba egenskaper vilket minskar vägöverbyggnadens känslighet för fukt och tjälskador [2][4].

En liknande teknik används i vissa fall för att underlätta och effektivisera hanteringen av kol vid energiproduktion. Det är framförallt den fina fraktionen som ger kolet oönskade egenskaper och försvårar hanteringen vid förädlingsprocessen av råvaran till bränsle. Genom att blanda in en bitumenemulsion i kolslurryn innan avvattning sker en mikroagglomerering och den våta och klibbiga finfraktionen omvandlas till ett lätthanterbart granulärt material med hydrofoba egenskaper. Kornstorleksfördelningens tyngdpunkt kommer därmed att förskjutas mot större partikelstorlekar vilket visat sig ge en mängd fördelar såsom bl.a minskad påverkan vid frost, lägre vatteninnehåll i aggregaten och minskad benägenhet att damma [5].

En delvis förbisedd potential hos skumbitumenstabilisering är den effekt som denna behandling kan ha för utlakningsegenskaperna hos granulära avfallsklassificerade material. Genom att belägga askpartiklarna/aggregaten med en bitumenfilm får de hydrofoba egenskaper och den tillgängliga ytan minskar. Genom att partiklarna/aggregaten häftar ihop vid kompaktering så får materialet en monolitisk struktur, vilket begränsar exponeringen för vatten och bidrar till att diffusion kan bli en begränsande utlakningsprocess. Samtidigt förbättras hållfastheten genom de kohesiva egenskaperna hos de bitumenbelagda aggregaten. En ytterligare positiv effekt är att kapillariteten och frostkänsligheten förväntas att minska.

Erfarenheter visar att det vid applicering av bitumenskummet kan vara svårt att få en god bitumenbeläggning på alla kornstorlekar. De minsta partikelstorlekarna täcks först medan de större partiklarna ofta bara får en partiell beläggning. Ur ett utlakningsperspektiv är det viktigast att reducera utlakningen från de minsta partiklarna eftersom dessa partiklar har ett oproportionerligt stort inflytande på slaggens lakegenskaper. Zevenberger et al. [6] fann att trots att de minsta partiklarna ($< 300 \mu\text{m}$) utgjorde mindre än 35 % av den totala volymen, så återfanns mer än 60 % av den specifika ytan i denna fraktion. Detta bekräftas också genom de undersökningar som gjorts, effekten av de små partiklarna är mycket påtaglig då reaktiviteten för olika partikelstorlekar jämförs [7][8][9].

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Projektet är fokuserat på en delvis förbisedd potential hos skumbitumenstabilisering och den effekt som denna behandling kan ha för utlakningsegenskaperna och de geotekniska egenskaperna hos granulära avfallsklassificerade material. Projektet är fokuserat på bottenaska, men stabiliseringstekniken är också intressant för andra alternativa

ballastmaterial. Tekniken förväntas att öka möjligheterna att återanvända bottenaska från avfallsförbränning som bärlager i vägkonstruktioner.

1.4 Mål

Den övergripande målsättningen i detta projekt har varit att undersöka möjligheterna att stabilisera bottenaska från avfallsförbränning med skumbitumen.

Hypotesen i denna studie har varit att man genom skumbitumenstabilisering kan uppnå förbättrade utlakningsegenskaper och dessutom förbättra de geotekniska egenskaperna hos bottenaska. Genom att belägga askpartiklarna/aggregaten med en bitumenfilm görs partiklarna hydrofoba samtidigt som den specifika ytan (BET) minskar, vilket förväntades begränsa upplösningstakten av askpartiklarna. Samtidigt förbättras hållfastheten genom de kohesiva egenskaperna hos de bitumenbelagda aggregaten, silt/lerfraktionen reduceras genom aggregatbildning och den kapillära stighöjden minskar tillsammans med frostkänsligheten.

Specifika målsättningar är att:

- Karakterisera bitumenhinnan på behandlade partiklar av olika storlek och undersöka hur den specifika ytan och porositeten påverkas.
- Undersöka lakningsegenskaperna för bitumenstabiliserade bottenaska genom att utföra skaklaktest, pH-stat laktest, kolonnlaktest och ytutlakningstest.
- Utredda skumbitumenstabiliseringens effekt på de mekaniska egenskaperna hos bottenaska. Även de mekaniska egenskaperna för bottenaska stabiliserad med bitumenemulsion och cementinblandning undersöktes, vilket var en utvidgning av projektet.

2 Bitumen och skumbitumen

2.1 Allmänt

Bitumen framställs ur råolja, som är en blandning av kolväte med varierande molekylvikt och kokpunkt. Separation av lättare och tyngre kolväten utförs i en destillationskolonn. Den fraktion som återstår efter destillering vid atmosfärstryck är de långa kolkedjorna. För att vara användbar i produktionen av bitumen så destilleras denna fraktion ytterligare och producerar gas, destillat och korta kolkedjor. Denna fraktion används sedan för att framställa bitumen.

De fysikaliska egenskaperna hos bitumen karakteriseras av dess penetrationsgrad (pen). Penetrationsgraden är ett mått på dess konsistens och mjukpunkt. Penetrationen definieras som det djup i decimillimetrar som en nål med en specificerad dimension, under en viss last, temperatur och under en viss tid kan tränga ned i bitumen. Med denna metod kan bitumen karakteriseras precist i området 2-500 dmm, där hård bitumen har en låg penetrationsgrad och mjuk bitumen har en hög penetrationsgrad. Mjukpunkten definieras som den temperatur i Celciusgrader där bitumen har en viss konsistens. Enligt teststandarden placeras en stålkula med vikten 3.5 g på ett bitumenprov innesluten i en mässingsring som placeras i vatten eller glycerin. Temperaturen ökas successivt och när stålkulan vidrör basen 25 mm under ringen så avläses temperaturen.

Bitumen är ett material som uppvisar hög motståndskraft mot strålning, kemikalier, vatten och nedbrytning. Det är resistent mot sprickbildning och uppvisar god vidhäftning till många material. Det vanligaste användningsområdet för bitumen är som bindemedel i asfalt. Andra vanliga användningsområden är takbeläggning, golv, korrosionsskydd och olika industritillämpningar där vatteninträngning måste undvikas [10].

Bitumen åldras genom oxidering, avgasning av flyktiga ämnen, migration av vissa ämnen som finns i bitumen in i aggregaten och härdning genom en långsam omorganisation av bitumen molekyler. Oxidationen är den viktigaste åldringsprocessen. De kemiska och fysikaliska processer som definierar åldrandet gör att bitumen förlorar sina viskoelastiska egenskaper och dess mekaniska egenskaper kommer mer och mer att likna ett fast material [19].

2.2 Kemisk komposition bitumen

Bitumen är ett kolloidsystem som består av tunga kolvätemolekyler i ett oljemedium med lägre molekylvikt. Bitumens beståndsdelar av kolvätemolekyler kan delas in i fyra kemiska grupper: asfalter, resiner, aromater och saturater, Tabell 1. Bitumen består också av vanadin, nickel, järn, magnesium och kalcium i spårämneskoncentrationer. Den specifika kemiska kompositionen beror av ursprungsland (källa), modifiering och åldring.

Asfaltener består av polära och komplexa molekyler med hög vikt. Förutom kol och väte innehåller dom också kväve, svavel och syre. Innehållet av asfaltener styr bitumens reologiska egenskaper. Ett högre innehåll av asfaltener ger ett hårdare, mer visköst bitumen med en lägre penetrationsgrad. Asfaltenerna utgör 5-25% i bitumen. Resiner är polära ämnen som också innehåller små mängder kväve, svavel och syre. Aromater består av ämnen med låg molekylvikt och uppbyggda som icke-polära kolkedjor. Dom representerar 40-65% av bitumen och utgör det huvudsakliga dispersionsmediet för asfaltenerna. Saturater består av både raka och grenformade alifatiska kolväten med olika alkylgrupper. Dessa ämnen är icke-polära och har liknande molekylvikt som aromater. Saturaterna utgör 5-20 % i bitumen. Ett exempel på innehåll i en 100 pen bitumen ges i Tabell 1 [10]

Tabell 1. De fyra kolvätegrupperna i en 100 pen bitumen [10]

Table 1. The four groups of hydrocarbon in a 100 pen bitumen [10].

	Beståndsdel Bitumen % mass	Kol % mass	Väte % mass	Kväve % mass	Svavel % mass	Syre % mass	Molekyl-vikt
Asfaltener	5.7	82.0	7.3	1.0	7.8	0.8	11 300
Resiner	19.8	81.6	9.1	1.0	5.2	-	1 270
Aromater	62.4	83.3	10.4	0.1	5.6	-	870
Saturater	9.6	85.6	13.2	0.05	0.3	-	835

2.3 Lakegenskaper bitumen

Den kemiska resistansen hos bitumen är god och ökar med ökande hårdhet. Nedbrytning av bitumen pga av biologiska processer har endast iakttagits i extrema miljöer [10]. Brandt och Groot [11] genomförde ytutlakningstest (NEN 7345) på 9 olika bitumentyper för att studera utlakningen av PAH. Experimenten visade att koncentrationen av PAH:s i vattenfasen initieellt är en diffusionskontrollerad process. För längre tider (3 dagar<) inställer sig jämnvikt mellan bitumen och vattenfasen och koncentrationen i vattenfasen av en specifik PAH kan då definieras med jämnviktskonstant.

Resultaten presenterades i [11] som medelvärden av de högsta koncentrationer som uppnåddes i varje lagssteg (9, 16, 36, och 64 dagar). Resultatet visade att endast PAH med 4 ringar eller mindre uppvisade koncentrationer på 0.1 ng/l eller mer. Naftalen detekterades i koncentrationer mellan 0.9 – 371 ng/l och dominerade utlakningen av PAH:er följt av Phenantrene (1-180ng/l) och Fluoren (0.8-44 ng/l). Benso(a)pyren kunde endast detekteras i lakvattnet från två bitumen och den högsta koncentrationen var 0.3 ng/l. Ämnena benso(b)fluoranten, och benso(k)fluoranten detekterades bara i tre bitumen och den högsta koncentrationen var 0.4 ng/l. Ämnena benso(ghi)perylene och inden(1,2,3-cd)pyren kunde inte detekteras i lakvatten från något bitumen.

Som jämförelse kan nämnas att dricksvattenkriterierna SLVFS 2001:30 anger följande gänsvärden för PAH:

- Bensa(a)pyren: 10 ng/l
- Summan av följande ämnen: benso(b)fluoranten, benso(k)fluoranten, benso(ghi)perylen, inden(1,2,3-cd)pyren: 100 ng/l

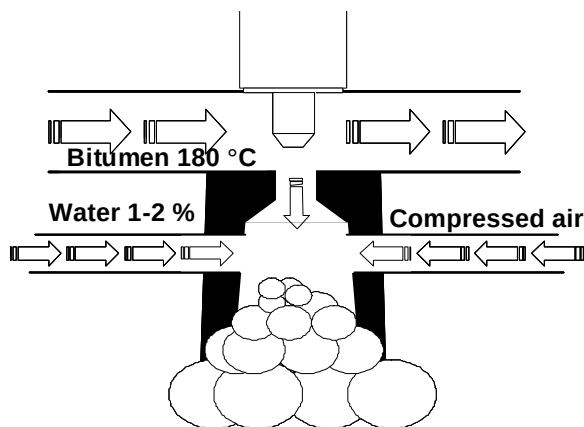
Enligt Naturvårdsverkets bedömningsgrunder för förorenad mark [22] baserar sig ytvattenkriteriet för cancerogena PAH på benso(a)pyren och för övriga PAH på naftalen. Riktvärdena är:

- Naftalen 1100 ng/l
- Benso(a)pyren 5 ng/l

De uppmätta jämviktskoncentrationer [11] understiger dessa kriterier med goda marginaler utan att tillgodoräkna sig den utspädning som är aktuellt i en verklig applikation i fält.

2.4 Skumbitumenteknologin

Skumbitumen består av en blandning av luft, vatten och bitumen. Tillverkning sker genom att injektera en liten mängd vatten och luft under högt tryck in i bitumen vid 175°C. Bitumen expanderar då kraftigt till i storleksordningen 15 gånger sin ursprungliga volym. I detta tillstånd är den skummade bitumen ideal för att blanda med aggregat. Blandningen måste dock ske direkt eftersom den skummade bitumen sjunker ihop relativt snabbt och är endast stabil i 20-50 s. Andelen vatten optimeras med avseende på volymökning och skummets livslängd. Mängden tillsatt vatten är positivt korrelerad till volymökningen men negativt korrelerat till tiden det tar för skummet att sjunka ihop [12]. Det är dom fina partiklarna som preferentiellt beläggs med bitumen, vilket gör att dom klibbar ihop och bildar större aggregat [3][13].



Figur 1. Schematisk bild av produktion av skumbitumen

Figure 1. Schematic illustration of foamed bitumen production.

Fördelarna med skumbitumen eller bitumen emulgerad i vatten är att det är resurssnåla tekniker. Det är det mest effektiva sättet att tillsätta bitumen och eftersom det är kalla tekniker, dvs ballasten värms inte upp, så sparar man stora mängder energi.

Skumbitumen användes 1956 för första gången som bindmedel i jord av Dr Ladi H Csanyi vid Engineering Experiment Station, Iowa State University. Då tillverkades skumbitumen genom att injicera ånga i varm bitumen. Eftersom denna process var opraktisk utvecklade Mobile Oil i Australien, efter att ha förvärvat patentet, 1968 en modifierad process där kallt vatten injicerades istället för ånga. På detta sätt blev tekniken mer praktisk och ekonomisk [13].

Skumbitumenteknologin implementerades inte förrän i mitten på 1980-talet i stor skala och då som en kall teknik för att återvinna asfalt. Skumbitumen teknologin introducerades tidigt i Australien och Sydafrika [13][14] och användningen är idag utbredd där. Även om skumbitumenteknologin är gammal så är dess spridning relativt begränsad i Norden även om det finns ett stigande intresse för kall asfaltsteknik [2] [15].

2.5 Ekonomi

Baserat på verkliga entreprenader i Holland har NYNAS bitumen [16] tillhandahållit följande ungefärliga uppgifter på kostnader vid skumbitumenstabilisering med Wirtgen KMA 200 mobilt blandningsverk som ställs upp i anslutning till arbetsplatsen. Den ungefärliga kostnaden är 2.25-3.25 euro per ton och baseras sig på 1 veckas arbete och en produktion av 1000-1500 ton per dag. Till denna kostnad kommer kostnaden för bitumen inklusive leverans till arbetsplatsen samt transportkostnad av utrustning till arbetsplats samt eventuell vänttid.

