

1128

SBUF-projekt nr 11128



Återvunnen betong

**Krossningsmetodens inverkan
på den krossade betongens kvalitet**

Christer Molin
Kjell Larsson
Lars-Olof Dahl

Förord

Studien har finansierats av SBUF. Projektnummer är 11128.

LODAB har stått för krossning med OM käftkross och Segerströms för krossning med Hartl rotationskross.

Stockholm den 30 april 2003

Projektledare

Lars-Olof Dahl (LODAB)

Utredningsmän

Christer Molin (Ing.firma Christer Molin)

Kjell Larsson (Kellek Konsult)

Innehållsförteckning

| | |
|--|----|
| Förord..... | 2 |
| Sammanfattning | 4 |
| Bakgrund och motiv..... | 5 |
| Syfte | 5 |
| Krossningsmetoder..... | 5 |
| Provad betong..... | 6 |
| Litteraturgenomgång | 6 |
| Resultat av vägtekniska provningar | 7 |
| Utvärdering och diskussion..... | 8 |
| Litteratur..... | 10 |

Bilagor

SP-Rapport F210585, tryckhållfasthet på utborrade betongcylindrar
VTI Rapport nr 02-056, prov av krossad betong
Principskiss avseende rotations- och käftekross
Fotografier

Sammanfattning

Rivning av betong, särskilt betonghus, har de senaste åren ökat, exempelvis många hyreshus belägna i mindre attraktiva orter. Däremot har inte återanvändningen av krossad betong ökat så mycket som förväntat. Samstämmiga erfarenheter pekar på mycket god återvinningspotential.

En fråga, som inte alls har studerats i utförda tillgängliga undersökningar, är huruvida betongkrosstyp har betydelse för restproduktens kvalitet. Nedbrytningsmekanismerna är olika och därför kan man misstänka att kvaliteten påverkas, till exempel avseende mikrosprickor och konform. Man skiljer huvudsakligen mellan rotationskross/slagkross och käftkross.

Det har vid flera tillfällen i samband med upphandling av rivnings- och återvinningsentreprenader varit avgörande vilken typ av kross som entreprenören kunnat erbjuda.

Fyra olika krosstyper har studerats material från rotationskross med liten och stor spaltöppning samt material från käftkross med samma spaltöppningar.

De utförda vägtekniska provningarna visar att alla fyra typerna av krossad betong har erhållit mycket bra resultat, väl i klass med typiskt referensmaterial av krossad sten. Det kan delvis förklaras av att den för försök valda tillgängliga betongen har en relativt hög kvalitet. Vår erfarenhet är dock att den är förvånansvärt vanlig i betongbyggnadsbeståndet, vilket förmodligen bland annat kan förklaras av hållfasthetstillväxt under lång tid.

Man kan konstatera att betong från käftkross med stor spaltöppning ger de bästa mekaniska egenskaperna. Käftkrossen uppvisar genomgående något bättre värden.

För övrigt syns spaltöppningen ej ha någon större betydelse, möjligtvis för frostbeständigheten. Större spaltöppning tycks ge något lägre frostbeständighet.

De få uppgifter som går att finna i litteraturen, antyder att käftkrossen skulle ge sämre material. Detta förklaras bland annat med att mikrosprickor uppstår lättare vid hoptryckning än vid slag. Vidare sägs att rotationskrossen minskar svagheter i ursprungsmaterialet. Vi har inte lyckats finna faktiska belägg för dessa påståenden.

Bakgrund och motiv

Rivning av betong, särskilt betonghus, har de senaste åren ökat, exempelvis många hyreshus belägna i mindre orter. Däremot har inte återanvändningen av krossad betong ökat så mycket som förväntat. Detta gäller särskilt Stockholmsområdet. Ett antal utvecklingsprojekt har genomförts de senaste åren, finansierade av SBUF och Boverket. Samstämmiga resultat pekar på mycket god återvinningspotential. Mest uppenbar är möjligheten för markkonstruktion, till exempel vägunderbyggnad.

En fråga, som inte alls har studerats i utförda undersökningar, är huruvida betongkrosstyp har betydelse för restproduktens kvalitet. Nedbrytningsmekanismerna är olika och därför kan man misstänka att kvaliteten påverkas, till exempel avseende mikrosprickor och konform. Man skiljer huvudsakligen mellan rotationskross/slagkross och käftkross.

Det har vid flera tillfällen i samband med upphandling av rivnings- och återvinningsentreprenader varit avgörande vilken typ av kross som entreprenören kunnat erbjuda. Exempelvis vid en större entreprenad nyligen valdes den entreprenör som kunde erbjuda beställaren en rotationskross i stället för en käftkross. Med andra ord blev krosstypen utslagsgivande på bekostnad av andra viktiga faktorer.

Syfte

Syftet är att klargöra eventuella skillnader mellan krossad betongballast från de viktigaste krossningsmetoderna.

Krossningsmetoder

Rotationskross/slagkross

I rotationskrossen finns en vågrät rotor med fasta slagor som slungar materialet mot en slagplatta. Detta ger en snabb energiimpuls som åstadkommer en hastig krossning av materialet. Krossen har en högre nedbrytningsgrad än andra krosstyper. Men slitaget är dock högt, vilket medför att underhållet kan bli kostsamt. Följande rotationskross/slagkross har använts:

- Hartl. Minitrack 503 PCV, slagkross (Prallmühle) Crusier MK 203 L. Vikt 24,5 ton.

Krossen består av fyra slagplattor. Rotationshastigheten är 750–950 varv per minut. Krossöppning 1 000 x 600 mm, spaltöppning kan regleras mellan 20–100 mm.

En principskiss och ett fotografi av denna typ av kross framgår av bilaga.

Käftkross

Käftkrossen tuggar sönder materialet mellan en fast och en rörlig krossplatta. Den rörliga plattan, krossplattan, sitter på en käke som ges en tuggande rörelse, därav namnet.

Följande käftkross har använts:

- OMTRACK Giove käftkross. Vikt 43 ton.

Krossen består av två krossplattor. Den rörliga plattan har en excentrisk infästning som åstadkommer en tuggande rörelse. Rotationshastigheten uppskattas till 350–400 varv per minut. Krossöppningen är 1 050 x 750 mm, spaltöppningen kan regleras mellan 35–200 mm.

En principskiss och ett fotografi av denna typ av kross framgår av bilaga.

Provad betong

Exakt samma betong, det vill säga från samma industri- och lagerbyggnad (Hammarby Sjöstad, 50- och 60-tal) och i samma konstruktionsdel, har använts vid jämförelsen mellan de två krossningsprinciperna och spaltöppningarna. Medeltryckhållfastheten för sex utborrade cylindrar var 59 MPa, se detaljerad redovisning i bilagd SP-Rapport.

Litteraturgenomgång

Hellstöm, V et al

Cementpastan trycks sönder lättare i en käftkross och det sker en större separering mellan sten och cementpasta. Kornformen kan bli flisig på grund av den långa smala spaltöppningen. Det framförs också att mikrosprickor uppstår i kornen. Man hänvisar till tyska forskare. Det skulle innebära lägre hållfasthet och sämre frostbeständighet.

Rotationskross/slagkross uppges ha större nedkrossningsgrad. Slitaget är dock stort, vilket kan innebära stora underhållskostnader vid hårda material.

Kronenberger, E J

Konventionell käftkross uppges vara olämplig för mobil återanvändning av armerad betong.

Slagkross och en specialvariant av käftkross anses vara bättre lämpade. Den ökande gruppen användare av krossningsmaskiner nödvändiggör vidare teknisk utveckling.

Springerschmid, R et al

Författaren framför åsikten att käftkross endast får användas till förkrossning. Istället bör slagkross användas som slår sönder materialet på dess svagaste ställen.

Om endast stenfraktionen återanvänds blir andelen gammal hårdnad cementpasta endast drygt fem procent.

Wachsman, S et al

Konkurrenskraften hos återvunnet material hämmas fortfarande av för stora produktionskostnader och ganska låg kvalitet.

