



Packningsegenskaper och hållfasthet för moränjordar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

ERIK BERGMAN

CHRISTIAN GENBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2005
Examensarbete 2005:78

EXAMENSARBETE 2005:78

Packningsegenskaper och hållfasthet för moränjordar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet, Väg och vattenbyggnad

ERIK BERGMAN

CHRISTIAN GENBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
GEO- avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargrupp Geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2005

Packningsegenskaper och hållfasthet för moränjordar
Examensarbete inom Civilingenjörsprogrammet, Väg och vattenbyggnad

ERIK BERGMAN
CHRISTIAN GENBERG

© ERIK BERGMAN CHRISTIAN GENBERG, 2005

Examensarbete 2005:78
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telephone: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Moräntäkt i Målerås

Chalmers Reproservice
Göteborg, Sweden 2005

Packing ability and shear strength of till
Master's Thesis in the Master Degree Programme, Civil Engineering

ERIK BERGMAN
CHRISTIAN GENBERG

Department of Civil and Environmental Engineering
Division of GeoEngineering
Geotechnical Engineering Research Group
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Due to increased environmental consciousness in construction, rules have been made more stringent to the use of natural gravel in Sweden. This has led to an increased interest in use of alternative materials for road construction. Based on high supply of till materials in Sweden, there is a good reason in evaluating the geotechnical characteristics of till.

This report is demarcated to handle the shear strength and packing ability of three different types of till. The materials are classified to silty sand-till, and two gravel sand-tills with different mineral composition. The packing ability is evaluated by modified Proctor test. The results are presented as dry density as a function of water content. One of the materials has been evaluated by triaxial tests, in order to calculate friction angle. The tests has been carried out after packing the material at the water content 4, 6 and 8 %, and also after reducing the packing energy by half.

The results show that maximum dry density for the three materials varies between 2,13 – 2,25 t/m³ at optimum water content 6,1 – 6,2 %. The highest dry density was reached in the two coarsest materials. The friction angle for the tested material varies between 44 – 51 ° depending on water content and degree of packing. The empirical calculated friction angel for the same material is 39 °. The difference between the two results can depend on the small testing volume at the triaxial test compared to the grain size.

The results indicates that the three materials can be suitable of use in road construction. This conclusion is based on good packing ability due to high dry densities, and relatively high friction angles.

This report is written in Swedish.

Key words: till, modified Proctor, triaxial, density, water content, friction angle.

Packningsegenskaper och hållfasthet för moränjordar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet, Väg och vattenbyggnad

ERIK BERGMAN

CHRISTIAN GENBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Forskargrupp Geoteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

På grund av ökat miljötänkande inom vägbyggnad har reglerna skärpts för användandet av naturgrus (SFS 1995:1667). Detta har gjort att intresset för användandet av alternativa material ökat. Med tanke på den goda tillgången på morän i Sverige finns stort intresse av att utvärdera moränens vägtekniska egenskaper.

Denna rapport avgränsas till att behandla tre olika moränjordars packningsegenskaper och hållfasthet. De material som undersökts är klassificerade till **siltig sandmorän**, **grusig sandig morän** samt ytterligare en **grusig sandig morän**. Packningsegenskaperna har bestämts genom modifierad Proctor försök. Resultaten redovisas med torrdensitet som funktion av vattenhalt. Triaxialförsök har genomförts för ett av materialen (siltig sandmorän), för att utvärdera friktionsvinkel. Försöken har genomförts med variation i provens densitet.

Resultaten visade att maximal torrdensitet för de tre materialen varierar mellan 2,13 – 2,25 t/m³, vid optimal vattenhalt 6,1 – 6,2 %. Högst torrdensitet uppnåddes för de två grovkornigaste moränerna i studien. Friktionsvinkeln för den testade moränen varierade mellan 44 – 51° beroende på vattenhalt och packningsgrad. En empiriskt beräknad friktionsvinkel (Brinch Hansen) för samma material är cirka 39°. Provdiametern vid försöken var relativt liten största kornstorlek vilket kan medföra en högre friktionsvinkel i resultatet jämfört med den empiriskt framräknade.

Resultaten visar på att moränen kan fungera bra som vägbyggnadsmaterial, utifrån packningsegenskaper och hållfasthet. Detta på grund av höga torrdensiteter, vilket tyder på god packningsbarhet och höga friktionsvinklar som medför hög hållfasthet i materialet som utvärderats.

Nyckelord: morän, packningsegenskaper, hållfasthet, friktionsvinkel, torrdensitet, optimal vattenhalt.

Innehållsförteckning

ABSTRACT	III
SAMMANFATTNING	IV
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	V
FÖRORD	VII
NOMENKLATUR	VIII
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	1
1.3 Genomförande	1
2 BALLASTMATERIAL	3
2.1 Vägkroppens uppbyggnad och funktion	3
2.2 Morän	5
2.3 Material i studien	7
3 HÅLLFASTHET	10
3.1 Allmänt	10
3.1.1 Triaxialförsök	17
3.2 Packningsegenskaper	18
3.2.1 Proctorförsök	21
4 BESTÄMNING AV PACKNINGSEGENSKAPER OCH HÅLLFASTHET	24
4.1 Materialhantering	24
4.2 Proctorförsök	25
4.3 Triaxialförsök	27
5 RESULTAT OCH ANALYS	33
5.1 Proctorförsök	33
5.1.1 Felkällor	34
5.2 Triaxialförsök	36
5.2.1 Felkällor	43
6 SLUTSATSER	44
6.1 Fortsatta studier	45
7 KÄLLFÖRTECKNING	46

Appendix

A - Proctorförsök material M1

B - Proctorförsök material M2

C - Proctorförsök material N1

D – Packningsresultat vid triaxialförsök

Förord

Examensarbetet har genomförts på institutionen för bygg- och miljöteknik, GEO-avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola. Arbetet har initierats och genomförts i samarbete med NCC.

Vi vill börja med att tacka vår handledare för examensarbetet, Helene Kennedy NCC/Chalmers, för god handledning och många bra åsikter samt hennes stora engagemang och noggrannhet.

Vi vill också speciellt tacka Peter Hedborg och Aaro Pirhonen för all hjälp och trevligt umgänge i laboratoriet.

Tack även till:

Göran Sällfors, examinator

Chester Svensson, som har hjälpt oss med bestämning av petrologi

Lars Björck, Vägverket

Anders Lenngren, Vägverket/Chalmers

Fikagänget

Göteborg, juni 2005

Erik Bergman och Christian Genberg

Nomenklatur

B	Skillnad i stenhalt mellan fält och laboratorieprov, uttryckt i förhållande till torr totalvikt
b	Lastens bredd, m
C_U	Graderingstal
c	Kohesion, kPa
c'	Kohesion (effektivvärde), kPa
D	Lastens diameter, m
d_{50}	Medelkornstorlek, mm
e	Portal
e_L	Portal vid lösaste lagring
e_F	Portal vid fastaste lagring
g	Tyngdacceleration, m/s^2
h	Fallhöjd, m
I_D	Lagringstäthet
K_0	Viljodtryckskoefficienten
m	Fallvikt, kg
N	Antal lager
n	Antal stötar per lager
q	Lastens storlek, kPa
R_D	Packningsgrad
u	Portryck, kPa
V	Packningscylinderns volym, m^3
V_p	Porvolym
V_s	Fasta substansens volym
W	Provets vikt i fuktigt tillstånd, g
W_d	Provets vikt i torrt tillstånd, g
W_E	Packningsenergi, MJ/m^3
w	Vattenhalt
w_1	Vattenhalt hos laboratorieprov, % av torrsvikt
w_2	Vattenhalt, korrigerad att gälla material med samma stenhalt som i fält, % av torrsvikt
z	Djup från markyta, m
z_i	Lagertjocklek, m
γ	Tunghet, kN/m^3
ϕ	Jordens inre friktionsvinkel, grader
ϕ'	Friktionsvinkel (effektivvärde), grader
ρ	Skrymdensitet, t/m^3
ρ_D	Torrdensitet, t/m^3
ρ_{d1}	Torrdensitet hos laboratorieprov, t/m^3
ρ_{d2}	Uppnådd torrdensitet i fält t/m^3
$\rho_{d2\text{max}}$	Maximal torrdensitet vid modifierad Proctor packning, t/m^3

ρ_s	Kompaktdensitet, t/m ³
σ	Totalspänning, kPa
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Huvudspänningar, kPa
σ'	Effektiv vertikalspänning, kPa
σ'_h	Effektiv horisontalspänning, kPa
σ_z	Vertikalspänning på djupet z, kPa
$\Delta\sigma_z$	Vertikal tillskottsspänning, kPa
τ_f	Skjuvhållfasthet, kPa
ν	Tvärkontraktionstal

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Materialet i en vägöverbyggnad har i Sverige länge utgjorts av bergkross och naturgrus. Dessa material lämpar sig bra med tanke på Sveriges goda tillgång samt att de är väl beprövade i vägbyggnadssammanhang. Det ställs höga krav på ett vägöverbyggnadsmaterial, då dimensioneringsperioden för det obundna materialet i en vägkropp är 40 år.

På senare år har kraven på hållbar utveckling och kretsloppstänkande ökat, vilket bland annat har medfört beskattning på uttag av naturgrus. Denna beskattning beror till stor del på att naturgrus är en viktig del i den naturliga reningen av vatten (SFS 1995:1667). Detta har gjort att intresset för användande av alternativa material har ökat.

Morän är Sveriges vanligaste jordart och täcker cirka 2/3 av Sveriges yta (www.sgu.se). På grund av den goda tillgången finns intresse av att utreda moränens vägtekniska egenskaper. Användande av morän som vägbyggnadsmaterial skulle kunna spara såväl ekonomiska som miljömässiga resurser. Tanken är att byta ut en del av materialet i förstärkningslagret mot morän. Den främsta fördelen är att material i väglinjen kan utnyttjas, och därmed kan masstransporter minskas.

Svårigheterna med utnyttjande av morän är dess skiftande egenskaper, såväl regionalt som lokalt. Dessutom gör den ofta höga finjordsandelen att morän länge ansetts som en problemjord, på grund av att materialet är känsligt för förändringar i vattenhalt och därmed kan förlora en stor del av sin bärförmåga.

1.2 Syfte och mål

Syftet med rapporten är att utvärdera moräns lämplighet som konstruktionsmaterial i en vägöverbyggnad. De egenskaper som ligger till grund för utvärderingen är packningsegenskaper och hållfasthet. Denna rapport ger därför inte ett heltäckande underlag för moräns lämplighet i frågan, utan ingår som en del i en större undersökning.

Målet är att finna representativa värden på maximal densitet, optimal vattenhalt och friktionsvinkel för de material som studeras, samt jämföra dessa resultat med kända empiriska samband.

1.3 Genomförande

En litteraturstudie har genomförts för att erhålla kännedom om materialen, undersökningsmetoderna samt teori bakom de olika egenskaperna.

Undersökningen omfattar tre olika moräntyper. Materialen i studien är tänkta att representera tre för svenska förhållande vanligt förekommande moräntyper. Laboratieförsök har genomförts för att bestämma materialens kornfördelning, torrdensitet, optimala vattenhalt samt friktionsvinkel. Laboratieförsöken innefattar siktanalys, modifierad Proctor- samt triaxialförsök.

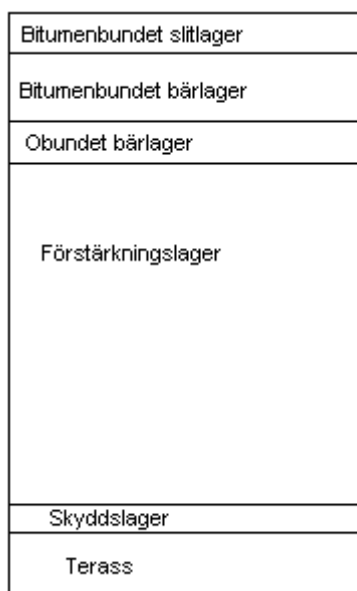
Slutligen jämförs moränmaterialens egenskaper med kända empiriska samband för vanligt använda material i vägbyggnadssammanhang.

2 Ballastmaterial

I detta kapitel beskrivs en vägkroppens uppbyggnad och de olika lagrens funktion. Därefter följer ett avsnitt om moräns bildningssätt och uppbyggnad. Slutligen presenteras materialen som har analyserats i studien.

2.1 Vägkroppens uppbyggnad och funktion

En vägöverbyggnad är uppbyggd av flera skikt vilka har olika sammansättning och funktion, se *Figur 2.1*. De ingående skikten skall tillsammans uppnå de krav som finns på vägen, för att säkerhetsställa att den förblir säker, bärig och beständig under hela den dimensionerade tiden. En i Sverige vanlig vägöverbyggnad, GBÖ (Grus Bitumen Överbyggnad), består av ett bitumenbundet slitlager, bitumenbundet bärlager, obundet bärlager, förstärkningslager samt ett skyddslager.



Figur 2.1 Principskiss av en vägöverbyggnad

Det bitumenbundna slitlagrets funktion är att uppfylla de krav som ställs på vägytan, vilket innebär att vägen skall vara jämn och säker att åka på, samt uppnå de krav på avrinning som finns.

Det bitumenbundna bärlagret är tillsammans med det obundna bärlagret ur bärighetssynpunkt de viktigaste lagren. Bärlagren skall fördela lasterna från det bitumenbundna slitlagret så att det inte uppkommer deformationer och skadliga spänningar i de underliggande lagren.

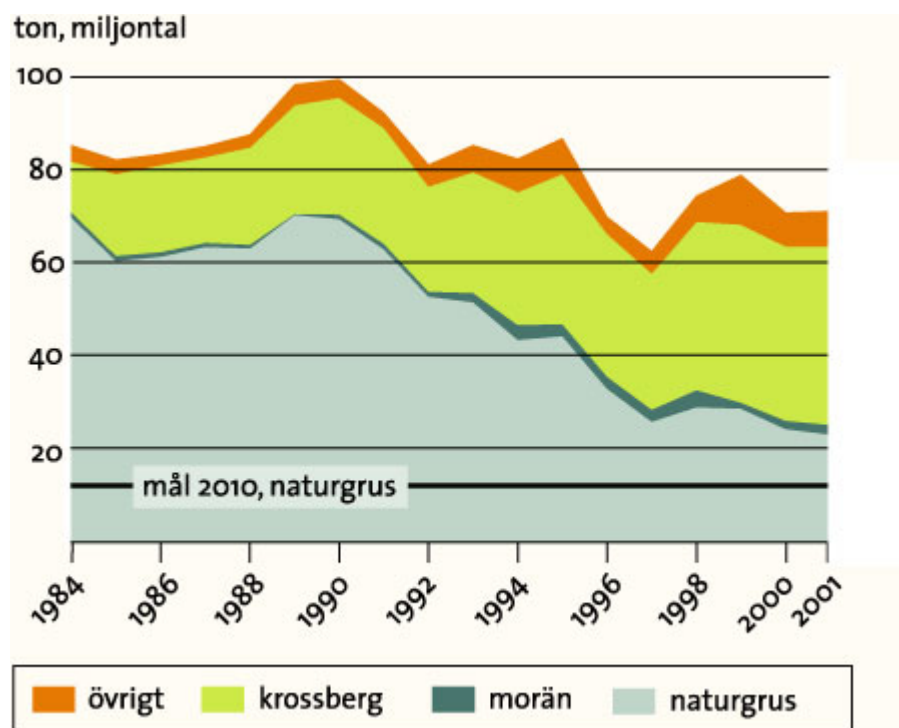
Förstärkningslagret har till uppgift att tåla de spänningar och laster som fördelas från bärlagren, och sedan i sin tur fördela dem vidare till undergrunden (terrassen). Detta lager fungerar även som ett dränerande skikt och därför ställs det krav på materialets kornstorlek. Materialet skall utgöra ett stabilt lager så att packning och utläggning av ovanliggande lager är möjlig.

Skyddslagrets uppgift är att i områden med stor köldmängd och tjälfarligt material i undergrunden tjäna som ett materialavskiljande lager. Det skall hindra undergrundsmaterial från att tränga upp i förstärkningslagret samt minska ojämna tjällyftningar. (Asfaltboken, 2002).

Material som skall användas i ett anläggningsprojekt kan delas in i två typer, det som köps in och det som kan tillgodoses i linjen. Inköpta material är material där råmaterialet inte härrör från arbetsområdet utan köps ifrån närliggande täkter och

transporteras till arbetsplatsen. Med material i väglinjen avses material utvunnet ur det tänkta arbetsområdet.

De totala leveranserna av ballast i Sverige har de senaste fyra åren uppgått till cirka 70 miljoner ton. Av detta används cirka 50 % för vägbyggnad (Berg, 2004). *Figur 2.2* visar statistik över fördelningen av olika ballastmaterial. Observera att fördelningen avser total ballastleverans, och visar därför inte fördelning specifikt för vägändamål.



Figur 2.2 Fördelning av ballastmaterial (Berg, 2004)

Figuren visar att andelen krossberg har ökat, medan användningen av naturgrus har minskat avsevärt, vilket beror på beskattningen på naturgrus (SFS 1995:1667).

Morän har i mindre skala använts för vägändamål, efter uppsiktning av materialet. Genom att sikta materialet innan användning kan önskade kornstorlekar användas. Denna metod är dock kostnadskrävande, då endast en del av materialet kan användas, beroende på kornfördelning och det är svårt att finna möjliga avsättningsområden för den resterande delen av materialet (Vägverket Publ 1996:6). Det är därför viktigt att samtliga fraktioner av moränen kan utnyttjas.

2.2 Morän

Morän är Sveriges vanligaste jordart och täcker cirka 2/3 av Sveriges yta (www.sgu.se). På grund av den goda tillgången är det önskvärt att använda morän i vägbyggnadsändamål.



Morän är en blandkornig jordart och kan innehålla samtliga kornfraktioner. Kornen i morän är i regel kantiga och av oregelbunden form. Variationen i kornstorlek och mineralsammansättning är stor i olika regioner.

Bild 2.1 Morän från Målerås

Morän har bildats av material som transporterats med landisen, och sedan avsatts vid avsmältningen av isen, för cirka 10 000 år sedan. Materialet består dels av tidigare jordlager som upptagits, dels av berggrund som eroderat och brutits loss av isen. Materialet har sedan blandats och bildat en jordart innehållande allt ifrån lerpartiklar till stora block. Tjockleken på moränen varierar mellan några decimeter till flera meter. I extrema fall kan mäktigheten uppgå till 100 meter (Ericsson et al, 1996). Morän delas ofta in i två grupper beroende på bildningssätt: **bottenmorän** och **ytmorän**.

Bottenmorän består av det material som transporterats under, eller i landisens nedre delar. På grund av det höga tryck som materialet utsatts för, har resultatet blivit en mycket fast jordart. Huvuddelen av materialet härstammar från berggrunden där isen drog fram. Därför präglas bottenmoränens sammansättning av områdets bergarter, med hänsyn till kornstorlek och mineralsammansättning. Detta medför att moränens egenskaper varierar kraftigt över Sverige (Ericsson et al, 1996).

Ytmorän består av det material som transporterats ovanpå isen, för att sedan avsättas som kullar, vallar eller ett lager över bottenmorän. Ytmoränen är lösare lagrad än bottenmorän då den inte utsatts för nämnvärt tryck. Vidare är ytmoränen finjordsfattig och dess korn oftast mer skarpkantade. Ytmoränen överlagrar ofta bottenmorän, och gränsen mellan de två typerna är diffus. I områden som ligger under högsta kustlinjen finns dock sällan någon ytmorän (Ericsson et al, 1996).

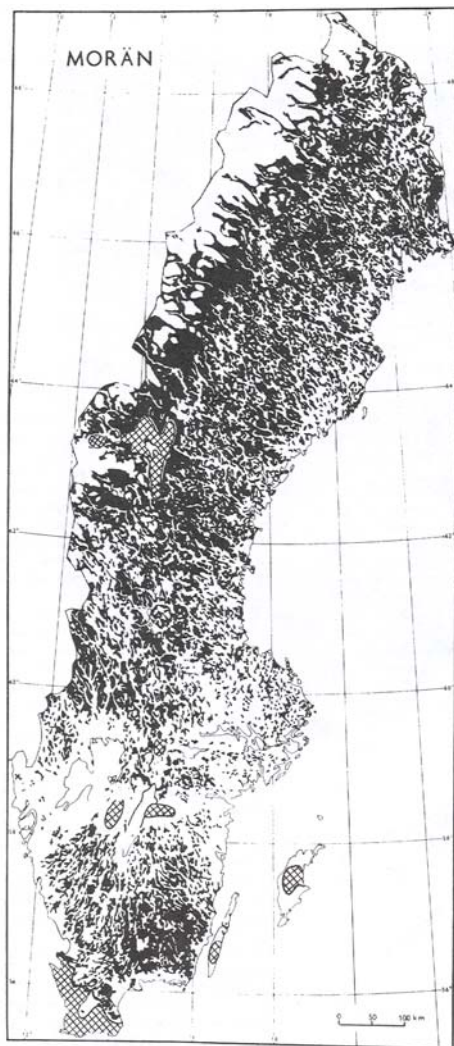
Problemet med att använda morän i vägbyggnadssammanhang anses vara förekomsten av finjordsfraktioner, vilket talar för att ytmoränen har den bästa förutsättningen för ändamålet.

Morän kan delas in i olika grupper, enligt *Tabell 2.1*, beroende på de ingående fraktionernas andel.

Tabell 2.1 Indelning av morän enligt SGF

Block- och stenmoräner	Block- och stenhalt > 40 viktprocent av total jordmängd
Grovkorniga moräner	Block- och stenhalt < 40 viktprocent av total jordmängd Finjordshalt < 15 viktprocent av mängden grovjord + finjord
Blandkorniga moräner	Block- och stenhalt < 40 viktprocent av total jordmängd Finjordshalt 15-40 viktprocent av mängden grovjord + finjord
Finkorniga moräner	Block och stenhalt <40 viktprocent av total jordmängd Finjordshalt > 40 viktprocent av mängden grovjord + finjord
Siltmorän	Lerhalt < 20 viktprocent av finjordsmängden.

Avgörande för moränens egenskaper och sammansättning är geologin i området och isens rörelse. Bergarterna har olika hållfasthetsegenskaper, vilket påverkar moränens kornsammansättning. En bergart som tål mycket nötning (till exempel granit), bildar morän med större kornfraktioner än en jordart som härstammar från undergrund som tål mindre nötning (till exempel kalksten). Kornstorleksfördelningen påverkas även av hur isen drog sig tillbaka, vart isälven mynnade ut och iskanten befann sig. Inlandsisen drog sig inte tillbaka med jämn hastighet utan stannade på vissa ställen längre än andra. Här återfinns ofta ett mer krossat material till följd av mer nötning av kornen. Ytterligare en viktig faktor som har med isens rörelse att göra är hur långt materialet har transporterats innan avsättningen. En morän som transporterades långa sträckor med isen har utsatts för mer nötning, och består därför av ett finkornigare material (Lindström, 1974). Dessa faktorer påverkar hur moränen skiljer sig i olika delar av landet.

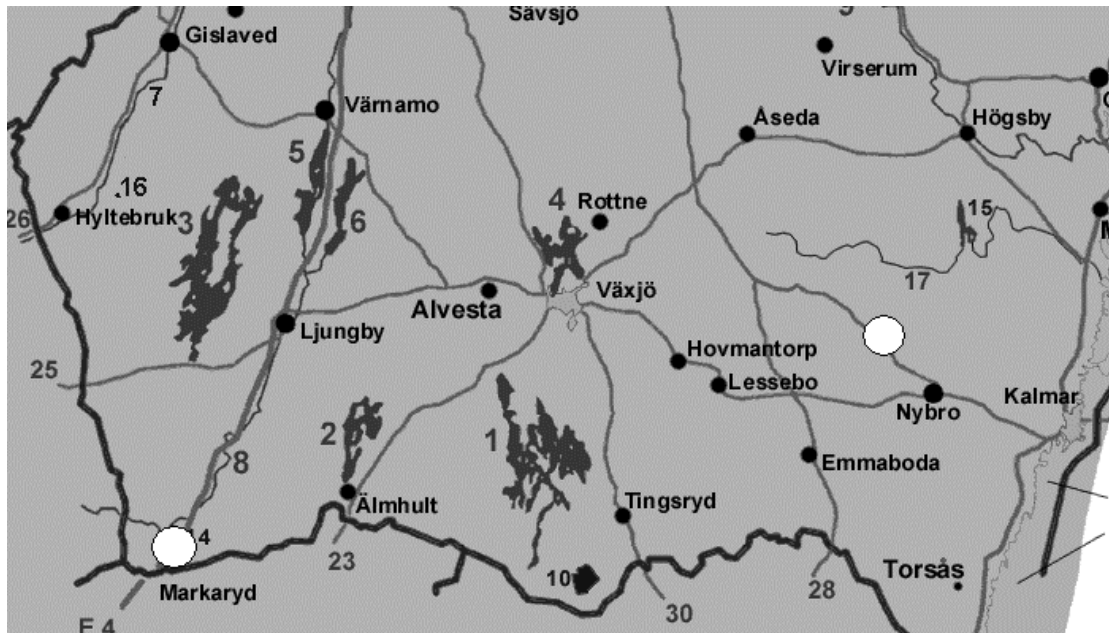


I *Figur 2.3* visas moränens utbredning i Sverige i form av de mörka ytorna. Figuren visar att moräntillgången är god i större delen av landet. Den största delen av moränen i Sverige har bildats av urbergarter, då främst av gnejs och granit. Morän som har bildats av dessa bergarter har ofta sand- och grusfraktioner som dominerande kornfraktion. I områden med sedimentära och finkorniga bergarter är moränen av lerig karaktär. Variationerna är till exempel lermorän eller lerig morän. Denna typ av morän finns främst i Skåne samt på Gotland och Öland, vilket motsvaras av de rutade ytorna i *Figur 2.3*.

Figur 2.3 Moränens utbredning i Sverige

2.3 Material i studien

I studien ingår tre olika moräner. Valet av moräner baseras på att utvärdera två moräntyper med olika kornfördelning men liknande mineralsammansättning, samt en morän med annan mineralsammansättning, för att studera skillnaden mellan dessa egenskaper. Av praktiska skäl valdes områden dels inom rimligt avstånd från Göteborg, och från täkt, då jorden är naturligt hårt packad. De områden som valdes är Markaryd och Nybro (Målerås), se *Figur 2.4* där områdena som moränen hämtats från är markerade.