3 Metod

3.1 Provtagning av bottenaska

Ett prov av behandlad bottenaska togs i september 2002 på SYSAV:s avfallsanläggning i Malmö. Provet togs från bottenaska som genom gått behandling enligt det system som var i drift på SYSAV:s anläggning mellan 1985 och 2003. Den kylda bottenaskan transporterades från förbränningsanläggningen till en sorteringsanläggning på Spillepengs deponeringsanläggning där bottenaskan först förlagrades under ca. 1 vecka. Den förlagrade bottenaskan behandlades sedan i ett sorteringsverk där grov- och finskrot avskiljs i magnetavskiljare och rejekt (> 45 mm) sållas bort. Resten, den behandlade bottenaskan lagrades sedan under minst 6 månader i stora högar. Den mognade, färdiga produkten, s.k. slaggrus, består således av ett blandat stabiliserat material som är < 45 mm.

Den bottenaska som användes i detta projekt hade lagrats utomhus i c:a 20 månader. Ett stort prov på uppskattningsvis 4 ton togs ut ur högen från ett par ställen med hjälp av en frontlastare. Ett homogent prov på c:a 350 kg preparerades genom så kallad konkvadring delvis för hand med skyffel och delvis med hjälp av en frontlastare, se. Figur 2.



Figur 2. Kvadrering med hjälp av spade (Foto: David Bendz).

Figure 2. Performing the square method with shovel (Photo: David Bendz).

Det homogena provet siktades genom en 20 mm sikt och lagrades i plasttunnor med tättslutande lock fram till användandet. Kornstorleksfördelningen på två delmängder på vardera 1.5 kg bestämdes av SGI:s lab enligt standard SS027123. Innan siktningen torkades materialet i 105°C till dess att provets massa var konstant.

Det materialet som användes vidare i denna studie siktades ytterligare en gång med en 11.3 mm sikt.

3.2 Behandling med skumbitumen

Ungefär 30 kg av bottenaskan skickades till NYNAS Bitumen laboratoriet i Belgien för behandling med skumbitumen i en bänkskaleanläggning. Materialet skumbitumenbehandlades den 2 maj 2003 och skickades sedan tillbaka till Sverige i lufttäta plastpåsar. Ett antal provkroppar preparerades av NYNAS laboratorium för testning på VTIs laboratorium med avseende på hållrumshalt och mekaniska egenskaper. Cylindriska provkroppar tillverkades genom gyratorisk packning enligt följande:

- Tryck: 350 kPa
- Vinkel: 1,25°
- Varv: 100

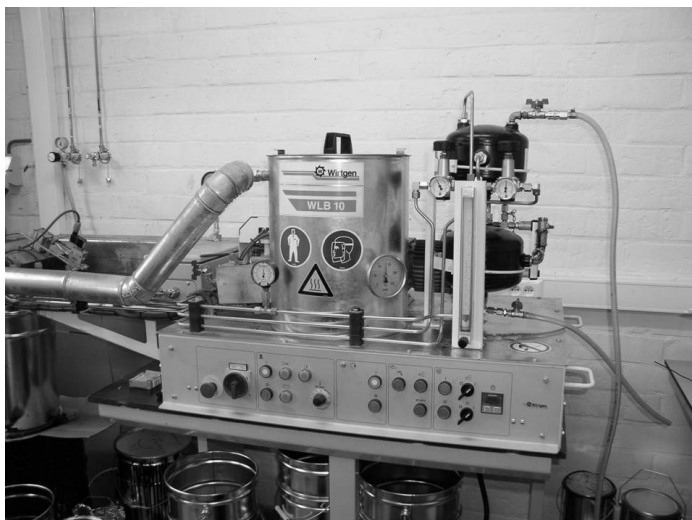
Efter inpackning lagrades de 7 dygn vid +40°C. Det innebär att provkropparna efterlagrades i 1,5-2 månader innan de testades (kan ha påverkat hållfastheten något). Provkropparna hade diametern 100 mm och var 60-65 mm höga.

Följande bindemedel och recept ingick i provserierna:

- § Emulsion, E3, C2 (3 % emulsion + 2 % cement)
- § Emulsion, N3, C2 (3 % emulsion + 2 % cement)
- § Skumbitumen, F2, (2 % skumbitumen)
- § Skumbitumen, F45, (4,5 % skumbitumen)
- § Skumbitumen, F45 C15 (4,5 % skumbitumen + 1,5 % cement)
- § Cement, C3 (3 % cement)

Fyra provkroppar tillverkades per blandning, varav tre användes för de geotekniska testerna och en användes för ytutlakningsförsök (men endast F2 och F45 blandningen). Skumbitumen var av kvaliteten 70/100. Noterbart är att proverna med skumbitumen består av ett hårdare bindemedel än emulsionen, vilket påverkar de mekaniska egenskaperna (ger högre värden).

Den bänkskaleutrustningen som användes av NYNAS Bitumen för att producera skumbitumen var tillverkad av WIRTGEN, model WLB 10, se Figur 3. Den producerade skumbitumen blandades med bottenaskan i en roterande trumma (som inte syns på bilden).



Figur 3. Bänkskaleutrustningen som användes för att producera skumbitumen

Figure 3. The bench-scale equipment that was used for production of foamed bitumen

Den bitumen som användes härstammar från Venezuela och hade en penetrationsgrad på 80. Följande uppgifter på den kemiska kompositionen tillhandahölls av NYNAS [17]:

Tabell 2. Beståndsdelar bitumen

Table 2. Composition bitumen

Ämne	Mass-%
Asfaltener	19,6 %
Resins	21,6 %
Aromater	51,1 %
Saturater	7,8 %
Nickel	680 mg/kg
Vanadin	90 mg/kg

3.3 Partikelyta och partikelporositet

Tre provmängder på vardera 300-400 g av originalaskan och den skumbitumenbehandlade askan, blandning F2 och F45, torkades försiktigt i 40°C till massan var konstant. Vart och ett av de tre proverna delades upp med hjälp av siktar i tre storleksfraktioner: 0,5-1 mm, 1-2 mm och 2-4 mm. Dessa provmängder analyserade med BET N₂ adsorptions experiment och den specifika ytan och partikelporositeten

bestämdes. Experimenten utfördes på avdelningen för kemiteknik på Lunds Tekniska Högskola med en Gemini III 2375 (Micromeretics).

3.4 Karakterisering av lakegenskaper

Den obehandlade bottenaskan användes som referens. Alla experiment och undersökningar utfördes på både referensprovet och de skumbitumenbehandlade askorna F2 och F45.

Följande laktester utfördes på de tre askorna:

- Skakförsök och kolonnförsök enligt lakstandard EN12457-4 respektive EN 14405.
- pH statisk laktest (prEN14997).
- Ytutlakningsförsök (NEN 7345) på två cylindriska provkroppar tillverkade av F2 respektive F45 blandningen. Provkropparna var tillverkade enligt beskrivningen i avsnitt 3.2.

Eluaten från laktesterna analyserades på institutionen för växtekologi vid Lunds Universitet. Följande analystekniker användes:

- TOC analysutrustning för att bestämma IC and TOC
- Jonkromatography för Cl, NO₃-N, och SO₄-S
- ICP AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) och ICP MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy) för Al, Ag, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, V and Zn

Den utrustning som användes var: TOC analys utrustning från Shimadzu, Jonkromatograf Dionex med kolonner AG14 and AS14A, ICP AES instrument P-E 3000DV och ICP MS instrument Elan 6000.

3.5 Geoteknisk undersökning

3.5.1 Allmänt

Provkroppar bestående av bunden (stabiliserad) bottenaska testades på VTIs laboratorium med avseende på hållrumshalt och mekaniska egenskaper.

Antal prov som undersöktes per blandning var 3 st. Vid den okulära besiktningen av provkropparna observerades att de var ömtåliga för repning (spröda). Det innebär att materialet inte är så lämpligt för slitlager. Några av provkropparna var kantstöta men fullt provningsbara. Proverna förvarades fram till provningstillfället i plastpåsar.

3.5.2 Provningsmetoder

Provkropparna analyserades med inriktning hållrumshalt och hållfasthet. Provningarna utfördes enligt den standard som finns för asfaltmaterial (FAS-metoder eller ASTM) och cementgrus (SS). Följande analyser utfördes:

Bitumenbunden bottenaska:

- Hållrumshalt, skrymdensitet och kompaktdensitet
- Styvhetsmodul vid +10°C
- Marshallstabilitet vid rumstemperatur

Cementbunden bottenaska:

- Skrymdensitet
- Tryckhållfasthet vid rumstemperatur

När hållfastheten hos kalltillverkade asfaltmassor skall testas finns ett förfarande för preparering av provkroppar (VVMB 701, Bestämning av vattenkänslighet hos kalla och halvvarma asfaltmassor genom pressdragprovning). I metoden som givits ut av Vägverket 2001 beskrivs bland annat blandningsförfarande, packning av provkroppar och lagring av proven innan hållfasthetsprovning. Det är faktorer som inverkar på provningsresultatet.

Skrymdensitet bestämdes genom FAS metod 427 där proverna vägs under vatten (avsedd för prov med tätare sammansättning) och genom FAS metod 448 där provets volym bestäms genom mätning med skjutmått (avsedd för prov med öppnare sammansättning). Kompaktdensiteten bestämdes på en provkropp per serie. Hållrumshalten beräknas från kompakt- och skrymdensiteterna (FAS 413).

Styvhetsmodulen bestämdes vid +10°C och följde FAS metod 454 (Bestämning av styvhetsmodulen hos asfaltbetong genom pulserande pressdragprovning). Styvhetsmodulen som är ett mått på materialets lastfördelande förmåga (bärighet) påverkas av bindemedelshalten och bindemedlets hårdhet i provblandningarna. Även härdningstiden (skiljer något mellan skum och emulsion) har betydelse för hållfastheten.

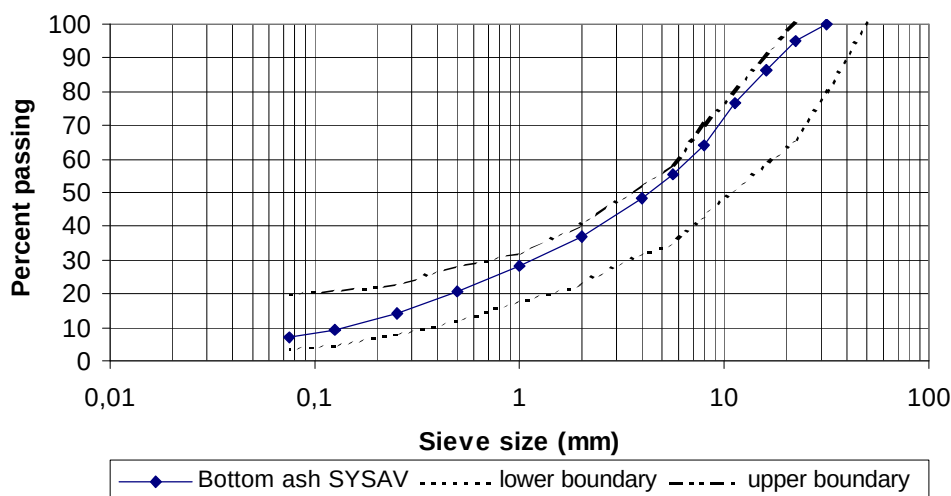
Provning av stabilitet på kalltillverkade asfaltmassor gjordes genom Marshallstabilitet (ASTM D 1559, krav i ATB VÄG för kall återvinning) vid +25°C.

Vid hållfasthetsprovning av cementbundet grus används tryckhållfastheten efter korttidslagring (7 dygn, ATB VÄG).

4 Resultat undersökning av korn

4.1 Kornstorleksfördelning

Askans kornstorleksfördelning redovisas i Figur 4. Enligt [14] är det önskvärt att kornstorleksfördelningen vid skumbitumenbehandling ligger inom det intervall (över och undre gräns) som anges i figuren. Som framgår av Figur 4 så ligger kornstorleksfördelningen för askan väl inom det önskade intervallet.



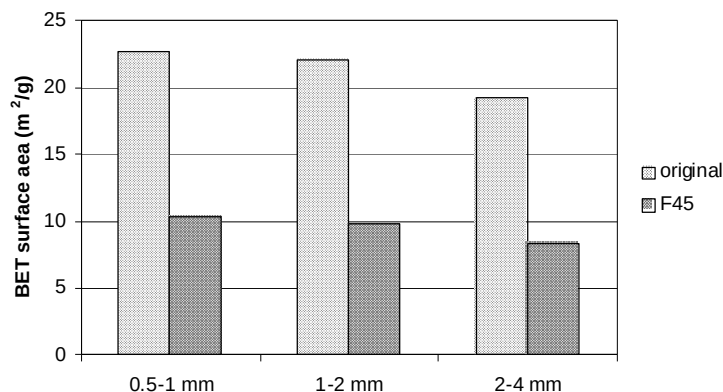
Figur 4. Kornstorleksfördelning bottenaska (< 20 mm) från SYSAV jämförd med önskat intervall enligt [14].

Figure 4. Particle size distribution bottom ash (< 20 mm) from SYSAV compared to ideal intervall given by [14].

4.2 BET-yta och porositet

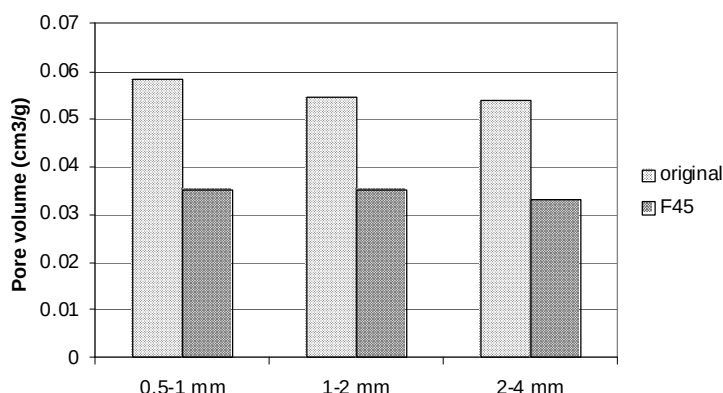
Resultatet från N_2 -experimenten redovisas i Figur 5 och Figur 6. Datan visar att både den specifika ytan och partikelporositeten för originalaskan ökar med minskande partikelstorlek, vilket är i enlighet med tidigare undersökningar [18][7]. I Figur 5 framgår det också tydligt att skumbitumenstabiliseringen har en kraftig effekt på den specifika ytan. För samtliga partikelklasser är den specifika ytan för F45 askan mer än 50% mindre jämfört med originalaskan. Partikelporositeten för F45 askan är c:a 40%

mindre jämfört med originalaskan, se Figur 6. Sammantaget så visar detta att askpartiklarna har blivit partiellt belagda med en bitumenfilm och en stor del av partiklarnas hålrum har blockerats.



