Vägverket

Dokumentets datum
2001–12

Dokumentbeteckning
Publ 2001:34

Upphovsman (författare)
Vägavdelningen
Kontaktperson: Ingrid Södergren

Dokumentets titel
Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad
– Undersökning av rosteldad kolbottenaska, slaggrus och krossad betong

Huvudinnehåll
Denna publikation redovisar en undersökning om traditionella provningsmetoder för vägunderbyggnad även kan användas på alternativa material. Dessutom redovisas om de provade materialen i sig anses lämpliga som underbyggnadsmaterial och förslag ges på dimensionerande värden.

Utgivare
Enheten för statlig väghållning

ISSN 1401-9612
Vägverkets tryckeri i Borlänge 2001

Nyckelord
Vägunderbyggnad, provningsmetoder, rosteldad kolbottenaska, slaggrus, krossad betong, materialegenskaper, miljötekniska egenskaper, dimensionerande värden, restprodukter, vägbyggnad

Distributör (namn, postadress, telefon, telefax)
Vägverket, Avd för intern service, 781 87 Borlänge, tfn 0243-755 00, fax 0243-755 50
e-post: vagverket.butiken@vv.se
Svensk Byggtjänst, 113 87 Stockholm, tfn 08-457 11 00

Huvudkontoret

Postadress	Telefon	Telefax
781 87 BORLÄNGE	0243-750 00	0243-758 25

Förord

Projektets huvudsyfte har varit att studera de mest relevanta tekniska och miljömässiga provningsmetoderna för att kunna bedöma alternativa materials lämplighet för användning till vägunderbyggnadsändamål. I projektet har även ingått att, för undersökta material, föreslå dimensionerande värden på materialparametrar och rekommendera lämpligt utförande. Huvuddelen av arbetet genomfördes under 1997 och 1998 som ett samarbete mellan Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut (SP), Statens geotekniska institut (SGI) och Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI).

Björn Schouenborg, SP, koordinerade projektet i samarbete med övriga projektledare/ kontaktpersoner från respektive organisation: Hjördis Andersson (SGI), Maria Carling (SGI) och Maria Arm (VTI).

Projektet har haft en styrgrupp och en referensgrupp.

SP har finansierat en del av projektet.

Denna rapport är en bearbetad och avkortad version av forskarredovisningen. Den ursprungliga versionen har diarienummer BY 20A 97:10295. Rapporten har redigerats av Ingrid Södergren, VV, och Jan Lindgren, SGI.

Borlänge i december 2001

Hamid Zarghampour

Innehållsförteckning

Förord 3

Sammanfattning och rekommendationer 6
Geometriska och fysikaliska egenskaper 6
Beständighet – termisk 6
Packningsegenskaper 6
Bärförmåga och stabilitet 6
Sättning/kompression 7
Tjälrörelse 7
Miljömässiga egenskaper 7
Bedömning på materialens lämplighet för användning i vägunderbyggnad 7
Förslag på dimensionerande värden 7
Rekommendationer för lämpligt utförande 9

1. Introduktion 10
Syfte 10
Bakgrund 10

2. Beskrivning av provmaterialen 11

3. Diskussion och utvärdering 12
3.1 Egenskaper och metoder 12
Geometriska egenskaper 12
Fysikaliska egenskaper 13
Beständighet 13
Packningsegenskaper 15
Bärförmåga och stabilitet 16
Sättning/kompression 17
Tjälrörelse och värmekonduktivitet 18
Miljömässiga egenskaper 19

4. Förslag till fortsatt arbete 20

Bilaga 1 Laboratorieprovningar 21
B1.1 Provberedning 21
B1.2 Geometriska och fysikaliska egenskaper 21
Kornstorleksfördelning
Korndensitet enligt FAS Metod 208
Korndensitet enligt SP Metod 758
Vattensugning
Flisighetsindex enligt SS-EN 933-3
Kornformsindex (LT-3) enligt EN 933-4
B1.3 Beständighet: mekanisk och termisk 22
Sprödhet enligt FAS Metod 210
Sprödhet enligt EN 1097-2 (Los Angelestal)
Sprödhet enligt holländskt statiskt kompressionstest (DSC)
Nötningsmotstånd enligt EN 1097-1 (micro-Deval)
Frostbeständighet enligt prEN 1367-1

B1.4 Packningsegenskaper 24
Optimal vattenkvot och maximal densitet
Beslut om provningsparametrar med ledning av packningsförsöken
B1.5 Bärförmåga och stabilitet 27
Direkt skjuvförsök
Dynamisk treaxialprovning
B1.6 Sättning/kompression 30
Kompressometerförsök
Kompressibilitet enligt SP Metod 01-46-77
B1.7 Tjälrörelse och värmekonduktivitet 33
Permeabilitetsbestämning med rörpermeameter
Tjällyftningsbenägenhet
Värmekonduktivitet

Bilaga 2 Litteraturstudie 36
B2.1 Tekniska egenskaper 36
Rosteldad kolbottenaska
Slaggrus
Krossad betong
B2.2 Miljömässiga egenskaper 39
Miljömässig karakterisering
Rosteldad kolbottenaska
Slaggrus
Krossad betong
Naturgrus och bergkross

Bilaga 3 Kompletterande provningar i fält 44
B3.1 Allmänt 44
B3.2 Uppsamling av lakvatten i fält 45
Resultat
B3.3 Provtagning på material 46
B3.4 Lakningsförsök i laboratorium 46
Resultat
Sammanfattning
B3.5 Analys av kornstorleksfördelning 50

Bilaga 4 Kornstorleksfördelning hos provmaterialen vid leverans 52

Bilaga 5 Kornstorleksfördelning före och efter packning 54
B4.1 Kornstorleksfördelning före och efter tung instampning för enskilda material 54
B4.2 Kornstorleksfördelning före och efter lätt instampning för enskilda material 56

Litteratur- och referenslista 58

Sammanfattning och rekommendationer

Kan traditionella provningsmetoder användas på alternativa material?

Projektets huvudsyfte har varit att undersöka om traditionella provningsmetoder för vägunderbyggnad även kan användas på alternativa material som
- rosteldad kolbottenaska,
- slaggrus och
- krossad betong.

Är valet av metoder relevant? Är metoderna i sig tillämpliga? Behöver de modifieras eller bytas mot helt andra?

Studien av materialen har indelats efter de olika egenskaper som direkt eller indirekt påverkar funktion och dimensionering:
- geometriska egenskaper
- fysikaliska egenskaper
- beständighet
- packningsegenskaper
- bärförmåga och stabilitet
- sättning/kompression
- tjälrörelse
- miljömässiga egenskaper

För att göra en jämförelse med traditionella material har ett ”referensmaterial”, ungefär motsvarande ett sandigt grus, proportionerats och provats parallellt.

Vidare redovisas en sammanställning av en litteraturstudie.

I projektet ingick även att för undersökta material ge förslag på parametrar som kan användas vid dimensionering och rekommendera lämpligt utförande.

Geometriska och fysikaliska egenskaper

Kornform och kornstorleksfördelning, densitet och mekaniska egenskaper har undersökts. Avsikten var främst att få en utförlig materialkarakterisering, men även att undersöka materialen enligt några av förslagen till kommande europastandard. Det kan konstateras att flera av metoderna kräver större eller mindre modifiering för att kunna användas på ett relevant sätt. Vissa metoder är direkt olämpliga, som olika sorters roterande trummor där kopplingen är dålig mellan provningsresultatet och den faktiska funktionen i vägkroppen.

Beständighet – termisk

Frostbeständighet har utvärderats enligt förslag till europastandard för ballast. Metoden tar emellertid inte hänsyn till att vissa material suger vatten under lång tid och kanske måste förkonditioneras. Detta kräver därför modifiering av metoden. Någon generell koppling mellan vattenabsorption och frostbeständighet kan inte göras på samma sätt som för naturlig ballast.

Packningsegenskaper

Optimal vattenkvot, dvs den vattenkvot som ger de bästa packningsegenskaperna och därigenom bästa bärförmågan har bestämts för de tre materialen. Det gjordes genom inpackning och densitetsbestämning med hjälp av lätt och tung instampning vid olika vattenkvoter. Dessutom bestämdes maximal densitet med hjälp av lätt och tung instampning liksom med vibrobord. Följande slutsatser kan dras av försöken. På krossad betong bör optimal vattenkvot bestämmas med tung instampning och maximal densitet genom inpackning på vibrobord. På slaggrus bör optimal vattenkvot och maximal densitet bestämmas med tung instampning. På kolbottenaska kan optimal vattenkvot bestämmas med lätt eller tung instampning och maximal densitet genom inpackning på vibrobord vid den vattenkvot som gett högst densitet vid instampningen.

Bärförmåga och stabilitet

Terrass

Bärförmåga och styvhet har undersökts med hjälp av dynamisk treaxialprovning för att ta reda på vilken terrassmaterialtyp materialen kan sägas motsvara vid överbyggnadsdimensionering. Eftersom provningen görs på hela materialet upp till åtminstone 64 mm kornstorlek och provkroppen tillverkas med vibrering där densitet och vattenkvot kan väljas efter behov, kan metoden sägas vara generell och är därför mycket lämplig för alternativa material. Resultatet blev att samtliga provade material kan anses minst motsvara materialtyp 2.

Vägbank

Materialens hållfasthet under dränerade förhållanden, dvs dess inre friktionsvinkel, har bestämts med direkt skjuvförsök. Metoden fungerar för de provade alternativa materialen, men om stora kornstorlekar ska kunna tas med behöver en större utrustning användas. Vid en jämförelse med naturliga material har samtliga provade alternativa material en friktionsvinkel jämförbar med fast lagrad sand eller grus. På basis av detta kan de jämföras med naturliga material av materialtyp 2.

Sättning/kompression

Materialens kompressionsegenskaper, sättningsmodul, har bestämts genom kompressometerförsök med stegvis pålastning. Då materialet packas för hand i utrustningen är det svårt att uppnå den packningsgrad som erhålls vid packning i fält eller den lagringstäthet som finns hos naturligt lagrade jordar. På basis av utförda försök bedöms metoden kunna användas för en relativ bestämning av materialens kompressionsegenskaper.

Materialens kompressionsegenskaper har även utvärderats genom kompressibilitetsförsök enligt förslag till Nordtestmetod för lättballast. Metoden är främst avsedd för egenkontroll. Resultaten tyder på att det är fullt möjligt att tillämpa denna metod på alternativa material. På grund av stora skillnader gentemot ovan nämnda kompressibilitetsprovningar så är dessa resultat inte direkt korrelerbara.

Tjälrörelse

Frystest för bestämning av tjällyftningsparametrar har gjorts för att bestämma vilken tjälfarlighetsklass materialen tillhör och vilken tjällyftning som kan förväntas i olika lastfall. Försöken fungerade bra och resultatet blev att samtliga material kan anses som icke tjällyftande vid den kornstorleksfördelning som provats.

Materialens permeabilitet har bestämts med rörpermeameter. Permeabiliteten har betydelse bl a för den kemiska beständigheten (utlakning), tjälrörelse/tjälfarlighet och, vid täta material, även för sättningarnas tidsförlopp. Resultaten visar att metoden fungerar bra och att de provade materialen vid aktuell kornstorleksfördelning har permeabiliteter vilka närmast kan jämföras med naturliga material av materialtyp 2 eller 3.

Miljömässiga egenskaper

De miljömässiga egenskaperna hos restprodukter kan undersökas genom en s k miljömässig karakterisering. Då bestäms materialets huvudsakliga beståndsdelar och spårämnen samt hur utlakningsförloppet ser ut på kort och lång sikt. Rosteldad kolbottenaska har tidigare undersökts i ett flertal olika projekt vid SGI. Svenska Renhållningsverksföreningen (RVF) har i ett projekt låtit undersöka hur de miljömässiga egenskaperna hos slaggrus varierar i tiden och mellan olika anläggningar. Även på betongkross och naturmaterial som morän och bergkross finns miljöundersökningar gjorda, men i mindre omfattning. Sammanfattningsvis visar en generell jämförelse av de data som finns tillgängliga vid SGI att halterna i betongkross och rosteldad kolbottenaska är i samma storleksordning som i naturmaterial. Slaggrus har generellt högst halter av de här jämförda materialen.

Under sommaren 1998 har provtagning av lakvatten från en provväg som anlades i slutet av 80-talet genomförts. Provvägen bestod av provsträckor med slaggrus, kolbottenaska samt ett referensmaterial i förstärkningslagret. Analys av lakvatten från vägslänterna visade inte på några större skillnader varken mellan materialen eller i tiden (dvs förändring under 10-årsperioden).

Lakförsök har även utförts på material som tagits upp ur provvägen. Material (kolbottenaska, slaggrus och referensmaterial) har tagits dels från vägkropp, dels från vägslänt. Generellt för de tre undersökta materialen gäller att huvudelementen och salter lakar ut i större mängder från materialet i körbanan än från vägslänten, medan spårämnen tenderar att laka ut i större mängder från materialet från vägslänten.

Om utlakningen av spårämnen jämförs mellan de tre olika materialen, är det svårt att dra generella slutsatser. För t ex kadmium, krom, nickel och zink är inte skillnaderna särskilt stora mellan materialen. Kopparutlakningen är högst från slaggruset samt från referensmaterialet i vägslänten och blyutlakningen är högst för referensmaterialet från vägslänten.

Bedömningar av dimensionerande värden gäller inte generellt, utan avser de provade materialen.

Bedömning av materialens lämplighet för användning i vägunderbyggnad

På basis av undersökta tekniska egenskaper bedöms samtliga undersökta material lämpliga att användas som underbyggnadsmaterial.

Vad gäller de miljömässiga aspekterna visar de undersökningar som refereras i rapporten att den rosteldade kolbottenaskan har egenskaper som liknar naturmaterial. Materialet är också homogent och bör kunna användas, med vissa restriktioner vad gäller konstruktionens utformning och lokalisering. Betongkross och slaggrus är mer heterogena material. Användning av dessa material bör diskuteras vidare. Beträffande slaggrus måste hänsyn tas till slutsatserna från det nämnda RVF-projektet.

Organiska ämnen har inte alls diskuterats i denna rapport, men måste beaktas.

Riskbedömning av miljöpåverkan vid användning av restprodukter som material till vägunderbyggnad är en komplex fråga som kräver mycket fortsatt arbete.

Förslag på dimensionerande värden

Det skall observeras att egenskaperna hos kolbottenaska, och slaggrus kan variera mellan såväl anläggningar som enskilda leveranser och egenskaperna hos betongkross kan variera beroende på ursprunglig betongkvalité och rivningsobjekt. Gjorda bedömningar av dimensionerande värden avser de provade materialen, och kan därför inte anses gälla generellt för egenskaper hos kolbottenaska, slaggrus och betongkross av annat ursprung.

Dimensionering av vägunderbyggnad

Friktionsvinkel

Vid spänningsnivåer upp till 50 kPa, dvs ner till ca 3 m under vägytan, bedöms ett rimligt dimensionerande värde på den inre friktionsvinkeln för de provade alternativa materialen vara ca 35°. Materialen kan avseende den inre friktionsvinkeln jämföras med naturligt material av materialtyp 2.

Permeabilitet

Permeabiliteten vid den undersökta kornstorleksfördelningen kan närmast jämföras med naturligt material av materialtyp 2 eller 3. Det är vanskligt att ge generella dimensionerande värden för permeabiliteten enbart baserade på enstaka försök som gjorts här och de bestämda permeabiliteterna gäller då enbart den provade kornstorleksfördelningen. Det är också svårt att göra en generell bedömning ”på säkra sidan” eftersom det i vissa fall (t ex utlakning) är en fördel med låg permeabilitet och i andra fall (t ex sättning) är en fördel med hög permeabilitet. En bedömning bör därför göras i varje enskilt fall.

Sättningsmodul

Som beskrivs i avsnitt 3.1 ”Sättning/kompression” kan utvärderade sättningsmoduler bestämda i laboratorium inte jämföras med motsvarande moduler då materialen packats i fält. En jämförelse av kompressionsegenskaperna hos de alternativa materialen och referensmaterialet visar dock att slaggruset och betongkrosset motsvarar referensmaterialet, medan kolbottenaskan har en lägre modul.

Materialtyp

För dimensionering kan de provade materialen vid aktuell kornstorleksfördelning betraktas som materialtyp 2, under förutsättning att den organiska halten är mindre än 2 %. (Organisk halt har inte undersökts i detta projekt).

Densitet

På basis av utförda försök och tidigare erfarenheter bedöms slaggrusets maximala torrdensitet variera mellan 1,4 och 1,8 t/m^3 (tung instampning) och betongkrossets maximala torrdensitet mellan 1,8 och 2,0 t/m^3 (tung instampning eller vibrobord). Kolbottenaskans maximala densitet är i högre grad beroende av hur mycket av materialet som krossas. På basis av såväl utförda försök som tidigare erfarenhet bedöms den maximala torrdensitet variera mellan 0,9 och 1,2 t/m^3 (tung instampning eller vibrobord). Det aktuella materialets torr- och skrymdensitet bör dock bestämmas i varje enskilt fall.

Vid dimensionering bör ett högt värde användas då jordens densitet till övervägande del verkar ogynnsamt (t ex vid beräkning av totalstabilitet) och ett lågt värde då jordens densitet till övervägande del verkar gynnsamt (t ex vid plattgrundläggning).

Dimensionering av vägöverbyggnad

E-modul
Följande E-moduler kan anses rimliga vid de spänningsnivåer som förekommer på underbyggnads- och skyddslagernivå:

- 80 MPa för kolbottenaska med densiteten 1,1 t/m^3,
- 90 MPa för slaggrus från Göteborg med 90 % packningsgrad samt
- 210 MPa för krossad rivningsbetong (blandade husrester) med den gradering som provats och med 97 % packningsgrad.

Tjälfarlighetsklass
Samtliga material kan anses som icke tjällyftande vid den kornstorleksfördelning som provats. På grund av vissa materials vattensugande egenskaper under lång tid vore det värdefullt att undersöka tjällyftningsegenskaperna vid olika vattenkvoter.

Materialtyp
Vid dimensionering av en överbyggnad på de aktuella materialen kan de jämföras med minst materialtyp 2, under förutsättning att den organiska halten är mindre än 2 %. Enligt VÄG 94 bedöms materialtyp 2 ha elasticitetsmoduler mellan 70 och 100 MPa i icke fruset tillstånd. Vidare krävs minst 54,5 cm överbyggnadstjocklek på materialtyp 2.

Observera att materialen inte provats i riktigt blött tillstånd. Som nämnts tidigare vore det lämpligt att göra försök med varierande vattenkvot för att se hur stor förändringen blir vid hög och låg vattenmättnadsgrad. Detta förbättrar beräkningsunderlaget för dimensioneringen.

Rekommendationer för lämpligt utförande

Tidigare utförda packningsförsök i fält med slaggrus är utförda med välttyper motsvarande dem som föreskrivs i VÄG 94. Dock har vid respektive välttyp packningen utförts med tunnare lager än vad som i VÄG 94 anges för materialtyp 2. Använd lagertjocklek motsvarar närmast angiven lagertjocklek för materialtyp 3 och 5. I en av utredningarna anges att en djupverkan på minst 0,4 m erhålls (även med en 400 kg vibroplatta). På basis av de tidigare utförda packningsförsöken med slaggrus bedöms utläggning och packning kunna utföras enligt VÄG 94, med lagertjocklekar motsvarande materialtyp 3 och 5 (i tabell 4.10-1).

På utförda provsträckor med krossad betong har inte några särskilda packningsförsök utförts. Enligt uppgift har packning utförts på traditionellt sätt med gott resultat. Att härifrån i detta projekt bedöma om utläggning och packning generellt kan utföras enligt VÄG 94 är svårt. Det tyder dock på att VÄG 94 skulle kunna följas.

Inte heller i de kända fall då kolbottenaska använts har några särskilda packningsförsök utförts. Det har konstaterats att nedkrossningen av kolbottenaskan blir omfattande vid utläggning och packning. Därför bedöms packning inte kunna utföras enligt VÄG 94. Enligt de erfarenheter som finns, bör lägre last generellt användas vid packning t ex lätta vibrovältar med stora valsdiametrar och låg amplitud. Konventionell byggtrafik bör också undvikas.

1. Introduktion

Syfte

Projektets syfte var att välja mest relevanta tekniska och miljömässiga provningsmetoder för att kunna bedöma alternativa materials lämplighet för användning till vägunderbyggnadsändamål. De valda provningsmetoderna gör det möjligt att jämföra de alternativa materialen med väl kända, naturliga material. De egenskaper som redovisas skall kunna utgöra ett underlag för dimensionering av över- och underbyggnad. Projektet skall även kunna föreslå lämpligt utförande av underbyggnad för att uppnå redovisade egenskaper.

En ytterligare målsättning är att provningsmetoderna inte skall vara onödig komplicerade. Enkla provningar bör om möjligt korreleras med mer avancerade. Hanteringen av alternativa material tål sannolikt inte ekonomiskt att belastas med alltför dyra provningar. I en förlängning bör även en ekonomisk bedömning kunna göras av de alternativa materialen, som en resurs bredvid de traditionella naturliga materialen.

Bakgrund

Kunskapen om metoder för att bedöma restprodukternas lämplighet, både tekniska, miljömässiga och ekonomiska, är inte komplett för flera användningsområden, bl a vid användning som vägunderbyggnad.

Vägverket beslutade därför att stötta en samordnad forskningsinsats från SGI, SP och VTI för att möjliggöra användning av restprodukter i denna tillämpning.

2. Beskrivning av provmaterialen

Provmaterialen som valdes var *rosteldad kolbottenaska* (hädanefter benämnd kolbottenaska), *sorterad och lagrad bottenaska från avfallsförbränning* (hädanefter benämnd slaggrus) och *krossad betong*. För att jämföra med *naturligt material* har ett sådant valts som referensmaterial.

Vid val av vilka restprodukter som skulle studeras i projektet har hänsyn tagits till att de valda restprodukterna ska ha olika egenskaper, att det finns erfarenhet från tidigare användning, att restprodukten genereras i tillräckligt stora volymer och på sådana platser att det gör det intressant att nyttiggöra dem. Vidare har material som bedömts som intressanta för vägunderbyggnad valts ut. Slutligen har hänsyn tagits till den prioritering av restprodukter som görs i en OECD-rapport.

Detaljer om provmaterialen:

- *Rosteldad kolbottenaska,* som kommer från Händelöverket i Norrköping. Materialet (1,6 ton) är provtaget från en askhög utomhus med aska av varierande ålder. Rostereldning är en av flera olika tekniker vid kolförbränning. Restprodukterna från rostereldning av kol utgörs till största delen av bottenaska.

- Det studerade *slaggruset* (ca 2,2 ton) kommer från GRAAB i Göteborg och har lagrats utomhus i mer än ett år, enligt rekommendationer från tidigare projekt. Materialet har också undersökts inom ramen för ett projekt i Renhållningsverksföreningens regi, i syfte att fastställa de miljömässiga egenskaperna hos slaggrus. Materialet sorterades 1996–09–17 och har sedan dess förvarats utomhus utan täckning.

- *Krossad betong* (ca 3 ton) levererades av SYSAV (Sydvästra Skånes Avfallsaktiebolag) i Malmö till AB Sydsten för krossning till ca 0–50 mm (motsvarande bärlagergrus) och därefter för vidare leverans till SP. Den krossade betongen är från samma leverantör som bidrar med material till både VTI och SGI inom ramen för ett annat projekt – ”Återvinning av mineraliska massor” – som drivs av SYSAV och finansieras av Boverket. Genom att använda samma betong har det varit projektets förhoppning att kunna utnyttja resultat från det parallellt pågående projektet och därmed undvika dubbelarbete. Betongen kommer från ett upplag på SYSAV:s område och består därför av en blandning av olika betongkvaliteter med olika ursprung.

- *Referensmaterialet* är ett naturmaterial, proportionerat av SWEROCK AB och motsvarar ungefär ett sandigt grus. Tyvärr blev inte kornstorlekskurvan helt harmonisk, vilket främst kan ha inverkat på provningen av stabiliteten. Detta diskuteras under respektive egenskap.

Materialens kornstorleksfördelning vid leverans redovisas i bilaga 4. De flesta materialens kornstorlek faller inom 0–31,5 mm. Större partiklar är bortsiktade.

Restprodukterna är valda utifrån egenskaper, erfarenhet från tidigare användning och att de genereras i tillräckligt stora volymer.

3. Diskussion och utvärdering

3.1 Egenskaper och metoder

Inom projektets ramar har, förutom vad som vanligtvis utförs för vägunderbyggnadsmaterial även ytterligare ett antal materialegenskaper verifierats. Detta har gjorts för att bättre karakterisera provmaterialen och därigenom öka förståelsen för materialens funktion och även utfallet vid andra provningar. Dessutom bidrar dessa provningar till att öka den allmänna kunskapen om materialen inför framtida jämförelser.

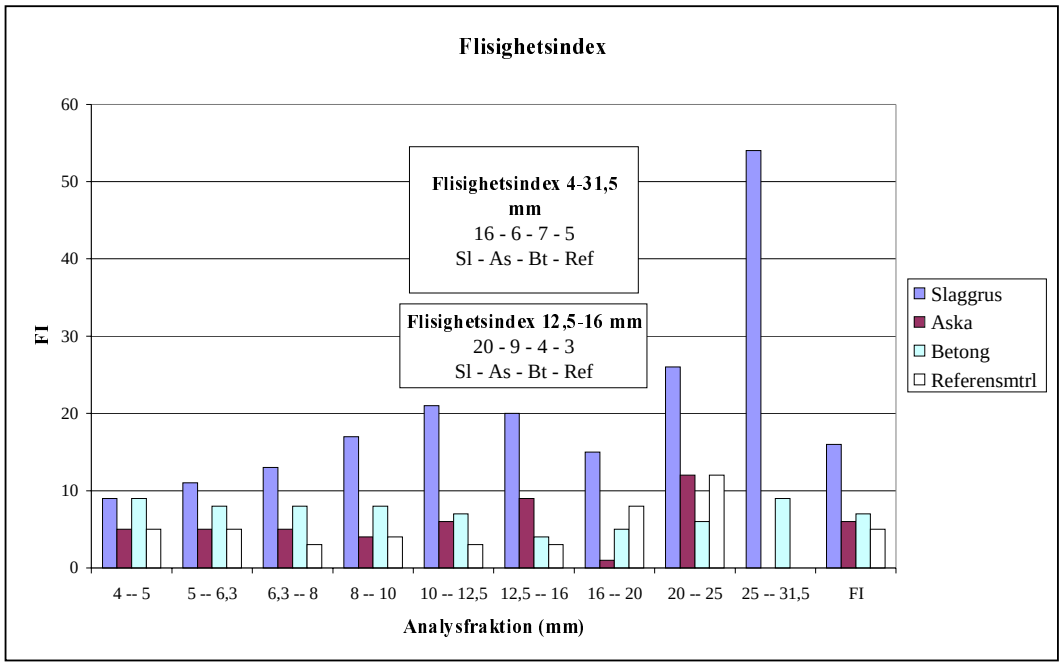
Geometriska egenskaper

Beträffande kornstorleksfördelning och kornform har tidigare nämnts deras betydelse för packningsegenskaperna och även egenskaper som permeabilitet. Kornformen har dessutom betydelse för provningen av andra egenskaper.

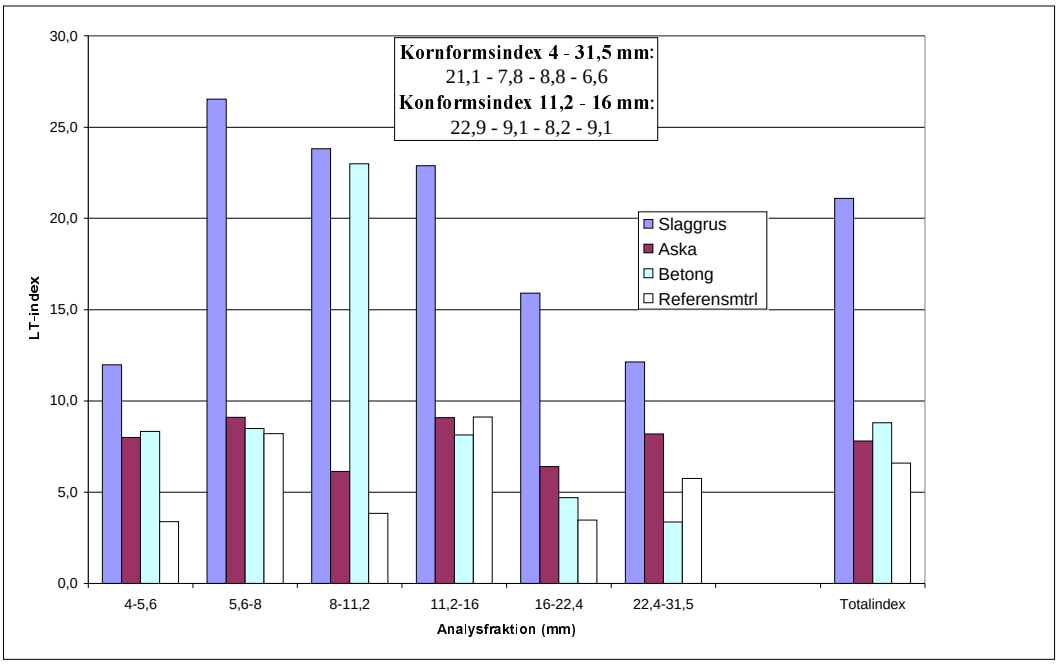
De vanligast använda provningsmetoder och standarder för att bestämma kornstorleksfördelningen säger inte så mycket om vilken tid som provet skall siktas. Det viktigaste är att provet är representativt och att det blir rensiktat. Av denna anledning har det blivit en form av praxis med en sikttid om ca 10 minuter. I tidigare projekt (Stenberg & Schouenborg, 1997) har det visat sig att man med denna sikttid riskerar att öka produktion av finare storleksfraktioner med uppåt 7 vikt-% vid siktning av krossad betong. Detta är naturligtvis av avgörande betydelse vid bedömning av olika material, både inför ett projekt och senare, i samband med utvärdering t ex av material som grävts ur en väg för kontroll av eventuella förändringar.