Slagkrossen kommer att fortsätta vara den främsta slagkrosstypen enligt tillverkare och användare. Förbättring av slagplattornas nötningsmotstånd är önskvärt. Olika typer av beläggningsmaterial studeras med hjälp av en nötningstestanordning. I rapporten studeras även energiåtgång och kornstorleksfördelning.

Abe, M et al

Produktionsmetodens inflytande på produktivitet och kvalitet studeras. Speciella typer av krossar används.

Punkki, J

I en doktorsavhandling studeras en nyutvecklad kombinerad kross och tvångsblandare. Den färska betongens egenskaper undersöktes ingående. Den direktkrossade ballasten ökar betongens vattenbehov.

Ydrevik, K et al

Tre olika betongkvaliteter har undersökts med avseende på den krossade betongens vägtekniska egenskaper. Endast betongen med låg kvalitet (7MPa) blev underkänd i alla avseenden, det vill säga beträffande styvhet, stabilitet och kulkvarnsvärde.

Molin, C et al

Rapporten utgör en sammanfattande analys av krossad betong för återvinning. Man konstaterar att materialet har en god potential för återvinning, särskilt som bär- och förstärkningslager till vägar, planer m.m.

Resultat av vägtekniska provningar

En fullständig resultatredovisning finns i bilagd VTI Rapport.

I de material som testats har fraktioner större än 32 mm siktats bort. Samtliga faller då innanför ramen för ABT Väg.

Nötningsmotstånd har provats med kulkvarnsmetoden. Kulkvarnsvärden mellan 20,6–21,9 erhöles. Kraven i ABT Väg är max 23 om den skall trafikeras med byggtrafik, annars max 37.

Materialens stabilitet och styvhet bestäms med triaxialförsök

Stabilitet, ett materials förmåga att motstå last utan att deformeras, redovisas som en ackumulerad permanent deformation vid triaxialförsök.

Alla fyra materialen håller till de högsta nivåerna. Material från käftkross

OM 0–100 och OM 0–45 har mycket små deformationer ända till slutet av provningen.

Styvhet, ett materials förmåga att fördela, redovisas som E-modul vid triaxialförsök. Ju högre E-modul, desto bättre lastspridande förmåga.

Förenklad resultattabell

| Egenskap | Material | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Krossad betong | | | | Krossat berg |
| | OM 0–100 käft | H 0–100 rotation | OM 0–45 käft | H 0–45 rotation | Skärlunda |
| Kornfördelning | | | | | |
| Graderingstal $C_u = d_{50}/d_{10}$ | 30,4 | 19,4 | 20,9 | 10,2 | 40 |
| Laboratoriepackning | | | | | |
| Optimal vattenkvot | 8,8 % | 8,1 % | 9,1 % | 6,1 % | 4,7 % |
| Max torr skrymdensitet | 1,980 kg/dm ³ | 1,866 kg/dm ³ | 1,972 kg/dm ³ | 1,891 kg/dm ³ | 2,151 kg/dm ³ |
| Kulkvarn | | | | | |
| Korndensitet | 2,55 kg/dm ³ | 2,55 kg/dm ³ | 2,57 kg/dm ³ | 2,63 kg/dm ³ | 2,64 kg/dm ³ |
| Kulkvarnsvärde | 20,6 | 21,9 | 21,5 | 21,2 | – |
| Treaxialförsök | | | | | |
| Antal delprov | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| Önskad packningsgrad | 97 % | 97 % | 97 % | 97 % | 97 % |
| Uppnådd packningsgrad, m ^v | 95,6 | 95,7 | 96,1 | 96,9 | ej mätt |
| Uppnådd relativ vattenkvot | 67 % | 69 % | 66 % | 68 % | 55 |
| Ack. perm. def efter 200/60 | 0,28 mm | 0,64 mm | 0,37 mm | 0,64 mm | 0,68 mm |
| Ack. perm. def efter 400/120 | 0,86 mm | 2,65 mm | 1,19 mm | 4,11 mm | 3,27 mm |
| Ack. perm. def efter 800/120 | 3,17 mm | 17,32 mm | 4,49 mm | 13,38 mm | 10,90 mm |
| Ack. perm. def efter 1200/120 | 16,50 mm | Brott e. 3000 bel. | 22,16 mm | Brott | Brott e. 1000 bel. |
| E-modul e. 1000 bel. 200/60 | 387 MPa | 318 MPa | 340 MPa | 280 MPa | 230 MPa |
| E-modul e. 1000 bel. 400/120 | 459 MPa | 390 MPa | 406 MPa | 345 MPa | 344 MPa |
| E-modul e. 1000 bel. 800/120 | 529 MPa | 431 MPa | 465 MPa | 420 MPa | 470 MPa |
| E-modul e. 1000 bel. 1200/120 | 477 MPa | Brott e. 3000 bel. | 480 MPa | Brott | 530 MPa |
| Frostbeständighetstal | 29,9 % | 27,7 % | 38,2 % | 33,0 % | – |

Utvärdering och diskussion

De utförda vägtekiska provningarna visar att alla fyra typerna har erhållit mycket bra resultat väl i klass med typiskt referensmaterial av krossad sten. Det kan delvis förklaras av att den för försök valda tillgängliga betongen har en relativt hög kvalitet. Vår erfarenhet är dock att den är förvånansvärt vanlig i betongbyggnadsbeståndet, vilket förmodligen bland annat kan förklaras av hållfasthetstillväxt under lång tid.

Käftkrossen visar sig ha något bättre värden än rotationskrossen.

Kornfördelningen uppvisar ett högre graderingstal för käftkrossen, vilket är positivt ur stabilitetssynpunkt.

Önskad vattenkvot är något gynnsammare för käftkrossen.

Stabiliteten för käftkrossen är mycket god, det vill säga mycket liten ackumulerad permanent deformation i försöken. Rotationskrossens deformationsvärden är något högre, dock helt godkända.

Styvheten, materialets lastspredande förmåga, är mycket god, särskilt för käftkrossen.

Frostbeständighetstalet är lägre för en krossad betong än för ett typiskt krossat berg. Käftkrossen uppvisar lite bättre värden än rotationskrossen.

Man kan konstatera att betong från käftkross med stor spaltöppning ger de bästa mekaniska egenskaperna. För övrigt syns spaltöppningen ej ha någon större betydelse, möjligtvis för frostbeständigheten. Större spaltöppning tycks ge något lägre frostbeständighet.

De få uppgifter, som går att finna i litteraturen, antyder att käftkrossen skulle ge sämre betongkross. Detta förklaras bland annat med att mikrosprickor uppstår lättare vid hoptryckning än vid slag. Vidare sägs att rotationskrossen minskar svagheter i ursprungsmaterialet. Vi har inte lyckats bekräfta dessa uppgifter genom granskning av utförda försök. Det är inte säkert att det ens finns några dylika försök.

Skillnaden mellan våra resultat och de som framförs i litteraturen kan möjligtvis förklaras av olikheter i ballastmaterial. I Tyskland till exempel förekommer ofta sämre ballast än vår svenska granitballast. Man kan där tänka sig att käftkrossen skulle kunna ge något sämre resultat.

Litteratur

- Abe, M et al. Influence of production method on productivity and quality of recycled aggregate. JCA-proceedings-of-cement-and-concrete no 49. Japan 1995.
- Hellström, et al. Betong i kretsloppet – återvinning av betongvägar. KTH institutionen för byggkonstruktion, examensarbete nr 50. Stockholm 1995.
- Kronberger, EJ. Zerdrueckende Zerkleinerung im mobilen Recycling von Bauschutt. BMT-Baumaschine- und Bautechnik no 1. Deutschland 1993.
- Molin, C et al. Rivning av betong med tanke på återanvändning, steg 3. SBUF-projekt 5044. Stockholm 1996.
- Punkki, J. Effects of high speed crusher-mixer on the properties of concrete. Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. Esbo, Finland 2000.
- Springerschmid, R et al. Zur Technologie der Viederverwendung von altem Strassenbetong. Strasse und Autobahn v 44 no 12. Deutschland 1993.
- Wachsman, S et al. Betongzekerleinerung im Prallbrecher und Verschleissimulation der Schlagleisten. Aufbereitungs-Technik v 38 no 12. Deutschland 1997.
- Ydrevik, K et al. Krossad betong som vägbyggnadsmaterial. Samband mellan cylindertryckhållfasthet och vägtekniska egenskaper. Väg- och transportforskningsinstitutet, rapport nr 46-1996. Linköping 1996.

