MILJÖRIKTIG ANVÄNDNING AV ASKOR

Projekt Vändöra

En studie av långtidsegenskaper hos en väg anlagd med bottenaska från avfallsförbränning

964

David Bendz, Maria Arm, Peter Flyhammar, Gunnar Westberg, Karin Sjöstrand, Martin Lyth och Ola Wik



11,1111

Projekt Vändöra: En studie av långtidsegenskaper hos en väg anlagd med bottenaska från avfallsförbränning

The Vändöra test road, Sweden:

A case study of long-term properties of a road constructed with MSWI bottom ash

David Bendz, Maria Arm, Peter Flyhammar, Gunnar Westberg, Karin Sjöstrand, Martin Lyth och Ola Wik

Q4-241

VÄRMEFORSK Service AB 101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80 Mars 2006 ISSN 1653-1248

Abstract

Projektet har tillfört ny kunskap om långtidseffekterna på avfallsbottenaska under verkliga förhållanden i en vägkonstruktion. De geotekniska undersökningar som utförts inkluderar fallviktsmätningar och triax försök på uppborrade provkärnor. Den ökning av slaggrusets hållfasthet som uppmätts med hjälp av upprepade fallviktsmätningar i början av provvägens existens har avstannat. Provkropparna hade däremot lika stor styvhet som ett nyare slaggrus från samma förbränningsanläggning. Den miljötekniska undersökningarna har innefattat en omfattande provtagning i förstärkningslagret av bottenaska och i undergrunden av utfyllnadsmassor. Med undantag av lättlösliga ämnen som SO₄, Ca, K, Na, Cl, Mg och Mo så finns det inget som indikerar att en signifikant utlakning har skett. Distributionen av lättlösliga ämnen, konduktivitet, pH och DOC i bottenaskan bekräftar hypotesen om vägslänternas betydelse som transportväg för vatten, koldioxid och syre mellan bottenaskan och omgivningen. Detta är viktig information för utveckling av matematiska modeller för utlakning. Separat bortschaktning av olika vägbyggnadslager för eventuell senare återanvändning visade sig vara praktiskt möjlig .

Förord

Detta projekt har utförts av:

David Bendz, Maria Arm, Gunnar Westberg, Karin Sjöstrand, Martin Lyth och Ola Wik (Statens Geotekniska Institut)

Peter Flyhammar (Teknisk Geologi, Lunds Tekniska Högskola)

Projekt har samfinansierats av Värmeforsk, Renhållningsverksföreningen Utveckling, Sydskånes avfallsaktiebolag Utveckling AB och Tekniska Verken Linköping.

Projekthandläggare på Värmeforsk och Renhållningsverksföreningen Utveckling har varit Claes Ribbing respektive Per Nilzén. En referensgrupp har varit knuten till projektet och bestått av Jan Christiansson (Naturvårdsverket), Raul Grönholm (Sydskånes avfallsaktiebolag Utveckling AB) Magnus Hammar (Tekniska verken Linköping), Klas Hermelin (Vägverket) och Karl Johan Loorents (Statens väg- och transportforskningsinstitut).

Vi i projektgruppen vill tacka Claes Ribbing och referensgruppen för stort engagemang, synpunkter och kommentarer. Vi vill rikta ett speciellt tack till Magnus Hammar som tog kontakt tidig vår 2003 och påpekade möjligheten att genomföra denna studie i samband med att provvägen vid reningsverket i Linköping skulle schaktas bort. Tack också till Peter Flyhammar som initierade en provtagning i provvägen redan sommaren 2002. Resultaten och erfarenheterna från den studien har varit viktiga för planerandet och utförandet av detta projekt.

Vi vill också tacka Kent Enkell, Håkan Arvidsson och Karl Johan Loorents, m.fl på Statens väg- och transportforskningsinstitut för jordartsbestämning, uppborrning av provkroppar och triaxförsök.

Malmö den 21 december 2005

David Bendz, projektledare

Sammanfattning

I detta projekt har en provväg studerats, vilken anlades 1987 inom ramen för ett större forskningsprojekt. Provvägen anlades med naturliga och alternativa material i form av ett vändöra vid infarten till Linköpings avloppsreningsverk. Vid tidpunkten för detta projektets start (september 2003) var provvägen c.a 16 år gammal. Syftet med detta projekt var att studera: (i) de ackumulerade effekterna av utlakning efter en längre tids användning av bottenaska från avfallsförbränning som förstärkningslager (av äldre konstruktionstyp) (ii) de ackumulerade effekterna av belastning och åldring på bottenaskans geotekniska egenskaper. (iii) förutsättningarna för återvinning (separat schaktning) av bottenaska från befintliga väglager. Studien inleddes i september 2003 genom insituexperiment och provtagning i grävda schakt i samband med att den knappt 16 år gamla provvägen med bottenaska schaktades bort på grund av omläggning av en angränsande väg. De geotekniska undersökningar som utförts inkluderar fallviktsmätningar och triax försök på uppborrade provkärnor. Den miljötekniska undersökningarna har innefattat en omfattande provtagning i förstärkningslagret av bottenaska och i undergrunden av utfyllnadsmassor. Effekten en eventuell utlakning har undersökts genom laktester och extraktion av totalhalter samt pH och konduktivitetsmätningar. Projektet har tillfört ny kunskap om effekterna av långtidsutlakning från avfallsbottenaska under verkliga förhållanden i en vägkonstruktion.

Den ökning av slaggrusets hållfasthet som uppmätts med hjälp av upprepade fallviktsmätningar i början av provvägens existens har avstannat. Den lagermodul som utvärderades för förstärkningslagret av bottenaska var något lägre än den för förstärkningslagret av naturgrus. Provkropparna hade lägre styvhet än krossat berg. De hade också mindre styvhet än ett par slaggrusmaterial från andra förbränningsanläggningar, som undersökts tidigare och som användes som jämförelsematerial. Provkropparna hade däremot lika stor styvhet som ett nyare slaggrus från samma förbränningsanläggning. Provkropparna fick betydligt större permanenta deformationer (sättning) än krossat berg och de tre slaggrusmaterialen som användes som jämförelsematerial. Distributionen av lättlösliga ämnen, konduktivitet, pH och DOC i bottenaskan bekräftar hypotesen om vägslänternas betydelse som tranportväg för vatten, koldioxid och syre mellan bottenaskan och omgivningen. Tydliga horisontella koncentrationsgradienter indikerar att den huvudsakliga tranportmekanismen för lösta ämnen är diffusion och kapillär transport från vägens mitt ut mot vägens flanker där vertikal advektiv transport med infiltrerande vatten från vägbanans ytavrinning dominerar. Horisontella gradienterna i pH indikerar att atmosfärisk koldioxid har diffunderat in från vägens flanker och bildat reaktionsfronter (karbonatisering). Genom diffusion av syre in i vägen har redoxfronter utvecklats, vilka styr formerna och mobiliteten hos redoxkänsliga element som arsenik, krom och mangan.

Med undantag av lättlösliga ämnen som SO₄, Ca, K, Na, Cl, Mg och Mo så finns det inget som indikerar att en signifikant utlakning har skett. För de lättlösliga ämnena så har det skett en betydande utlakning vilken är svår att kvantifiera pga av avsaknaden av tillförlitliga uppgifter på askans innehåll vid tidpunkten då vägen anlades. Endast i ett fåtal provpunkter i de underliggande jorden överskreds kriterierna för känslig markanvändning. men eftersom undergrunden bestod av utfyllnadsmassor med okänt ursprung

kan inga slutsatser angående orsaken till detta dras. Det var mycket lätt för grävmaskinisten att hålla isär de olika materiallagren vid bortschaktning av vägen. En viss omblandning kunde dock också iaaktagas i vägens kantzoner vid bortschaktning av förstärkningslaget

Summary

The accumulated effects of leaching and aging in a subbase layer of bottom ash were investigated in this study. The paved test road were constructed in 1987 in Linköping, Sweden, and has been used until the start of this study. The objective of this study was to investigate: (i) the accumulated effects of leaching and aging (ii) the accumulated effects of load and aging on the geotechnical properties (iii) the prerequisites for separate excavation of the bottom ash for possible reuse. The study started in September 2003 and included tests with falling weight deflectometer, triax testing on undisturbed core samples of bottom ash, sampling for chemical analysis. Three trenches were excavated in the test road, samples of the subbase layer and the subgrade were taken in the shaft walls and brought to the laboratory for leaching tests (EN 12457-2) and extraction, respectively. The extraction procedure was used to estimate extractable and chemically available fractions.

It was found that the steady increase of stiffness which had been detected by falling weight deflectometer during the first years after construction had ceased. The undisturbed samples showed stiffness comparable with recently produced bottom ash from the same incineration plant, but lower stiffness if compared with the reference material of crushed rock. The permanent deformation was significantly larger for the samples compared with the crushed rock and recent (1999-2001) bottom ash from other incineration plants. The spatial distribution patterns of leachable easily soluble constituents reveal the existence of horizontal gradients, directed from the center of the road towards the shoulders of the road. This implies that horizontal transport by diffusion and capillary flow is the rate limiting leaching process for all easily soluble constituents underneath the pavement in a road. The bottom ash that was used in the sub-base laver was fresh at the time of the construction of the test road with a pH of about 11. Measured pH values in the collected bottom ash samples also show horizontal gradients with decreasing values towards the shoulder slopes and a pH front propagating from the road shoulders towards the center of the road. This indicates reaction with atmospheric carbon dioxide. The spatial distribution of leachable trace elements in the subbase layer was found to reflect the distribution of pH and the aging process.

No evidence of significant leaching where found with exception for the easily dissolvable elements SO4, Ca, K, Na, Cl, Mg and Mo. The criteria for sensitive land use was only exceeded in a few sampling points in the subgrade. However, the origin of the subgrade is not clear which makes the interpretation of that data difficult. I turned out to be easy to excavate the different layers in the road construction separately which is favorable for future reuse.

Innehållsförteckning

1	I	NLEDNING	. 15
	1.1 1.2 1.3 1.4	Bakgrund Beskrivning av forskningsområdet Syfte Målgrupp	15 16 16 17
2	В	ESKRIVNING AV PROVVÄGEN OCH TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR	. 18
	2.1 2.2	Provvägen Tidigare undersökningar	18 19
3	M	IETOD GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR	. 24
	3.1 3.2 3.3	Fallviktsmätning Uppborrning av "ostörda" provkroppar Belastningsförsök i laboratorium	24 25 26
4	Μ	IETOD MILJÖTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR	. 29
	4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	PROVTAGNING I FÄLT LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR ENSTEGS LAKTEST TOTALHALT EXTRAKTION ANALYS AV LAKVÄTSKA	29 31 34 34 34 34
	-		
5	R	ESULTAT OCH DISKUSSION GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR	.36
5	R 5.1 5.2	ESULTAT OCH DISKUSSION GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR Resultat och diskussion – fallviktsmätning Resultat och diskussion – belastningsförsök i laboratoriet	.36 36 38
5 6	R 5.1 5.2 R	ESULTAT OCH DISKUSSION GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR Resultat och diskussion – fallviktsmätning Resultat och diskussion – belastningsförsök i laboratoriet ESULTAT OCH DISKUSSION MILJÖTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR	.36 36 38 .43
5	R 5.1 5.2 R 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 PROV 6.6	ESULTAT OCH DISKUSSION GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR RESULTAT OCH DISKUSSION – FALLVIKTSMÄTNING RESULTAT OCH DISKUSSION – BELASTNINGSFÖRSÖK I LABORATORIET ESULTAT OCH DISKUSSION MILJÖTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR ALLMÄNT KONDUKTIVITET PH TOTALHALT BOTTENASKPROVER SKAKTEST PÅ BOTTENASKPROVER OCH EXTRAKTION PÅ PROVER FRÅN UNDERLIGGANDE JORDLAG /STRÄCKA 4 SAMMANSTÄLLNING OCH DISKUSSION	36 36 38 43 43 43 44 45 45 50 69
5 6 7	R 5.1 5.2 R 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 PROV 6.6 Å	ESULTAT OCH DISKUSSION GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR RESULTAT OCH DISKUSSION – FALLVIKTSMÄTNING RESULTAT OCH DISKUSSION – BELASTNINGSFÖRSÖK I LABORATORIET ESULTAT OCH DISKUSSION MILJÖTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR ALLMÄNT KONDUKTIVITET PH TOTALHALT BOTTENASKPROVER SKAKTEST PÅ BOTTENASKPROVER OCH EXTRAKTION PÅ PROVER FRÅN UNDERLIGGANDE JORDLAG /STRÄCKA 4 SAMMANSTÄLLNING OCH DISKUSSION	36 38 43 43 43 44 45 50 69 74
5 6 7	R 5.1 5.2 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 PROV 6.6 7.1 7.2 7.3	ESULTAT OCH DISKUSSION GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR. RESULTAT OCH DISKUSSION – FALLVIKTSMÄTNING . RESULTAT OCH DISKUSSION – BELASTNINGSFÖRSÖK I LABORATORIET . ESULTAT OCH DISKUSSION MILJÖTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR . ALLMÄNT. KONDUKTIVITET . PH TOTALHALT BOTTENASKPROVER . SKAKTEST PÅ BOTTENASKPROVER OCH EXTRAKTION PÅ PROVER FRÅN UNDERLIGGANDE JORDLAG /STRÄCKA 4. SAMMANSTÄLLNING OCH DISKUSSION . TERVINNINGSSTUDIE. INLEDNING . SCHAKTNING OCH SEPARATHANTERING . OBSERVATIONER .	36 36 38 43 43 43 43 43 43 43 43 43 45 69 69 74 74 75
5 6 7 8	R 5.1 5.2 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 PROV 6.6 7.1 7.2 7.3 S	ESULTAT OCH DISKUSSION GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR RESULTAT OCH DISKUSSION – FALLVIKTSMÄTNING RESULTAT OCH DISKUSSION – BELASTNINGSFÖRSÖK I LABORATORIET ESULTAT OCH DISKUSSION MILJÖTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR ALLMÄNT KONDUKTIVITET PH TOTALHALT BOTTENASKPROVER SKAKTEST PÅ BOTTENASKPROVER OCH EXTRAKTION PÅ PROVER FRÅN UNDERLIGGANDE JORDLAG 'STRÄCKA 4 SAMMANSTÄLLNING OCH DISKUSSION TERVINNINGSSTUDIE INLEDNING SCHAKTNING OCH SEPARATHANTERING OBSERVATIONER	36 38 43 43 43 43 44 45 50 69 74 74 74 75

Bilagor

- A JORDARTSBESTÄMNING
- B BELASTNINGSNIVÅER VID BELASTNINGSFÖRSÖK I LABORATORIUM
- C SAMLINGSPROVER FÖRSTÄRKNINGSLAGER AV BOTTENASKA

1 Inledning

1.1 Bakgrund

De restprodukter som har störst potential som alternativa ballastmaterial är hyttsten, stålslagg, ferrokromslagg, bottenaska från förbränning av hushållsavfall, kolbottenaska och mineraliskt bygg- och rivningsavfall. Bottenaska från avfallsförbränning är ett från många synpunkter attraktivt geotekniskt konstruktionsmaterial, till exempel som förstärkningslager i vägar och hårdgjorda ytor. Internationellt har bottenaska från avfallsförbränning funnit stor användning i vissa länder; 100% i Holland, 70% i Danmark och 50% i Tyskland [1] [3]. I dessa länder finns regelverk som reglerar användningen, men i Sverige saknas än så länge sådana. Därför återanvänds inte bottenaska i någon större omfattning utanför svenska avfallsanläggningar idag. Behovet av bedömningsgrunder för restproduktanvändning påpekats av både producenter, sektorsansvariga och myndigheter. Från miljövårdande myndigheters sida ser man gärna att de berörda sektorerna tar initiativet och tar fram underlag för utarbetande av kriterier för restproduktanvändning. Man stödjer sig på den nya miljöbalken som innebär ett sektoriserat miljöansvar, alla aktörer åläggs ett ansvar för att miljömålen uppfylls. Ett förslag på miljöriktlinjer för askanvändning i anläggningskonstruktioner har därför presenterats i ett parallellt Värmeforskprojekt [1].

I detta projekt har en provväg studerats, vilken anlades 1987 inom ramen för ett större forskningsprojekt i slutet av 80-talet (Slagganvändning – Teknik och Miljö, finansierat av stiftelsen REFORSK). Provvägen anlades med naturliga och alternativa material i form av ett vändöra vid infarten till Linköpings avloppsreningsverk [4]. Både materialtekniska och miljömässiga egenskaper studerades vid anläggningstillfället. För att studera miljöpåverkan gjordes insamling av lakvatten från provvägen, dels från den belagda delen av vägen, dels från vägslänterna. Provvägen har studerats även i senare sammanhang. Till de senare studierna av vägen hör Andersson et al [5] som publicerats i en omarbetad version av Vägverket [6] samt Flyhammar och Bendz [7].

Vid tidpunkten för detta projektets start var provvägen c.a 16 år gammal och var då troligen den äldsta kvarvarande vägen i Sverige där bottenaska från förbränning av hushållsavfall använts som alternativt ballastmaterial.