Figur 5. Specifik yta, BET, (m^2/g) för original aska och den skumbitumenstabiliserade bottenaskan F45 för tre klasser av partikelstorlekar.

Figure 5. Specific surface, BET, (m^2/g) of the original ash and the bitumen stabilized bottom ash F45 for three different classes of particle sizes.



Figur 6. Partikelhårumsvolym (cm^3/g) för original aska och den skumbitumenstabiliserade bottenaskan F45 för tre klasser av partikelstorlekar.

Figure 6. Particle pore volume (cm^3/g) of the original ash and the bitumen stabilized bottom ash F45 for three different classes of particle sizes.

4.3 Okulärt intryck

Ganska förvånande så var det svårt att med blotta ögat se någon stor skillnad på den skumbitumenbehandlade askan och originalaskan. Den skumbitumenbehandlade askan

var något mörkare i färgen, men i övrigt var den lik originalaskan, se Figur 7. Skillnaden mellan askorna blir tydlig om mekanisk energi tillförs. Om den skumbitumenbehandlade askan kramas i handen häftar den samman, vilket originalaskan inte gör.



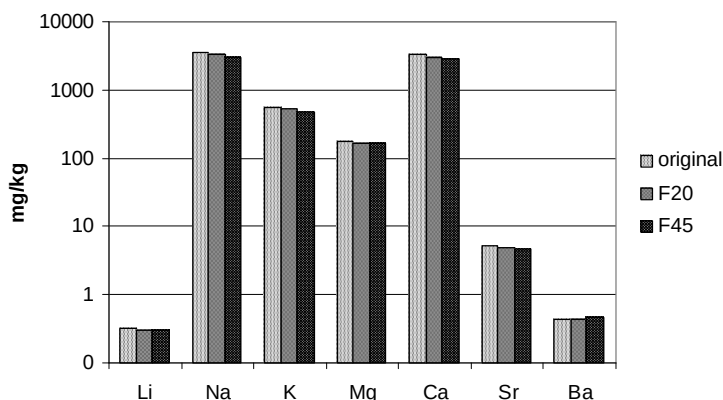
Figur 7. Originalaska och aska med skumbitumeninblandning (F45 (Foto: Mikael Svensson))

Figure 7. Original ash and foamed bitumen stabilized ash (F45) (Photo: Mikael Svensson)

5 Resultat karakterisering av lakegenskaper

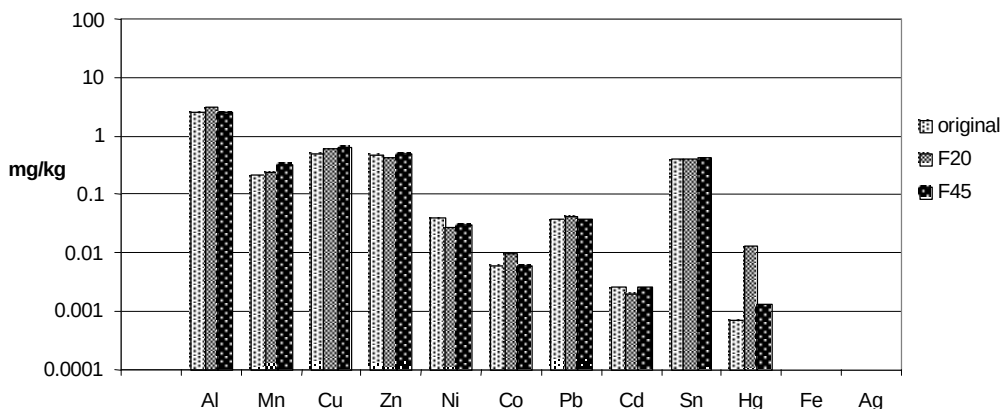
5.1 Skakförsök

Resultaten från skaktesterna redovisas i Figur 8-Figur 12 och sammanfattas i Tabell 5. Med undantag av Hg, NO₃-N och DOC så kan ingen signifikant skillnad i utlakade mängder vid L/S 10 detekteras mellan de tre askorna: originalaskan och de skumbitumenstabiliserade askorna F2 och F45. F2 askan uppvisar en utlakad mängd på 0.0127 mg/kg, vilket är en tiopotens högre än både originalaskan och F45 askan. Utlakningen av NO₃-N reduceras med ökande andel inblandad bitumen, medan DOC uppvisar motsatt beroende.



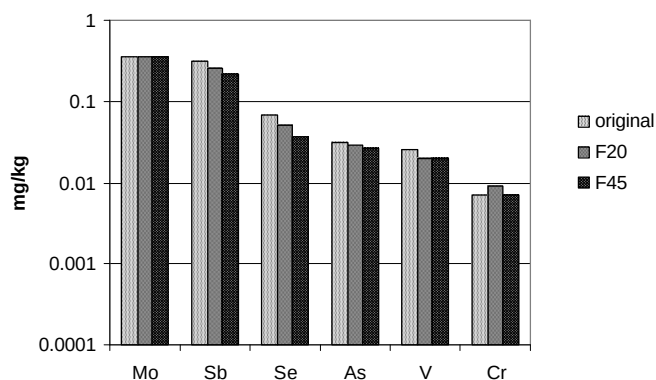
Figur 8. Alkali/jordalkalimetaller: Utlakade mängder vid L/S 10 (mg/kg) för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F2 och F45

Figure 8. Alkali/Alkali earth metals: Leached mass at L/S 10 (mg/kg) for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.



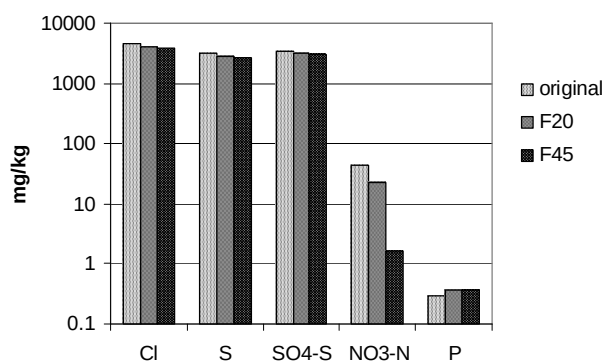
Figur 9. Metaller: Utlakade mängder vid L/S 10 (mg/kg) för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F2 och F45

Figure 9. Metals: Leached mass at L/S 10 (mg/kg) for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.



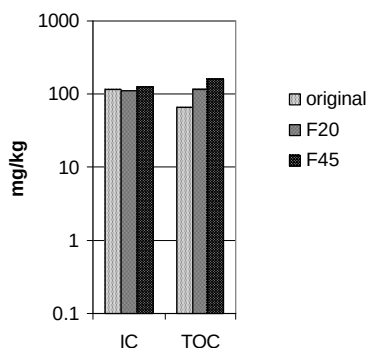
Figur 10. Oxyanjoner: Utlakade mängder vid L/S 10 (mg/kg) för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F2 och F45.

Figure 10. Oxyanions: Leached mass at L/S 10 (mg/kg) for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.



Figur 11. Anjoner: Utlakade mängder vid L/S 10 (mg/kg) för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F2 och F45.

Figure 11. Anions: Leached mass at L/S 10 (mg/kg) for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.



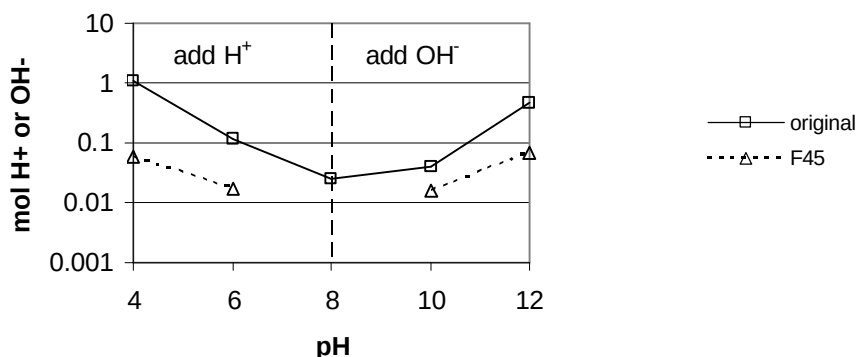
Figur 12. Oorganiskt och löst organiskt kol: Utlakade mängder vid L/S 10 (mg/kg) för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F2 och F45.

Figure 12. Inorganic and dissolved organic carbon: Leached mass at L/S 10 (mg/kg) for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.

5.2 PH statiska försök

5.2.1 Buffringskapacitet

Den totala mängd syra respektive bas som tillfördes vid pH-stat försöken är ett mått på askans syra- och basbuffringskapacitet. I Figur 13 har tillförd mängd H^+ och OH^- plottats vid respektive pH-nivå. Originalaskan krävde titrering med natriumhydroxid för att hålla ett stabilt pH vid 8 under försöket. Den behandlade askan F45 höll ett stabilt pH på 8.0 utan titrering. Effekten av skumbitumenbehandlingen framgår tydligt, den behandlade askan har en lägre buffringskapacitet både vid syra- och bastitrering. Det krävdes nästan 20 ggr större tillförsel av protoner för att hålla pH konstant vid 4 för originalaskan jämfört med den behandlade F45 askan. Denna skillnad i buffringskapacitet beror sannolikt på att den specifika ytan kraftigt reducerats vid skumbitumenbehandlingen (Figur 5) och att tillgängligheten på buffrande mineral därmed har minskat.

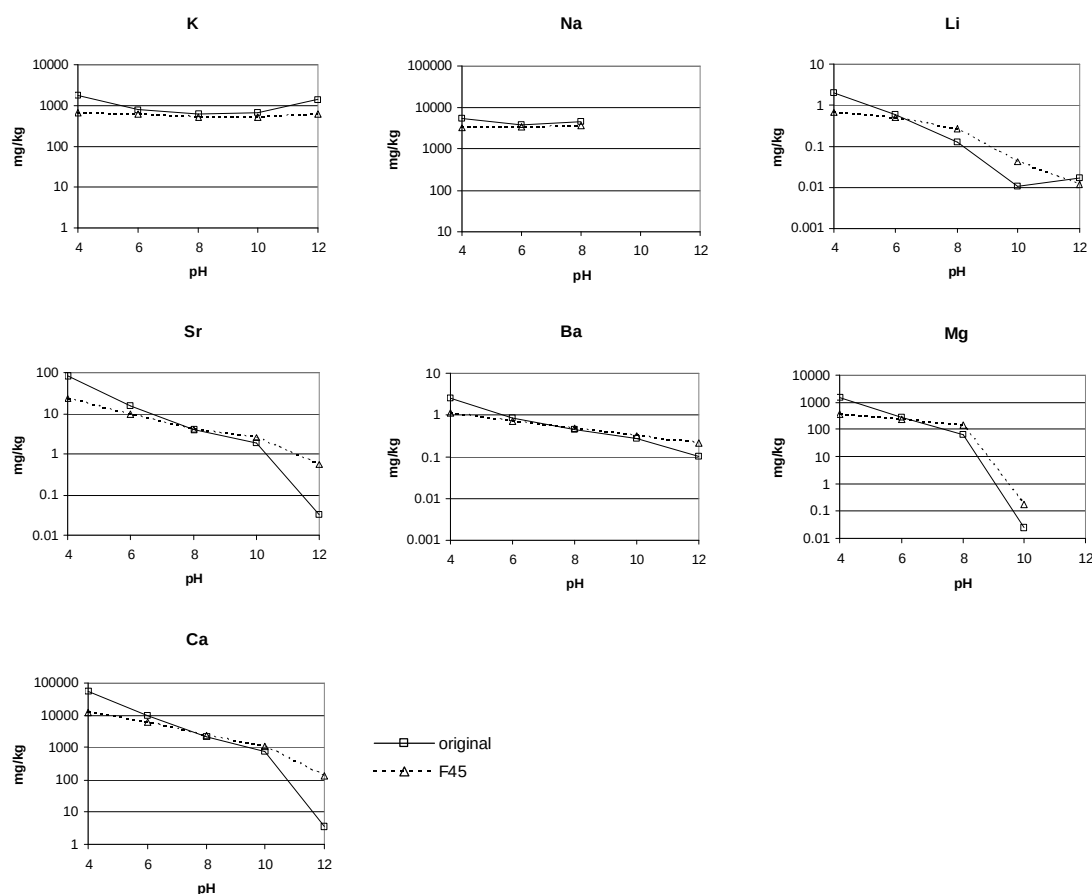


Figur 13. Buffringskapacitet för original askan och den skumbitumenbehandlade askan F45.

Figure 13. Buffer capacity for the original ash and the foamed bitumen treated ash F45.