SYCON Barab
att: Christer Molin
Sjökvarnsbacken 20
131 31 Nacka

| Handläggare, enhet / <i>Handled by, department</i> | Datum / <i>Date</i> | Beteckning / <i>Reference</i> | Sida / <i>Page</i> |
|---|---------------------|-------------------------------|--------------------|
| Göran Olsson, Byggnadsteknik, Sthlm Tel +46 (0)8 615 12 98, goran.olsson@sp.se | 2002-07-19 | F210585 | 1 (1) |

Tryckhållfasthet på utborrade betongcylindrar (1 bilaga)

Provföremål

Sex borrkärnor av betong med diameter 75 mm och längd 120-140 mm, enligt uppgift tillhörande projekt SBUF 111-28. Kärnorna var omärkta. De inlämnades till SP 2002-06-19.

Provningsmetod


Från varje kärna utsågades en provcylinder med höjden motsvarande diametern. Cylindrarnas trycktytor planslipades.

Tryckhållfastheten bestämdes enligt SS 13 72 30, utgåva 1. Efter provberedningen och fram till provningstillfället lagrades cylindrarna i luft med 20 °C temperatur och 65 % RH.


Provningsresultat

Erhållna resultat framgår av bilaga 1 och avser endast de ovan specificerade provföremålen.
För information avseende mätosäkerhet - kontakta gärna tekniskt ansvarig.

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
Byggnadsteknik, Stockholm



Göran Olsson
Tekniskt ansvarig



Mati Vilval
Teknisk handläggare

Bilaga
1 Provningsresultat

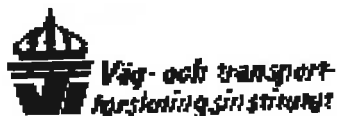


Provningsresultat

TRYCKHÅLLFASTHET

Provnings utfördes 2002-06-26.

| Prov nr | Diameter (mm) | Höjd (mm) | Densitet (kg/m ³) | Tryckhållfasthet (MPa) |
|---------|---------------|------------|-------------------------------|------------------------|
| 1 | 75,0 | 75,4 | 2350 | 54,9 |
| 2 | 75,0 | 75,1 | 2350 | 65,1 |
| 3 | 75,1 | 75,3 | 2350 | 61,0 |
| 4 | 75,0 | 75,2 | 2350 | 60,4 |
| 5 | 75,0 | 74,6 | 2350 | 55,3 |
| 6 | 75,0 | 74,7 | 2350 | 59,0 |
| | | medelvärde | 2350 | 59 |



Väg- och banteknik

RAPPORT

| | |
|------------------------------------|--|
| VTI nummer 02-056 | Uppdragsgivare Ing. firma Christer Molin Smedjegatan 8 131 34 NACKA |
| Ankomstdatum 02-06-18 | |
| Vår handläggare Håkan Arvidsson | Er handläggare Christer Molin |

| | |
|---|------------------------------------|
| Prov av Krossad betong | Provtagningsplats - |
| Provmärkning OM 0-100, H 0-100, OM 0-45 och H 0-45 | |
| Provtagningsdatum - | Provningsperiod 020813 - 021025 |

Utförd provning

Resultat avser enbart de analyserade proven.

Treaxialförsök enligt VTI-metod, samt följande kompletterande analyser:

- Kornkurva enligt VVMB 619:1998, trådsiktat har använts.
- Bestämning av optimal vattenkvot och maximal torr skrymdensitet enligt VVMB 36:1977, "Tung instampning", bestämning. av packningskurva.
- Beständighetsanalys enligt Kulkvarn, FAS 259-02

| | |
|---|--------------------|
| Resultat (kommentarer och tabell)..... | sid. 2-3 |
| Kornkurvor..... | bilaga 1 (5 sidor) |
| Packningskurvor..... | bilaga 2 (1 sida) |
| Treaxialförsök, diagram..... | bilaga 3 (3 sidor) |
| Kortfattad beskrivning av VTI:s treaxmetod..... | bilaga 4 (1 sida) |

Linköping 2002-11-04

Utfört av

 Håkan Arvidsson

 Leif Viman
 Provningsansvarig

| Postadress Postal address | Besöksadress Visiting address | Telefon Telephone | Telefax Telefax | E-post E-mail | Postgiro postal giro account |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------|------------------|---------------------------------|
| Statens väg- och transport- | Olaus Magnus väg 37 | 013-20 40 00 | 013-14 14 36 | vti@vti.se | 5 98 01-1 |

RAPPORT

Väg- och banteknik

RESULTAT

I denna redovisning görs jämförelser med andra material testade på VTI. De har en kornfördelning mitt i bärlagerzonen för VÄG 94, kallad för Normalkurvan. Ett material består av krossat berg, granit, från Skärlunda vidare en krossad betong från Grums och även de olika kvaliteter vi testade från Er 1996 (se VTI notat 46-1996.) De har valts som jämförelse för att de första är ett typiska referensmaterial och de sista för att de är "kända material".

KORNFÖRDELNING

I de material som testats har material > 32 mm (31,5) siktats bort. Samtliga faller då i stort inom zonen för bärlager enligt ATB VÄG. H 0-100 och H 0-45 faller dock precis utanför i den finare delen.

PACKNINGSEGENSKAPER

OM 0-100 (<32) och OM 0-45 (<32) uppvisar liknande resultat. Optimal vattenkvot ca 9 % och maximal torr skrymdensitet ca 1,98 kg/dm³. H 0-100 (<32) och H 0-45 (<32) ligger på samma nivå vad gäller maximal torr skrymdensitet ca 1,88 kg/dm³ men skiljer sig lite vad gäller optimal vattenkvot 8 % för H 0-100 och 6 % för H 0-45.

NÖTNINGSMOTSTÅND

Beständighet, förmågan att motstå nednötning/nedkrossning har testats med kulkvarnsmetoden. Den krossade betongen i detta försök fick kulkvarnsvärde 20,6-21,9. Kraven i ATB VÄG är max 23 om den ska trafikeras med byggtrafik annars max 37. Ur den synpunkten uppfyller den krossade betongen kraven för bär- och förstärkningslager. *Endast enkelprov har utförts pga viss materialbrist.*

TREAXIALFÖRSÖK

Metod: se bilaga 4

En kort förklaring av belastningsnivåer: de anges som "Dynamisk last"/"Kammartryck". T.ex. 100/60 betyder dynamisk last 100 kPa och kammartryck 60 kPa. Läs mer i bilaga 4.

Stabilitet, ett materials förmåga att motstå last utan att deformerar redovisas som ackumulerad permanent deformation vid treaxialförsök.

Alla fyra materialen håller till de högsta nivåerna. OM 0-100 och OM 0-45 har väldigt små permanenta deformationer ända till slutet av testet, ca 4 mm efter 800/120-nivån. H 0-100 och H 0-45 vid samma nivå ca 15 mm ackumulerad permanent deformation.

Styvhet, ett materials förmåga att fördela lasten (minska lasten för underliggande lager) redovisas som E-modul vid treaxialförsök. Ju högre E-modul desto bättre lastspridande förmåga.

E-modul på krossad betong brukar normalt vara högre på de lägre nivåerna än för konventionella material för att sedan plana ut och vara lägre på de högre nivåerna. Det är också fallet i det här försöket. Samtliga är bättre eller i stort lika bra som krossat berg med "Normalkurvan" upp till åtminstone 600/120-nivån. Efter 600/120-nivån är det bara OM 0-100 är bättre än referens materialet. OM 0-100 har höga E-moduler testet igenom.