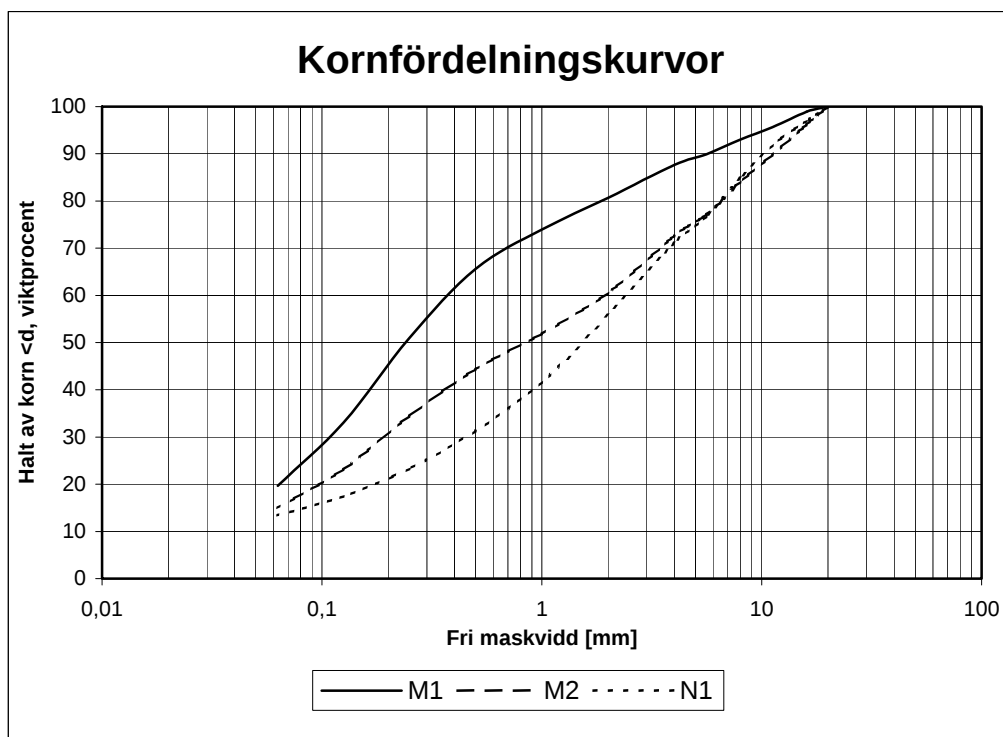


Figur 2.4 Karta över södra Småland

Berggrunden i Markaryd består av framför allt gnejs och kvartsit. Målerås ligger i ett område av vulkaniska bergarter omgivet av granit. Berggrunden i områdena antas till stor del bestämma moränernas sammansättning, tillsammans med omgivande berggrund, som har transporterats med isen. Jordarterna i båda områdena består av moräner och isälvsediment.

Materialen har siktats för att bestämma kornstorleksfördelning (se Figur 2.5) samt mineralbestämts. Nedan följer en beskrivning av materialen. Kornfördelningskurvorna baseras på cirka 5 siktningsar av varje material, vilka har slagits ihop till en medelsiktcurve för vardera materialet. Fullständiga redovisningar av siktanalyser finns i appendix A-C.

Materialen i studien kommer härnäst att benämnas som M1 (Markaryd 1), M2 (Markaryd 2) och N1 (Nybro 1).



Figur 2.5 Kornfördelningskurvor M1, M2 och N1

M1 är hämtad i närheten av Markaryd. Moräntypen har bestämts till **siltig sandmorän** (Karlsson & Hansbo, 1984). Materialet består av främst sura, finkorniga, mest grå gnejser (62%) samt sura, medelkorniga, granitiska bergarter (29%). M1 innehåller störst andel finjord av de tre moränerna. Denna morän antas, på grund av mineralsammansättningen, bildats av främst lokal berggrund med inslag av material som transporterats från andra områden.

M2 är också hämtad i närheten av Markaryd. Moräntypen har bestämts till **grusig sandig morän** (Karlsson & Hansbo, 1984). Materialet består av sura, medelkorniga granitiska bergarter (79%), men även sura, finkorniga, grå gnejser (10%) och basiska, finkorniga bergarter (8%). Den höga andelen av granit tyder på att moränen har bildats av material från angränsande områden som transporterats med isen.

N1 är hämtat i närheten av Nybro (Målerås) och har en kornfördelning liknande M2. Moräntypen har bestämts till **grusig sandig morän** (Karlsson & Hansbo, 1984). Materialet består av porfyryr och andra täta sura vulkaniter (98%). Moränsammansättningen stämmer väl överens med berggrunden i området, och materialet kan därför antas vara en lokalt bildad morän.

Observera att klassificeringen av moräntyp baseras på det material som har skapats genom bortsiktning av material >20 mm (se avsnitt 4.1). Då ingen okulärbesiktning av materialet på plats har genomförts angående till exempel blockförekomst, görs här ingen bedömning av ursprungsmaterialet.

3 Hållfasthet

I detta kapitel beskrivs några av de faktorer som påverkar en jords hållfasthet. Kapitlet inleds med grundläggande hållfasthet- och spänningsbegrepp. Därefter presenteras några beräkningsmodeller för tillskottsspänningar, och beskrivning av bestämning av hållfasthet med triaxialförsök. Slutligen behandlas packningens inverkan på en jords hållfasthet med teorier kring principerna för packning av jord, och beskrivning av Proctorförsök.

3.1 Allmänt

Jordarterna delas in i två huvudgrupper, med avseende på hållfasthet: friktionsjord och kohesionsjord. Hållfastheten hos friktionsjord byggs till största delen upp av friktion mellan kornen. Dessutom kännetecknas friktionsjord av att permeabiliteten är relativt hög. Permeabiliteten är ett mått på ett materials dränerande förmåga, och bestäms till stor del av kornfördelningen hos materialet. Hållfastheten hos kohesionsjord byggs dels upp av friktion mellan kornen, dels av kohesion i materialet. Kohesionsjord har låg permeabilitet. (Karlsson & Hansbo, 1984).

Morän är en blandning av de två ovan nämnda jordtyperna. Indelningen beror av finjordsandelen hos materialet. De material som ingår i studien är relativt grovkorniga, vilket gör att de kommer att behandlas som friktionsjord.

Skjuvhållfastheten hos friktionsjord byggs, som nämnts, främst upp av friktionen mellan kornen. För att brott skall uppstå krävs att kornen förskjuts i förhållande till varandra. Förskjutningen sker genom till exempel glidning, rullning och vridning.

Skjuvhållfastheten hos en jord uttrycks normalt med Mohr-Coulomb's brotthypotes, se *Figur 3.1*:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

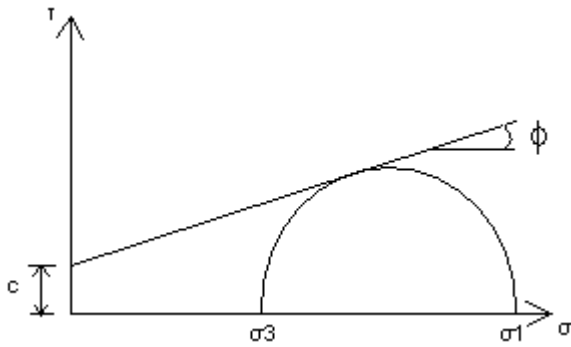
där

τ_f är jordens skjuvhållfasthet, kPa

c är kohesion, kPa

ϕ är jordens inre friktionsvinkel i grader

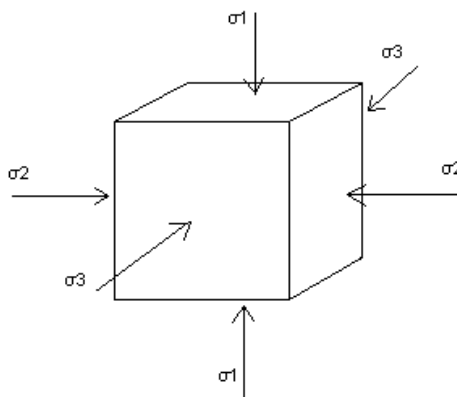
Brotthypotesen illustreras i *Figur 3.1*.



Figur 3.1 Mohr-Coulomb's brotthypotes

För alla spänningstillstånd (σ_1 - σ_3) som ligger under brottenveloppen råder jämvikt, men när cirkeln tangerar brottenveloppen sker brott i materialet.

De tre huvudspänningsriktningarna för ett jordelement visas i Figur 3.2. Den största spänningen är oftast den vertikala.



Figur 3.2 Huvudspänningsriktningar

Vertikalspänningen för ett jordelement på ett visst djup beräknas som:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^N g \rho_i z_i \quad (3.2)$$

där

σ_z är vertikalspänning, kPa

g är tyngdaccelerationen, m/s^2

ρ_i är respektive lagers skrymdensitet, t/m^3

z_i är respektive lagers tjocklek, m

Vanligtvis används i jordsammanhang begreppet tunghet, vilket bestäms som:

$$\gamma = g\rho \quad (3.3)$$

där

γ är tunghet, kN/m³

De flesta jordar innehåller porvatten, vilket hjälper till att bära upp spänningarna. Den del av spänningen som bärs upp av porvatten kallas för portryck och den del som bärs upp av kornskelettet kallas för effektivspänning. Förhållandet mellan totalspänning, effektivspänning och portryck är:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3.4)$$

där

σ är totalspänning, kPa

σ' är effektivspänning, kPa

u är portryck, kPa

Horizontalspänningar för ett snitt är betydligt svårare att bestämma jämfört med vertikalspänningar. Horizontalspänningen σ'_h relateras därför ofta till vertikalspänningen enligt:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'} \quad (3.5)$$

där

K_0 är vilojordtryckskoefficienten

σ'_h är effektiv horizontalspänning, kPa

σ' är effektiv vertikalspänning, kPa

K_0 är ofta ett empiriskt värde. I sand antas $K_0 = 0,5$. För lera kan K_0 variera från 0,6 till över 1, beroende på konsolideringsgrad (Sällfors 2001).

Friktionsjord kan nästan alltid betraktas som dränerad, varvid skjuvhållfastheten beskrivs utifrån effektivspänningar enligt:

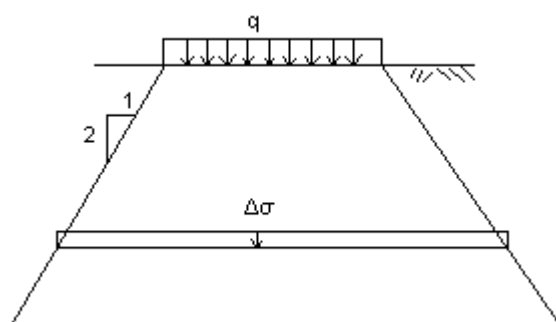
$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (3.6)$$

I regel finns ingen kohesion i friktionsjord, varvid c' termen ofta kan försummas. Detta medför att friktionsvinkeln bestämmer hållfastheten för friktionsjord. Det bör dock uppmärksammas att cementering mellan kornen kan ge upphov till så kallad skenbar kohesion.

När en jord utsätts för en yttre last uppkommer så kallade tillskottsspänningar i materialet. Tillskottsspänningarna beror bland annat av lastens storlek, typ och form. Spänningen är som störst direkt under lasten, och minskande med djupet.

Spänningsberäkningar bygger ofta på antaganden om jord som ett homogent, isotropt och linjärelastiskt medium. Trots att antagandet inte är helt korrekt så anses denna metod ge ett tillfredsställande resultat.

En närmetod för beräkning av tillskottsspänningar är den så kallade 2:1 metoden. Spänningarna från den tillförda lasten antas här spridas med en lutning 2:1 se *Figur 3.3*.



Figur 3.3 Schematisk beskrivning av 2:1 metoden

För en långsträckt belastning med bredden blir medeltillskottsspänningen från lasten på djupet:

$$\Delta\sigma_z = \frac{b \cdot q}{(b + z)} \quad (3.7)$$

där

$\Delta\sigma_z$ är vertikal tillskottsspänning, kPa

b är lastens bredd, m

q är lastens storlek, kPa

z är djup från markyta, m

Tillskottsspänningen av en cirkulär last enligt 2:1 metoden beräknas enligt:

$$\Delta\sigma_z = \frac{q \cdot D^2}{(D + z)^2} \quad (3.8)$$

där

D är lastens diameter, m

Boussinesq härledde följande samband för spänningar orsakade av en vertikal punktlast på markytan:

(3.9)

Enligt Boussinesq blir spänningen i en punkt under en cirkulärt utbredd last:

$$(3.10)$$

[illegible]

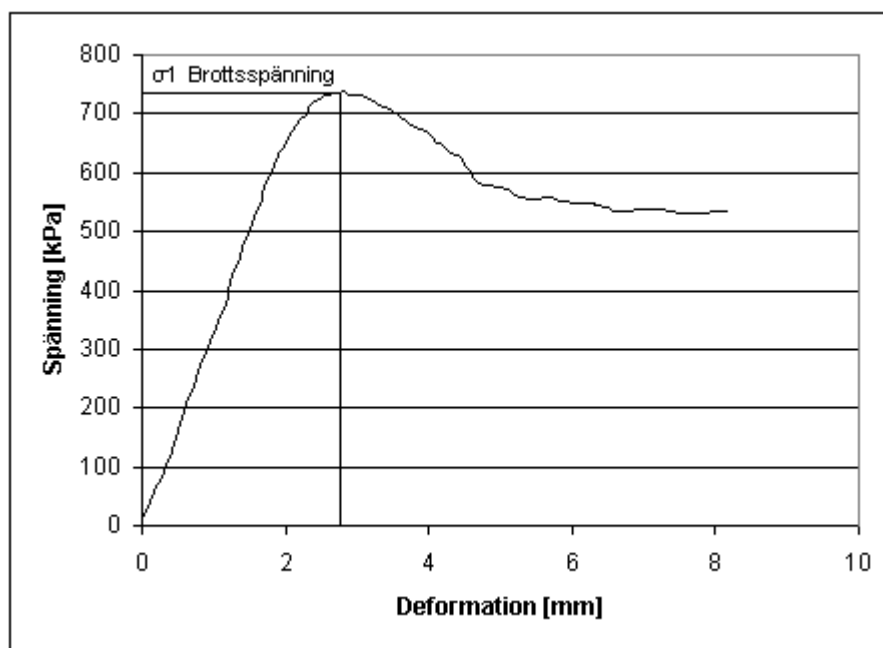
Centralt under lastarean erhålls:

$$\Delta\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (3.11)$$

$$\Delta\sigma_\rho = \sigma_\omega = q \left[\frac{1+2\nu}{2} \cdot \left(1 - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right) - \frac{R^2 z}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (3.12)$$

$$\tau_{\rho z} = 0$$

Skjuvhållfastheten τ_f definieras av det spänningstillstånd då materialet går till brott. När brott uppstår i materialet ökar deformationerna utan att spänningen i jorden ökar. Detta illustreras i *Figur 3.6*.



Figur 3.6 Deformationskurva för fast lagrad jord

Figuren visar att spänningen ökar linjärt med deformationen upp till en viss punkt då spänningen avtar, för att sedan minska. Den maximala spänningen motsvaras av σ_1 i *Figur 3.1*. Kurvans utseende beror till stor del av lagringstätheten hos materialet. Lagringstätheten I_D är ett mått på hur stor del av jordvolymen som består av hålrum, och definieras som

$$I_D = \frac{e_L - e}{e_L - e_F} \quad (3.13)$$

där

e är aktuellt portal

e_L är portal vid lösaste lagring

e_F är portal vid fastaste lagring

Portalet är kvoten mellan porvolym och den fasta substansens volym.

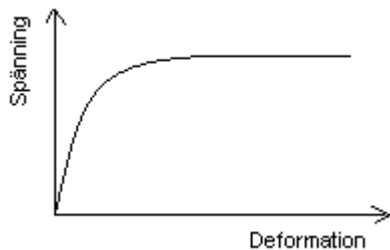
$$e = \frac{V_p}{V_s} \quad (3.14)$$

där

V_p är porvolym

V_s är den fasta substansens volym

Det finns tre typer av lagringstäthet, lös-, fast-, och kritisk lagring. En fast lagrad jord måste expandera för att kornen skall få möjlighet att förskjutas, jorden sägs då vara dilatant. Detta fall kräver större energimängd för att brott skall uppstå, jämfört med en löst lagrad jord. Deformationskurvan i *Figur 3.6* är typisk för en fast lagrad jord. Karakteristiska deformationskurvor för kritiskt respektive löst lagrad jord visas i *Figur 3.7* och *Figur 3.8*.



Figur 3.7 Deformationskurva för kritiskt lagrad jord



Figur 3.8 Deformationskurva för löst lagrad jord

Som tidigare nämnts är det till stor del friktionsvinkeln som bestämmer en jords skjuvhållfasthet. Storleken på friktionsvinkeln beror av flera faktorer, och kan delas upp i två komponenter: en basfriktionsvinkel som i huvudsak beror av kornens mineralsammansättning och i viss mån form, samt en komponent som beror av lagringstäthet (Larsson, 1989).

Följande empiriska samband för uppskattning av friktionsvinkeln, vid en största kornstorlek på 20 mm, ställdes upp av Brinch Hansen (1970):

$$\phi' = 26 + 10I_D + 0,4C_U + 1,6\lg d_{50} \quad (3.15)$$

där

C_U är graderingstalet ($\frac{d_{60}}{d_{10}}$)

d_{50} medelkornstorleken, mm

Sambandet baseras på triaxialförsök inom spänningsintervallet 50-500 kPa (Wiesel, 1985).

Ungefärliga värden på friktionsvinkeln i olika jordar visas i *Tabell 3.1*.

Tabell 3.1 Friktionsvinklar för olika jordmaterial, enligt SGI 1984

Lagringstäthet	Jordart						
	Silt	Sand	Grus	Sand-morän	Grus-morän	Maka-dam	Sprängsten
Löst lagrad	26°	28°	30°	35°	38°	30°	40°
Fast lagrad	33°	35°	37°	42°	45°	38°	45°

Som visas i ekvation 3.15 beror friktionsvinkeln även av kornfördelningen hos materialet. Enligt ekvationen ökar friktionsvinkeln med ökande kornstorlek.

Mineralsammansättningen hos kornen påverkar friktionsvinkeln dels genom att de olika mineralen har olika friktionsegenskaper, och dels genom mineralens hårdhet. Hårdheten hos mineralen påverkar friktionsvinkeln indirekt genom dess motstånd mot krossning. Att friktionsvinkeln minskar med ökad krossning hos materialet beror på att kornen kan förskjutas utan omlagring.

Flera undersökningar har genomförts med avseende på krossning av korn. Lee & Farhoomand (1967) genomförde försök på krossad granit och fann bland annat att krossningen ökar med ökande kornstorlek, samt när graderingstalet minskar. Hardin (1985) undersökte krossningen för olika friktionsmaterial, och konstaterade, utöver ovanstående, bland annat att krossningen ökar med kornens kantighet. Dessa faktorer påverkar genom antalet kontaktpunkter mellan kornen. Ökande kornstorlek och kantighet medför färre kontaktpunkter, varvid spänningen i dessa ökar (Larsson, 1989)

3.1.1 Triaxialförsök

En metod för att undersöka en jords hållfasthet är triaxialförsök. Triaxialförsök utförs genom att belasta ett jordprov med ett allsidigt tryck. Vanligtvis utförs försöket med ett cirkulärt jordprov med höjden 2-2,5 gånger diametern. Försöken kan utföras

dränerade eller odränerade beroende på vilken sorts material som studeras. Normalt konsolideras provet för önskat spänningstillstånd innan försöket utförs.

Provet belastas sedan vertikalt till brott (aktivt försök), medan deformation och spänning mäts kontinuerligt. Ur försöket kan en spänning – deformationskurva ritas upp och brottsspänningen utläsas. Ett alternativ till att öka vertikalspänningen är att, efter konsolidering, avlasta provet vertikalt, så kallat passivt försök.

Triaxialförsök beskrivs vidare i avsnitt 4.3.

3.2 Packningsegenskaper

Som nämnts tidigare påverkas hållfastheten hos en jord till stor del av lagringstätheten. Ökad lagringstäthet innebär högre densitet hos jorden, vilket medför ökad skjuvhållfasthet. På grund av detta är det viktigt att öka jordens densitet vid anläggningen av till exempel en väg. Densitetsökningen erhålls genom packning av materialet.

Packning av jord utförs genom att belasta jorden enligt tre olika principer: statiskt tryck, stötar eller vibrering. Förutom ökad hållfasthet bidrar packningen bland annat till minskade sättningar i konstruktionen, ökad stabilitet samt ökad bärighet.

Packning av jord är ett effektivt sätt att minska underhållskostnader samt förlänga livslängden för konstruktionen. Normalt uppgår kostnaden för packning till 2-4 % av totalkostnaden (Forssblad, 2000).

Resultatet av packningen kan beskrivas som packningsgrad. Packningsgraden, vilken är förhållandet mellan uppnådd torrdensitet i fält och maximal torrdensitet vid modifierad Proctor packning (se kapitel 3.2.1), uttrycks enligt:

$$R_D = \frac{\rho_{d2}}{\rho_{d2\max}} \quad (3.16)$$

där

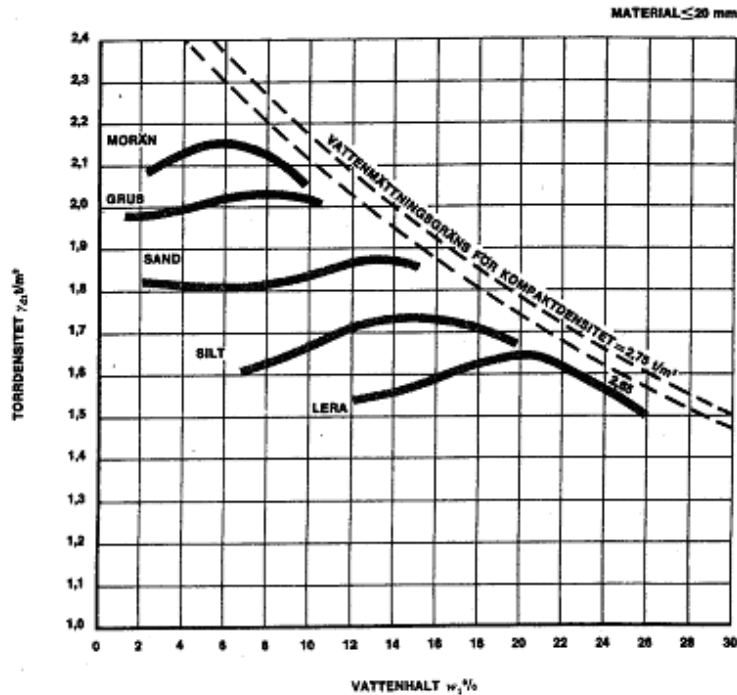
R_D är packningsgrad

ρ_{d2} är uppnådd torrdensitet i fält, t/m^3

$\rho_{d2\max}$ är maximal torrdensitet vid modifierad Proctor packning, t/m^3

För vägbankar föreskrivs en packningsgrad på 90-95 % modifierad Proctor (Forssblad, 1987).

Resultatet av packningen beror bland annat av jordart, vattenhalt, packningsarbete, packningsmetod samt undergrundens komprimeringsegenskaper. I *Figur 3.9* visas typiska densitetskurvor, med modifierad Proctorförsök, för olika jordmaterial.



Figur 3.9 Karaktäristiska packningskurvor för olika material, modifierad Proctor (Fagerström, 1973)

Densitetskurvorna i Figur 3.9 visar sambandet mellan uppnådd torrdensitet och vattenhalt hos materialet vid packning. Formen hos de olika kurvorna beror på att resultatet av packningen varierar vid olika vattenhalter.

Vattenmättnadskurvan visar de teoretiskt högsta torrdensiteter som kan uppnås vid en given vattenhalt. Vid vattenmättnadsgraden 100 % beräknas kurvan enligt:

$$\rho_D = \frac{\rho_s}{\rho_s w + 1} \quad (3.17)$$

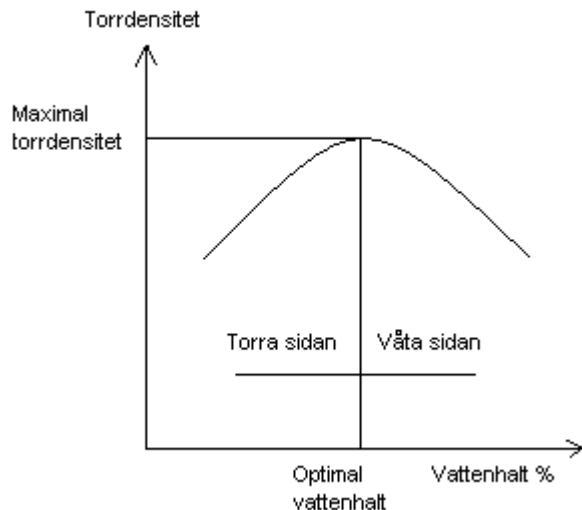
där

ρ_D är torrdensitet, t/m^3

ρ_s är kompaktdensitet, t/m^3

w är vattenhalt

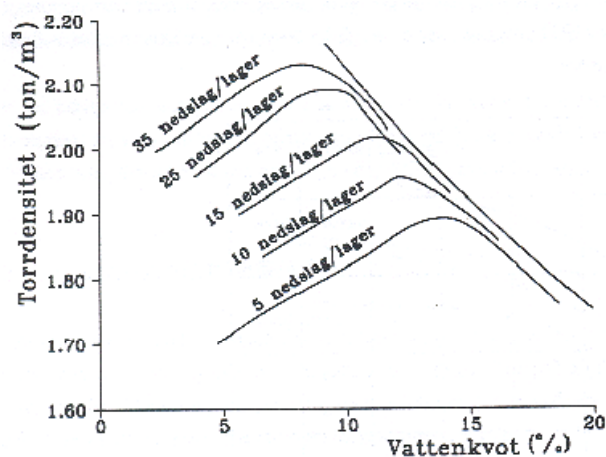
Densitetskurvan erhålls genom att samma typ av material packas med olika vattenhalter. Efter packningen torkas materialet och torrdensiteten beräknas. Densiteten kan sedan plottas mot aktuell vattenhalt vid packning.



Figur 3.10 Principskiss av densitetskurva (Proctorförsök)

För varje material och packningsmetod finns en viss vattenhalt (se Figur 3.10) som ger det bästa packningsresultatet, så kallad optimal vattenhalt. Generellt så ökar optimal vattenhalt vid minskande kornstorlek. Inverkan av optimal vattenhalt är olika för olika material. Sand och grus, vilka tillhör de större kornstorlekarna är mindre känsliga för vattenhalten då materialet hinner dränera bort eventuellt överskottsvatten vid packningen. En för låg vattenhalt ger dock ett sämre packningsresultat. Vid packning av finkorniga material är det viktigare att vattenhalten är nära den optimala, då dräneringsförmågan är begränsad. En vattenhalt under den optimala ger ett större packningsmotstånd medan en vattenhalt över är mer lättpackad men ger sämre densitet (Forssblad, 2000).

Den viktigaste faktorn för resultatet av packningen är tillfört packningsarbete. Ett ökat packningsarbete innebär högre densitet upp till en viss gräns. Figur 3.11 visar exempel på uppmätta torrdensiteter för varierande packningsarbete. Resultaten baseras på tester med Proctormetod. Figuren visar även att optimal vattenhalt påverkas av tillförd packningsenergi.



Figur 3.11 Torrdensitet som funktion av vattenkvot vid olika packningsarbete, efter Hough (1969)

Ett för lågt packningsarbete ger otillräcklig packning, medan ett för stort arbete kan medföra nedkrossning av materialet. Nedkrossning av materialet kan dock ha positiv inverkan på hållfastheten. Genom att packa materialet med stötar istället för vibrering kan en högre friktionsvinkel erhållas, för samma lagringstäthet. Skillnaden i resultatet beror av den nedkrossning av kornen, och därmed större anläggningspunkter, som uppstår vid packning genom stötar. Storleken på skillnaden för de olika metoderna beror på hur lättkrossat materialet är (Larsson, 1989). Nedkrossning av kornen kan dock även medföra till exempel förändrad permeabilitet för jorden.

För att utvärdera ett materials packningsegenskaper finns ett antal testmetoder framtagna. Gemensamt för metoderna är att bestämma maximal densitet för det aktuella materialet. Resultaten från försöken kan ej direkt överföras till egenskaperna i fält, men kan användas som referenser för att jämföra olika material.