Erfarenheter från den senare studien [7] indikerade att bottenaskan in-situ till viss del liknade ett monolitiskt material, vilket är intressant ur både ett miljötekniskt och ett geotekniskt perspektiv. Resultaten från fältstudierna utförda 2002 och rapporterade i [7] tyder på att en mobilisering av lättlösliga och mobila salter ägt rum i vägslänten och en bit in under asfaltkanten. Ute i vägslänten tycktes materialets pH sjunka snabbare än inne under beläggningen. Advektiv transport och urspolning antogs vara den domine-rande utlakningsmekanismen i vägslänten, medan masstransporten under asfaltbeläggningen sannolikt styrs av diffusiv transport. Omfördelningen av salter under beläggningen på både utspolningseffekter och karbonatisering.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Med eventuellt undantag av organiska ämnen så är bottenaska från avfallsförbränning relativt välkarakteriserad med avseende på fysikaliska och miljömässiga egenskaper. Standardiserade utlakningsförsök utgör ett grundläggande test för att undersöka lakningsegenskaperna för ett specifikt material Ett stort problem är att karakteriseringen av ett material i laboratorium med avseende på totalhalter, tillgängliga mängder och lakbara halter av ett specifikt ämne säger relativt lite om vilka utlakningskoncentrationer som kan förväntas under fältförhållanden. Detta beror på att en mängd parametrar skiljer sig markant när lakning under laboratorie- och fältförhållanden jämförs. Det gäller till exempel temperatur, pH, redoxförhållanden, materialets geometri (form och dimensioner), vattenflödet, ytarean av materialet som är exponerat för mobilt vatten, exponeringstid (varaktighet och frekvens) samt den spatiella variationen i fältskala [8].

Det saknas fortfarande kunskap om bärighet och utlakningsprocesser under fältförhållande från obundna vägbyggnadsmaterial i ett tidsperspektiv som svarar mot vägars livslängd. Den förväntade tekniska livslängden är minst 20–40 år för vägöverbyggnader som utformats enligt VÄG 94 [9] och ATB VÄG [10].

En förutsättning för storskalig användning av bottenaska från avfallsförbränning måste rimligtvis vara att materialet återanvänds ellert återtas när den markanläggning där det använts tas ur drift. Det finns också ett behov av att utreda förutsättningarna för återanvändning av sådant material som uppstår vid till exempel ledningsgrävning eller reparationer och underhåll i markanläggningarna. Det finns ett stort antal nationella och internationella undersökningar av bottenaskans geotekniska och miljögeotekniska egenskaper i samband med etablering av olika markanläggningar. Däremot saknas beskrivningar av utvecklingstrender i tiden med avseende på lakegenskaper och geotekniska egenska i befintliga väglager.

1.3 Syfte

Syftet med detta projekt var att studera:

- de ackumulerade effekterna av utlakning efter en längre tids användning av bottenaska från avfallsförbränning som förstärkningslager, genom att kartlägga förändringar i bottenaskan och eventuell fastläggning av utlakade ämnen i underliggande jordlager.
- de ackumulerade effekterna av belastning och åldring på bottenaskans geotekniska egenskaper.
- förutsättningarna för återvinning (separat schaktning) av bottenaska från befintliga väglager.

Studien inleddes i september 2003 genom insitu-experiment och provtagning i samband med att den knappt 16 år gamla provvägen med bottenaska schaktades bort på grund av omläggning av en angränsande väg. Utgrävningen av vägen utgjorde en unik möjlighet att studera den ackumulerade effekten av yttre påverkan (klimat, regn, trafikbelastning, etc.) och åldringsprocessernas inverkan på de miljömässiga och tekniska egenskaperna hos bottenaskan.

Projektet har tillfört ny kunskap om effekterna av långtidsutlakning från avfallsbottenaska under verkliga förhållanden i en vägkonstruktion. Rapportförfattarna känner bara till en tidigare studie i Sverige där utgrävning och provtagning utförts i samma syfte [7]. Dessutom tillvaratogs för första gången i Sverige också möjligheten att undersöka förutsättningarna för separat schaktning av bottenaskan i samband med bortschaktning av vägen.

1.4 Målgrupp

Producenter av bottenaska, entreprenörer, sektorsansvariga och tillståndsmyndigheter.

2 Beskrivning av provvägen och tidigare undersökningar

2.1 Provvägen

Vägen, det s.k. vändörat, var belägen i Linköping invid Gumpekullavägen och har fram till bortgrävningen i september 2003 utgjort en avfart till reningsverket. Provvägen byggdes 1987 av Tekniska Verken i samarbete med VTI och SGI inom projektet "Slagg från avfallsförbränning. Teknik och miljö" [4]. Provvägens totala längd var cirka 160 meter och den bestod av fem stycken delsträckor, var och en med unik uppbyggnad. Vägens bredd var 7,5 m, varje delsträcka var cirka 30 meter lång och vägbanan var doserad med lutningen 3%. Sträcka 1–4 utgjorde provsträckor och sträcka 5 tjänade som referenssträcka. Sträcka 1 och 2 var anlagda med kolbottenaska i förstärkningslagret och sträcka 3 och 4 med bottenaska från avfallsförbränning (förstärkningslager av äldre konstruktionstyp). Referenssträckan, nr 5, var anlagd med naturgrus med kornstorlek 0–200 mm i förstärkningslagret.

De tre schakt som grävdes inom ramen för denna studie, i sträcka 3, 4 och 5, har markerats i Figur 1 och uppbyggnaden av dessa delsträckor framgår av Figur 2.



Figur 1. Provvägens utformning i plan (Lundgren och Hartlén, 1991) Figure 1. Plan of the test road (Lundgren och Hartlén, 1991)







Benämning Material Nr cm 3 5 1 Slitlager 80 MAB12T Bärlager 110 AG 25 2 3 Bärlager Bärlagergrus 15 4 Först.lager Först.lager A-mtrl 10 5 Först.lager Slaggrus 32 6 Sand 15

Nr	Benämning	Material	cm
1	Slitlager	80 MAB12T	3
2	Bärlager	110 AG 25	5
3	Bärlager	Bärlagergrus	15
4	Först.lager	Slaggrus	42
5		Sand	15



Nr	Material	Benämning	cm
1	Slitlager	80 MAB12T	3
2	Bärlager	110 AG 25	5
3	Bärlager	Bärlagergrus	15
4	Först.lager	Först.lager, A-mtrl	42
5	-	Sand	15

Figur 2. Uppbyggnad av sträcka 3, 4 och 5 [4].

Figure 2. Cross-section of structure 3, 4 and 5 [4].

2.2 Tidigare undersökningar

Inom det ursprungliga projektet provades både materialegenskaper och miljöegenskaper. För att studera miljöpåverkan gjordes uppsamling av lakvatten från provsträckorna och referenssträckan. Uppsamlingen gjordes dels från material under den belagda delen, dels från material i vägslänterna. Den gjordes med hjälp av kluvna PVC-rör som anslöts till brunnar av betongrör. För att underlätta infiltrationen i vägkroppen och påskynda lakvattenproduktionen, slitsades asfalten vid brunnarna. Emellertid fungerade inte upp-samlingen av lakvatten som tänkt. Infiltrationen var för liten och vatten läckte in bakvägen i brunnarna. Provtagning av lakvattnet gjordes under perioden juli 1988–maj 1990, men på grund av problemen med lakvattenuppsamlingen kunde endast ett fåtal prov användas. Till exempel erhölls inte något lakvatten alls från vägkroppen vid provsträcka 4 under de två försöksåren.

Under sommaren 1998 gjordes en förnyad lakvattenprovtagning [6]. Syftet var att undersöka om halterna i lakvattnet förändrats sedan början av 1990-talet. Brunnarna pumpades ur och PVC-rörens inlopp till brunnarna rengjordes varefter plastflaskor fästes vid PVC-rören. Det visade sig att problemen med inläckande vatten fortfarande fanns kvar. Det gick inte att få något lakvatten från vägkroppen, eftersom brunnarna snabbt vattenfylldes vid kraftiga regn och flaskorna då flöt omkring. En provtagning av lakvatten som infiltrerat i vägslänterna kunde dock genomföras 1998-08-25. Flaskorna hade då suttit ute cirka en vecka. Från provsträcka 4 och referenssträckan erhölls vardera ett prov som analyserades med avseende på pH, elektrisk konduktivitet, klorid och metaller. Lakvattnen filtrerades (0,45 mm) innan analys. SGI:s laboratorium ansvarade för provhantering och analys av pH och elektrisk konduktivitet, medan analys av metaller gjordes med hjälp av ICO-teknik vid SGAB i Luleå. SGAB svarade också för analys av kloridhalt.

Hösten 1998 togs också prov på de gamla provsträckornas förstärkningslagermaterial. Avsikten var att undersöka om kornstorleksfördelningen eller de miljötekniska egenskaperna hade ändrats. För varje sträcka grävdes en provgrop i körbanan vid beräknat hjulspår och en i slänten. Motivet var hypotesen att materialet i körbanan eventuellt skulle ha utsatts för nedkrossning, men varit skyddat mot nederbörd och resulterande utlakning. Materialet i slänten skulle vara opåverkat av trafik, men utsatt för nederbörd och åtföljande lakning. Provgroparna grävdes och spettades för hand efter att det asfaltbundna slitlagret och bärlagret bilats bort med handhållen maskin (Pioneer). Sedan det obundna bärlagret grävts bort grävdes förstärkningslagret upp i hela sin tjocklek. Materialet delades ner och erforderlig provmängd togs hem till laboratorium för kornstorleks- och test av lakningsegenskaper enligt EN 12457 [5].



- Figur 3. Provgrop i sträcka 5 med fältsiktat förstärkningslagermaterial av naturgrus. Strax vänster om vägmitt på den enkelriktade provvägen. (Foto: Maria Arm, 1998)
- Figure 3. Test pit in structure 5, just left of the middle of the one-way road (Photo: Maria Arm, 1998)

Resultaten från lakförsöken 1998 sammanfattades med att det var svårt att dra några generella slutsatser baserat enbart på dessa [5]. För flertalet av de utlakade spårämnena, t.ex. Cd, Cr, Ni och Zn, var inte skillnaderna så stora mellan de utlakade mängderna från de olika materialen. Utlakningen av Cu var högst från bottenaskan samt från referensmaterialet i vägslänten, medan den högsta utlakade Pb-mängden noterades för referensmaterialet som låg i vägslänten. Ca, Mg och SO₄ lakade ut i större mängd från bottenaskan än från referensmaterialet.

Generellt för de undersökta materialen gällde att huvudelementen och salter lakade ut i större mängder från materialet i körbanan än i vägslänten, medan spårämnen tenderade att laka ut i större mängder från materialet i vägslänten. I vägslänten uppvisade materialen tecken på karbonatisering, dvs. ett lägre pH-värde.

Kornstorleksanalysen visade att det var svårt att dra några slutsatser om eventuell krossning av materialet utifrån siktningarna ([5] och [12]). För bottenaskan låg kurvorna efter de nya siktningarna lägre än såväl opackad som packad bottenaska siktad 1987. Även för det konventionella 0–200 mm materialet låg de senare siktkurvorna lägre än kurvan för det material som siktades 1987 (dvs. mindre andel finmaterial). En viss del av denna skillnad kan bero på att vid de senare siktningarna hade materialet inte tvättsiktats, vilket det gjordes vid siktningarna 1987. Då materialet ej tvättsiktas fastnar en del finpartiklar på de grövre kornen och andelen finmaterial som passerar den finmaskigaste sikten blir lägre än i verkligheten. Den största skillnaden berodde dock sannolikt på att materialens kornstorleksfördelning varierade inom respektive provsträcka och provtagningen gjordes inom olika delar av provsträckan. De senare utförda provtagningarna i körbanan respektive i slänten, vilka var tagna relativt nära varandra, tydde dock på att en viss krossning av materialet i körbanan kan ha ägt rum. Kurvorna för slaggruset som tagits i körbanan låg något högre än motsvarande kurvor från material taget i slänten. För det konventionella 0–200 materialet visade kurvorna ingen direkt skillnad mellan materialet taget i körbanan och i slänten.



Figur 4. Kornstorleksfördelning 1987 och 1998 --- sträcka 4 med slaggrus

Figure 4. Particle size distribution 1987 and 1998 – structure 4 with MSWI gravel



Figur 5. Kornstorleksfördelning 1987 och 1998 - sträcka 5 med konventionellt 0–200 mm material

Figure 5. Particle size distribution 1987 and 1998 – structure 5 with natural gravel 0–200 mm

Jämnhetsmätningar och besiktningar utförda 1988 visade inga tecken till spårbildning, sprickor eller andra skador [11]. Med åren började dock sprickor uppträda (Figur 6). Trafikmängden kan uppskattas till cirka 50 fordon per dygn, varav de flesta var tunga.



- Figur 6. Bärighetsskador längs med beläggningens mittskarv vilken sammanfaller med vänster hjulspår (Foto: VTI Safwat Said, 1999).
- *Figure 6.* Longitudinal cracks along the centerline of the road which is also the left wheel track . (Photo: VTI Safwat Said, 1999)

3 Metod geotekniska undersökningar

3.1 Fallviktsmätning

Fallviktsmätningar brukar användas för att registrera hållfasthetsutveckling för vägkonstruktioner. Eftersom fallviktsmätningar har gjorts på dessa sträckor vid flera tillfällen tidigare, dels de två första åren efter byggandet 1987 och 1988 [11], dels 1999 [12] utnyttjades möjligheten att göra en sista mätning i maj 2003 före bortgrävningen av vägen. Vid mätningen användes samma utrustning och utvärderingssätt som vid mätningen 1999, d.v.s. mätning enligt Vägverkets Metodbeskrivning [13].

Metoden är ett hjälpmedel för att bedöma vägars eller vägmateriallagers styvhetsegenskaper och heter egentligen Provbelastning med fallviktsapparat (Figur 7). En fördel med metoden är att den använder en dynamisk last som simulerar en fordonsaxelöverfart. Dessutom är det en snabb, ickeförstörande provning där olika lagers egenskaper kan särskiljas. Den fungerar bra på vägkonstruktioner med alternativa material, men den kan inte användas på för svagt underlag där inte mätfordonet tar sig fram.



Figur 7. Princip för provbelastning med fallviktsapparat enligt [13]

Figure 7. Principle of Falling Weight Deflectometer, FWD, measurement according to [13]

Vid provbelastningen belastas vägytan av en vikt som får falla ned på en belastningsplatta som vilar på vägen. Under belastningen registreras vägytans maximala nedsjunkning eller deflektion av givare, dels i belastningscentrum, dels i ett antal punkter på valda avstånd därifrån. Vikten faller ned på ett fjädersystem ovanpå belastningsplattan och plattan överför kraftpulsen till vägen. Kraftpulsens storlek beror av viktens massa, fallhöjden, fjädersystemets egenskaper och vägkroppens styvhet. Storleken på deflektionerna och hela "deflektionsprofilens" utseende är en funktion av styvheterna och tjocklekarna hos de lager som påverkas av belastningen. Deflektionen i belastningscentrum påverkas av alla lager inom lastens djupverkan, medan deflektionen under den yttersta givaren påverkas främst av förhållandena i undergrunden. (Deflektionsprofilen kallas ofta lite vanvördigt för sjunktratt). Om lagertjocklekarna i en konstruktion är kända kan de olika lagrens styvheter itereras fram med hjälp av ett datorprogram och de uppmätta deflektionernas storlek [14]. Vid kontroll av hållfasthetsutveckling görs upprepade mätningar och de utvärderade lagerstyvheterna, s.k. lagermoduler, jämförs.

Observera att det finns fallviktsapparater av olika fabrikat och att tekniskt viktiga egenskaper såsom kraftpulsens längd och form kan skilja dem åt. Därför bör upprepade mätningar med syfte att följa upp ett vägobjekt utföras med apparater av samma konstruktionstyp. Normalt utförs mätning i höger hjulspår för att fånga den tunga trafikens påverkan på vägen. På färdig vägyta används belastningen 50 kN. På andra ytor, till exempel terrass, bör en mindre last användas. Normalt är belastningsplattans diameter 300 mm. Deflektionsgivarnas antal och placering väljs med tanke på vägkonstruktionen. Vägverket rekommenderar generellt minst sex givare som placeras på följande avstånd från belastningscentrum: 0, 200, 300, 450, 600 och 900 mm. Mätning ska göras på otjälad väg om inte syftet är att studera just tjällossning. Temperaturen i beläggningen och luften ska mätas vid belastningstillfället, beläggningstemperaturen flera gånger. Det beror på att en asfaltbeläggnings styvhet är temperaturberoende och mätresultaten behöver korrigeras till en referenstemperatur.

3.2 Uppborrning av "ostörda" provkroppar

I samband med utgrävningen av provvägen i augusti 2003 borrades tre provkroppar upp ur förstärkningslagret av bottenaska med hjälp av kärnborrutrustning. Syftet var att studera styvhet och stabilitet på dessa "ostörda" provkroppar genom belastningsförsök i laboratoriet (Avsnitt 3.3).

Med ledning av tidigare studier antogs materialet bestå av större partiklar [7]. Därför beslutades att provdiametern behövde vara större än de som vanligtvis brukar användas vid geotekniska provtagningar. Diametern 150 mm valdes eftersom en provtagare för 150 mm tjocka prov fanns tillgänglig och eftersom VTI har utrustning för och erfarenhetsdata från belastningsförsök på provkroppar med diametern 150 mm. Generellt gäller för denna typ av belastningsförsök att provdiametern skall vara minst fem gånger större än det provade materialets största partikelstorlek.

Proverna togs längs en linje cirka en meter väster om schaktet i provsträcka 3. En provkropp borrades i vägmitt, en på halva avståndet från vägmitt till vägkant och en ca 0,5 meter in från vägens norra kant (Figur 8). Borrningen gjordes med kärnborrutrustning, Hilti DCM II, med asfaltborrkrona ϕ 15 cm utan användande av kylvatten, men med grävning runtom foderröret. Utrustningen används vanligtvis av VTI för provtagning i vägkroppars asfaltbundna lager. Borrningen gjordes med foderrör med en invändig diameter av cirka ϕ 15 cm och möjlighet till att ta drygt 30 cm höga prov. Tre stycken likadana borrkronor användes och provkropparna transporterades inuti foderrören från provtagningsplatsen till VTI:s Vägmateriallaboratorium.