RAPPORT

Väg- och banteknik

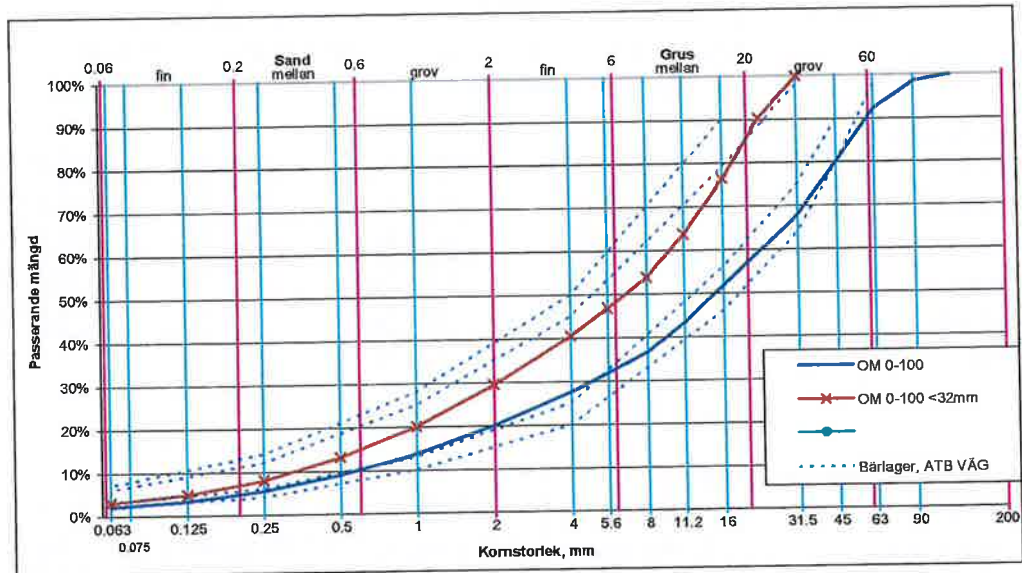
Resultattabell

| Egenskap | Material | | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | OM 0-100 02-056-1 | H 0-100 02-056-2 | OM 0-45 02-056-3 | H 0-45 02-056-4 | Krossat berg Skärlunda |
| Kornfördelning (se bilaga 1) | | | | | |
| passerar 31,5 mm | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % |
| passerar 16 mm | 76,5 % | 71,6 % | 81,1 % | 87,0 % | 67,5 % |
| passerar 4 mm | 40,5 % | 25,6 % | 48,4 % | 31,5 % | 35,0 % |
| passerar 1 mm | 20,1 % | 12,3 % | 21,8 % | 10,7 % | 19,0 % |
| passerar 0,25 mm | 8,1 % | 4,9 % | 8,1 % | 3,4 % | 9,0 % |
| pass. 0,063 mm | 3,1 % | 1,6 % | 2,8 % | 1,3 % | 4,5 % |
| graderingstal, $C_u = d_{60}/d_{10}$ | 30,4 | 19,4 | 20,9 | 10,2 | 40 |
| Labororiepackning (se bilaga 2) | | | | | |
| optimal vattenkvot | 8,8 % | 8,1 % | 9,1 % | 6,1 % | 4,7 % |
| max torr skrymdensitet | 1,980 kg/dm ³ | 1,866 kg/dm ³ | 1,972 kg/dm ³ | 1,891 kg/dm ³ | 2,151 kg/dm ³ |
| Kulkvarn (se bilaga 4) | | | | | |
| korn densitet | 2,55 kg/dm ³ | 2,55 kg/dm ³ | 2,57 kg/dm ³ | 2,63 kg/dm ³ | 2,64 kg/dm ³ |
| kulkvarnsvärde | 20,6 | 21,9 | 21,5 | 21,2 | |
| Treaxialförsök (se bilaga 3) | | | | | |
| antal delprov | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| önskad packningsgrad | 97 % | 97 % | 97 % | 97 % | 97 % |
| uppnådd packningsgrad, mv. | 95,6 % | 95,7 % | 96,1 % | 96,9 % | <i>Ej mätt</i> |
| önskad vattenkvot | 5,3 % | 4,9 % | 5,4 % | 3,7 % | 2,8 % |
| uppnådd vattenkvot, mv. | 5,9 % | 5,6 % | 6,0 % | 4,1 % | 2,6 % |
| uppnådd relativ vattenkvot | 67 % | 69 % | 66 % | 68 % | 55 % |
| ack. perm. def efter 100/60 | 0,08 mm | 0,17 mm | 0,11 mm | 0,15 mm | 0,17 mm |
| ack. perm. def efter 200/60 | 0,28 mm | 0,64 mm | 0,37 mm | 0,64 mm | 0,68 mm |
| ack. perm. def efter 400/60 | 0,77 mm | 2,46 mm | 1,08 mm | 3,88 mm | 3,08 mm |
| ack. perm. def efter 400/120 | 0,86 mm | 2,65 mm | 1,19 mm | 4,11 mm | 3,27 mm |
| ack. perm. def efter 600/120 | 1,66 mm | 6,77 mm | 2,18 mm | 6,99 mm | 7,31 mm |
| ack. perm. def efter 800/120 | 3,17 mm | 17,32 mm | 4,49 mm | 13,38 mm | 10,90 mm |
| ack. perm. def efter 1000/120 | 4,41 mm | 21,47 mm | 8,41 mm | Brott e. 6000 bel | 12,14 mm |
| ack. perm. def efter 1200/120 | 16,50 mm | Brott e. 3000 bel. | 22,16 mm | Brott. | Brott e. 1000 bel |
| E-modul efter 1000 bel. 100/60 | 395 MPa | 303 MPa | 330 MPa | 280 MPa | 200 MPa |
| E-modul efter 1000 bel. 200/60 | 387 MPa | 318 MPa | 340 MPa | 280 MPa | 230 MPa |
| E-modul efter 1000 bel. 400/60 | 394 MPa | 326 MPa | 348 MPa | 282 MPa | 290 MPa |
| E-modul efter 1000 bel. 400/120 | 459 MPa | 390 MPa | 406 MPa | 345 MPa | 344 MPa |
| E-modul efter 1000 bel. 600/120 | 479 MPa | 410 MPa | 427 MPa | 370 MPa | 385 MPa |
| E-modul efter 1000 bel. 800/120 | 529 MPa | 431 MPa | 465 MPa | 420 MPa | 470 MPa |
| E-modul efter 1000 bel. 1000/120 | 538 MPa | 445 MPa | 465 MPa | 455 MPa | 530 MPa |
| E-modul efter 1000 bel. 1200/120 | 477 MPa | Brott e. 3000 bel | 480 MPa | Brott. | 530 MPa |

Graderingstal, $C_u = d_{60}/d_{10}$, d_{60} = kornstorlek där 60% passerar, d_{10} = kornstorlek där 10% passerar. Ju högre graderingstal desto flackare kurva och troligare hög stabilitet.

Önskad vattenkvot är 60% av optimal vattenkvot.