3.2.1 Proctorförsök

För att tillgodose ökade kvalitetskrav på vägar, i samband med bilismens genombrott i USA på 1920-talet, utvecklades metoder för packning av jord samt laboratorieförsök för att bedöma packningsegenskaper. En av de vanligaste metoderna för att bedöma ett materials packningsegenskaper är Proctorförsök. Metoden introducerades år 1933 av R.R Proctor i Kalifornien, och är numer standardiserad av AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) och ASTM (American Society for Testing and Materials), och benämns ofta AASHTO/ASTM. Proctorförsök finns i två olika huvudtyper, standard Proctorförsök samt modifierad Proctorförsök. Modifierad Proctorförsök utvecklades för att möta ökningen av tung trafik, och innefattar ett större packningsarbete gentemot Standard Proctorförsök. Skillnaden mellan metoderna visas i *Tabell 3.2*.

Tabell 3.2 Jämförelse mellan standard- och modifierad Proctorförsök

Data	Standard Proctor	Modifierad Proctor, metod A -D			
Metod		Metod A	Metod B	Metod C	Metod D
Volym, [cm ³]	944	944	2129	944	2129
Stampvikt [kg]	2,49	4,54	4,54	4,54	4,54
Fallhöjd [cm]	30,5	45,7	45,7	45,7	45,7
Stamps bottendiameter [cm]	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
Antal lager [st]	3	5	5	5	5
Antal slag per lager [st]	25	25	56	25	56
Arbete/volymenthet [MJ/m ³]	$5,9 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$
Max kornstorlek [mm]	19,1	4,76	4,76	19,1	19,1

På grund av större packningsarbete vid modifierad Proctor blir även torrdensiteten högre jämfört med standard Proctor.

Idag är Modifierad Proctor den vanligaste laboratoriepackningen. Anledningen till detta kan förklaras med att försöken är enkla att genomföra och ger ett snabbt resultat. Dessutom har packning med fallvikt visat sig vara den metod vars resultat överensstämmer bäst med de densiteter som uppmäts i fält efter packning (Viklander, 1994).

Proctorförsök går i princip ut på att packa jorden med hjälp av fallvikt. Packningen sker i en cylinder som roterar under försöket för att ge en jämn packning av materialet. Eftersom packningscylinderns volym är känd kan jordens densitet efter packning bestämmas. Försöken utförs vid lämpliga vattenhalter så att optimal vattenhalt kan utvärderas. Syftet med försöken är att ge anvisningar för att rätt densitet skall uppnås i fält. Proctorförsök beskrivs vidare i avsnitt 4.2.

Laboratoriepackning begränsar av praktiska skäl ofta maximal kornstorlek till 20 mm. För att korrigera de uppmätta densiteterna och vattenhalterna till fältförhållanden kan följande formler användas:

$$\rho_{d2} = \frac{1}{\frac{1-B}{\rho_{d1}} + \frac{B}{\rho_s}} = \frac{\rho_s \cdot \rho_{d1}}{\rho_s(1-B) + \rho_{d1} \cdot B} \quad (3.18)$$

$$w_2 = w_1 \cdot (1-B) + 2B \quad (3.19)$$

där

ρ_{d1} är torrdensitet hos laboratorieprov, t/m³

ρ_{d2} är torrdensitet, korrigerad att gälla material med samma stenhalt som i fält, t/m³

w_1 är vattenhalt hos laboratorieprov, % av torrsvikt

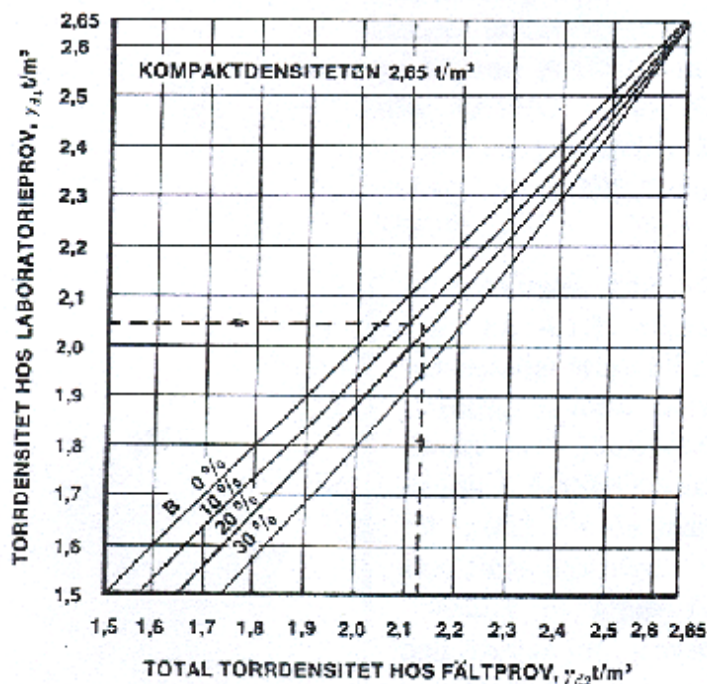
w_2 är vattenhalt, korrigerad att gälla material med samma stenhalt som i fält, % av torrsvikt

ρ_s är stenmaterialalets kompaktdensitet, t/m³

B är skillnaden i stenhalt mellan fält- och laboratorieprov, uttryckt i förhållande till torr totalvikt

Korrigeringen får ej användas om skillnaden i stenhalt överstiger 30 %.

Korrekturen motsvaras av diagrammet i *Figur 3.12* nedan. Diagrammet visar att ökad stenhalt hos jorden medför högre torrdensitet.



Figur 3.12 Diagram för omräkning av torrdensitet hos laboratorieprov till total torrdensitet hos fältmaterial

4 Bestämning av packningsegenskaper och hållfasthet

I detta kapitel presenteras de laborationer som genomförts. Kapitlet inleds med att beskriva hur materialet har hanterats inför försöken. Därefter beskrivs hur Proctorförsöken har genomförts, och vid vilka vattenhalter materialet har packats. Slutligen redovisas genomförandet av triaxialförsök och vilka antaganden som har gjorts inför dessa försök.

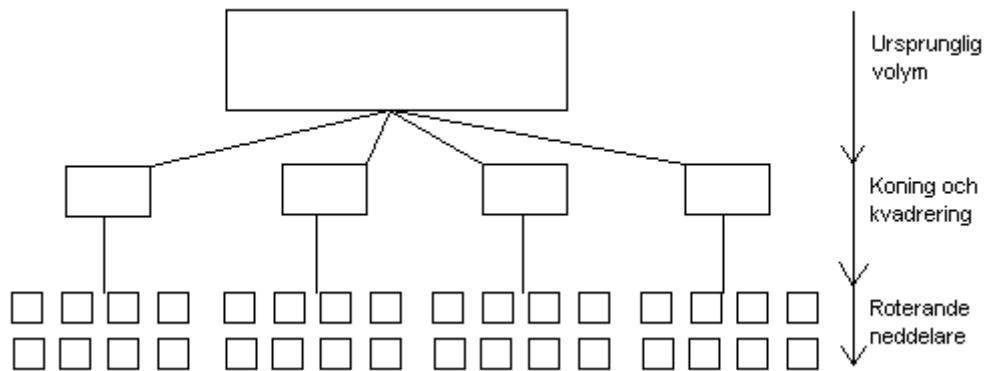
4.1 Materialhantering

Nybromaterialet (N1) hämtades den 11/11 –04 och Markarydmaterialen (M1 och M2) hämtades den 12/11 –04. Materialet grovsiktades på plats (32 mm) och placerades i lådor. För att anpassa jorden till kommande laboratorieförsök, siktades korn >20 mm bort.



Bild 4.1 Koning och kvadrering av material Bild 4.2 Bortsiktning av material >20 mm

Materialet konades och kvadrerades för att erhålla en homogen uppdelning (se *Bild 4.1*), enligt Stål, 1972. För att anpassa jorden till kommande försök, siktades i laboratorium korn >20 mm bort. En roterande provneddelare användes för att dela ned provvolymen i hanterbara enheter. Ytterligare neddelning utfördes med delningsapparat för att erhålla lämpliga provvolymmer. Neddelningen sammanfattas i *Figur 4.1*.



Figur 4.1 Schematisk bild över neddelning av material

4.2 Proctorförsök

De tre olika moränernas packningsegenskaper har analyserats med hjälp av Modifierad Proctorförsök. Syftet med försöken var att bestämma packningskaraktäristika för de tre materialen, och ur dessa bestämma maximal torr densitet samt optimal vattenhalt. Utrustningen som användes för testerna visas i Bild 4.3. Packningen har genomförts för vattenhalter varierande mellan 4 och 12 % (riktvärden enligt Fagerström, 1973). Materialet har siktats före och efter packning för att undersöka nedkrossning av korn under packningsförfarandet. Siktningen har utförts enligt ISO 3310.



Bild 4.3 Laborariestamp

På grund av de olika kornsammansättningarna hos materialen har vattenhalterna vid packning av jorden varierats något. Dessa val motiveras med att när materialet är nära

vattenmättnad avgår mycket vatten under packningen genom att det skvätter bort. Vattenavgången under försöken bör påverka resultatet genom att vattenhalten ändras under packningen. Vattenhalter under 4 % ansågs inte vara nödvändiga.

Materialet M1 packades vid vattenhalterna 4, 5, 6, 7, 8 samt 9 %. Vid vattenhalter över 9 % bedömdes jorden för blöt för att packning skulle vara meningsfull.

Materialet M2 packades vid vattenhalterna 4, 6, 7, 8, 9, 10 samt 12 %.

Materialet N1 packades vid vattenhalterna 4, 5, 6, 7, 8, 9 samt 10 %. Packning vid vattenhalter över 10 % bedömdes inte vara meningsfull.

Materialet delades ned med hjälp neddelningsmaskin till provvikter om cirka 3 kg för Proctorförsök samt cirka 1 kg för siktnings. Då proven innehöll en viss naturlig okänd fuktmängd torkades materialet i ugn (105 °C) cirka 12-16 h tills dess att jorden var helt torr. Proven tillfördes därefter vatten, och blandades väl, för att erhålla önskad vattenhalt. Mängden tillfört vatten bör vara något större än beräknat, då en viss andel försvinner vid blandningen (Fagerström, 1973). Proven förvarades i hink med lock i cirka 16 h i rumstemperatur innan packningen genomfördes, för att jorden skulle få en jämnt fördelad vattenhalt genom hela materialet.

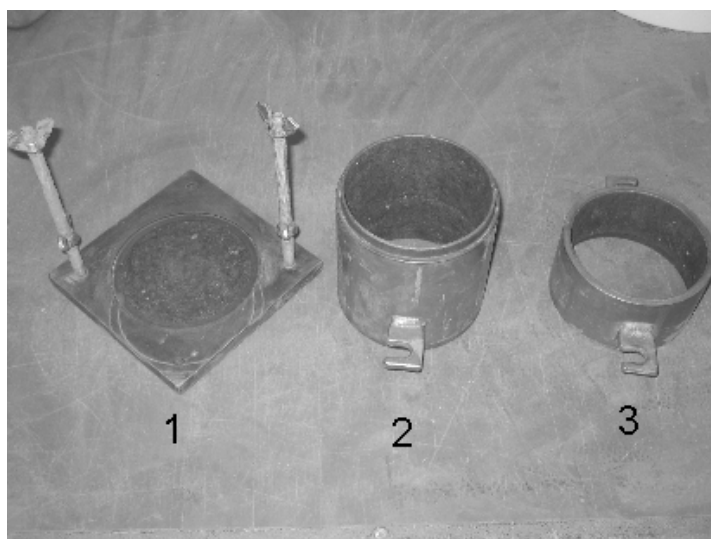


Bild 4.4 Bottenplatta (1), packningscylinder (2) och skarvcylinder (3)

Själva packningsförfarandet med modifierad Proctormetod genomfördes enligt Modifierad AASHO, metod C (se *Tabell 3.2*), och beskrivs kortfattat nedan.

Jorden fylls i packningscylindern (se *Bild 4.4*) i fem omgångar, som var och en packas genom 25 stötar med packningsstampen. Materialmängden som tillförs vid varje omgång bör vara lika stor. Vid sista packningen skall jordprovet nå upp i skarvcylindern (se *Bild 4.4*). Cylindern roterar under packningen så att ett jämt resultat erhålles. Efter packningen avlägsnas skarvcylindern och jordprovet planas av så att en jämn yta erhålles vid packningscylinderns topp. Den packade jorden avlägsnas från packningscylindern och vägs. Jorden torkas sedan för att vägas igen, varvid verklig vattenhalt kan beräknas.

$$w_1 = \frac{W - W_d}{W_d} \cdot 100 \quad (4.1)$$

där

w_1 är uppmätt vattenhalt, %

W är provets vikt i fuktigt tillstånd, g

W_d är provets vikt i torrt tillstånd, g

Torrdensiteten för provet beräknas sedan.

$$\rho_{d1} = \frac{W_d}{V} \quad (4.2)$$

där

ρ_{d1} är torrdensitet, t/m³

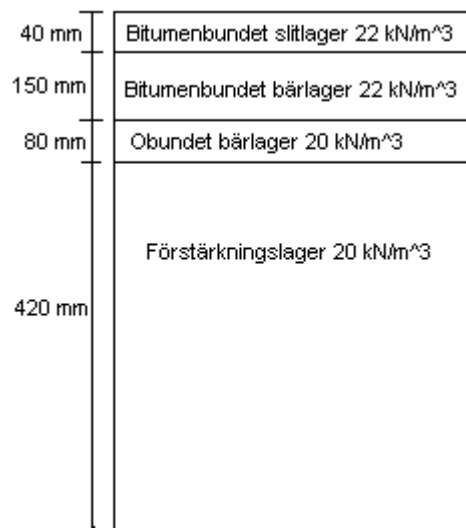
V är packningscylinderns volym, m³

Ovanstående förfarande upprepas för olika vattenkvoter. Torrdensiteten för jorden plottas mot tillhörande vattenhalt, varefter maximal torrdensitet, samt optimal vattenhalt, kan utläsas.

4.3 Triaxialförsök

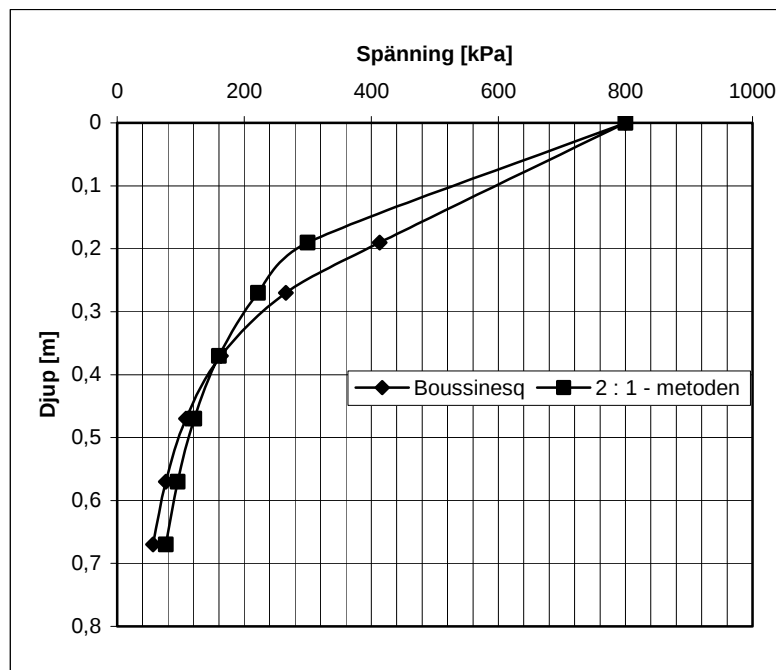
Triaxialförsök genomfördes för att bestämma moränens hållfasthet. Försöken avgränsades till endast ett av materialen. Vid samma lagringstäthet gjordes antagande att det material med högst finjordsandel har lägst hållfasthet (se *Tabell 3.1*). Materialet som valdes var M1, på grund av den höga finjordsandelen i materialet. Syftet med triaxialförsöken var att bestämma friktionsvinkeln för materialet vid olika densiteter. Det finns två sätt att påverka densiteten vid packning av material: förändring av vattenhalt samt förändring av packningsarbete. Dessa två parametrar har varierats inför försöken. Triaxialförsöken har genomförts efter packning av materialet vid vattenhalterna 4, 6 och 8 %, samt efter packning med minskat packningsarbete.

För att bestämma celltrycket vid triaxialförsöken gjordes en del antaganden, och ”in-situ” spänningen för en vägöverbyggnad beräknades. Beräkningarna utgår från en vägöverbyggnad av typ GBÖ enligt *Figur 4.2*.



Lagertjocklekar och tungheter för materialen är tagna från PMS-objekt. Förstärkningslagret antas i *Figur 4.2* bestå av morän som överlagras av till exempel bergkross. Spänningsberäkningar har genomförts för konstruktionen för punkter centralt under lastarean. Lasten på konstruktionen baseras på en standardaxel, och består av en cirkulärt utbredd statisk last med trycket 800 kPa med diametern 0,3 m. Spänningsberäkningen gjordes med 2:1 metoden (se ekvation 3.9) samt Boussinesq (se ekvation 3.12). Spänningsfördelningen med djupet visas i *Figur 4.3*.

Figur 4.2 Principskiss av GBÖ med tungheter enligt PMS-objekt.



Figur 4.3 Jämförelse mellan spänning med Boussinesq och 2:1 metoden.

För att kunna utvärdera friktionsvinkel och kohesion krävs minst tre tester med olika spänningsnivåer (Larsson, 1989). För att bestämma relevanta spänningsnivåer för konsolidering av proven användes ovanstående spänningsberäkningar. Valet av övre spänningsnivå utgår ifrån överkant av moränlagret, vilket antas vara på djupet 0,5 m, det vill säga cirka 100 kPa (*Figur 4.3*). Som undre spänningsnivå valdes situationen för obelastad väg på djupet 0,5 m, vilket motsvaras av $\sigma_1 = 10$ kPa. En ytterligare spänningsnivå mellan dessa sattes till $\sigma_1 = 50$ kPa. Vidare antas $K_0 = 0,9$ vilket ger horisontalspänningarna (celltrycket) 9, 45 respektive 90 kPa. Valet av K_0 baseras främst på den höga lagringstätheten hos det packade materialet.



För inpackning av provet har en specialbyggd tvådelad cylinder använts (se Bild 4.5).

Bild 4.5 Packningscylinder för triaxialförsök



Packningsutrustningen består av en fallande vikt (se Bild 4.6). Genom att släppa vikten uppstår stötvis packning av materialet. Stången flyttas runt längs cylinderns innervägg under förfarandet, för att en jämn packning skall erhållas.

Bild 4.6 Packningsutrustning för triaxialförsök

Materialet delades ned med hjälp av en neddelningsapparat till provmängder om cirka 400 g. Jorden blandades med önskad mängd vatten för att därefter packas. Packningsmetoden skall efterlikna en packning enligt modifierad Proctor i så stor utsträckning som möjligt för provdimensionen diameter 5 centimeter och höjden 10 centimeter. Omräkning av dimensioner för packningsutrustningen baseras på att tillförd packningsenergi skall vara lika stor som för metoden modifierad Proctortest. Packningsenergin beräknas enligt:

$$W_E = \frac{N \cdot n \cdot m \cdot g \cdot h}{V} \quad (4.3)$$

där

W_E är packningsenergi, MJ/m³
 N är antal lager
 n är antal stötar per lager
 m är fallvikt, kg
 g är tyngdacceleration, m/s²
 h är fallhöjd, m
 V är provcylinderns volym, m³

Packningsenergin för modifierad Proctortest är, som nämnts i kapitel 3.2.1, 2,7 MJ/m³. Med samma antal lager och samma antal slag per lager, kan fallvikt och fallhöjd bestämmas enligt ekvation 4.3. Data för packningen redovisas i *Tabell 4.1*.

Tabell 4.1 Data för packningsutrustning, triaxförsök

Antal lager	5
Antal stötar per lager	25
Fallvikt [kg]	1,55
Fallhöjd [m]	0,25
Provcylinderns volym [m ³]	1,96*10 ⁻⁴
Packningsenergi [MJ/m ³]	2,4

Med hjälp av den modifierade packningsmetoden uppmättes en torrdensitet efter provpackning på 2,11 t/m³. Motsvarande torrdensitet vid Proctorförsök är 2,13 t/m³ (se *Tabell 5.1*), vilket gör att packningen ansågs tillräcklig.

Vid triaxialförsöken med minskat packningsarbete minskades antalet stötar per lager till 10, vilket motsvarar packningsarbetet 1,0 MJ/m³. Packningen utfördes med vattenhalten 6 %. I övrigt var förutsättningarna samma som för föregående försök. Med det minskade packningsarbetet uppnåddes torrdensiteten 2,05 t/m³.



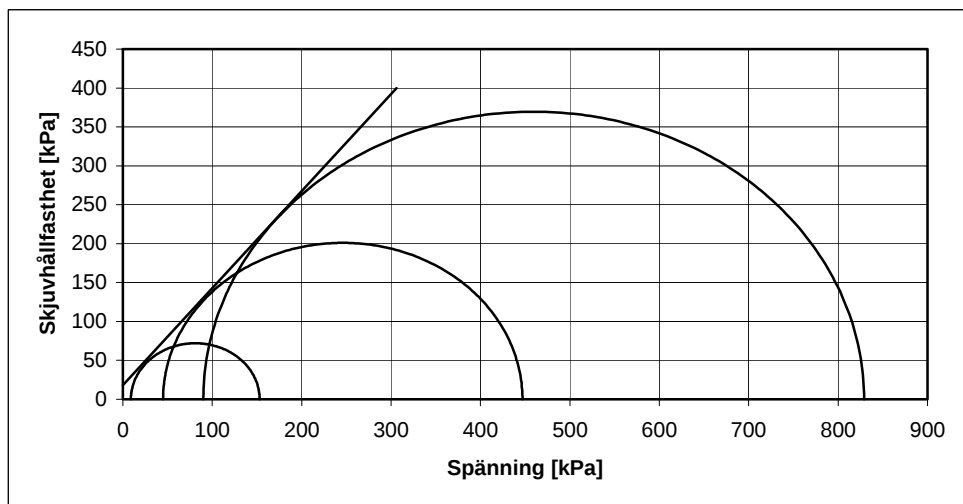
Bild 4.7 Försökupställning för triaxialförsök

Den triaxialutrustning som använts vid försöken visas i *Bild 4.7*. Det packade materialet placeras på bottenplattan och packningscylindern avlägsnas. Ett gummimembran träs över provet, med hjälp av en monteringscylinder, och fästes sedan över bottenplattan och stämpel med fyra O-ringar. Cylindern monteras över provet och celltrycket ställs in med hjälp av tryckluft.

Provet konsolideras till önskat spänningstillstånd tills att portryck, deformation och vertikaltryck stabiliseras. Därefter belastas provet under konstant deformationshastighet till brott. Deformationshastigheten beror av jordtyp och försökstyp (dränerad eller odränerad). Analysen utfördes dränerad och deformationshastighet valdes till cirka 0,4 mm/min. Om deformationshastigheten är för hög så hinner inte vattnet i jorden dräneras bort, vilket medför portryckhöjning. Under försöket registreras provets deformation, vertikalspänning och portryck kontinuerligt av mot tiden. Under försöken uppstod inga portryckshöjningar, vilket gjorde att deformationshastigheten ansågs lämplig.

Efter utfört triaxialförsök samlades materialet upp för att torkas och vägas. Uppnådd densitet samt vattenhalt vid packningen kan på så sätt beräknas.

Ur försöket fås värden på deformation, vertikalspänning och portryck vid valda tidsintervall. Med hjälp av dessa data kan en spänning-deformation kurva ritas upp. I kurvan kan brottspänningen avläsas. Friktionsvinkel och eventuell kohesion kan sedan utvärderas grafiskt genom att Mohr's cirklar ritas upp med hjälp av deviatorspänningen ($\sigma_1 - \sigma_3$) vid brott, se *Figur 4.4*. Friktionsvinkeln utvärderas som tangenten till de tre cirklarna, och kohesionen motsvaras av linjens skärning med den vertikala axeln.



Figur 4.4 Grafisk utvärdering av friktionsvinkel och kohesion

5 Resultat och analys

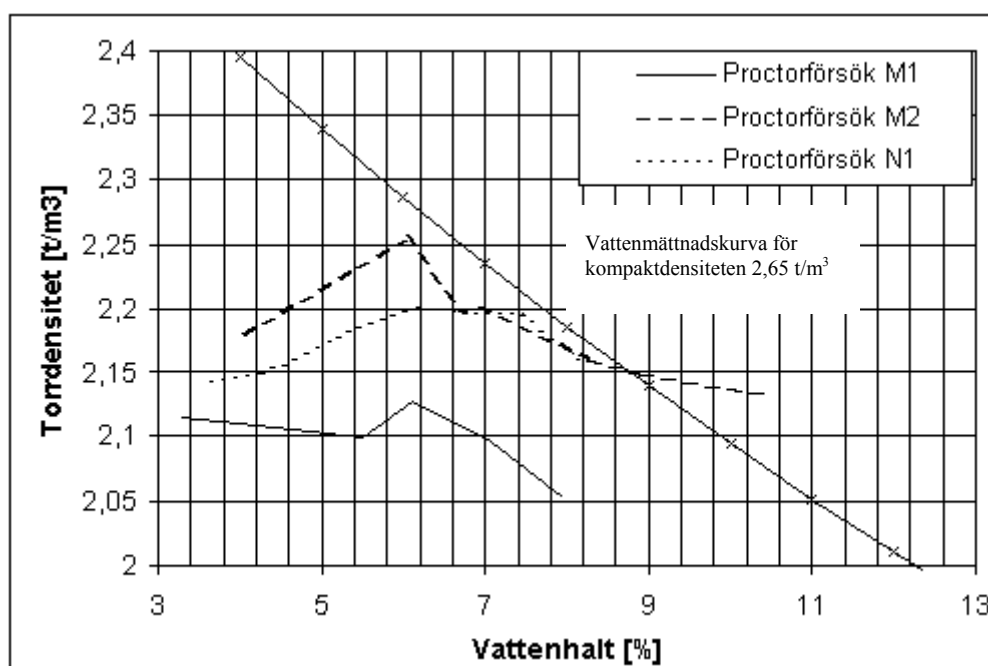
I detta kapitel redovisas resultaten från utförda laboratorieförsök. Kapitlet inleds med att redovisa maximal torrdensitet och optimal vattenhalt för de tre materialen. Därefter analyseras resultaten och eventuella felkällor diskuteras. Uppmätta friktionsvinklar samt kohesion för M1 materialet redovisas sedan och resultaten diskuteras. Slutligen diskuteras eventuella felkällor för triaxialförsöken.

5.1 Proctorförsök

De erhållna maximala torrdensiteterna vid optimal vattenhalt för de tre olika materialen redovisas i *Tabell 5.1*. Densitetskurvorna visas i *Figur 5.1*.

Tabell 5.1 Resultat Proctorförsök M1, M2 och N1

Material	Optimal vattenhalt [%]	Maximal torrdensitet [t/m ³]
M1	6,1	2,13
M2	6,1	2,25
N1	6,2	2,20



Figur 5.1 Densitetskurvor från packningsförsök enligt modifierad Proctor

Försöken med modifierad Proctor visade att de två grovkornigaste materialen, M2 och N1, gav de högsta torrdensiteterna. Att en ökad kornstorlek ger en ökad torrdensitet överensstämmer även med omräkningsmetoden av torrdensitet för laboratorieförsök till fältförhållanden (se *Figur 3.12*). Jämförelse av resultaten från packningsförsöken

med till exempel ett rent grusmaterial visar att en viss andel finmaterial har gynnsam inverkan på densiteten.