Likaså ändras resultatet från provning av mekaniska egenskaper, t ex sprödhetstalet ett antal enheter om man siktar analysprovet på ett traditionellt sätt efter att det utsatts för vikten i fallhammaren. Provningsresultatet blir därmed en blandning av nötning och sprödhet. Siktningen har i detta projekt beaktat tidigare resultat på så sätt att analysproven delats upp i mindre enheter som siktats kortare tid. Vid ”slutsiktningen” för provning av mekaniska egenskaper bör tvättsiktning användas.

Både kolbottenaskan och den krossade betongen har en relativt likartad kornform inom stora delar av sorteringen. Slaggruset, å andra sidan varierar betydligt mer och har kraftigt flisigt material i storleksfraktion 25–31,5 mm (se *figur 3.1*). För en bedömning av hela materialet kan det vara lämpligt att inte bara redovisa ett index som ett viktat värde för hela provet, utan även redovisa resultaten för de individuella storleksfraktionerna.



Figur 3.1. Delresultat från flisighetsmätning av samtliga storleksfraktioner i alla provmaterial.



Figur 3.2. Kornform hos samtliga storleksfraktioner hos alla provmaterial.

Som jämförelse redovisas i *figur 3.1*, nedan, flisighetsindex för hela provet samt flisighetstalet för fraktion 12,5–16 mm, vilken närmast ansluter till analysfraktion för flera europeiska mekaniska provningsmetoder (10–14 mm).

Bestämningen av provmaterialens längd-tjockleksförhållande 1:3 (LT 3) visar att slaggruset även skiljer ut sig som ett kraftigt stängligt material. *Figur 3.2* på samma förhållande, dvs att en enstaka storleksfraktion kan ha kraftigt avvikande kornform relativt materialet i sin helhet.

Resultaten från provning av geometriska egenskaper indikerar att man så långt möjligt bör prova starkt heterogena material som en enhet och inte dra långtgående slutsatser från provning av enstaka framsiktade analysfraktioner eftersom dessa kan variera kraftigt.

Fysikaliska egenskaper

Då provmaterialen i flera fall är ganska inhomogena (kolbottenaskan undantagen) förväntades stora skillnader i sprödhetstal mellan delproverna. De redovisade värdena faller dock inom den tolerans som anges i metoden.

Eftersom flera av de alternativa materialen är mer porösa än traditionellt använda naturmaterial så suger de även vatten under en längre tid än vad som föreskrivs i traditionella standarder. De traditionella metoderna för bestämning av densitet och vattenabsorption är därför inte alltid relevanta utan viss modifiering. Se vidare under ”Beständighet” i detta kapitel och *figur 3.4*.

I förslaget till europastandard för bestämning av vattenabsorption hos lättklinker (prEN 1097-6) föreslås att man bestämmer vattenabsorption på kort och lång sikt. En lämplig modifiering av den metoden kan vara att man bestämmer vattenabsorptionen vid 1 dygn på traditionellt sätt och kompletterar med vattenabsorption efter vakuumsugning alternativt kokning. Det senare för att bestämma den maximala vattenabsorptionen.

Fler fysikaliska egenskaper såsom de mekaniska diskuteras under rubriken beständighet, nedan, eftersom de ofta används för att utvärdera beständighet mot krossning och nötning.

Beständighet

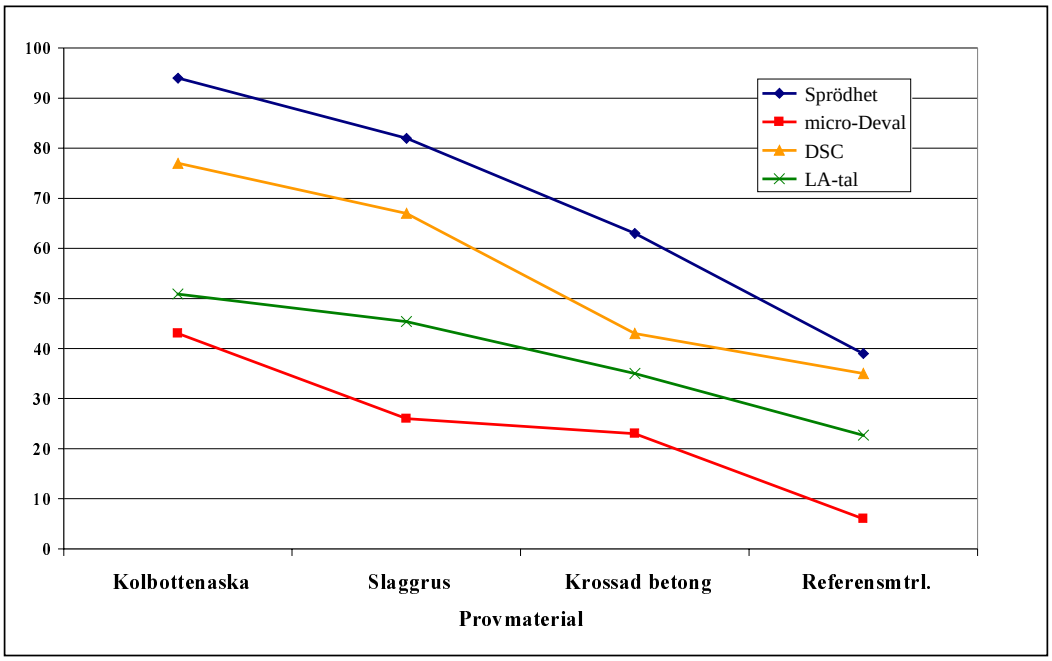
Mekanisk –
Sprödhet och nötningsbeständighet

Beständighet gentemot mekanisk nedbrytning som krossning och nötning har provats enligt en rad olika metoder, bl a för att om möjligt se om det finns någon metod som kan användas för enklare fortlöpande kontroll (egenkontroll).

I *figur 3.3* nedan kan man se att samtliga provningsmetoder rankar de provade materialen på samma sätt. Det är emellertid störst skillnad (i absoluta procent) mellan materialen vid provning av sprödhet med den svenska fallhammaren. Variationsvidden mellan de fyra materialen är 55 %–37 %–42 %–28 % enligt ordningen given i legenden i figuren nedan, dvs Sprödhet – m-D–DSC–LA-tal.

Det går inte att utan vidare att från dessa analyser rekommendera en metod framför den andra för alla ändamål. Den svenska fallham-

De traditionella metoderna för bestämning av densitet och vattenabsorption är inte alltid relevanta.



Figur 3.3 Resultat från provning av mekaniska egenskaper.

maren, Los Angelestestet och det holländska statiska kompressionstestet är metoder för att mäta sprödhet medan micro-Deval är för att bestämma nötningsmotstånd (se SP Rapporten i Svensk Bergs- & Brukstidning 1999 nr. 1), varför de inte är direkt korrelerbara med varandra. Vidare provas de enskilda partiklarna i trummorna medan materialet provas som en enhet i de svenska och holländska sprödhetstesterna. Ur den aspekten efterliknar de senare mest verkligheten och är sannolikt de som kan rekommenderas för eventuell egenkontroll. En utökad studie bör dock göras för att undersöka korrelationen mellan de mer komplicerade metoderna, t ex triaxialförsöken och de här föreslagna enklare metoderna innan en slutlig rekommendation kan göras.

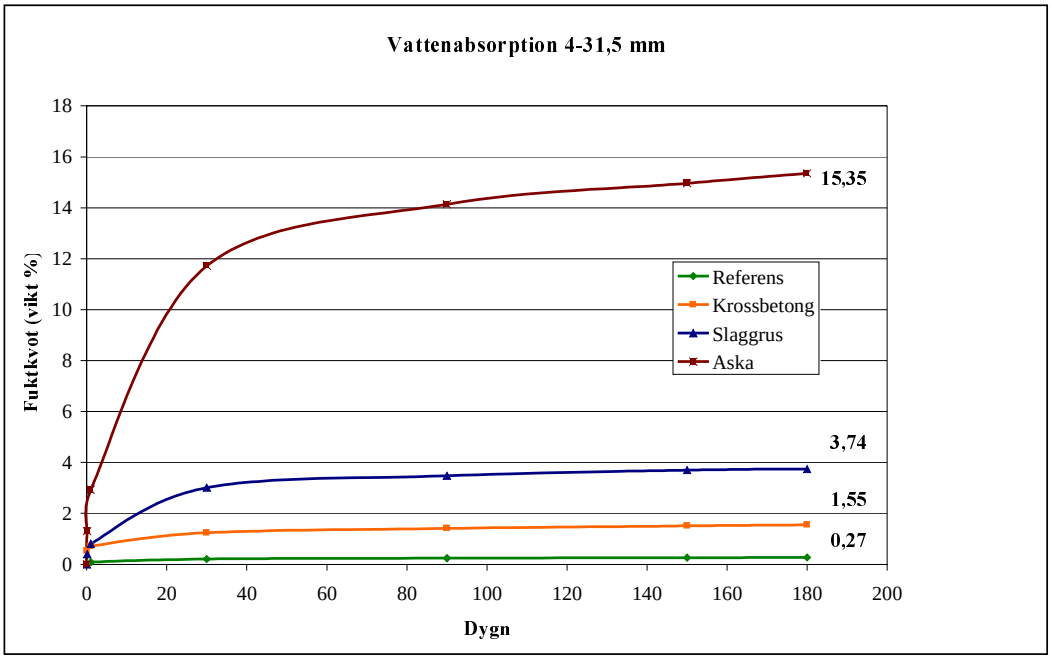
Termisk beständighet

För undersökningar av frostbeständighet hos naturliga material till väg-, betong- och järnvägsändamål, har man i Sverige, sedan länge, rekommenderat ett screeningtest i form av vattenabsorption. Ligger vattenabsorptionen över 1 viktprocent så går man vidare med ett frys-töväxlingsförsök med 1 % NaCl lösning. Den kommande europastandarden föreskriver dock, som första alternativ, frys-töväxling i rent vatten och saltlösning endast i vissa klimat. I detta projekt valdes att använda rent vatten då klimatet i en vägunderbyggnad inte kan betraktas som mycket aggressivt med upprepade frys-töcykler under vintern. Inte heller kan man argumentera för att vägsalt har någon större inverkan på materialet så långt ned i vägkroppen.

Riktmärket för naturliga material har tidigare varit maximalt 1 viktprocent vattenabsorption, vilket har fungerat bra för de vanligast använda bergarterna, med ett undantag, nämligen kalksten. Kalksten är en skiktad sedimentär bergart där vatten i vissa fall kan gå in mellan skikten eller i lerslag och frysa sönder stenen. Exemplet belyser att det inte alltid går att använda traditionella riktmärken för bedömning av frostbeständighet när det handlar om alternativa material.

En viktig faktor som eventuellt kan inverka på resultatet av frostprovningen i detta projektet är att provmaterialen inte haft möjlighet att suga vatten under tillräckligt lång tid före frys-töväxlingsförsöken. Vissa av proverna kan därmed ha haft flera ofyllda luftporer där vatten kunnat gå in och expandera under frysning utan att skada materialet. I *figur 3.4* redovisas tydligt hur de olika provmaterialen i vissa fall fortsätter att suga vatten under lång period. Detta kan påverka bedömning av beständighet samt även de provningstekniska principerna för provning av värmekonduktivitet och tjällyftning.

Beträffande värmekonduktivitetsprovning så har proverna fått suga vatten under närmare 1 vecka. Huvuddelen av vattnet i provmaterialet finns därmed inne i porerna, men även i viss utsträckning på partikelytorna.



Figur 3.4
Vattensugande förmåga under en längre period.
Observera att analysfraktionen här är 4–31,5 mm och inte direkt jämförbar med 0–31,5 mm, vilket är hela provmaterialet. Provning inkluderande finmaterialet tenderar att överskatta vattenabsorptionen, då den även inkluderar adsorberat vatten på partiklarnas ytor.

Packningsegenskaper

Packningsmetoder i laboratorium

Jämförelse mellan metoder

Optimal vattenkvot, dvs den vattenkvot som ger de bästa packningsegenskaperna och därigenom bärförmågan kan bestämmas med hjälp av lätt eller tung instampning. Maximal densitet bestäms i laboratorium för att ha som referensvärde för fältpackningen. Enligt svensk standard måste laboratoriepackningen då ske med tung instampning eller vibrobord.

- *Tung instampning* motsvarar ett packningsarbete av $2{,}5 \cdot 10^6$ Nm/m^3 jord, vilket är mer än vad som uppnås i fält och ca 5 ggr så mycket som lätt instampning ger. Tung instampning ger upphov till stor nedkrossning på porösa partiklar. Lätt instampning ger också en viss nedkrossning.
- *Vibrobordet* är skonsammare eftersom det packar med hjälp av vibrering, men kräver helt vattenmättat prov vilket leder till att optimal vattenkvot inte bestäms. Vibrobordet kan inte användas för bestämning av maximal densitet för material med högre finjordshalt än 10 % eftersom dessa inte är fridränerande och det därigenom inte är maxdensiteten som bestäms.

Vibrobordet den metod som mest liknar verkligheten och rekommenderas därför till grovkorniga material med mindre än 10 % finjord, t ex krossad betong med rätt kornstorleksfördelning.

Nedkrossning

För alla fyra materialen gjordes en kontrollsiktning efter instampningen. De tre alternativa materialen krossades ner mer eller mindre med både lätt och tung instampning, medan referensmaterialet var i stort sett opåverkat. Kurvor för enskilda material redovisas i bilaga 5.

Tung instampning gav naturligt nog mest nedkrossning. För slaggruset visade resultatet att den ursprungliga kurvan hade flyttats en till tio procentenheter uppåt och för kolbottenaskan två till 15 procentenheter uppåt, se bilaga 5. Den krossade betongen hade fått en kurva som låg mellan noll och sex procentenheter högre efter instampningen och referensmaterialet hade en kurva som skilde som mest tre procentenheter, men då åt andra hållet.

Vid lätt instampning höjdes slaggrusets kornstorleksfördelningskurva som mest fem procentenheter, kolbottenaskans tio procentenheter och betongens kurva sex procentenheter. Referensmaterialet påverkades obetydligt av den lätta instampningen.

Rekommenderad provningsmetod

Av utförda provningar kan följande slutsatser dras:

- För krossad rivningsbetong bör optimal vattenkvot bestämmas med tung instampning och maximal densitet genom inpackning på vibrobord.
- För slaggrus bör optimal vattenkvot och maximal densitet bestämmas med tung instampning.

• För kolbottenaska kan optimal vattenkvot bestämmas med lätt eller tung instampning och maximal densitet genom inpackning på vibrobord vid den vattenkvot som gett högst densitet vid instampningen.

En metod som inte använts i dessa försök , men som kan vara lämplig för nedkrossningsbenägna material, är den elektriska vibrationshammaren som beskrivs i prEN 00227411 part X.

Alla tre alternativa material kan jämföras med materialtyp 2.

Bärförmåga och stabilitet

Terrass

Bärförmåga och styvhet har undersökts med hjälp av dynamisk treaxialprovning för att ta reda på vilken terrassmaterialtyp materialen kan sägas motsvara vid överbyggnadsdimensionering.

Dynamisk treaxialprovning är en metod som provar hur ett material deformeras under trafikliknande laster. Istället för att enskilda partiklar utsätts för påfrestningar provas en provkropp av det sammansatta materialet (upp till en viss kornstorlek, t ex 32 eller 64 mm). Man kan därför påstå att provkroppens funktion provas, vilket gör metoden lämplig även för alternativa material. Provningsmetoden är sedan gammalt spridd ute i Europa för finkorniga material och nu även för grovkorniga material. En Europastandard är under utarbetande och ett ”Draft” från CEN/TC 227 finns.

Den metod som använts i detta projekt överensstämmer inte helt med förslaget i Europastandarden. VTI började med sina första försök långt tidigare och använder sig t ex av andra belastningar. Eftersom detta projekt bland annat skulle svara på frågan vilken materialtyp de nya materialen tillhörde ansågs det värdefullt att kunna jämföra med tidigare resultat. VTI har idag en databank med värden både för finkorniga och grovkorniga material, som kan användas för jämförelser. Det är dessa jämförelser som ligger till grund för bedömningarna nedan. Dessutom har spänningsberäkningar för några olika konstruktioner gjorts och använts för rekommendationen av lämplig nivå.

• *Styvhet:* Följande E-moduler kan anses rimliga vid de spänningsnivåer som förekommer på underbyggnads- och skyddslagernivå: 80 MPa för kolbottenaska med densiteten 1,1 t/m^3, 90 MPa för slaggrus från Göteborg med 90 % packningsgrad samt 210 MPa för krossad rivningsbetong (blandade husrester) med 97 % packningsgrad.

• *Bärförmåga:* Alla fyra undersökta material är stabila och ger acceptabla deformationer på ca 40 cm djup, dvs. rimliga skyddslagernivåer.

Slutsatsen blir att alla de tre alternativa materialen kan jämföras med minst materialtyp 2. Enligt VÄG 94 bedöms materialtyp 2 ha elasticitetsmoduler mellan 70 och 100 MPa i icke fruset tillstånd. Vidare krävs minst 54,5 cm överbyggnadstjocklek på materialtyp 2.

Observera att materialen inte provats i riktigt blött tillstånd. Det vore lämpligt att göra försök med varierande vattenkvot för att se hur stor förändringen blir vid hög och låg vattenmättnadsgrad. Detta förbättrar beräkningsunderlaget för dimensioneringen.

Vägbank

Materialens hållfasthet under dränerade förhållanden, dvs dess inre friktionsvinkel, har bestämts med direkt skjuvförsök. Vid dimensionering av en vägbank behövs bankmaterialets friktionsvinkel vid beräkning av bankens stabilitet och bärförmåga.

Enligt VV publ. 1994:15 ”Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper” skall inre friktionsvinkeln för friktionsjord bestämmas antingen genom laboratorieförsök, in situ provning eller enligt en tabell (3.3-1) vilken är baserad på sonderingsresultat i fält. Den metod som använts i detta projekt är en av de angivna laboratoriemetoderna.

Den metod som använts fungerar bra för de provade alternativa materialen och bedöms kunna användas för andra liknande material. Dock har endast material mindre än 11,2 mm (av en maximal kornstorlek på 32 mm) kunnat provas då utrustningens diameter varit begränsad till 100 mm. Detta kan innebära att värdet på friktionsvinkeln skiljer sig något i verkligheten. Utrustning med större diameter (500 mm) finns och kan användas för material med större kornstorlek. Tidigare försök med en apparat för direkt skjuvning har visat att, den utvärdering av skjuvförsöket som normalt görs underskattar den mobiliserade friktionsvinkeln, eftersom det i de flesta fall inte är horisontalplanet som är mest kritiskt.

Vid en jämförelse med naturliga material har samtliga provade alternativa material en friktionsvinkel jämförbar med fast lagrad sand eller grus. På basis av detta kan de jämföras med naturliga material av materialtyp 2.

Sättning/kompression

Materialens kompressionsegenskaper, sättningsmodul, har bestämts genom kompressometerförsök med stegvis pålastning. Kompressionsegenskaperna behövs för beräkning av vägbankens långtidsdeformation (sättning).

Enligt VV Publ. 1994:15 ”Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper” skall sättningsmodulen i naturligt lagrad friktionsjord bestämmas med in situ metoder eller enligt en tabell (3.4-1) vilken är baserad på sonderingsresultat i fält. Någon metod för bestämning av sättningsmodulen i laboratorium anges inte. Det finns inte heller någon direkt koppling mellan resultat erhållna med in situ metoder eller sonderingar i fält och utvärderade moduler i laboratorium. En jämförelse av vid laboratorieförsöken erhållna kompressionsegenskaper och sättningsmoduler, med moduler hos naturligt lagrad friktionsjord kan därför inte göras.

Vid utförande av kompressionsförsök med den använda utrustningen packas materialet för hand i utrustningen. Det är således svårt att uppnå den packningsgrad som erhålls vid packning i fält eller den lagringstäthet som finns hos naturligt lagrade jordar. På basis av utförda försök bedöms metoden kunna användas för en relativ bestämning av materialens kompressionsegenskaper. En jämförelse av olika provade material kan göras genom att jämföra de erhållna last-deformationskurvorna och de därur utvärderade sättningsmodulerna. En bedömning av erhållen sättningsmodul vid packning i fält kan dock inte göras utifrån laboratorieresultaten. En nackdel är att endast material mindre än 11,2 mm kan provas i utrustningen och för material med stor andel grövre material kan det vara svårt att bedöma vilken inverkan detta har på kompressionsegenskaperna. Utrustning med större diameter (500 mm) finns och kan användas för material med större kornstorlek.

I verkligheten, vid byggandet av en vägbank, är det främst sättningarnas tidsförlopp som är av betydelse. För täta material med låg permeabilitet kan sättningsförloppet ta lång tid (månader, år). Utbildas huvuddelen av sättningarna under byggtiden och materialet har en relativt bra modul, är det absoluta värdet på modulen och sättningarnas storlek av mindre betydelse. Samtliga provade material har en hög permeabilitet och eventuella sättningar kommer att utbildas snabbt.

Jämförelser har gjorts av hur mycket materialet krossas under försöket, vilket motsvarar krossning under statisk last. Härur görs bedömningen att, när de alternativa materialen väl packats och vägen färdigställts, kommer knappast någon ytterligare krossning att ske.

Inom ramen för ett Nordtestprojekt med deltagare från Sverige, Norge och Danmark har metoder för bestämning av hållfasthets- och deformationsegenskaper hos lättballast och alternativa material utvärderats. Den här använda metoden omfattar en omarbetning av kompressibilitetsmetoden så att belastning och deformation mäts kontinuerligt vilket medger att såväl hållfasthet vid en viss deformation som deformation vid en viss last kan utläsas. Vidare kan tydliga indikationer på materialets E-modul uppskattas. Kompressibilitetsmetoden är avsedd att användas som ett instrument vid fortlöpande kontroll av variationen i egenskap hos en produkt. Denna metod har också testats på andra provmaterial som testas inom ramen för ett Nordtestprojekt, t ex lättballast. Resultaten tyder på att det är fullt möjligt att tillämpa denna metod på alternativa material. En lämplig modifiering vore dock att utöka antalet mätdata i det nedre belastningsområdet (upp till ca 300 kPa) som är mer relevant för vägunderbyggnad.

En direkt jämförelse mellan de två här använda metoderna för att se på alternativa materials kompressionsegenskaper kan inte göras då de skiljer sig på ett antal punkter. Kompressibilitetsmetoden har använts på torrt material och med hela sorteringen till skillnad från kompressometerförsöken där fraktion 0–11,2 mm har använts och provats i vattenmättat tillstånd. Den inledande packningen och provkammarens storlek skiljer sig också. Kompressometerförsöken utförs dessutom under en längre tid med konstanthållning av varje laststeg, vilket innebär att krypdeformationer hinner utbildas. Beroende på hur pass väl den inledande packningen är utförd samt hur väl materialen låter sig packas så har detta en större eller mindre inverkan på slutresultatet. Generellt kan man säga att ju bättre packat material desto mindre omlagring sker.

Materialens kompressionsegenskaper har bestämts genom kompressometerförsök med stegvis pålastning.

Tjälrörelse och värmekonduktivitet

Materialens permeabilitet har bestämts med rörpermeameter enligt Nordtest rapport nr 254. Permeabiliteten har betydelse bl a för den kemiska beständigheten (utlakning), tjälrörelse/tjälfarlighet och, vid täta material, även för sättningarnas tidsförlopp.

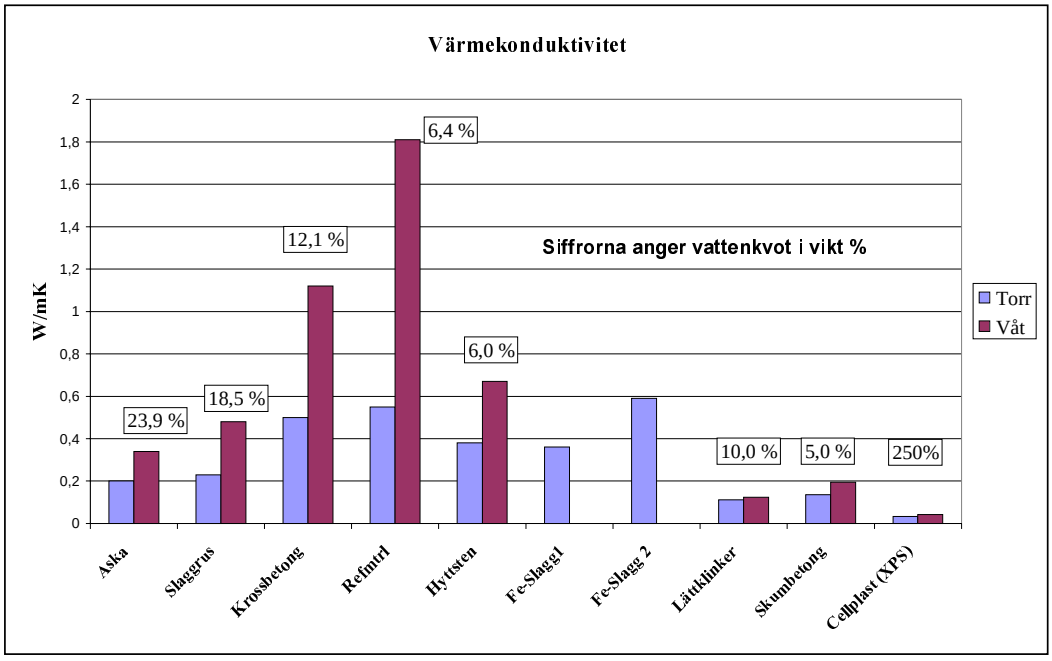
Den använda metoden fungerar bra för de provade alternativa materialen och bedöms kunna användas för andra liknande material. Ett materials permeabilitet är starkt beroende av dess kornstorleksfördelning. En nedkrossning av materialet t ex i samband med byggtrafik innebär att materialens permeabilitet minskar. De permeabiliteter som erhållits gäller därför enbart de provade materialen vid aktuell kornstorleksfördelning. De provade materialen har permeabiliteter vilka närmast kan jämföras med naturliga material av materialtyp 2 eller 3.

Frystest för bestämning av tjällyftningsparametrar har gjorts för att bestämma vilken tjälfarlighetsklass materialen tillhör och vilken tjällyftning som kan förväntas i olika lastfall. Resultatet blev att samtliga material kan anses som icke tjällyftande vid den kornstorleksfördelning som provats.

Eftersom kornstorleksfördelning har stor betydelse för kapillariteten och därigenom lyftningsförmågan är resultatet inte förvånande. Det intressanta är om kornstorleks-fördelningen bibehålls under vägens livstid. Eftersom materialen föreslås läggas som underbyggnad finns ingen risk för nedkrossning på grund av trafiklast efter vägens färdigställande. Däremot finns denna risk under byggnadstiden, speciellt för kolbottenaska och slaggrus. En nedkrossning på grund av byggtrafik ändrar materialens kornstorleksfördelning till det sämre och kan då innebära risk för framtida tjällyftningar.

Beträffande värmekonduktivitetsmätningarna så redovisas provmaterialens värden i jämförelse med andra material (från tidigare provningar vid SP). Egenskapen har huvudsakligen betydelse om materialens eventuella isolerande förmåga kan utnyttjas. De här redovisade värdena kan användas för dimensionering av lagertjocklekar förutsatt att motsvarande densiteter (indirekt packning) är aktuella. Fortsatta undersökningar av packningsgradens inverkan på värmekonduktiviteten är därför att rekommendera. Erforderliga siffror på värmemotståndet hos terassisolering beror på klimatzon och återfinns i VÄG 94 kapitel 2.7.3. De mest isolerande provmaterialen är aska och slaggrus som dock har ca 5–10 ggr högre värmeledningsförmåga än cellplast.

Då materialet suger vatten kan det uppkomma en ojämn fukthaltsfördelning i provet, vilket medför att värmekonduktiviteten inte helt förändras enligt uttryck framtagna vid stationära tillstånd. Värmekonduktiviteten blir lägre vid en ojämnare fukthaltsfördelning. Uttryckes värmekonduktiviteten (λ) som $\lambda = \lambda_{torr} + \Delta\lambda_{fukt}$, så blir tilläggstermen $\Delta\lambda_{fukt}$ en funktion av fukthalten. Korrektionstermen på grund av fukt kommer att följa kurvornas principiella utseende i *figur 3.5* med nästan horisontell slutfas, dvs ungefär konstant värmekondukti-



Figur 3.5 Värmekonduktivitet hos provmaterialen samt ytterligare material för jämförelse.

vitet. Man bör därför kunna interpolera fram det beräknade värdet, då vattenkvoten i det aktuella materialet är känt.