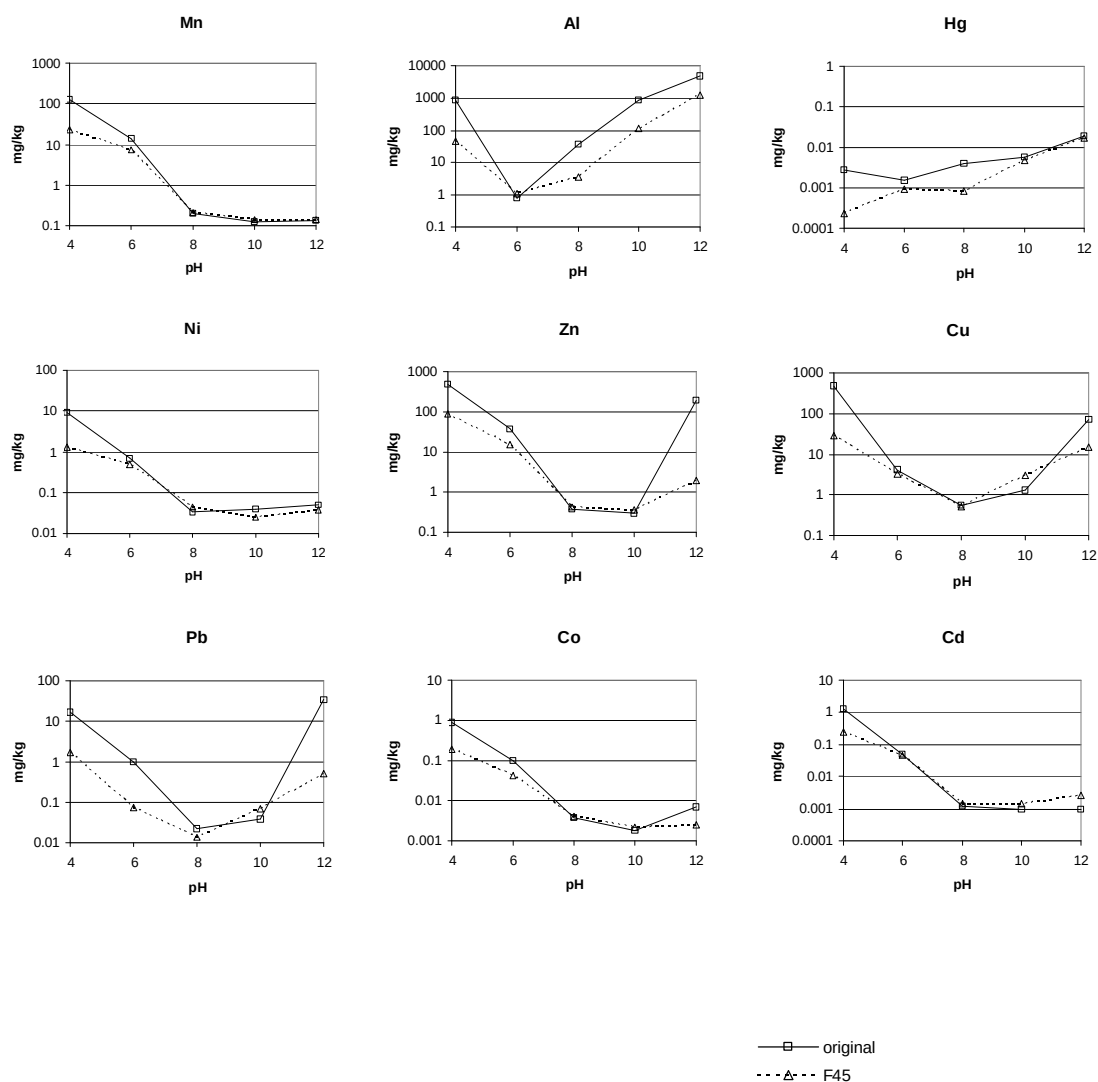
5.2.2 Utlakningens pH-beroende

Resultatet från de pH statiska försöken redovisas i Figur 14-Figur 18. De utlakade mängderna vid pH 8 uppvisar för många element endast en liten skillnad om resultaten från originalaskan och den skumbitumenstabiliserade F45 askan jämförs. Detta gäller alkali/jordalkalimetallerna (Figur 14) och Mn, Ni, Zn, Cu, Pb, Co, Cd, As och V (Figur 15). Först vid pH som representerar en högre löslighet manifesterar sig skumbitumenbehandlingen i mindre utlakade mängder. Detta indikerar att utlakningen vid pH 8 är löslighetstyrd och övergår till att kontrolleras av tillgänglig yta vid låga pH (se Mn, Ni, Cd) och för element som uppvisar amfotera egenskaper (Al, Zn, Cu, Pb, As, Cr), vid både höga och låga pH.



Figur 14. Alkali/jordalkalimetaller: Utlakade mängder (mg/kg) som funktion av pH för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F45

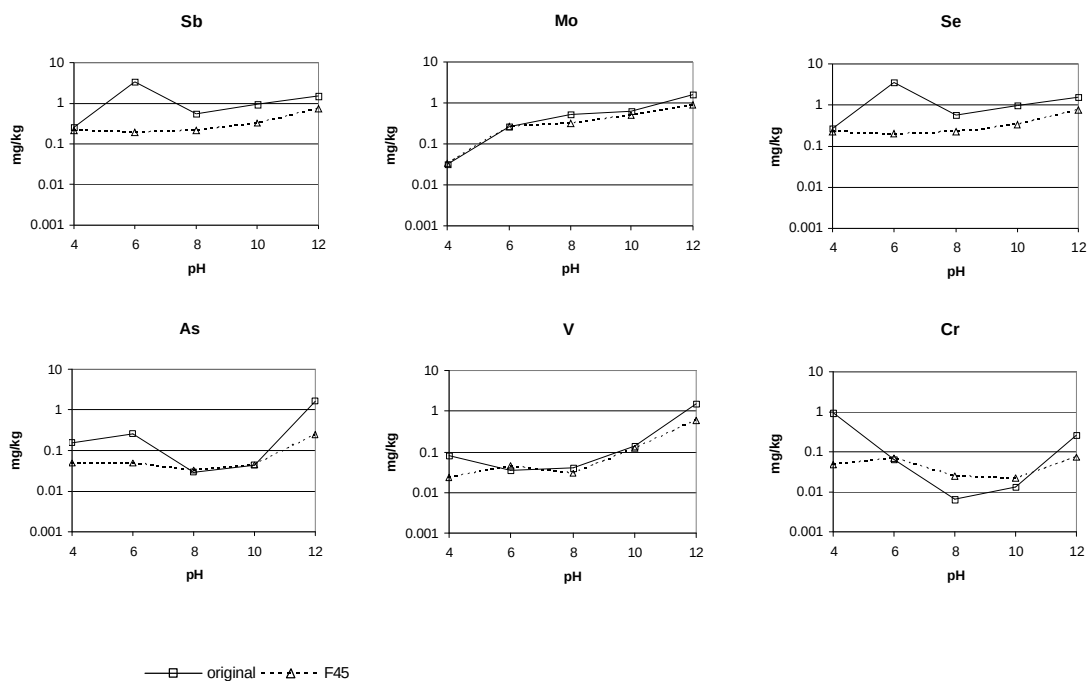
Figure 14. Alkali/Alkali earth metals: Leached mass (mg/kg) as a function of pH for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F45.



Figur 15. Utlakade mängder (mg/kg) som funktion av pH för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F45

Figure 15. Leached mass (mg/kg) as a function of pH for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F45.

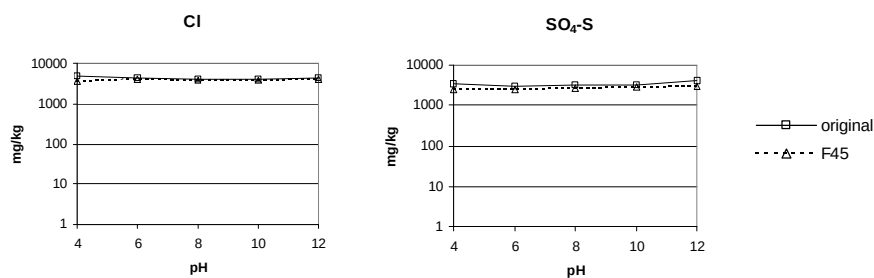
Utlakningen av oxyanjonerna uppvisar ett karakteristiskt pH-beroende med ökande löslighet med högre pH (Figur 16). För Sb och Se så uppvisar skumbitumenbehandlingen en positiv effekt över hela pH-intervallet, vilket indikerar att utlakningen styrs av tillgänglig yta hos askpartiklarna.



Figur 16. Oxyanjoner: Utlakade mängder (mg/kg) som funktion av pH för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F45

Figure 16. Oxyanions: Leached mass (mg/kg) as a function of pH for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F45.

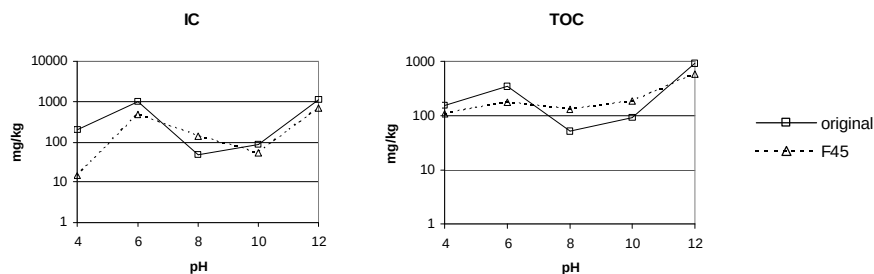
Skumbitumenstabiliseringen gav ingen effekt på utlakningen av Cl och SO₄ (Figur 17).



Figur 17. Anjoner: Utlakade mängder (mg/kg) som funktion av pH för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F45

Figure 17. Anions: Leached mass (mg/kg) as a function of pH for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F45

Utlakningen av oorganiskt och organiskt kol uppvisar ett sinusformat pH-beroende. Den utlakade mängden av oorganiskt kol vid pH 4 är signifikant lägre för den behandlade askan.



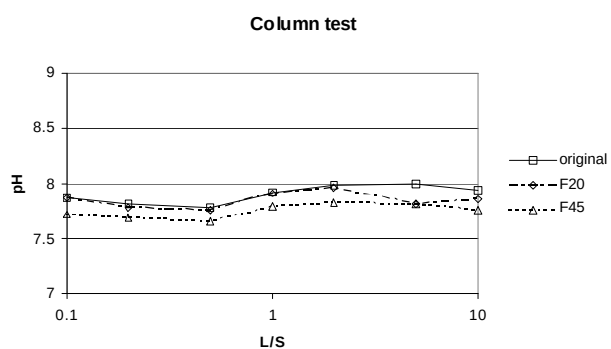
Figur 18. Oorganiskt kol och organiskt kol: Utlakade mängder (mg/kg) som funktion av pH för originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan F45

Figure 18. Inorganic and organic carbon: Leached mass (mg/kg) as a function of pH for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F45

5.3 Kolonnförsök

5.3.1 pH och konduktivitet

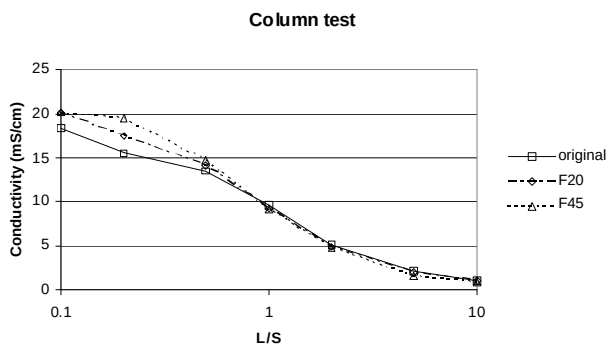
Originalaskan hade ett pH som låg mellan 7.8 and 8.0 under kolonnförsökets gång. Upp till L/S 5 hade F2 askan en pH utveckling som var lika originalaskan. Efter L/S 5 sjönk pH något för F2 askan. För F45 askan låg pH under hela försöket mellan 7.6 och 7.8, vilket är något under originalaskan.



Figur 19. Utveckling av pH under kolonntesterna

Figure 19. Development of pH during column tests

Med undantag av de första provtagningarna (L/S 0.1 och 0.2) var konduktiviteten för de tre kolonnerna närmast identisk. Vid L/S 0.1 var konduktiviteten 18.4 mS/cm för original askan och 20.1 mS/cm för the F2 material and the F45 material. Vid L/S 0.2 var konduktiviteten 19.5 mS/cm för F45 askan, 17.4 mS/cm för F2 askan och 15.5 mS/cm för originalaskan. Skillnaden mellan de tre kolonnerna upphörde efter L/S 0.5.

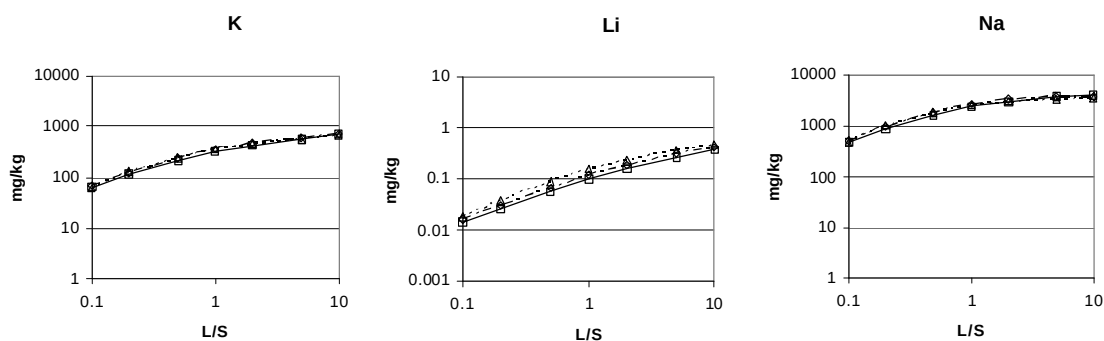


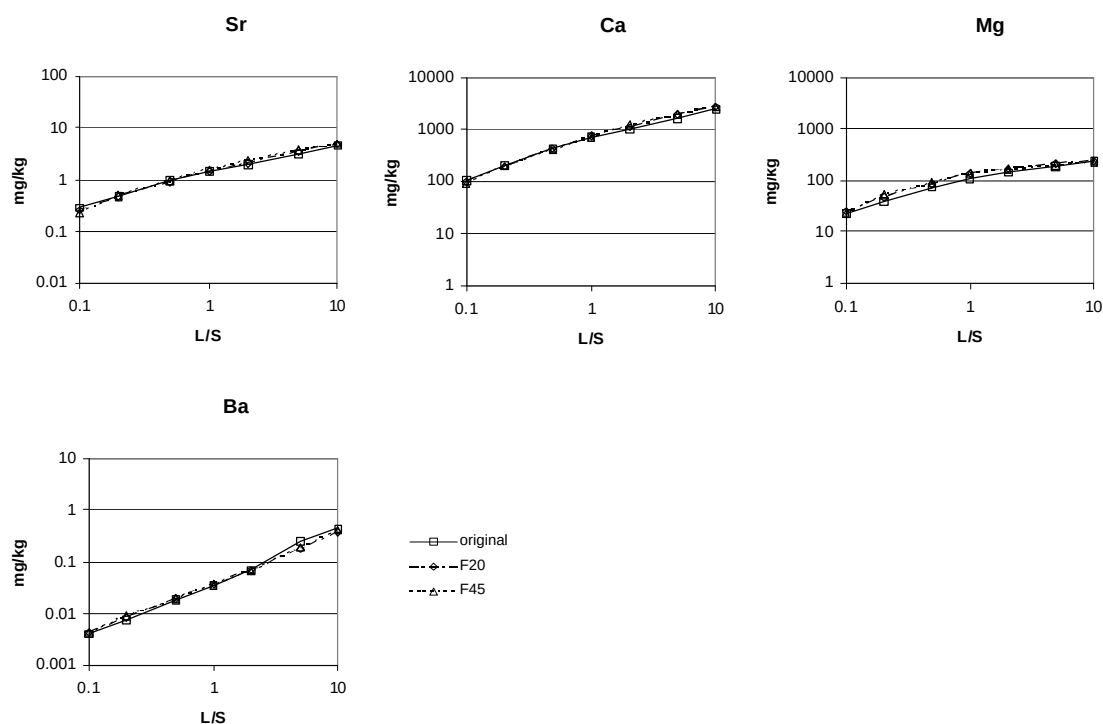
Figur 20. Utveckling av konduktivitet under kolonntesterna

Figure 20. Development of conductivity during column tests

5.3.2 Utlakade mängder

De utlakade mängderna i kolonnförsöken redovisas i Figur 21-Figur 25. För alkali och jordalkalimetallerna är utlakningsförloppet i det närmsta identiskt för de tre kolonnerna och ingen effekt av skumbitumenbehandlingen kan iakttagas (Figur 21).