Anledningen till att inget kylvatten användes här var att ett obundet materials egenskaper förändras av vatten. Dessutom fanns en uppenbar risk för bortspolning av provmaterial och därmed en störning av provkroppen. Grävningen runt utsidan av foderröret var

inte planerad men blev nödvändig för att minska friktionen från omgivande material och få borrkronan att rotera. Detta visade sig på plats då elverket som drev borrutrustningen överbelastades. Elverkets säkring löste ut vid ett flertal tillfällen när friktionen mellan omgivande material och borrkronan blev för stor. Vid normal borrning hjälper kylvattnet som ska kyla borrkronan även till att minska friktionen genom att vattnet "smörjer". De provkroppar som borrades ut antogs vara relativt ostörda. Materialet behöll sin naturliga vattenkvot och packningsgraden i provkropparna blev sannolikt nära insituförhållandet, men störningar av materialet på grund av provtagningen kan inte uteslutas. Hur stor denna eventuella störning var kan inte bedömas inom ramen för detta arbete. Det kan nämnas att det var mycket svårt att trycka ut proven ur foderrören.



Borrning



borrning/grävning



Grävning på utsidan om foderröret



Utrymme på utsidan om foderröret under Utborrat prov i foderrör. Nere till höger i bilden syns en hylsa för att ta hand om sådana prov som glidit ut ur foderröret.

Uppborrning av "ostörda" provkroppar. Figur 8.

Figure 8. Sampling of "undisturbed" specimens

3.3 Belastningsförsök i laboratorium

På de tre uppborrade provkropparna utfördes belastningsförsök i form av dynamiska treaxialförsök i VTI:s utrustning. Dynamiska treaxialförsök är en metod för att bestämma mekaniska egenskaper på obundna material. Ur försöken utvärderas styvheten dvs. materiallagrets förmåga att fördela lasten till underliggande lager och stabiliteten dvs. materialets förmåga att motstå omlagringar och sättningar. Styvheten anges som en resilientmodul, M_r , som beräknas ur spänningen, σ , och de axiella elastiska deformationerna, ε , genom uttrycket $M_r = \sigma/\varepsilon$. Stabiliteten redovisas som uppmätta permanenta axiella deformationer (sättningar) vid olika belastningar.



Färdig provkropp innesluten i gummimembran Provkropp installerad i treaxialutrustning

Figur 9. Provberedning och installerat prov.

Figure 9. Preparation of specimens

Före provningen kapades provkroppen till rätt höjd och försågs med ändplattor i metall och ett gummimembran utmed mantelytan. Den ställdes sedan in i en lufttät kammare (Figur 9). Via ett plaströr genom topplattan var provkroppen i kontakt med atmosfären. På det viset säkerställdes att den höll atmosfärstryck och eventuell dränering möjliggjordes.

Vid provningen utsattes provkroppen för ett förutbestämt belastningsprogram. Ett sådant består av ett antal sekvenser med sinsemellan olika vertikallaster, kammartryck och antal belastningspulser. En belastningspuls är en sinusformad dynamisk belastning med frekvensen 10 Hz utan viloperioder vilket ger belastningstiden 0,1 sekunder. Mätning av deformationer görs med externa och interna givare, s.k. Linear Variable Differential Transducers (LVDT). En extern givare mäter provkroppens totala vertikala deformation. Tre interna givare är monterade axiellt runt provkroppen och mäter den vertikala deformationen vid provkroppens mittersta tredjedel. Medelvärdet från dessa interna givare ger deformationen mätt med interna givare. När avsikten är att jämföra material med varandra används endast den externa givarens resultat. Kraften mäts med en lastcell. När den ackumulerade permanenta vertikala hoptryckningen överstiger 6% avbryts provningen automatiskt och provet sägs ha gått till brott.

Eftersom obundna materials resilientmodul varierar med den belastning de utsätts för brukar den redovisas som en funktion av belastningen eller spänningen, σ . Några exempel på uttryck för belastningen är summan av huvudspänningarna, $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, som innebär hela vertikalspänningen plus dubbla kammartrycket, deviatorspänningen, q, som innebär skillnaden mellan vertikal- och horisontalspänningen samt medelnormalspänningen, p som innebär (hela vertikalspänningen+dubbla kammartrycket)/3.

Tre olika belastningsprogram brukar användas vid VTI:s materialprovningar. De kallas bärlagertest, förstärkningslagertest och skyddslagertest, eftersom de är anpassade till de spänningar som kan förväntas förekomma på dessa olika typer av väglager.

Avsikten var att använda bärlagertestprogrammet på de uppborrade provkropparna eftersom de antogs klara den påfrestningen som detta belastningsprogrammet innebär. Efter att den första provkroppen provats och gått till brott mycket snabbt, justerades emellertid det ursprungliga antagandet. De två senare provkropparna belastades därför först med skyddslagertestprogrammet, vilka de klarade utan större deformationer. Därefter flyttades de över till utrustningen för bärlagertest och provades med detta belastningsprogram.

4 Metod miljötekniska undersökningar

4.1 Provtagning i fält

Asfaltbeläggningen och det underliggande bärlagret schaktades bort med hjullastare så att förstärkningslagret där bottenaskan ingick blottlades. För att undvika att eventuell nederbörd kom i kontakt med de tilltänkta provtagningsytorna täcktes sträckorna 3, 4 och 5 med presenningar.

I de tre sträckorna grävdes 1,5 m djupa och knappt 1 m breda schakt tvärs vägriktningen med hjälp av hjullastaren (Figur 10).



Figur 10. Utgrävning av schakt i provsträcka 3

Figure 10. Excavation of trench in structure 3

För indelning av provtagningspunkter fästes en träregel i horisontellt läge på schaktens botten. Brädans ände i innerkrurvan sattes som origo varefter varje halvmeter markerades för provtagning. Innan provtagning bestämdes jordlagerföljden vid varje halvmeter. I provsträcka 3 och 4 togs 250 ml stora prover var tjugonde centimeter i vertikalled upp till bottenaskans nivå . I övergången mellan naturgrus och bottenaska togs ett prov strax under och ett prov strax över materialgränsen. Sedan fortsatte provtagningen var tjugonde centimeter upp i bottenaskan (Figur 11). I provsträcka 3 och 4 togs även 2 liter stora prover av slaggruset. Dessa prover togs för varje hel meter i horisontell led i höjd med slaggrusets två lägsta provtagningspunkter.



Figur 11. Provtagning i provsträcka 4

Figure 11. Sampling in structure 4

Provtagningen skedde med murslev (Figur 12). I varje provpunkt skrapades först det ytliga materialet bort innan provet togs. Det bör påpekas att bottenaskan var mycket hård och fast i sin uppbyggnad. Det var mycket svårt att kratsa ut erforderlig mängd provmaterial. Proven förvarades i tättslutande plastburkar med kvävgas i väntan på analys.



Figur 12. Provtagning med murslev och 250 ml plastburk

Figure 12. Sampling with a trowel and a 250 ml plastic container.

I sträcka 5 togs prover varje hel meter i horisontellt led. I vertikal led togs prover på 0, 60 och 120 cm nivå. Samlingsprov i leran togs på nivån 0–20 cm och samlingsprov av sand togs på nivån 100–120 cm.

Provpunkterna i de olika jordlagren visas i Figur 13–Figur 14. Jordartsbestämning av proverna som togs i jordlagren i sträcka 4 och 5 utfördes av Kent Enkell (VTI) och resultatet presenteras i Bilaga A.



Figur 13. Provtagningspunkter i provsträcka 4

Figure 13. Sampling points in structure 4]



Figur 14. Provtagningspunkter i sträcka 5

Figure 14. Sampling points in structure 5[

I provsträcka 4 togs 53 prov i förstärkningslagret och 107 prover i de underliggande jordlagren. I referenssträckan togs 27 prover totalt. I provsträcka 3 togs totalt x prov. Dessa prover utgör en reserv och inga analyser kommer att göras på dessa inom ramen för denna studie.

Efter provtagningen schaktades bottenaskan bort och lades i upplag vid Gärstadverket.

4.2 Laboratorieundersökningar

4.2.1 Provberedning och neddelning

Vid provberedningen användes skedar av rostfritt stål, omblandningsskålar av porslin, papper (Torky),, plastpåsar, latexhandskar, etiketter, kranvatten och kvävgas på tub. Proverna delades i två hälfter, där den ena hälften återfördes till burken för vidare förvaring under mörker och kyla och den andra fördes till en plastpåse för vidare torkning och provberedning. Provburkarnas storlek var 250 ml för schakt 2 och 3 (provsträcka 3 och 4) samt 500 ml för schakt 1 (sträcka 5).

Sandiga prover/bottenaska

Provburken skakades och vändes ett flertal gånger för att erhålla en bra omblandning av provet. Om provburken var välfylld lossades locket och materialet omrördes med den rostfria skeden noggrant, varefter burken tillslöts och skakades/vändes åter. Hälften av provet uttogs direkt från provburken och överfördes till plastpåsen med hjälp av skeden. Påsen tillslöts med en knut för att förhindra eventuell avdunstning från materialet medan det mellanlagrades. Provburken, med den resterande halva provmängden, konserverades genom att den fylldes med kvävgas, vilket minskar risken för biologisk och kemisk (bl a oxidering) förändring av provet.

Leriga prover

Hela provet tömdes ut i porslinsskålen, där det finfördelades till mindre klumpar med den rostfria skeden eller med händerna. Handskar användes för att minimera kontaminationsrisken. Då provet erhållit tillräckligt liten aggregatstorlek, omblandades provet med skeden innan hälften återfördes till provburken. Liksom de sandiga proven konserverades detta provet med kvävgas innan det återbördades till förvaringen i klimatrummet. Den resterande provmängden skrapades ned i en plastpåse och förslöts.

Efter att skeden och/eller porslinsskålen använts, diskades de ur med en skvätt vatten, varefter de torkades med papper. Rengöringen kan tyckas ej vara optimal ur ett kemiskt och kontaminationsriskperspektiv, men med tanke på de provmängder som hanterades torde proceduren ha liten påverkan på slutresultatet.

Torkning

Innan proverna torkades vägdes de för att senare kunna beräkna vatteninnehållet. Proverna torkades i respektive plastpåse i torkskåp vid temperaturen 40°C under en tillräckligt lång tidsrymd för att proverna skulle hinna torka. Denna tid varierade beroende på materialets struktur och fuktighet, men understeg inte 48 timmar och översteg inte 96 timmar.

4.2.2 Bestämning av naturlig vattenkvot

Efter torkningen vägdes påsarna åter för att bestämma hur mycket vatten som avgått under torkningen. En vattenkvot beräknades enligt formeln

$$w_{N} = \frac{\left(m_{fuktigt} - m_{torrt}\right)}{\left(m_{torrt} - m_{pase}\right)} \cdot 100$$

där

 $w_N = vattenkvoten i \%$ $m_{fuktigt} = provets fuktiga vikt (inkl. påse)$ $m_{torrt} = provets torra vikt (inkl. påse)$ $m_{påse} = påsens vikt$

4.2.3 Siktning

Proverna siktades maskinellt genom en 2 mm-sikt, varefter materialet som stannat på sikten vägdes för att få en grov uppskattning av materialets storleksfördelning (dvs.

vikten av materialet större och mindre än 2 mm). Vikten av materialet mindre än 2 mm beräknades genom att dra ifrån vikten av materialet större än 2 mm från den totala vikten på det torra materialet. Ingen hänsyn har tagits till eventuellt materialbortfall under processen. Materialet mindre än 2 mm återfördes sedan till påsen.

4.2.4 Mätning av pH i jord enligt SS-ISO 10 390

Bestämning av pH utfördes enligt standard SS-ISO 10 390. Standarden beskriver en instrumentell metod för att bestämma pH med glaselektrod i en 1:5 (V/V) suspension av jord och vätskemedium. Kaliumkloridlösning med en koncentration på 1 M användes som vätska. Denna tillreddes genom att lösa 149 (\pm 0,5) g KCl i 2000 ml avjoniserat Milli-Q-vatten. Mätkolv användes för att erhålla stor noggrannhet hos volymen. I en och samma omgång gjordes cirka 30–40 prover i ordning.

Efter att påsen med provet omskakats väl uppmättes med hjälp av "mätsked" 5 (\pm 0,5) ml av det siktade provet och överfördes till en mindre, 60 ml, flaska med kork. 25 (\pm 0,5) ml kaliumkloridlösning tillsattes sedan med "autopipett" (apparat som fyller på ungefärlig mängd vätska med hjälp av en pump som sköts med en skruvratt) varefter korken förslöts och provet skakades. Alla proverna fördes sedan över till ett skakbord och skakades i 5 (\pm 0,2) minuter, varefter de tilläts vila i 17 (\pm 3) timmar. (Standarden föreskriver att proverna kan stå 2–24 timmar.) Mätningar av fyra prover gjordes paralellt, och inför varje mätning skakades provet kraftigt, varefter mätningen utfördes på sedimenterande prov.

Elektroderna som användes var relativt nyinköpta och av Metrohms "unitrode"-typ (gelelektrod) och utrustningen var MeterLab PHM 290. Efter utförd mätning kastades proverna, flaskorna diskades i diskmaskin med Milli-Q-vattensköljningar och återanvändes. Repeterbarheten och reproducerbarheten i mätningarna säkerställdes genom att minst vart tionde prov (28 st av totalt 187 prov) utfördes som dubbelprov där mätningarna inte fick avvika mer än:

0.15 för pH < 7 0.20 för 7 < pH < 7,5 0.30 för 7,5 < pH < 8 0.40 för pH > 8

4.2.5 Mätning av elektrisk konduktivitet i jord enligt SS-ISO 11 265

Den elektriska konduktiviteten mättes på proverna enligt standard SS-ISO 11 265. Standarden beskriver en instrumentell metod för rutinmässig bestämning av den elektriska konduktiviteten i ett vattenextrakt av jord. Proverna gjordes i ordning samtidigt som proverna för pH-mätning. Relationen mellan prov och vätska var 1:5 (vikt/volym) till skillnad från pH-mätningarna som var volym/volym. I en och samma omgång gjordes cirka 30–40 prover i ordning.

Efter att påsen med provet omskakats väl vägdes 20,00 (\pm 0,02) g av det siktade provet in och överfördes till en mindre, 150 ml, flaska med kork. 100 (\pm 2) ml avjoniserat Milli-Q-vatten tillsattes sedan med mätglas varefter korken förslöts och provet skakades. Alla proverna fördes sedan över till ett skakbord och skakades i 30 (\pm 1) minuter, varefter de filtrerades direkt (eller så fort det var möjligt). Det var möjligt att filtrera 12 prover samtidigt genom en uppriggad filtrerställning. Från start användes filter med låg askhalt (Munktell modell 5 och 005, diameter 125 mm) men då filtreringen tog alltför lång tid övergick filtreringarna till att utföras med veckade filter, Schleicher & Schuell Folded Filter 520 B ¹/₂ med diameter 125 mm. Kontrollmätningar gjordes, vilka inte indikerade några som helst skillnader i konduktivitetsvärdena. Vätskan samlades upp i ett litet kärl, varefter en magnetloppa tillfördes för omrörning under själva mätningen. En del av proverna fick vänta ett litet tag på att få mätas, vilket dock inte torde påverkat mätningarna nämnvärt. För mätningarna användes en konduktivitetsmätare, MeterLab CDM 210, och efter mätningarna kastades proverna, flaskorna diskades i diskmaskin med Milli-Q-vattensköljningar och återanvändes. Mellan respektive filtreringsomgång sköljdes trattarna som hållit filtrena ur noggrant med Milli-Q-vatten med hjälp av en sprutflaska. Repeterbarheten och reproducerbarheten i mätningarna säkerställdes genom att minst vart tionde prov (28 st av totalt 187 prov, samma som för pH-mätningarna) utfördes som dubbelprov där mätningarna inte fick avvika mer än:

 $\begin{array}{l} 5 \mbox{ mS } m^{-1} \mbox{ för } 0 < \kappa < 50 \mbox{ mS } m^{-1} \\ 20 \mbox{ mS } m^{-1} \mbox{ för } 50 < \kappa < 200 \mbox{ mS } m^{-1} \\ 10 \mbox{ \% } \mbox{ för } \kappa > 200 \mbox{ mS } m^{-1} \end{array}$

4.3 Enstegs laktest

4.3.1 Provberedning

Materialet siktades i en 4 mm sikt. Metallbitar och växtdelar > 4 mm avlägsnades. Övrigt material > 4 mm krossades med käftkross/mortel.Burkarna innehöll cirka 100 g material och av det krossades cirka 40–50 g alltså cirka 50%. Uppskattningsvis var det i allmänhet 3–4 aggregat > 1 cm i diameter, 5–6 aggregat 0,5–1 cm i diameter och ett större antal mindre partiklar.

4.3.2 Skakförsök

Enstegs skakförsök L/S-10 utfördes. Försöken gjordes på 45 gram torrmaterial, annars enligt standard för enstegs skakförsök L/S-10 materialstorlek mindre än 4 mm, EN 12457-2.

4.3.3 Övrigt

Det material som skakförsök utförts på sparades separat. Materialet torkades i provburkarna vid 40°C och tömdes sedan i plastpåsar.

4.4 Totalhalt

Ur var och en av de 53 proven som togs i förstärkningslagret i provsträcka 4, och som beretts enligt 4.3.1, togs en delmängd om c:a 20 g ut. Dessa delmängder blandades samman till totalt 10 samlingsprover som lämnades till Analytica för totalhaltsanalys enligt EN 13656. I bilaga C beskrivs vilka prov som ingår i de olika samlingsproverna.

4.5 Extraktion

Extraktion utfördes på jordproverna från schaktet i provsträcka 4. Fraktionen motsvarar de former som kan frigöras vid extraktion med 0.5 M HCl under 1 timme vid L/S 20.