Miljömässiga egenskaper

Att i laboratorium undersöka lämpliga metoder för att bestämma materials miljömässiga egenskaper har inte ingått i föreliggande projekt. Arbete med att utveckla metoder för miljömässig karakterisering av avfall och restprodukter pågår både inom Nordtest och CEN. Rekommendationer kring hur alternativa material för vägunderbyggnad ska undersökas med avseende på miljöegenskaper baserar sig därför huvudsakligen på vad som skrivits i andra sammanhang (Fällman & Hartlén, 1994, RVF, 1998):

Efter en inledande karakterisering av materialen rekommenderas en enklare kvalitetskontroll som skulle kunna omfatta:

- kornstorleksfördelning
- glödgningsförlust
- tillgänglighetstest
- tvåstegs kontrolltest (”CEN-lakning”) vid L/S 2 och L/S 10

I lakförsöken analyseras nyckelparametrar. Dessa principer följer också i stort de rekommendationer som Naturvårdsverket presenterar i sitt förslag till allmänna råd för deponering (Naturvårdsverket, 1996).

Det saknas svenska kriterier för bedömning av restprodukters miljöegenskaper och vad som kan anses som acceptabel miljöpåverkan (dvs rikt- eller gränsvärden och ev. regler för utformning av anläggning där restprodukter används). Det är av största vikt att sådana kriterier tas fram.

Det saknas svenska kriterier för bedömning av restprodukters miljöegenskaper.

4. Förslag till fortsatt arbete

Det är viktigt att i ett projekt prova materialen under fältmässiga förhållanden.

Provväg - förstudie

Resultaten från projektet, vars huvudsakliga syfte har varit att undersöka olika provningsmetoders tillämpbarhet på alternativa material, visar på vikten av att i ett fortsättningsprojekt prova sådana material under fältmässiga förhållanden. Syftet med ett provvägsprojekt skulle vara att studera hur materialen uppträder i en vägunderbyggnad och

- ge förslag på lämpliga utförandekrav
- korrelera laboratorieundersökningar mot fältmätningar
- studera såväl de tekniska som miljömässiga materialegenskapernas förändring i tiden

Som inledning till ett sådant provvägsprojekt föreslås en förstudie. Förstudien syftar till att genom kontakt med miljömyndigheter, Vägverksregioner samt restproduktproducenter hitta en lämplig plats för en provväg samt att göra en noggrann projektplanering med kostnadsuppskattning för det större uppföljningsprojektet.

Miljömässiga kriterier

Riktlinjer saknas för hur och när restprodukter kan användas som material till vägunderbyggnad – Hur ska vägen utformas? Vilka mängder får användas? Vilka restprodukter kan accepteras? Vilken markanvändning i omgivningen kan tillåtas? Det är av största vikt att sådana riktlinjer tas fram.

Laboratorieundersökning

Tidigare erfarenheter, och även detta projekt, visar på en tydlig koppling mellan vattenkvot och provningsresultat. Det gäller t ex för värmekonduktivitet, styvhet och stabilitet. I detta projekt har materialen inte provats i riktigt blött tillstånd. Det vore därför lämpligt att göra fortsatta försök med *varierande vattenkvot*, för att se hur stor förändringen blir vid hög och låg vattenmättnadsgrad. Det skulle förbättra dimensioneringsunderlaget avsevärt. För att få fram relevanta vattenkvoter för provningarna bör naturliga vattenkvotsvariationer i vägunderbyggnader undersökas.

Vid vissa provningar i detta projekt, t ex skjuvförsöken och kompressionsförsöken, har tillgänglig utrustning begränsat den maximala kornstorleken som kunnat provas. För att undersöka vilken inverkan *maximal kornstorlek* har på provningsresultaten bör jämförande försök göras i en större utrustning, när detta är möjligt.

En modifierad metod för att bestämma *vattenabsorptionen* behöver tas fram. Vidare bör *packningens* betydelse för värmekonduktiviteten utvärderas.

Kvalitetssäkring

Kvalitetssäkring av materialen är mycket viktig. Efter en inledande grundläggande karakterisering av materialen rekommenderas en enklare kontinuerlig kvalitetskontroll. Därför behöver mer avancerade metoder som treaxialprovning korreleras med enklare metoder, vilka kan användas av producenterna.

Bilaga 1 – Laboratorieprovningar

B1.1 Provberedning

Inledande provberedning och utskick av material till respektive laboratorium har utförts av SP med hjälp av roterande provneddelare och s k ”fraktionerad skyffling” (se SS-EN 932-1). Denna neddelningsmetodik valdes för att samtliga laboratorieprover skulle få så lika egenskaper som möjligt och därigenom öka möjligheterna att jämföra resultat från olika provningar.

B1.2 Geometriska och fysikaliska egenskaper

Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelningen hos provmaterialen har bestämts genom skonsam siktning (flera delprov och kort sikttid) enligt utfallet i tidigare Nordtestprojekt (SP Rapport 1997:08). Vid siktning på motsvarande sätt som för traditionella material, naturgrus, bergkross o dylikt tenderar flera alternativa material att nötas och rundas med en icke representativt hög halt finmaterial som följd. Speciellt kolbottenaska är mycket svårhanterlig och tenderar att krossas och nötas kraftigt i samband med de flesta typer av hantering.

Korndensitet enligt FAS Metod 208

Provningen utfördes för att få ett ungefärligt värde på densiteten inför sprödhetsprovningen. Dubbelprov utfördes inte förutom på referensmaterialet. De alternativa materialen suger kontinuerligt vatten, varför korndensiteten inte kunde bestämmas exakt.

Bestämning av korndensiteten enligt SS 02 71 15, utförs i princip på samma sätt som enligt FAS Metod 208. Metoden är avsedd för grovkorning jord. Vid material med hög porositet skall vattnet vid volymbestämningen bytas ut mot en vätska som inte tränger in i partiklarnas hålrum, t ex silikonolja med hög viskositet. Om det fungerar för de alternativa materialen är okänt, då det inte provats i detta projekt.

Korndensitet enligt SP Metod 758

Denna provning används vid bestämning av korndensitet på lättballast. Då några av de alternativa materialen liknar lättballast undersöktes huruvida denna metod kunde vara lämplig vid bestämning av korndensitet. Provningen utfördes också för att få ett jämförande värde med FAS-metoden.

Även här kan materialen suga vatten och metoden ger inget exakt värde på korndensitet. Materialen är inte heller så lätta som lättballast och alla korn är inte så rörliga, vilket medför att luftbubblor på kornens yta inte drivs bort effektivt.

Vattensugning

På grund av komplikationer noterade vid traditionell provning av densitet och vattenabsorptionen har den senare även studerats under längre tid (180 dygn). Den traditionella metoden för att bestämma vattenabsorption pågår endast ca 1 dygn. Samtliga alternativa material fortsätter att suga vatten efter detta.

Ju mindre storleksfraktion desto snabbare vattenmättas materialet. Av denna anledning så siktades 0–4 mm fraktionen bort och analysfraktionen 4–31,5 mm placerades i semipermeabla påsar som vattenlagrades. Detta förklarar skillnaden i resultat mellan provning av 0–31,5 mm respektive 4–31,5 mm. Med definierade intervall vägdes påsarna med innehåll och vattenabsorptionen bestämdes.

Flisighetsindex enligt SS-EN 933-3

Den traditionella metoden för att bestämma flisigheten är FAS Metod 209-94, som ger ett uttryck för förhållandet mellan stenpartiklarnas medelbredd och medeltjocklek (= vidden hos den minsta spalt som kornet kan passera). Egenskapen bestäms normalt på en, ur sorteringen, framsiktad analysfraktion, t ex 8–11,2 mm eller 11,2–16 mm.

Flisighet enligt europastandard (EN 933-3) mäts däremot på hela materialet och det index som redovisas tar hänsyn till andelen material i respektive storleksfraktion. Det ger därmed ett representativt värde för hela materialet. EN 933-3 har därför använts i projektet. Det ger också en möjlighet att bättre bedöma variationer inom materialet.

Kornformsindex (LT-3) enligt EN 933-4

Kornformsindex eller LT-3 som tidigare använts i Sverige (enligt FAS Metod 244) beskriver förhållandet mellan partiklarnas längd och tjocklek. Tjocklek är det minsta mått mellan två planparallella ytor som man kan omsluta partiklarna med.

Här utvärderas hur stor andel av materialet (vikt %) som har ett längd/tjockleksförhållande större än 3. Liksom det nya flisighetsindex så tar förslaget till kommande europastandard för LT-index (prEN 933-4) hänsyn till hela materialet och inte en framsiktad analysfraktion (enligt FAS Metod 244).

Resultat

Resultat – se *tabell B1.1.*

Korndensitetsbestämningarna är inte särskilt relevanta för de alternativa materialen

B1.3 Beständighet: mekanisk och termisk

Sprödhet enligt FAS Metod 210

Referensmaterialet provades helt enligt standard.

Vid provberedning siktades de alternativa materialen maskinellt i 5 minuter. Efter den provade fraktionen rensiktats kvarterades materialen ned för hand då det annars fanns risk att de skulle slås sönder i neddelningsapparaten.

Korndensitetsbestämningarna är inte särskilt relevanta för de alternativa materialen, eftersom de i flera fall är lätta och porösa. Flera provningsmetoder föreskriver proportionering av analysprovet med hänsyn tagen till korndensiteten. I projektet har det befunnits mer relevant att använda volymen för proportionering av analysproverna. Som måttstock användes volymen hos referensmaterialet. Cirka 350 ml material placerades i cylindern för sprödhetsbestämning.

Efter de föreskrivna 20 slagen siktades proverna på 11,2 mm, 8 mm, 5,6 mm, 4 mm och 2 mm maskvidd i 5 minuter.

Alla de alternativa materialen packade sig mer än vanlig ballast och särskilt kolbottenaska var mycket svår att få ur cylindern. På grund av detta hanteringsproblem kan det redovisade sprödhetstalet vara något sämre än verkligt.

Tabell B1.1. Geometriska och fysikaliska egenskaper.

Egenskap	Kolbottenaska	Slaggrus	Krossad betong	Referensmtrl.
Kornstorleksfördelning	Se bilaga 4	Se bilaga 4	Se bilaga 4	Se bilaga 4
Korndensitet, FAS (t/m^3)	1,55	2,50	2,58	2,66
Korndensitet, SP (t/m^3)	1,77	2,59	2,82	–
Vattenabsorption 1) FAS (vikt %)	10,1	5,6	5,1	0,4
Vattensugning 2) 1 dygn (vikt %)	2,9	0,8	0,7	0,1
Vattensugning 2) 180 dygn (vikt %)	15,4	3,7	1,6	0,3
Flisighetsindex	6	16	7	5
Kornformsindex	8	21	8	7

1) Provat på 0–31,5 mm.
2) Provat på 4–31,5 mm.

Sprödhet enligt EN 1097-2 (Los Angelestal)

Los Angelestalet, är, liksom sprödhetstalet, ett uttryck för stenmaterialets hållfasthet vid slagpåkänning. Analyserna är utförda enligt förslag till europastandard prEN 1097-2 . Två analysprov om 5 kg vardera, med storleksfraktion 10–14 mm, siktas fram för att rotera i en ståltrumma med diametern 710 ± 3 mm tillsammans med 11 stålkulor med diameter mellan 45 och 49 mm. I trumman finns en hylla monterad, vilken lyfter stålkulorna och provmaterialet som sedan faller ned och utsätts för en fragmentering främst under inverkan av stålkulorna. Förhållandet i storlek mellan stålkulorna och stenmaterialet gör att det i huvudsak är frågan om nedkrossning och inte nötning. Utvärdering sker genom att mäta andelen krossat material som passerar en sikt med maskvidden 1,6 mm.

Sprödhet enligt holländskt statiskt kompressionstest (DSC)

Testet är den holländska motsvarigheten till Los Angelestestet och vårt sprödhetstal, dvs ett uttryck för hållfasthet.

Analysfraktionen är 10–14 mm. Drygt ett halvt kilo provmaterial används för varje delprov (totalt 3 delprov per material).

En stålcylinder med diametern 112,8 mm fylls och skakas kraftigt för hand i horisontella rörelser, på en bordsskiva, varefter en vikt läggs på och lasten på 200 kN ökas upp under 60 s och hålls kvar i ytterligare 30 s för att därefter släppas. Provmaterialet siktas på 5 mm för att kontrollera nedkrossningsgraden. I projektet användes även 1,6 mm sikt för att se på eventuellt samband med Los Angelestalet där utvärdering också sker med hjälp av denna maskvidd.

Nötningsmotstånd enligt EN 1097-1 (micro-Deval)

Micro-Deval är en metod för att mäta stenmaterials motståndsförmåga mot nötning.

Analyserna är utförda enligt förslag till europastandard prEN 1097-1. Två prov stenmaterial om 500 g vardera, med storlek 10–14 mm, utsätts för nötning i en rostfri trumma med diameter 200 ± 1 mm tillsammans med rostfria stålkulor med diametern 10 ± 0,5 mm. Trumman är slät invändigt. Utvärdering sker genom vägning av material större än 1,6 mm efter nötningen, dvs bestämning av hur mycket analysprovet har minskat i vikt.

Frostbeständighet enligt prEN 1367-1

Materialens frostbeständighet har utvärderats i enlighet med kommande europastandard prEN 1367-1. Principen är att det vattenmättade provmaterialet (11,2–16 mm) tio gånger, utsätts för frysning med påföljande upptining i avjoniserat vatten. Temperaturerna är + 20 och –17,5 ºC. För extrema klimat kan saltblandat vatten användas vilket inte ansetts som relevant i projektet.

Utvärderingen sker, för den här använda analysfraktionen, genom att man kontrollerar hur stor andel av det ursprungliga provet som passerar en sikt med maskvidd 5,6 mm. Även andra storleksfraktioner än 11,2–16 mm kan provas och då ändras sikten för utvärdering.

Resultat

Resultaten (se *tabell B1.2*) diskuteras i ”Diskussion och utvärdering”.

Tabell B1.2. Beständighet: mekanisk och termisk

Egenskap	Kolbottenaska	Slaggrus	Krossad betong	Referensmtrl.
Sprödhet, FAS	94	82	63	39
LA-tal	50,9	45,4	35,0	22,7
DSC 1)	77 / 47	67 / 37	43 / 22	35 / 15
micro-Deval	43	26	23	6
Sönderfall 2) (vikt %)	1,4	3,9	8,2	0,1

1) Resultat på 5 mm respektive 1,6 mm maskvidd
2) Frys-töväxling i avjoniserat vatten

B1.4 Packningsegenskaper

Optimal vattenkvot och maximal densitet

Optimal vattenkvot, den vattenkvot som ger den tätaste packningen (högsta densiteten) och därigenom bästa stabiliteten, kan bestämmas i laboratorium med hjälp av lätt eller tung instampning. Maximal densitet bestäms i laboratorium för att ha som referensvärde för fältpackningen. Enligt svensk standard måste laboratoriepackningen då ske med tung instampning eller vibrobord.

I detta projekt användes inledningsvis tung instampning och vibrobord för att studera materialens packningsegenskaper. Sedan kompletterades även med lätt instampning.

Tung instampning

Tung instampning är en svensk standardiserad metod (VVMB 36:1977 och SS 027109) som motsvarar den internationellt använda ”modifierad proctor”. Instampningar vid några olika vattenkvoter resulterar i en packningskurva för varje material. Ur dessa kan maximal densitet och motsvarande vattenkvot avläsas.

Fraktionen 0–20 mm delas ned i 2,5–3,0 kg prov. Vatten tillsätts provet och blandas in noggrant. Det färdigblandade provet instampas i fem lager i en stålcylinder med hjälp av en fallvikt. Skrymdensiteten erhålls genom att dividera provets torrvikt med dess volym. Genom att variera vattenkvoten i proven erhålls olika skrymdensiteter och maximal skrymdensitet kan bestämmas. Vid tung instampning väger fallvikten 4,5 kg och fallhöjden är 450 mm, vilket ger ett packningsarbete som motsvarar 2,5 MNm/m^3 jord.

I normalfallet siktas fraktioner > 20 mm bort från det material som ska provas och korrigering för eventuellt innehåll av material 20–60 mm görs genom att ersätta med motsvarande viktsandel material 5,6–20 mm. I detta projekt har allt material upp till 32 mm stampats in och en större cylinder än vanligt (cylindern för CBR-provning) har använts.

Lätt instampning

Lätt laboratoriestampning enligt svensk standard SS 02 71 09 motsvarar den internationellt använda ”standard proctor”. Provningen går till som vid tung instampning med undantag av att jorden fylls på i tre lager i stället för fem samt att använd packningsenergi är mindre. Fallvikten väger 2,5 kg och fallhöjden är 300 mm, vilket ger ett packningsarbete som motsvarar 0,55 MNm/m^3 jord. Vid dessa försök har fraktioner upp till 20 mm provats och standardcylinder använts.

Vibrobord

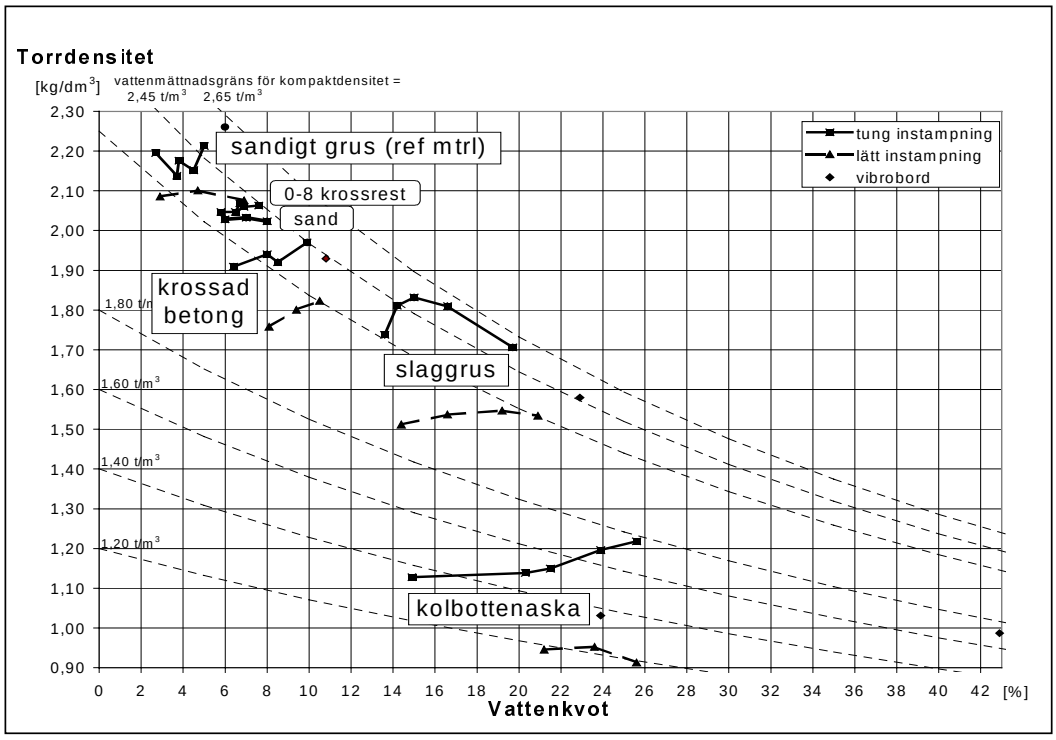
Maximal torrdensitet för ett visst kohesionslöst, fridränerande material bestäms genom att hälla vattenmättat material i en provcylinder, placera en överlast (statisk last) på provets yta och därefter vertikalt vibrera provcylindern, provet och överlasten. Den maximala torrdensiteten beräknas genom att dividera det packade provets torra massa med dess volym.

Två alternativa provcylindrar kan användas beroende på maximal partikelstorlek. I detta projekt användes den provcylinder som har volymen 14 200 cm^3 eftersom den tillåter provning av material upp till 32 mm.

Resultat

Packningskurvorna för samtliga material redovisas i *figur B1.1*. Där är packningsresultat från de tre använda metoderna inlagda. För jämförelse har packningskurvor från tung instampning för två naturmaterial, en sand och ett 0–8 material, ritats in.

I *tabell B1.3* har resultaten från samtliga packningsförsök sammanställts. Kornstorleksfördelningen för de fyra undersökta materialen visas i *figur B1.2*.



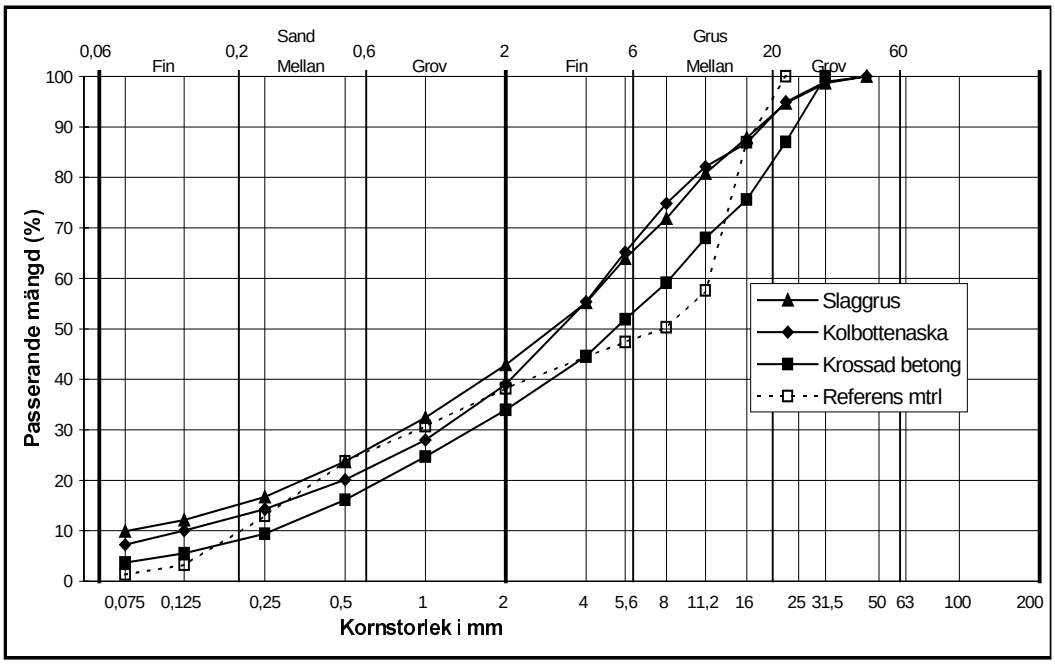
Figur B1.1 Packningskurvor för undersökta material samt två naturmaterial.

Tabell B1.3 Packningsegenskaper för studerade material.

Egenskap	Kolbottenaska	Slaggrus	Krossad betong 0-32 mm	Referensmtrl.
Naturlig vattenkvot, (%)	22,1	17,3	8,6	3,1
Optimal vattenkvot, lätt instampning, (%)	23,6	19,2	10,5	4,7
Max torrdensitet, lätt instampning, (t/m^3)	0,95	1,55	1,82	2,10
Optimal vattenkvot, tung instampning, (%)	23,0	15,0	9,9	5,0
Max torrdensitet, tung instampning, (t/m^3)	1,18	1,83	1,97	2,21
Max torrdensitet, vibrobord, (t/m^3)	1,03 med optimal vattenkvot	Ej fridränerande	1,93	2,26

Kommentarer: Med naturlig vattenkvot menas den vattenkvot materialet hade vid leverans till laboratoriet. Den krossade betongen skalades ned genom att material större än 32 mm siktades bort.

Kornstorleksfördelningen för de fyra undersökta materialen visas i figur B1.2.



Figur B1.2 Kornstorleksfördelning för undersökta material.

Slaggruset och kolbottenaskan behandlades lite annorlunda än betongen och referensmaterialet.

Beslut om provningsparametrar med ledning av packningsförsöken

Packningsförsöken förlades tidigt i projektet för att andra provningar skulle kunna dra nytta av resultaten. Det är exempelvis skjuvförsök, dynamisk treaxialprovning och bestämning av värmeledningstal som bör göras vid olika packningsgrad eller densitet.

För varje material valdes två olika densiteter som skulle vara representativa för vad som går att uppnå i fält med respektive material. De två densiteterna skulle motsvara ”löst” och ”hårt” packat tillstånd. Här togs hjälp av tidigare dokumenterade försök med slaggrus och kolbottenaska samt erfarenhetsvärden från packning av naturmaterial. De valda densiteterna relaterades till den maximala, dvs packningsgraden angavs.

Val av maximal densitet

Från början var tanken att maximal densitet skulle bestämmas med hjälp av vibrobord för samtliga material. Tidigare erfarenheter visade nämligen att kolbottenaska och i någon mån även slaggrus lätt krossas sönder vid vanliga, slående packningsmetoder. Vibrering är en skonsammare metod. Emellertid var inte vibrobordet praktiskt användbart för slaggruset och kolbottenaskan, eftersom metoden kräver att materialet är helt vattenmättat och dessa båda material inte är fridränerande. Om inte materialet är fridränerande byggs ett porvattentryck upp vid vibreringen, vilket hindrar tätare packning och de uppnådda densiteterna blir inte sanna. Gränsen för fridränering går ungefär vid 10 % finjordshalt.

Därför behandlades slaggruset och kolbottenaskan lite annorlunda än betongen och referensmaterialet. För slaggruset valdes den maximala densitet som bestämts i samband med bestämningen av optimal vattenkvot. Denna densitet var högre än den som bestämdes på vibrobordet. En del av denna densitetsökning beror säkert på nedkrossning vid instampningen.

För kolbottenaskan valdes en kompromiss. När optimal vattenkvot bestämts genom tung instampning gjordes en invibrering på vibrobordet vid denna vattenkvot och det resulterande densitetsvärdet användes som maximal densitet.

Erfarenhetsvärden för densitet

Enligt tidigare försök på kolbottenaska uppnår man densiteterna 1,1 respektive 0,95 t/m^3 i hårt och löst packat tillstånd i fält. Löst ifyllt tillstånd motsvarar densiteten ca 0,8 t/m^3.

Gamla fältförsök på slaggrus har visat att det med rimlig packningsinsats går att uppnå ca 90–93 % packningsgrad (av tung instampning). 80–95 % packningsgrad är vanligt förekommande vid mätning på terrasser av naturmaterial. Det lägre värdet är representativt för terrasser av ler- och silt, medan det högre brukar uppnås av rena friktionsmaterial.

Vattenkvot
För slaggruset och referensmaterialet valdes den ”naturliga” vattenkvoten (w_N). Kolbottenaskan provades vid samma vattenkvot som slaggruset.

Riktvärden för övriga provningar
Resultaten från de inledande packningsförsöken ledde till att densiteterna och vattenkvoterna i *tabell B1.4* eftersträvades vid provning av andra densitetsberoende egenskaper. För den krossade betongen kunde inte parametrarna väljas fritt eftersom den provades inom ett annat projekt.

B1.5 Bärförmåga och stabilitet

Direkt skjuvförsök

Beskrivning av provningsmetoden
Vid ett direkt skjuvförsök som utförs på friktionsmaterial, packas provet för hand i ett gummimembran med ett antal ringar utvändigt som hindrar att provet ökar sin diameter. Ringarnas inbördes avstånd skall vara sådant att de inte överför vertikalkrafter. Provet placeras i en belastningsanordning med en fast underdel och en rörlig överdel. I provets ändytor finns filterstenar för dränering. Försöket utförs på vattenmättade prov.

Provet tillåts först konsolidera för en vertikal belastning och skjuvas sedan genom att överdelen förskjuts horisontellt och på ett sådant sätt att skjuvkraften angriper på halva provhöjden. I denna utredning har skjuvningen utförts dränerad. För utvärdering av den inre friktionsvinkeln erfordras minst tre försök som konsolideras för olika vertikala belastningar. I de utförda försöken har proven konsoliderats för 20, 40 och 80 kPa, vilket ungefär motsvarar effektivspänningen på ett djup 1, 2 och 4,5 m under vägens överyta. Försöken har utförts på material <11,2 mm i en skjuvapparat med 100 mm diameter (se *figur B1.3*).

Det finns en svensk standard för direkt skjuvförsök på kohesionsjord (kohesionsmaterial), men inte för den typ av direkta skjuvförsök som utförs på friktionsjord (friktionsmaterial). Direkt skjuvförsök på friktionsjord finns beskrivet i Geotekniska laboratorieanvisningar, del 9.

Resultat
Resultaten visar att metoden fungerar bra för de provade materialen. Samtliga provade alternativa material har en god hållfasthet och utvärderade friktionsvinklar har värden motsvarande referensmaterialet, se *tabell B1.5*. Några jämförbara erfarenhetsvärden på friktionsvinkeln för naturliga material anges i SGI Information 1, ”Jords egenskaper”, till 35° för fast lagrad sand, 37° för fast lagrat grus och 42° för fast lagrad sandmorän.