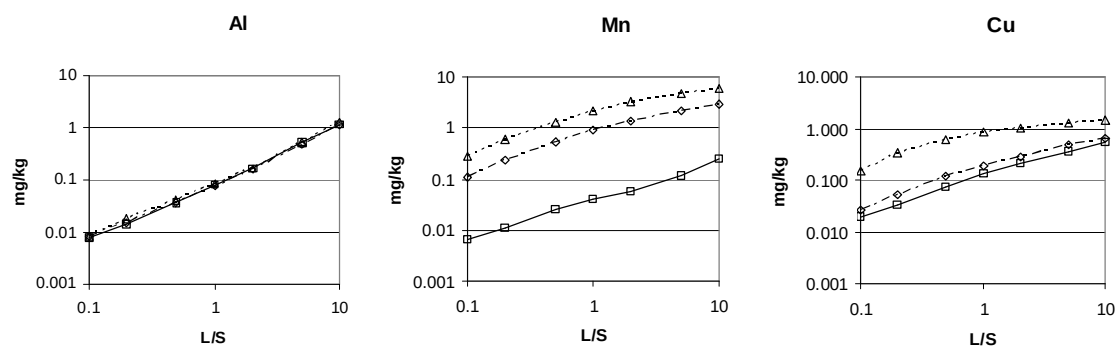


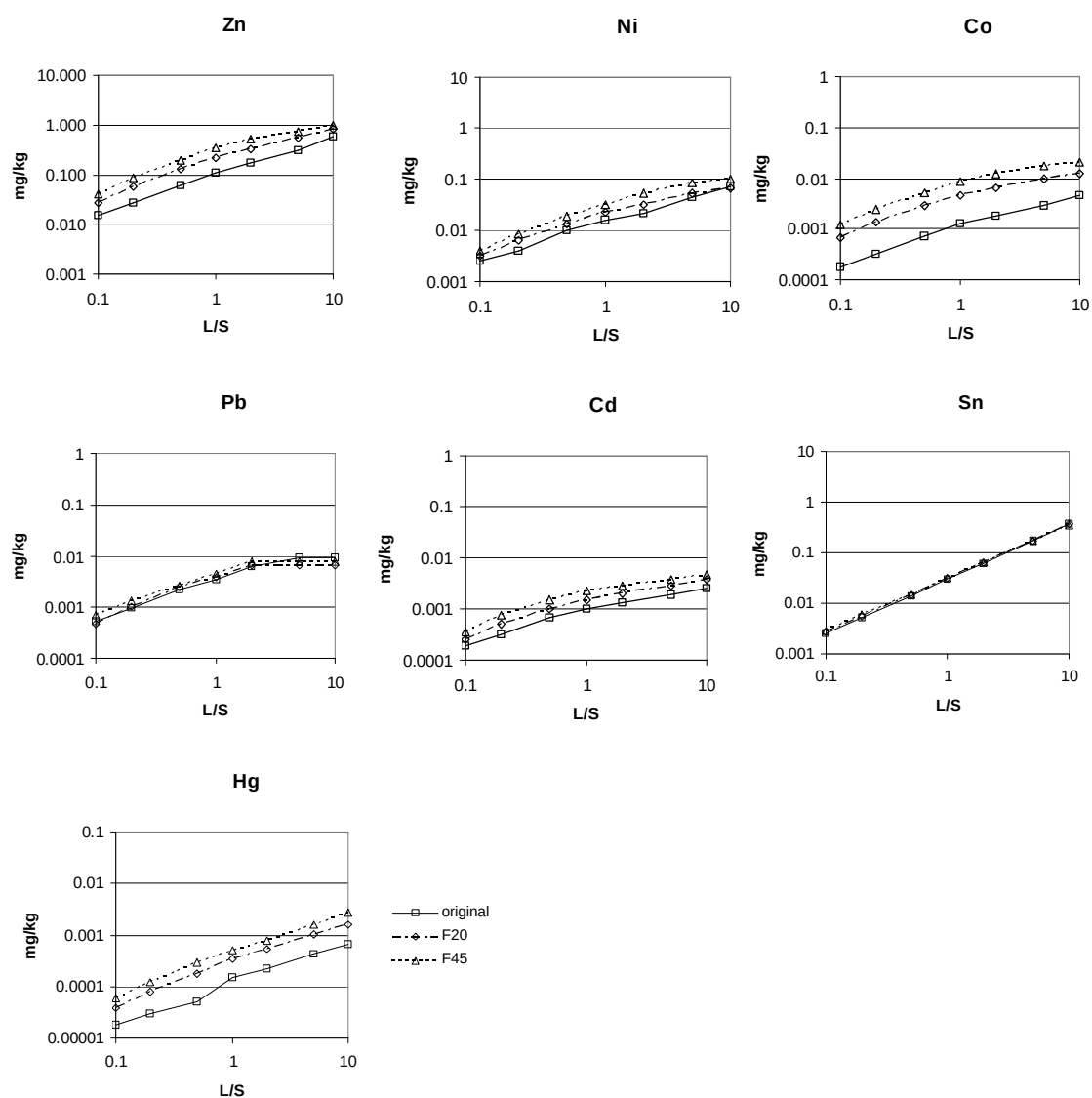
Figur 21. Alkali/jordalkalimetaller: Kumulativ utlakad mängd (mg/kg) som funktion av L/S för originalaskan och de skumbitumenstabiliserade askorna F2 och F45.

Figure 21. Alkali/Alkali earth metals: Cumulative leached mass (mg/kg) as a function of L/S for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.

Metallerna Mn, Cu, Zn, Ni, Co, Cd och Hg uppvisar alla en förhöjd utlakning för de skumbitumenbehandlade askorna med högst utlakning för F45 askan. Den totala utlakade mängden av Mn vid L/S10 är 0.26 mg/kg för originalaskan och 5.92 mg/kg för F45 askan. Den totala utlakade mängden Cu vid L/S10 är 0.54 mg/kg för originalaskan och 1.47 mg/kg för F45 askan. För övriga resultat se Tabell 5.

Utlakningen av Al, Pb och Sn uppvisar ingen effekt av skumbitumenbehandlingen

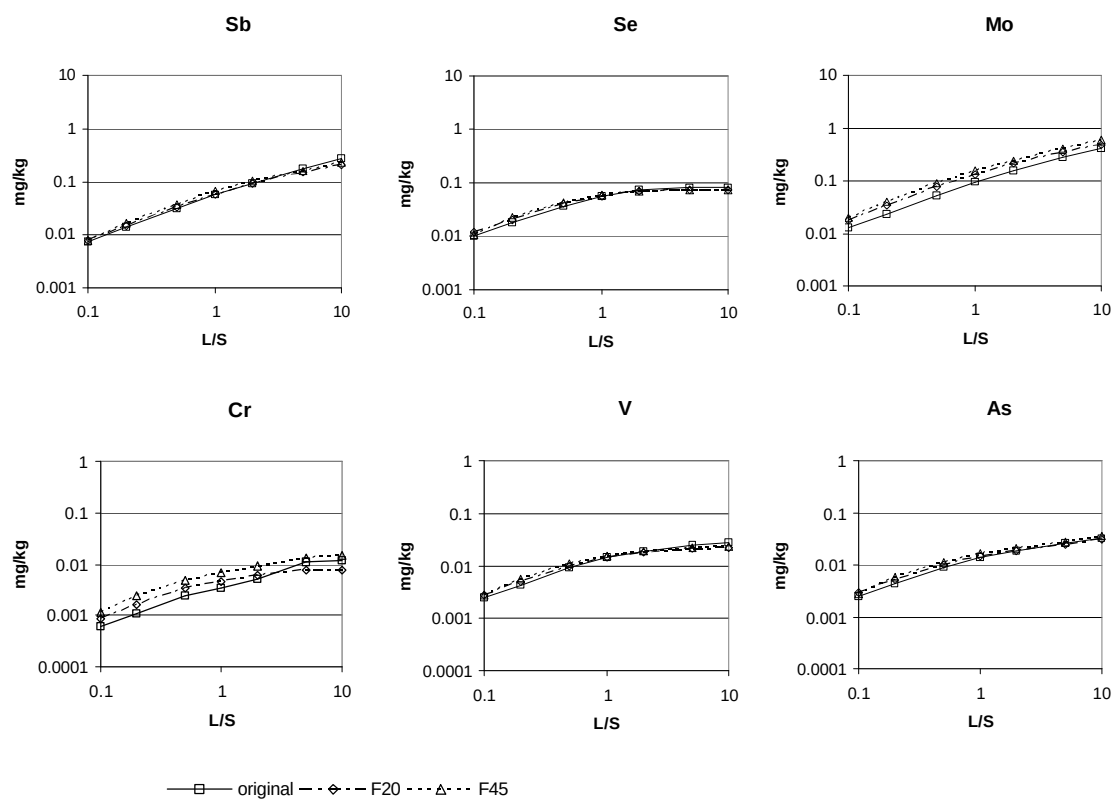




Figur 22. Metaller: Kumulativ utlakad mängd (mg/kg) som funktion av L/S för originalaskan och de skumbitumenstabiliserade askorna F2 och F45.

Figure 22. Metals: Cumulative leached mass (mg/kg) as a function of L/S for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.

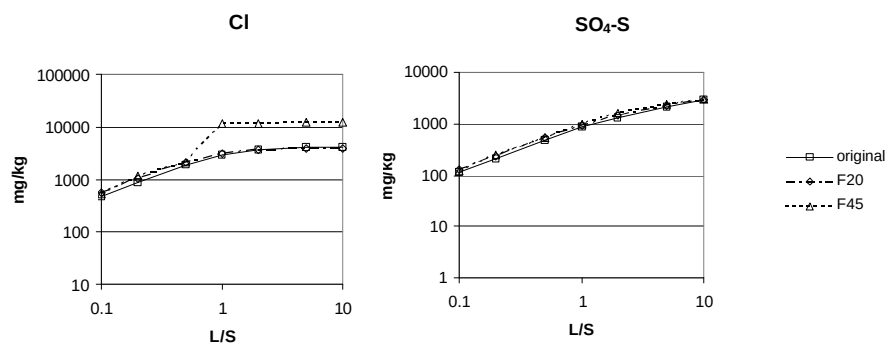
Skumbitumenbehandlingen gav ingen signifikant effekt på utlakningen av Sb, Se, V och As. En något förhöjd utlakning av Mo och Cr för skumbitumenstabiliserade askorna kunde uppmätas (Figur 23).



Figur 23. Oxyanjoner: Kumulativ utlakad mängd (mg/kg) som funktion av L/S för originalaskan och de skumbitumenstabiliserade askorna F2 och F45.

Figure 23. Oxyanions: Cumulative leached mass (mg/kg) as a function of L/S for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.

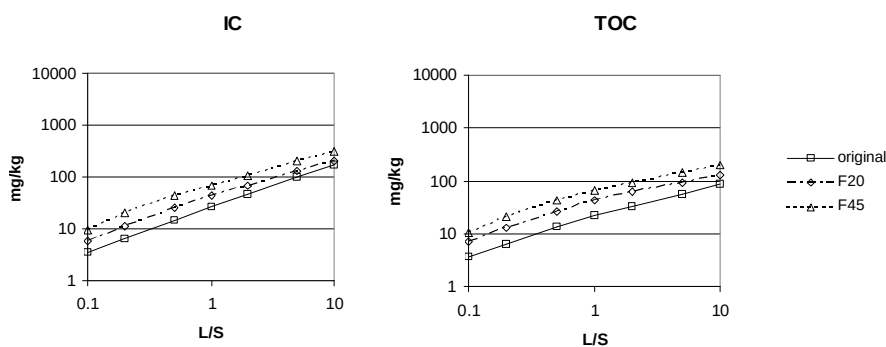
Skumbitumenbehandlingen gav ingen effekt på utlakningen av Cl och SO₄.



Figur 24. Anjoner: Kumulativ utlakad mängd (mg/kg) som funktion av L/S för originalaskan och de skumbitumenstabiliserade askorna F2 och F45.

Figure 24. Anions: Cumulative leached mass (mg/kg) as a function of L/S for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.

De skumbitumenbehandlade askorna uppvisade en förhöjd utlakning av både oorganiskt och organiskt kol. Den totala utlakade mängden DOC vid L/S10 var 86 mg/kg för originalaskan, 128 mg/kg för F2 askan och 199 mg/kg för F45 askan. För övriga resultat se Tabell 5.



Figur 25. Oorganiskt och organiskt kol: Kumulativ utlakad mängd (mg/kg) som funktion av L/S för originalaskan och de skumbitumenstabiliserade askorna F2 och F45.

Figure 25. Inorganic and organic coal: Cumulative leached mass (mg/kg) as a function of L/S for the original bottom ash and the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.

5.4 Ytutlakningsförsök

Ytarean, volymen och massan för de två provkropparna tillverkade av F2 och F45 aska redovisas i Tabell 3. Beredningen av provkropparna beskrivs i kapitel 3.2.

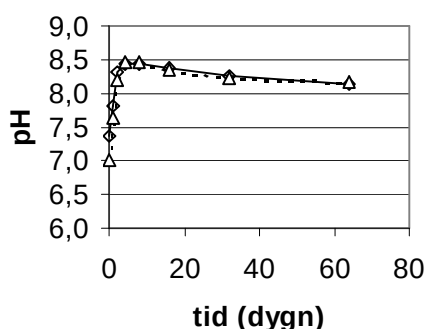
Tabell 3. Data provkroppar

Table 3. Data samples

	F2	F45
A (m ²)	0.01762	0.01766
V (dm ³)	0.479	0.487
M (kg)	0.8332	0.08423

Den totala volymen lakvätska vid ytutlakningsförsöken var 2.5 dm^3 för båda provkropparna.