Det handlar således om en delmängd av totalhalten. Sunderland [16] fann att HClextraktioner på jordprover visar något större mängd lösta ämnen än en sekvens av tre olika extraktionssteg enligt den sk Bureau of Reference (BRC) -proceduren. I BRCproceduren upplöses ämnen bundna till kemiskt reaktiva fasta faser: syralösliga (t.ex. karbonater och amorfa oxider), reducerbara (t.ex. järnhydroxider) och oxiderbara (t.ex. organiskt material och sulfider). Dessa faser bildas ofta i anrikningshorisonten i en jordartsekvens i samband med utfällningar av sekundära mineralfaser som kalcit, hydroxider/oxider av Fe, Mn och Al och lermineral samt humusämnen. Vår hypotes är att ämnen i undergrunden som lakats ut från slaggruset/bottenaskan huvudsakligen binds till dessa faser. Även omfördelningar av olika ämnen i bottenaskan antas äga rum huvudsakligen mellan dessa faser.

4.6 Analys av lakvätska

Lakvätskan från skaktesterna på bottenaskan analyserades med avseende på: Al, As, Ba, Ca, Cd, Cl⁻, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, NO₃⁻, N, TN, P, PO₄³⁻, P.

Pb, S, SO₄²⁻, S, Si, V, Zn, TOC och IC.

Lakvätskan från HCl-extraktionerna analyserades med avseende på:

Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, V och Zn.

Analyserna utfördes på Institutionen för Växtekology, Lunds Universitet och följande utrustning användes: TOC analys utrustning av fabrikat Shimandzu, jonkromatograf Dionex med kolonner av typ AG14 och AS14A och ICP AEC instrument P-E 3000DV.

5 Resultat och diskussion geotekniska undersökningar

5.1 Resultat och diskussion – fallviktsmätning

Här redovisas resultatet av fallviktsmätningen 2003 på sträcka 4 och 5. Vid resultatanalysen har vägkonstruktionen i sträckorna delats upp i tre lager och lagermodulen för respektive lager har utvärderats. Lager 1 består av slitlager plus bundet och obundet bärlager (Figur 2). Lager 2 är förstärkningslagret och Lager 3 är undergrunden. Resultatet visar att förstärkningslagret av slaggrus har i stort sett samma lagermodul som förstärkningslagret av naturgrus (Figur 15).



Figur 15. Beräknade lagermoduler för tre lager i sträcka 4 och 5 vid provvägen. Lager 1: beläggning plus bärlager, lager 2: förstärkningslager, lager 3: undergrund.

Figure 15. Calculated E-module for three layers in section 4 and 4 of the test road. Layer 1 pavement and base layer. Layer 2: subbbase layer Layer 3: Subgrade

Sträcka 4, 2003	Sträcka 5, 2003
E1= modul för skiktet 0–265 mm	E1= modul för skiktet 0–260 mm
E2= modul för skiktet 265–830 mm	E2= modul för skiktet 260–890 mm
E3= modul för skiktet 830–3000 mm	E3= modul för skiktet 890–3000 mm

Uppföljande fallviktsmätningar har gjorts vid flera tillfällen förutom inom detta projekt, dels de två första åren efter byggandet 1987 och 1988 [11], dels 1999 [12]. Resultaten från de två tidigare mätningarna kan emellertid inte jämföras direkt med de två senare eftersom mätförfarandet och beräkningsförfarandet inte var desamma då som nu. Däremot kan en relativ jämförelse göras, dvs. relationen mellan slaggrussträckans och referenssträckans styvhet kan jämföras vid olika tidpunkter. Då framgår det att en utveckling av slaggrusets hållfasthet har ägt rum. Resultaten från samtliga fallviktsmätningar jämförs i Tabell 1.

Tabell 1Resultat från fallviktsmätningar på provvägen i Linköping. Kvot mellan slaggrus-
sträckans och referenssträckans lagermodul. Förstärkningslager (FL) och under-
grund har räknats som ett lager. (Data från [12] och detta projekt).

Mättillfälle	Lagermodul (FL av <i>aska</i> + undergrund) / Lagermodul (FL av <i>grus</i> + undergrund)		
1987-11	55%		
1988-05	79%		
1988-10	92%		
1999-08	101% (relation mellan förstärkningslager) 143% (relation mellan undergrunder)		
2003-05	92% (relation mellan förstärkningslager) 127% (relation mellan undergrunder)		

Värdena ska tolkas så att vid mätningen i november 1987, strax efter färdigställandet, var slaggrussträckans sammansatta lagermodul bara drygt hälften så stor som referenssträckans. Efter cirka ett år var den nästan lika stor och i augusti 1999 hade skillnaden försvunnit helt. Vid den sista mätningen, 2003, var slaggrussträckans lagermodul något lägre än referenssträckans. Det visar att den ökning av styvheten som uppmätts tidigare har avstannat (Figur 16).



Figur 16. Resultat från fallviktsmätning i augusti 1999 och maj 2003. Beräknade lagermoduler för tre lager i sträcka 4 och 5 vid Gumpekulla i Linköping. Lager 1: asfaltbeläggning plus bärlager, Lager 2: förstärkningslager, Lager 3: undergrund.

Figure 16. Results from the falling weight deflectometer in August 1999 and may 2003.

Två skillnader mellan de båda senaste mättillfällena är en hög beläggningstemperatur 2003 och ett nytt slitlager om cirka fyra cm asfalt (MAB) som lagts på mellan mätningarna. Båda skillnaderna har beaktats vid utvärderingen av data.

5.2 Resultat och diskussion – belastningsförsök i laboratoriet

Från belastningsförsöken har styvhet och stabilitet för de tre uppborrade provkropparna utvärderats. Dessa parametrar redovisas här var för sig. Dessutom jämförs resultaten med motsvarande för ett bergkrossmaterial och två slaggrusmaterial som provats tidigare inom andra studier.

För provkropp 1 finns bara värden från bärlagertestet eftersom den ursprungliga planeringen bara omfattade det belastningsprogrammet. När provkroppen gick till brott mycket snabbt, justerades planen och de två senare provkropparna belastades först med skyddslagertestprogrammet, vilket de klarade utan brott. Därefter flyttades de över till utrustningen för bärlagertest där provkropp 3 gick till brott tidigt och provkropp 2 klarade relativt höga belastningar innan brott.

5.2.1 Styvhet

Styvheten redovisas som beräknad resilientmodul vid olika belastningar (Tabell 2).

			· · · · J · /· · ·	· · · · · · ·		
Sekvensnamn	Antal belastnings- pulser	Medelnormalspänning	Beräknad resilientmodul (MPa)			
horisontalspänning, σ _h (kPa)		(σ _v + 2 x σ _h) / 3 (kPa)	Provkropp 1	Provkropp 2	Provkropp 3	
Skyddslagertest						
10/10	1 000	17		81	60	
30/10	1 000	23		69	61	
50/10	1 000	30		66	61	
50/20	100 000	37		74	64	
70/20	100 000	43		93	74	
100/20	10 000	53		84	70	
150/20	10 000	70		72	brott	
Bärlagertest						
100/60	1 000	80	91	135		
200/60	1 000	113	92	136		
400/60	1 000	180	brott	143		
400/120	1 000	220		178		
600/120	100 000	287		brott		
800/120	100 000	353				
1 000/120	10 000	420				
1 200/120	10 000	487				

Tabell 2. Beräknade resilientmoduler (MPa) efter 1 000 belastningspulser i varje sekvens.

När provkropparnas resultat från bärlagertestet jämförs bör det observeras att provkropp nr 2 har belastats med skyddslagertest innan, medan nr 1 inte har "förbelastats" på detta sätt. En sådan förbelastning kan antas stärka provkroppen, så länge som belastningarna är små.

Jämförelser med andra material

Resultaten jämförs här med ofta använt referensmaterial av bergkross. Referensmaterialet kommer från Skärlundatäkten i Östergötland och är en krossad, finkornig, relativt glimmerrik granit med kornstorlek 0–32 mm och något flisiga partiklar. Det är inte samma material som användes i referenssträckan (provsträcka 5) i provvägen. Det pro-
vades med skyddslagertestprogrammet 2004 och bärlagertestprogrammet 2001. Jämförelser görs också med två slaggrusmaterial som undersökts tidigare i andra studier. Slaggrusmaterialen kommer från SYSAV:s och Umeå Energis anläggningar. Båda har kornstorleken 0–32 mm. SYSAV:s material provtogs 1999 och hade då lagrats utomhus i cirka två år medan Umeås material provtogs 2001 och var lagrat i sex månader.

Styvheten hos de uppborrade provkropparna varierar mellan 60 och 93 MPa vid de små belastningar som ingår i skyddslagertestet. Det kan jämföras med 106–221 MPa för de andra slaggrusmaterialen och 117–170 MPa för det krossade bergmaterialet (Figur 17 Vänster). Under bärlagertestet var styvheten 91–178 MPa, vilket ska jämföras med 188–296 MPa för de andra slaggrusmaterialen och 226–496 MPa för bergkrossmaterialet (Figur 17 Höger).



Figur 17. Utvärderad resilientmodul som funktion av medelnormalspänningen för projektets tre provkroppar plus inpackade provkroppar av krossat berg, slaggrus från Umeå Energi och slaggrus från SYSAV. Vänster: Skyddslagertest. Bergkrossmaterialet är provat 2004. Höger: Bärlagertest. Bergkrossmaterialet är provat 2001.

Observera att provkropp 2 liksom de inpackade provkropparna från SYSAV och Dåva har belastats med skyddslagertest innan bärlagertestet påbörjades. Provkropp 1 och referensmaterialet av krossat berg har inte förbelastats på det sättet.

5.2.2 Stabilitet

Stabiliteten redovisas som ackumulerad permanent deformation (sättning) under hela försökets gång, skyddslagertestprogram med små belastningar (Figur 18) och bärlagertestprogram med stora belastningar (Figur 19). Belastningscykel enligt VTI-metoden se bilaga B.

Figure 17. Resilient modeule as a function of the average tension for the three test road samples, crushed rock (reference material), bottom ash from Umeå Energi and bottom ash from SYSAV.



Figur 18. Ackumulerad deformation (%) som funktion av ackumulerat antal belastningspulser under skyddslagertestprogrammet. Belastningssekvenser är angivna på samma sätt som i Tabell 2. Referensmaterialet är provat 2004.

Figure 18. Cumulative deformation as a function of the number of loading cycles

Under belastningen av provkropp 3 trängde vatten ut ur provkroppen, vilket också kan utläsas ur vattenkvoterna före och efter provning (Tabell 3).

	Vattenkvot	Vattenkvot	
Provkropp	(före provning	(efter provning	Skrymdensitet
nr	(%)	(%)	(kg/dm ³)
1	16,1%	16,1%	1,77
2	17,0%	16,5%	1,67
3	18,4%	17,5%	1,78

Tabell 3. Vattenkvot före och efter provning samt skrymdensitet.

Provkropp 3 uppnådde 6% deformation, dvs brott, under den sista sekvensen av skyddslagertestet. I studiesyfte fullföljdes testet ändå och därefter startades även bärlagertestet. Under detta deformerades provkroppen ytterligare 3,7 %-enheter innan testet avbröts efter 2 800 belastningar. Provkropp 3:s resultat från bärlagertestet redovisas inte i Figur 19.





Figure 19. Cumulative deformation as a function of the number of loading cycles

Provkropp 2 gick till brott efter cirka 5 000 lastpulser på bärlagertestprogrammet. Provkropp 1 gick till brott tidigare, under den kritiska sekvensen 400/60 där kvoten mellan vertikal- och horisontalspänning är stor. När provkropp 1 demonterades och studerades närmare invändigt visade det sig att parallellt med brottytan låg en tesked! Denna kan ha bidragit till den låga hållfastheten och det tidiga brottet.

Jämförelser med andra material

Vid de belastningar som ingår i skyddslagertestet deformerades provkropparna mer än referensmaterialet av krossat berg och också mer än slaggrusmaterialen från Umeå och SYSAV. Inför den sista belastningssekvensen hade provkropp 2 deformerats 1% och provkropp 3 2%, medan de tre jämförelsematerialen hade deformerats mindre än 0,5% (Figur 18).

Under bärlagertestet, med större belastningar, var skillnaden ännu tydligare. Provkropp 1 och 2 gick till brott tidigt, långt före jämförelsematerialen. Resultaten för provkropp 1 bör emellertid betraktas kritiskt med tanke på den tesked som återfanns i brottytan efter försöket.

5.2.3 Diskussion

Det finns tydliga skillnader mellan materialen, skillnader som kan ha flera orsaker. De tre slaggrusmaterialen har olika ursprung och olika lagringstid. De har dessutom olika kornstorlek. Alla dessa parametrar påverkar styvheten och stabiliteten. Provkroppstillverkningen spelar säkert också in. Projektets tre provkroppar borrades upp i s.k. "ostört" tillstånd medan de olika jämförelsematerialen har packats in på laboratoriet med hjälp av vibrering och tryck till en förutbestämd densitet.

Eftersom provkropparna uppvisade så olika resultat bör inte medelvärdesbildning användas i redovisningen utan varje prov bör redovisas separat. Det är oklart om provkropparnas läge i vägen har påverkat resultatet. Det finns en tendens till att provkropp nr 2 är styvare än de båda andra. Emellertid är det vanskligt att dra några slutsatser eftersom det bara finns en provkropp i varje provtagningspunkt. Dessutom bör resultatet för provkropp 1 betraktas kritiskt enligt ovan.

Vid resultatanalysen har ytterligare en jämförelse gjorts. Det är provkropp 2 och 3 som jämförts med ett slaggrus från Linköping, provtaget 1997 och därefter lagrat i mellan ett och två år innan det packades in och belastades. Jämförelsen begränsas till resultaten från skyddslagertest eftersom 1997-materialet inte har genomgått någon högre belastning. Observera att även om detta jämförelsematerial kommer från samma anläggning som de uppborrade provkropparna kan det inte betraktas som samma material. Det skiljer cirka tio år i förbränningsdatum, vilket medför skillnader i både avfallssammansättning och förbränningsteknik. Dessutom skiljer provkroppstillverkningen liksom i den tidigare gjorda jämförelsen. Resultatet av jämförelsen visar att styvheten för materialen är ungefär lika stor, medan den permanenta deformationen är större för de båda uppborrade provkropparna än för 1997-materialet (Figur 20).



Figur 20. Jämförelse mellan provkropp 2 och 3 samt ett slaggrus från Linköping 1997. Vänster: Utvärderad resilientmodul som funktion av medelnormalspänningen. Höger: Ackumulerad deformation (%) som funktion av ackumulerat antal belastningspulser under skyddslagertestprogrammet. Belastningssekvenser är angivna på samma sätt som i Tabell 2.

Slutligen bör det observeras att belastningsförsöken ger en resilientmodul som är specifik för provningsmetoden. Olika försöksmetoder såsom belastning i dynamisk treaxialutrustning, fallviktsbelastning och plattbelastningsförsök ger moduler med samma enhet som svar. Dessa moduler är alla beroende av försöksmetoden och jämförelser mellan moduler från olika provningsmetoder är högst osäker.

Figure 20. Comparison of results of sample 2, 3 and a bottom ash sample from Linköping 1997.

6 Resultat och diskussion miljötekniska undersökningar

6.1 Allmänt

Som redan beskrivits inledningsvis, så var syftet med de miljötekniska undersökningarna att kartlägga den ackumulerade effekten av utlakning efter en längre tids användning av bottenaska som förstärkningslager. Med undantag av de lättlösliga salterna så förväntades en eventuell effekt av utlakning vara liten i förhållande till totalhalterna för ämnena. Proven som togs i bottenaskan analyserades därför både genom uppslutning (totalhalter) och EN 12457-2 skaktest (lakbar halt). Skillnader i utlakade mängder i skaktesterna kan representera både skillnader i totalinnehåll, grad av åldring, pH och redoxförhållande.

För att bestämma förekomsten och fördelningen av eventuellt fastlagda ämnen i de underliggande jordlagren behandlades proverna genom extraktion enligt beskrivning nedan.

Vägen lutade åt vänster (x=0) och asfalten sträckte sig från x=175 till x=875 cm, vilket markerats i Figur 21.

6.2 Konduktivitet

Provmaterialet från förstärkningslager och underliggande lager i schakten i provsträcka 4 och 5 (referenssträcka) analyserades med avseende på pH och konduktivitet. Resultaten från dessa analyser redovisas nedan. Observera att graderingen av pH och konduktivitet i nedanstående figurer är olika för sträcka 4 och 5. Då vägen anlades 1987 hade det uppsamlade lakvattnet från bottenaskan en elektrisk ledningsförmåga på ca 200 mS/m [4]. Det framgår dock inte i tydligt [4] vilket lakvatten som avses och vad det uppmätta värdet egentligen representerar.

I referenssträckan kan fördelningen av konduktivitet förklaras av jordlagerföljden. Konduktiviteten i förstärkningslagret låg mellan 4.6-15.2 mS/m (n=17) och i det underliggande lagret av finlera på 18.6-35.0 mS/m (n=10). Som jämförelse kan nämnas att konduktiviteten för lera typiskt ligger mellan 10 och 150 mS/m medan konduktiviteten för sand/grus ligger mellan 0,1 och 10 mS/m.

Resultatet från konduktivitetsmätningarna på proverna från provsträcka 4 visar tydliga gradienter som beror på jordlagerföljden och utlakning (Figur 21). Den streckade linjen markerar gränsen mellan bottenaska och jord. En mycket tydlig konduktivitetsgradient kan ses i gränsskiktet mellan förstärkningslagret av bottenaska och den underliggande jorden. Konduktiviteten i förstärkningslagret avtar mot asfaltkanterna, där nederbörden har trängt in och sköljt ur de mest lättlösliga salterna. Den högsta konduktiviteten (EC-max= 234 mS/m) återfinns i ett område i mitten av vägen, något förskjutet till höger (x=500–700 cm). En orsak till detta kan vara att den vänstra sidan i figuren är innerkurvan, varför vägen lutar åt det hållet. En större andel av nederbörden på vägen rinner därmed av på den vänstra vägkanten och ger högre infiltration, vilket medför en längre

kommen utlakningsprocess där (EC_{min}= 15 mS/m). Tydliga horisontella koncentrationsgradienter indikerar att den huvudsakliga tranportmekanismen för lösta ämnen är diffusion och kapillär transport från vägens mitt horisontellt ut mot vägens flanker där vertikal advektiv transport med infiltrerande vatten från vägbanans ytavrinning dominerar.