Resultatet av testerna hamnar inom förväntat intervall för torrdensiteten (se *Figur 3.9*), där torrdensiteten för morän är cirka $2,15 \text{ t/m}^3$. Vad som kan observeras är att densitetskurvan för M1 aldrig når vattenmättnadskurvan. Det är svårt att erhålla högre vattenhalter än 8 % i detta material utan att vattnet försvinner under packningen. Lägst densitet erhålles för material M1, vilket antas bero på att detta är det finkornigaste av de tre materialen. Generellt så syns i *Figur 3.9* att ju finkornigare materialet som packas är, desto lägre blir densiteten. Detta beror på att kohesionen i ett finkornigt material gör att ett högre packningsarbete krävs för tillräcklig packning. Att densiteten för samtliga material i studien har högre densitet än till exempel grus, vilket har en maximal densitet på cirka 2,0, kan förklaras med att finjorden som finns i materialen fyller ut hålrummen mellan de större fraktionerna.

Skillnaden i uppnådd optimal vattenhalt var mycket liten mellan materialen. Förväntningarna innan försöken genomfördes var att optimal vattenhalt skulle vara högre för material M1, det vill säga den morän med störst finjordsandel. Istället erhöles högst optimal vattenhalt för material N1. Packning av detta material gav dessutom höga torrdensiteter även vid vattenhalter strax över 7 %. Detta antas bero på att denna morän innehåller relativt lite finjord, vilket medför bättre dräneringsförmåga. För material M1 uppnåddes höga torrdensiteter även vid packning under optimal vattenhalt. Densitetskurvan för denna morän liknade den karakteristiska kurvan för sand, med densitetstopp även vid låg vattenhalt, vilket kan bero på den höga andelen sand i materialet (60 %).

Viklander (1994) genomförde packningsförsök på morän med olika kornfördelningar. Maximal torrdensitet för sandig siltig morän uppmättes till $2,04 - 2,10 \text{ t/m}^3$, med optimal vattenhalt 6,3 %. Resultatet kan främst jämföras med M1 (siltig sandmorän) där maximal torrdensitet uppmättes till $2,13 \text{ t/m}^3$ vid vattenhalten 6,1 %. Även vid Viklanders försök observerades en densitetstopp för låga vattenhalter.

Jämförelse mellan kornfördelningen före och efter packning för respektive vattenhalt visas i appendix A-C. Ingen nedkrossning av materialet under packningen har observerats.

5.1.1 Felkällor

En av de mest avgörande felkällorna för modifierad Proctorförsök, enligt litteraturen, är avplaningen av provet vid packningscylindens topp. Detta gäller framför allt för grovkorninga material, då håligheter kan uppkomma då grövre korn avlägsnas. För att reducera inverkan av detta har ojämnheter fyllts ut med finkornigt material.

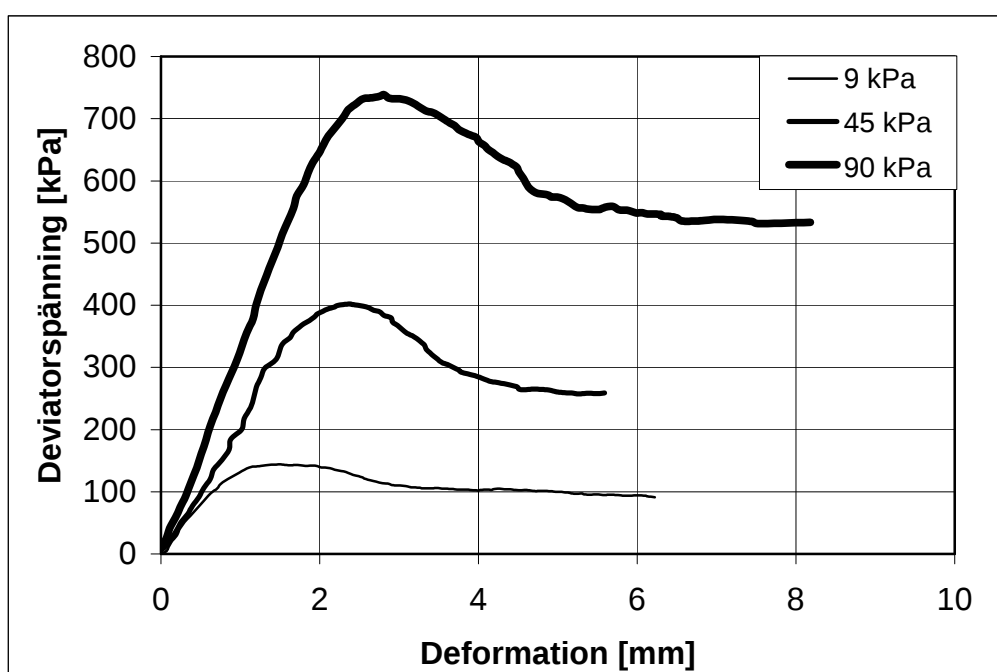
Samtliga neddelningar har utförts med delningsapparat. Trots detta har avvikelser i kornfördelning vid försöken uppmärksamats. Det är dessutom svårt att genom neddelning erhålla precis rätt jordmängd för försöken, vilket gör att en liten del av materialet inte används för packningen. Detta kan medföra lokala avvikelser i kornfördelning.

I försöken har det eftersträövats att tillföra samma jordvolym för respektive skikt. Trots ett noggrant utförande kan viss avvikelse inte undvikas. Även vid tillförsel av jord till packningscylindern kan avvikelser i kornfördelning uppstå.

Iblandning av vatten har skett för hand. Det är svårt att veta när materialet och vattnet är tillräckligt blandat, då aggregat av korn bildas under blandningen som kan försvåra en jämn vattenhalt. Bedömningen när tillräcklig blandning har erhållits är därför något subjektiv. Under försöken observerades även att resultaten till stor del påverkades av tiden för homogenisering av vattenhalt. Vid försöken fick materialet stå med vatten i cirka 16 timmar innan packningen genomfördes.

5.2 Triaxialförsök

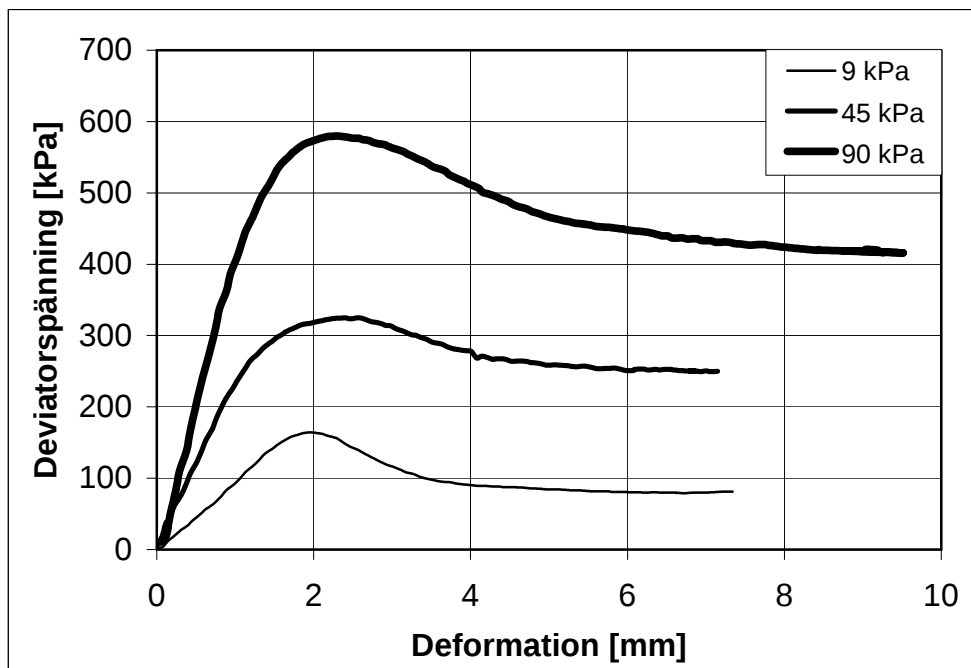
Under triaxialförsöken har vertikalspänning, deformation och portryck registrerats kontinuerligt var tionde sekund. Samtliga försöksomgångar genomfördes med celltrycken 9, 45 respektive 90 kPa. *Figur 5.2* till *Figur 5.5* visar spänning – deformationskurvor för de genomförda försöken. Ur dessa kurvor har vertikalspänning samt deformation vid brott utvärderats. Brottet motsvaras av toppen på respektive kurva. Dessa värden redovisas i *Tabell 5.2* till *Tabell 5.5*. Observera att kurvorna visar deviatorspänning ($\sigma_1 - \sigma_3$), medan värdena i tabellerna visar σ_1 , det vill säga att celltrycket har adderats till kurvornas värden för att senare kunna utvärdera friktionsvinklarna.



Figur 5.2 Spänning-deformationskurva för material M1 med 4 % vattenhalt

Tabell 5.2 Brottspänning och brottsdeformation för material M1 med 4 % vattenhalt

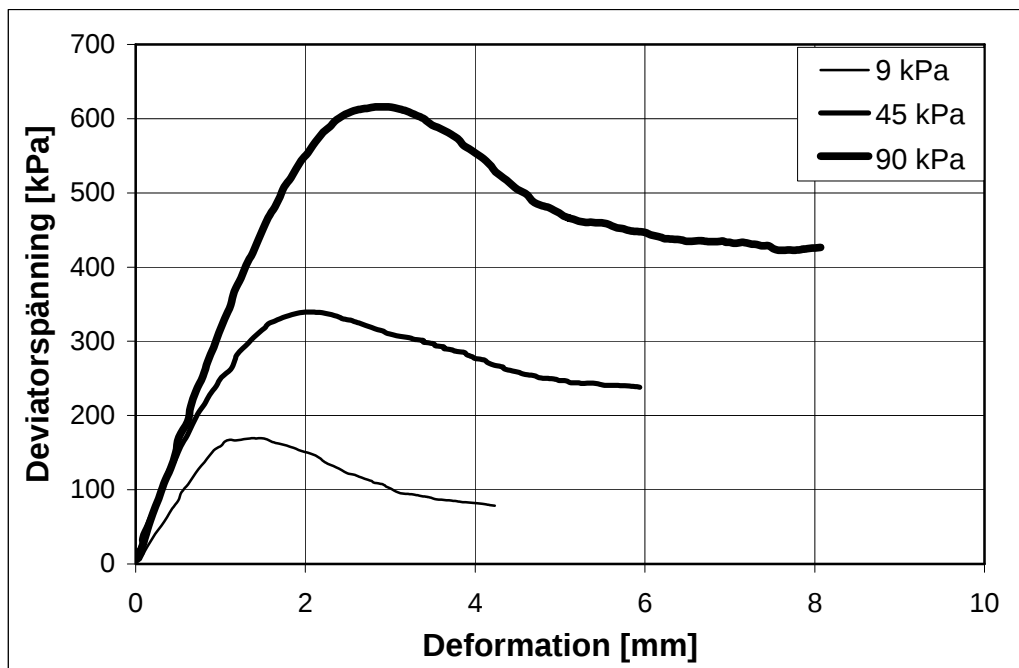
Celltryck [kPa]	Vertikalspänning [kPa]	Deformation [mm]
9	153	1,5
45	447	2,4
90	829	2,8



Figur 5.3 Spänning-deformationskurva för material M1 med 6 % vattenhalt

Tabell 5.3 Brottspänning och brottsdeformation för material M1 med 6 % vattenhalt

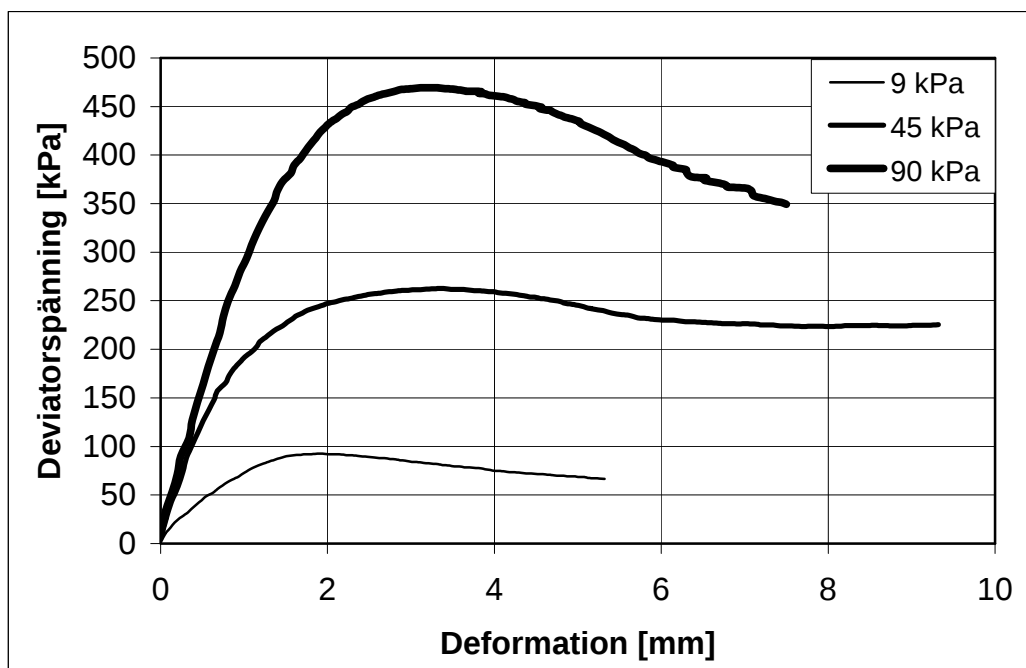
Celltryck [kPa]	Vertikalspänning [kPa]	Deformation [mm]
9	173	2,0
45	370	2,4
90	670	2,3



Figur 5.4 Spänning-deformationskurva för material M1 med 8 % vattenhalt

Tabell 5.4 Brottspänning och brottsdeformation för material M1 med 8 % vattenhalt

Celltryck [kPa]	Vertikalspänning [kPa]	Deformation [mm]
9	179	1,6
45	385	2,1
90	706	2,9



Figur 5.5 Spänning-deformationskurva för material M1 6 % vattenhalt med lägre packningsgrad

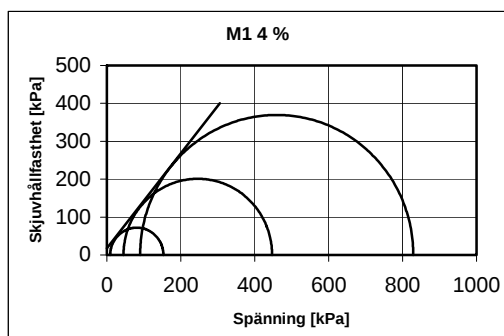
Tabell 5.5 Brottspänning och brottsdeformation för material M1 6 % vattenhalt med lägre packningsgrad

Celltryck [kPa]	Vertikalspänning [kPa]	Deformation [mm]
9	101	1,9
45	308	3,4
90	559	3,2

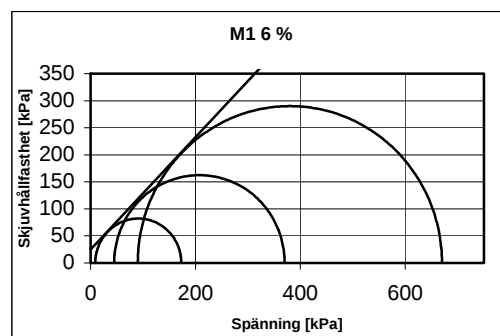
I spänning – deformations kurvorna för de tre försöken med hög packningsgrad syns det tydligt när materialet går till brott (tydlig spänningstopp). Detta är till följd av den höga lagringstätheten hos materialet.

För de försök med lägre packningsgrad är brottet betydligt mer diffust. Dessa kurvor liknar mer karaktäristisk kurva för ett kritiskt lagrat material, vilket är naturligt då lagringstätheten är lägre för dessa försök. Brottspänningen för dessa försök är dessutom betydligt lägre än för försöken med högt packningsarbete.

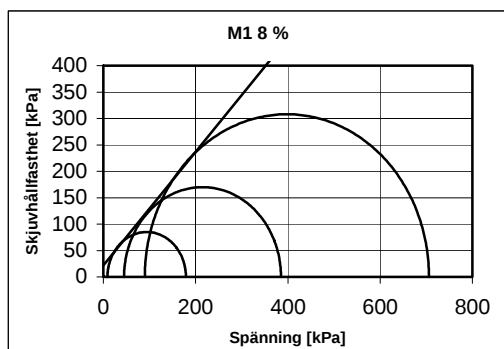
För att utvärdera materialets friktionsvinkel och kohesion ritas Mohr's cirklar upp med hjälp av brottspänningarna i ovanstående tabeller.



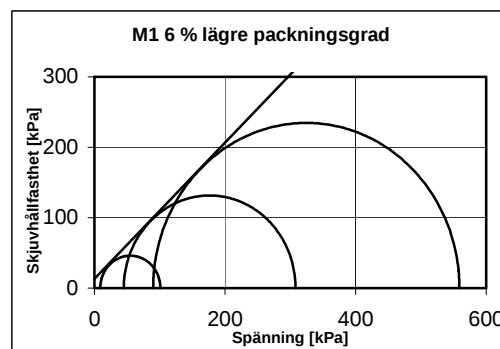
Figur 5.6 Grafisk utvärdering av friktionsvinkel material M1 med vattenhalt 4 %



Figur 5.7 Grafisk utvärdering av friktionsvinkel material M1 med vattenhalt 6 %



Figur 5.8 Grafisk utvärdering av friktionsvinkel material M1 med vattenhalt 8 %



Figur 5.9 Grafisk utvärdering av friktionsvinkel material M1 med lägre packningsgrad

Friktionsvinkeln bestäms genom att beräkna lutningen för den raka linjen som tangerar cirkelarna i Figur 5.6 till Figur 5.9. Således erhålls en friktionsvinkel för varje vattenhalt respektive packningsgrad.

Friktionsvinklar, kohesion och uppnådd torrdensitet vid packningen inför respektive försök redovisas i Tabell 5.6. Torrdensiteterna i Tabell 5.6 är medelvärden för de tre försöken i varje serie. Fullständig redovisning av torrdensiteter och vattenhalter vid försöken redovisas i appendix D.

Tabell 5.6 Kohesion friktionsvinklar och torrdensitet, material M1

Vattenhalt [%]	Packningsarbete [MJ/m ³]	Kohesion [kPa]	Friktionsvinkel [°]	Torrdensitet [t/m ³]
4	2,4	18	51	2,14
6	2,4	25	46	2,15
8	2,4	22	47	2,14
6	1,2	13	44	2,05

Tabell 5.7 visar framräknade friktionsvinklar för material M1 med varierande lagringstäthet. Beräkningarna baseras på Brinch Hansen's empiriska samband (se ekvation 3.15). Värdet på d_{10} har erhållits genom interpolation av materialets kornfördelningskurva. Följande värden har använts vid beräkningarna:

$$d_{10} = 0,035$$

$$d_{50} = 0,25$$

$$d_{60} = 0,35$$

$$C_U = 10$$

Tabell 5.7 Beräknade friktionsvinklar för material M1, enligt Brinch Hansen's samband

Lagringstäthet, I_D	Friktionsvinkel [°]
1,0	39
0,95	39
0,90	38

Triaxialförsöken visar att den högsta friktionsvinkeln erhålls vid 4 % vattenhalt. Den första försöksserien utfördes med 6 % vattenhalt. Efter att resultaten för denna serie hade granskats väcktes teorier om att lastöverföringen vid utrustningens stämpel försvårades av ett visst inspänningsmoment mellan stämpel och spänningsgivare. Inför fortsatta försök modifierades därför utrustningen något. Hur mycket förändringen har inverkat på resultatet är svårt att uppskatta.

Friktionsvinkeln för proven som packats med lägre arbete, är något lägre. Skillnaden är dock inte så stor som förväntat.

Det är, som ses i *Tabell 5.6*, ingen märkbar skillnad i uppnådd torrdensitet för de olika vattenhalterna. Då friktionsvinkeln är beroende av lagringstätheten för materialet, är detta troligen orsaken till att de uppmätta friktionsvinklarna ligger så nära varandra. Trots att packningsarbetet minskades med hälften för en provserie så minskade uppmätt torrdensitet endast marginellt, vilket gör att friktionsvinkeln för detta försök är nästan lika stor som för de tre övriga.

Brottenveloppen har utvärderats som en rät linje, vilken tangerar cirkelarna för deviatorspänningen. Då brottenveloppen i verkligheten är krökt, så är kohesionen förmodligen lägre än vad som redovisas i *Tabell 5.6*.

En viss vattenmängd kan ha pressats ur provet under pålastningen, vilket i så fall påverkar uppmätt vattenhalt. Anledningen till att vattenavgången inte mätts under försöken är att när celltrycket påförs så pressas det vatten som finns i dräneringsslangen ut, och höjer nivån i mätbyretten. På grund av detta är det svårt att mäta hur mycket vatten som pressats ur provet. Detta problem uppstår då celltrycket anbringas med hjälp av luft istället för till exempel vatten.

Tanken med försöken var att studera skillnad i friktionsvinkel när packningsförhållandena ändras. På grund av att materialets torrdensitet inte förändrades nämnvärt är det svårt att dra några slutsatser i denna fråga. För att undersöka detta bör inpackningen av provet utvecklas ytterligare, så att önskad packningsgrad erhålles. Tyvärr så visade sig packningsmetoden som används för dessa försök vara alldeles för effektiv.

Spridningen i vattenhalt beror troligen på att det är så små provvikter (cirka 500 g). Det är därför svårt att tillsätta exakt rätt vattenmängd, då endast 1 ml för mycket vatten motsvarar cirka 0,2 % högre vattenhalt.

På grund av tidsskäl kunde endast en av moränerna analyseras med triaxialförsök. Att material med olika mineralsammansättningar valdes beror bland annat på att olika mineraler har olika friktionsegenskaper och hårdhet vilket skulle kunna påverka friktionsvinkeln. Valet att testa M1 gjordes då detta material antogs ha lägst hållfasthet.

Triaxialförsöken visade att friktionsvinkeln var hög även för detta material. De uppmätta friktionsvinklarna varierade i intervallet 44 -51°, beroende på vattenhalt och packningsgrad. Detta är liknande värden som för till exempel sprängsten. Det bör dock poängteras att dessa friktionsvinklar baseras på ett väl packat material nära optimal vattenhalt. Vid dessa förhållanden är hållfastheten god i materialet. Dessutom är proverna som testats relativt små, vilket kan påverka resultaten. Hade en försöksomgång även gjorts i en större triaxialcell hade de resultaten kunnat lämna mer underlag för analys av materialets verkliga hållfasthet.

Jämförelse av resultaten från triaxialförsöken med de beräknade värdena i *Tabell 5.7* visar att de uppmätta friktionsvinklarna är något höga. Detta kan bero på att proven vid försöken är relativt små (se avsnitt 5.2.1). Dessutom är beroendet av lagringstäthet större än vad som visas med Brinch Hansen's samband.

För att få en bättre bild av materialets hållfasthetsvariation bör ytterligare försök genomföras. Vattenhalter betydligt över den optimala bör analyseras, då en stor del av hållfastheten försvinner vid vattenhalter nära vattenmättnad.

5.2.1 Felkällor

För packningen av materialet innan triaxialförsök är felkällorna liknande de för Proctorförsök (se avsnitt 5.1). Det som tillkommer är främst variationer i packningen, då denna utförs för hand. Dessutom kan en ojämn överyta på provet medföra sned belastning under försöket och ojämn spänningsfördelning.

Störning av provet kan uppstå vid montering av membran och O-ringar, vilket kan påverka resultatet.

Mätutrustningen som användes vid försöken har en viss onoggrannhet, vilket dock inte bedöms påverka resultatet märkbart. Friktionen mellan stämpelskaft och cylinderlock kan påverka lastöverföringen till provet, främst under konsolideringsfasen då externa vikter läggs på. Detta bör inte påverka verklig spänning under belastningsfasen då spänningsgivaren är placerad inuti cylindern.

Vanligtvis föreskrivs en maximal kornstorlek på $1/10$ av provets diameter, för ett månggraderat material (Larsson, 1989). För de tester som genomförts är förhållandet istället $2/5$, vilket kan medföra högre friktionsvinklar.

6 Slutsatser

Syftet med detta arbete var att utvärdera packningsegenskaper samt hållfasthet hos tre olika moräner. Utifrån resultat från laborationer skulle moränernas användbarhet som vägbyggnadsmaterial bedömas.

Resultaten från försöken med modifierad Proctor visade att:

De två grovkornigaste av materialen (M2 och N1) gav de högsta torrdensiteterna. Detta stämmer väl överens med de empiriska samband som finns för ökad stenhalt (se *Figur 3.12*).

De flesta jordar har ungefär samma kompaktdensitet ($2,65 - 2,75 \text{ t/m}^3$), vilket gör att olika materials packningsbarhet kan jämföras genom att studera packningskurvor från modifierad Proctorförsök. Eftersom uppmätt maximal torrdensitet för samtliga material i studien är högre än för ett grusmaterial vid samma packningsarbete (se *Figur 3.9*), kan slutsatsen dras att materialen är relativt lättpackade. Däremot är moränerna känsligare för variation av vattenhalt jämfört med grus eller bergkross, då de studerade moränerna inte är fridränerande.

Packningsegenskaperna kan indirekt påverka hållfastheten hos materialen, detta på grund av att ett väl packat material bidrar till en högre hållfasthet. Som nämnts tidigare är materialen olika känsliga för inverkan av vattenhalt. Det är ofta fördelaktigt att packa ett material som uppnår hög densitet även vid en viss avvikelse från den optimala vattenhalten, då det kan vara svårt att uppnå rätt vattenhalt i fält.

Resultaten från triaxialförsöken (Material M1) visade att:

De uppmätta friktionsvinklarna är höga ($44^\circ - 51^\circ$), vilket ger hög skjuvhållfasthet i materialet. Jämförelse av resultaten med Brinch Hansens samband för bestämning av friktionsvinkeln tyder på att verkliga friktionsvinklar i fält är något lägre än de uppmätta. Detta antagande beror främst på att triaxialproverna är relativt små för kornstorleken i materialet, vilket sannolikt påverkar resultaten.

Höga friktionsvinklar talar för att materialet skulle fungera bra som ett förstärkningslager. Dock är dessa friktionsvinklar framtagna under goda förhållanden, alltså med ett väl packat material och nära den optimala vattenhalten.

Då endast ett av materialen har utvärderats med triaxialförsök kan inga friktionsvinklar redovisas för materialen M2 och N1. Dessa material antas dock ha högre hållfasthet än det material som testats till följd av de empiriska samband som finns.

Utifrån de friktionsvinklar som utvärderats ur triaxialförsöken, och antagandet att det material som undersökts har lägst hållfasthet, bedöms samtliga tre material i studien lämpliga som ballastmaterial i förstärkningslagret hos en vägöverbyggnad.

6.1 Fortsatta studier

För att kunna dra några ytterligare slutsatser krävs vidare försök för att analysera materialets känslighet i hållfasthet för stora förändringar i vattenhalt och packningsgrad. Vid försöken med lägre packningsarbete uppnåddes packningsgraden 96 %. Vid denna packningsgrad uppvisades viss minskning av friktionsvinkeln. Ytterligare försök bör utföras vid packningsgrader omkring 90 %, vilket rekommenderas som minimivärde för vägbankar, för att undersöka hur mycket av hållfastheten som förloras. Dessutom bör även hållfasthet för materialen M2 och N1 utvärderas med triaxialförsök, för att undersöka om antagandet att friktionsvinklarna för dessa material är högre stämmer.