Utvecklingen av pH sjönk ned mot 8.1 under försökets gång, se Figur 26.

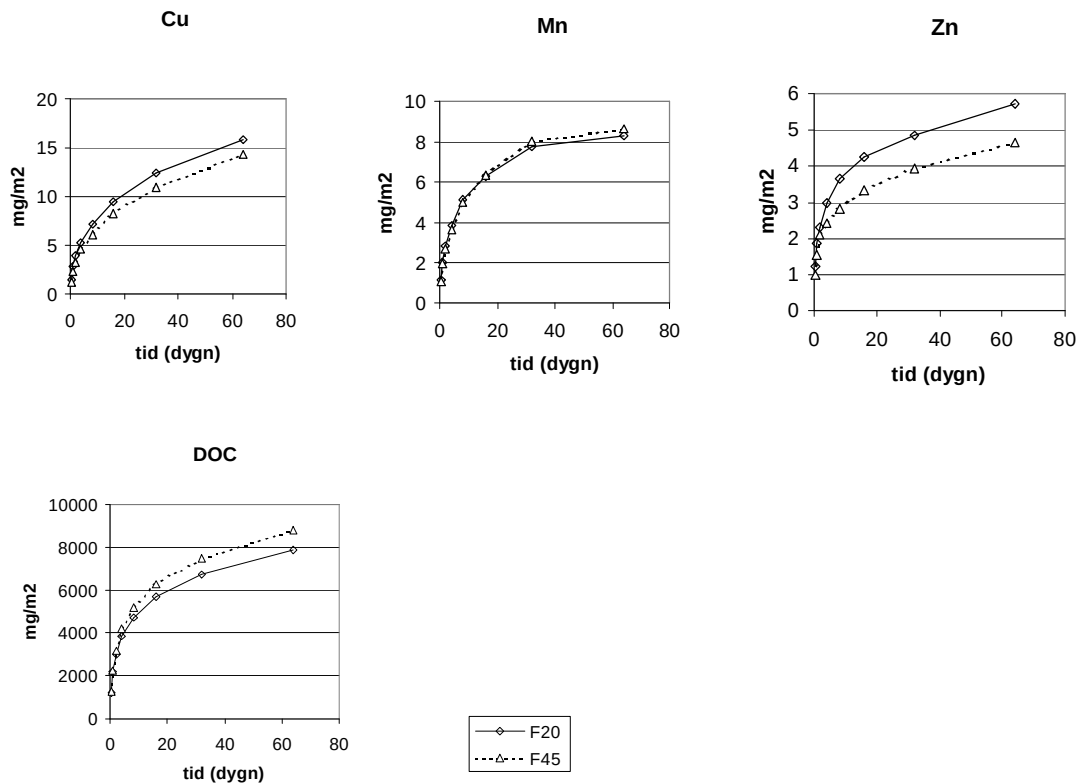


Figur 26. Utveckling pH F2 och F40 monoliter

Figure 26. Development pH F2 and F45 monoliths

I Tabell 4 redovisas resultatet från ytutlakningstestet som kumulativa mängder vid de 8 provtagningstillfällena. I samtliga 8 prov för både F2 och F45 understegs detektionsgränserna för Fe ($<0.005 \text{ mg/l}$), Co ($<0.05 \cdot \text{g/l}$) och Hg ($<0.02 \cdot \text{g/l}$). Koncentrationerna understeg i ett antal fall detektionsgränserna för As, Cd, Cr, Ni (se fotnot till Tabell 4). Vid beräkningen av utlakad mängd (mg/m^2) antogs i dessa fall att koncentration uppgick till den övre gräns som angetts av analyslaboratorium.

Elementen Cu, Mn, Zn, Co, Cd och Hg uppvisade signifikant skillnad mellan originalaska och de skumbitumenbehandlade askorna i kolonnlaktesten, vilket redovisats i kapitel 5.3.2. Ökande andel skumbitumeninblandning gav ökade utlakade mängder. Resultatet från ytutlakningstesten (NEN7345) uppvisade Co och Hg halter som var under detekterbarhetsgränsen för både F2 ($<0.05 \cdot \text{g/l}$) och F45 ($<0.02 \cdot \text{g/l}$) provkroppen. Resultat för Cu, Mn, Zn och DOC har plottats i Figur 27. För de ämnen som vid kolonnförsöken visade en tydligast påverkan av skumbitumenbehandlingen, Cu och Mn, så visar resultaten från monolitlakförsöken en positiv påverkan av skumbitumenbehandlingen. En högre inblandningskvot av bitumen gav en lägre utlakning av Cu och Mn trots att utlakningen av DOC ökade.



Figur 27. Kumulativ utlakad mängd (mg/m²), monolit laktest (NEN 7345), som funktion av tiden (dagar) för de skumbitumenstabiliserade askorna F2 och F45.

Figure 27. Cumulative leached mass (mg/m²), monolithic leaching test (NEN 7345), as a function of L/S for the foamed bitumen stabilized ash F2 and F45.

Det är inte möjligt att på ett enkelt sätt relatera resultat från ytutlakningstest med resultat från skak- eller kolonnlaktest. Medan resultat från skak- eller kolonnlaktest kan skalas upp för att göra prediktioner i ett fältscenario, genom att utgå från en utlakad mängd vid ett viss L/S förhållande, så låter sig inte detta göras på ett enkelt sätt för monolitiska material och resultat från ytutlakningstest. I ett fältscenario så kommer det monolitiska materialets exponerade yta och flödes hastigheten att ha betydelse för koncentrationen i det bildade lakvattnet.

Tabell 4. Resultat monolit laktest (NEN 7345) kumulativt utlakade mängder (mg/m2).

Table 4. Result monolithic leaching test (NEN 7345) cumulative leached mass (mg/m2).

	F2								F45							
Tid (dygn)	0,25	1	2	4	8	16	32	64	0,25	1	2	4	8	16	32	64
Ca mg/l	8809	15533	21320	28951	38087	48711	61563	78301	7788	13395	17841	24043	32256	42961	56002	72427
Fe ¹⁾																
K	3163	5745	7986	10979	14227	17391	20469	23590	3993	6344	8043	10167	12772	15816	19016	22401
Mg	791,5	1304	1739	2392	3115	3826	4603	5565	1041	1515	1835	2264	2825	3507	4285	5245
Na	31207	46952	60740	81450	1E+05	1E+05	1E+05	1E+05	45594	58564	67159	78459	92463	1E+05	1E+05	1E+05
S	8497	15533	21547	29803	40895	55931	74230	94656	8029	14202	19073	26210	35753	48200	63634	84165
Al	9,702	32,54	63,18	95,81	133,1	174,1	211,3	234,7	5,975	24,67	47,32	74,93	104,8	137	163,3	185,7
As	³⁾ 0,284	³⁾ 0,567	²⁾ 0,709	1,065	1,328	1,525	1,759	1,977	³⁾ 0,425	³⁾ 0,566	³⁾ 0,708	²⁾ 0,85	1,073	1,341	1,495	1,797
Ba	3,036	7,788	12,82	19,75	28,02	37,75	49,66	63,85	2,393	5,834	9,345	15,09	22,68	32,47	44,4	57,66
Cd • g/l	0,098	0,106	0,115	³⁾ 0,122	³⁾ 0,13	0,139	³⁾ 0,146	³⁾ 0,153	0,29	0,303	0,332	0,34	0,349	0,359	0,367	³⁾ 0,374
Co ⁵⁾																
Cr	³⁾ 0,007	³⁾ 0,014	³⁾ 0,021	³⁾ 0,028	³⁾ 0,035	³⁾ 0,043	0,124	0,213	³⁾ 0,007	³⁾ 0,014	³⁾ 0,021	0,094	³⁾ 0,101	³⁾ 0,108	³⁾ 0,115	0,196
Cu	1,532	2,813	3,898	5,331	7,203	9,487	12,37	15,87	1,192	2,341	3,207	4,542	6,128	8,238	10,97	14,3
Hg ⁶⁾																
Mn	1,138	2,047	2,817	3,826	5,104	6,254	7,8	8,31	1,076	1,954	2,697	3,619	4,976	6,37	8,041	8,661
Ni	0,095	³⁾ 0,102	³⁾ 0,109	³⁾ 0,116	³⁾ 0,123	³⁾ 0,13	0,219	0,409	0,092	³⁾ 0,099	³⁾ 0,106	³⁾ 0,113	³⁾ 0,12	³⁾ 0,127	0,203	0,296
Pb	0,515	0,735	0,85	1,018	1,129	1,216	1,323	1,449	1,376	1,58	1,793	1,938	2,094	2,186	2,295	2,438
Sb	0,37	0,874	1,355	2,014	2,941	4,27	6,1	8,539	0,324	0,77	1,219	1,946	2,915	4,331	6,144	8,523
Se	0,069	0,114	0,156	0,217	0,283	0,354	0,415	0,458	0,068	0,106	0,135	0,174	0,219	0,278	0,337	0,403
Zn	1,247	1,851	2,289	2,976	3,638	4,241	4,829	5,702	0,976	1,543	2,087	2,406	2,822	3,322	3,925	4,66
Cl	4,70E4	7,04E4	8,45E4	1,15E5	1,40E5	1,54E5	1,59E5	1,62E5	6,50E4	8,61E4	9,77E4	1,11E5	1,32E5	1,50E5	1,64E5	1,69E5
SO4	2,03E4	3,73E4	4,92E4	6,94E4	9,50E4	1,34E5	1,85E5	2,42E5	2,19E4	3,82E4	5,13E4	6,88E4	9,63E4	1,31E5	1,76E5	2,34E5
DOC	1234	2156	2965	3844	4738	5688	6752	7901	1260	2251	3172	4177	5182	6273	7476	8765

¹⁾ <0.005 mg/l ²⁾ <1 • g/l ³⁾ <2 • g/l ⁴⁾ <3 • g/l ⁵⁾ <0.05 • g/l ⁶⁾ <0.02 • g/l

5.5 Summering utlakade mängder i skak-, pH-stat och kolonnlaktest

I Tabell 5 har resultaten från skak-, pH-stat och kolonnlaktest sammanställts som utlakade mängder vid L/S 10.

Tabell 5. Jämförelse utlakade mängder vid L/S 10 vis skaktest, pH-stat test (pH8) och kolonnlaktest

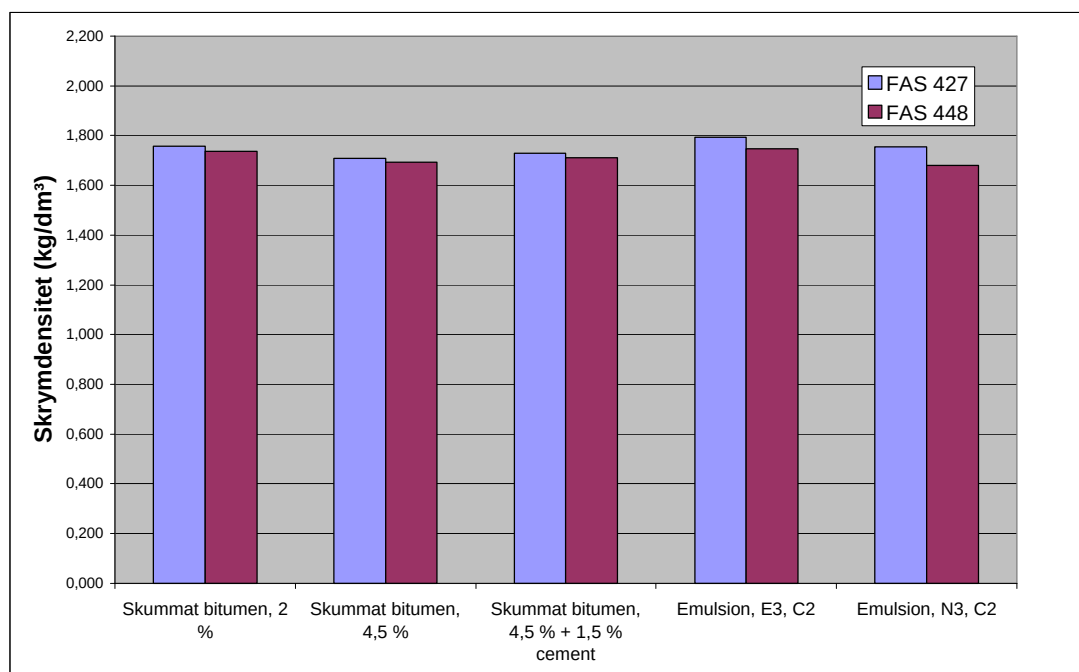
Table 5. Comparison leached mass at L/S 10 for compliance test, pH-stat test (pH 8) and columntest.