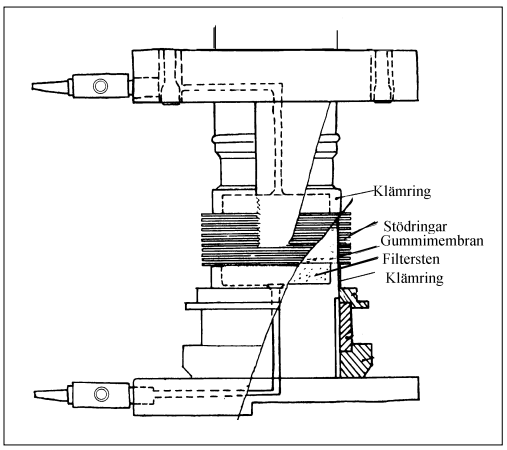
Samtliga alternativa material har en god hållfasthet och utvärderade friktionsvinklar har värden motsvarande referensmaterialet.

Tabell B1.4 Riktvärden för densitet och vattenkvot vid övriga provningar.

Egenskap		Kolbottenaska	Slaggrus	Krossad betong	Referensmtrl.
Vattenkvot (%)		17	17	6	3
Anmärkning			”naturlig vattenkvot”		”naturlig vattenkvot”
Densitet (t/m^3)	löst	0,90	1,56		2,00
	hårt	1,10	1,65	1,87	2,15
Anmärkning		ca 90 och 110 % av max torrdensitet	85 och 90 % av max torrdensitet bestämd med tung instampning	97 % av max torrdensitet bestämd med vibrobord	90 och 95 % av max torrdensitet bestämd med vibrobord

Tabell 6.5 Friktionsvinkel bestämd genom skjuvförsök vid bestämd vattenkvot och densitet.

Parameter	Kolbottenaska	Slaggrus	Betongkross	Referens-material
Friktionsvinkel (°) för spänningar <50 kPa	37	39	38	37
Vattenkvot vid packning (%)	17	15	6	3
Torrdensitet (t/m^3)	0,90	1,56	1,81	1,99



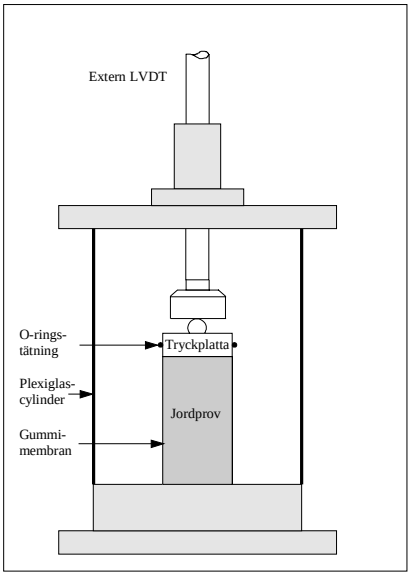
Figur B1.3 Utrustning för direkt skjuvförsök och kompressometerförsök (Wiesel et al 1985).

I en skjuvapparat med 100 mm diameter bör kornstorleken begränsas till 1/10 av diametern. Vid försöket har därför endast material < 11,2 mm provats. Bestäms friktionsvinkeln i en skjuvapparat med större dimension så att även större materialfraktioner kan tas med kan värdet på den utvärderade friktionsvinkeln skilja sig något. Vid försöken har inget av de provade materialen uppvisat något brott. Utvärderingen har därför utförts vid 15/100 radianer i enlighet med metodbeskrivningen.

Trafiklasten är en snabb belastning jämfört med de långtidsbelastningar man använder inom geotekniken.

Dynamisk treaxialprovning

Beskrivning av provningsmetoden
Provningarna har utförts på odränerade prov med dimensionerna 150 mm diameter och 300 mm höjd i VTI:s servohydrauliska materialprovningssystem (VMS). Provkropparna har varit odränerade eftersom detta mest liknar verkligheten. Trafiklasten är en snabb belastning jämfört med de långtidsbelastningar man använder inom geotekniken.



Figur B1.4 Utrustning för dynamisk treaxialprovning.

Provkropparna har tillverkats i ett lager med vibrerande packningsutrustning av fabrikat Vibrocompresseur i en speciell packningscylinder. Den är skonsam och dessutom kan både vattenkvot och densitet för det färdiga provet väljas. Efter inpackning har provkropparna pressats ur packningscylindern och försetts med ändplattor och en tunn gummistrumpa runt mantelytan.

Efter ca ett dygns lagring har provkropparna placerats i en s.k. treaxialcell, där luft använts som tryckmedium för att skapa det horisontella sidotrycket som simulerar intilliggande jords mottryck eller stöd. Det dynamiska vertikaltrycket erhålls från hydraulcylindern och simulerar hjullastens inverkan på provet. Den dynamiska lasten har varierats enligt en sinusformad våg med frekvensen 10 Hz utan viloperioder. Detta snabba förlopp, som ger en belastningstid på 0,1 s, motsvarar en axelpassage i ca 70 km/tim.

Varje prov har testats vid sju på varandra följande lastsekvenser där varje ny sekvens inneburit en ökning av den dynamiska vertikalspänningen. Tre sekvenser med lågt kammartryck och fyra med högt kammartryck. Testet har pågått tills dess att alla sekvenser är genomkörda eller tills dess att uppmätt permanent deformation vid en enskild sekvens uppgår till mer än 20 mm, varvid provet anses ha gått till ”brott” och testet stoppas automatiskt.

Under varje lastsekvens har värden för elastisk och permanent vertikaldeformation registrerats och lagrats vid ett visst förutbestämt antal belastningar, i princip var 100:e, var 1000:e eller var 10 000:e belastning. Registrering av vertikaldeformationen har skett med hjälp av en externt monterad lägesgivare (LVDT), vilket innebär att deformationen mätts över hela provets höjd. Horisontaldeformation har inte mätts. Från den elastiska töjningen har resilientmodulen (M_r) beräknats enligt formeln:

$$M_r = \sigma_{v\ dyn} / \varepsilon_{v\ resilient}$$

Resilientmodulen vid ett visst belastningsförhållande kan användas som ett mått på materialets styvhet eller lastspridningsförmåga vid denna belastning. Det har visats att resilientmodulerna för både friktions- och kohesionsmaterial är spänningsberoende, fast på olika sätt. Resilientmodulen för ett friktionsmaterial ökar med stigande verikalspänning, medan den minskar för ett kohesionsmaterial. De s k blandmaterialen, t ex silt, hamnar ungefär mitt emellan, dvs resilientmodulen är ganska opåverkad av vertikalspänningen.

Det belastningsförhållande som gäller för en viss resilientmodul kan anges i form av vertikalspänningen, deviatorspänningen (skillnaden mellan vertikal- och horisontalspänningen) eller summan av huvudspänningarna (vertikalspänningen + dubbla horisontalspänningen).

För varje materialvariant som undersökts har tre provkroppar tillverkats och testats och de värden som redovisas är medelvärden för dessa tre provkroppar.

Resultat

■ ***Styvhet***

I *figur B1.5* får de olika materialens styvhet representeras av resilientmodulen vid olika deviatorspänningar. Samtliga kurvor har ett språng vid ca 70 kPa, vilket visar övergången mellan det tredje och fjärde belastningssteget vid provningen. Då ökas både vertikal- och horisontallasten vilket ger samma deviatorspänning, men olika vertikalspänning och därmed förändrad resilientmodul.

Resilientmodulerna för slaggruset tyder på att det är ett material som från styvhetssynpunkt är jämförbart med några naturmaterial som har provats i ett annat forskningsprojekt, en sand från Bästerna vid Ljungby och ett 0–8-material från bergkrossanläggningen i Skärlunda, Östergötland.

Kolbottenaskan blir i hårt packat tillstånd något mindre styv än sanden och 0–8 materialet, medan den i löst packat tillstånd är bara hälften så styv.

Den krossade betongen blev som väntat betydligt styvare än de andra materialen inklusive referensmaterialet.

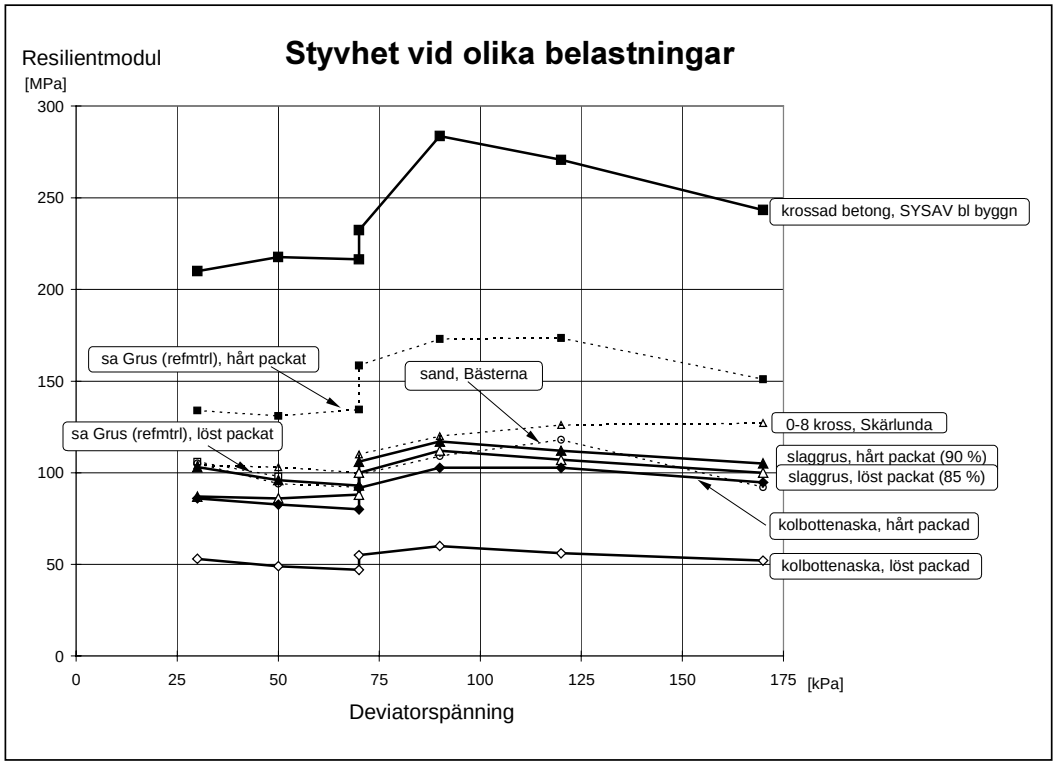
■ ***Stabilitet***

Den permanenta deformationen som uppstår i ett material vid en viss vertikal belastning kan användas som ett mått på dess stabilitet. I *figur B1.6* används den ackumulerade permanenta deformationen per dm som jämförelse av stabiliteten hos de undersökta materialen och de två tidigare nämnda naturmaterialen.

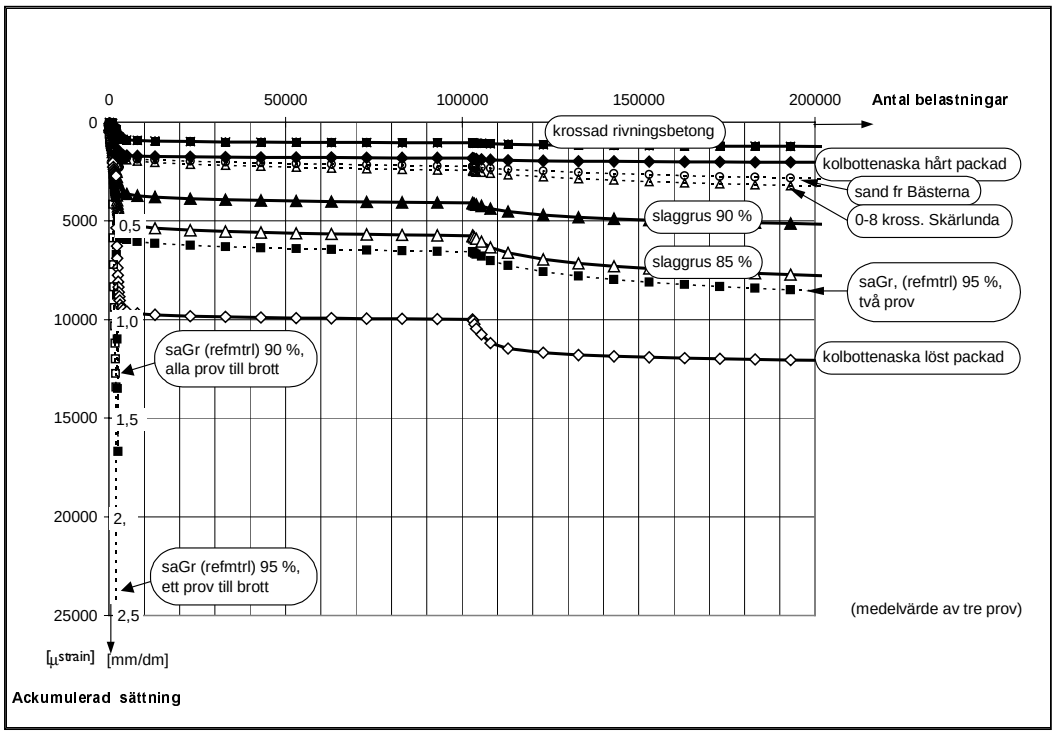
Den vertikala belastningen har ökats i flera steg under försökets gång, medan den permanenta deformationen har ackumulerats under hela försöket. Belastningarna har valts för att täcka in de spänningar som en underbyggnad eller ett skyddslager utsätts för. Vid större permanent deformation än 6 % av provkroppens höjd avbryts försöket. Detta definieras som ”brott”.

Generellt kan sägas att en brant kornstorleksfördelningskurva, eller en rundad kornform, är negativt för stabiliteten. Även vattenkvoten har betydelse.

Generellt är en brantkornstorleksfördelningskurva, eller en rundad kornform, negativt för stabiliteten



Figur B1.5 Resilientmoduler för de undersökta materialen jämfört med en sand och ett 0–8 material.



Figur B1.6 Ackumulerad permanent deformation för de undersökta materialen jämfört med en sand och ett 0–8 material.

För samtliga material har den ursprungliga packningen stor betydelse för den initiala deformationen.

Figur B1.6 visar att det så kallade referensmaterialet, ett sammansatt sandigt grus, är så instabilt att alla tre provkropparna går till brott på ett tidigt stadium vid den ”lösa” packningen, dvs 90 % av tung instampning. Vid den hårdare packningen går en av provkropparna till brott tidigt, medan de andra två håller längre. Förklaringen finns nog i kornstorleksfördelningen som är brant i fraktionen 11–22 mm och även har en sandpuckel.

För samtliga material ser man att den ursprungliga packningen har stor betydelse för den initiala deformationen. Till exempel deformeras den löst packade kolbottenaskan mycket i början, men följer sedan de andra materialen. Alla provkroppar har packats till sin förutbestämda densitet med hjälp av samtidig vibrering och tryck i ett skikt.

De fyra översta materialen, krossad rivningsbetong, hårt packad kolbottenaska, sand från Bästerna och 0–8 krossrest från Skärlunda kan förväntas tåla högre laster än de här använda utan att deformationen ändras dramatiskt.

B1.6 Sättning/kompression

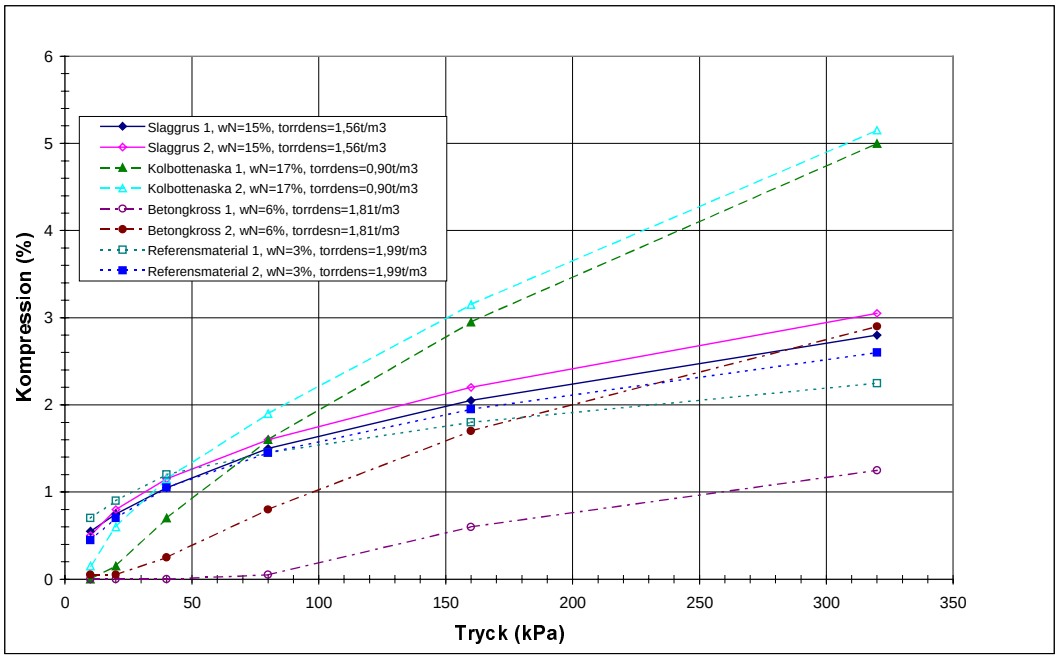
Kompressometerförsök

Beskrivning av provningsmetoden

Vid kompressionsförsök på friktionsmaterial i kompressometer, typ SGI, packas provet för hand inom ett gummimembran med ett antal ringar utvändigt, vilka är placerade så att de kan följa med vid provets kompression utan att ge upphov till friktionskrafter. I provets ändytor finns filterstenar för dränering. Provet belastas sedan stegvis, med en fördubbling av vertikallasten varje dygn. Efter lastpåläggning avläses deformationen efter bestämda tidsintervall. Tid-sättningskurvan för varje laststeg uppritas och därefter last-deformationskurvan. Härvid används deformationen efter 24 tim lastpåläggning. Försöken har utförts på vattenmättade prover på material < 11,2 mm i en kompressometer med 100 mm diameter (se *figur B1.3*).

Skillnaden mellan ett ödometerförsök som används för finkorniga jordarter och kompressometerförsöket som används för mer grovkorniga, är det antal ringar som vid kompressometerförsöket ersätter ödometerringen vid ödometerförsöket. Ödometerförsöket finns beskrivet i SS 02 71 29 i Geotekniska laboratorieanvisningar, del 10.

Resultat – se *figur B1.7*.



Figur 6.7
Resultat av kompressionsförsök (angivna vattenkvoter och torrdensiteter avser inpackning).

Från resultaten av försöken kan konstateras att tre av materialen, slaggruset, betongkrosset och referensmaterialet har relativt likartade kompressionsegenskaper. För dessa material avtar kompressionsökningen successivt med ökad last. För slaggruset och referensmaterialet sker den största kompressionen i det lägre spänningsintervallet (10–80 kPa). Betongkrosset uppträder på liknande sätt, men detta material komprimeras dock lite vid de lägsta spänningarna (10–40 kPa), varefter den uppträder som de båda andra materialen. Betongkrosset har de bästa kompressionsegenskaperna, men det är också detta material som uppvisar den största spridningen. Kolbottenaskan komprimeras mer än övriga material vid högre laster och förloppet är mer rätlinjigt, dvs kompressionsökningen avtar inte nämnvärt med ökad last.

Ett försök har också gjorts att bestämma en sättningsmodul, E. Ur kompressionsförsöken kan en kompressionsmodul, M, utvärderas och därur kan sättningsmodulen erhållas genom $E = M(1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu)$. Denna modul kan inte jämföras med sättningsmoduler utvärderade utifrån fältförsök i enlighet med VV publ 1994:15 ”Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper”. En jämförelse kan dock göras mellan de olika materialen.

Sättningsmodulen har utvärderats som en sekantmodul inom intervallet 20–80 kPa, se *tabell B1.6*. Detta spänningsintervall motsvarar ett läge ca 1–5 m under vägytan. Vid utvärderingen av sättningsmodulen har värdet på tvärkontraktionstalet $\nu = 0{,}3$ använts. Betongkrossen och referensmaterialet har högst sättningsmodul och slaggrusets modul är något lägre. Kolbottenaskan har sämre kompressionsegenskaper än de övriga materialen och dess sättningsmodul är knappt hälften så stor. Vid användning av alternativa material vid vägbyggnation är det viktigt att veta spridningen i materialets egenskaper. Erhålls en stor spridning i en materialegenskap, som t ex i fallet med sättningsmodulen hos betongkrosset, bör ett flertal försök göras för att klarlägga spridningen.

För att studera hur mycket materialen krossas under statisk last har de alternativa materialen siktats före och efter kompressionsförsöken. Siktningarna visar att betongkrosset i princip inte krossades alls. Den ursprungliga

Slaggruset, betongkrosset och referensmaterialet har relativt likartade kompressionsegenskaper.

Tabell B1.6
Sättningsmodul utvärderad från kompressionsförsöken.

Parameter	Kolbotten-aska	Slaggrus	Betong-kross	Referens-material
Sättningsmodul (MPa); försök 1	3,0	5,6	5,9	5,9
Sättningsmodul (MPa); försök 2	3,4	5,9	89,1	8,1

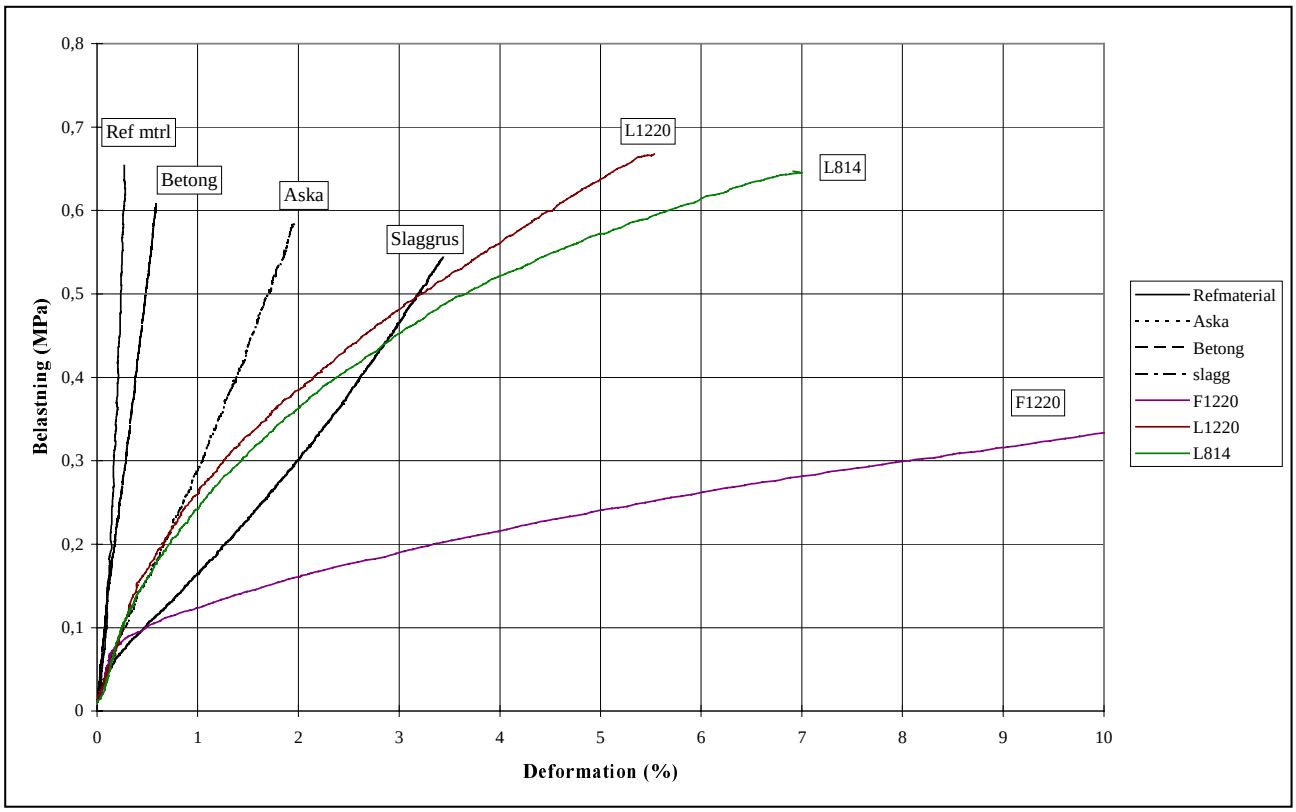
kurvan hade flyttats som mest 0,5 procentenheter uppåt. För slaggruset visade resultatet att den ursprungliga kurvan hade flyttats 2–4 procentenheter uppåt och för kolbottenaskan hade den ursprungliga kurvan flyttats 1–5 procentenheter uppåt. Trycket vid försöket hade då maximalt uppgått till 320 kPa, vilket motsvarar trycket i en vägbank ca 17 m under vägytan. Hos kolbottenaskan hade krossning främst skett vid fraktioner större än 2 mm, medan för slaggruset krossning främst skett vid fraktioner mindre än 1 mm.

Kompressibilitet enligt SP Metod 01-46-77

Beskrivning av provningsmetoden

Metoden syftar till att bestämma sambandet mellan deformationen och vissa givna laster och används normalt för material till kompensationsfyllnader, t ex lättklinker. Metoden har modifierats i detta projekt för att användas på hela 0–31,5 mm sorteringen.

7 liter provmaterial fylls löst i en stålcylinder med diametern 200 mm, skrapar av och monterar ett lock med vikten 24,5 kg. Därefter avläses 0-nivån, dvs höjden. Materialet packas genom att cylindern med material vibreras på vibratorbord i 2 minuter (belastningen på materialet är 0,08 kg/cm^2). Därefter avläses nivån, dvs hur högt materialet fyller i cylindern. En last läggs på med en hastighet så att 0,6 MPa erhålls efter 5 minuter. Mätningar utförs kontinuerligt (se *figur B1.8*) men deformationen rapporteras vanligen vid 0,2; 0,4 och 0,6 MPa. De senare är egentligen överflödiga för vägunderbyggnadsändamål utan används för de punktlaster som kan uppstå under platta på mark vid husbyggnation.



Figur B1.8 Diagrammet visar last-deformationskurvor för de 3 alternativa materialen, referensmaterialet samt ytterligare 3 st lättballastmaterial. Notera den ökade deformation hos lättballast kontra övriga material. Detta beror på att krossning inträder tidigare.

B1.7 Tjälrörelse och värmekonduktivitet

Permeabilitetsbestämning med rörpermeameter

Permeabiliteten har betydelse för en rad olika andra egenskaper och funktioner, som tjälrörelse, frosthalka, utlakning och, vid täta material, även sättningarnas tidsförlopp.

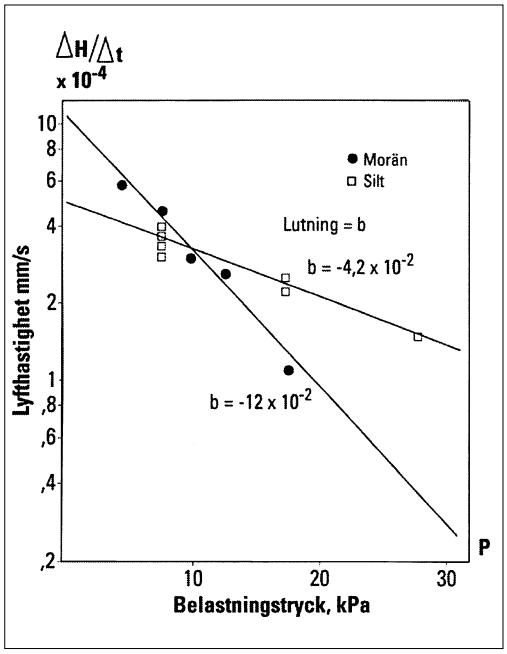
Beskrivning av provningsmetoden
Materialens permeabilitet har undersökts med rörpermeameter enligt Nordtest rapport nr 254. Rörpermeametern utgörs av en cylinder med stela väggar. Provet packas direkt i cellen, normalt med tung laboratoriestampning (Modified Proctor). Provet vattenmättas sedan varvid vattnets tryckhöjd mot inströmningsänden bör begränsas till samma höjd som provets, för att urspolning skall undvikas. Gradienten är således ca 1 vid vattenmättnadsfasen. Efter vattenmättnad höjs gradienten upp till 20 à 30 beroende på provat material. Genomströmning vid full tryckhöjd anses ha stabiliserats när 5–6 jämna värden erhållits efter varandra. Strömningsriktningen kan vara både uppåt och nedåt. Vid de i denna utredning utförda försöken har gradienten varit ca 2 à 4. Strömningsriktningen har varit uppåt. Försöken har utförts i en rörpermeameter med provdiametern 101 mm och provhöjden 124 mm.

Resultat
Försöken visar att metoden fungerar väl för samtliga provade material, se *tabell B1.7*. De erhållna resultaten kan jämföras med erfarenhetsmässiga värden på permeabiliteten för några jämförbara naturliga material (SGI Information 1): grusig morän 10^{-7}–10^{-5}, sandig morän 10^{-8}–10^{-6} och siltig morän 10^{-9}–10^{-7}.