7 Källförteckning

- Evett J. B., Liu C. (1997): Soil properties –Testing measurements and evaluation, third edition. Prentice-Hall, Inc. Simon and Schuster /A Viacom Company Upper saddle river, New Jersey
- Ericsson, B., Königsson, L-K., Larsson, L-E. (1978), komplettering och revidering av Gembert, B. (1996): Kvartärgeologi kompendium för grundkurs i geovetenskap, Uppsala universitet 1996.
- Fagerström, H. (1973): Packningsegenskaper, Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 5. Bygghöjnings informationsblad B2:1971, Statens Institut för Byggnadsforskning, Stockholm.
- Forssblad L. (2000): Packning –Handbok om packning av jord- och bergmaterial. AB Svensk byggtjänst, Stockholm.
- Hansbo, S. (1975): Jordmateriallära, Almqvist & Wiksell Förlag AB Stockholm 1975.
- Hansbo, S. (1990): Jordmekanik 1 Spänningar av yttre last, sättningar, jordtryck, Svenskt Tryck Stockholm 1990.
- Jönsson, S-S., Magnusson, O. 1985: Packning av jord och packningskontroll. Spångbergs Tryckerier AB, Stockholm 1985.
- Karlsson R., Hansbo S. (1984): Jordarternas indelning och benämning, andra upplagan. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.
- Larsson, R. (1989): Hållfasthet i Friktionsjord. Statens Geotekniska Institut, Information 8, Linköping 1989.
- Lundegårdh, P., Lundqvist, J., Lindström, M. (1964): Berg och Jord i Sverige. Fjärde upplagan, Almqvist & Wiksell Läromedel AB, Stockholm 1974.
- Sällfors, G. (2001): Geoteknik Jordmateriallära Jordmekanik, 3:e upplagan, Vasastadens Bokbinderi AB, Göteborg 2002.
- Viklander, P. (1994): Frusen jords packnings- och deformationsegenskaper. Luleå 1994.
- Wiesel, C-E., Hansbo, S., Broms, B. (1985): Skjuvhållfasthet Geotekniska Laboratorieanvisningar, del 9, Spångbergs Tryckerier AB, Stockholm 1985.
- Vägverket Publ 1996:6 (1996): Optimering av naturliga grusråvaror för vägändamål. Vägverkets tryckeri, Borlänge 1996.
- FAS Asfaltbok, 2002, Föreningen för Asfaltsbeläggningar i Sverige – FAS. (www.asfaltsboken.nu 2005-03-15)

http://www.sgu.se/sgu/sv/geologi_samhalle/geologi_sverige/sver_jord.html, 2005-04-25

SFS 1995:1667, Lag om skatt på naturgrus

Appendix A Proctorförsök Material M1

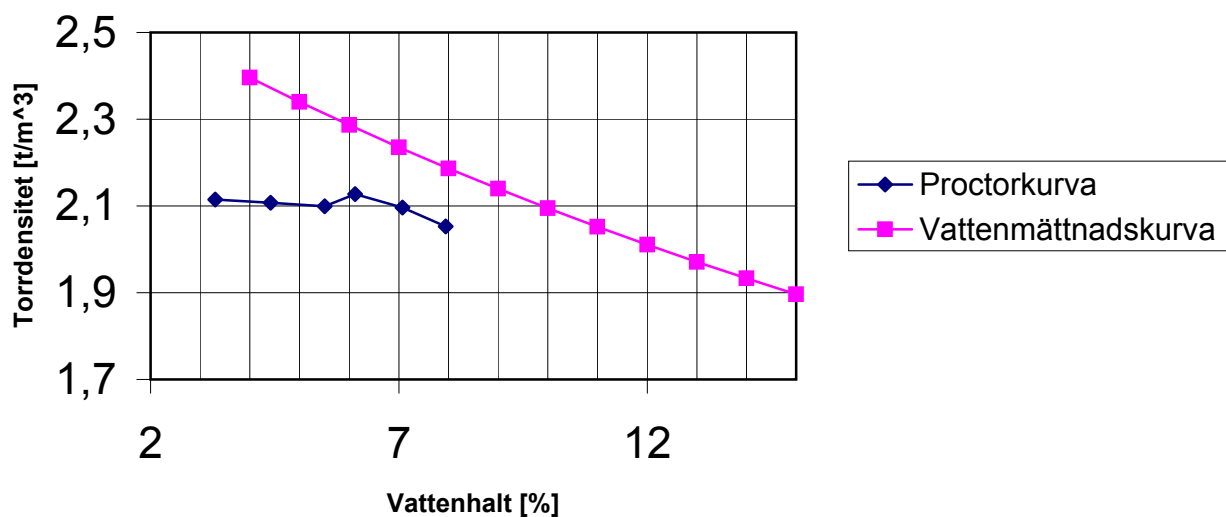
Packning

Provnummer: 4% 5% 6% 7% 8% 9%

Proctorcylinders volym: 944 cm³

Mängd prov [g]	3197,6	2911,6	2737,2	2758,3	2948,7	2914,8	
Mängd vatten [g]	130	148	166	195	240	265	
Framräknad fukthalt[%]	4,065549	5,08311581	6,064592	7,069572	8,13918	9,091533	
Torkplåts vikt [g]	516,1	553,9	551,7	491,8	551,2	516,4	
Vikt innan torkning [g]	2062,3	2076,9	2091,1	2131,4	2118,9	2092	
Vikt efter torkning [g]	1996,4	1989,1	1982	2008,5	1978,9	1938,1	
Verklig fukthalt [%]	3,300942	4,41405661	5,504541	6,118994	7,074637	7,940767	
Torrdensitet [ton/m ³]	2,114831	2,10709746	2,099576	2,127648	2,096292	2,053072	

Proctorresultat M1



Siktning

Före packning

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provrnr: 4%			
20	0	998	100
16	16,8	981,2	98,31663
11,2	40,9	940,3	94,21844
8	22,6	917,7	91,95391
5,6	33,8	883,9	88,56713
4	23,1	860,8	86,25251
2	68,4	792,4	79,3988
1	65,3	727,1	72,85571
0,5	82	645,1	64,63928
0,25	144,3	500,8	50,18036
0,125	175,2	325,6	32,62525
0,063	133,1	192,5	19,28858
Rest	192,5	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 5%			
20	0	928	100
16	0	928	100
11,2	30,9	897,1	96,67026
8	26	871,1	93,86853
5,6	25,2	845,9	91,15302
4	18,3	827,6	89,18103
2	63	764,6	82,39224
1	62,7	701,9	75,63578
0,5	79	622,9	67,12284
0,25	139,4	483,5	52,10129
0,125	170,2	313,3	33,76078
0,063	124,2	189,1	20,37716
Rest	189,1	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 6%			
20	0	955	100
16	8,4	946,6	99,12042
11,2	25,3	921,3	96,4712
8	26,8	894,5	93,66492
5,6	30,9	863,6	90,42932
4	20,5	843,1	88,28272
2	69	774,1	81,05759
1	63,3	710,8	74,42932
0,5	80,4	630,4	66,01047
0,25	141,3	489,1	51,21466
0,125	172,2	316,9	33,18325
0,063	130,8	186,1	19,48691
Rest	186,1	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 7%			
20	0	911,4	100
16	8	903,4	99,12223
11,2	35,9	867,5	95,18323
8	20,6	846,9	92,92298
5,6	26,6	820,3	90,00439
4	20,4	799,9	87,76607
2	64,5	735,4	80,68905
1	61	674,4	73,99605
0,5	76,4	598	65,61334
0,25	134,2	463,8	50,88874
0,125	161,6	302,2	33,15778
0,063	121,5	180,7	19,82664
Rest	180,7	0	0

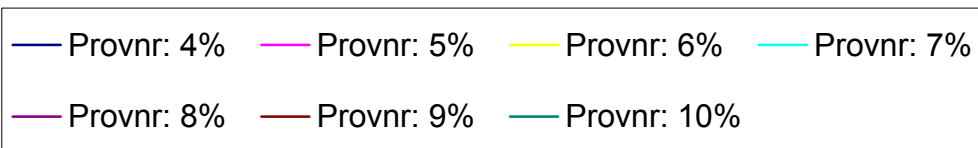
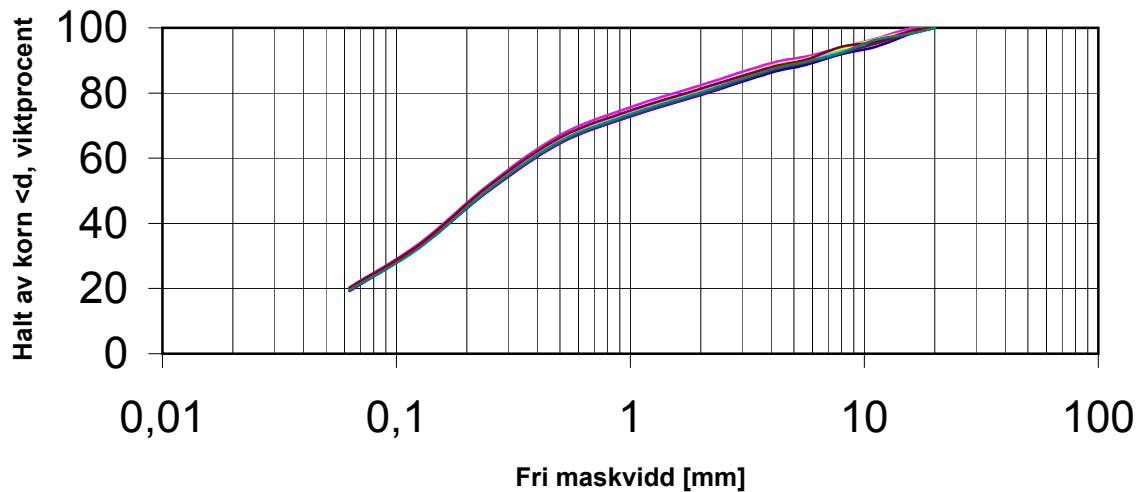
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 8%			
20	0	856	100
16	14,2	841,8	98,34112
11,2	27	814,8	95,18692
8	25,3	789,5	92,23131
5,6	25,5	764	89,25234
4	20,6	743,4	86,84579
2	62,7	680,7	79,52103
1	57,3	623,4	72,8271
0,5	71,1	552,3	64,52103
0,25	122,3	430	50,23364
0,125	150,4	279,6	32,66355
0,063	114,9	164,7	19,24065
Rest	164,7	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 9%			
20	0	917	100
16	7	910	99,23664
11,2	32,9	877,1	95,64885
8	13,5	863,6	94,17666
5,6	36,8	826,8	90,16358
4	21	805,8	87,8735
2	60	745,8	81,33043
1	61	684,8	74,6783
0,5	77	607,8	66,28135
0,25	133,9	473,9	51,67939
0,125	167,6	306,3	33,4024
0,063	121,4	184,9	20,16358
Rest	184,9	0	0

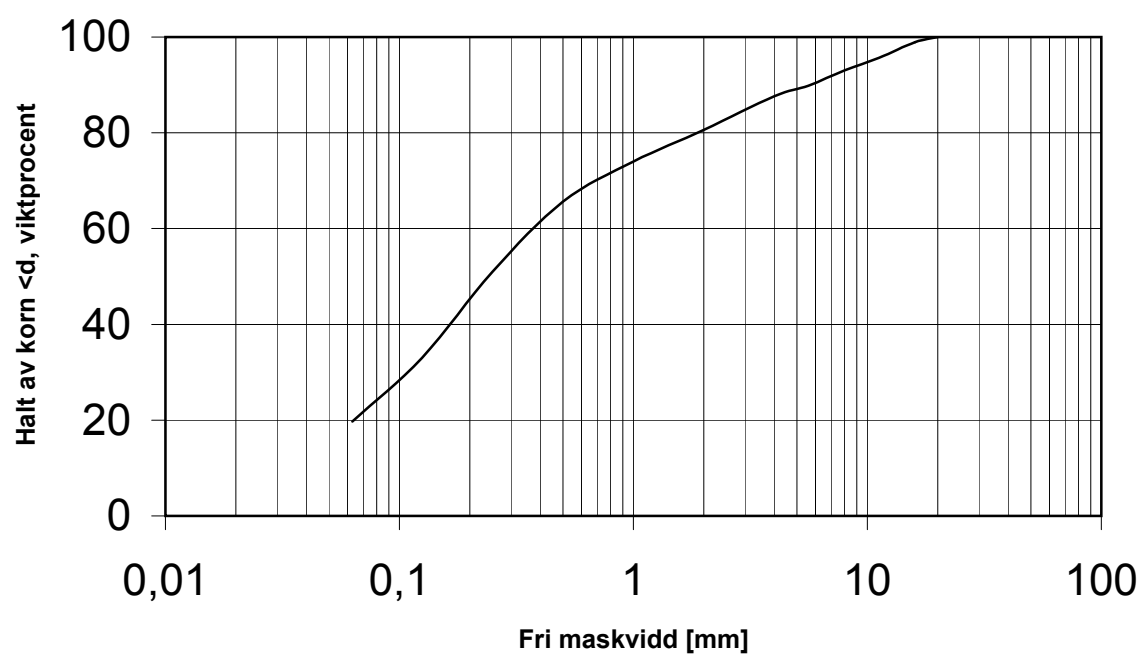
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 10%			
20	0	1053,4	100
16	17,4	1036	98,34821
11,2	21,4	1014,6	96,31669
8	40,5	974,1	92,472
5,6	30,8	943,3	89,54813
4	24	919,3	87,26979
2	75,4	843,9	80,11202
1	70	773,9	73,46687
0,5	87,7	686,2	65,14145
0,25	153	533,2	50,61705
0,125	191,8	341,4	32,40934
0,063	135,8	205,6	19,51775
Rest	205,6	0	0

	Kvarstannad mängd[g]		Passerad mängd [g]		Passerad mängd [%]
Medelsikturva innan packning		Siltig sandmorän			
20		0	6618,8		100
16		71,8	6547		98,91521
11,2		214,3	6332,7		95,67746
8		175,3	6157,4		93,02895
5,6		209,6	5947,8		89,86221
4		147,9	5799,9		87,62767
2		463	5336,9		80,63244
1		440,6	4896,3		73,97565
0,5		553,6	4342,7		65,61159
0,25		968,4	3374,3		50,98054
0,125		1189	2185,3		33,01656
0,063		881,7	1303,6		19,69541
Rest		1303,6	0		0

Siktkurvor före packning M1



Medelsiktkurva före packning M1



Siktning

Efter packning

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 4%			
20	0	947,8	100
16	16	931,8	98,31188
11,2	43,8	888	93,69065
8	31,5	856,5	90,36717
5,6	34,3	822,2	86,74826
4	21,4	800,8	84,4904
2	62,4	738,4	77,90673
1	58,3	680,1	71,75564
0,5	73,1	607	64,04305
0,25	130	477	50,32707
0,125	164,3	312,7	32,99219
0,063	124,4	188,3	19,86706
Rest	188,3	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 5%			
20	0	1086,2	100
16	28,4	1057,8	97,38538
11,2	73,2	984,6	90,64629
8	40,7	943,9	86,89928
5,6	31,2	912,7	84,02688
4	24,3	888,4	81,78973
2	70,3	818,1	75,31762
1	58,8	759,3	69,90425
0,5	74	685,3	63,09151
0,25	128,6	556,7	51,25207
0,125	164,4	392,3	36,11674
0,063	123,8	268,5	24,7192
Rest	268,5	0	0

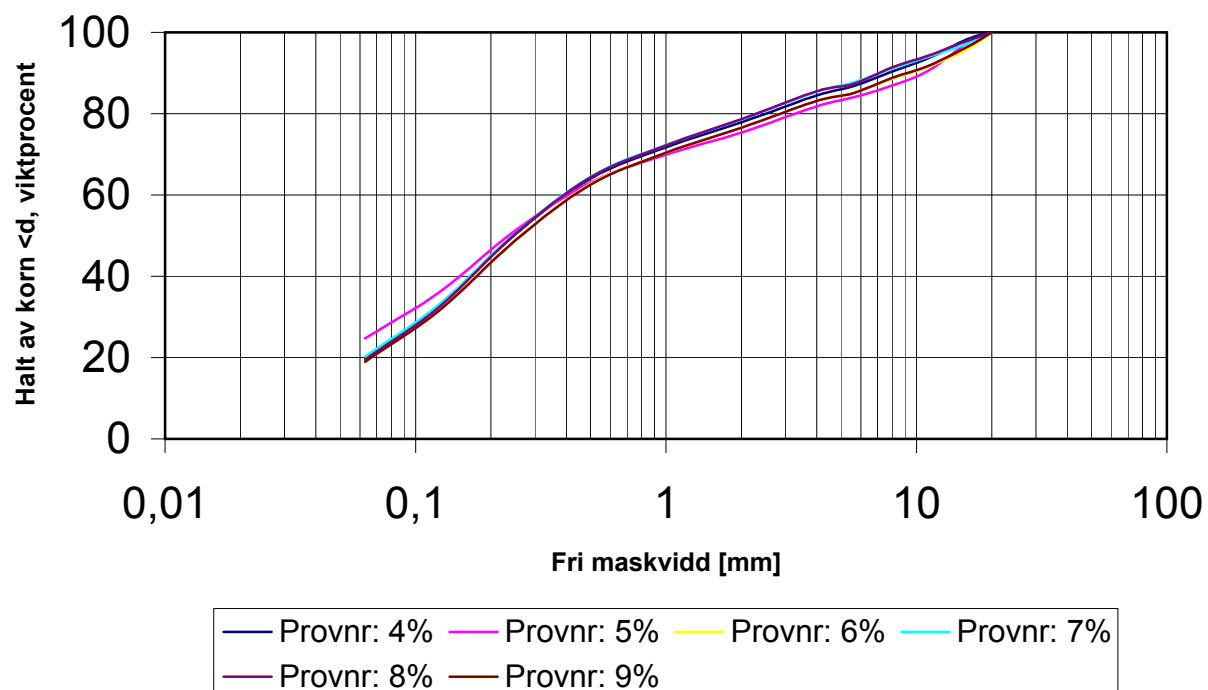
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 6%			
20	0	937,2	100
16	38,2	899	95,92403
11,2	40,8	858,2	91,57064
8	27,7	830,5	88,61502
5,6	33	797,5	85,0939
4	18,2	779,3	83,15194
2	61,6	717,7	76,57917
1	57,9	659,8	70,4012
0,5	71,4	588,4	62,78276
0,25	129,4	459	48,97567
0,125	160	299	31,90354
0,063	121,4	177,6	18,95006
Rest	177,6	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 7%			
20	0	973,7	100
16	26,9	946,8	97,23734
11,2	31,7	915,1	93,98172
8	28,3	886,8	91,07528
5,6	33,3	853,5	87,65534
4	21,8	831,7	85,41645
2	66,9	764,8	78,54575
1	60,6	704,2	72,32207
0,5	76	628,2	64,51679
0,25	135,9	492,3	50,55972
0,125	169,5	322,8	33,15189
0,063	126,1	196,7	20,20129
Rest	196,7	0	0

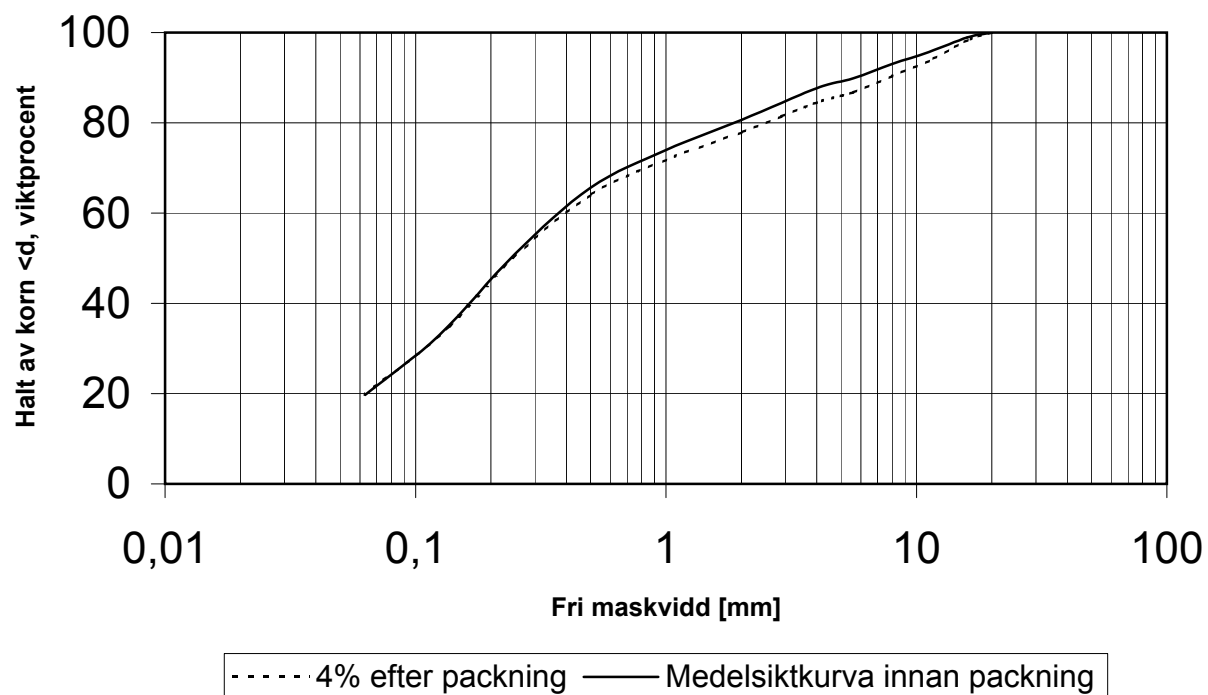
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 8%			
20	0	912,7	100
16	19	893,7	97,91826
11,2	32,4	861,3	94,36836
8	26,8	834,5	91,43201
5,6	37,2	797,3	87,3562
4	16,7	780,6	85,52646
2	63	717,6	78,62386
1	58,5	659,1	72,21431
0,5	71,6	587,5	64,36945
0,25	127,9	459,6	50,35609
0,125	162,7	296,9	32,52986
0,063	119,5	177,4	19,43684
Rest	177,4	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 9%			
20	0	920,1	100
16	32,4	887,7	96,47864
11,2	42,6	845,1	91,84871
8	28,2	816,9	88,78383
5,6	34,2	782,7	85,06684
4	18	764,7	83,11053
2	60,3	704,4	76,5569
1	56,8	647,6	70,38365
0,5	72	575,6	62,55842
0,25	126,6	449	48,79904
0,125	157,6	291,4	31,67047
0,063	117,1	174,3	18,94359
Rest	174,3	0	0