KORNFÖRDELNING



Prov: **OM 0-100**
Krossad betong 02-056-1
Kommentarer: Extra grovsikt >32 mm

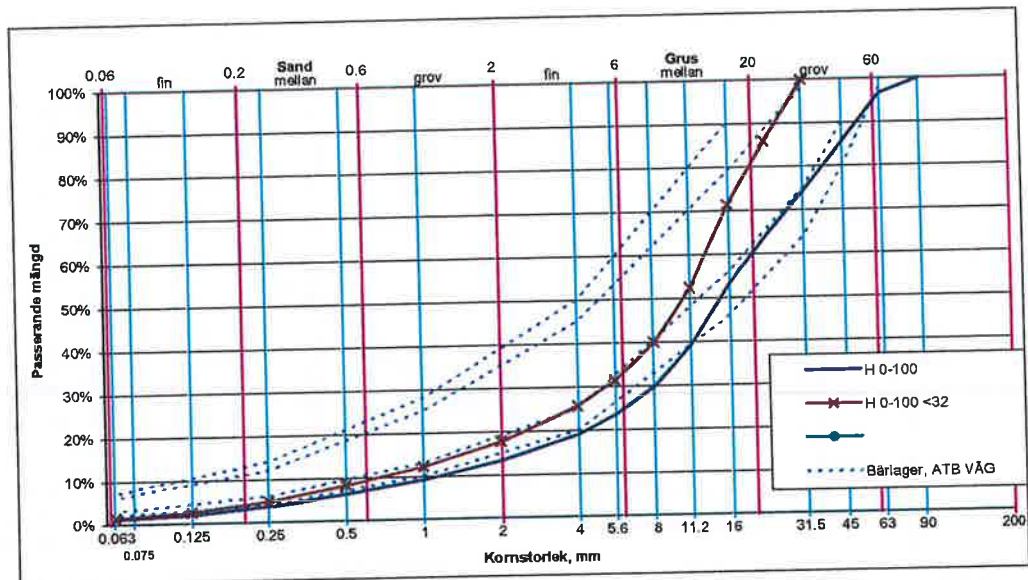
Prov: **OM 0-100 <32mm**
Krossad betong 02-056-1
Kommentarer: 0-32 mm

Total siktmängd: 75 240 g
Tvättsiktat (<16): 1736.0 g
Datum: 2002-08-28

Total siktmängd: 4 466 g
Tvättsiktat (<16): 1736.0 g
Datum: 2002-08-28

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 125 | 100.0% |
| 90 | 98.5% |
| 63 | 92.4% |
| 45 | 80.2% |
| 31.5 | 68.0% |
| 11.2 | 43.4% |
| 8 | 36.6% |
| 5.6 | 31.8% |
| 4 | 27.6% |
| 2 | 20.1% |
| 1 | 13.7% |
| 0.5 | 9.0% |
| 0.25 | 5.5% |
| 0.125 | 3.3% |
| 0.063 | 2.1% |

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 31.5 | 100.0% |
| 22.4 | 90.4% |
| 16 | 76.5% |
| 11.2 | 63.8% |
| 8 | 53.9% |
| 5.6 | 46.9% |
| 4 | 40.5% |
| 2 | 29.6% |
| 1 | 20.1% |
| 0.5 | 13.2% |
| 0.25 | 8.1% |
| 0.125 | 4.8% |
| 0.063 | 3.1% |



Prov: H 0-100

Krossad betong, 02-056-2

Kommentarer: Extra grovsikt >32 mm

Prov: H 0-100 <32

Krossad betong, 02-056-2

Kommentarer: 0-32 mm

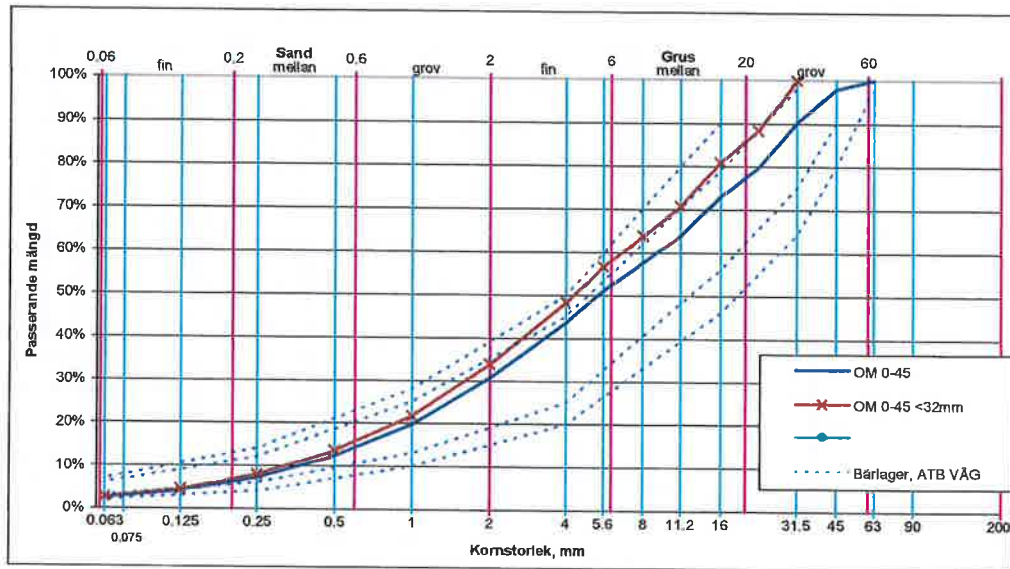
Total siktmängd: 68 976 g
Tvättsiktat (<16): 1684.0 g
Datum: 2002-09-09

Total siktmängd: 4 659 g
Tvättsiktat (<16): 1684.0 g
Datum: 2002-09-09

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 90 | 100.0% |
| 63 | 96.6% |
| 45 | 85.7% |
| 31.5 | 74.5% |
| 22.4 | 64.1% |
| 16 | 53.3% |
| 11.2 | 39.2% |
| 8 | 29.9% |
| 5.6 | 23.4% |
| 4 | 19.1% |
| 2 | 13.3% |
| 1 | 9.2% |
| 0.5 | 6.2% |
| 0.25 | 3.6% |
| 0.125 | 2.0% |
| 0.063 | 1.2% |

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 31.5 | 100.0% |
| 22.4 | 86.0% |
| 16 | 71.6% |
| 11.2 | 52.6% |
| 8 | 40.1% |
| 5.6 | 31.4% |
| 4 | 25.6% |
| 2 | 17.8% |
| 1 | 12.3% |
| 0.5 | 8.4% |
| 0.25 | 4.9% |
| 0.125 | 2.6% |
| 0.063 | 1.6% |

Väg- och banteknik



Prov: **OM 0-45**

Krossad betong 02-056-3

Kommentarer: Extra grovsikt > 32 mm

Prov: **OM 0-45 <32mm**

Krossad betong 02-056-3

Kommentarer: 0-32 mm

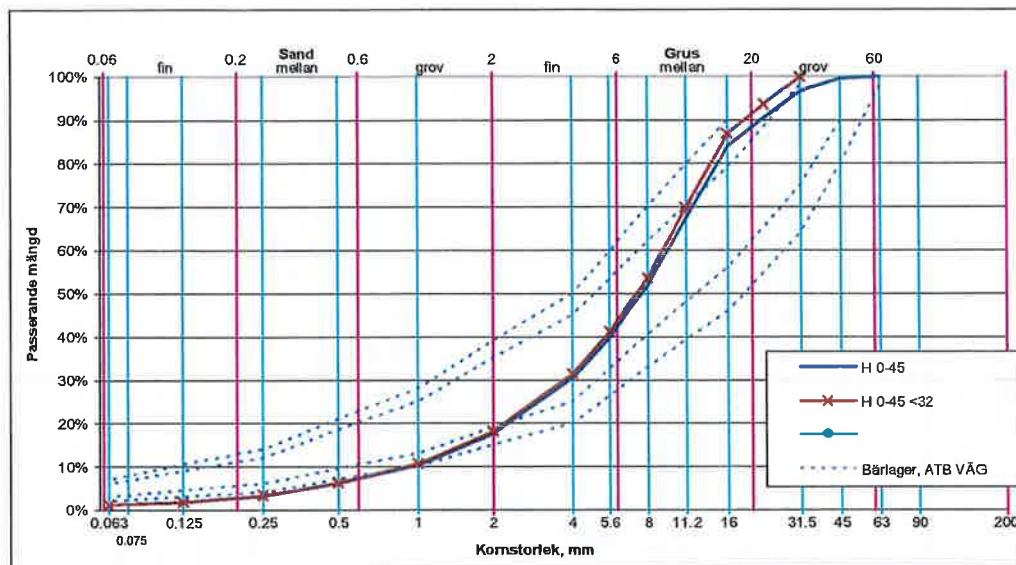
Total siktmängd: 72 018 g
Tvättsiktat (<16): 1104.0 g
Datum: 2002-09-17