Figur 21. Konduktivitet (mS/m) i provsträcka med bottenaska (sträcka 4). Den streckade linjen markerar gränsen mellan bottenaska och jord.

Figure 21. Conductivity in structure 4. The dashed line marks the boundary between bottom ash and the underlaying soil.

Fördelningen av konduktivitet i den underliggande jordlagren reflekterar i huvudsak de ingående jordarterna (se Figur 13 och bilaga A.1). I ett begränsat antal provpunkter, samtliga belägna strax under förstärkningslagret, finns dock indikationer på lakvattenpåverkan. Dessa är provpunkterna 284 (30.7 mS/m), 294 (39.0 mS/m), 2104 (42.9 mS/m), 2114 (32.5 mS/m), 2124 (30.9 mS/m), 2134 (36.9 mS/m) och 2144 (56.2 mS/m). Jordarterna i dessa provpunkter är finkorning grusig sand sandigt grus, för exakt positionsangivelse och jordart se bilaga A.1.

6.3 pH

Flera omvandlings och åldringsprocesser initieras när färsk bottenaska exponeras för vatten och atmosfäriskt koldioxid. Bottenaskans pH styrs i huvudsak av Ca-mineraler, initiellt som CaO och då askan exponeras för vatten av portlandit (Ca(OH)₂) [18]. Under omvandlingen av bottenaskan sker en kontinuerlig konsumtion av ämnen som buffrar starkt alkaliska lösningar (pH > 10) genom upplösning och utspolning samt genom reaktioner med koldioxid (karbonatisering). Termodynamiska beräkningar på ett öppet system med en vattenfas i jämvikt med kalcit (CaCO₃) och ett konstant partialtryck av koldioxid på 10^{-3.5} atm (luftens partialtryck) ger ett pH på ca. 8.3. Denna pH nivå är ganska typisk för en bottenaska som lagrats utomhus i 3-6 månader. Karbonatiseringen är med andra ord en relativt snabb process om askan är fuktig och i kontakt med atmosfäriskt koldioxid. Då vägen anlades 1987 hade det uppsamlade lakvattnet från bottenaskan ett pH på mellan 11.1 och 11.7 [4].

I referenssträckans underliggande lager av finlera var pH uniform och varierade endast mellan 6.18 - 6.66 (n=10). I förstärkningslagret var variationen stor 5.26-8.02 (n=17) på grund av den relativt inhomogena sammansättningen.

I provsträcka 4 varierade pH med jordlagerföljden i de underliggande jordlagren (Figur 22). En väsentligt lägre pH-nivå kunde urskiljas i de områden som är uppbyggda av lera jämfört med pH-nivåerna i sand/gruslagren (se Figur 13 och bilaga A.1). I bottenaskan mitt under vägen är pH-nivåerna mycket höga, uppemot 10, för att mot kanterna avta till en mer neutral nivå runt 7.5–8. De högsta pH-nivåerna ligger en aning förskjutna mot den högra sidan av vägen (x=500-600 cm). En viss åldringsprocess har ägt rum under de 16 år som vägen varit i drift. Den relativt opåverkade kärnan i vägens mitt och de horisontella gradienterna i pH indikerar att atmosfärisk koldioxid har diffunderat in från vägens flanker och bildat reaktionsfronter (karbonatisering) som horisontellt rört sig in i vägkonstruktionen.



Figur 22. pH-variationer i provsträcka 4. Den streckade linjen markerar gränsen mellan bottenaska och jord.

Figure 22. pH–*variations in structure 4. The dashed line marks the boundary between bottom ash and the underlaying soil.*

Den underliggande jorden utgjordes till stor del av heterogena schaktmassor inklusive rivningsrester vilket kan förklara de varierande pH nivåerna.

6.4 Totalhalt bottenaskprover

Totalhalten för de 10 samlingsprover av bottenaska (som bereddes av de totalt 53 prov som togs i förstärkningslagret) presenteras här för ett urval av ämnen. I tabell 4 presenteras medelvärden och variationskoefficient av totalhalten (mg/kgTS) för de 10 samlingsproverna.

Tabell 4Medelvärden och variationskoefficient (n=10) av totalhalten (mg/kgTS) i
samlingsproverna.

	Al	Ca	Fe	Κ	Mg	Mn	Na	As	Cd	Cr	Cu	Мо	Ni	Pb	S	Zn	TOC
m	57770	60910	101910	16730	9652	1641	27960	58,5	10,1	240	3874	6,2	158	2688	2182	4541	2,4
CV	0,045	0,068	0,082	0,044	0,064	0,049	0,061	0,364	0,117	0,131	0,811	0,780	0,206	0,563	0,393	0,245	0,147

Halterna för elementen Cu, Zn, As, Pb, S och Mo är de som uppvisar en påtaglig variation, medan variationen för övriga element är begränsad. I Figur 23-Figur 29 har totalhalterna för samlingsproverna plottas som funktion av position i x-led för TOC, Cu, Zn, As, Pb, S och Mo. Positionen i x-led för samlingsproven har räknats fram som medelvärdet av x-koordinaterna för de ingående delproven.



Figur 23. Totalhalt (vikt%) TOC för 10 samlingsprover. Samlingsproverna representerar hela asklagrets mäktighet vid den angivna position i x-led.

Figure 23. Total content (weight %) TOC.



Figur 24. Totalhalt (mg/kgTS) Cu för 10 samlingsprover. Samlingsproverna representerar hela asklagrets mäktighet vid den angivna positionen i x-led.

Figure 24. Total content (mg/kgTS) Cu



Figur 25. Totalhalt (mg/kgTS) Zn för 10 samlingsprover. Samlingsproverna representerar hela asklagrets mäktighet vid den angivna positionen i x-led .

Figure 25. Total content (mg/kgTS) Zn.



Figur 26. Totalhalt (mg/kgTS) As för 10 samlingsprover. Samlingsproverna representerar hela asklagrets mäktighet vid den angivna positionen i x-led .

Figure 26. Total content (mg/kgTS) As.



Figur 27. Totalhalt (mg/kgTS) Pb för 10 samlingsprover. Samlingsproverna representerar hela asklagrets mäktighet vid den angivna positionen i x-led .

Figure 27. Total content (mg/kgTS) Pb.



Figur 28. Totalhalt (mg/kgTS) S för 10 samlingsprover. Samlingsproverna representerar hela asklagrets mäktighet vid den angivna positionen i x-led .

Figure 28. Total content (mg/kgTS) S.



Figur 29. Totalhalt (mg/kgTS) Mo för 10 samlingsprover. Samlingsproverna representerar hela asklagrets mäktighet vid den angivna positionen i x-led .

Figure 29. Total content (mg/kgTS) Mo.

Med undantag av tecken på utlakning eller nedbrytning vid x=175 –275 cm så är fördelningen av TOC i förstärkningslagret homogen med ett medel på 2.4 vikt %.

Fördelningen av totalhalterna för elementen Cu och Zn, As och Pb uppvisar vissa likheter. För alla elementen är totalhalterna som lägst mitt under vägen och uppvisar högre halter i kanterna. Cu och Zn uppvisar små toppar vid x=375 cm och x=875 cm och ett maxima vid x=75 cm. För Cu är totalhalten vid x=75 cm 12100 mg/kgTS vilket är fyra gånger högre än medelvärdet för hela förstärkningslagret 3874 mg/kgTS. För Zn är max värdet vid x=75 cm 7430 vilket är 1.6 gånger högre än medelvärdet för hela förstärkningslagret. Arsenik uppvisar en topp vid x=975 och har sitt maxima vid x=175 cm. Bly uppvisar toppar vid x=175 cm, x=375 cm och når sitt maxima vid x=875 cm. Som tidigare beskrivits så lutade vägen åt vänster (x=0) och asfalten sträckte sig från x=175 tillx=875 cm. En möjlig förklaring är att dessa förhöjda nivåer i kanterna härstammar från trafikgenerade emissioner. De föroreningar som ansamlats på vägbanan kan spridas till vägens närmsta omgivningen via luften som damm och stänk eller som ytavrinning. Den största emissionen från trafiken utgörs av klorid, zink, koppar och bly (I Sverige har biltrafikens blyutsläpp upphört efter införandet av oblyad bensin), emissionerna är direkt kopplade till trafikbelastningen [15]. Eftersom Vändörat endast tjänat som infart till reningsverket så bedöms trafikbelastningen ha varit ganska begränsad. Den närliggande Gumpekullavägen utgör däremot en viktig väg med en relativt hög trafikbelastning (se Figur 1).

Elementen S och Mo uppvisar båda tecken på urlakning på vänster sida av vägen där infiltrationen av vägbanans ytavrinning sker.

6.5 Skaktest på bottenaskprover och extraktion på prover från underliggande jordlager i provsträcka 4

I detta kapitel presenteras resultatet från enstegs skakförsök L/S-10 som utförts på samtliga prov (n=53) som togs i förstärkningslagret i schaktet i provsträcka 4. Skakförsöken gjordes på endast 45 gram torrmaterial, men annars enligt standard för enstegs skakförsök L/S 10 för materialstorlek mindre än 4 mm (EN 12457-2). Dessutom presenteras här resultatet från HCl-extraktionerna som utfördes på samtliga prov (n=107) från de underliggande jordlagren i samma schakt.

Resultaten från labförsöken presenteras gruppvis i följande underkapitel: Kol, lättlösliga salter, makroämnen, spårämnen och oxyanjoner.

6.5.1 Kol innehåll

Den lakbara halten oorganiskt respektive organiskt kol redovisas i Figur 30 och Figur 31.



Figur 30. Fördelning av lakbar (mg/kg) IC i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2). X och Y-axlarna är graderade i cm.

Figure 30. Distribution of leachable IC (mg/kg) at L/S 10 (EN 12457-2) in the subbase of bottom ash. The X and Y-axis are graded in centimeters.

Innehållet av DOC uppvisar endast ett begränsat pH beroende och fördelningen av lakbar DOC kan därför kopplas till organiskt innehåll och fastläggningsprocesser. Det organiska innehållet minskar med tiden pga av nedbrytning och läggs samtidigt fast i mindre lakbara former [19]. Detta manifesterar sig som relativt höga lakbara mängder i vägens mitt och avtagande lakbara mängder mot flankerna (Figur 31). De lokala DOCtopparna i vägens båda ytterkanterna beror sannolikt på förekomst av växtdelar, rötter, etc och infiltration av humusämnen.



Figur 31. Fördelning av lakbar (mg/kg) DOC i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2). X och Y-axlarna är graderade i cm.

Figure 31. Distribution of leachable (mg/kg) DOC at L/S 10 (EN 12457-2) in the subbase of bottom ash. The X and Y-axis are graded in centimeters.

6.5.2 Lättlösliga ämnen

Den elektriska konduktiviteten (se Figur 21) representerar förekomsten av lättlösliga och mobila salter (Cl SO42-, Ca2+, Na+, K+ och Mg2+). Bottenaskans lakbarhet med avseende på dessa ämnen illustreras i Figur 32 - Figur 36. I figurerna redovisas också de extraherade mängderna av dessa ämnen i de underliggande jordlagren. Förekomst av klorid i den underliggande jorden kunde inte bestämmas pga av att extraktionen gjordes med saltsyra. Med undantag av sulfat och kalcium, vilka är löslighetsstyrda, förväntades ingen signifikant ackumulation av lättlösliga och mobila salter i de underliggande jordlagren. Figurerna nedan visar en spatiell fördelning som överensstämmer väl med den elektriska konduktiviteten (Figur 21). De höga koncentrationerna återfinner man under själva vägkroppen, något förskjutna till höger i bilderna, vid x=450-700 cm. Halterna för samtliga ämnen uppvisar tydliga gradienter ut mot vägens flanker, vilket indikerar en horisontell transport styrd av diffusion och kapillärt flöde. I vägens flanker har en utspolning ägt rum och de uppmätta halterna är låga. Som exempel kan nämnas att de lakbara kloridhalterna ute i vägens inre sida (vänster i bild) är nedåt 20 mg/kg och mitt i vägen vid x=500 cm är halterna c:a 800 mg/kg som högst. Genom att integrera de uppmätta lakbara halterna av klorid över hela lagret av bottenaska erhölls ett värde på 382 mg/kg. Tyvärr finns det ingen relevant lakdata att jämföra med från tiden vid vägens anläggande. Men 1996 gjordes en laktestkarakterisering av bottenaskan från TVL vilken rapporterats i Fällman (1997). I ett jämförbart tvåstegs skaktest lakades i genomsnitt (dubbelprov) 2260 mg/kg klorid ut. Den kvarvarande lakbara mängden klorid som uppmättes i denna studie (382 mg/kg) representerar alltså endast 17 % av den lakbara mängden för som uppmättes av Fällman (1997). Resterande del c:a 1880 mg/kg har alltså lakats ut och då företrädesvis genom horisontell transport.

De horisontella gradienterna och de låga halterna i vägflanken för lättlösliga ämnen har detekterats i en tidigare studie [23]. Vägen har under relativt lång tid varit i dålig kondition med långa längsgående sprickor i mitten på vägen (Figur 6) och en viss infiltration bör rimligtvis också ägt rum. I förstärkningslagrets ovankant i regionen x=450-600 cm syns också tecken på infiltration genom slitlager och bärlager och en viss vertikal advektiv transport ut ur förstärkningslagret vid x= 600 cm (Figur 32).



Figur 32. Fördelning av lakbar (mg/kg) klorid i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2). X och Y Axlarna är graderade i cm.

Figure 32. Distribution of leachable content of chloride (mg/kg) in the bottom ash layer (EN 12457-2)

Kalium (Figur 33), natrium (Figur 34) uppvisar samma mönster, med de högsta koncentrationerna i förstärkningslagret mitt under vägen, horisontella gradienter, kraftig urlakning i vägens flanker och tecken på viss infiltration vid $x \approx 500$ cm samt advektiv uttransport. I alla figurer som följer hör graderingen till höger till undergrunden.

VÄRMEFORSK



- Figur 33. Fördelning av lakbar (mg/kg) kalium i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 33. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of pottasium in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.



- Figur 34. Fördelning av lakbar (mg/kg) natrium i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 34. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of sodium in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.



- Figur 35. Fördelning av lakbar (mg/kg) svavel i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 35. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of sulfur in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.



- Figur 36. Fördelning av lakbar (mg/kg) kalcium i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 36. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of calcium in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

Kalcium och svavel uppvisar också samma mönster som de övriga lättlösliga ämnena. Den analys av totalhalter som gjorts (Figur 28) visar tydligt att en signifikant utlakning av svavel ägt rum, vilket också bekräftas av Figur 35. Jämfört med de övriga lättlösliga ämnena styrs utlakningen av kalcium av en möjlig löslighetskontroll med avseende på gips och kalciumkarbonater (karbonatisering). Distributionen av lakbar kalcium kan tolkas som effekten av en relativt tidig utspolning i kantzonerna (troligtvis begränsad av lösligheten för gips) och en med tiden en lägre löslighet av kalcium pga av utfällning som karbonater. Löst kalcium har framförallt karbonatiserats i vägens kantzoner och i mindre utsträckning längre in i vägen pga ett lägre partialtryck av koldioxid. Denna process avspeglas i tydliga pH-gradienter (Figur 22). Den lakbara mängden av kalcium i samtliga provpunkter (n=53) i förstärkningslagret har i Figur 37 plottas som funktion av pH.

Lokalt höga halter av extraherbart kalcium i undergrunden kan bero på schaktmassornas ursprung och eventuellt innehåll av cementrester, etc.



Figur 37. Lakbar mängd kalcium (mg/kg) *i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2)* plottad som funktion av pH.

Figure 37. Leachable amount of calcium (mg/kg) in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) plotted as a function of pH.

Magnesium har liknande egenskaper som kalcium och distribution av lakbar magnesium styrs också av utspolning och karbonatisering. Distributionen av lakbart magnesium reflekterar distributionen av pH, med undantag av ett område mitt under vägen (x=550 cm). I Figur 38 har distributionen av lakbart magnesium i förstärkningslagret plottats tillsammans med extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager.



- Figur 38. Fördelning av lakbar (mg/kg) magnesium i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 38. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of magnesium in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

En tydlig inverkan av lermineral i undergrunden kan ses (Figur 38).

6.5.3 Övriga makroämnen



- Figur 39. Fördelning av lakbar (mg/kg) aluminium i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 39. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of aluminum in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

Fördelningen av lakbar aluminium (Figur 39) är en effekt av distributionen av pH i bottenaskan. Aluminium har amfotera egenskaper och uppvisar en hög löslighet vid både höga och låga pH. Den lakbara mängden av aluminium i samtliga provpunkter (n=53) i förstärkningslagret har i Figur 40 plottas som funktion av pH. Figuren illustrerat ett för aluminium karakteristiskt pH-beroende med ökande löslighet i basisk miljö. De höga halterna av aluminium i undergrunden beror på förekomst av lermineral.



Figur 40. Lakbar mängd aluminium (mg/kg) *i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2)* plottad som funktion av pH.



Även förekomsten av järn följer lerlagren i undergrunden (Figur 41). De små anrikningarna av järn i förstärkningslagret (längst ut till vänster) kan härröra från trafikgenererade emissioner. Fördelningen av järn i undergrunden beror sannolikt på varierande halter av lermineral och hydroxider/oxider.



Figur 41. Fördelning av lakbar (mg/kg) järn i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.