	Skaktest			pH-stat test vid pH 8			Kolonntest		
	orig	2%	4.5%	orig	2%	4.5%	orig	2%	4.5%
Li	0.33	0.30	0.30	0.12	0.26	0.27	0.38	0.40	0.46
Na	3519	3235	3035	4476	9709	3666	3940	3847	3608
K	543	519	481	618	721	513	706	705	673
Mg	177	167	162	67	187	142	234	242	231
Ca	3248	2960	2858	2204	3910	2365	2454	2809	2705
Sr	5.1	4.9	4.6	4.1	6.1	4.1	4.6	5.0	5.0
Ba	0.44	0.45	0.46	0.44	0.56	0.49	0.44	0.37	0.42
Si	14.1	12.2	13.4	3.5	15.2	9.8	32.0	26.4	32.9
Al	2.6	3.0	2.5	37.5	2.6	3.5	1.1	1.1	1.3
Mn	0.21	0.24	0.33	0.20	0.24	0.20	0.26	2.92	5.92
Cu	0.49	0.60	0.64	0.56	0.75	0.50	0.54	0.64	1.47
Zn	0.47	0.43	0.50	0.37	0.44	0.43	0.57	0.81	0.99
Ni	0.039	0.026	0.031	0.014	0.051	0.029	0.071	0.067	0.103
Co	0.006	0.009	0.006	0.0040	0.0070	0.0039	0.005	0.012	0.021
Pb	0.037	0.041	0.037	0.02	0.03	0.01	0.009	0.007	0.008
Cd	0.0025	0.0020	0.0025	0.001	0.002	0.001	0.003	0.004	0.005
Sn	0.39	0.40	0.42	0.007	0.003	0.218	0.37	0.37	0.36
Hg	0.0007	0.0127	0.0013	0.0040	0.0018	0.0009	0.0007	0.0016	0.0028
Fe	-	-	-	-	-	-	-	0.011	-
Ag	-	-	-	0.002	0.001	-	0.00075	0.00061	0.00086
Mo	0.35	0.36	0.36	0.54	0.34	0.32	0.40	0.49	0.58
Sb	0.31	0.26	0.22	0.55	0.28	0.22	0.28	0.21	0.23
Se	0.068	0.050	0.036	0.082	0.073	0.067	0.079	0.073	0.072
As	0.031	0.028	0.026	0.029	0.038	0.033	0.032	0.030	0.036
V	0.026	0.020	0.020	0.039	0.034	0.031	0.028	0.023	0.024
Cr	0.007	0.009	0.007	0.006	0.041	0.025	0.012	0.008	0.015
Cl	4553	4127	3878	4124	4111	3966	4124	3832	12077
S	3195	2907	2770	2977	3014	2486	2840	3036	2833
SO ₄ ⁻	3358	3134	3014	3158	3053	2699	2956	3037	3042
NO ₃ ⁻	44.1	22.7	1.6	-	-	-	35.6	20.5	2.0
P	0.30	0.36	0.36	0.28	0.65	0.56	0.45	0.22	0.24
IC	117	112	124	46	297	142	168	208	312
DOC	66	117	161	52	112	132	86	128	199

6 Resultat geoteknisk undersökning av provkroppar

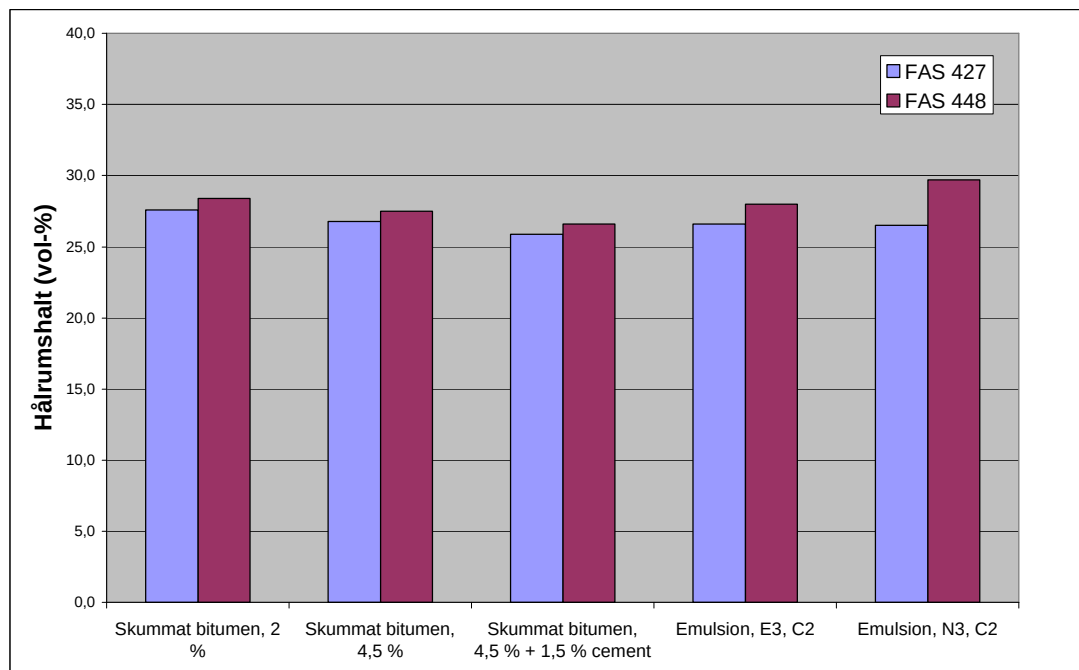
6.1 Skrymdensitet och hålrumsinhalt

Skrymdensitet och hålrumsinhalt bestämdes genom FAS metod 427 och genom FAS metod 448, en jämförelse mellan de två metoderna ges i Figur 28 och Figur 29.



Figur 28. Skrymdensitet (kg/dm^3) cylindriska provkroppar av bitumenbunden bottenaska

Figure 28. Bulk density (kg/dm^3) cylindrical samples of bitumen stabilized bottom ash



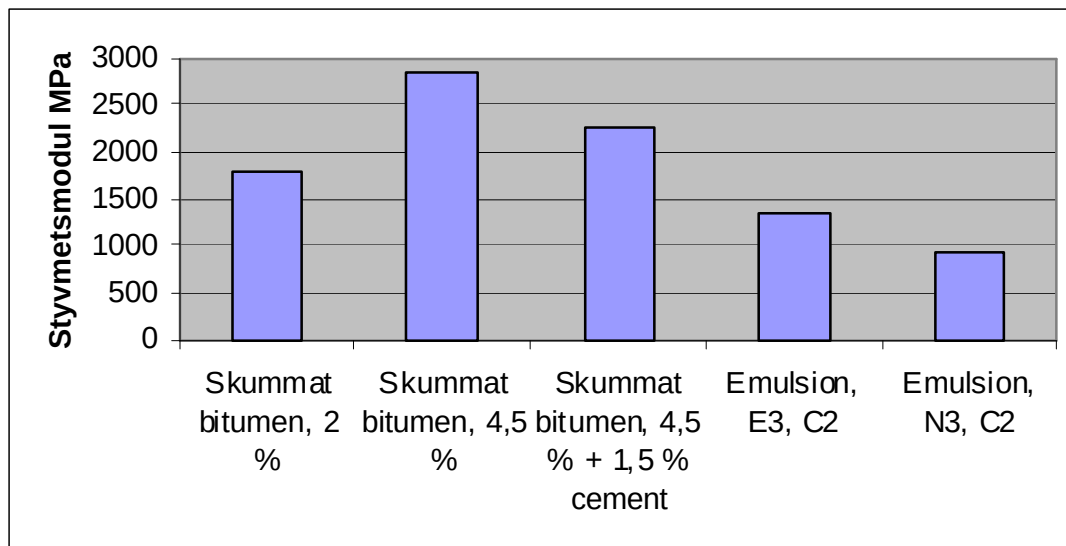
Figur 29. Hålrums halt hos cylindriska provkroppar av bitumenbunden bottenaska.

Figure 29. Porosity (vol%) of cylindrical samples of bitumen stabilized bottom ash

Skillnaden i skrymdensitet och hålrums halt är förhållandevis liten även om proverna vägda under vatten överlag har något högre skrymdensitet och lägre hålrums halt än de som mättes med skjutmått. Normalt så brukar FAS 448 ge högre hålrums halter (större skillnader än i detta fall) jämfört med 427 på grund av inverkan från ytliga porer och skrovlighet. I detta fall var ytorna förhållandevis släta på provkropparna (tyder på att bottenaskan krossats ned vid provpackningen). Hålrums halterna ligger markant högre (26-30 vol-%) om en jämförelse görs med stabiliserat naturmaterial eller återvunnen asfalt (5-15 vol-%). Skillnaden i hålrums halt mellan de olika provblandningarna är överlag liten (25,9-29,7 vol-%). Som väntat uppvisar de med högst bindemedelsinblandning något lägre hålrums halter. Noterbart är också materialets låga skrymdensitet (1,69-1,79 kg/dm³).

6.2 Styvhetsmodul

Proverna med tillsats av skumbitumen uppvisar högre hållfasthet än de med tillsats av emulsion, vilket är logiskt med tanke på skillnaderna i bitumenhårheten. Tillsats av cement i kombination med skumbitumen har inte förbättrat styvhetsmodulen, se Figur 30. Cementtillsats anses dock ge större utslag på beständighet och stabilitet.

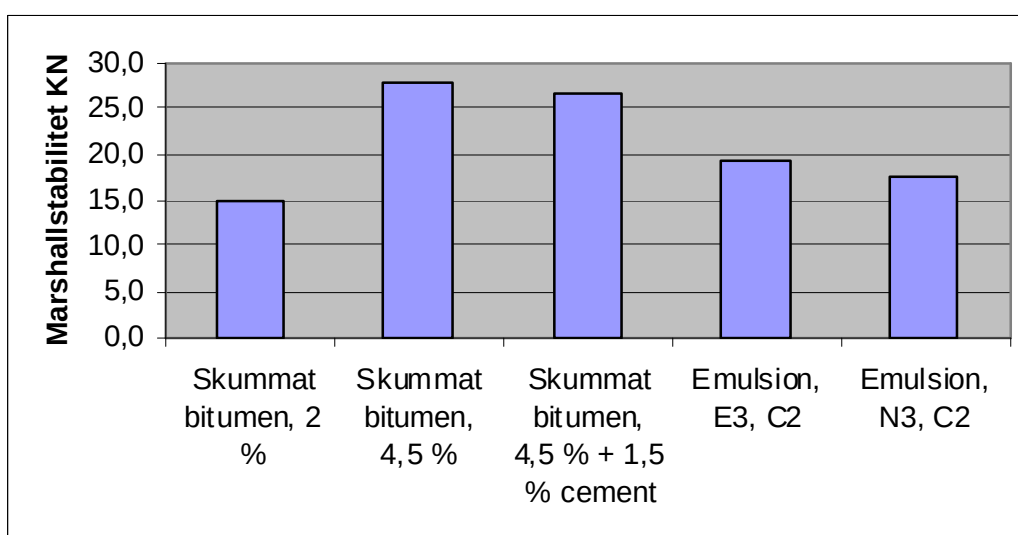


Figur 30. Styvhetsmodul hos provblandningar av bitumenbunden bottenaska.

Figure 30. Stiffness module of cylindrical samples of bitumen stabilized bottom ash

6.3 Stabilitet

Provning av stabilitet på kalltillverkade asfaltmassor gjordes genom Marshallstabilitet och resultaten presenteras i Figur 31.



Figur 31. Marshallstabilitet hos provblandningar av bitumenbunden bottenaska.

Figure 31. Marshall stability of cylindrical samples of bitumen stabilized bottom ash.

De högsta värdena erhåller blandningen med 4,5 % skummat bitumen tätt följt av blandningen med 4,5 % skummat bitumen + 1,5 % cement.

6.4 Tryckhållfasthet på cementstabiliserad bottenaska

Vid hållfasthetsprovning av cementbundet grus används tryckhållfastheten efter korttidslagring (7 dygn, ATB VÄG). Kravet är lika eller större än 9 MPa för BÖ-konstruktioner medan kravet för CBÖ-konstruktioner är att tryckhållfastheten skall ligga inom intervallet $9 \text{ MPa} \pm 3,0-0,65 \cdot \text{standardavvikelsen}$. I detta fall erhöll provblandningen med 3 % cement 10,5, 10,8 och 10,0 MPa (medelvärde: 10,4 MPa, standardavvikelse: 0,4). Provkropparna hade lagrats i ca 2 månader innan de provtrycktes. Slankhetstalet (höjd/bredd förhållandet) var drygt 0,6. Om provningsresultatet korrigeras till korttidshållfasthet och slankhetstal till 1 (VTI Meddelande 522 och handbok Betongprovning, BST) blir tryckhållfastheten ca 7,7 MPa (medelvärdet). Det innebär att cementstabiliserad bottenaska på denna punkt uppfyller kraven i ATB VÄG för CBÖ-konstruktioner.

Skrymdensiteten låg på 1,80-1,85 kg/dm³ för cementbunden bottenaska.

7 Diskussion

7.1 Miljöteknisk undersökning

Resultatet från karakterisering av partiklarna och bestämningen av buffringskapacitet bekräftar att partiklarna partiellt belagts med en bitumenhinna och eventuellt att de minsta partiklarna täckts helt och hållet med bitumen och häftat samman. Den specifika ytan har halverats vilket manifesterar sig i en lägre syra- och basbuffringskapacitet genom att tillgängligheten på buffrande mineral har minskat.

De tester som utförts på originalaskan och den skumbitumenstabiliserade askan i granulär form visar:

- § Ingen signifikant effekt av skumbitumenbehandlingen vid skaktest, med undantag för de lösliga ämnena Cl, S, SO₄, NO₃, Sb, och Ca där skumbitumenbehandlingen hade en positiv effekt och den reducerade tillgängliga ytan verkade begränsande för utlakningen.
- § En något förhöjd utlakning för Mn, Cu, Zn, Co, Cd och Hg för de skumbitumenbehandlade askorna vid kolonnlaktest.
- § En signifikant positiv effekt vid extrema pH för vissa element vid pH-stattest. Detta indikerar att utlakningen vid pH 8 ($\approx$ egen pH) är löslighetsstyrd och övergår till att kontrolleras av tillgänglig yta vid låga pH (se Mn, Ni, Cd) och för element som uppvisar amfotera egenskaper (Al, Zn, Cu, Pb, As, Cr), vid både höga och låga pH. För Sb och Se så uppvisar skumbitumenbehandlingen en positiv effekt över hela pH-intervallet, vilket indikerar att utlakningen styrs av tillgänglig yta hos askpartiklarna.

Löst organiskt material har en förmåga att binda många metaller i stabila komplex, detta har i andra sammanhang iakttagits för bl.a mangan, koppar, nickel, kadmium och zink (se t.ex [23]). Formeringen av organiska metallkomplex beror på metalljonen och sammansättningen av det lösta organiska materialet. Det är välkänt att lösligheten för koppar i bottenaska till stor del styrs av närvaron av organiska komplexbindare. Termodynamiska beräkningar som utförts av [21] tyder på att nästan 100 % av kopparn i lakväska från färsk och 1.5 år gammal bottenaska är bunden till organiska föreningar. Den positiva korrelation mellan lakbarheten för vissa metaller och DOC (för de askor som behandlats med skumbitumen) som iakttagits i denna studie indikerar förekomsten av löst organiskt material som styrande mekanism.

Kolonnlaktesten gav den största utlakade mängden av DOC för F45 askan (199 mg/kg), följt av skaktesten (161 mg/kg) och pH-stat testen vid pH 8 ($\approx$ egen pH) (132 mg/kg). Ingen förklaring har hittats till varför varför kolonnlaktesten, men inte skaktesten och pH-stat testen (vid pH=8), gav en signifikant förhöjd utlakning för Mn, Cu, Zn, Co, Cd och Hg för de skumbitumenbehandlade askorna. Som exempel kan nämnas att i

skaktestet respektive kolonnlaktestet lakades 0.21 mg/kg respektive 0.26 mg/kg ut ur originalaskan. Motsvarande siffror för F45 askan var 0.33 mg/kg respektive 5.92 mg/kg. Detta är inte en effekt av en större utlakade mängd DOC i kolonnlaktestet. Kolonnlakningen av F2 askan gav en total utlakad mängd DOC på 128 mg/kg, vilket understiger den utlakade DOC mängden för F45 askan vid skaktestet (161 mg/kg). Ändå lakades det ut 2.92 mg/kg mangan i kolonnlaktestet med F2 askan, vilket kan jämföras med 0.33 mg/kg för F45 askan vid skaktestet.