Total siktmängd: 5 213 g
Tvättsiktat (<16): 1104.0 g
Datum: 2002-09-17

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 63 | 100.0% |
| 45 | 97.9% |
| 31.5 | 90.2% |
| 31.5 | 90.2% |
| 22.4 | 79.7% |
| 16 | 73.2% |
| 11.2 | 64.0% |
| 8 | 57.6% |
| 5.6 | 51.2% |
| 4 | 43.6% |
| 2 | 30.6% |
| 1 | 19.7% |
| 0.5 | 12.3% |
| 0.25 | 7.3% |
| 0.125 | 4.2% |
| 0.063 | 2.5% |

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 31.5 | 100.0% |
| 22.4 | 88.4% |
| 16 | 81.1% |
| 11.2 | 70.9% |
| 8 | 63.9% |
| 5.6 | 56.7% |
| 4 | 48.4% |
| 2 | 34.0% |
| 1 | 21.8% |
| 0.5 | 13.7% |
| 0.25 | 8.1% |
| 0.125 | 4.6% |
| 0.063 | 2.8% |

Väg- och banteknik



Prov: H 0-45

Krossad betong 02-056-4

Kommentarer: Extra grovsikt > 32 mm.

Prov: H 0-45 <32

Krossad betong 02-056-4

Kommentarer: 0-32 mm

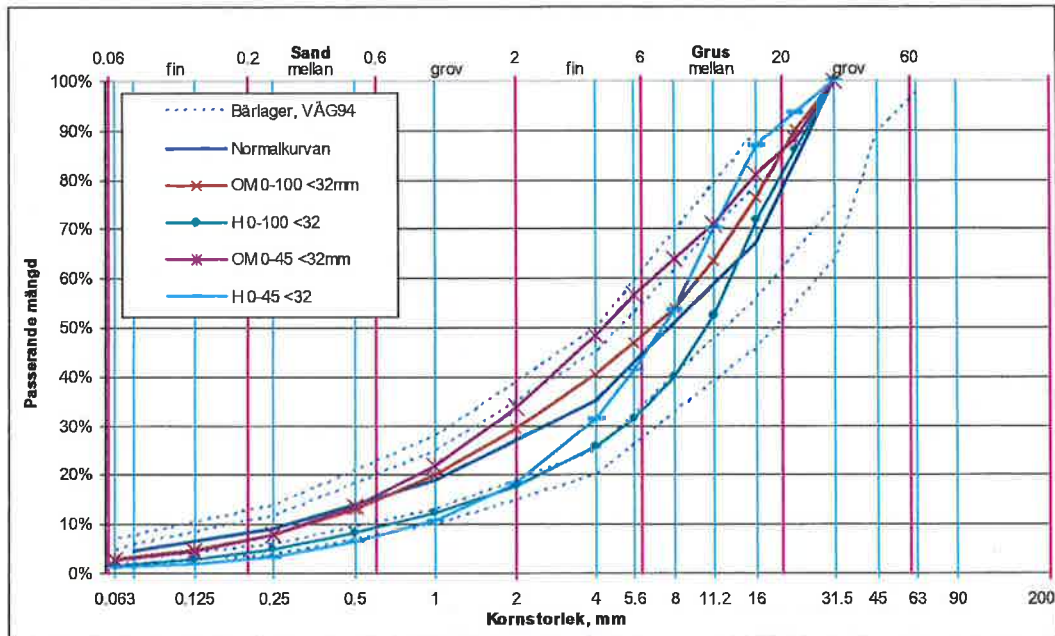
Total sikt mängd: 68 183 g
Tvättsikt (<16): —, - g
Datum: 2002-10-17

Total sikt mängd: 5 778 g
Tvättsikt (<16): 1305.7 g
Datum: 2002-10-17

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 63 | 100.0% |
| 45 | 99.5% |
| 31.5 | 96.6% |
| 22.4 | 90.5% |
| 16 | 84.0% |
| 11.2 | 67.6% |
| 8 | 51.8% |
| 5.6 | 39.8% |
| 4 | 30.5% |
| 2 | 17.6% |
| 1 | 10.4% |
| 0.5 | 6.2% |
| 0.25 | 3.3% |
| 0.125 | 1.8% |
| 0.063 | 1.3% |

| Sikt | Pass-% |
|-------|--------|
| 31.5 | 100.0% |
| 22.4 | 93.7% |
| 16 | 87.0% |
| 11.2 | 70.0% |
| 8 | 53.7% |
| 5.6 | 41.3% |
| 4 | 31.5% |
| 2 | 18.2% |
| 1 | 10.7% |
| 0.5 | 6.4% |
| 0.25 | 3.4% |
| 0.125 | 1.9% |
| 0.063 | 1.3% |

Väg- och banteknik



Materialen < 31,5 mm i samma diagram som kurvan för referenserna, som har kornfördelning enligt "Normalkurvan" mitt i bärlagerzonen.

Väg- och banteknik

Proctor

Krossad betong

Tung Instampning. (modified proctor)

Största sten: 31.5 mm

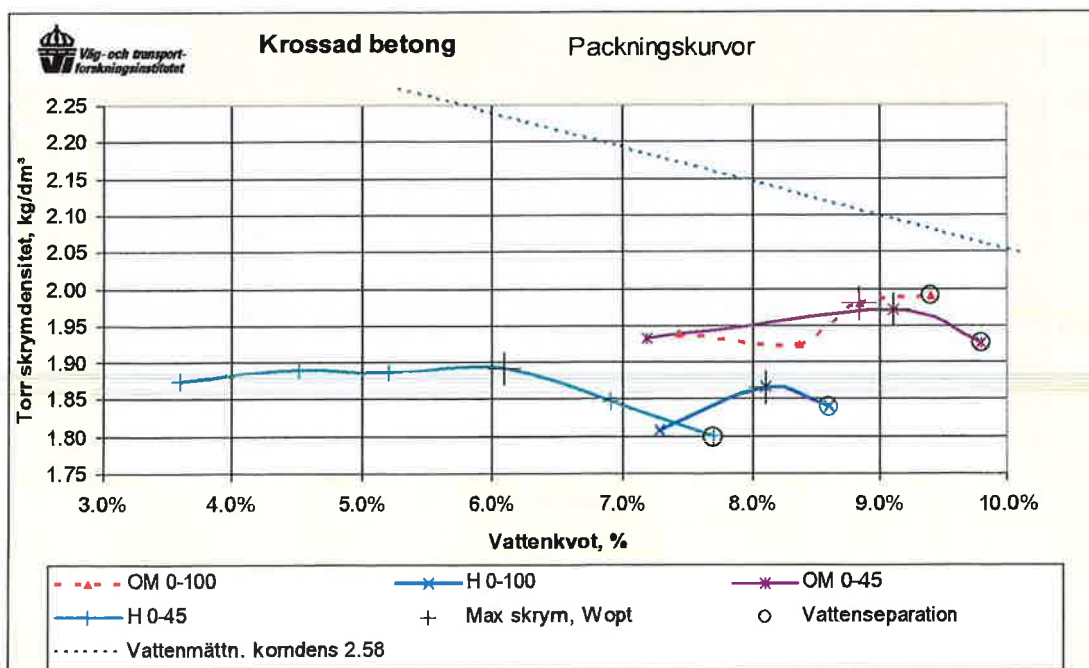
Inpackat i CBR-cylinder, volym = 2123 cm³

| OM 0-100 | | | Wopt;Max ρ_t | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| vattenkvot | 7.4% | 8.4% | 8.8% | 9.4% |
| torr skrymdensitet | 1.938 kg/dm ³ | 1.925 kg/dm ³ | 1.980 kg/dm ³ | 1.991 kg/dm ³ |
| vattensep. | | | | ja |
| kommentar | | | | |