Figure 41. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of iron in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

Mangan är precis som järn ett redoxkänsligt ämne och under oxiderande förhållande har troligen en omvandling skett till mangan(IV)oxider, vilka då kommer att styr lakbarheten för mangan. Detta manifesterar sig i en avtagande lakbarhet ju längre ut mot kantzonerna som proven är tagna, Figur 42.



- Figur 42. Fördelning av lakbar (mg/kg) mangan i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 42. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of manganese in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

6.5.4 Spårämnen

Figur 43 illustrerar fördelningen av lakbar kadmium i förstärkningslagret och extraherbar kadmium i undergrunden. Inget pH beroende kan utläsas ur figuren



Figur 43. Fördelning av lakbar (mg/kg) kadmium i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.

Figure 43. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of cadmium in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

För koppar så är det intressant att notera att något förhöjda halter kan iakttagas i kantzonerna vilket kan härröra från trafikgenererade emissioner (se även Figur 24). Kopparns amfotera egenskaper kan till viss del förklara den skillnad i lakbar koppar som kan iakttas om förstärkningslagrets mittersta region jämförs med kanterna (Figur 44) vilket representerar ett pH spann på pH 8 – pH 10. Ett möjligt pH beroende framgår också i Figur 45 där lakbara mängder av koppar plottas som funktion av pH. Det är dock välkänt att kopparns löslighet till stor del styrs av närvaron av organiska komplexbindare, speciellt i intervallet pH 9 – 10.5.



Figur 44. Fördelning av lakbar (mg/kg) koppar i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.

Figure 44. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of copper in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.



Figur 45. Lakbar mängd koppar (mg/kg) plottad som funktion av pH (EN 12457-2).

Figure 45. Leachable amount of copper (mg/kg) plotted as a function of pH (EN 12457-2).

Som tidigare beskrivits så kan fördelningen av löst organiskt kol (DOC) kopplas till förekomsten av organiskt innehåll och fastläggningsprocesser. Det organiska innehållet minskar med tiden pga av nedbrytning och läggs samtidigt fast i mindre lakbara former [19]. Termodynamiska beräknar som utförts av [20] tyder på att nästan 100 % av kopparn i lakvätskor från färsk och 1.5 år gammal bottenaska är bunden till organiska föreningar. För att studera hur lakbarheten av koppar beror av lakbart löst organiskt material så plottades de utlakade mängderna koppar (mg/kg) i alla provpunkter (n=53) i förstärkningslagret som funktion av lakbar mängd DOC (mg/kg). Figur 46 illustrerar tydligt en positiv korrelation mellan lakbarheten för koppar och DOC och förekomsten av löst organiska material som styrande mekanism för kopparutlakning.



Figur 46. Lakbar mängd koppar (mg/kg) plottad som funktion av lakbar mängd DOC (mg/kg) (EN 12457-2).

Figure 46. Leachable amount of copper (mg/kg) *plotted as a function of leachable amount of DOC* (mg/kg) (*EN 12457-2*).

Figur 47 illustrerar fördelningen av lakbar nickel i förstärkningslagret och extraherbar nickel i undergrunden. Möjligtvis kan en viss effekt av en eventuell infiltration genom asfalten ses vid $x \approx 500$ cm (jämför t.ex klorid i Figur 32). Inget pH beroende kan iakttas.



- Figur 47. Fördelning av lakbar (mg/kg) nickel i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Yaxlarna är graderade i cm. Maxvärdet i undergrunden är c:a 22 mg/kg, men i figuren har sträcker sig färgskalan endast upp till 5 mg/kg.
- Figure 47. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of nickel in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

Maxvärde i undergrunden 22 mg/kg vi x= 800 cm men maxvärde i figuren har begränsats till 5 mg/kg av åskådlighetsskäl

Något förhöjda halter av bly i både förstärkningslager och undergrund i den kantzon som är till vänster i figuren kan indikera trafikgenererade emissioner. Fördelningen indikerar inget pH beroende. Den låga lakbarheten av järn (Figur 41) kan indikera att järn föreligger som järn(III)oxid/hydroxidfaser vilka kan utgör effektiva sorptionsytor [21].

Trots att zink är ett mycket pH-känsligt ämne så indikerar fördelningen av zink inget direkt pH beroende i det aktuella pH intervallet, se Figur 50. Detta kan vara ett tecken på att en viss utlakning kan ha ägt rum. Det kan också vara ett tecken på att lakegenskaperna har stabiliserats genom omvandlingsprocesser. Zink visar tecken på viss ackumulation i undergrunden vid x = 100 cm vilket är snett utanför asfaltkanten ($x \approx 175 \text{ cm}$) Den högsta extraherbara halten i detta område bestämdes till 180 mg/kg.



- Figur 48. Fördelning av lakbar (mg/kg) bly i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 48. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of lead in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.



- Figur 49. Fördelning av lakbar (mg/kg) zink i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 49. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of zinc in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.



Figur 50. Lakbar mängd Zink (mg/kg) plottad som funktion av pH (EN 12457-2).

Figure 50. Leachable amount of zinc (mg/kg) *plotted as a function of pH* (mg/kg) *(EN 12457-2).*

6.5.5 Oxyanjoner

Arsenik förekommer oftast som oxyanjonerna arsenite (As(III)) eller som arsenate (As(V)). I aeroba, pH neutrala eller svagt sura miljöer kontrolleras arseniks löslighet ofta av sorption på mineraloxider, framförallt järnoxider men även aluminium- och manganoxider. Vid en förändring av redox till reducerande förhållanden går dessa oxider i lösning. Dessutom så antas ofta att den oxiderade formen av arsenik, As(V), sorberar starkare än As(III) vilket också kan bidra till förhöjda As koncentrationer vid en förändring av redoxpotentialen från oxiderande till reducerande förhållanden [22]. Sammantaget gör detta att man kan förvänta sig högre löslighet av arsenik vid högt pH och vid en reducerande miljö. Fördelningen av lakbara mängder av arsenik uppvisar just ett sådant mönster, Figur 51.



Figur 51. Fördelning av lakbar (mg/kg) arsenik i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.

Figure 51. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of arsenic in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

Krom förekommer som oxyanion i oxiderat tillstånd (Cr(VI)) och är mycket mobilt i alkaliska miljöer. I en reducerande miljö förekommer Cr som katjon (Cr(III)) och är relativt immobil vid en neutral pH nivå pga av det fälls ut som svårlöslig kromhydroxid.



Figur 52. Fördelning av lakbar (mg/kg) krom i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.

Figure 52. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of chrome in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.

Lösligheten för Cr(VI) stiger vid ökande pH, eftersom Cr(VI) bildar oxy-anjon-komplex och därför uppträder som en negativt laddad jon. Figur 52 indikerar en ökande löslighet av krom i konstruktionens kantzoner. Detta antages här bero på varierande redoxförhållanden, med reducerande förhållande i vägens mitt och oxiderande förhållande i vägens kantzoner. Motsvarande effekt kan iakttas även för andra redoxkänsliga ämnen som mangan (Figur 42).



- Figur 53. Fördelning av lakbar (mg/kg) vanadin i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2) och extraherade mängder (mg/kg) i underliggande jordlager. X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 53. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of vanadin in the subbase at LS 10 (EN 12457-2) and extractable amounts (mg/kg) in the subgrade layer. The X and Y axis are marked in centimeters.



- Figur 54. Fördelning av lakbar (mg/kg) molybden i förstärkningslagret av bottenaska vid L/S 10 (EN 12457-2). X och Y-axlarna är graderade i cm.
- Figure 54. Distribution of leachable amounts (mg/kg) of molybden in the subbase at LS 10 (EN 12457-2). The X and Y axis are marked in centimeters.

Medan fördelningen av lakbara mängder krom och vanadin inte uppvisar något signifikant pH beroende i det aktuella pH intervallet så är en pH effekt signifikant för lakbarheten av molybden., se Figur 54 och Figur 55. Molybden uppvisade ett för oxyanjoner karateristisk pH beroende med ökande löslighet med högre pH.



Figur 55. Lakbar mängd molybden(mg/kg) plottad som funktion av pH (EN 12457-2).

Figure 55. Leachable amount of molybden (mg/kg) plotted as a function of pH (mg/kg) (EN 12457-2).

6.6 Sammanställning och diskussion

6.6.1 Sammanställning laktester och jämförelse med jordkriterier

I tabell 5 nedan sammanfattas resultaten från laktester och extraktioner som max och min värde. Trots omfattande efterforskning så har ingen uppgifter på totalhalter i askan vid tidpunkten för anläggandet av vägen kunnat fås fram. Naturvårdsverkets (2005) riktvärden för känslig markanvändning och jämförvärden (bakgrundshalter) är också angivna i tabellen för de ämnen där sådana värden finns.

Tabell 5Totalhalter samt minimum- och maximumvärden för lakbara och extraher-
bara fraktioner av olika grundämnen (mg/kg TS) i bottenaskan respektive
undergrunden.

	BOT	UNDERGRUND						
	Totalhalt	Lakbar n	nängd vid	Extrahe	rbar	Riktvärden	Jämförvär-	
	(Std.aV.) (Aritm. medelvär- de och standard- avvikelse. för 10 samlingsprover)	LS10 (EN		fraktion	1 [16]	KM (NV,2005)	den (NV) morän och sediment jordarter	
		max	min	max	min			
Al	57 770 (2625)	173	0,467	5271	131			
As	58,5 (21)	0,338	0,006	3,6	<0,02	10	7-10	
Ba	1 797 (486)	1,50	0,104	154	5,1			
Ca	60 910 (4195)	2316	28,4	46552	1519			
Cd	10,1 (1,2)	0,005	<0,001	1,7	0,05	3	0,15-0,3	
Cl	-	771	19,1	-	-			
Со	13,5 (2,5)	-	-	4,0	0,5	20	10-15	
Cr	240 (32)	0,049	<0,001	5,4	0,08	120 (CrVI: 4)	30-45	
Cu	3 874 (3145)	0,345	0,013	182	1,7	100	25-30	
Fe	101 910 (8441)	0,756	<0,001	6029	384			
Κ	16 730 (751)	630	14,1	1024	59			
Mg	9 652 (619)	103	3,86	3220	95			
Mn	1 641 (81)	1,37	0,006	346	61			
Мо	6,2 (4,9)	0,779	0,033	0,9	<0,2			
Na	27 960 (1715)	1537	46,3	777	29			
Ni	158 (33)	0,058	<0,001	24	<0,002	25	25-30	
NO3—N	-	105	0,672	-	-			
TN		118	1,40	-	-			
Р	4 691 (202)	2,15	<0,001	812	181			
PO4-P	-	1,08	<0,1	-	-			
Pb	2 688 (1516)	0,107	<0,001	241	3,0	120	25	
S	2 182 (859)	2032	40,4	509	31			
SO4-S	-	2059	35,9	-	-			
Sb	-	-	-	<0,02	<0,02			
Se	-	-	-	<0,02	<0,02			
Si	-	22,9	1,29	3683	109			
V	26,8 (2,7)	0,018	<0,001	23	0,74	100	40-60	
Zn	4 541 (1115)	0,575	0,019	431	1,2	350	70-100	
TOC	2,4 (0,36)	43,9	2,01	-	-			
IC	-	431	4,14	-	-			

De extraherbara fraktionerna av koppar (138 mg/kg), bly (120 mg/kg) och zink (431 mg/kg) i provpunkten *2161* överskred kriterierna för känslig markanvändning. Provet 2161 togs i ett lager av finlera c:a 80 cm under lagret av bottenaska. Enligt jordartsbestämningen (bilaga A.1) bestod provpunkt 2161 av *finlera med doft av aska*.

För koppar överskreds kriteriet även i punkt 204 (182 mg/kg) och för bly i punkt 2154 (241 mg/kg). Provpunkten 204 var belägen längst ut i vägslänten utanför förstärkningslagret av bottenaska och enligt jordartsbestämningen (bilaga A.1) bestod provet av *finlera med gruspartiklar, rottrådar och växtrester*. Den förhöjda halten av koppar kan sannolikt vara en effekt av trafikgenerade emissioner. Provet 2154 togs c:a 15 cm under lagret av bottenaska och bestod av *siltig lera blandat med sand och gruspartiklar*.

I detta sammanhang måste hänsyn tas till att undergrunden bestod av utfyllnadsmassor med okänt ursprung. Några slutsatser angående orsaken till de förhöjda koncentrationerna i dessa punkter kan därför ej dras.

Genom att integrera de uppmätta lakbara halterna av klorid över hela lagret av bottenaska erhölls ett värde på 382 mg/kg. Tyvärr finns det ingen relevant lakdata att jämföra med från tiden vid vägens anläggande. Men 1996 gjordes en laktestkarakterisering av bottenaskan från TVL vilken rapporterats i Fällman (1997). I ett jämförbart tvåstegs skaktest lakades i genomsnitt (dubbelprov) 2260 mg/kg klorid ut. Den kvarvarande lakbara mängden klorid som uppmättes i denna studie (382 mg/kg) representerar alltså endast 17 % av den lakbara mängden för som uppmättes av Fällman (1997). Resterande del c:a 1880 mg/kg har alltså lakats ut och då företrädesvis genom horisontell transport. Den elektriska konduktiviteten i undergrunden med relativt små variationer och låga värden indikerade inte några ackumuleringar av lättlösliga salter i undergrunden.

6.6.2 Implikationer för modellering av utlakningsförlopp

Utveckling av en matematisk modell bör göras utifrån en konceptuell modell och grundläggande information och kunskap (systembeskrivning). Med en konceptuell modell avses en kvalitativ beskrivning av det studerade systemet och kan inkludera bl.a inflöden/utflöden, materialegenskaper och tillståndsparametrar (fysiska egenskaper och kemisk sammansättning, pH, redox, etc.), processer (vattenflöde, nedbrytning, sorption, utfällning, upplösning, etc.), beskrivning av scenarier och långsiktiga förändringar. Den konceptuella modellen måste representeras kvantitativt för att beräkningar skall kunna utföras, dvs med en matematisk modell. Det är viktigt att understryka att av samma skäl som det finns olika sätt att utforma den konceptuella modellen så existerar det heller inte något entydigt samband mellan den konceptuella modellen och dess matematiska motsvarighet. En konceptuell modell kan formuleras matematiskt på mer än ett sätt och ett sådant arbete ligger utanför ramarna för detta projekt.

Felkällorna vid beräkningarna med en matematisk modell kan bero på felaktigt uppställande av den konceptuella modellen, osäkerhet i modellparametrarna samt fel i algoritmer och beräkningar. Osäkerheten i modellparametrarna beror på begränsad kunskap och data, och parametrarnas variation i tid och rum. Variationerna i tid kan bero på långsamma förändring av askans fysikaliska och kemiska egenskaper (åldring). Den relativa storleken av ovanstående felkällor varierar beroende på det studerade systemet, men felet i den konceptuella modellen kan i många fall dominera.

Detta projekt har genererat grundläggande information för utformning av en konceptuell modell: Distributionen av lättlösliga ämnen, konduktivitet, pH och DOC i bottenaskan bekräftar hypotesen om vägslänternas betydelse som tranportväg för vatten, koldioxid och syre mellan bottenaskan och omgivningen [7],[23],[24]. Tydliga horisontella koncentrationsgradienter indikerar att den huvudsakliga tranportmekanismen för lösta ämnen är diffusion och kapillär transport från vägens mitt ut mot vägens flanker där vertikal advektiv transport med infiltrerande vatten från vägbanans ytavrinning dominerar. I en kärna i vägens mitt uppmättes värden på pH som är jämförbar med nivån vid vägens anläggande. Horisontella gradienterna i pH indikerar att atmosfärisk koldioxid har diffunderat in från vägens flanker och bildat reaktionsfronter (karbonatisering) som horisontellt rört sig in i vägkonstruktionen. Genom diffusion av syre in i vägkroppen har också redoxfronter utvecklats, vilka styr formerna och mobiliteten hos redoxkänsliga element som arsenik, krom och mangan.

Förekomsten av en advektionsdomän och en diffusionsdominerad domän och bildandet av en upplösningsfront har också iakttagits genom 2-dimensionella utlakningsexperiment med bottenaska i pilotskala [25]. Allt eftersom upplösningsfronten rör sig in i konstruktionen kommer koncentrationsgradienten och det diffusiva massflödet ut ur konstruktionen att minska.

Vid modellering av utlakningsförlopp ur en restproduktkonstruktion med asfaltbeläggning måste hänsyn tas till de processer som iakttagits både i fält och pilotskala. Dessa förlopp och processer kan representeras matematiskt på olika sätt i modellerna och här föreligger ett forskningsbehov, framför allt med avseende på långsiktiga förändringar och omvandlingsprocesser..

7 Återvinningsstudie

7.1 Inledning

En förutsättning för storskalig användning av bottenaska måste rimligtvis förutsätta att materialet återtas när den markanläggning där det använts tas ur drift. Det finns också ett behov av att utreda förutsättningarna för återanvändning av sådant material som upp-står vid t ex ledningsgrävning eller reparationer och underhåll i markanläggningarna.

I detta projekt tillvaratogs möjligheten att praktiskt undersöka omhändertagande av bottenaskan i samband med bortschaktningen av vägen för eventuell återvinnig i framtiden. Den grad av korskontaminering som erhålls vid bortschaktning bedömdes okulärt.

7.2 Schaktning och separathantering

Återvinning av slaggbaserade förstärkningslager förutsätter att materialet till huvuddelen schaktas bort som en separat fraktion. Redan i dagsläget är separat bortschaktning och återvinning av asfaltlager en väletablerad metod och får betraktas som bästa tillgängliga teknik från miljösynpunkt. Det förutsätts därför att asfaltlager även för restproduktvägar kan omhändertas separat. Separat bortschaktning kan delas in i två olika kvalitetsnivåer:

- Separat bortschaktning av bärlager och förstärkningslager
- Gemensam bortschaktning av bärlager och förstärkningslager.