Tjällyftningsbenägenhet

Beskrivning av provningsmetoden
Frystest har utförts enligt VV Metodbeskrivning 609:1994 ”Bestämning av tjällyftningsparametrar”. Materialet packas in med handstamp i en plastcylinder med höjden 100 mm och diametern 110 mm i kapillärt vattenmättat tillstånd och belastas under 1 dygn under vatten. Frysning sker underifrån med konstant värmeflöde och med tre olika vertikalbelastningar 7, 17 och 27 kPa.

Den registrerade lyfthastigheten avsätts som funktion av belastningstrycket i ett semilogaritmiskt diagram (se *figur B1.10*) och de båda parametrarna a och b utvärderas. Lutningen hos regressionslinjen benämns b-värdet. A-värdet beräknas ur medelvärdet för värmeflödet, q_0, under de utförda frystesterna och lyfthastigheten, h_0, vid lasten 0 kPa, dvs obelastat prov.



Figur B1.10 Lyfthastighet vs belastningstryck för två jordarter. Linjens lutning anger b-värdet och h_0 erhålls som linjens skärning med y-axeln. (Stenberg, 1997)

Parameter	Kolbottenaska	Slaggrus	Betongkross	Referensmaterial
Permeabilitet (m/s) (2 provomgångar)	$2\cdot10^{-5}$–$4\cdot10^{-5}$	$9\cdot10^{-7}$–$2\cdot10^{-6}$	$1\cdot10^{-6}$–$5\cdot10^{-6}$	$3\cdot10^{-6}$–$4\cdot10^{-6}$
Vattenkvot vid packning (%) medelvärde	17,0	17,5	6,0	3,0
Torrdensitet (t/m^3) medelvärde	0,97*	1,73	1,88	2,13

* Inpackad med lätt laboratoriestampning (övriga med tung laboratoriestampning)

Tabell B1.7 Resultat av utförda permeabilitetsförsök vid bestämd vattenkvot och densitet.

För att ett material ska anses lyftande, dvs under frysning ackumulera vatten i form av is och därvid överskrida vattenmättnad i ofruset tillstånd, skall det uppmätta lyftbeloppet vara större än 10 % av provets porvolym. Är lyftningen mindre än detta belopp är materialet icke lyftande och a- och b-värden får ett underordnat intresse för en tjälskyddsdimensionering.

Resultat
För samtliga fyra material är de registrerade lyftbeloppen (nedersta raden i *tabell B1.8*) mindre än 10 % av porvolymen. Alla kan alltså betecknas som icke tjällyftande, vilket kanske inte var så överraskande när man studerat kornstorleksfördelningarna. För jämförelse har resultat från frystest på två tjällyftande material tagits med i tabellen. Det ena är en lerig silt och det andra en sandig siltig morän, båda från provvägar utanför Umeå.

Värmekonduktivitet

Beskrivning av provningsmetoden
Mätning av värmekonduktivitet utförs i en plattapparat försedd med värmeflödesmätare vid den övre och undre plattan. Vid provning placeras provföremålet (provlådan) mellan en kall och en varm platta med yttermått 600 x 600 mm. Mätning av yttemperatur och värmeflöde sker i plattans mittdel. Vanligtvis väljs temperaturer så att provets medeltemperatur blir +10 °C.

Normalt mäts värmekonduktiviteten på material som är löst utfyllt i provbehållaren. Detta användes även på kolbottenaskan på grund av de i kapitel B1.4 beskrivna problemen med nedbrytning vid packning. För provningen av övriga material tillverkades en speciell packningsrigg i vilken materialet kunde vibreras under tryck i provbehållaren. Metoden för packning grundar sig på Banverkets handbok BVH 585.11, Lättfyllning för järnvägsbankar, avsnitt 6.2.1.2.

En ram i stål skruvades fast med fyra skruvar på ett vibratorbord och lådan till värmekonduktivitet sattes däri. Materialet fylldes i och ovanpå lades en stålvikt på ca 100 kg, lika stor som lådans innermått (500 x 500 mm) och med höjden 50 mm. Materialet packades i ett lager (med eventuell lite påfyllning i några fall) och vibrerades i 3 minuter.

Materialen har provats torra och vattenmättade. Det senare efter att ha sugit vatten under 1 dygn och sedan dränerat av under varierande tid för att så långt möjligt få bort fritt vatten mellan partiklarna.

Erfarenhet från tidigare uppdragsverksamhet vid SP visar att värmekonduktiviteten är i stort sett linjär mellan ett torrt, respektive fuktigt material varför den aktuella värmekonduktiviteten för en given fukthalt kan utläsas som ett värde mellan dessa två ändpunkter. Detta förutsätter dock att packningsgraden (densiteten) är jämförbar. Högre packningsgrad ger sämre isoleringsvärde.

I prEN 12524 används exponentiella uttryck för att korrigera ett värde på värmekonduktiviteten med avseende på fukt och temperatur. Omräkning av ett värde från ett förhållande (1) till ett annat (2) utförs genom följande uttryck

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}$$

där f_ψ = fuktomvandlingsfaktor för vikt
ψ_2 , ψ_1 = fuktkvot (kg/kg)
λ = värmekonduktivitet, w/(mk)

För små fukthalter kommer uttrycket att vara ungefär rätlinjigt. Fukthaltsintervallet då det angivna uttrycket är giltigt är beroende av materialtyp, t ex 0–25 kg/kg för betongprodukter.

I standarden redovisade tabellvärden är emellertid begränsade till de vanligaste förekommande byggmaterialen. Erfarenheterna av omvandlingsfaktorer för fukt är mycket bristfällig för fyllnadsmaterial.

Tabell B1.8 Resultat från bestämning av tjällyftningsparametrar.

Egenskap	Kolbotten-aska	Slaggrus	Krossad betong	Sandigt grus	Silt från Djäkneböle	sa si Mn fr Bösta
Porvatten (volym %)	66	46,9	35	24,5	47	27
Last (kPa)	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Lyftning (% av frusen provhöjd)	0,4	1,4	1,7	0,2	38	20

På basis av de uppmätta värdena för torrt och fuktigt material kan en omvandlingsfaktor (f_ψ) beräknas:

	f_ψ
aska	2,2
slaggrus	4,0
krossbetong	6,7
referensmaterial	18,6

Värmekonduktiviteten för ett fuktigt material är beroende av hur fukten är fördelad, t ex inuti eller mellan materialkorn, fuktfördelning i tjockleksriktningen. Normalt sker bestämningen av värmekonduktivitet under stationära förhållanden. Materialet konditioneras under en viss tid före provning, så att en jämn fukthaltsfördelning erhålles före provning.

Efter provningarna har fukthaltsfördelningen kontrollerats genom att ta ut material från olika provdjup. Provet har delats in i tre skikt. Fukthalten har varierat mycket lite mellan skikten, inom ca ± 0,5 % från medelvärdet.

Själva provningen har för samtliga material inte inneburit några speciella mätproblem. För att få ett prov som är representativt för en vägfyllning måste det vattenlagrade materialet fyllas i provlådan och vibreras i omgångar, vilket är en relativt omständlig process. Då provlådan är av begränsad omfattning bör alltför stora partiklar inte ingå i provet. Om partikeldiametern är större än ca en tiondel av provtjockleken, blir svårigheterna stora att fördela materialet jämnt över provytan.

Resultat (se *tabell B1.9*)

Tabell B1.9
Värmekonduktivitet.

Egenskap	Aska, (torr)	Aska (våt)	Slagg (torr)	Slagg (våt)	Betong (torr)	Betong (våt)	Referens (torrt)	Referens (vått)
Värmekonduktivitet (W/mK)	0,20	0,34	0,23	0,48	0,50	1,12	0,55	1,81
Torrdensitet (t/m^3)	0,81	0,70	1,370	1,16	1,76	–	2,04	–
Skrymdensitet (t/m^3)	–	0,86	–	1,37	–	1,75	–	2,22
Fukthalt (vikt %)	–	23,9	–	18,5	–	12,2	–	6,4

Anm. 1. Torrdensiteten för det våta materialet beräknades genom att dra fukthalten ifrån det våta materialet.

Anm.2. Enligt geoteknisk terminologi är skrymdensitet alltid den våta densiteten till skillnad från praxis inom ballastbranschen där skymdensitet motsvarar bulkdensitet och är normalt i torrt tillstånd.

Bilaga 2 – Litteraturstudie

Här redovisas de sammanfattningar författarna gjort av sin litteraturstudie. Den som vill få tillgång till författare, litteraturhänvisning och övriga detaljer i litteraturstudiien hänvisas till huvuddokumentationen av projektet.

B2.1 Tekniska egenskaper

Rosteldad kolbottenaska

Provningsmetoder i laboratorium
I den litteraturstudie som gjorts avseende provning av såväl kolbottenaska som slaggrus har huvudsakligen publicerad litteratur, men även utlåtanden från SGI:s konsultprojekt gåtts igenom. I det material som studerats har ett begränsat antal materialtekniska egenskaper bestämts och metoder använts.

Sammanfattningsvis har huvudsakligen följande egenskaper bestämts och laboratoriemetoder använts vid undersökning av ***kolbottenaska***:

- Kornstorleksfördelning bestämd genom siktning (SS 027123). (Torr metod, enligt Lundgren & Hartlén (1991))
- Glödgningsförlust. (Metod enligt ASTM C25-88, dock vid 550 °C, enligt Lundgren & Hartlén (1991))
- Vattenkvot (SS 027116).
- Packningsegenskaper med tung laboratoriestampning (modifierad proctor), laboratorievibrering och lös ifyllning (SS 027109).
- Bestämning av torrdensitet, skrymdensitet och korndensitet. (SS 027114-15)
- Bedömning av bärighet med CBR-metoden (California Bearing Ratio)
- Bestämning av E-modul med SEB-metoden (Swedish Earth Bearing Method).
- Bestämning av tjälfarlighet med frystest (b-värde) (VTI).

Resultat av laboratorieprovningar

På ***kolbottenaskan*** har sammanfattningsvis följande resultat erhållits:

- Kornstorleksfördelning motsvarande sandigt grus - stenigt grus.
- Korndensitet 1,8–2,2 t/m^3.
- Torrdensitet bestämd med tung laboratoriestampning: 0,9–1,2 t/m^3 och med lös ifyllning 0,6–0,8 t/m^3.
- Stora nedkrossningseffekter vid packning med tung laboratoriestampning. Jämn packningskurva vilket indikerar okänslighet för variationer i vattenkvot.
- Bärighet enligt CBR-provningar: 60–100 %.
- E-modul bestämd med SEB-metoden varierande mellan 20 och 55 MPa beroende bl a på ålder och vattenmättnadsgrad.

Packningsförsök i fält
I den studerade litteraturen finns packning av kolbottenaska i fält endast beskriven vid uppbyggnad av provväg vid Gärstad i Linköping utförd inom projektet ”Slagg från avfallsförbränning – Teknik och miljö” (Lundgren & Hartlén 1991, Jacobsson & Höbeda 1988). Man konstaterar att nedkrossningen av kolbottenaskan blev omfattande vid utläggning och packning, men någon redovisning av packningsredskap och lagertjocklekar har ej gjorts. Baserat på erfarenheter från användning av kolbottenaska, Rogbeck och Knutz (1996) rekommenderades lätta vibrovältar med en stor diameter och jämförelsevis låg amplitud vid packning.

Slaggrus

Provningsmetoder i laboratorium

Sammanfattningsvis har huvudsakligen följande egenskaper bestämts och laboratoriemetoder använts vid undersökning av ***slaggrus***:

- Kornstorleksfördelning bestämd genom siktning (SS 027123). (Torr metod, enligt Lundgren & Hartlén (1991))
- Glödgningsförlust. (Metod enligt ASTM C25-88, dock vid 550 °C, enligt Lundgren & Hartlén (1991))
- Vattenkvot (SS 027116).
- Packningsegenskaper med tung laboratoriestampning (modifierad proctor), laboratorievibrering och lös ifyllning (SS 027109).
- Bestämning av torrdensitet, skrymdensitet och korndensitet. (SS 027114-15)
- Bedömning av bärighet med CBR-metoden (California Bearing Ratio)
- Bestämning av E-modul med SEB-metoden (Swedish Earth Bearing Method).
- Bestämning av tjälfarlighet med frystest (b-värde) (VTI).

Resultat av laboratorieprovningar

På ***slaggruset*** har sammanfattningsvis följande resultat erhållits:

- Kornstorleksfördelning motsvarande grusig sand - sandigt grus.
- Optimal vattenkvot varierande mellan 12 % och 25 %.
- Korndensitet: 2,3–2,6 t/m^3.
- Maximal torrdensitet bestämd med tung laboratoriestampning: 1,4–1,8 t/m^3.
- Vid packning med tung laboratoriestampning erhölls viss nedkrossning. Stor variation i packbarhet och inverkan av vattenkvot konstaterades.
- Bärighet enligt CBR-provningar: 120–147 % (vid normal vattenhalt).
- E-modul bestämd med SEB-metoden varierande mellan 50 MPa och 135 MPa beroende bl a på ålder och vattenmättnadsgrad.
- Icke tjälfarligt material.
- Permeabilitet 10^{-5}–10^{-7} m/s, bestämd i modifierade triaxialceller.

Packningsförsök i fält

Inom projektet ”Slagg från avfallsförbränning – Teknik och miljö” har provpackning av färsk och åldrad slagg utförts på Spillepengen i Malmö (Lundgren & Hartlén 1991, Hartlén 1988). Det packade slaggruset liknade ett välgraderat grus-sandmaterial med en finmaterialhalt på drygt 10 %.

Det konstateras i rapporten att antal överfarter, statisk/dynamisk packning, välttyngd och slaggålder endast marginellt påverkar graden av nedkrossning.

På basis av packningsförsöken i fält dras i rapporten slutsatsen att packningen kan utföras enligt Mark AMA:s tabeller på slagg som lagrats ca 1 år. Färsk slagg visade sig vara olämplig då en fjädring och vattenutpressning skedde vid packningen.

I rapporten dras slutsatserna att slaggruset har goda packningsegenskaper och uppvisar såväl stor fasthet som hög packningsgrad. Nedbrytningen av materialet under packningen är liten och en djupverkan på 0,4 m kan uppnås även med vibroplatta. Vidare anser man att vid användning av slaggrus som fyllningsmaterial bör utförandekontrollen omfatta vattenkvotsbestämning och bestämning av packningsgrad med Troxler.

Krossad betong

Provningsmetoder i laboratorium

Undersökningar av krossad betong har gjorts på VTI. Det är under senare år som krossad betong från rivning av olika byggnadskonstruktioner har studerats på VTI. Hittills har samtliga studier gjorts för att undersöka betongens lämplighet som överbyggnadsmaterial eftersom egenskaperna har visat sig vara snarlika de hos ett konventionellt bär- eller förstärkningslager.

Resultat av laboratorieundersökningar

Det går inte att fastställa egenskaper som gäller för alla typer av rivningsbetong, som en enda materialgrupp. Cementpastans och ballastens kvalitet liksom vidhäftningen dem emellan påverkar materialets egenskaper efter krossningen. Ydrevik et al (1996) menar att cylindertryckhållfastheten hos utborrade provkroppar av betongen före rivning, kan ge en grov uppskattning av materialets användbarhet i krossad form. Efter rivning kan betongen krossas till önskad kornstorleksfördelning och packas till önskad densitet, vilket naturligtvis påverkar de vägtekniska egenskaperna.

Sammanfattningsvis har huvudsakligen följande egenskaper bestämts och laboratoriemetoder använts vid undersökning av ***krossad betong*** vid VTI:

- Kornstorleksfördelning går att påverka via krossning och siktningsförfarande. För de aktuella betongtyperna gjordes treaxialförsöken på material mellan 0 och 31,5 mm. I ett fall med 6 % finjord, 20 % < 0,6 mm och 58 % < 6 mm. I de andra fallen föll kurvan mitt i den godkända bärlagerzonen med 5 % finjord, 15 % < 0,6 mm och 42 % < 6 mm
- Optimal vattenkvot bestämd med tung laboratoriestampning (modifierad Proctor) varierade mellan 8 och 12 %.
- Maximal torrdensitet bestämd med tung laboratoriestampning varierade mellan 1,8 och 1,9 t/m^3. Samma egenskap bestämd med vibrobord varierade också mellan 1,8 och 1,9 t/m^3.
- Vid packning med tung laboratoriestampning erhölls viss nedkrossning. I ett fall finns värden på kornstorleksfördelningen före och efter instampning. Dessa visar en höjning av kurvan med upp till femton procentenheter.
- Liten variation i packbarhet och inverkan av vattenkvot konstaterades, vilket är typiskt också för konventionella bärlagermaterial.
- Styvhet angiven som resilientmodul bestämd med dynamisk treaxialprovning (vattenkvot 60 % av optimal och densiteten 97 % av max torrdensitet) varierade mellan 220 och 480 MPa beroende på spänning och material. Vid låga spänningar (summa huvudspänning 300–400 kPa) ligger resilientmodulen mellan 220 och 290 MPa.
- Stabilitet uttryckt som ackumulerad permanent deformation varierade mellan 1 och över 7 mm/dm efter 100 000 belastningar med spänningsnivån 600/120 kPa. Här avviker husbetongen med låg tryckhållfasthet och vägbetongen med låg densitet kraftigt.

Packningsförsök i fält

Några särskilda packningsförsök i fält har inte gjorts på provsträckorna med krossad betong. Packning har skett på traditionellt sätt med gott resultat.

B2.2 Miljömässiga egenskaper

Nedanstående sammanställning baserar sig på erfarenheter och resultat från tidigare projekt där SGI undersökt de miljömässiga egenskaperna hos framför allt slaggrus och rosteldad kolbottenaska. Krossad betong och naturmaterial har studerats i mindre omfattning. Under 1996–1998 har de miljömässiga egenskaperna hos slaggrus undersökts i ett projekt i Svenska Renhållningsverksföreningens (RVF) regi. Ett av materialen från RVF-projektet (slaggrus från Göteborg) utgör provmaterial i undersökningen av materialtekniska egenskaper inom föreliggande projekt.

Miljömässig karakterisering

De miljömässiga egenskaperna bestäms vanligen genom en s k miljömässig karakterisering. I en miljömässig karakterisering av en restprodukt görs inledningsvis en bestämning av totalhalten, vilket ger en uppfattning om materialets huvudsakliga beståndsdelar. I ett s k tillgänglighetstest bestäms den potentiellt lakbara mängden på mycket lång sikt. Vanligtvis är endast en mindre del av den totala mängden av ett ämne tillgängligt för utlakning, även i ett mycket långt tidsperspektiv. Hur utlakningsförloppet ser ut i ett kortare tidsperspektiv kan man få en uppfattning om genom skak- eller kolonnförsök.

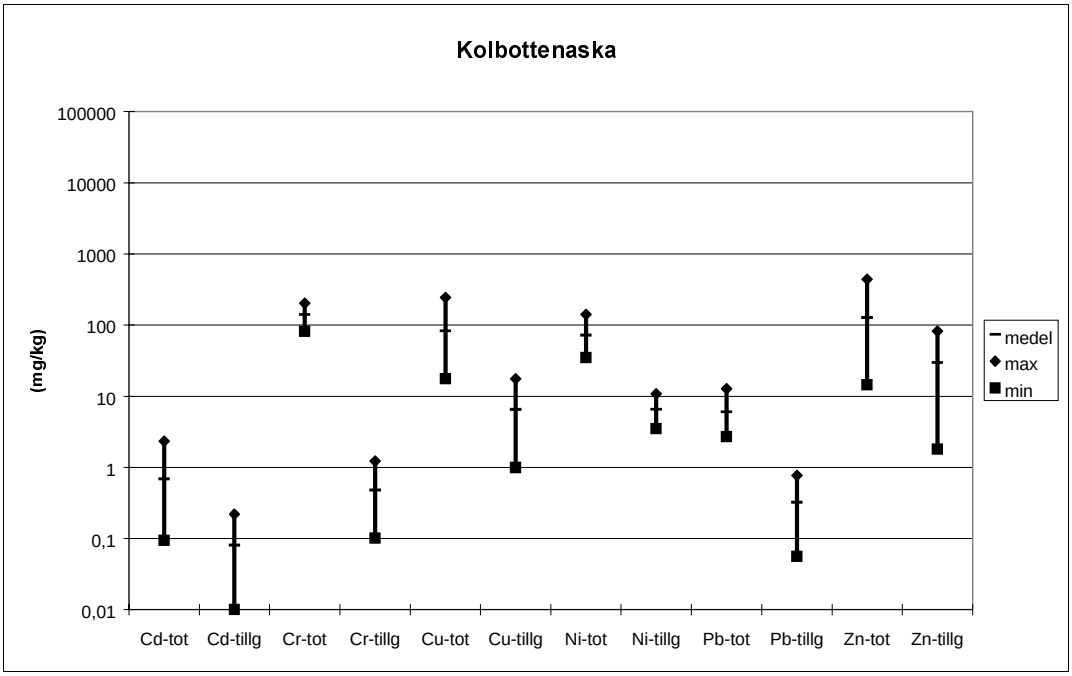
CEN-lakning som nämns nedan är en typ av skakförsök. När resultaten från lakförsöken ska ”översättas till verkligheten” kan L/S överslagsmässigt räknas om till en tidsskala. Genom att uppskatta hur mycket vatten (liquid) som kommer i kontakt med materialet (solid) under ett år och beräkna förhållandet mellan ”liquid” och ”solid” kan man få en uppfattning om vilken L/S-kvot som ett år motsvarar. Resultaten från skak- eller kolonnförsök kan användas för att uppskatta den tidsberoende utlakningen från en anläggning (t ex en väg) som innehåller det studerade materialet. Hur lång tid de respektive L/S-förhållandena representerar beror på vattenomsättningen (dvs hur mycket vatten som kommer i kontakt med materialet) och därmed indirekt på anläggningens utformning.

Rosteldad kolbottenaska

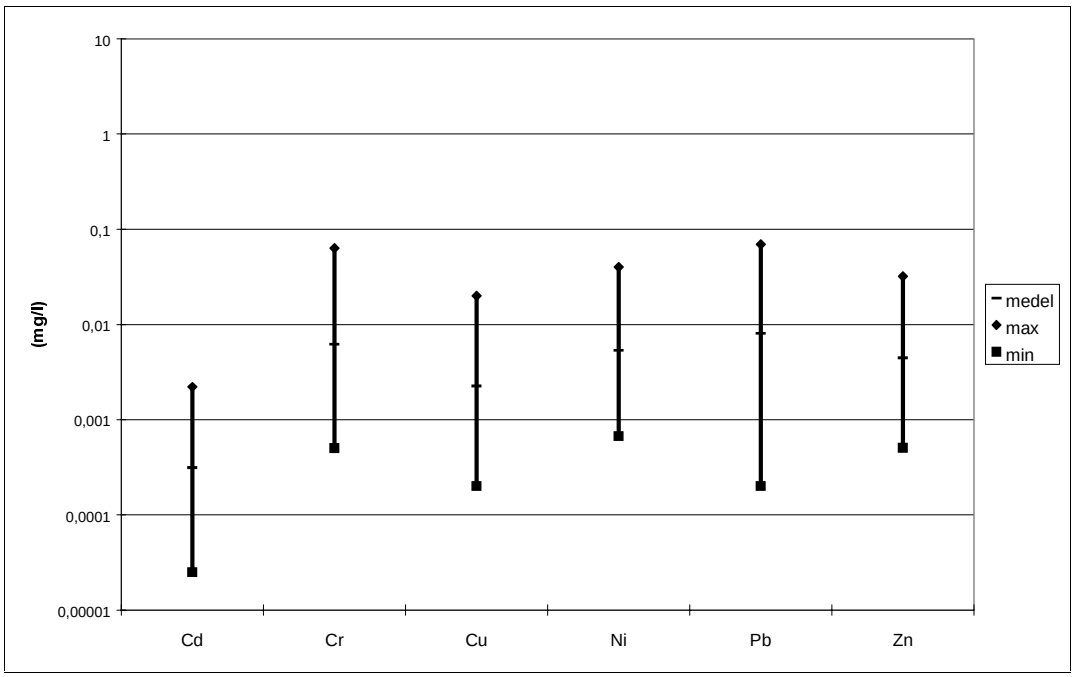
I samband med tillståndsansökan till länsstyrelsen i Östergötland avseende användning av aska från Norrköping Energi för anläggningsändamål, gjordes undersökningar av askans miljöegenskaper. Som en del i kvalitetskontrollen görs dessutom regelbundet lakförsök. Resultaten från lakförsöken jämförs med de rikt- och gränsvärden som satts upp av länsstyrelsen.

Även i andra sammanhang har miljöegenskaperna hos rosteldad kolbottenaska undersökts, bl a inom ramen för ett projekt i EFO Energiaskor:s regi (EFO Energiaskor AB, 1998). En del resultat från dessa undersökningar har sammanställts och redovisas i nedanstående figurer. I *Figur B2.4* ingår även prov med en liten inblandning av flis i bränslet. I *figur B2.1* redovisas totalhalt och tillgänglig mängd, baserat på 3–4 askprov. Ur figuren framgår att den tillgängliga mängden kan vara någon tiopotens lägre än den totala halten. För de undersökta askproverna varierar den totala halten av krom, koppar, nickel respektive zink mellan 10 och 400 mg/kg. Den tillgängliga mängden är störst för zink.

I *figur B2.2* redovisas halterna i lakvatten från skakförsök (L/S 2) på rosteldad kolbottenaska (17–19 prover). Ur figuren framgår att halterna kan variera flera tiopotenser. Några värden ligger dock under detektionsgränsen, vilket gör att intervallet kan minska något. Med undantag för krom och bly ligger halterna (omräknat till ackumulerad utlakad mängd, mg/kg) av de här jämförda tungmetallerna mycket lägre vid skakförsökets L/S 2 än den för utlakning tillgängliga mängden, vilket tyder på att utlakningen går långsamt. Salter som sulfat och klorid lakar i allmänhet ut relativt snabbt.



Figur B2.1 Totalhalt och tillgänglig mängd av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn i rosteldad kolbottenaska.

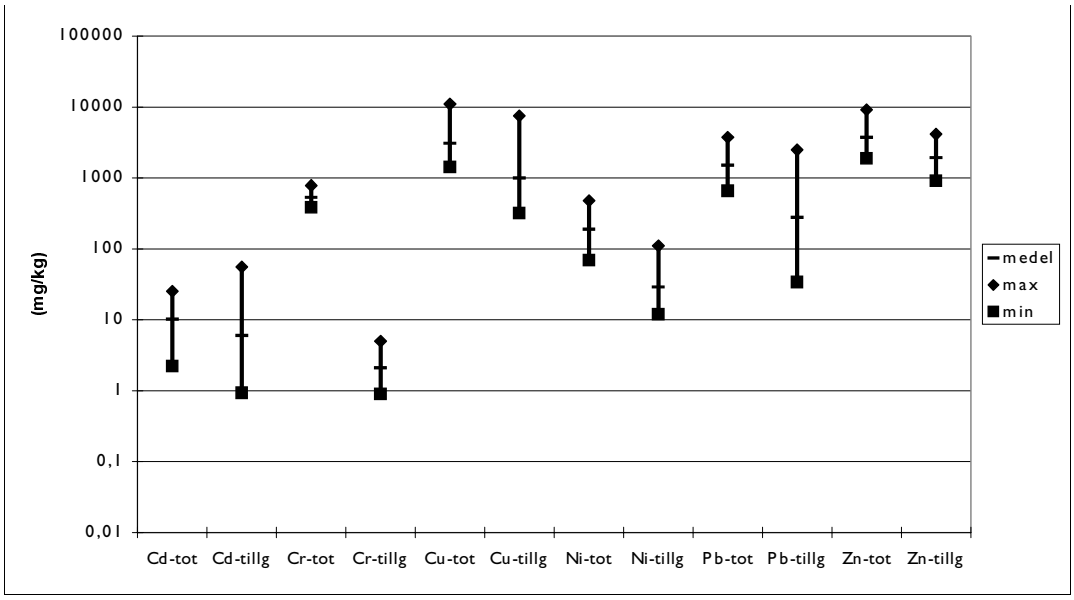


Figur B2.2 Halter i lakvatten, skakförsök L/S 2, för rosteldad kolbottenaska.