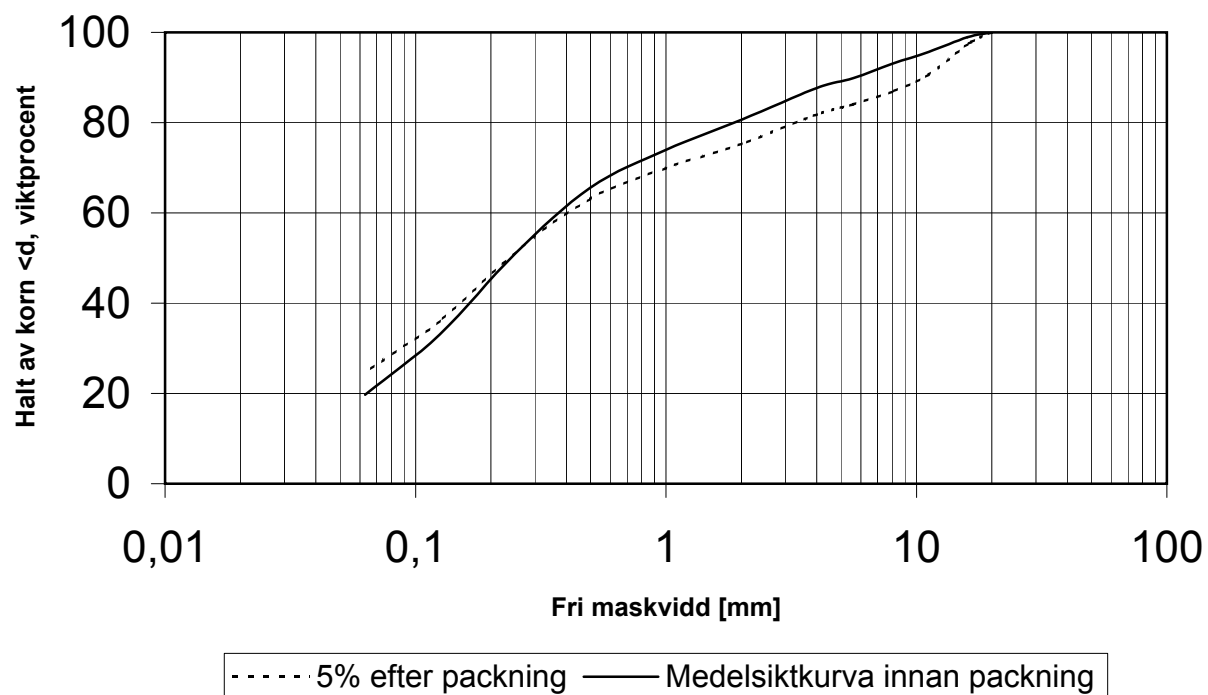
Siktning efter packning M1



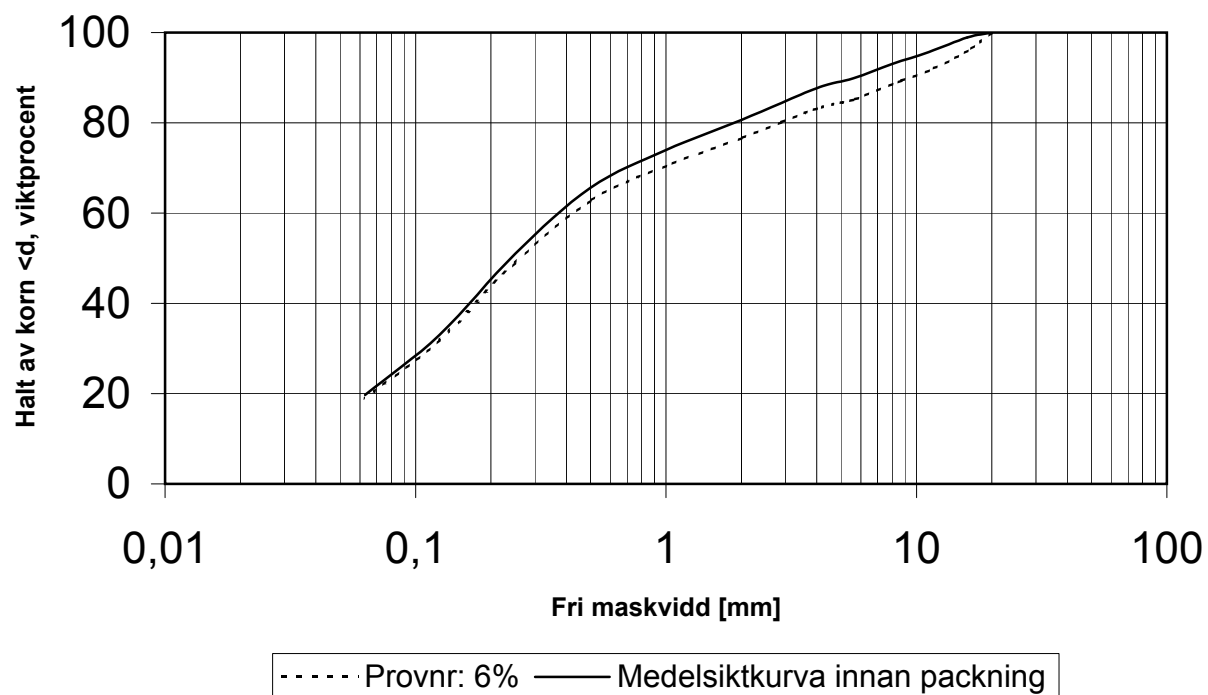
Jämförelse 4% M1



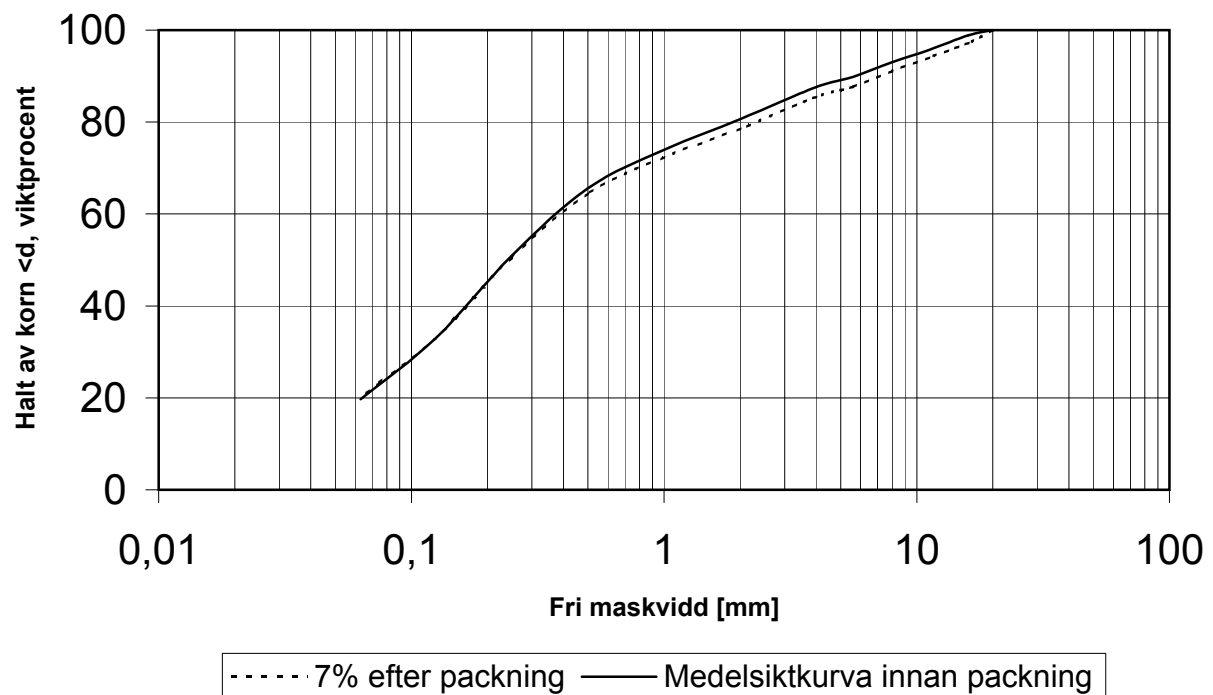
Jämförelse 5% M1



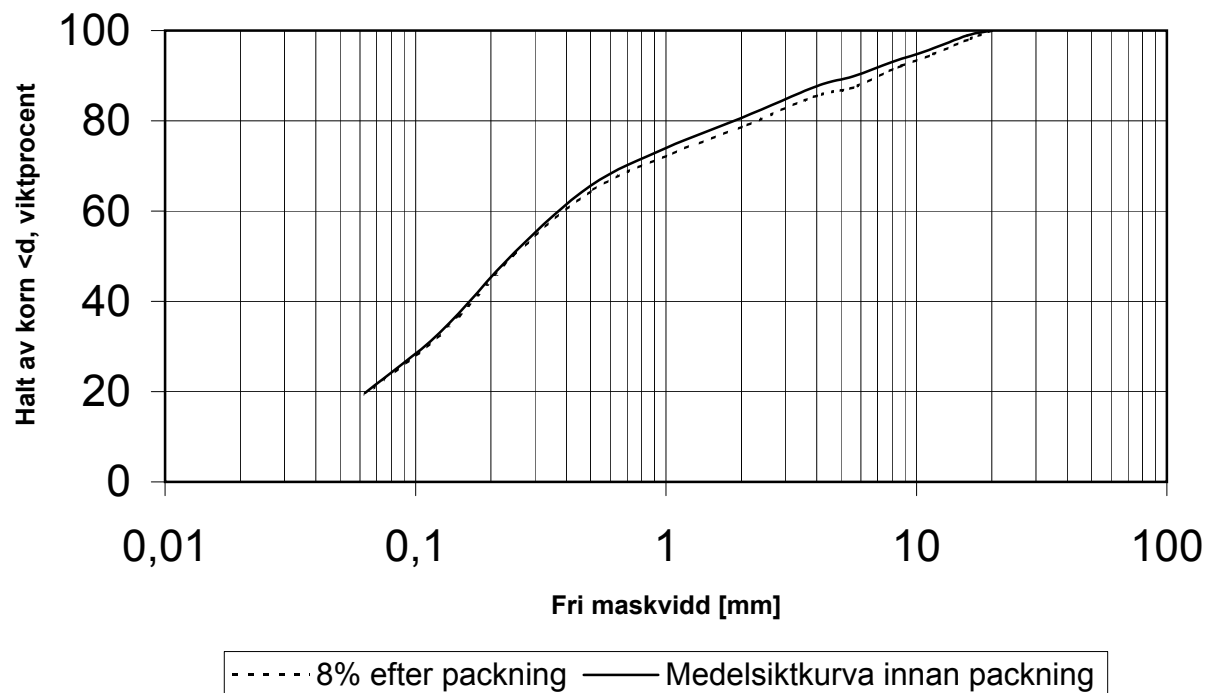
Jämförelse 6% M1



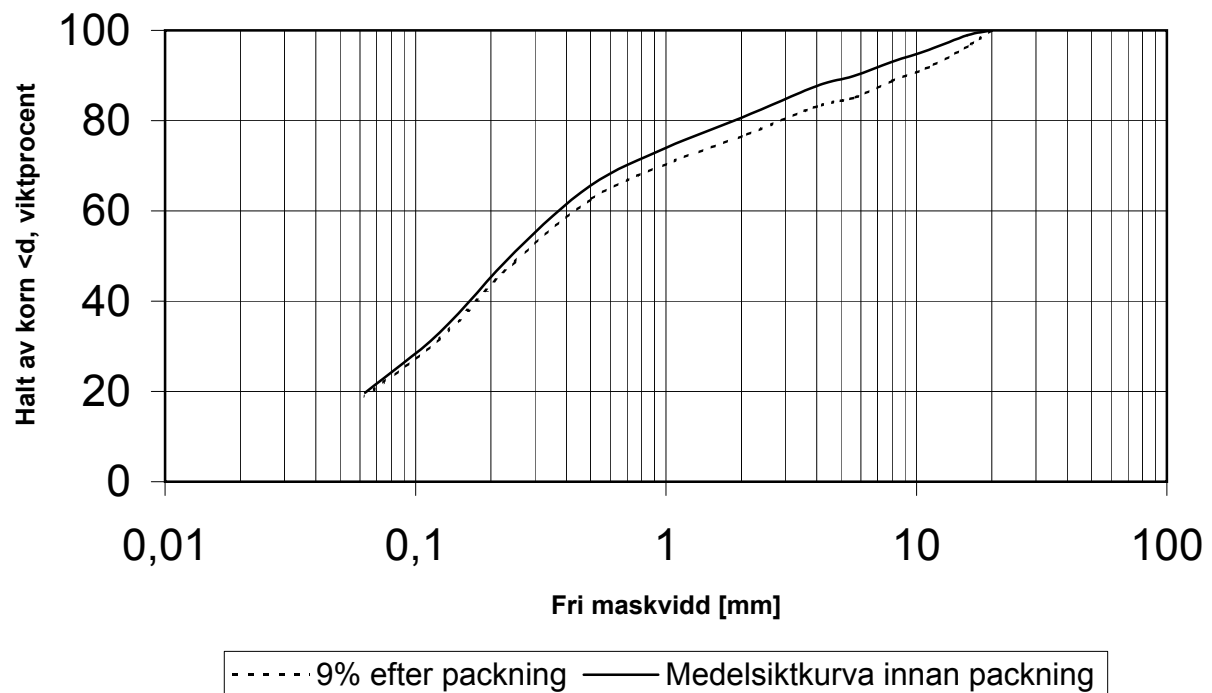
Jämförelse 7% M1



Jämförelse 8% M1



Jämförelse 9% M1



Vattenmättnadshalten

$$Sr = \frac{(w \cdot p \cdot ps / pw)}{(ps(w+1) - p)}$$

w=vattenkvot

p=skrymdensitet(t/m3)

ps=kompaktdensitet(t/m3)

pw=vattnets densitet(t/m3)

Vid antagande att vattenmättnadsgraden är 100% och att vattnets densitet är 1ton/m3

$$pD = ps / (ps \cdot w + 1)$$

pD=Torrdensiteten ps= 2,65 t/m3

	pD	w	
4%	2,396022	0,04	4
5%	2,339956	0,05	5
6%	2,286454	0,06	6
7%	2,235344	0,07	7
8%	2,186469	0,08	8
9%	2,139685	0,09	9
10%	2,094862	0,1	10
11%	2,051878	0,11	11
12%	2,010622	0,12	12
13%	1,970993	0,13	13
14%	1,932896	0,14	14
15%	1,896243	0,15	15

Appendix B Proctorförsök Material M2

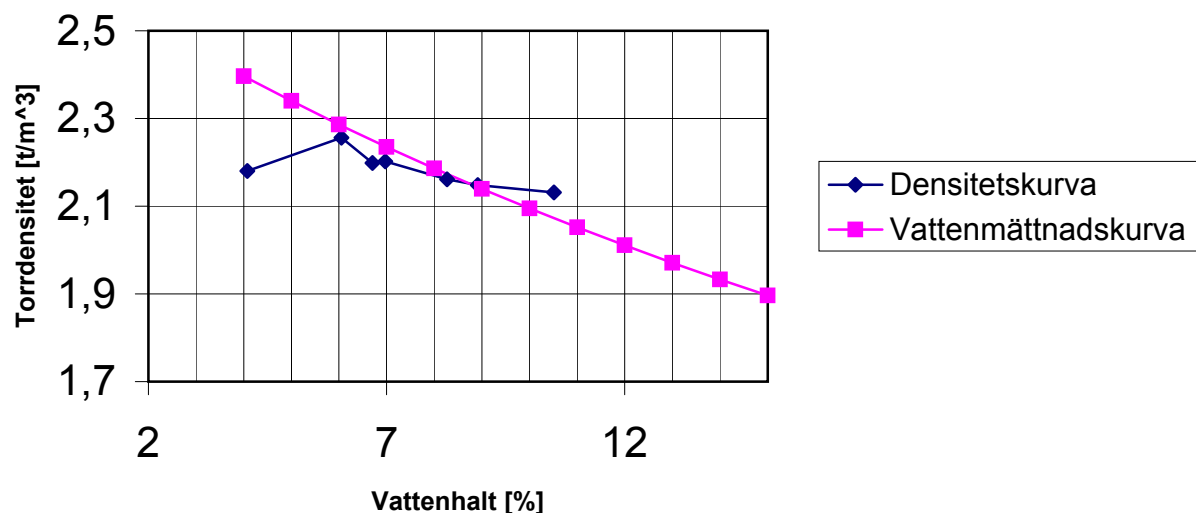
Packning

Provnnummer: 4% 6% 7% 8% 9% 10% 12%

Proctorcylinders volym: 944 cm³

Mängd prov [g]	3447,8	3151,7	2743,5	2748,2	2750	2831	2719
Mängd vatten [g]	140	195	200	225	255	285	330
Framräknad fukthalt[%]	4,06056	6,187137	7,289958	8,187177	9,272727	10,06711	12,13682
Torkplåts vikt [g]	552,1	492,5	554,3	492,6	515,9	552,4	493,4
Vikt innan torkning [g]	2142,2	2258,6	2214,5	2224,2	2209,2	2208,7	2223,6
Vikt efter torkning [g]	2058,3	2129,7	2075,4	2079,2	2040,5	2027,9	2012,1
Verklig fukthalt [%]	4,076179	6,052496	6,702322	6,973836	8,267581	8,915627	10,51141
Torrdensitet [ton/m ³]	2,180403	2,256038	2,198517	2,202542	2,161547	2,148199	2,131462

Proctorresultat M2



Siktning

Före packning

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 4%			
20	0	917,1	100
16	53,1	864	94,21001
11,2	43,8	820,2	89,43409
8	52,8	767,4	83,67681
5,6	61,6	705,8	76,95998
4	42,4	663,4	72,33671
2	111,5	551,9	60,17882
1	79,3	472,6	51,532
0,5	68	404,6	44,11733
0,25	90,3	314,3	34,27107
0,125	102,4	211,9	23,10544
0,063	72,4	139,5	15,21099
Rest	139,5	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 6%			
20	0	812,5	100
16	13,7	798,8	98,31385
11,2	36,8	762	93,78462
8	46,2	715,8	88,09846
5,6	65,3	650,5	80,06154
4	36,9	613,6	75,52
2	104,1	509,5	62,70769
1	72,9	436,6	53,73538
0,5	64,2	372,4	45,83385
0,25	83,2	289,2	35,59385
0,125	95,3	193,9	23,86462
0,063	68,2	125,7	15,47077
Rest	125,7	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 7%			
20	0	868,6	100
16	16,5	852,1	98,10039
11,2	60,3	791,8	91,15819
8	38,3	753,5	86,74879
5,6	66,6	686,9	79,08128
4	43,1	643,8	74,11927
2	106,8	537	61,82362
1	77,1	459,9	52,94727
0,5	66,7	393,2	45,26825
0,25	88,5	304,7	35,07944
0,125	101	203,7	23,45153
0,063	72,2	131,5	15,1393
Rest	131,5	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 8%			
20	0	891,5	100
16	10,1	881,4	98,86708
11,2	97,6	783,8	87,91924
8	61,9	721,9	80,97588
5,6	50,4	671,5	75,32249
4	38,6	632,9	70,99271
2	106,1	526,8	59,09142
1	74,5	452,3	50,73472
0,5	65	387,3	43,44363
0,25	85	302,3	33,90914
0,125	100,2	202,1	22,66966
0,063	70,9	131,2	14,71677
Rest	131,2	0	0

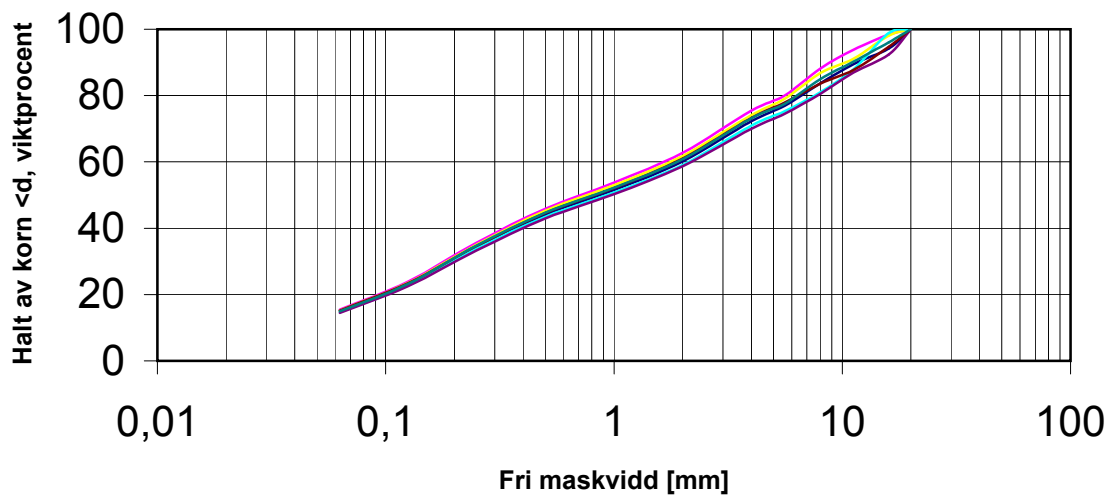
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 9%			
20	0	947,1	100
16	71,8	875,3	92,41896
11,2	51,8	823,5	86,94964
8	61	762,5	80,50892
5,6	57,2	705,3	74,46943
4	42,2	663,1	70,01373
2	107,6	555,5	58,65273
1	79,5	476	50,25868
0,5	69,2	406,8	42,95217
0,25	91,3	315,5	33,31222
0,125	102,8	212,7	22,45803
0,063	75,5	137,2	14,48633
Rest	137,2	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 10%			
20	0	932,8	100
16	49,1	883,7	94,73628
11,2	65,4	818,3	87,72513
8	38,6	779,7	83,58705
5,6	52,8	726,9	77,92667
4	43,4	683,5	73,27401
2	114,7	568,8	60,9777
1	82,8	486	52,1012
0,5	70,3	415,7	44,56475
0,25	92,4	323,3	34,65909
0,125	105,4	217,9	23,35978
0,063	76,4	141,5	15,16938
Rest	141,5	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 12%			
20	0	920	100
16	36,5	883,5	96,03261
11,2	53,1	830,4	90,26087
8	49,1	781,3	84,92391
5,6	68,3	713	77,5
4	39,7	673,3	73,18478
2	113,4	559,9	60,8587
1	79,7	480,2	52,19565
0,5	69,1	411,1	44,68478
0,25	91	320,1	34,79348
0,125	106,7	213,4	23,19565
0,063	75,7	137,7	14,96739
Rest	137,7	0	0

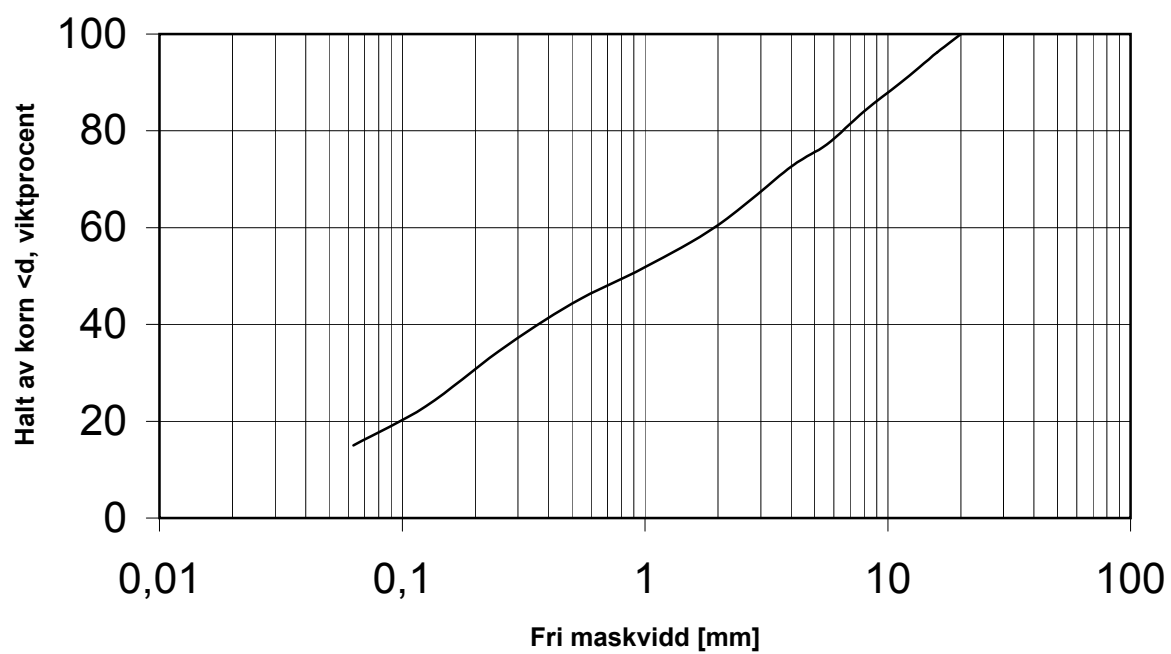
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Medelsiktkurva innan packning			
20	0	5356,8	100
16	201,7	5155,1	96,23469
11,2	343,4	4811,7	89,82415
8	309,3	4502,4	84,05018
5,6	369,4	4133	77,15427
4	242,9	3890,1	72,61985
2	649,5	3240,6	60,49507
1	463	2777,6	51,85185
0,5	402,2	2375,4	44,34364
0,25	529,3	1846,1	34,46274
0,125	608,4	1237,7	23,10521
0,063	434,9	802,8	14,98656
Rest	802,8	0	0

Siktcurvor före packning M2



— Provnr: 4% — Provnr: 6% — Provnr: 7% — Provnr: 8%
 — Provnr: 9% — Provnr: 10% — Provnr: 12%

Medelsiktkurva före packning M2



Siktning

Efter packning

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 4%			
20	0	1047,8	100
16	22,7	1025,1	97,83356
11,2	64,1	961	91,71598
8	75,4	885,6	84,51995
5,6	71,9	813,7	77,65795
4	55,9	757,8	72,32296
2	131,3	626,5	59,79195
1	91,2	535,3	51,08799
0,5	77,6	457,7	43,682
0,25	100	357,7	34,13819
0,125	117,1	240,6	22,9624
0,063	84,8	155,8	14,86925
Rest	155,8	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 6%			
20	0	1054,7	100
16	13,9	1040,8	98,68209
11,2	72,7	968,1	91,78913
8	80,3	887,8	84,17559
5,6	77,4	810,4	76,83702
4	52,2	758,2	71,88774
2	126,5	631,7	59,89381
1	88,4	543,3	51,51228
0,5	78,7	464,6	44,05044
0,25	101,8	362,8	34,39841
0,125	120,1	242,7	23,01128
0,063	86,7	156	14,79094
Rest	156	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 7%			
20	0	1022,2	100
16	13,5	1008,7	98,67932
11,2	51,8	956,9	93,61182
8	71	885,9	86,66601
5,6	69,8	816,1	79,83761
4	47,5	768,6	75,19077
2	134,9	633,7	61,99374
1	88,1	545,6	53,37507
0,5	77,9	467,7	45,75426
0,25	102,6	365,1	35,71708
0,125	119,6	245,5	24,01683
0,063	88,5	157	15,35903
Rest	157	0	0

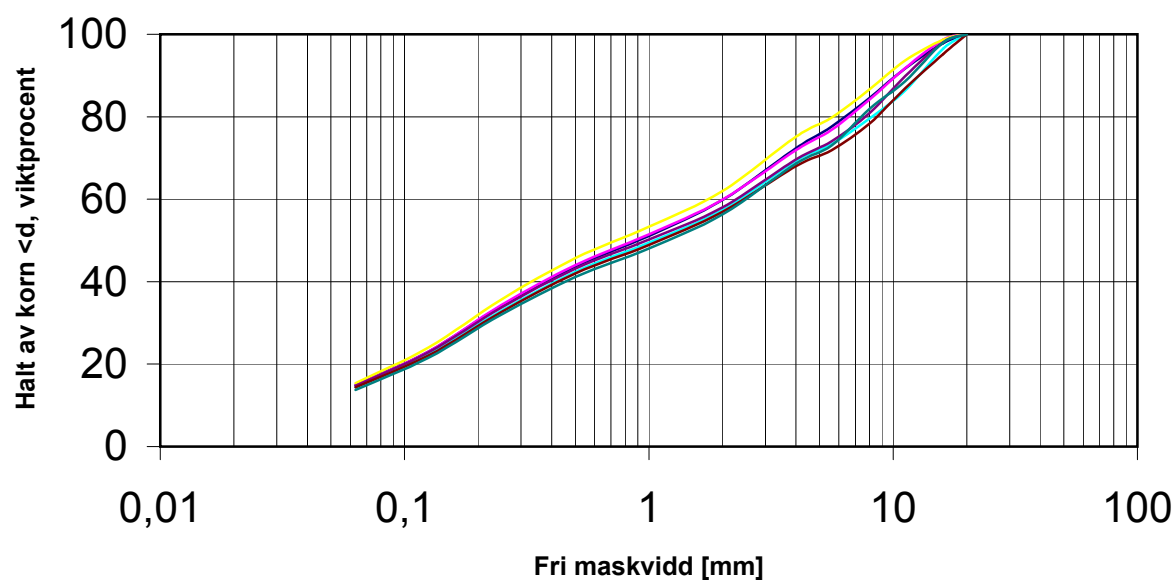
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 8%			
20	0	1058,6	100
16	37	1021,6	96,50482
11,2	107,9	913,7	86,31211
8	71	842,7	79,60514
5,6	66,1	776,6	73,36104
4	42,8	733,8	69,31797
2	126,3	607,5	57,38712
1	84,3	523,2	49,42377
0,5	74,8	448,4	42,35783
0,25	98,8	349,6	33,02475
0,125	113,7	235,9	22,28415
0,063	83,3	152,6	14,41527
Rest	152,6	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 9%			
20	0	1021,9	100
16	19,5	1002,4	98,09179
11,2	84,3	918,1	89,84245
8	91,7	826,4	80,86897
5,6	69,7	756,7	74,04834
4	44,9	711,8	69,65457
2	119,4	592,4	57,97045
1	79,4	513	50,20061
0,5	71,9	441,1	43,16469
0,25	96,3	344,8	33,74107
0,125	111,4	233,4	22,83981
0,063	82,7	150,7	14,74704
Rest	150,7	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 10%			
20	0	1038,4	100
16	49,7	988,7	95,21379
11,2	86,3	902,4	86,90293
8	89,2	813,2	78,31279
5,6	66,9	746,3	71,87018
4	39,8	706,5	68,03737
2	115,4	591,1	56,92411
1	82,9	508,2	48,94068
0,5	72,3	435,9	41,97804
0,25	96,5	339,4	32,6849
0,125	110,1	229,3	22,08205
0,063	80,3	149	14,349
Rest	149	0	0