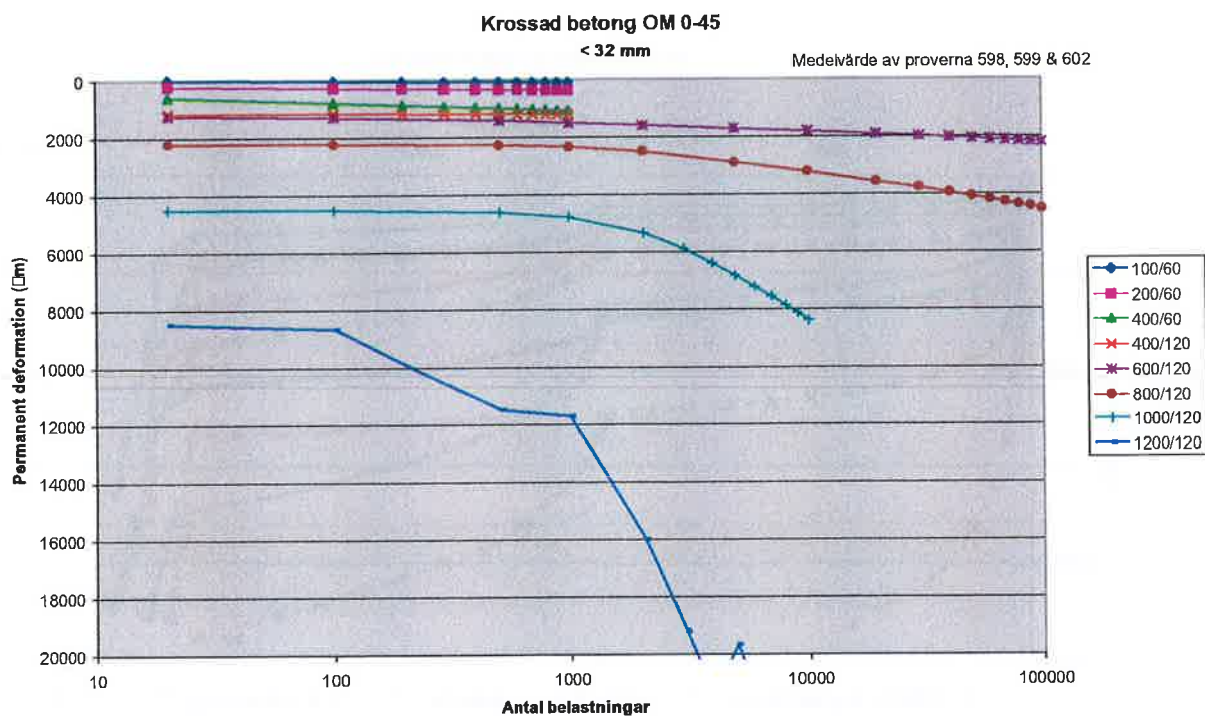
| H 0-100 | | | Wopt;Max ρ_t | |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| vattenkvot | 7.3% | 8.1% | 8.6% | |
| torr skrymdensitet | 1.809 kg/dm ³ | 1.866 kg/dm ³ | 1.840 kg/dm ³ | |
| vattensep. | | | ja | |
| kommentar | | | | |

| OM 0-45 | | | Wopt;Max ρ_t | |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| vattenkvot | 7.2% | 9.1% | 9.8% | |
| torr skrymdensitet | 1.933 kg/dm ³ | 1.972 kg/dm ³ | 1.925 kg/dm ³ | |
| vattensep. | | | ja | |
| kommentar | | | | |

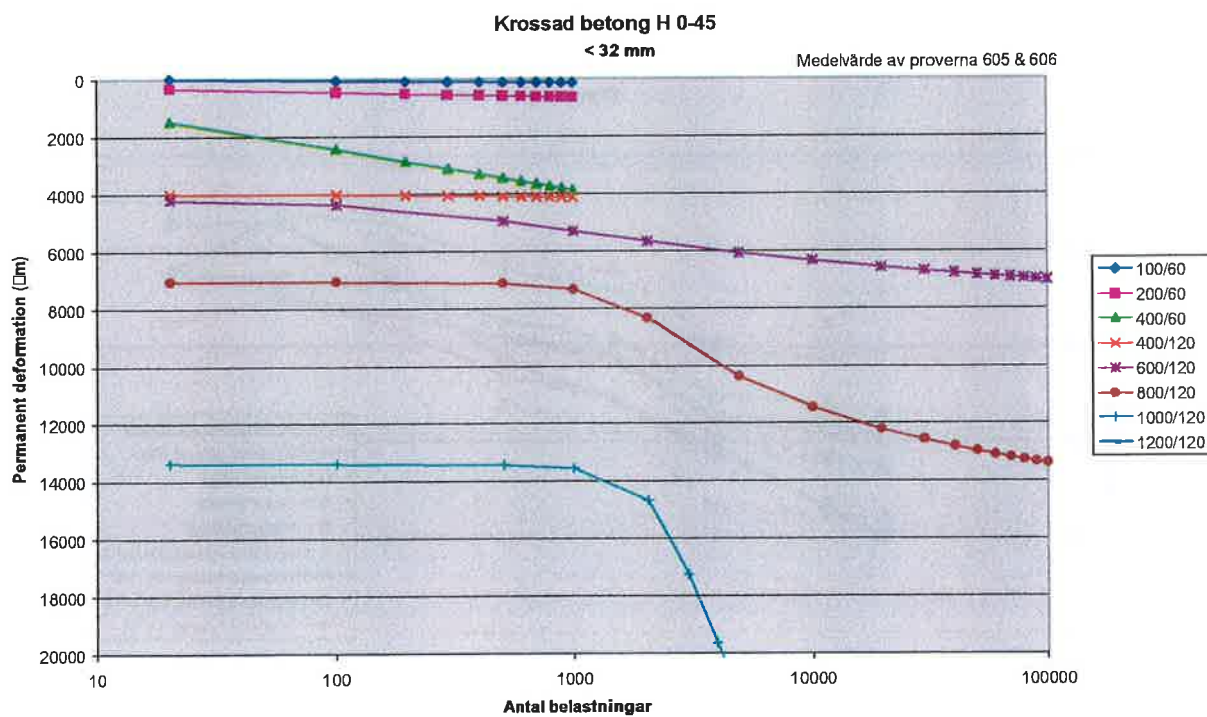
| H 0-45 | | | Wopt;Max ρ_t | | | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| vattenkvot | 3.6% | 4.5% | 5.2% | 6.1% | 6.9% | 7.7% |
| torr skrymdensitet | 1.873 kg/dm ³ | 1.890 kg/dm ³ | 1.885 kg/dm ³ | 1.891 kg/dm ³ | 1.847 kg/dm ³ | 1.800 kg/dm ³ |
| vattensep. | | | | | | ja |
| kommentar | | | | | | |