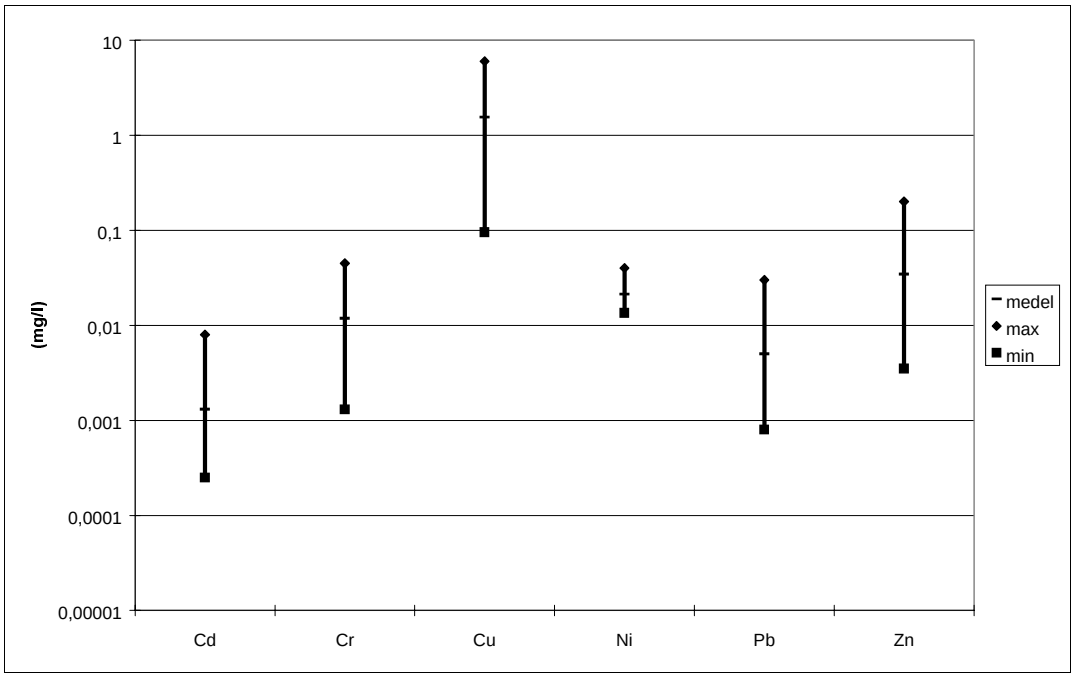
Slaggrus

Sorterad och lagrad slagg (bottenaska) från avfallsförbränning brukar benämnas slaggrus. Slaggrus har undersökts tidigare, bl a av Fällman (1997) och Fällman & Hartlén (1994). Dessutom finns det i SGI:s lakvattendatabank även andra lakförsök på slaggrus. I det tidigare nämnda RVF-projektet (RVF, 1998) undersöktes slaggrus från fyra olika anläggningar provtaget vid fyra olika tillfällen under 1996 och 1997 med efterföljande lagring utomhus i sex månader. Försöken utfördes som dubbelprov, vilket innebär att sammanlagt undersöktes 32 olika prov med slaggrus. Syftet med projektet var bl a att undersöka variationerna både mellan anläggningarna och mellan olika provtagningsperioder. Man kan anta att nuvarande avfallshantering med ökande källsortering sannolikt genererar en annan typ av slagg än den som studerats i tidigare projekt. Av den anledningen redovisas här endast resultat från RVF-projektet.

Ur *figur B2.3* framgår att av spårämnena så var totalhalten högst för koppar, bly och zink. För dessa tre ämnen låg medelvärdet för totalhalten i storleksordningen 1500–4000 mg/kg. Den till-gängliga mängden var störst för zink (i medeltal ca 2000 mg/kg). För zink fanns en signifikant skillnad i tillgänglig mängd både mellan anläggningarna och mellan provtagningsomgångarna.



Figur B2.3
Totalhalt och tillgänglig mängd av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn i slaggrus.



Figur B2.4
Halter i lakvatten, skakförsök L/S 2, för slaggrus (16-32 prover).

I RVF-projektet utfördes även kontrolltest (CEN-lakning). Resultaten visade att utlakningen av salterna sulfat och klorid utgjorde de största utlakade mängderna. Den största utlakningen av spårämnen utgjordes av koppar. Utlakningen av bly var låg i förhållande till den potentiellt lakbara mängden. Utlakningen av nickel var under detektionsgränsen för flera lakvatten. Vid L/S10 var det bara krom som för två av anläggningarna hade lakat ut till mer än 1 % av den potentiellt lakbara mängden.

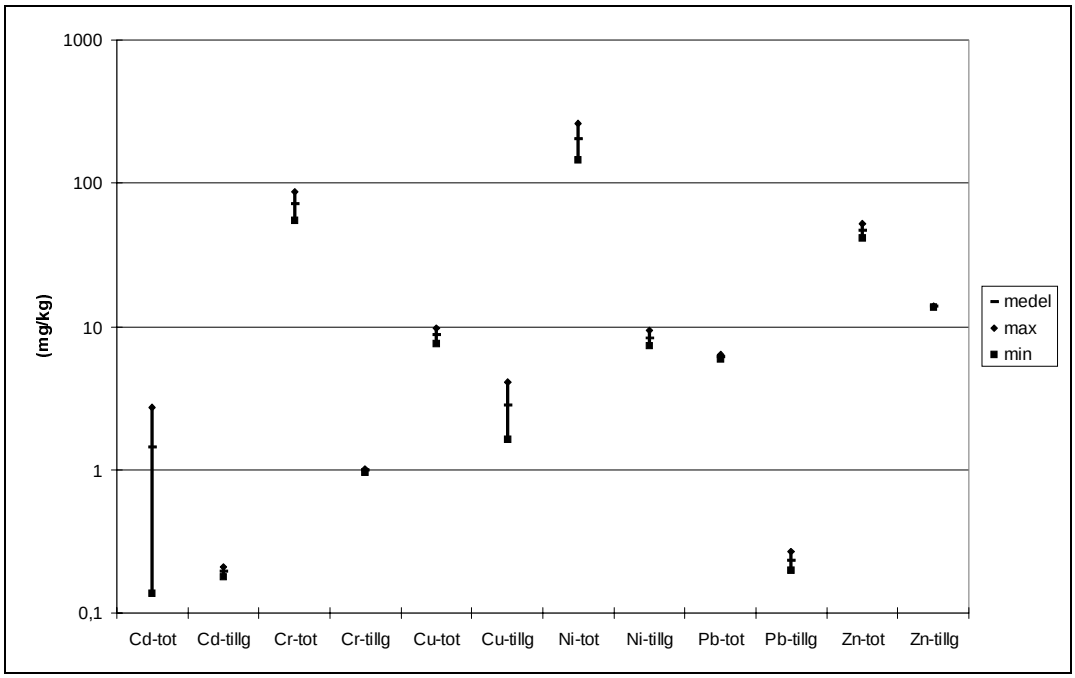
Den utlakade mängden av de undersökta ämnena varierade mellan omgångarna. Tidigare undersökningar har visat att variationen kan vara 5 - 10 ggr mellan tester på samma prov p g a att materialet inte är homogent (Fällman, 1997). I *figur B2.4* redovisas hur lakvatten-halterna vid L/S 2 varierar mellan de olika proven. Värden under detektionsgränsen har inte tagits med.

Krossad betong

Krossad betong har tidigare undersökts i ett examensarbete av Kälvesten (1996). Betongen var ett samlingsprov rivningsmaterial från en f d fabrik i Nyköping. Dessutom har SGI på uppdrag av VTI utfört lakförsök på krossad betong från St Lars skola i Linköping (Johansson et al, 1996). Underlaget är därmed litet, endast 2–3 prover har undersökts. I *figur B2.5* redovisas hur halterna av den totala och tillgängliga mängden av några utvalda spårämnen varierar.

Totalhalten är högst för nickel, mer än 200 mg/kg. Zink har den högsta tillgänglig mängden, ca 14 mg/kg. För kadmium och krom är den tillgängliga mängden ca 0,2 mg/kg.

Eftersom antalet undersökta prover är så begränsat har ingen sammanställning av lakvattenhalter från skakförsök, L/S 2, gjorts. Resultat från kontrolltest (CEN-lakning) finns från två olika undersökningar (Johansson et al, 1996; Kälvesten, 1996). Det syns en tydlig skillnad mellan betongkrossen från dessa båda undersökningar. Med undantag för nickel är utlakningen högre av de undersökta spårämnena (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) för betongkrossen från Linköping (Johansson et al, 1996) jämfört med betong-krossen från Nyköping (Kälvesten, 1996). För betongkrossen från Nyköping har mindre än 4% av den tillgängliga mängden bly lakat ut vid L/S 10.



Figur B2.5 Totalhalt och tillgänglig mängd av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn i betongkross.

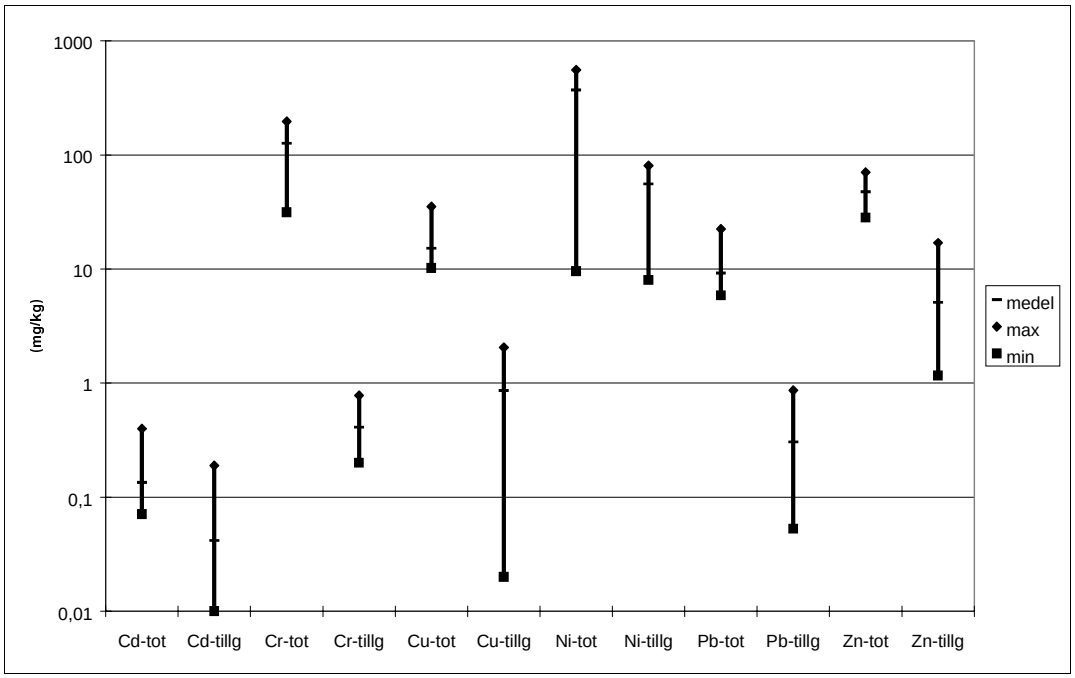
Naturgrus och bergkross

Miljömässig karakterisering av morän och bergkross har bland annat utförts i ett examensarbete av Kälvesten (1996). Ett fåtal andra data på naturmaterial finns i SGI:s lakvattendatabank. I *Figur B2.6* presenteras totalhalter (baserat på 12 prover) och tillgängligt utlakbar mängd (baserat på 9 prover) av ett urval tungmetaller hos bergkross och morän. Av diagrammet framgår att halterna varierar mellan proverna. För vissa ämnen, t ex krom och koppar, är den för utlakning tillgängliga mängden flera tiopotenser lägre än totalhalten.

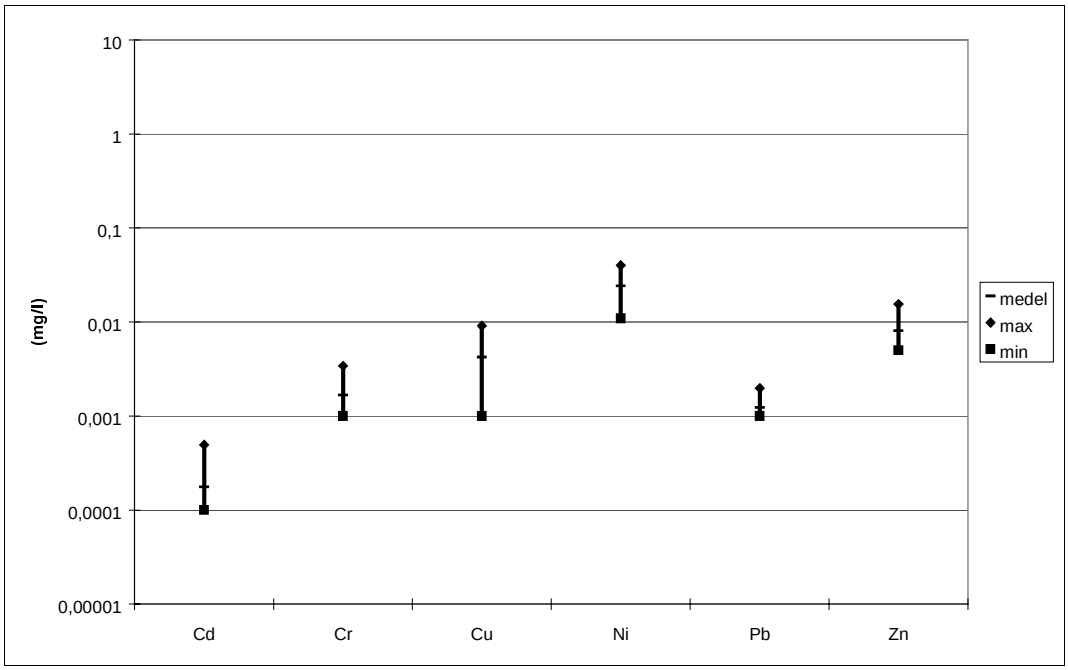
I *figur B2.7* redovisas en sammanställning av uppmätta lakvattenhalter vid skakförsök L/S 2 på morän och bergkross. Med undantag för koppar ligger halterna (omräknat till ackumulerade utlakade mängder, mg/kg) mycket lägre än den mängd som uppmätts i tillgänglighetstest, vilket tyder på att utlakningen går långsamt.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis visar en generell jämförelse av totalhalter och tillgänglig mängd mellan de här beskrivna materialen (och med reservation för att underlaget är begränsat) att halterna i betongkross och rosteldad kolbottenaska är i samma storleksordning som i naturmaterial. Slaggrus har generellt högst halter, i flera fall 10–10 000 ggr högre halter än i naturmaterial.



Figur B2.6 Totalhalt och tillgänglig mängd av Cd, Cr, Cu, Ni, Pb och Zn i naturmaterial (morän och bergkross).



Figur B2.7 Halter i lakvatten, skakförsök L/S 2, för morän och bergkross (10 prov).

Bilaga 3 – Kompletterande provningar i fält

B3.1 Allmänt

Inom ramen för ett större forskningsprojekt i slutet av 1980-talet (Slagganvändning – Teknik och Miljö, finansierat av Stiftelsen REFORSK) anlades två provvägar med slaggrus och kolbottenaska i Linköping och Malmö. Både materialtekniska och miljömässiga egenskaper testades vid dessa provvägar. För att studera miljöpåverkan gjordes insamling av lakvatten från provsträckorna, dels från material under den belagda delen av vägen, dels från vägslänterna.

Provvägen i Linköping, som anlades i december 1987 är indelad i fem provsträckor på vardera 30 meter, se *figur B3.1*.

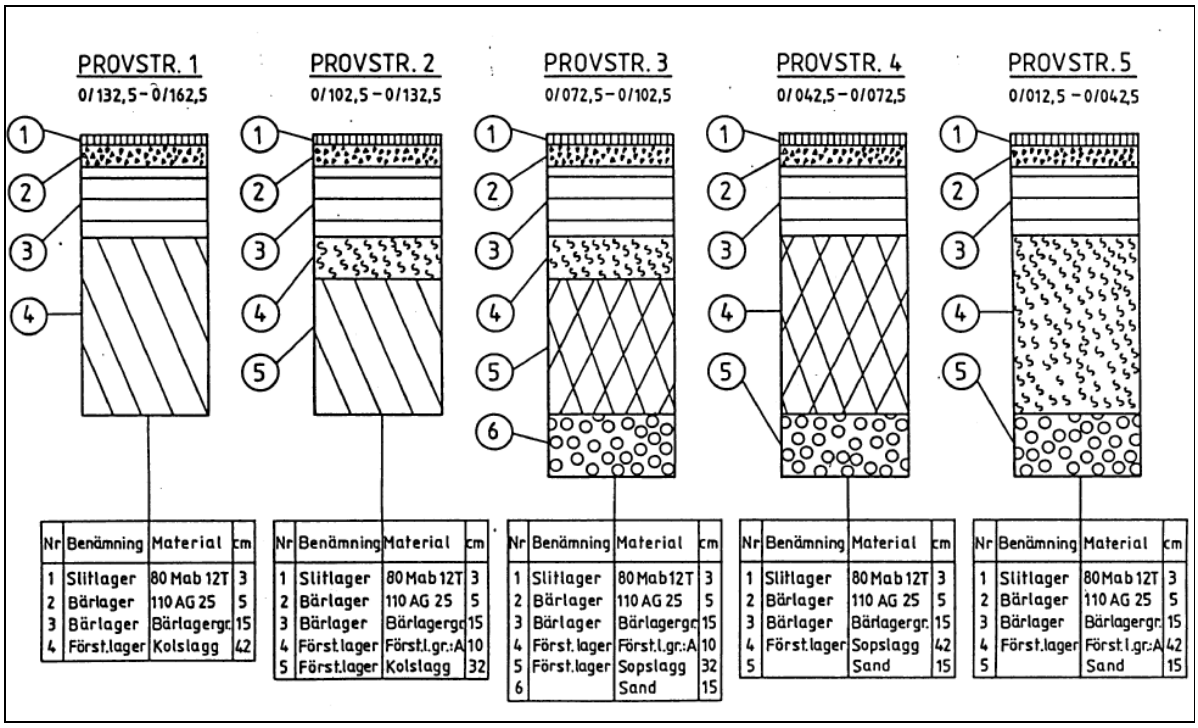
Förstärkningslagret i provsträcka 1 och 2 utgörs av kolbottenaska och i provsträcka 3 och 4 av slaggrus. Även vägslänterna vid dessa sträckor utgörs av kolbottenaska respektive slaggrus och har inte täckts av grus eller annat material. Provsträcka 5 utgör referenssträcka och är byggd med konventionellt material.

Provvägens utformning och resultat från de tidigare undersökningarna finns redovisade bland annat i en SYSAV-rapport (SYSAV, 1991).

För att kunna samla upp lakvatten från restprodukterna i vägen monterades tre olika uppsamlingsanordningar in i vägkroppen och i vägslänten.

Uppsamlingsanordningarna består av kluvna PVC-rör som anslutits till en brunn av cementrör. För att underlätta infiltration av vatten i vägkroppen och "forcera" lakvattenproduktionen, slitsades asfalten vid varje brunn.

Uppsamlingen av lakvatten fungerade inte som avsett, bland annat läckte vatten in bakvägen i brunnarna. Provtagning av lakvatten skedde under perioden juli 1988 – maj 1990. På grund av problemen med lakvatteninsamlingen så ”godkändes” endast ett fåtal av provtagningarna. Något lakvatten från vägkroppen vid provsträckorna med kolbottenaska och slaggrus erhölls inte alls under de två försöksåren.



Figur B3.1 Provväg med kolbottenaska, slaggrus och referensmaterial i Linköping. Uppbyggnad av provsträckor (Jacobsson & Viman, 1989). Kolslagg i figuren är en äldre beteckning och motsvarar kolbottenaska.

B3.2 Uppsamling av lakvatten i fält

Under sommaren 1998 har en förnyad lakvattenprovtagning gjorts. Syftet med denna (stickprov) 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, vilket medförde att det inte gick 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 ca en vecka. Från provsträckan med slaggrus och referensmaterial erhölls vardera ett prov, från provsträckan med kolbottenaska erhölls två separata prov.

Lakvattnen har analyserats med avseende på pH, elektrisk konduktivitet, klorid och metaller. Lakvattnen filtrerades (0,45 mm) innan analys. SGI:s laboratorium har ansvarat för provhantering och analys av pH och elektrisk konduktivitet. Analys av metall har gjorts med hjälp av ICP-teknik vid SGAB i Luleå. SGAB har också svarat för analys av kloridhalt.

Resultat

Av resultaten framgår att av huvudbeståndsdelarna är det i huvudsak halten kalcium, magnesium och svavel som är högre i lakvattnen från slaggrus och kolbottenaska än i lakvattnet från referensmaterialet. Av spårelementen är halten barium, kadmium, molybden och zink högre i lakvatten från slaggrus jämfört med referensmaterialets lakvatten. Motsvarande jämförelse för lakvatten från kolbottenaska och referensmaterial visar att halten av molybden och nickel är något högre för kolbottenaskan. I de allra flesta fall är haltskillnaderna små, dvs. halterna är i storleksordningen 2–3 ggr högre. Undantaget är halten kalcium i lakvatten från slaggrus som är ca 6 ggr högre än i lakvatten från referensmaterial, och halten klorid i lakvatten från kolbottenaska som är ca 25 ggr högre än i lakvatten från referensmaterialet. För flera ämnen är halterna högst i lakvatten från referensmaterialet. Det gäller bland annat halten aluminium, koppar och bly.

I *tabell B3.1* jämförs halterna från provtagningen i augusti 1998 med provtagningar gjorda 1988–1990. Mätdata från 1988–1990 är angivet dels som intervall, dels som ”mindre än” värden. Med undantag för analys av pH, elektrisk konduktivitet samt klorid där fler mätdata finns, så är de angivna intervallen endast base-

Tabell B3.1. Jämförelse lakvattenhalter från slänt med kolbottenaska, slaggrus och referensmaterial provtagna 1988-1990 samt 1998.

		Kolbottenaska		Slaggrus		Referensmaterial	
		1988-1990	aug.1998	1988-1990	aug.1998	1988-1990	aug.1998
pH		7,6-8,1	7,6-7,7	7,3-8,3	7,7	8,1	7,6
el. kond.	mS/m	22-229	26,5-30,1	21-245	42,5	134	27,7
Al	µg/l	4,5-13,8 (<60)	1855-2210	5,3-5,7 (<60)	328	5,9	3390
Cd	µg/l	<0,2 (<5)	0,084-0,10	<0,2 (<5)	0,45	<0,2 (<5)	0,22
Cr	µg/l	0,9-3,1 (<30)	2,8-3,1	2,1-3,1 (<30)	3,0	1,6 (<30)	3,8
Cu	µg/l	2,9-6,7 (<5)	11,4-16,2	4,0-5,6 (<5)	16,1	7-14 (<5)	40
Ni	µg/l	122 (<20)	4,2-5,4	1,6 (<20)	4,2	0,1 (<20)	4,1
Pb	µg/l	0,1 (<50)	9,3-10,0	0,44-0,47 (<50)	6,4	0,1 (<50)	23,9
Zn	µg/l	3,9-19 (<2)	52-53,1	7,6-14 (<2)	147	3,3-10,3 (<10)	69,7
Cl	mg/l	<1-520 81*	88-104	4-423 58*	5	310 310*	4

*avser medelvärde

rade på ett fåtal analyser (1–4 st). Vissa av de tidigare utförda analyserna gjordes med en något högre detektionsgräns, vilket medfört att halterna i några fall endast kunnat anges som ett ”mindre än”-värde. Detta finns angivet separat i tabellen nedan. Mätdata från 1998 baserar sig på ett stickprov. Från kolbottenaskan togs två stickprov.

Jämfört med lakvattenhalterna för tio år sedan, är halterna av bly, koppar och zink högre i de nu provtagna lakvatten för samtliga material. En förklaring kan vara att den lägre elektriska konduktiviteten kan ge högre halt partiklar i lakvattnet, vilket i sin tur kan ge höga metallhalter. Kloridhalten är lägre för 1998 års provtagning av slaggrus och referensmaterial. Överlag är skillnaderna mellan provtagningarna inte tydliga, och det går därför inte att dra några generella slutsatser om hur lakvattenhalterna har förändrats.

B3.3 Provtagning på material

Hösten 1998 togs prov på de gamla provsträckornas förstärkningslagermaterial. Avsikten var att undersöka om kornstorleksfördelningen och de miljötekniska egenskaperna hade ändrats.

Sex provgropar grävdes, två i vardera sträcka 1 (kolbottenaska), 4 (slaggrus) och 5 (konventionellt 0–200 material). För varje sträcka grävdes en provgrop i körbanan vid beräknat hjulspår och en i slänten. Motivet var att materialet i körbanan skulle ha utsatts för eventuell 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. 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 lakningsanalys. Provtagningen dokumenterades med foton och anteckningar.

B3.4 Lakningsförsök i laboratorium

Lakförsök i laboratorium har utförts enligt CEN-metoden på de tre materialen slaggrus, kolbottenaska och referensmaterial, dels provtaget i körbanan dels från vägslänten. Försöken är utförda som dubbelprov.

CEN-metoden beskrivs kortfattat i kap. 4.2.1.

Resultat

I texten redovisas utlakade mängder som medelvärde av dubbelproven.

Jämfört med referensmaterialet lakas, för både material i körbanan och från vägslänten, större mängder av främst kalcium (Ca), se *figur B3.2*, magnesium (Mg) och sulfat (SO_4) ut från slaggruset och kolbottenaskan. Detta stämmer även överens med resultaten från lakvattnet som uppsamlats i fält (avsnitt B3.2).

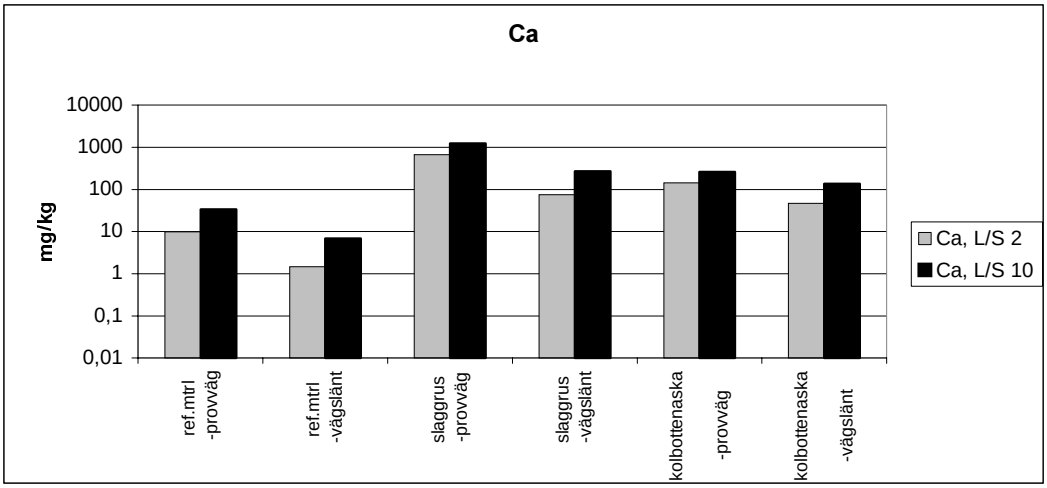
I figurerna används beteckningen provväg för material som provtagits i körbanan. I detta avsnitt används några termer som bör förklaras:

- huvudelement: vanligt förekommande grundämnen
- spårämnen: tungmetaller som normalt sett förekommer ganska sparsamt i vår omgivning
- salter: exempelvis klorid och sulfat

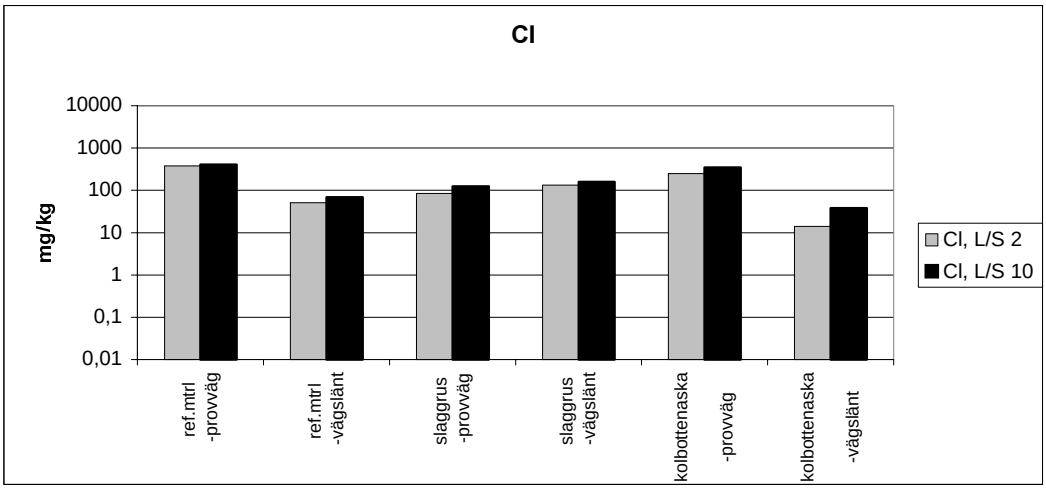
Av de tre olika materialen uppvisar slaggrus i körbanan den högsta utlakningen av flertalet av huvudelementen, undantag är järn (Fe), magnesium (Mg) och även klorid (Cl). Mängden Mg är dock högre än från referensmaterialet.

För referensmaterialet och kolbottenaskan är den utlakade mängden av klorid (Cl), *figur B3.3*, högre för körbanan än för vägslänten. Salter är mycket lättlakade och en viss del Cl har troligen redan hunnit laka ut i vägslänten.