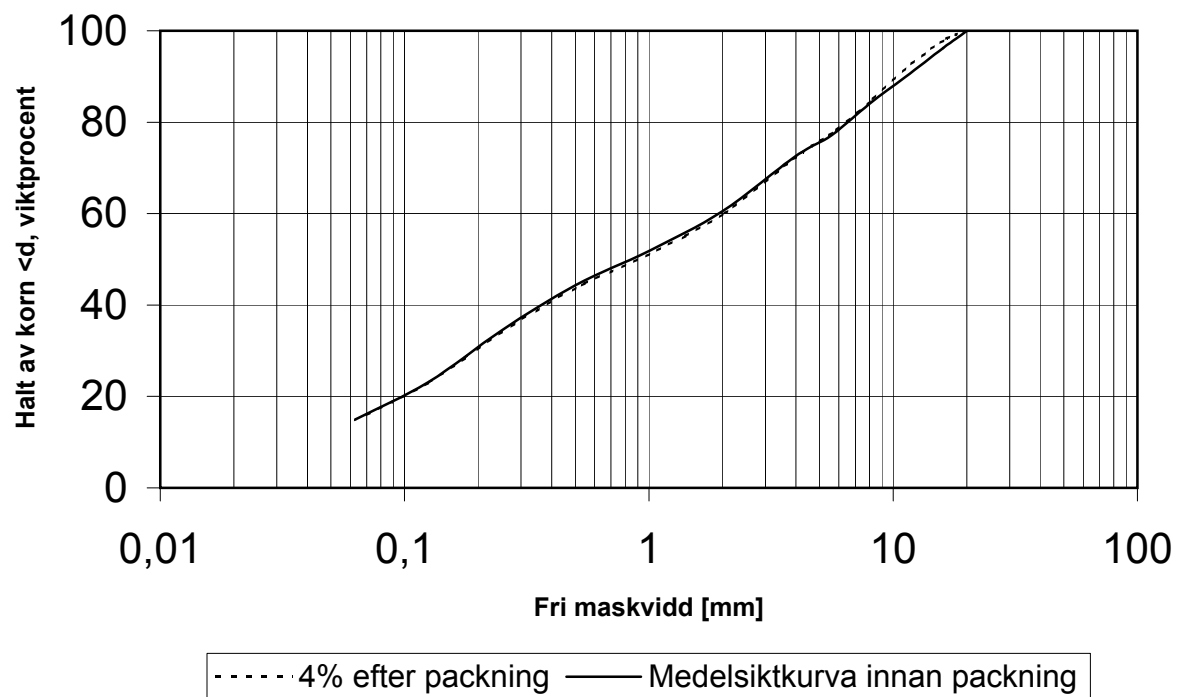
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 12%			
20	0	979	100
16	19,4	959,6	98,01839
11,2	92,3	867,3	88,5904
8	65,5	801,8	81,8999
5,6	86,3	715,5	73,08478
4	43,6	671,9	68,63126
2	120,8	551,1	56,29213
1	80,8	470,3	48,03882
0,5	67,5	402,8	41,14402
0,25	88,7	314,1	32,08376
0,125	103,3	210,8	21,53218
0,063	76,1	134,7	13,75894
Rest	134,7	0	0

Siktning efter packning M2

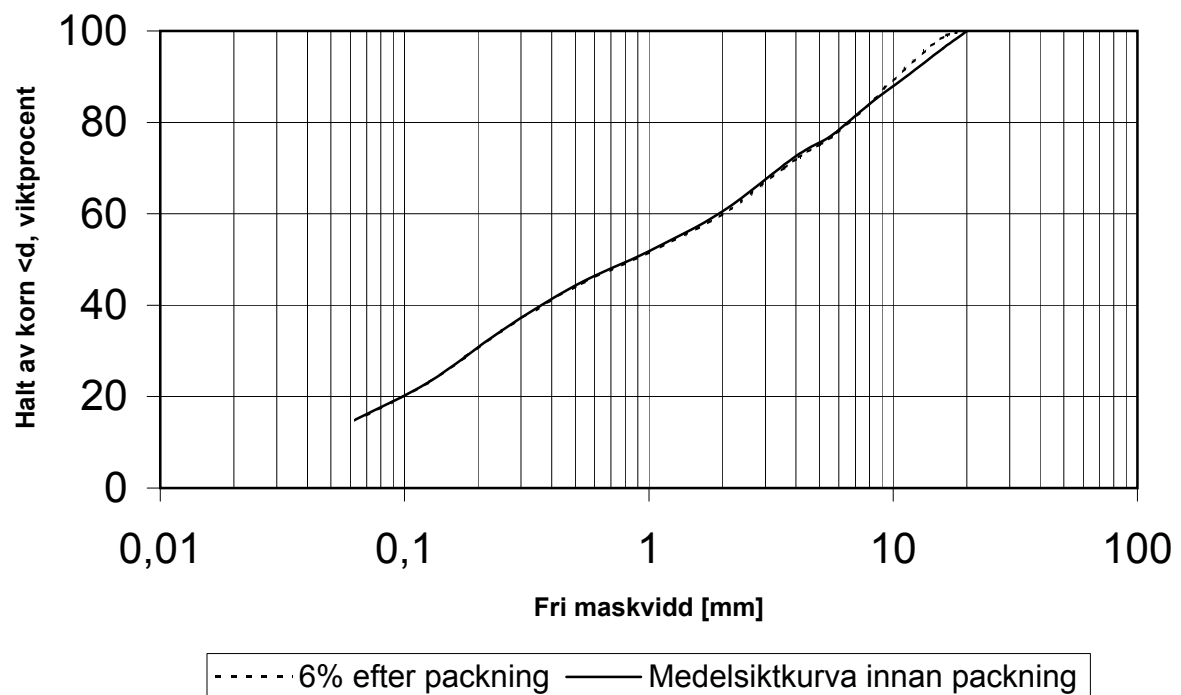


— Provnr: 4% — Provnr: 6% — Provnr: 7% — Provnr: 8%
 — Provnr: 9% — Provnr: 10% — Provnr: 12%

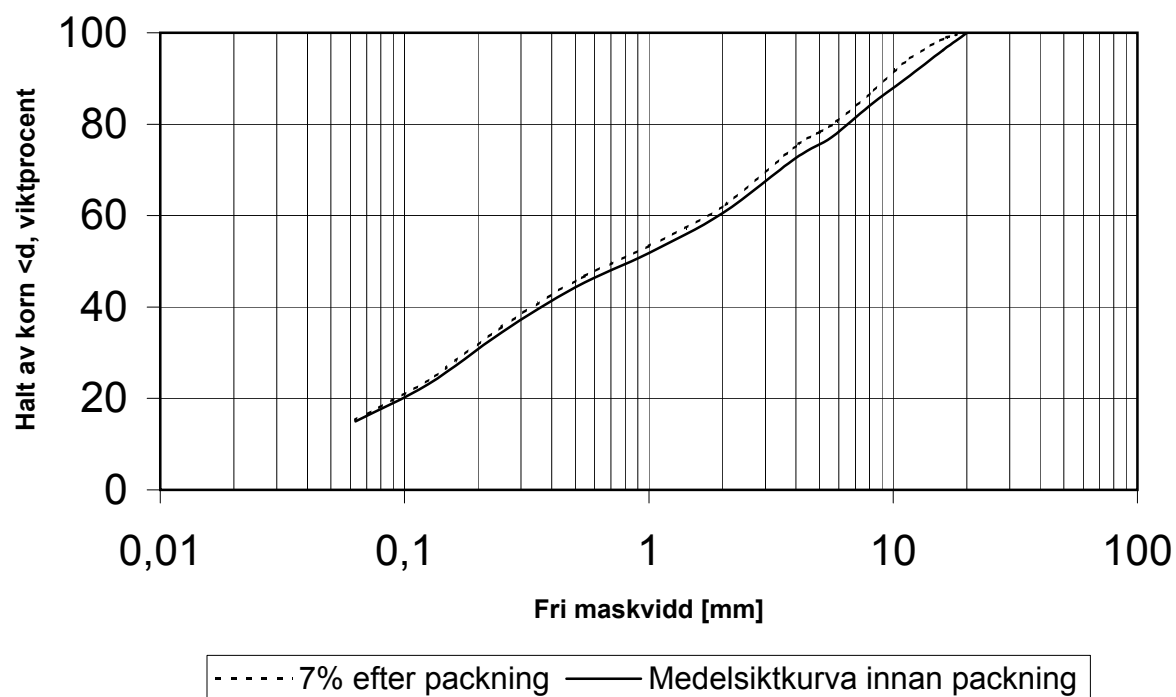
Jämförelse 4% M2



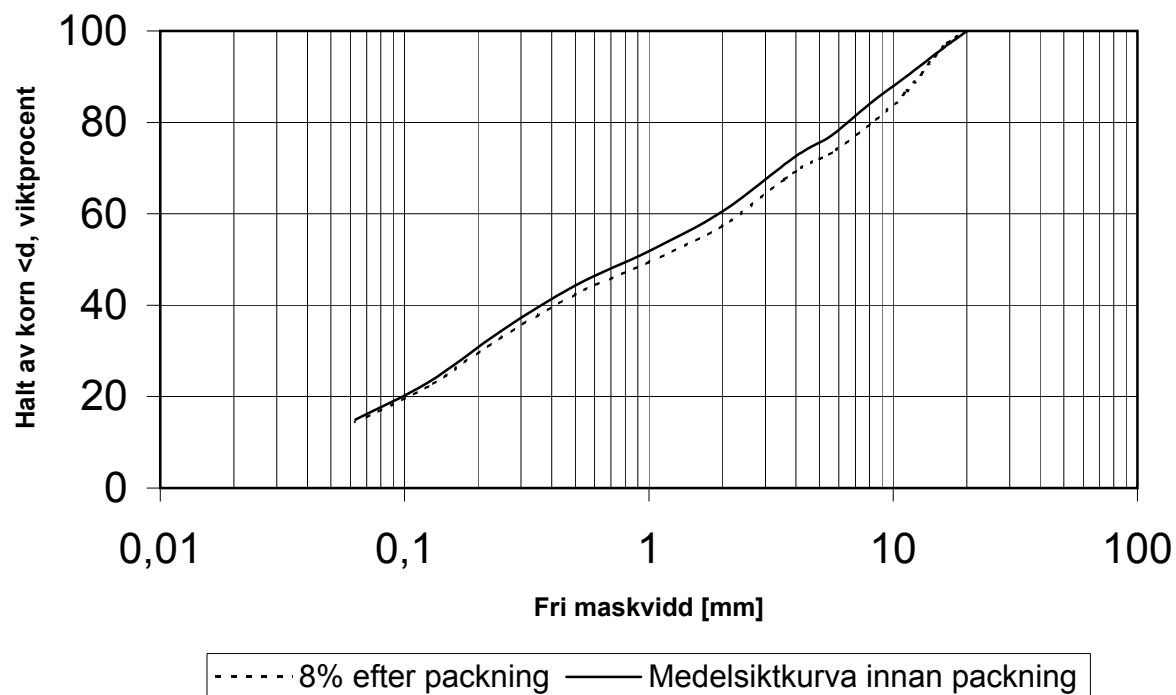
Jämförelse 6% M2



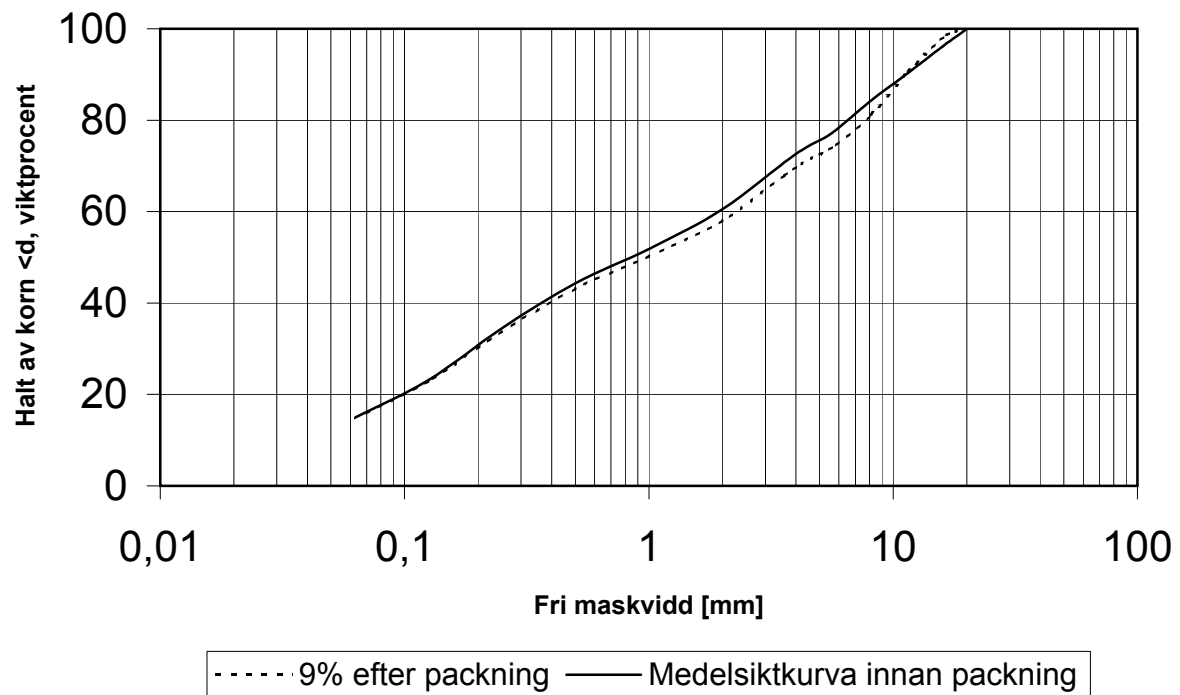
Jämförelse 7% M2



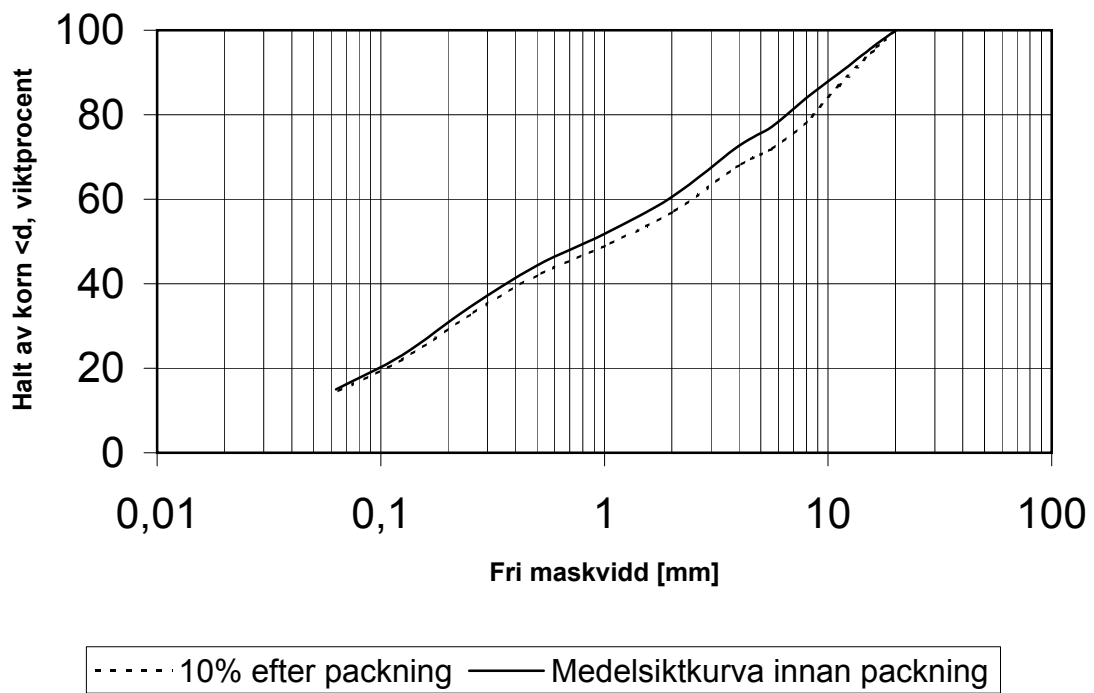
Jämförelse 8% M2



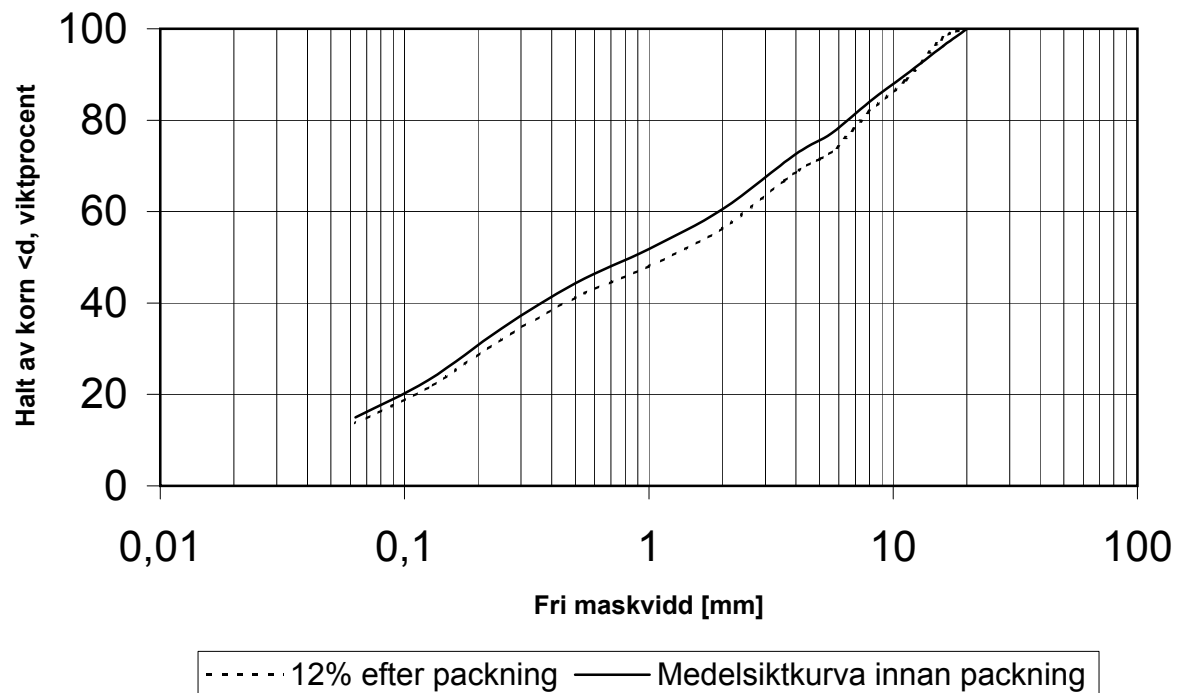
Jämförelse 9% M2



Jämförelse 10% M2



Jämförelse 12% M2



Vattenmättnadshalten

$$Sr = \frac{(w \cdot p \cdot ps / pw)}{(ps(w+1) - p)}$$

w = vattenkvot

p = skrymdensitet (t/m³)

ps = kompaktdensitet (t/m³)

pw = vattnets densitet (t/m³)

Vid antagande att vattenmättnadsgraden är 100% och att vattnets densitet är 1 ton/m³

$$pD = ps / (ps \cdot w + 1)$$

pD = Torrdensiteten ps = 2,65 t/m³

	pD	w	
4%	2,396022	0,04	4
5%	2,339956	0,05	5
6%	2,286454	0,06	6
7%	2,235344	0,07	7
8%	2,186469	0,08	8
9%	2,139685	0,09	9
10%	2,094862	0,1	10
11%	2,051878	0,11	11
12%	2,010622	0,12	12
13%	1,970993	0,13	13
14%	1,932896	0,14	14
15%	1,896243	0,15	15

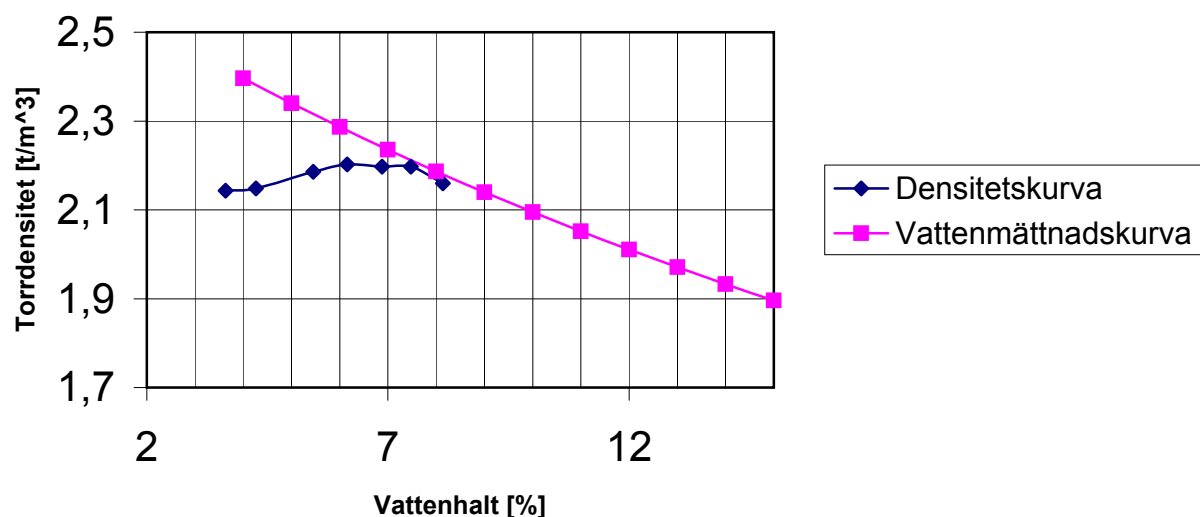
Appendix C Proctorförsök Material N1

Packning

Provnnummer: 4% 5% 6% 7% 8% 9% 10%
 Proctorcylinders volym: 944 cm³

Mängd prov [g]	2926,4	2991,5	2863,7	3159,1	3183,5	2887,5	2979,9
Mängd vatten [g]	120	150	175	225	255	260	300
Framräknad fukthalt[%]	4,100601	5,01420692	6,110975	7,122282	8,010052	9,004329	10,0675
Torkplåts vikt [g]	491,9	516,3	551,8	553,7	552	516,2	553,7
Vikt innan torkning [g]	2096,8	2114,3	2176	2206,9	2216,8	2229,1	2205,1
Vikt efter torkning [g]	2023,3	2027,8	2063,5	2078,9	2074,2	2074,1	2039,2
Verklig fukthalt [%]	3,632679	4,26570668	5,451902	6,157102	6,87494	7,473121	8,13554
Torrdensitet [ton/m ³]	2,143326	2,14809322	2,185911	2,202225	2,197246	2,19714	2,16017

Proctorresultat N1



Siktning

Före packning

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 1			
20	0	803,2	100
16	36,7	766,5	95,43078
11,2	20,3	746,2	92,90339
8	50,7	695,5	86,59114
5,6	63,9	631,6	78,63546
4	40,9	590,7	73,54333
2	135,3	455,4	56,69821
1	108,3	347,1	43,21464
0,5	85,9	261,2	32,51992
0,25	67,2	194	24,15339
0,125	49	145	18,05279
0,063	32,6	112,4	13,99402
Rest	112,4	0	0

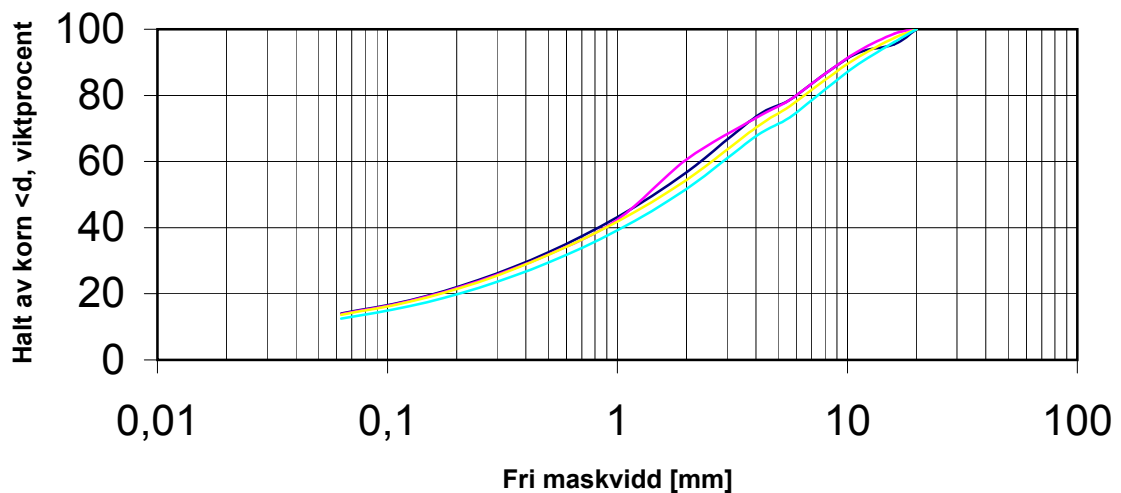
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 2			
20	0	903,4	100
16	12,6	890,8	98,60527
11,2	46,8	844	93,42484
8	62,1	781,9	86,55081
5,6	72,1	709,8	78,56985
4	49	660,8	73,14589
2	113,7	547,1	60,56011
1	163,7	383,4	42,43967
0,5	95,6	287,8	31,85743
0,25	73	214,8	23,77684
0,125	53,9	160,9	17,81049
0,063	35,7	125,2	13,85876
Rest	125,2	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr:3			
20	0	885,3	100
16	23,1	862,2	97,39072
11,2	50,6	811,6	91,67514
8	61,3	750,3	84,75093
5,6	71,9	678,4	76,62939
4	56,2	622,2	70,28126
2	140,3	481,9	54,43353
1	111,7	370,2	41,81633
0,5	89,2	281	31,74065
0,25	72,4	208,6	23,56263
0,125	52,4	156,2	17,64374
0,063	35,7	120,5	13,61121
Rest	120,5	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 4			
20	0	907,2	100
16	35,5	871,7	96,08686
11,2	59,7	812	89,50617
8	70,2	741,8	81,76808
5,6	76,8	665	73,30247
4	51,5	613,5	67,62566
2	144,4	469,1	51,70855
1	113,1	356	39,24162
0,5	89,1	266,9	29,42019
0,25	69,2	197,7	21,79233
0,125	50,5	147,2	16,22575
0,063	34,1	113,1	12,46693
Rest	113,1	0	0

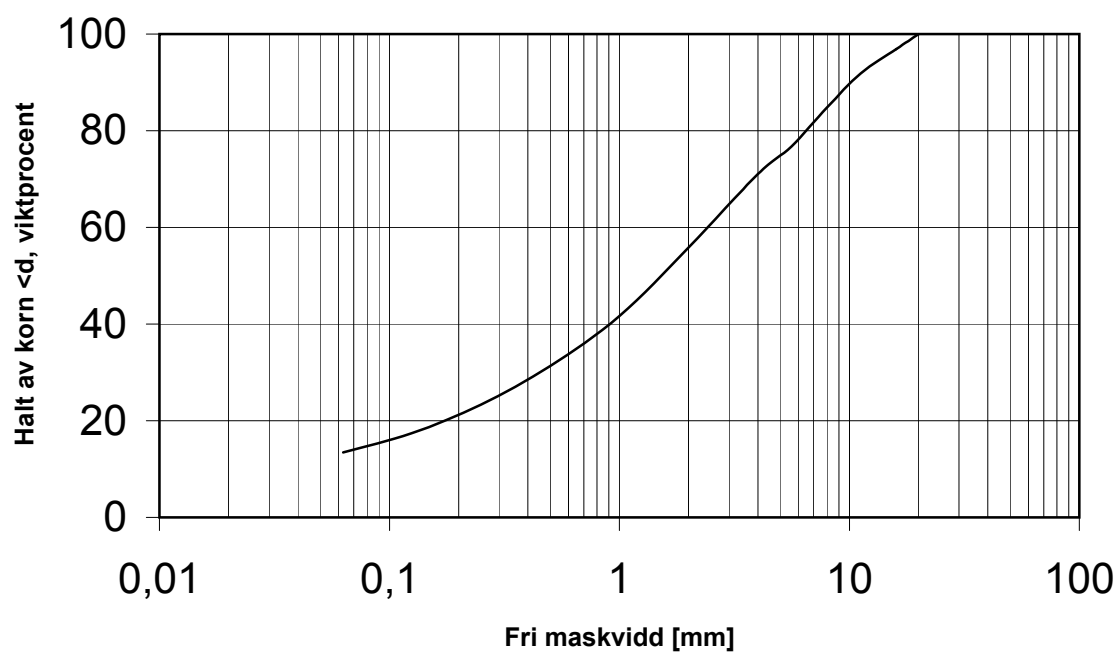
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Medelsiktkurva innan packning			
20	0	3499,1	100
16	107,9	3391,2	96,91635
11,2	177,4	3213,8	91,84647
8	244,3	2969,5	84,86468
5,6	284,7	2684,8	76,7283
4	197,6	2487,2	71,08114
2	533,7	1953,5	55,82864
1	496,8	1456,7	41,63071
0,5	359,8	1096,9	31,34806
0,25	281,8	815,1	23,29456
0,125	205,8	609,3	17,41305
0,063	138,1	471,2	13,46632
Rest	471,2	0	0