Väg- och banteknik



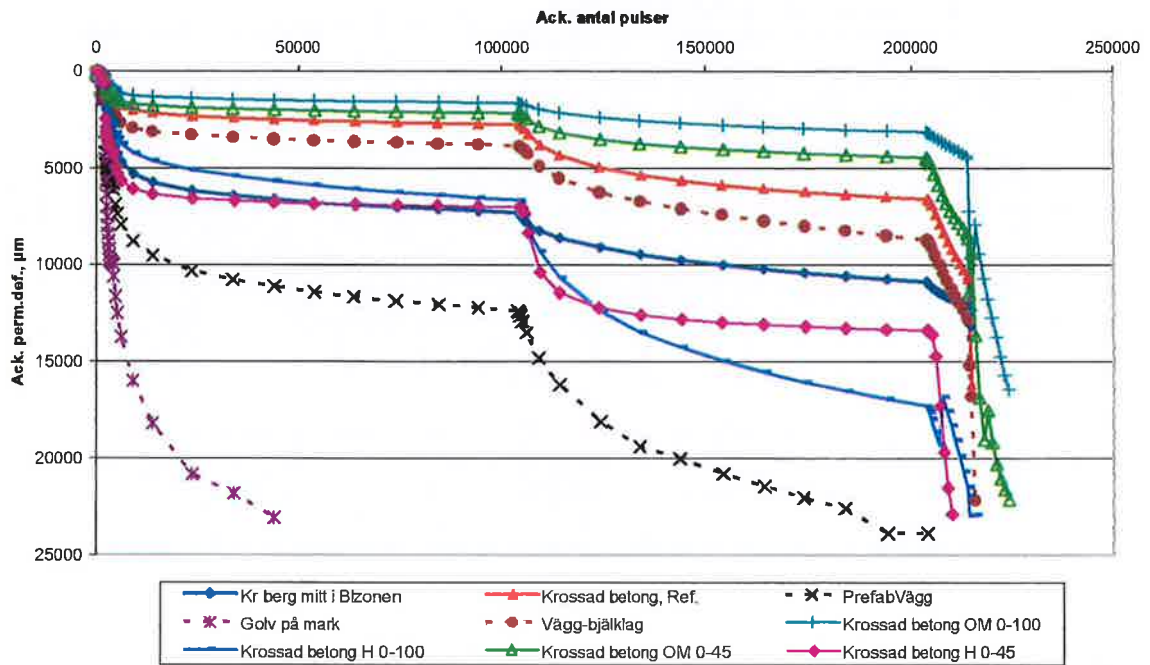
Hacken på sista nivån beror på brott vid olika antal pulser för delproverna.



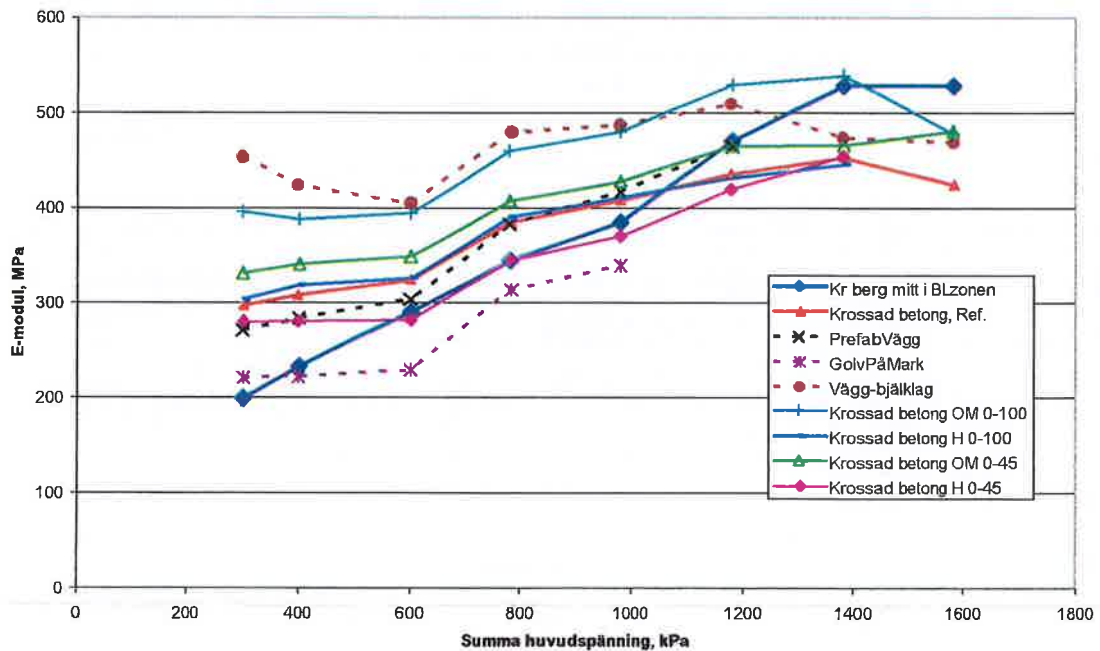
Stor deformationsökning mellan 1000 och 10000 pulser på 800/120- och 1000/120-nivåerna.

Väg- och banteknik

Krossad betong Permanenta def.



Styvhet, jämförelse



Väg- och banteknik

Dynamiskt treaxialförsök, VTI-metod

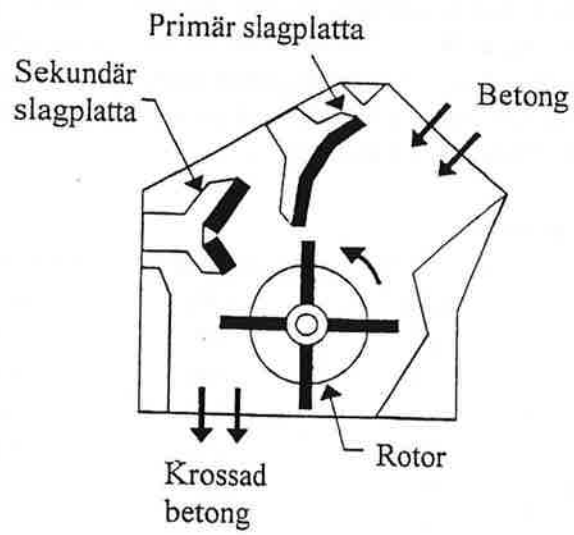
Ett cylindriskt prov med diametern 150 mm och höjden 300 mm packas in (volym=5,3 dm³). Normalt sätts önskad packningsgrad till 97 % och önskad vattenkvot sätts till 60 % av optimal vattenkvot (se resultattabell: Laboratoriepackning). Provet förses med ändplattor i metall och ett gummimembran utmed mantelytan. Provet ställs sedan in i en lufttät kammare. I kammaren sätts ett lufttryck för simulering av omkringliggande jords "stöd". Provet belastas i ett antal sekvenser med olika laster, kammartryck och antal pulser. En puls är en sinusformad dynamisk belastning på 0,1 sekund (10Hz, 10 i sekunden).

Belastningsnivåer, bärlagertest:

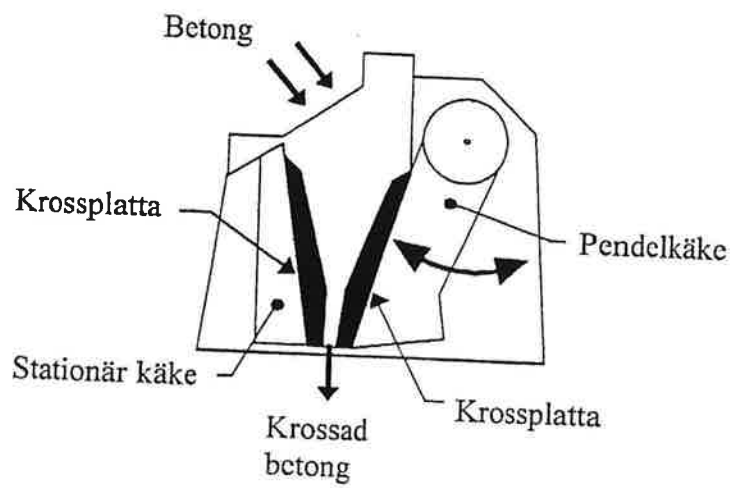
| Sekvens nr | Belastningsnivå | Statisk last kPa | Dynamisk last kPa | Kammartyck kPa | Antal pulser |
|------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|--------------|
| 1 | 100/60 | 20 | 100 | 60 | 1 000 |
| 2 | 200/60 | 20 | 200 | 60 | 1 000 |
| 3 | 400/60 |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

Från treaxialförsöket bestäms E-modul (styvhet) och ackumulerad permanent deformation (stabilitet). *Treaxialförsöken har utförts som dubbelprov där medelvärde bestämts. Vid större spridning har testet kompletterats med ett tredje försök.*

Principskiss



Rotationskross



Käftkross



Rotationskross



Kätkross