Separat bortschaktning är det ideala eftersom material med olika miljö och geotekniska egenskaper hålls isär. Detta innebär dock en fördyring som måste kunna vägas mot de vinster som görs. Bortschaktning av olika fraktioner kan genomföras med flera olika maskinutrustningar som: grävmaskin, hjullastare, väghyvel respektive bulldozer med schaktblad. De olika metoder ger sannolikt olika grader av nedkrossning. Det kan därför vara intressant att undersökning flera olika metoder.

Normalt torde inte avsättning för det uppschaktade slaggmaterialet kunna erhållas omgående utan materialet måste fraktas bort och mellanlagras. I schaktnings, lastningsoch lossningsarbeten sker en nedkrossning av materialet. För blandat material bärlager (stenkross) / förstärkningslager (slagg) kan en materialseparation uppstå vid hanteringen.

Från miljösynpunkt bör så korta transporter som möjligt göras från det att materialets schaktats upp till det att det används på nytt. En fördel är om materialet kan fraktas till en närliggande plats där andra ballastmassor tillhandahålls. Det är därför viktigt att den grad av skyddsåtgärder som behövs på mellanlagringsplatsen kan förutsägas. De viktigaste aspekterna i det sammanhanget bedöms vara risken för damning respektive urlakning genom nederbörd. Vid uppgrävning och borttransport förändras den geokemiska miljön och dessutom krossas materialet varför materialets lakegenskaperna kan variera över tiden.
7.3 Observationer

Bortschaktningen av vägen skedde med grävmaskin med slätskopa, se Figur 56 – Figur 58. Borttransporten till Gärdstadverken gjordes med dumper. Intrycket var att det var mycket lätt för grävmaskinisten att hålla isär de olika materiallagren. På bilden nedan skrapar grävmaskinen av förstärkningslagret av slaggrus och lämnar en jordyta efter sig.



Figur 56. I. Bortschaktning av förstärkningslager av bottenaska provsträcka 4,

Figure 56. I. Excavation of subgrade of bottom ash test section 4

Vid intervju med grävmaskinisten framkom det att det var lätt för honom att hålla isär massorna genom separat schaktning, vilket också illustreras i Figur 57. En viss begränsad omblandning av förstärkningslager och terrass bör ha skett vid anläggandet av vägen. Detta beroende på en viss mekanisk påverkan av maskiner vid utläggning och kompaktering. Detta ser man på Figur 58 som visar terrassytan efter schaktning. Ytan framstår som svart/brun spräcklig. En viss omblandning kunde också iaktagas i vägens kantzoner pga av att förstärkningslagret hade lagts hela vägen ut i dikesslänten.



Figur 57. . II. Bortschaktning av förstärkningslager av bottenaska provsträcka 4,

Figure 57. II. Excavation of subgrade of bottom ash test section 4



Figur 58. Ytan på underliggande jordlager efter bortschaktning av förstärkningslager provsträcka 4

Figure 58. The surface of the subbase after excavation of the subgrade of bottom ash test section 4

8 Slutsatser

- Den ökning av slaggrusets hållfasthet som uppmätts med hjälp av upprepade fallviktsmätningar i början av provvägens existens har avstannat.
- Den lagermodul som utvärderades för förstärkningslagret av slaggrus var något lägre än den för förstärkningslagret av naturgrus.
- När uppborrade provkroppar från provsträcka fyra (förstärkningslager av bottenaska) belastades i laboratorium varierade styvheten, *M_r*, mellan 60 och 93 MPa vid de små belastningar som ingår i det s.k. skyddslagertestet och mellan 91 och 178 MPa under de större belastningar som det s.k. bärlagertestet innebär.
- Provkropparna hade mindre styvhet än krossat berg, mycket mindre vid låga spänningar. De hade också mindre styvhet än ett par slaggrusmaterial från andra förbränningsanläggningar, som undersökts tidigare och som användes som jämförelsematerial. Provkropparna hade däremot lika stor styvhet som ett nyare slaggrus från samma förbränningsanläggning.
- Provkropparna fick betydligt större permanenta deformationer (sättning) än krossat berg och de tre slaggrusmaterialen som användes som jämförelsematerial. De permanenta deformationerna för provkropparna översteg 1% inför den sista belastningssekvensen i skyddslagertestet.
- Distributionen av lättlösliga ämnen, konduktivitet, pH och DOC i bottenaskan bekräftar hypotesen om vägslänternas betydelse som tranportväg för vatten, koldioxid och syre mellan bottenaskan och omgivningen. Tydliga horisontella koncentrationsgradienter indikerar att den huvudsakliga tranportmekanismen för lösta ämnen är diffusion och kapillär transport från vägens mitt ut mot vägens flanker där vertikal advektiv transport med infiltrerande vatten från vägbanans ytavrinning dominerar. I en kärna i vägens mitt är både uppmättes värden på pH som är jämförbar med nivån vid vägens anläggande. Horisontella gradienterna i pH indikerar att atmosfärisk koldioxid har diffunderat in från vägens flanker och bildat reaktionsfronter (karbonatisering) som horisontellt rört sig in i vägkonstruktionen. Genom diffusion av syre in i vägkroppen har också redoxfronter utvecklats, vilka styr formerna och mobiliteten hos redoxkänsliga element som arsenik, krom och mangan.
- Med undantag av lättlösliga ämnen som SO₄, Ca, K, Na, Cl, Mg och Mo så finns det inget som indikerar att en signifikant utlakning har skett. Distributionen av lakbarhet för metaller och spårämnen reflekterar framför allt distributionen av pH. För de lättlösliga ämnena så har det skett en betydande utlakning vilken är svår att kvantifiera pga av avsaknaden av tillförlitliga uppgifter på askans innehåll vid tidpunkten då vägen anlades. Som exempel kan nämnas att den kvarvarande lakbara mängden klorid som uppmättes i denna studie (382 mg/kg) representerar alltså endast 17 % av den lakbara mängden för som uppmättes i aska från samma förbränningsanläggning men 10 år senare.
- Endast i ett fåtal provpunkter i de underliggande jorden överskreds kriterierna för känslig markanvändning. I ett fall så togs provet så lång ute i vägslänten att det förefaller sannolikt att den förhöjda halten beror av trafikgenererade emissioner. Ett annat av dessa prov togs i finlera på 80 cm djup under bottenaskan och den förhöjda halten beror sannolikt på något annat än lakvatten från bottenaskan. I detta sammanhang måste hänsyn tas till att undergrunden bestod av utfyllnadsmassor med okänt ursprung. Några slutsatser angående orsaken till de förhöjda koncentrationerna i dessa punkter kan därför ej dras. Detta är en viktig lärdom vid anläggandet av nya test-

vägar med restprodukter: Om inte undergrunden är homogen försvåras möjligheterna att dra slutsatser angående vägens påverkan.

 Det var lätt för grävmaskinisten att hålla isär de olika materiallagren vid bortschaktning av vägen. En viss omblandning kunde dock också iaktagas i vägens kantzoner vid bortschaktning av förstärkningslagret

9 Litteraturreferenser

- [1] Bendz, D, O. Wik, M. Elert och K. Håkansson Miljöriktlinjer för askanvändning i anläggningsbyggande etapp 2, Värmeforsk rapport Q4-238, 2005.
- [2] Hartlén J, Fällman A-M, Back P-E, Jones C; "Principles for risk assessment of secondary materials in civil engineering work", AFR-report 250, Naturvårdsverket, Stockholm 1999
- [3] Chandler A J, Eighmy T T, Hartlén J, Hjelmar O, Kosson D S, Sawell S E, van der Sloot H A, Vehlow J; "Municipal solid waste combustor residues": The international ash working group, studies in environmental science 67, Elsevier science, Amsterdam 1997
- [4] Lundgren T & Hartlén J; "Slagg från avfallsförbränning Teknik och Miljö", RE-FORSK rapport FoU nr 61, REFORSK, Malmö 1991
- [5] Andersson H., Arm M., Carling M., Schouenborg B.; "Provtagningsmetoder för alternativa material till vägbyggnad – undersökning av rostereldad kolbottenaska, slaggrus och krossad betong", VTI/SGI/SP, Linköping 1999.
- [6] Vägverket; "Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad". Publ 2001:34, Vägverket, Borlänge 2001
- [7] Flyhammar P, Bendz D; Redistribution and leaching of different elements in a sub-base layer of alternative aggregates in a pavement construction, Accepted for publication in Journal of Hazardous Materials, 2006
- [8] van der Sloot H A; "Developments in evaluating environmental impact from utilization of bulk inert wastes using laboratory leaching tests and field verification", Waste Management, 16, 65–81, 1996.
- [9] VÄG 94, Allmän teknisk beskrivning för vägar, Vägverket, ISSN 1401-9612, 1994
- [10] ATB VÄG, Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktion, Vägverket, 2005
- [11] Jacobsson T & Viman L; "Provvägsförsök Gärstad –87, Slagger från kol- och sopförbränning, Lägesrapport 8901", VTI notat nr V80, Statens Väg- och trafikinstitut, Linköping 1989
- [12] Arm M; "Egenskaper hos alternativa ballastmaterial speciellt slaggrus, krossad betong och hyttsten", TRITA-AMI LIC 2063, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm 2000
- [13] Vägverket; "Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat", Metodbeskrivning 112, publ 1998:80, Vägverket, Borlänge 1998 <u>http://www.vv.se/filer/publikationer/mb112.pdf</u>
- [14] Vägverket; "Bearbetning av deflektionsdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat", Metodbeskrivning 114, publ 2000:29, Vägverket, Borlänge 2000 http://www.vv.se/filer/publikationer/vvmb114.pdf
- [15] Lind, B. Hantering av vägdagvatten råd och rekommendationer för val av miljöåtgärder, SGI rapport projekt 10671, 2004
- [16] Sutherland R A; "Comparison between non-residual Al, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn released by a three-step sequential extraction procedure and a dilute hy-

drochloric acid leach for soil and road deposited sediment", Applied Geochemistry, 17, 353–365, 2002

- [17] Arm M; "Mechanical properties of residues as unbound road materials experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag" Doctoral thesis, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm 2003
- [18] Belevi, H., D.M. Stämpfli, P. Baccini, Chemical behaviour of municipal solid waste incineration bottom ash in monofills, Waste Manage. Res., 10, 153-167, 1992
- [19] Gron, C., T.T. Andersen, J.B. Hansen, J. Isaksen S. Klem, L. Nordquist, Udvaskning af organisk stof og kobber fra bundslagg, Center for restprodukter UR-1, DHI, Rapport maj, 2003
- [20] Meima, J.A., A. Van Zomeren, R.N.J. Comans, Complexation of Cu with dissolved organic carbon in municipal soild waste incinerator bottom ash leachates, Environ. Sci. Technol, 33, 1424-1429, 1999.
- [21] Maima, J.A., R.N.J Comans, Application of surface complexation/precipitation modeling to contaminant leaching from weathered municipal solid waste incinerator bottom ash, Environ. Sci. Technol., 32, 688-693, 1998.
- [22] Smedley P.L., Kinniburgh D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.*, 17, 517-568.
- [23] Flyhammar P., D. Bendz, Vatten- och masstransporter i en dränerad vägkropp med asfaltsbeläggning, Lunds Tekniska Högskola, ISRN LUTVDG/TVTG-7028-SE, 40 p, 2004.
- [24] Bendz, D., Flyhammar, P., Elert, M., Hartlén, J. (2004) Leching from residues used in highway constructions – a system anaylsis. *In* The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 5, Part F, Springer-Verlag, 293-320.
- [25] Flyhammar P., D. Bendz, M. Persson (2006) Leaching of major elements from MSWI bottom ash in pavement constructions, Manuscript.

Bilagor

A Jordartsbestämning

A.1 Tabell: Jordartsbestämning provsträcka 4

prov	x (cm)	y (cm)	jordart - okulär besiktning
200	0	0	grusig mellansandig finsand
201	0	20	ngt grusig mellansandig finsand
202	0	40	grusig mellansandig finsand
203	0	63	grusig mellansandig finsand med inslag av lerklum-
			par, växtrester och rottrådar
204	0	77	finlera med gruspartiklar rottrådar växtrester
210	50	0	grusig mellansandig finsand
211	50	20	ngt grusig mellansandig finsand
212	50	40	ngt grusig mellansandig finsand
213	50	67	ngt grusig mellansandig finsand
220	100	0	ngt grusig mellansandig finsand (slakamos)
221	100	20	grusig mellansandig finsand
222	100	40	grusig mellansandig finsand med enstaka lerklum-
			par (finlera)
223	100	67	grusig mellansandig finsand
230	150	0	ngt grusig mellansandig finsand
231	150	20	grusig mellansandig finsand
232	150	40	grusig mellansandig finsand
233	150	67	ngt grusig mellansandig finsand med inslag av ler-
			klumpar (finlera)
240	200	0	finlera
241	200	20	fin lera blandad med grus och sand aggregat
242	200	40	finlera blandat med sand och grusaggregat
243	200	68	grusig mellansandig finsand
250	250	0	finlera
251	250	20	finlera
252	250	40	finlera
253	250	60	finlera blandat med sand och grus
254	250	69	fin lera blandad med grus och sandaggregat
260	300	0	sandigt grus
261	300	20	sandigt grus
262	300	40	sandigt grus
263	300	60	sandigt grus
264	300	72	sandigt grus
270	350	0	sandigt grus
271	350	20	sandigt grus
272	350	40	sandigt grus
273	350	60	sandigt grus
274	350	74	sandigt grus
280	400	0	sandigt grus