Siktcurvor före packning



— Provnr: 1 — Provnr: 2 — Provnr: 3 — Provnr: 4

Medelsiktkurva före packning N1



Siktning

Efter packning

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 4%			
20	0	991,4	100
16	23,2	968,2	97,65987
11,2	62,3	905,9	91,37583
8	61,4	844,5	85,18257
5,6	90,6	753,9	76,04398
4	53,9	700	70,60722
2	159	541	54,5693
1	124,5	416,5	42,0113
0,5	101,4	315,1	31,78334
0,25	78,8	236,3	23,83498
0,125	57,4	178,9	18,04519
0,063	39,9	139	14,02058
Rest	139	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 5%			
20	0	979,4	100
16	0	979,4	100
11,2	87,6	891,8	91,05575
8	64,5	827,3	84,47008
5,6	90,3	737	75,25015
4	52,5	684,5	69,88973
2	152,5	532	54,31897
1	125,1	406,9	41,54584
0,5	98,3	308,6	31,50909
0,25	74,4	234,2	23,9126
0,125	58,7	175,5	17,91913
0,063	38,8	136,7	13,95753
Rest	136,7	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 6%			
20	0	1018,9	100
16	49,7	969,2	95,12219
11,2	73,8	895,4	87,87909
8	72,1	823,3	80,80283
5,6	78,9	744,4	73,05918
4	50,8	693,6	68,07341
2	160,2	533,4	52,35057
1	123,2	410,2	40,2591
0,5	98,2	312	30,62126
0,25	77,3	234,7	23,03465
0,125	56,2	178,5	17,51889
0,063	39,2	139,3	13,67161
Rest	139,3	0	0

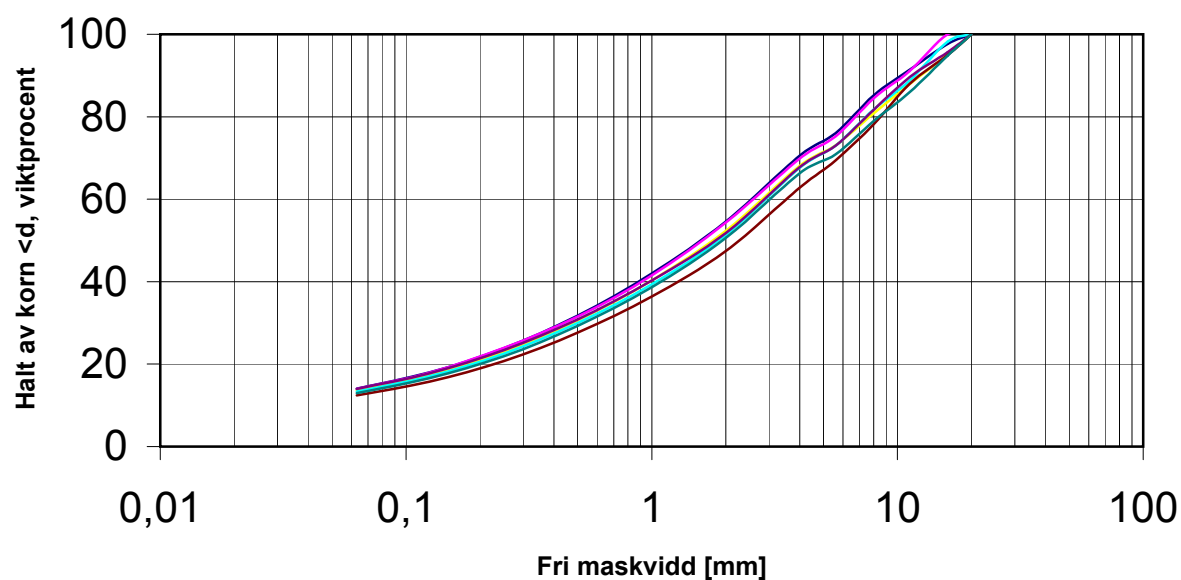
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 7%			
20	0	991,3	100
16	17,6	973,7	98,22455
11,2	93,9	879,8	88,75214
8	69,7	810,1	81,72097
5,6	86,5	723,6	72,99506
4	53,2	670,4	67,62837
2	161,3	509,1	51,3568
1	118,8	390,3	39,37254
0,5	93,2	297,1	29,97075
0,25	73,6	223,5	22,54615
0,125	53,8	169,7	17,11893
0,063	37,5	132,2	13,33602
Rest	132,2	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 8%			
20	0	1027,5	100
16	45	982,5	95,62044
11,2	61,7	920,8	89,61557
8	81,8	839	81,6545
5,6	88,8	750,2	73,01217
4	53,9	696,3	67,76642
2	164	532,3	51,80535
1	118	414,3	40,32117
0,5	97,9	316,4	30,79319
0,25	76,4	240	23,35766
0,125	57,4	182,6	17,77129
0,063	39,4	143,2	13,93674
Rest	143,2	0	0

	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 9%			
20	0	1036,7	100
16	52,5	984,2	94,93585
11,2	72,3	911,9	87,9618
8	101,3	810,6	78,19041
5,6	91,4	719,2	69,37398
4	67,9	651,3	62,82435
2	159,7	491,6	47,4197
1	114,1	377,5	36,41362
0,5	90,6	286,9	27,67435
0,25	71,8	215,1	20,74853
0,125	51,4	163,7	15,79049
0,063	35,3	128,4	12,38545
Rest	128,4	0	0

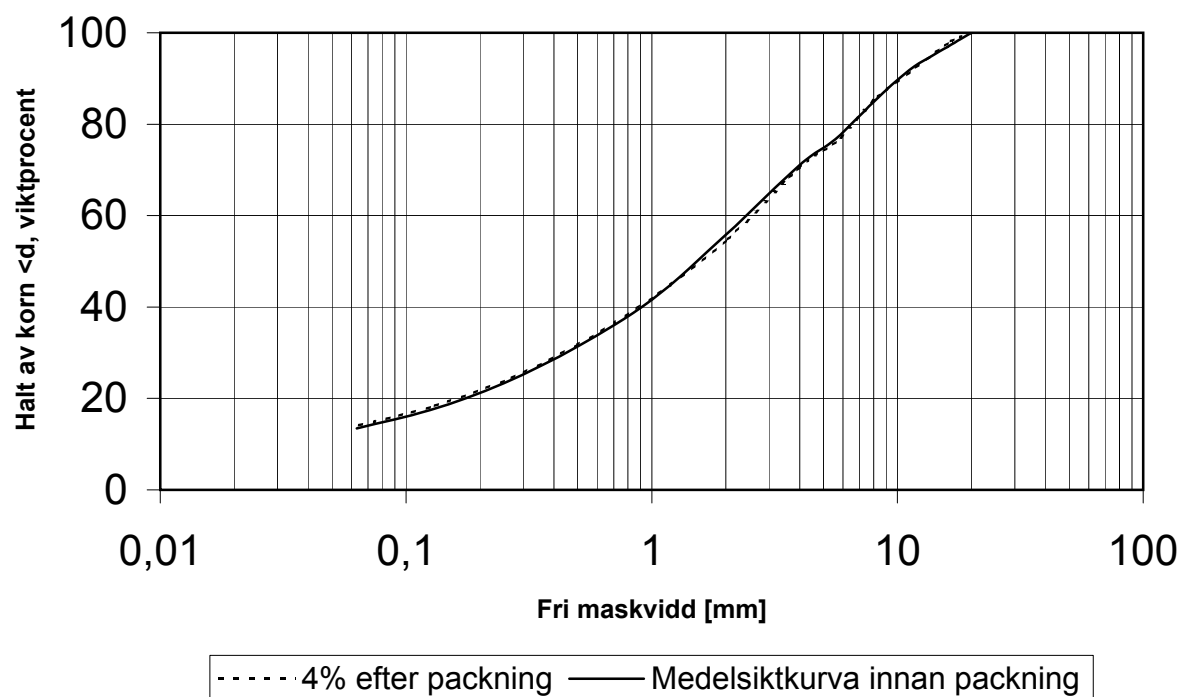
	Kvarstannad mängd[g]	Passerad mängd [g]	Passerad mängd [%]
Provnr: 10%			
20	0	1018,6	100
16	52,6	966	94,83605
11,2	90,8	875,2	85,92185
8	70,9	804,3	78,96132
5,6	82,1	722,2	70,90124
4	47,1	675,1	66,27724
2	159,4	515,7	50,62831
1	121,6	394,1	38,69036
0,5	95,7	298,4	29,29511
0,25	75,2	223,2	21,91243
0,125	53,9	169,3	16,62085
0,063	36,9	132,4	12,99823
Rest	132,4	0	0

Siktning efter packning

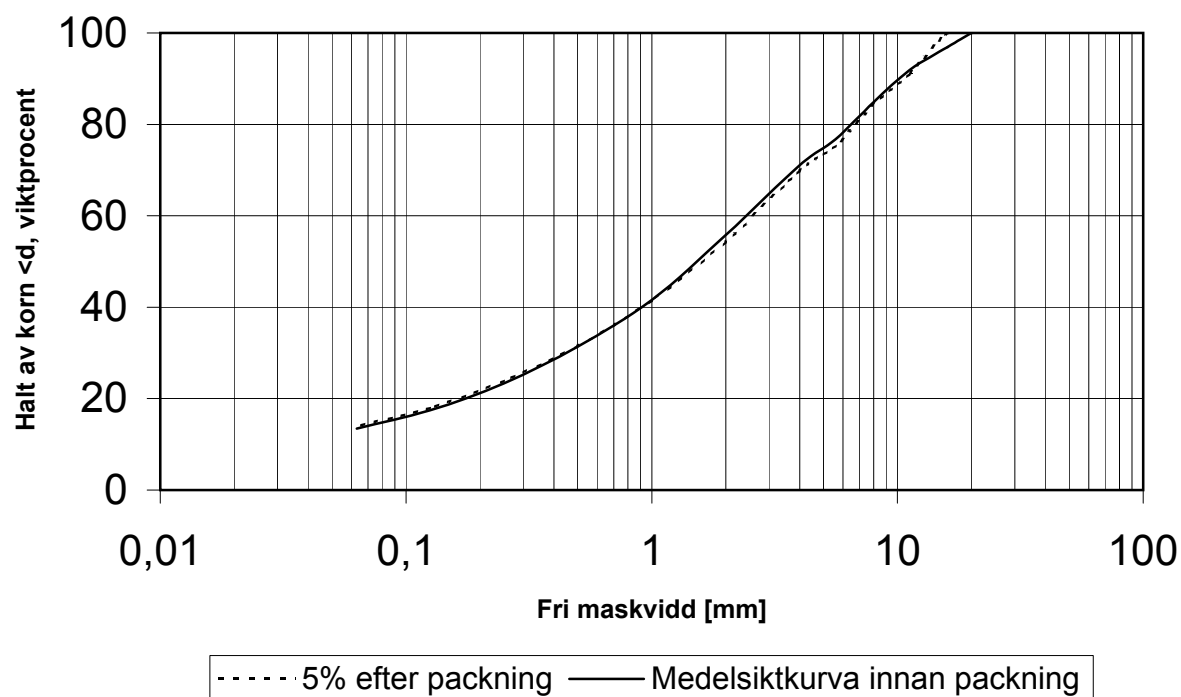


— Provnr: 4% — Provnr: 5% — Provnr: 6% — Provnr: 7%
 — Provnr: 8% — Provnr: 9% — Provnr: 10%

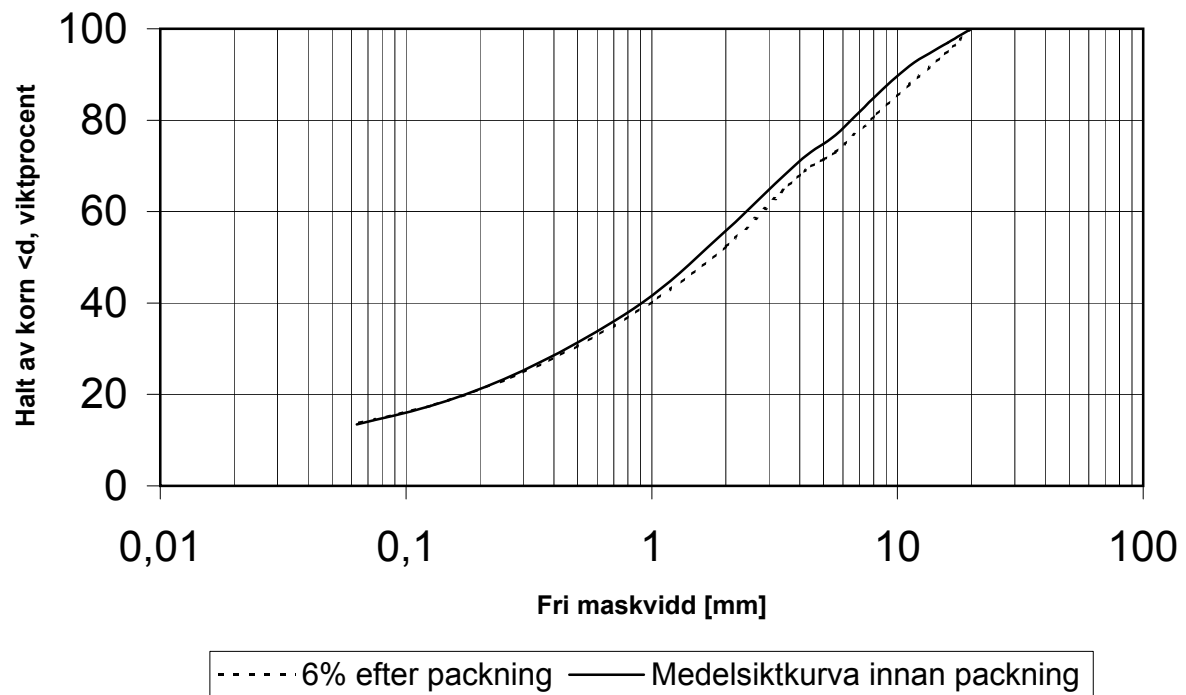
Jämförelse 4% N1



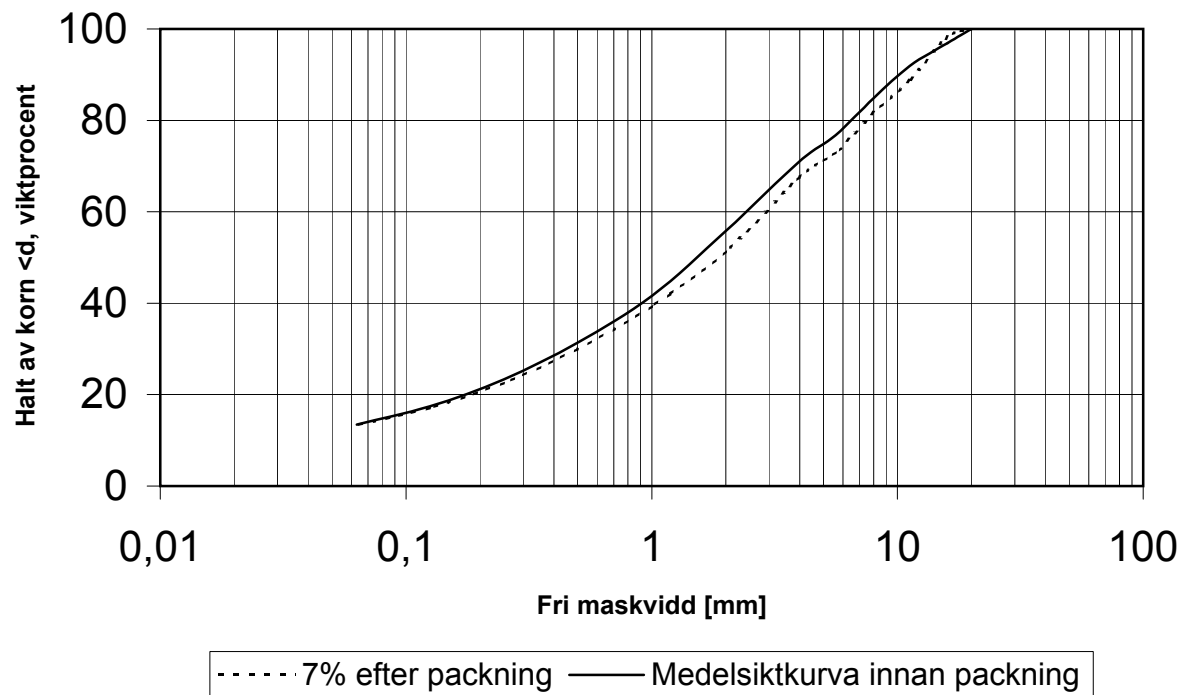
Jämförelse 5% N1



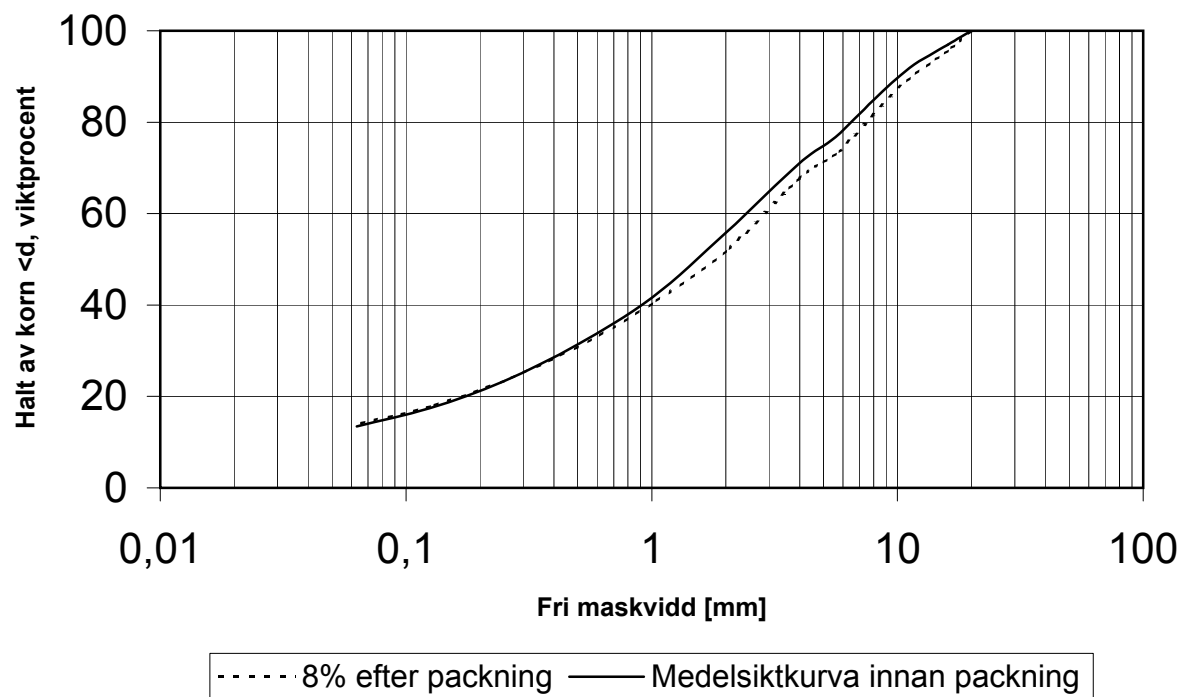
Jämförelse 6% N1



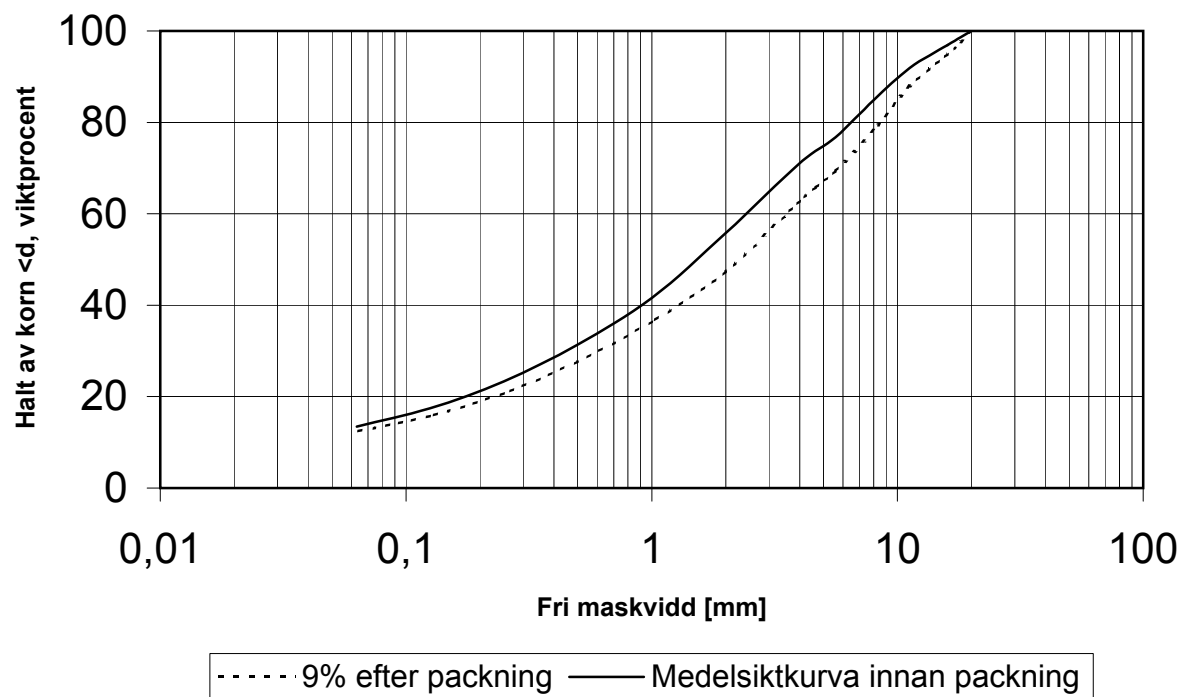
Jämförelse 7% N1



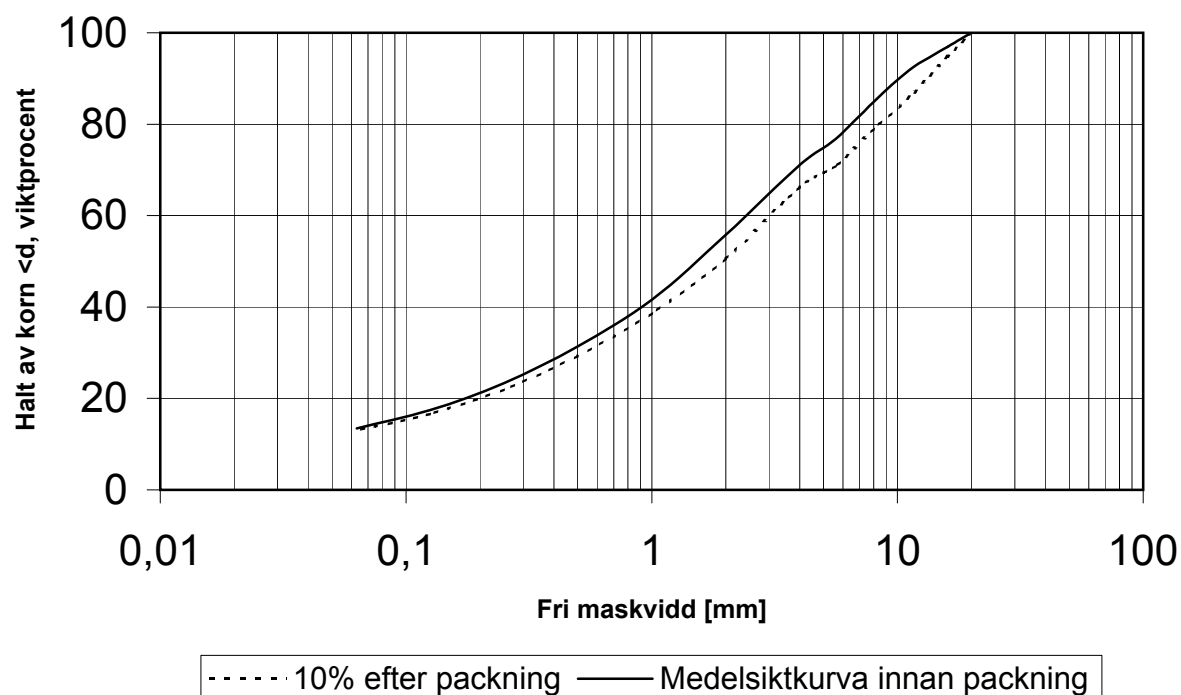
Jämförelse 8% N1



Jämförelse 9% N1



Jämförelse 10% N1



Vattenmättnadshalten

$$Sr = \frac{(w \cdot p \cdot ps / pw)}{(ps(w+1) - p)}$$

w=vattenkvot

p=skrymdensitet(t/m3)

ps=kompaktdensitet(t/m3)

pw=vattnets densitet(t/m3)

Vid antagande att vattenmättnadsgraden är 100% och att vattnets densitet är 1ton/m3

$$pD = ps / (ps \cdot w + 1)$$

pD=Torrdensiteten ps= 2,65 t/m3

	pD	w	
4%	2,396022	0,04	4
5%	2,339956	0,05	5
6%	2,286454	0,06	6
7%	2,235344	0,07	7
8%	2,186469	0,08	8
9%	2,139685	0,09	9
10%	2,094862	0,1	10
11%	2,051878	0,11	11
12%	2,010622	0,12	12
13%	1,970993	0,13	13
14%	1,932896	0,14	14
15%	1,896243	0,15	15

Appendix D Packningsresultat vid triaxialförsök

	Behållares vikt [g]	Vikt innan torkning [g]	Vikt efter torkning [g]	Torrsvikt jord [g]	Cylinderns volym [cm ³]	Torrdensitet [t/m ³]	Vattenhalt [%]
M1 6%							
10kPa	144	593,6	567,4	423,4	196,35	2,16	6,19
50kPa	240,9	691,6	663,6	422,7	196,35	2,15	6,62
100kPa	240,9	689,1	658,7	417,8	196,35	2,13	7,28
M1 4%							
10kPa	240,7	683,2	665,2	424,5	196,35	2,16	4,24
50kPa	240,8	677,9	660	419,2	196,35	2,13	4,27
100kPa	200,5	639,3	621,1	420,6	196,35	2,14	4,33
M1 8%							
10kPa	241,2	701,8	665,6	424,4	196,35	2,16	8,53
50kPa	200,4	651,5	618,5	418,1	196,35	2,13	7,89
100kPa	201	658,2	621,9	420,9	196,35	2,14	8,62
M1 6%.2							
10kPa	142	568,2	543,6	401,6	196,35	2,05	6,13
50kPa	142,4	570,3	545,7	403,3	196,35	2,05	6,10
100kPa	135,9	563,1	538,2	402,3	196,35	2,05	6,19