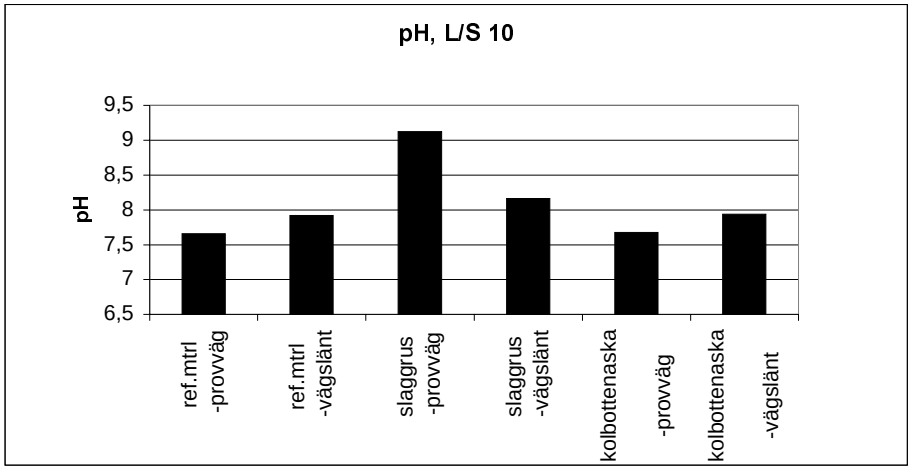
Asfaltsbeläggningen påverkar kontakten med luft. Därför är det en skillnad på pH-värdena mellan samma material som legat i körbanan, under asfalten, eller i vägslänten där karbonatpåverkan är större. Påverkan av luft gör att pH med tiden går mot 8,3 (en jämvikt ställer in sig mellan karbonat (CO_3^{2-}), vätekarbonat (HCO_3^-) och kolsyra (H_2CO_3)). Detta syns tydligt av resultatet där slaggrus, som har ett högt ursprungs-pH, uppvisar en hel pH-enhets skillnad mellan materialet från körbana och vägslänt. För referensmaterialet och kolbottenaskan, kan istället något förhöjda pH-värden noteras för materialet som legat i vägslänten. Detta påverkar naturligtvis utlakningen



Figur B3.2 Ackumulerad utlakad mängd Ca från CEN-lakning.



Figur B3.3 Ackumulerad utlakad mängd Cl från CEN-lakning.



Figur B3.4 pH vid L/S 10.

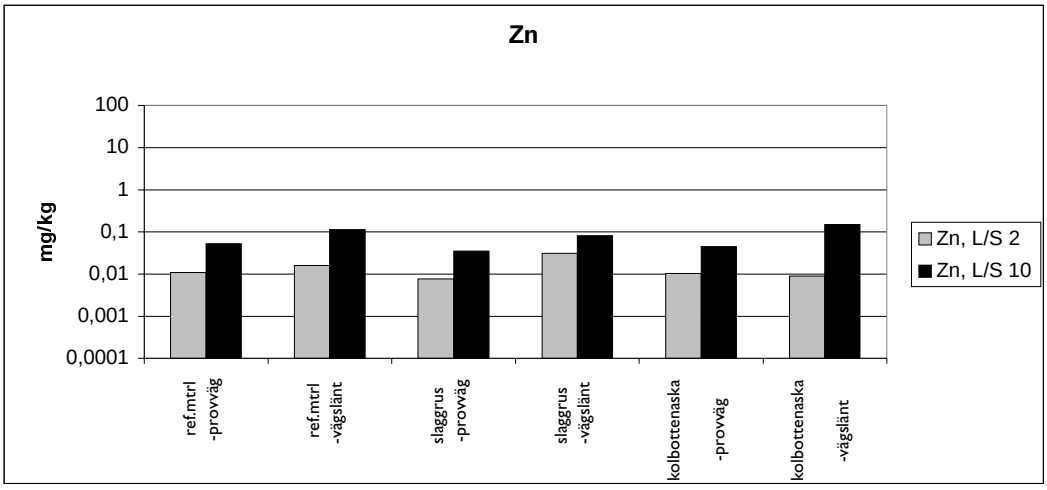
av spårämnen, som är beroende av både pH och redox. Det pH-värde som noterats för kolbottenaskan är lägre än förväntat.

Beträffande utlakningen av spårelement är det svårt att dra några entydiga slutsatser. Exempelvis så är skillnaderna mellan de olika materialen och dess härkomst små för den utlakade mängden av zink (Zn), se *figur B3.5*. Den ackumulerade utlakningen vid L/S 10 är dock genomgående högre i material från vägslänten. Skillnaderna är små även för de utlakade mängderna av kadmium (Cd). För Cd ligger flera av de analyserade proven under detektionsgränsen. Detta gäller bland annat samtliga prov för kolbottenaska i vägslänt.

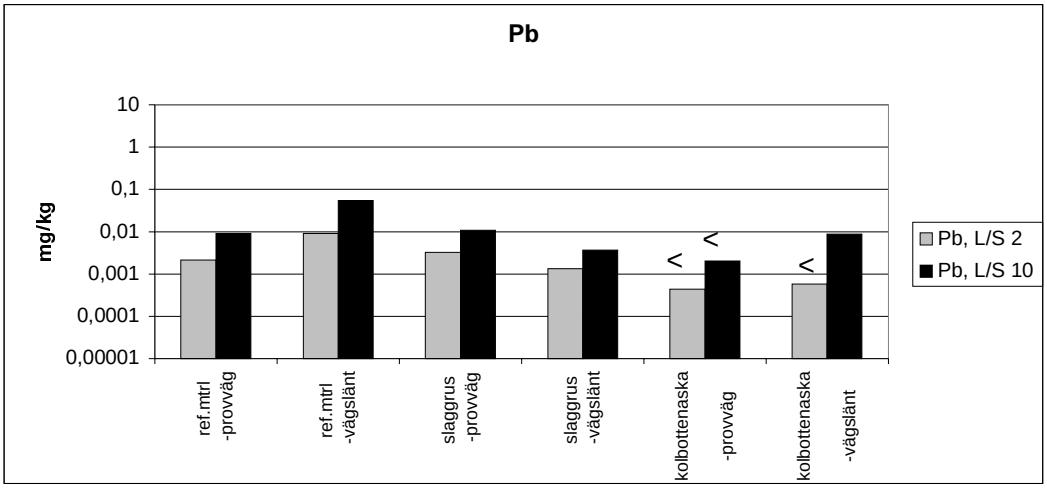
För bly (Pb), *figur B3.6*, är den utlakade mängden högre i vägslänten för referensmaterialet och för kolbottenaskan. Den utlakade Pb-mängden för slaggrus är större i körbanan. Observera att den utlakade mängden från material från vägslänten är störst för referensmaterialet.

Kolbottenaska uppvisar något lägre utlakad mängd krom (Cr), *figur B3.7*, för material från vägslänten, vilket kan bero på att materialet har högre pH-värde i slänten. På omvänt sätt kan den högre utlakningen i material från vägslänten motiveras för slaggruset, som uppvisar ett lägre pH-värde i slänten. Denna teori stämmer dock inte överens vad gäller referensmaterialet.

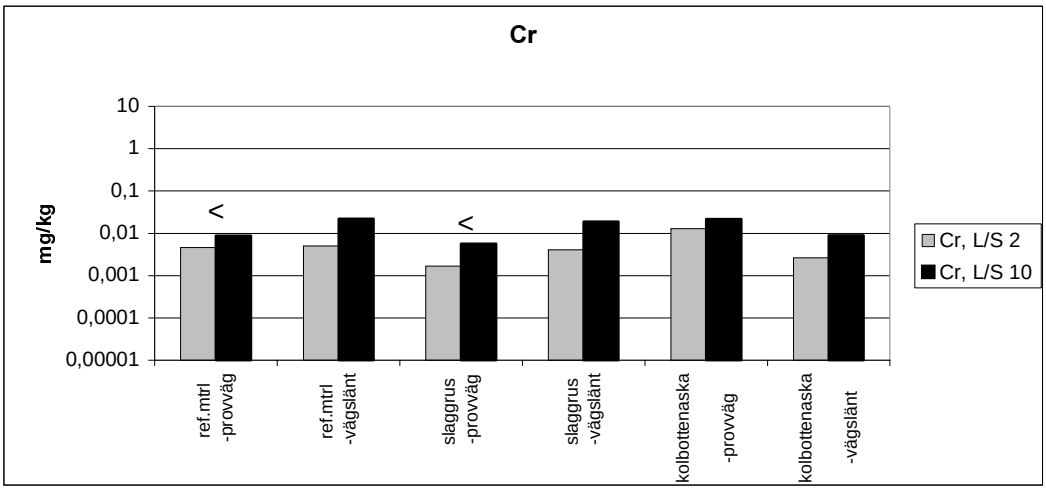
Redoxpotentialen är ett mått på om förhållandena är reducerande (utan tillgång av syre) eller oxiderande (i tillgång av syre). Redox varierar med pH och en jämförelse av redox som funktion av pH, för L/S = 10, visar att det enda materialet som uppvisar reducerande förhållande är slaggruset i vägslänten. Detta skulle kunna medföra en lägre utlakad mängd för materialet från vägslänten än från körbanan. Troligen är redoxskillnaden för liten, för det ger inget tydligt utslag när resultaten jämförs. I övrigt bedöms de andra materialen oxiderade oavsett om de härstammar från körbanan eller från vägslänten, något mindre tydligt för slaggruset i körbanan.



Figur B3.5 Ackumulerad utlakad mängd Zn från CEN-lakning.



Figur B3.6 Ackumulerad utlakad mängd Pb från CEN-lakning.



Figur B3.7 Ackumulerad utlakad mängd Cr från CEN-lakning.

Om materialen betraktas var för sig kan vissa trender noteras. Huvudelementen och salter lakas ut i större mängder från materialet från körbanan än från vägslänten, medan spårämnen tenderar att laka ut i större mängder från materialet från vägslänten.

Referensmaterial
Framför allt resultaten för referensmaterialet varierar ganska mycket, vilket visar vikten av att dubbelprov genomförs. Utlakade mängder av huvudelement, sulfat och klorid är högre i material från körbanan jämfört med från vägslänten, med undantag av järn (Fe), natrium (Na) och aluminium (Al), som är något högre från vägslänten. Klorid (Cl) från körbanan lakas ut i störst mängd, 407 mg/kg vid L/S 10. Förklaringen till detta är att salterna generellt lakas ut mycket lättare än spårämnen.

Av spårämnen lakas generellt större mängder ut från material från vägslänten än från körbanan. Koppar (0,19 mg Cu/kg), zink (0,11 mg Zn/kg) och barium (0,11 mg Ba/kg) lakas ut i störst mängder vid L/S 10.

Slaggrus
Materialet i körbanan lakas ut på större mängder av huvudelement och sulfat (SO_4) än materialet i vägslänten. För Cl är skillnaden marginell. Störst mängd lakas ut av sulfat (3110 mg SO_4/kg) och kalcium (1231 mg Ca/kg) vid L/S 10.

När det gäller utlakade mängder av spårelement är de något högre från materialet från vägslänten än från körbanan utom av kobolt (Co), nickel (Ni) och bly (Pb), som lakas ut något mer från körbanan. Störst mängder lakas vid L/S 10 ut av barium (0,77 mg Ba/kg), koppar (0,16 mg Cu/kg från båda materialen) och zink (0,08 mg Zn/kg).

Kolbottenaska
Av huvudelement, sulfat och klorid lakas störst mängder ut från materialet från körbanan jämfört med från vägslänten, utom av järn (Fe) och aluminium (Al) som lakar ut mer från vägslänten. Störst mängd lakas ut av sulfat (496 mg SO4/kg) och klorid (350 mg Cl/kg) vid L/S 10.

Utlakade mängder av olika spårämnen är inte entydigt högre från någon av placeringarna. Högst utlakad mängd uppvisar barium (Ba) från båda materialen (0,33 mg/kg från materialet från körbanan samt 0,20 mg/kg från vägslänten). Samma storleksordning av utlakad mängd når även zink (Zn) från materialet från vägslänten (0,15 mg/kg).

Sammanfattning

Det är svårt att dra några generella slutsatser baserat på dessa lakförsök.

För flertalet av de utlakade spårämnena, t ex Cd, Cr, Ni och Zn, är inte skillnaderna så stora mellan de utlakade mängderna från de tre materialen. Utlakningen av Cu är högst från slaggruset samt från referensmaterialet i vägslänten, medan den högsta utlakade Pb-mängden noterades för referensmaterialet som låg i vägslänten. Ca, Mg och SO_4 lakar ut i större mängd från restprodukterna än från referensmaterialet.

Generellt för de tre undersökta materialen gäller att huvudelementen och salter lakar ut i större mängder från materialet från körbanan än från vägslänten, medan spårämnen tenderar att laka ut i större mängder från materialet från vägslänten.

Slaggruset i vägslänten är det enda material som uppvisar reducerande förhållande. I övrigt bedöms materialen ha tillgång till syre. Materialen i vägslänten uppvisar tecken på karbonatisering, d v s att pH-värdet har påverkats av luftens koldioxid.

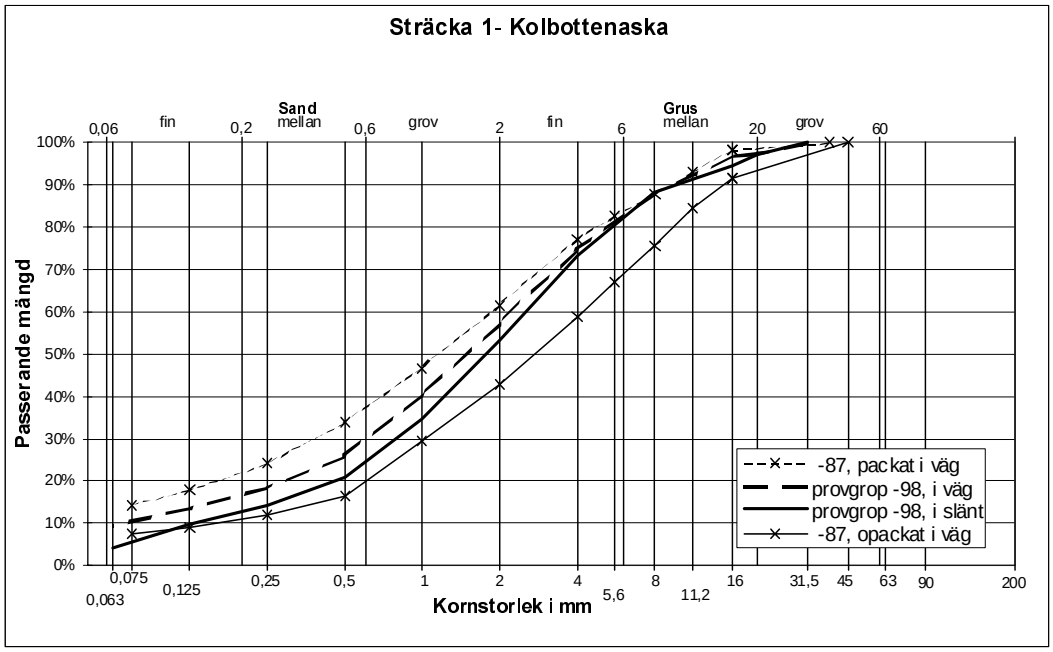
B3.5 Analys av kornstorleksfördelning

I *figur B3.8* visas kornstorleksfördelningar för de upptagna materialen. För jämförelse är även siktkurvorna från undersökningarna 1987 inritade.

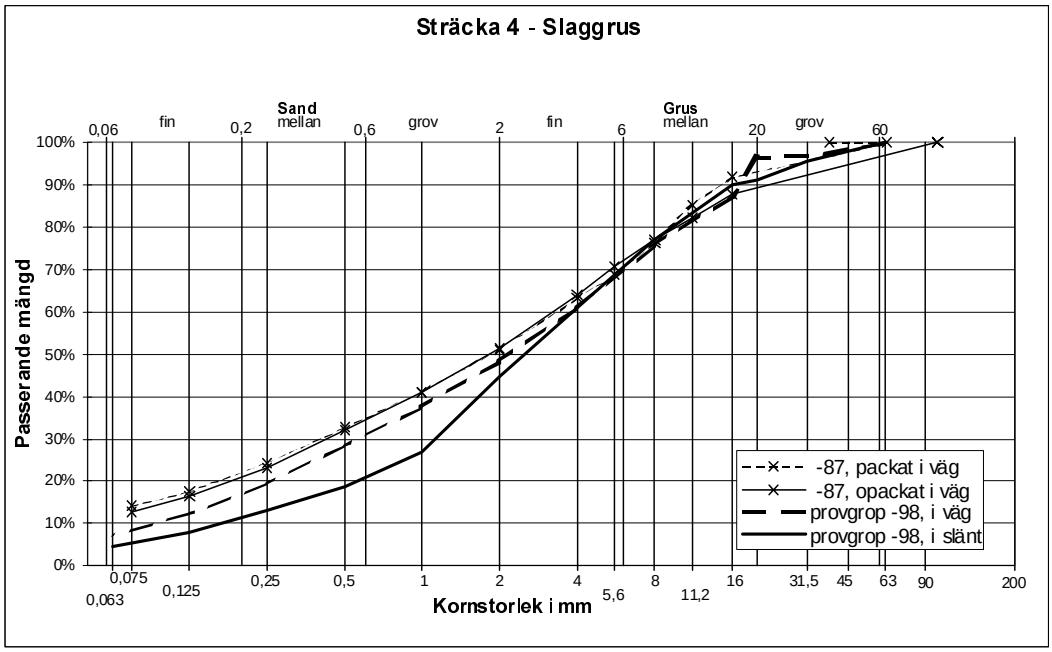
Det är svårt att dra några slutsatser om eventuell krossning av materialet utifrån siktningarna, jämför *figur B3.8–B3.10*. För kolbottenaskan ligger kornfördelningskurvorna efter de nu utförda siktningarna högre än kurvan för det opackade materialet innan det lades i vägen 1987 (dvs större andel finmaterial), men lägre än det material som packats i vägen 1987. För slaggruset ligger kurvorna efter de nu utförda siktningarna lägre än såväl opackat som packat slaggrus siktat 1987. Även för det konventionella 0–200 materialet ligger de nu utförda 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 nu utförda siktningarna har materialet inte tvättsiktats, vilket gjordes vid siktningarna 1987. Då materialet inte 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 beror dock sannolikt på att materialens kornstorleksfördelning varierar inom respektive provsträcka och provtagningen skett inom olika delar av provsträckan.

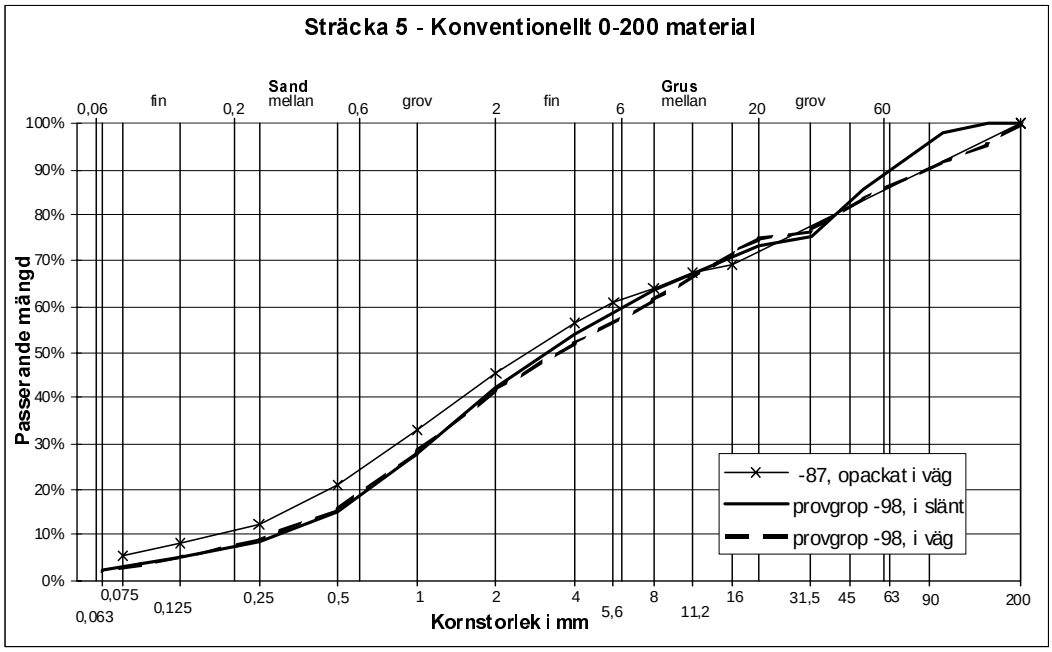
De nu utförda provtagningarna i körbanan respektive i slänten, vilka är tagna relativt nära varandra, tyder dock på att en viss krossning av materialet i körbanan kan ha skett. Kurvorna för såväl kolbottenaskan som slaggruset taget i körbanan ligger något högre än motsvarande kurvor från material taget i slänten. För det konventionella 0–200 materialet visar kurvorna ingen direkt skillnad mellan materialet taget i körbanan eller i slänten.



Figur B3.8 Kornstorleksfördelning 1987 och 1998 - sträcka 1 Kolbottenaska.

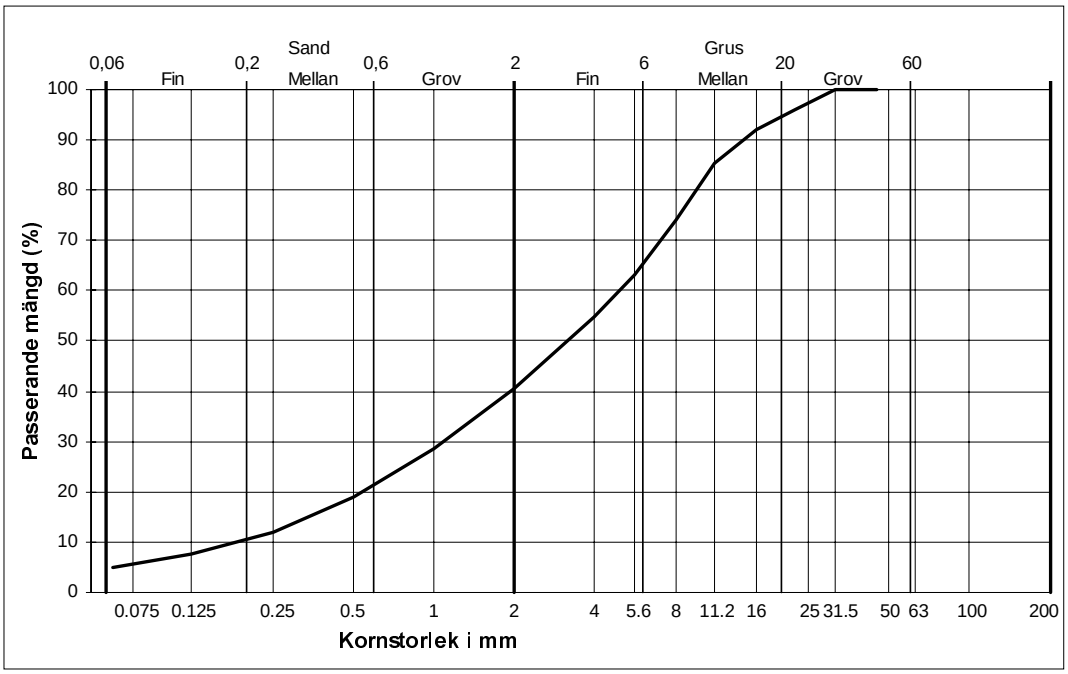


Figur B3.9 Kornstorleksfördelning 1987 och 1998 - sträcka 4 Slaggrus.

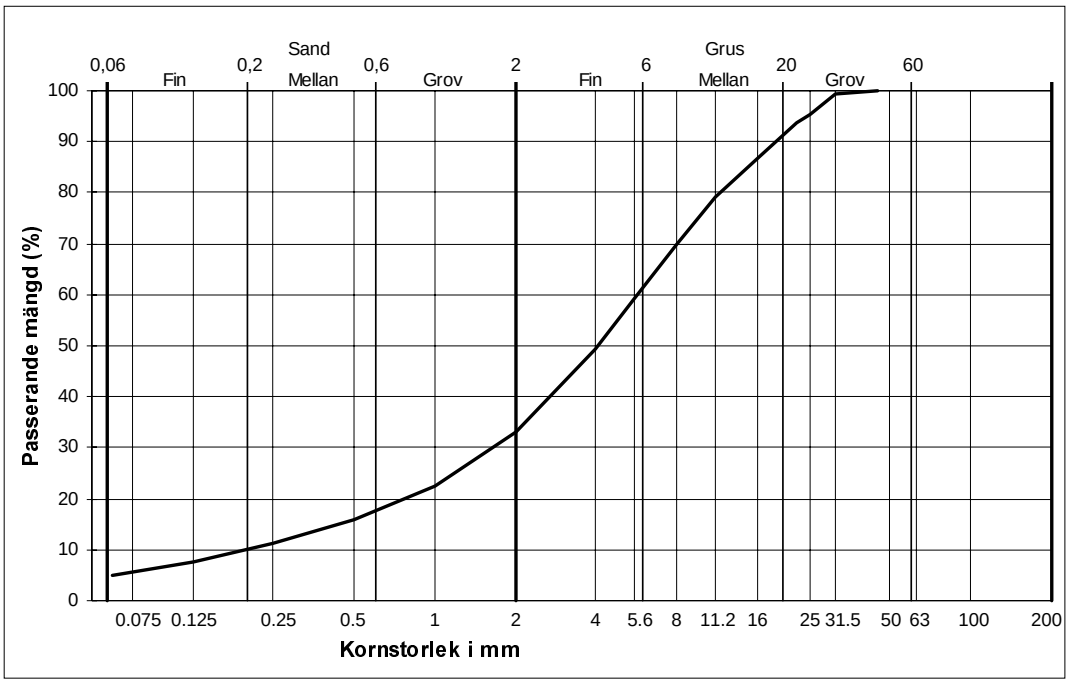


Figur B3.10 Kornstorleksfördelning 1987 och 1998 - sträcka 5 Konventionellt 0-200 material.

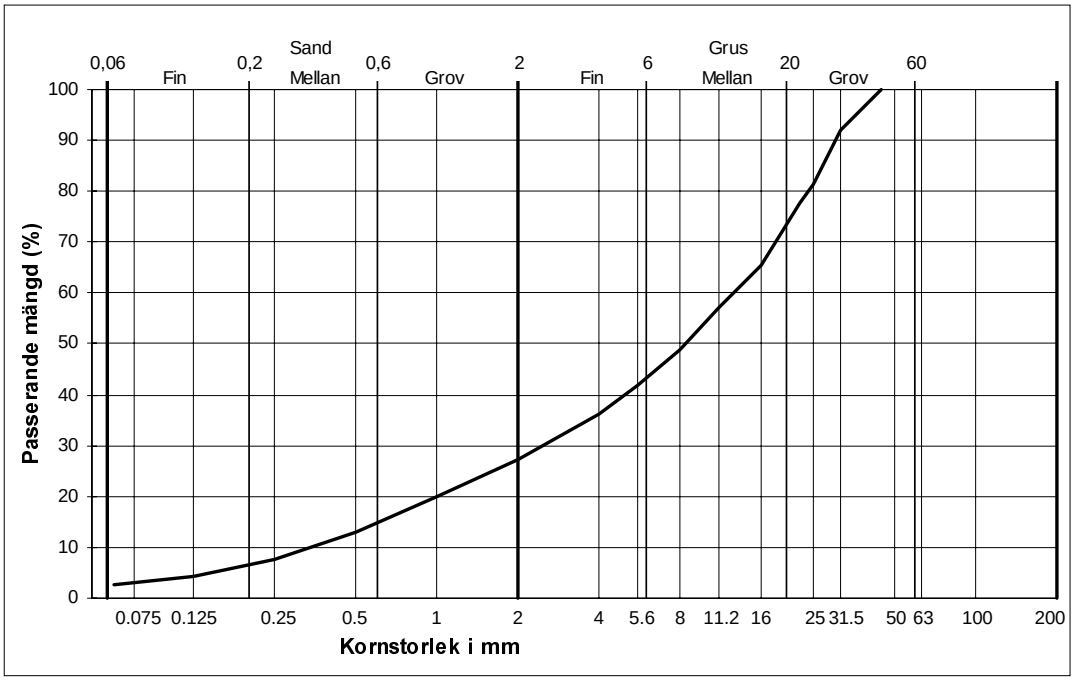
Bilaga 4 – Kornstorleksfördelning hos provmaterialen vid leverans



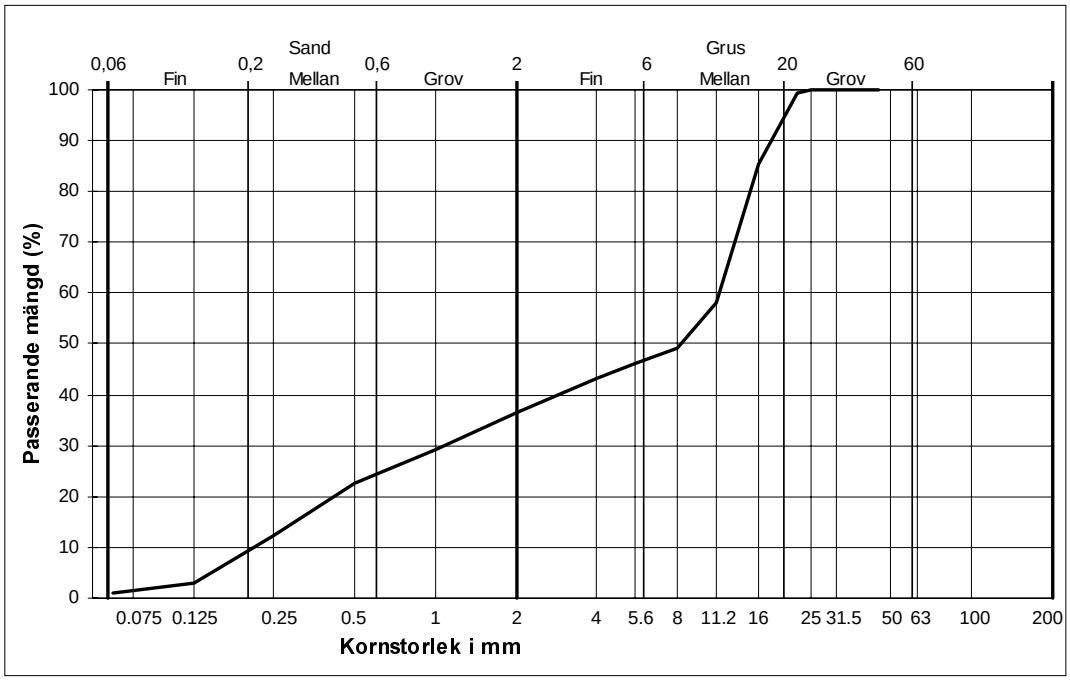
Slaggrus.