Med hänsyn till hur utlakningsprocessen kommer att se ut om den skumbitumenbehandlade askan återanvänds i ett bärlager så är resultaten från ytutlakningsförsöken mer relevanta än kolonnlakförsöken. Det anmärkningsvärda i resultaten från ytutlakningsförsöken är att för de ämnen som vid kolonnförsöken visade en tydligast negativ påverkan av skumbitumenbehandlingen, Cu och Mn, så visar resultaten från ytutlakningsförsöken en positiv påverkan av skumbitumenbehandlingen. En högre inblandningskvot av bitumen (F45) gav en lägre utlakning av Cu och Mn trots att utlakningen av DOC var högre för F45 askan än för F2 askan. Resultatet från den ytutlakningstesten uppvisade Co och Hg halter som var under detekterbarhetsgränsen för både F2 ($<0.05 \cdot \text{g/l}$) och F45 ($<0.02 \cdot \text{g/l}$) provkroppen.

Resultat från ytutlakningstest måste kombineras med ett fältscenario för att den resulterande koncentrationen i lakvattnet skall kunna uppskattas. Fältscenariot definierar hur det monolitiska materialet exponeras för vatten, hur stor den exponerade ytan är och vattnets flödes hastighet längs ytan. Det är därför inte möjligt att enkelt relatera resultat från ytutlakningstest till andra laktestresultat.

I ett annat Värmeforskningsprojekt "Miljöriktlinjer för askanvändning i anläggningsbyggande, Q4-238" har exponering via intag av växter och grönsaker (vilka odlas 20 meter från vägkonstruktionen och som kontaminerats med damm vid anläggande av vägen) visat sig vara en betydelsefull exponeringsväg. Skumbitumenstabiliserad aska bedöms vara fördelaktig ur dammsynpunkt eftersom de minsta partiklarna häftar ihop och bildar större aggregat som inte är benägna att spridas som damm.

7.2 Geoteknisk undersökning

Bottenaskan har en hög porositet som påverkar resultatet. De höga hålrumsalterna och den låga skillnaden mellan de två metoderna för skrymdensitet (FAS metod 427 och FAS metod 448) tyder på att ballastmaterialet har inneslutna porer. När proverna vägdes under vatten observerades att de absorberade mer fukt än vanligt, vilket även indikerar att det finns ett finmaskigt porsystem i beläggningen även om den släta ytan på proverna gav ett intryck av att materialet är tätt. För att studera tätheten hos materialet rekommenderas permeabilitetsstudier. Beständigheten mot vatten bör också undersökas genom pressdragprovning (FAS metod 446). Det bör nämnas att halten bindemedel i bottenaskan också påverkar hålrumsalten. De krav som finns i Vägverkets Tekniska Anvisningar (ATB VÄG) berör kall återvinning av asfalt. Där är kravet för

bärlagermassor att labtillverkade provkroppar skall ligga mellan 6-14 vol-% i hålrumshalt. Inga hålrumskrav ställs på nytillverkade massor med naturmaterial.

Undersökningen pekar mot att bottenaska behöver relativt hög bindemedelsinblandning (ca 5 % restbitumen) för att styvhetsmodulen skall hamna på acceptabel nivå. Porösa material kräver också mer bindemedel än tätare material. De emulsionshalter som testats i denna undersökning är sannolikt för låga för att materialet skall få optimala egenskaper. I ATB VÄG finns krav för bärlagermassor vid kall återvinning. Styvhetsmodulen skall efter 7 dygns lagring vid förhöjd temperatur (+40°C) ligga över 2000 MPa. I detta fall har proven efterlagrats i 2 månader vid rumstemperatur. Sannolikt hade styvhetsmodulerna legat något lägre om lagringstiden enbart varit 7 dygn vid +40°C. Om förnyade studier görs bör mer bindemedel inblandas i bottenaskan. Proven bör också fortsättningsvis tillverkas enligt metod VVMB 701 och testas efter 7 dygns lagring vid +40°C. För varmtillverkad asfalt ligger kravet på styvhetsmodul mellan 4 000-10 000 MPa beroende på trafikklass. För lågtrafikerade vägar där flexibiliteten i asfaltagren är viktig får inte styvhetsmodulen överstiga 4000 MPa. Kraven på styvhetsmodul gäller endast vid upphandlingar av asfaltbeläggningar där funktionskrav ställs (s.k. funktionsupphandlingar).

Även stabiliteten påverkas av bindemedelshalt och bitumenhårdhet. Tillsatsen av en mindre mängd cement verkar inte heller haft avsedd effekt på stabiliteten. Sannolikt behövs mer cement inblandas för att utslaget skall bli tydligare. Blandningarna med emulsion + cement uppvisar högre stabilitet än blandningen med 2 % skummat bitumen. Vid provningen av styvhetsmodul var resultatet det omvända (det finns inte alltid ett samband mellan styvhetsmodul och stabilitet). Cementinblandningen har sannolikt haft en större inverkan på emulsionsblandningarna än för skummat bitumen. Stabiliteten bedöms överlag vara acceptabel (och bra) för kalltillverkat bärlager. Det bör tilläggas att valda bitumenkvaliteter (i sammanhanget relativt hårt bitumen) är relevanta för förhållandena i södra Sverige. Kallblandade återvinningsmassor brukar vanligtvis vara baserade på mjukare bitumen, vilket har påverkat kriterierna i ATB VÄG och även provningstemperaturen vid stabilitetsprovning. Vägverkets krav på Marshallstabilitet för kalla återvinningsmassor är >7 kN efter 7 dygns lagring vid +40°C. Varmtillverkad asfalt testas vid högre temperatur +40°C och genom dynamisk kryptest. Provningen är inriktad på krypkänslighet (materialomlagring) och plastiska deformationer (viktiga parametrar för bindemedelsrik asfalt) och inte på permanent deformation som i detta fall.

8 Slutsats

- § Den specifika ytan reducerats med 50 för askan med 4,5 % skumbitumenbehandling. Detta manifesterar sig i en lägre syra- och basbuffringskapacitet genom att tillgängligheten på buffrande mineral minskar.
- § Skumbitumenbehandlingen visar ingen signifikant effekt vid skaktest, med undantag för de lösliga ämnen Cl, S, SO₄, NO₃, Sb, och Ca där skumbitumenbehandlingen hade en positiv effekt och den reducerade tillgängliga ytan verkade begränsande för utlakningen.
- § Resultaten visar en något förhöjd utlakning för Mn, Cu, Zn, Co, Cd och Hg för de skumbitumenbehandlade askorna vid kolonnlaktest. Ytutlakningsförsöken visar att för de ämnen som vid kolonnförsöken visade en tydligast negativ påverkan av skumbitumenbehandlingen, Cu och Mn, så visar resultaten från ytutlakningsförsöken en positiv påverkan av skumbitumenbehandlingen. Med hänsyn till hur utlakningsprocessen kommer att se ut om den skumbitumenbehandlade askan återanvänds i ett bärlager så är resultaten från ytutlakningsförsöken mer relevanta än kolonnlakförsöken.
- § Skumbitumenbehandlingen uppvisar en signifikant positiv effekt vid extrema pH för vissa element. Resultaten indikerar att utlakningen vid pH 8 ($\approx$ egen pH) är löslighetsstyrd och övergår till att kontrolleras av tillgänglig yta vid låga pH (se Mn, Ni, Cd) och för element som uppvisar amfotera egenskaper (Al, Zn, Cu, Pb, As, Cr), vid både höga och låga pH. För Sb och Se så uppvisar skumbitumenbehandlingen en positiv effekt över hela pH-intervallet, vilket indikerar att utlakningen styrs av tillgänglig yta hos askpartiklarna.
- § Skumbitumenstabiliserad aska bedöms vara fördelaktig ur dammsynpunkt eftersom de minsta partiklarna häftar ihop och bildar större aggregat som inte är benägna att spridas som damm.
- § Provningarna utfördes enligt den standard som finns för asfaltmaterial (FAS-metoder eller ASTM) och cementgrus (SS). De cylindriska provkroppar av bitumenbunden bottenaska uppvisade hög hålrums halt, 26-30 vol%, och låg skrymdensitet, 1,7-1,8 (kg/dm³).
- § Proverna med tillsats av skumbitumen uppvisade högre hållfasthet än de med tillsats av emulsion, vilket är logiskt med tanke på skillnaderna i bitumenhårheten. Tillsats av cement i kombination med skumbitumen förbättrade inte styvhetsmodulen. Den högsta styvhetsmodulen och den högsta stabiliteten uppvisade blandningen med 4,5 % skummat bitumen, styvhetsmodul: 2800 Mpa och stabilitet: 27 KN. På dessa punkter uppfyller blandningen gällande krav på bärlagermassor vid kall återvinning enligt ATB Väg: >2000 MPa respektive >7 KN.

§ Skrymdensiteten låg på 1,80-1,85 kg/dm³ för cementbunden bottenaska. Den cementstabiliserade bottenaskan uppfyller kraven i ATB VÄG för CBÖ-konstruktioner med avseende på tryckhållfasthet.

9 Förslag till fortsatt forskningsarbete

- § Studier av vilken betydelse åldring (oxidation) av den skumbitumenbehandlade askan har för lakegenskaperna. Detta kan ha stor betydelse för att kunna göra prediktioner av utlakning under fältförhållande och över realistiska tidsspann.
- § Beräkning av koncentrationer i lakvattnet i ett fältscenario där skumbitumenbehandlad aska (i monolitisk form) används som bundet bärlager i en vägkonstruktion.
- § Undersökning av kapillära och termiska egenskaper för skumbitumenbehandlad bottenaska.
- § Funktionell dimensionering och design av en vägkonstruktion med skumbitumenstabiliserat bärlager av bottenaska.
- § Analys av marknadsförutsättningar för att använda skumbitumenstabiliserad aska i ett verkligt anläggningsprojekt.
- § Anläggande av provväg med skumbitumenbehandlad bottenaska som bundet bärlager, mätning av styvhetsegenskaper i fullskala och uppföljning av hållfasthetsutveckling.

10 Litteraturreferenser

- [1] Larsson, L., Ytutlakning av återvunnen asfalt innehållande stenkolstjära – Lägesrapport 2001, Statens Geotekniska Institut, Linköping, Varia 522, 106 s., 2002
- [2] Jostein, M, The use of cold bitumen stabilized base course mixes in Norway, Civil Engineer,
http://icivilengineer.com/Transportation_Engineering/Airport_Engineering/, 2002-11-05.
- [3] Ramanujam J.M., J.D. Jones, Characterisation of foamed bitumen stabilisation, Road System & Engineering Technology Forum, 1-23, 2000
- [4] Wilmot T., Rodway B., Stabilised pavements – selecting the additive: cementitious, polymer or bitumen., The international congress on local government engineering & public works, August, 1999
- [5] Wen W.W., An integrated fine coal preparation technology: the GranuFlow Process, Int. J. Miner. Process., 58, 253-265, 2000
- [6] Zevenberger, C., Vander Wood, T., Bradley, J. P., Van der Broeck, P. F. C. W., Orbons, A. J., Van Reeuwijk, L. P. (1994). Morphological and chemical properties of MSWI bottom ash with respect to the glassy constituents. Hazard. Waste & Hazard. Mat., 11, pp. 371-383.
- [7] Bendz D., Tüchsen, P.L., T.H. Christensen The Dissolution Kinetics in Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Leaching of Major Cations and Anions (submitted)
- [8] Strömberg, B., S.A. Banwart, Experimental study of acidity-consuming processes in mining waste rock: some influences of mineralogy and particle size, Applied Geochemistry, 14, 1-16, 1999.
- [9] Fällman A-M., Performance and design of the availability test for measurement of potentially leachable amounts from waste materials, Environ. Sci. Technol., 31, 735-744, 1997.
- [10] Morgan, P., Mulder, A. The Shell Bitumen industrial handbook. Shell Bitumen, Riversdell House, Guildford Street, Chertsey, Surrey, KT16 9AU, 1995
- [11] Brandt H.C.A., P.C. De Groot, Aqueous leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from bitumen and asphalt, Water Research, 35, 17, 4200-4207, 2001.
- [12] Kavussi, A., M.A. Atabaki, Subgrade stabilization with lime and base strenghtening with cement-foambitumen, a case study in Assalouyeh airport in Iran, 1th

- International Symposium on subgrade stabilisation and in situ pavement recycling using cement, October 1-4, 479-492, 2001
- [13] Kendall, M., Baker, B., Evans P., Ramanujam, J. Foamed bitumen Stabilisation Proceedings Roads at Work - Developing Southern Queensland, Southern Region Symposium, Qld Department of Main Roads, Goondiwindi, 1999
- [14] Nataatmadja, A. Some characteristics of foamed bitumen mixes. Transportation research record 1767, paper no. 01-2790, 2001
- [15] Jacobson T., F. Hornwall Förbättring av vägar genom stabilisering med bitumenemulsion, skummat bitumen och cement, VTI-notat 29, 2001
- [16] NYNAS Bitumen, personlig kommunikation Derk Goos, 2004
- [17] NYNAS Bitumen, , personlig kommunikation Paul Landa, 2004
- [18] Chandler, A.J., T.T Eighmy, J. Hartlén, O. Hjelm, D.S. Kosson, S.E. Sawell, H.A. van der Sloot, J. Vehlow, Municipal solid waste combustor residues: the international ash working group, studies in environmental science 67, Elsevier science, Amsterdam, 1997.
- [19] Lu, X., Isacsson, U., Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology, Construction and Building Materials, 16, 15-22, 2002
- [20] Arm, M. (2000). Egenskaper hos alternativa ballastmaterial, speciellt slaggrus, krossad betong och hyttsten (in swedish). Licentiate dissertation, Royal Institute of Technology Department of ground- and water Resources Engineering, Stockholm.
- [21] Meima, J. A., Van Zomeren, A., Comans, R. N. J. Complexation of Cu with dissolved Organic Carbon in Municipal Solid Waste Incinerator Bottom ash Leachates. Environ. Sci. Technol., 33, pp. 1424-1429, 1999.
- [22] Naturvårdsverket, Beräkningsmodell för riktvärden för mark, REMISSVERSION, 2005-07-04, Kontaktperson NV Yvonne Österlund, 2005
- [23] Sedlak D.L., J.T. Phinney and W.W. Bedsworth, (1997) Strongly complexed Cu and Ni in wastewater effluents and surface runoff. *Environmental Science & Technology*;31: 3010-3016.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET



VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35