281 400 20 sandigt grus 282 400 40 sandigt grus 283 400 72 sandigt grus 284 400 72 sandigt grus 290 450 0 finilera 291 450 20 finilera 292 450 40 finilera 293 450 76 fkr grusig sand 2100 500 0 finilera 2101 500 20 lerig silt 2102 500 40 finilera 2103 500 60 fkr grusig sand 2110 550 0 finilera 2111 550 20 finilera 2112 550 40 finilera 2113 550 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2114 550 81 fkr grusig sand 2122 600 40 finilera 2123					
282 400 40 sandigt grus 283 400 60 sandigt grus 284 400 72 sandigt grus 290 450 0 finlera 291 450 20 finlera med sand och gruspartiklar 292 450 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o tegelrester 293 450 76 fikr grusig sand 2100 500 0 finlera 2101 500 20 lerig silt 2102 500 40 finlera 2113 500 60 fikr grusig sand 2114 550 0 finlera 2111 550 0 finlera 2112 550 40 finlera 2121 600 0 finlera 2122 600 0 finlera 2123 600 60 siltig lera med sand och gruspartiklar 2124 600 82 fkr sandigt grus 2131 650 0 finlera	281	400	20	sandigt grus	
283 400 60 sandigt grus 284 400 72 sandigt grus 290 450 0 finlera 291 450 20 finlera med sand och gruspartiklar 292 450 40 finlera 293 450 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o tegerester 294 450 76 fkr grusig sand 2100 500 0 finlera 2101 500 40 finlera 2102 500 40 finlera 2110 500 60 fkr grusig sand 2111 550 20 finlera 2112 50 40 finlera 2113 550 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2114 550 81 fkr grusig sand 2121 600 0 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2124 600 82	282	400	40	sandigt grus	
284 400 72 sandigt grus 290 450 0 finlera 291 450 20 finlera med sand och gruspartiklar 292 450 40 finlera 293 450 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o tegelrester 294 450 76 fkr grusig sand 2100 500 0 finlera 2101 500 20 lerig silt 2102 500 40 finlera 2103 500 60 fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar 2110 550 0 finlera 2111 550 0 finlera 2122 600 0 finlera 2121 600 0 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2131 650 0 finlera 2132 600 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2133 650	283	400	60	sandigt grus	
2904500finlera finlera med sand och gruspartiklar29145040finlera29345060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o tegelrester29445076finlera21005000finlera210150020lerig silt210250040finlera210350060fikr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar21145500finlera21155500finlera21165500finlera211755060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar211855060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21296000finlera21216000finlera212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar21306500finlera213165020finlera med sand och gruspartiklar21326500finlera213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester21347000finlera213575020finlera21366060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar213465086fkr sandigt grus21447000finlera213575020finlera214470060<	284	400	72	sandigt grus	
29145020finlera med sand och gruspartiklar29245040finlera29345060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o tegelrester29445076fkr grusig sand21005000finlera210150020lerig silt210250040finlera210350060fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar210450078fkr grusig sand21105500finlera211155020finlera211255040finlera211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21206000finlera212160060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar212260060siltig lera med sand och gruspartiklar21316500finlera213260060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med sand och gruspartiklar21447000finlera213365060lera blandat med sand och gruspartiklar21447000finlera213465086fir sandigt grus21407000finlera214175020finlera213475020finlera214270040finlera214470060	290	450	0	finlera	
292 450 40 finlera 293 450 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o te- gelrester 294 450 76 fkr grusig sand 2100 500 0 finlera 2101 500 20 lerig silt 2102 500 40 finlera 2103 500 60 fkr grusig sand 2104 500 78 fkr grusig sand 2110 550 0 finlera 2111 550 0 finlera 2112 550 40 finlera 2120 600 0 finlera 2121 600 20 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera mod sand och gruspartiklar 2123 600 60 siltig lera mod sand och gruspartiklar 2131 650 0 finlera 2132 600 60 lera blandat med sand och gruspartiklar 2133 650 0 finlera<	291	450	20	finlera med sand och gruspartiklar	
29345060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o tegelrester29445076fkr grusig sand21005000finlera210150020lerig silt210250040finlera210350060fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar210450078fkr grusig sand21105500finlera211155020finlera211255040finlera211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar211455081fkr grusig sand21226000finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar21306500finlera213165020finlera213265040finlera213365060lera blandat med sand och gruspartiklar213465086fkr sandigt grus21447000finlera214270040finlera214375060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470020finlera214470060siltig lera21507500finlera214170020finlera215275040siltig lera21537500finlera215475080siltig lera <td>292</td> <td>450</td> <td>40</td> <td>finlera</td>	292	450	40	finlera	
29445076fkr grusig sand21005000finlera210150020lerig silt210250040finlera210350060fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar210450078fkr grusig sand21105500finlera211155020finlera211255040finlera211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar212460020finlera212560040finlera212660020finlera212760060siltig lera med sand och gruspartiklar212860060siltig lera21306500finlera213165020finlera med sand och gruspartiklar21326500finlera213365060lera blandat med sand och gruspartiklar213465086fkr sandigt grus21417000finlera214270040finlera21437500finlera214470086fkr grusig sand215275040siltig lera215475091siltig lera215575091siltig lera21568060siltig lera215775040siltig lera215875091si	293	450	60	siltig lera blandat med sand och gruspartiklar o te-	
294 450 76 fkr grusig sand 2100 500 0 finlera 2101 500 20 lerig silt 2102 500 40 finlera 2103 500 60 fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar 2104 500 78 fkr grusig sand 2110 550 0 finlera 2111 550 40 finlera 2112 550 40 finlera 2120 600 0 finlera 2121 600 20 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera med sand och gruspartiklar 2124 600 82 fkr sandigt grus 2130 650 0 finlera 2131 650 20 finlera 2132 650 40 finlera 2133 650 60 lera blandat med sand och gruspartiklar 2132 650 40 finlera 2140 </td <td></td> <td></td> <td></td> <td>gelrester</td>				gelrester	
2100 500 0 finlera 2101 500 20 lerig silt 2103 500 60 fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar 2104 500 78 fkr grusig sand 2104 500 78 fkr grusig sand 2110 550 0 finlera 2111 550 40 finlera 2112 550 40 finlera 2113 550 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2114 550 81 fkr grusig sand 2120 600 0 finlera 2121 600 20 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera med sand och gruspartiklar 2124 600 82 fkr sandigt grus 2131 650 20 finlera med sand och gruspartiklar 2132 650 40 finlera 2133 650 60 lera blandat med sand och gruspartiklar 2134 700	294	450	76	fkr grusig sand	
2101 500 20 lerig silt 2102 500 40 finlera 2103 500 60 fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar 2104 500 78 fkr grusig sand 2110 550 0 finlera 2111 550 20 finlera 2112 550 40 finlera 2113 550 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2120 600 0 finlera 2121 600 20 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera med sand och gruspartiklar 2124 600 82 fkr sandigt grus 2130 650 0 finlera 2131 650 20 finlera med sand och gruspartiklar 2132 650 40 finlera 2133 650 60 lera blandat med grus och sandpartiklar 2132 650 40 finlera 2133 650 60 <td>2100</td> <td>500</td> <td>0</td> <td>finlera</td>	2100	500	0	finlera	
2102 500 40 finlera 2103 500 60 fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar 2104 500 78 fkr grusig sand 2110 550 0 finlera 2111 550 20 finlera 2112 550 40 finlera 2113 550 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2120 600 0 finlera 2121 600 20 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera med sand och gruspartiklar 2130 650 0 finlera 2131 650 20 finlera blandat med sand och gruspartiklar 2132 650 40 finlera blandat med sand och gruspartiklar 2133 650 60 lera blandat med sand och gruspartiklar 2134 700 0 finlera 2140 700 0 finlera 2141 700 20 finlera 2142	2101	500	20	lerig silt	
210350060fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar210450078fkr grusig sand21105500finlera211155020finlera211255040finlera211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar211455081fkr grusig sand21206000finlera212160020finlera212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar21346500finlera21356500finlera21366500finlera213765060lera blandat med sand och gruspartiklar213865060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213965060lera blandat med sand och gruspartiklar213965060finlera213065060lera blandat med sand och gruspartiklar213165086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera214470086fkr grusig sand21517500finlera215275040siltig lera215475080siltig lera215575091 <tt>siltig lera blandat med sand och gruspartiklar<</tt>	2102	500	40	finlera	
2104 500 78 fkr grusig sand 2110 550 0 finlera 2111 550 20 finlera 2112 550 40 finlera 2113 550 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2114 550 81 fkr grusig sand 2120 600 0 finlera 2121 600 20 finlera 2122 600 40 finlera 2123 600 60 siltig lera med sand och gruspartiklar 2124 600 82 fkr sandigt grus 2130 650 0 finlera 2131 650 20 finlera blandat med sand och gruspartiklar 2132 650 40 finlera 2133 650 60 lera blandat med sand och gruspartiklar 2133 650 60 lera blandat med sand och och gruspartiklar 2141 700 0 finlera 2142 700 40 finlera 2144 700 <td< td=""><td>2103</td><td>500</td><td>60</td><td>fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar</td></td<>	2103	500	60	fkr grusig sand med inslag av lerig silt klumpar	
21105500finlera211155020finlera211255040finlera211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar211455081fkr grusig sand21206000finlera212160020finlera212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera blandat med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21417000finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215475091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215475091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215575091siltig	2104	500	78	fkr grusig sand	
211155020finlera211255040finlera211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar211455081fkr grusig sand21206000finlera212160020finlera212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21417000finlera214270040finlera214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375091siltig lera215475091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215575091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215575091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera	2110	550	0	finlera	
211255040finlera211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar211455081fkr grusig sand21206000finlera212160020finlera212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera blandat med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera215375091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21638000finlera216480040finlera	2111	550	20	finlera	
211355060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar211455081fkr grusig sand21206000finlera212160020finlera212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera215275040siltig lera215375091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21648000finlera216580090finlera216480080fkr sandigt grus med	2112	550	40	finlera	
211455081fkr grusig sand21206000finlera212160020finlera212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera blandat med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera215575091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216180020finlera216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080finlera215375091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480020finlera216580090grusig sand216480080fkr sandigt grus med lerklumpar<	2113	550	60	siltig lera blandat med sand och gruspartiklar	
2120 600 0finlera2121 600 20finlera2122 600 40finlera2123 600 60siltig lera med sand och gruspartiklar2124 600 82fkr sandigt grus2130 650 0finlera2131 650 20finlera blandat med sand och gruspartiklar2132 650 0lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester2133 650 60lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester2134 650 86fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera215575091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera216280040finlera med doft av aska216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand216480095grusig s	2114	550	81	fkr grusig sand	
2121 600 20finlera2122 600 40finlera2123 600 60siltig lera med sand och gruspartiklar2124 600 82fkr sandigt grus2130 650 0finlera2131 650 20finlera blandat med sand och gruspartiklar2132 650 40finlera med sand och gruspartiklar2133 650 60lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester2134 650 86fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera215575091siltig lera21648000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera2171850<	2120	600	0	finlera	
212260040finlera212360060siltig lera med sand och gruspartiklar212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera blandat med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera216280040finlera216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand216480095grusig sand21708500finlera217185020finlera	2121	600	20	finlera	
212360060siltig lera med sand och gruspartiklar212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera blandat med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera216280040finlera ilmonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand216480095grusig sand21708500finlera217185020finlera	2122	600	40	finlera	
212460082fkr sandigt grus21306500finlera213165020finlera blandat med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera21618000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480095grusj sand216580095grusj sand21708500finlera217185020finlera217285040finlera	2123	600	60	siltig lera med sand och gruspartiklar	
21306500finlera213165020finlera blandat med sand och gruspartiklar213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera21618000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera ilmonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera	2124	600	82	fkr sandigt grus	
2131 650 20finlera blandat med sand och gruspartiklar2132 650 40finlera med sand och gruspartiklar2133 650 60lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester2134 650 86fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera216280040finlera med doft av aska216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080finlera limonithaltig216580095grusig sand21708500finlera216580095grusig sand217185020finlera	2130	650	0	finlera	
213265040finlera med sand och gruspartiklar213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21618000finlera216280040finlera med doft av aska216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera	2131	650	20	finlera blandat med sand och gruspartiklar	
213365060lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester213465086fkr sandigt grus21407000finlera214170020finlera214270040finlera med sand och och gruspartiklar214370060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar214470086fkr grusig sand21507500finlera215175020finlera215275040siltig lera215375060siltig lera215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21608000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera	2132	650	40	finlera med sand och gruspartiklar	
2134 650 86 fkr sandigt grus 2140 700 0finlera 2141 700 20finlera 2142 700 40finlera med sand och och gruspartiklar 2143 700 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2144 700 86 fkr grusig sand 2150 750 0finlera 2151 750 20finlera 2152 750 40siltig lera 2153 750 60siltig lera 2154 750 80siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 800 0finlera 2161 800 20finlera 2161 800 20finlera med doft av aska 2162 800 40finlera limonithaltig 2163 800 60siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 800 80 fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera	2133	650	60	lera blandat med grus och sandpartiklar tegelrester	
2140 700 0 finlera 2141 700 20 finlera 2142 700 40 finlera med sand och och gruspartiklar 2143 700 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2144 700 86 fkr grusig sand 2150 750 0 finlera 2151 750 20 finlera 2152 750 40 siltig lera 2153 750 60 siltig lera 2154 750 80 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 800 0 finlera 2161 800 20 finlera med doft av aska 2162 800 40 finlera limonithaltig 2163 800 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 800 80 fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera	2134	650	86	fkr sandigt grus	
214170020finlera 2142 70040finlera med sand och och gruspartiklar 2143 70060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2144 70086fkr grusig sand 2150 7500finlera 2151 75020finlera 2152 75040siltig lera 2153 75060siltig lera 2154 75080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2155 75091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2161 8000finlera 2162 80040finlera limonithaltig 2163 80060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 80080fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 80095grusig sand 2170 8500finlera 2171 85020finlera	2140	700	0	finlera	
214270040finlera med sand och och gruspartiklar 2143 70060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2144 70086fkr grusig sand 2150 7500finlera 2151 75020finlera 2152 75040siltig lera 2153 75060siltig lera 2154 75080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2155 75091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 8000finlera 2161 80020finlera med doft av aska 2162 80040finlera limonithaltig 2163 80060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 80080fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 80095grusig sand 2170 8500finlera 2171 85020finlera	2141	700	20	finlera	
2143 700 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2144 700 86 fkr grusig sand 2150 750 0 finlera 2151 750 20 finlera 2152 750 40 siltig lera 2153 750 60 siltig lera 2154 750 80 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2155 750 91 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 800 0 finlera 2161 800 20 finlera med doft av aska 2162 800 40 finlera limonithaltig 2163 800 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 800 80 fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera med gruspartiklar	2142	700	40	finlera med sand och och gruspartiklar	
2144 700 86 fkr grusig sand 2150 750 0 finlera 2151 750 20 finlera 2152 750 40 siltig lera 2153 750 60 siltig lera 2154 750 80 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2155 750 91 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 800 0 finlera 2161 800 20 finlera med doft av aska 2162 800 40 finlera limonithaltig 2163 800 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 800 80 fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera med gruspartiklar	2143	700	60	siltig lera blandat med sand och gruspartiklar	
2150 750 0 finlera 2151 750 20 finlera 2152 750 40 siltig lera 2153 750 60 siltig lera 2154 750 80 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2155 750 91 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 800 0 finlera 2161 800 20 finlera med doft av aska 2162 800 40 finlera limonithaltig 2163 800 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 800 80 fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera med gruspartiklar	2144	700	86	fkr grusig sand	
2151 750 20 finlera 2152 750 40 siltig lera 2153 750 60 siltig lera 2154 750 80 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2155 750 91 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 800 0 finlera 2161 800 20 finlera med doft av aska 2162 800 40 finlera limonithaltig 2163 800 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 800 80 fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera med gruspartiklar	2150	750	0	finlera	
2152 750 40 siltig lera 2153 750 60 siltig lera 2154 750 80 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2155 750 91 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2160 800 0 finlera 2161 800 20 finlera med doft av aska 2162 800 40 finlera limonithaltig 2163 800 60 siltig lera blandat med sand och gruspartiklar 2164 800 80 fkr sandigt grus med lerklumpar 2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera med gruspartiklar	2151	750	20	finlera	
215375060siltig lera215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215575091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21608000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera	2152	750	40	siltig lera	
215475080siltig lera blandat med sand och gruspartiklar215575091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21608000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera217285040finlera med gruspartiklar	2153	750	60	siltig lera	
215575091siltig lera blandat med sand och gruspartiklar21608000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera217285040finlera med gruspartiklar	2154	750	80	siltig lera blandat med sand och gruspartiklar	
21608000finlera21608000finlera216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera217285040finlera med gruspartiklar	2155	750	91	siltig lera blandat med sand och gruspartiklar	
216180020finlera med doft av aska216280040finlera limonithaltig216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera217285040finlera med gruspartiklar	2160	800	0	finlera	
216180040finlera limon inclusion under un	2161	800	20	finlera med doft av aska	
216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216380060siltig lera blandat med sand och gruspartiklar216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera217285040finlera med gruspartiklar	2162	800	40	finlera limonithaltig	
216480080fkr sandigt grus med lerklumpar216580095grusig sand21708500finlera217185020finlera217285040finlera med gruspartiklar	2163	800	60	siltig lera blandat med sand och gruspartiklar	
2165 800 95 grusig sand 2170 850 0 finlera 2171 850 20 finlera 2172 850 40 finlera med gruspartiklar	2164	800	80	fkr sandigt grus med lerklumpar	
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2165	800	95	ornsio sand	
217185020finlera217285040finlera med gruspartiklar	2170	850	0	finlera	
2172 850 40 finlera med gruspartiklar	2171	850	20	finlera	
	2172	850	40	finlera med gruspartiklar	

2173	850	60	fin lera med grus och sandpartiklar
2174	850	80	fkr grusig sand
2175	850	98	fkr grusig sand blandat med klumpar av finlera
2180	900	0	finlera
2181	900	20	finlera
2182	900	40	finlera
2183	900	60	sandigt grus
2184	900	80	grusig sand
2185	900	104	sandigt grus
2190	950	0	finlera
2191	950	20	finlera
2192	950	40	finlera
2193	950	60	grusig sand
2194	950	80	grusig mellansandig finsand
2195	950	101	fkr grusig sand med rottrådar
2200	1000	0	finlera
2201	1000	20	finlera med gruspartiklar
2202	1000	40	finlera
2203	1000	60	finlera blandat med grus och finkornrik sand
2204	1000	80	grusig sand
2205	1000	99	fkr grusig sand

prov	x (cm)	y (cm)	jordart - okulär besiktning
100	0	0	finlera
101	0	60	fkr sandigt grus
102	0	120	sandigt grus
110	100	0	
111	100	60	fkh grusig sand
112	100	120	sandigt grus
120	200	0	finlera
121	200	60	sandigt grus blandat med finlera
122	200	120	fkh sandigt grus
130	300	0	finlera
131	300	60	fkr sandig grus blandad med finlera
132	300	120	sandigt grus
140	400	0	finlera
141	400	60	finlera blandat med sand och grus (sten/grovgrus
			utplockat)
142	400	120	sandigt grus
150	500	0	finlera
151	500	60	fkr grusig sand blandat med finlera
152	500	120	fkh sandigt grus
160	600	0	finlera
161	600	60	sandigt grus blandat med finlera
162	600	120	fkr sandig grus blandat med enstaka finlerklumpar
170	700	0	finlera
171	700	60	fkr grusg sand blandat med enstaka lerklumpar
172	700	120	fkr sandigt grus
180	750	0	finlera
181	750	60	fkr grusig sand blanda med finlera
182	750	120	fkr grusig sand blandat med finlera, växtdelar

A.2 Tabell: Jordartsbestämning provsträcka 5

B Belastningsnivåer vid belastningsförsök i laboratorium

Sekvens	Belastnings-	Statisk last	Dynamisk last	Kammartyck	Antal pulser
nr	nivå	kPa	kPa	kPa	
1	100/60	20	100	60	1 000
2	200/60	20	200	60	1 000
3	400/60	20	400	60	1 000
4	400/120	20	400	120	1 000
5	600/120	20	600	120	100 000
6	800/120	20	800	120	100 000
7	1000/120	20	1 000	120	10 000
8	1200/120	20	1 200	120	10 000

Belastningsnivåer, bärlagertest:

Belastningsnivåer, skyddslagertest:

Sekvens	Belastnings-	Statisk last	Dynamisk last	Kammartyck	Antal pulser
nr	nivå	kPa	kPa	kPa	
1	10/10	20	10	10	1 000
2	30/10	20	30	10	1 000
3	50/10	20	50	10	1 000
4	50/20	20	50	20	100 000
5	70/20	20	70	20	100 000
6	100/20	20	100	20	10 000
7	150/20	20	150	20	10 000

Sam-	Delprov	Mängd per delprov (g)
lingsprov		
1	214, 215, 224, 225	25,06+25,26+25,08+25,02
2	234, 235, 236, 244, 245, 246	20,05+20,05+20,01+20,07+20,14+20,09
3	255, 256, 257, 265, 266, 267	20,06+20,11+20,03+20,02+20,05+20,66
4	275, 276, 277, 285, 286, 287,	20,06+20,21+20,04+20,08+20,01+20,05+2
	288	0,14
5	295, 296, 297, 2105, 2106, 2107	20,06+20,04+20,04+20,22+20,05+20,21
6	2115, 2116, 2117, 2125, 2126,	20,07+20,23+20,04+20,00+20,07+20,07
	2127	
7	2135, 2136, 2137, 2145, 2146,	20,05+20,04+20,51+20,10+20,03+20,03
	2147	
8	2156, 2157, 2158, 2166, 2167,	20,00+20,05+20,16+20,76+20,05+20,02
	2168	
9	2176, 2177, 2186, 2187	25,06+25,03+25,00+25,04
10	2196, 2206	40,07+40,20

C Samlingsprover förstärkningslager av bottenaska