Kolbottenaska.



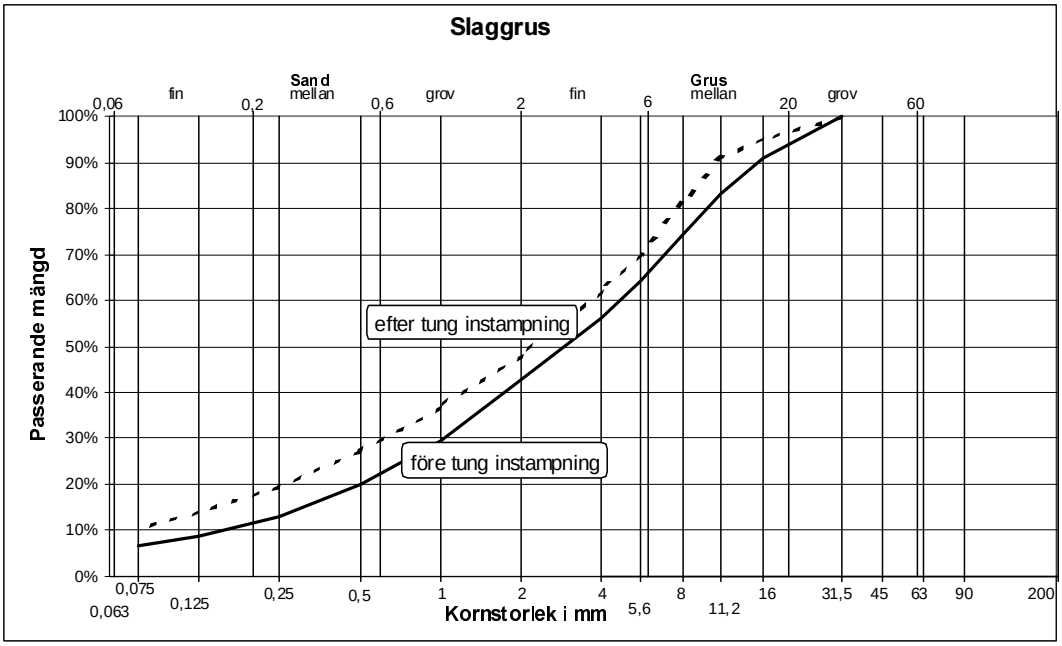
Krossad betong.



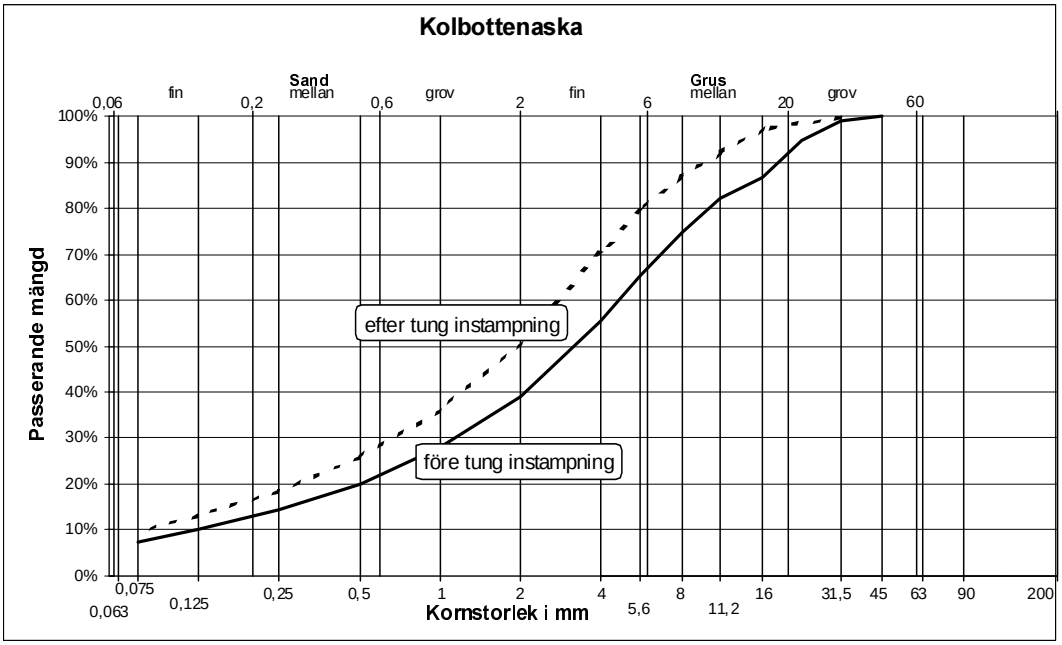
Referensmaterial.

Bilaga 5 – Kornstorleksfördelning före och efter packning

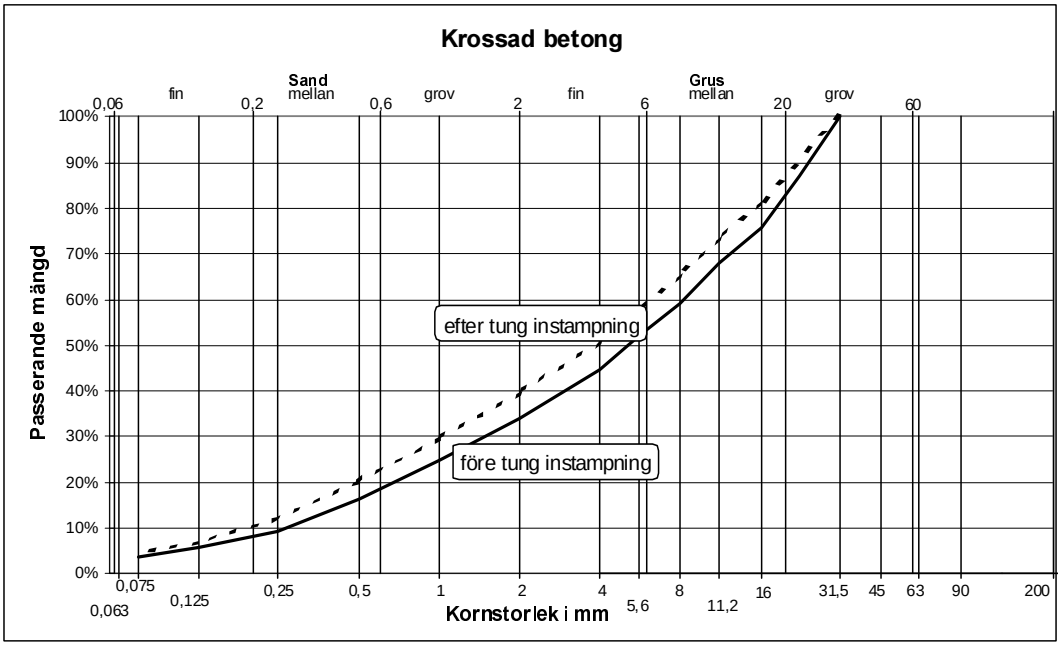
B5.1 Kornstorleksfördelning före och efter tung instampning för enskilda material



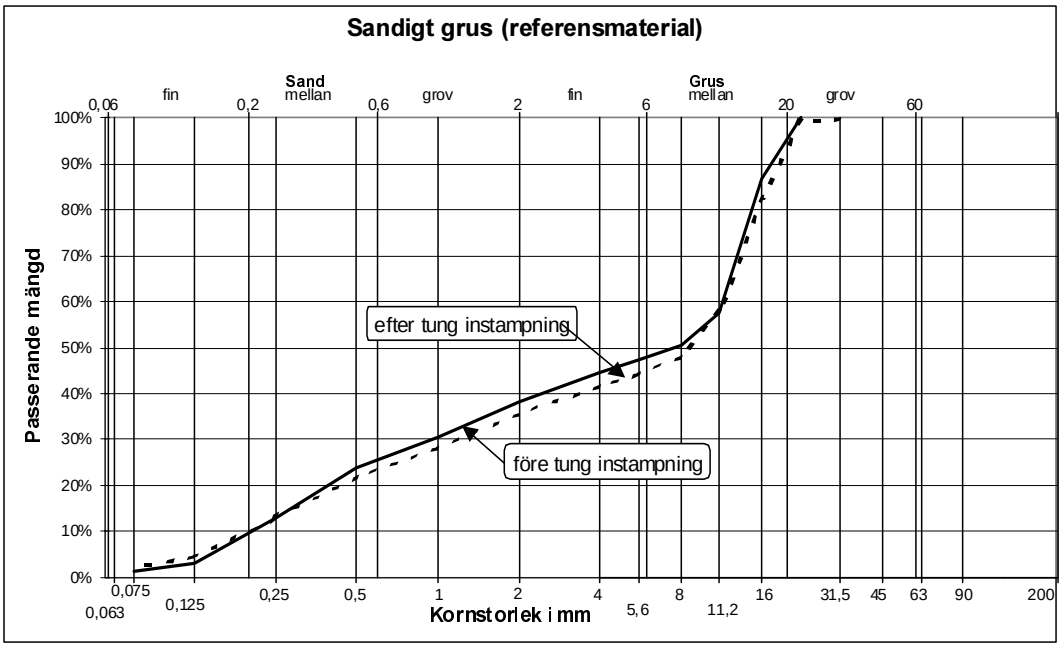
Figur B5.1 Kornstorleksfördelning före och efter tung instampning – Slaggrus.



Figur B5.2 Kornstorleksfördelning före och efter tung instampning – Kolbottenaska.

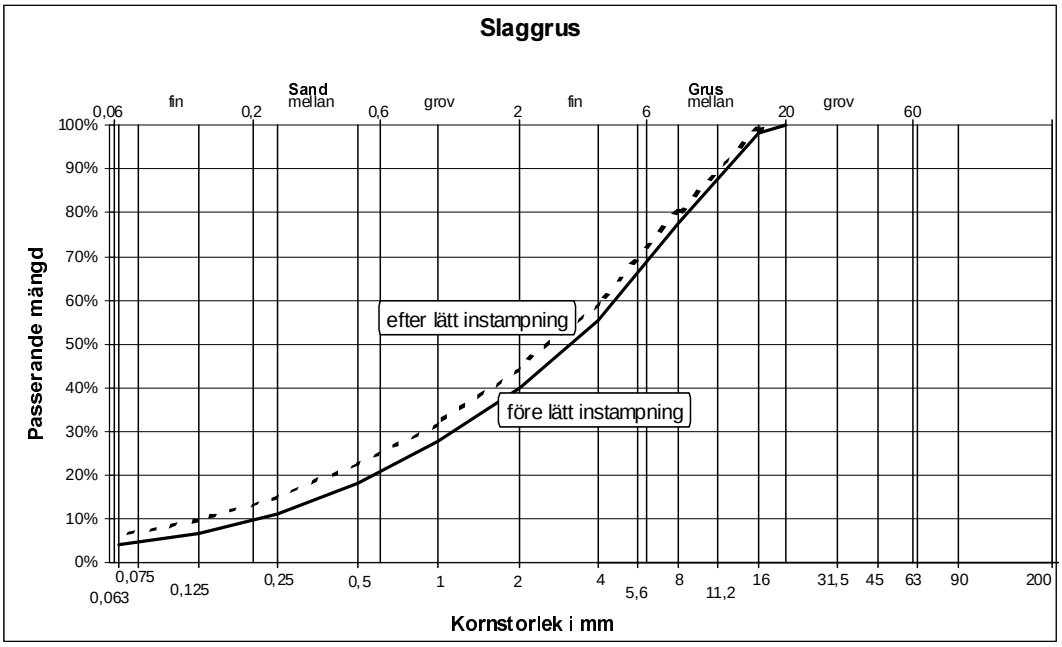


Figur B5.3 Kornstorleksfördelning före och efter tung instampning – Krossad betong.

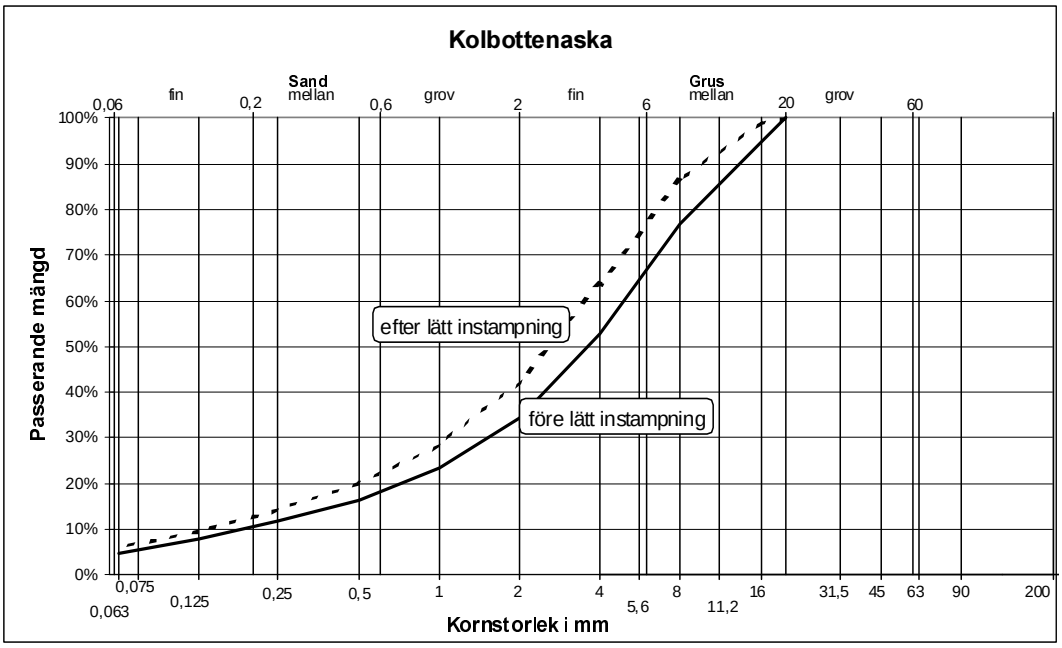


Figur B5.4 Kornstorleksfördelning före och efter tung instampning – Referensmaterial.

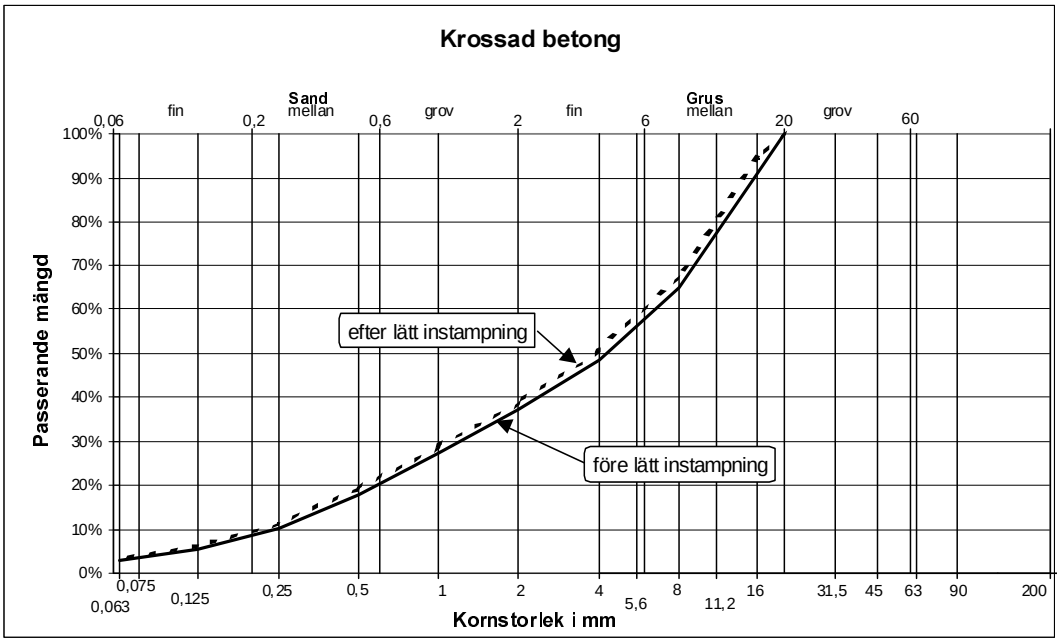
B5.2 Kornstorleksfördelning före och efter lätt instampning för enskilda material



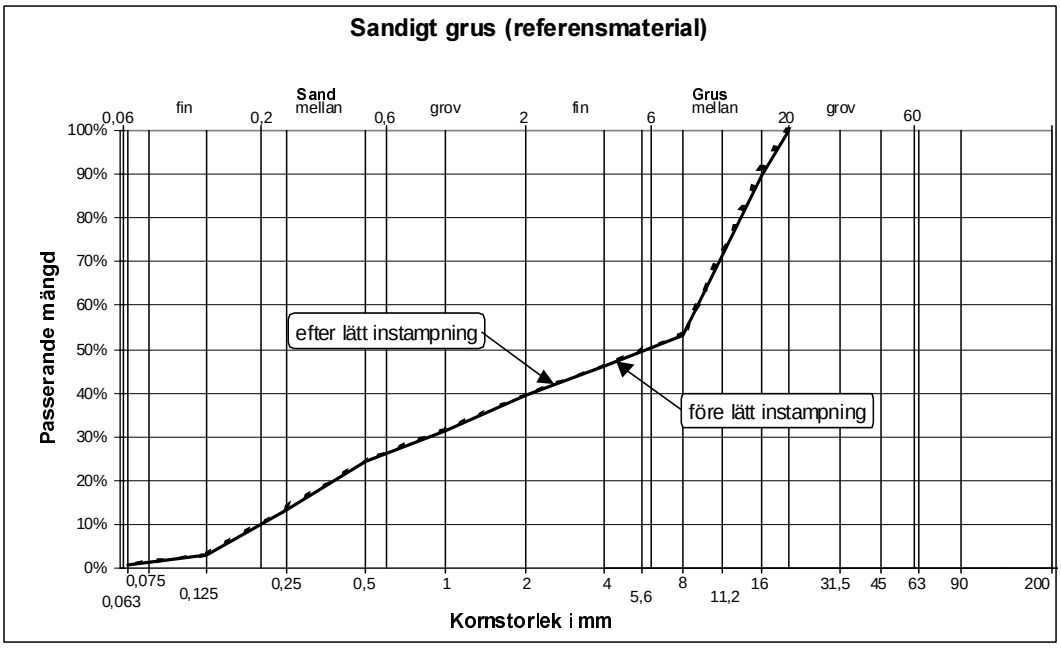
Figur B5.5 Kornstorleksfördelning före och efter lätt instampning – Slaggrus.



Figur B5.6 Kornstorleksfördelning före och efter lätt instampning – Kolbottenaska.



FigurB5.7 Kornstorleksfördelning före och efter lätt instampning – Krossad betong.



Figur B5.8 Kornstorleksfördelning före och efter lätt instampning – Referensmaterial.

Litteratur- och referenslista

Andersson, H och Carlsten, P. (1996). *Alternativa material i vägbankar, etapp 1*. Vägverket (arbetsrapport 1996-01-31).

Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hartlén, J., Hjelmar, O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., van der Sloot, H.A., Vehlow, J. (1997). *Municipal Solid Waste Incinerator Residues*. The International Ash Working Group (IAWG). Studies in Environmental Science 67. Elsevier, Amsterdam.

Directoraat-Generaal Milieubeheer (1995). *Bouwstoffenbesluit bodem – en oppervlaktewaterenbescherming*. Staatsblad 1995, 567.

EFO Energiaskor AB (1998). *Energiaskor för väg- och anläggningsändamål. Miljöaspekter*.

Fällman, A.-M. (1997). *Characterisation of residues. Release of contaminants from slags and ashes*. Dissertation No. 486. Linköping University.

Fällman, A.-M. & Aurell, B. (1996). *Leaching tests for environmental assessment of inorganic substances in wastes, Sweden*. Science of the Total Environment, 178, p.71-84.

Fällman, A.-M. & Hartlén, J. (1994). *Kvalitetssäkring av sorterad bottenaska från avfallsförbränning. System för provtagning och laktester*. Stiftelsen Reforsk FoU 108.

Johansson, H G., Ydrevik, K. och Arvidsson, H. (1996). *Krossad betong – ett material för användning i vägar och gator*. Statens väg- och transportforskningsinstitut. VTI notat nr 1-1996.

Hartlén, J. och Elander, P. (1986). *Restprodukter från avfallsförbränning. Kemiska och fysikaliska egenskaper*. Statens geotekniska institut. SGI Varia 172.

Höbeda, P. och Bünsov, L. (1979). *Slagg från förbränning av hushållsavfall som vägmaterial*. Statens väg- och trafikinstitut. VTI Meddelande nr 180.

Höbeda, P., Jacobsson, T. och Viman, L. (1985). *Undersökning av förbränningsrest från SYSAV, Malmö, genom laboratorie- och provvägsförsök*. Statens väg- och trafikinstitut. VTI Meddelande nr 413.

Karlsson, R och Hansbo, S. (1992). *Jordarternas indelning och benämning*. Geotekniska laboratorieanvisningar, del 2. Byggforskningsrådet.

Kullberg, S. (1990). *Slagganvändning – teknik och miljö. Miljöteknisk utvärdering av provvägar vid användning av slaggrus och kolbottenaska i Malmö och Linköping 1988 – 1990*. Statens geotekniska institut. SGI Varia 321.

Kälvesten, E. (1996). *Miljömässig karakterisering av vägbyggnadsmaterial*. Examensarbete på Kemiprogrammet, Matematisk-Naturvetenskaplig utbildning, Linköpings Tekniska Högskola utfört på Statens geotekniska institut. SGI dnr 1-9601-026.

Larsson, R. (1982). *Jords egenskaper*. SGI Information 1. Statens geotekniska institut.

Larsson, R. (1989). *Hållfasthet i friktionsjord*. SGI Information 8. Statens geotekniska institut.

Lehmann, N.K.J., Hjelmar, O., Wahlström, M., Hrolfsdottir, H.B., Nesgård, B.S., Carling, M. (1997). *Oversigt over nordiske metoder til miljømæssig testning af affald til genbrug*. Nordtest-projekt 1312-96. VKI, Danmark.

Lundgren, T. & Hartlén, J. (1991). *Slagg från avfallsförbränning, Teknik och miljö*. Stiftelsen REFORSK. FoU nr 61.

Möller, B. och Nilsson, G. (1983). *Tekniska egenskaper hos restprodukter från kolförbränning – en laboratoriestudie*. Statens geotekniska institut. Rapport No 21.

Naturvårdsverket (1996). *Deponering av avfall. Förslag till allmänna råd*. Naturvårdsverket Rapport 4610.

Rogbeck, J och Folkesson, A. (1995). *Slaggrus - ett material i kretsloppet*. Bygg & Teknik. 1995 vol 4.

Rogbeck, J. and Hartlén, J. (1996). *Ash Gravel – A Material for Recycling*. Waste Management. Vol 16. Nos 1-3. Pp 109-112.

Rogbeck, J. and Knutz, Å. (1996). *Coal Bottom Ash as Light Fill Material in Construction*. Waste Management. Vol 16. Nos 1-3. Pp 125-128.

Rogbeck, J, Carling, M och Ouacha, M. (1997). *Användning av restprodukter i vägbyggnad*. Vägverket (förhandskopia arbetsrapport 1997-03-13).

RVF (Svenska Renhållningsverksföreningen) (1998). *Slaggrus. Miljömässiga och materialtekniska egenskaper*.

Schouenborg, B., Persson, L. (1995). *Kvalitetsklassning av bergarter, N. Stockholm, Del 2*. SP Rapport 1995:49

Sjöholm, M, Carlsten, P och Elander, P. (1994). *Bestämning av permeabilitet hos restprodukter och jord, in situ och på laboratorium*. Nordtest rapport 254.

Stenberg L. (1997). *Frystest för dimensionering av tjälskydd. Studier avseende a-värdets definition*. Statens väg- och transportforskningsinstitut. VTI notat nr 42-1997.

Stenberg, F. & Schouenborg, B. (1997). *Provningsmetoder anpassade för återvinningsprodukter - Kornstorleksfördelning*. SP RAPPORT 1997:08

SYSAV (1991). *Slagg från avfallsförbränning. Teknik och miljö. Miljöteknisk utvärdering av provvägar i Malmö och Linköping 1988-1990*. Delrapport 8. Jan 1991. Av Statens geotekniska institut.

SYSAV, Delrapport 1, (1997). *Slagg från avfallsförbränning, Tekniska egenskaper hos packat slaggrus*.

Sällfors, G och Andréasson, L. (1986). *Kompressionsegenskaper*. Geotekniska laboratorieanvisningar, del 10. Byggforskningsrådet.

CEN/TC 154 N484 (1998). *Final Technical Report of the CEN(TC 154 Ad Hoc group for Recycled Aggregates*, september 1998.

Tigne, L., Ågren, E. och Berg, I. (1983). *Återanvändning av kolaska och avsvavlingsprodukter från mindre förbränningsanläggningar*. Kol Hälsa Miljö. Teknisk rapport nr 92.

VTI:s och KFB:s forskardagar (1997). Rapportsammanställning av föredrag vid forskardagarna i Linköping 1997-01-08—09. Statens väg- och transportforskningsinstitut, Linköping.

Vägverket, (1994). *Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper*. Publ 1994:15. Allmän teknisk beskrivning.

Wiesel, C-E, Hansbo, S och Broms, B. (1985). *Skjuvhållfasthet*. Geotekniska laboratorieanvisningar, del 9. Byggforskningsrådet.

Ydrevik, K., Hellström, V. och Molin, C (1996). *Krossad betong som vägbyggnadsmaterial. Samband mellan cylindertryckhållfasthet och vägtekniska egenskaper*. Statens väg- och transportforskningsinstitut. VTI notat nr 46-1996.

Ydrevik, K. (1996). *Krossad rivningsbetong som bär- och förstärkningslager i gatubyggnad. McDonalds hamburgerrestaurang i kvarteret Elstolpen i Västerås*. Statens väg- och transportforskningsinstitut. VTI notat nr 54-1996.

Ydrevik, K. (1997). *Utlåtande beträffande krossad vägbetongs mekaniska egenskaper och lämplighet som användning i bär- och förstärkningslager*. Statens väg- och transportforskningsinstitut. VTI utlåtande nr 644.

Standarder och motsvarande:

- Vägverket. (1994). VÄG 94
- SS 02 71 16: Glödgningsförlust och vattenkvot
- SS 02 71 15: Korndensitet
- SS 02 71 23: Kornfördelning (siktning, våtsiktning och sedimentationsanalys)
- SS 02 71 09, Geotekniska provningsmetoder – Packningsegenskaper – Laboratoriepackning
- VV Metodbeskrivning 36:1977. Jordmaterial. Tung instampning. Publ. 1987:158. Vägverket. Borlänge.
- VV Metodbeskrivning 607:1994. Bestämning av maximal densitet med vibrobord. Jord- och vägbyggnadsmaterial. Publ. 1994:16. Vägverket. Borlänge.
- VV Metodbeskrivning 609:1994. Bestämning av tjällyftningsparametrar. Jord- och vägbyggnadsmaterial. Publ. 1994:44. Vägverket. Borlänge.

- NT ENVIR 003. Column test (kolonntest)
- NT ENVIR 002. Availability test (tillgänglighetstest)
- prEN 12457. CEN-lakning (2-stegs kontrolltest)
- FAS Metod 208. Korndensitet
- FAS Metod 210. Sprödhet
- SP Metod 758. Korndensitet
- SS-EN 932-1. Provtagning
- SS-EN 933-3. Flisighetsindex
- EN 933-4. Kornformsindex
- EN 1097-2. Sprödhet (Los Angelestal)
- EN 1097-1. Nötningsmotstånd (micro-Deval)
- prEN 1367-1. Frostbeständighet
- prEN 1097-6. Bestämning av korndensitet och vattenabsorption
- EN 933-3. Bestämning av kornform - Flisighetsindex
- prEN 933-4. Bestämning av kornform – LT-index
- SP Metod 01-46-77. Kompressibilitet (modifierad)
- Värmekonduktivitet. BVH 585.11 för lättfyllning för järnvägsbank
- prEN 12524. Värmekonduktivitet