

KTH Architecture and the Built Environment

Utvärdering av kalkstens egenskaper med laboratorie- och fältmetoder

Examensarbete

Haval Rashid Ahmad Serafettin Tüdes

Division of Highway and Railway Engineering

Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm

> TRITA-VBT 11:12 ISSN 1650-867X ISRN KTH/VBT-11/12-SE Stockholm 2011

Utvärdering av kalkstens egenskaper med laboratorie- och fältmetoder

Haval Rashid Ahmad Serafettin Tüdes *Graduate Student* Infrastructure Engineering Division of Highway and Railway Engineering School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology (KTH) SE- 100 44 Stockholm Havala@kth.se Tudes@kth.se

ABSTRACT: A pavement construction designed to cope with the different type of traffic loads; it is exposed to and at the same time it can resist the effect of the climate. A road structure consists of sub- and superstructure which is divided by a boundary known as terrace. During the construction of unbound layers (base course and sub-base course) in the superstructure, it is always ensured that the material meet the requirements for bearing capacity and the degree of compaction. These parameters are controlled by various laboratory tests and control methods. To obtain increased knowledge of the material and improve the quality of the compaction in the field, it is necessary to perform laboratory tests in order to determine material properties.

A base course material 0/32 mm limestone from Gotland (Hejdeby) was investigated in this study. To determine properties of the material various laboratory tests such as proctor compaction test, Micro-Deval, Los Angeles, and grain distribution curve are conducted. To investigate how grain size distribution affects technical properties of the material, the 0/32 mm material was modified with two different samples; grain size distribution of 2/32 mm excluding superior material content, and 0+/32 mm with enhanced superior material content. The purpose of this study was to examine changes in material behavior during proctor compaction. Two aspects of changes in material behavior were emphasized in this study; the optimal water content and maximum dry density, as well as changes of both. As a reference for the limestone features, a traditional 0/32 mm tonalite material (granite) from Vällstaverket was used relating to proctor investigation. Material's resistance to abrasion and fragmentation was investigated by two methods: Micro-Deval and Los Angeles. The results were compared with other rock materials.

Furthermore the bearing capacity of the material was verified by examination of the Young's modulus and degree of compaction, as well as properties of water content and dry density, at three trial areas on Gotland. This is performed with various methods such as static plate loading test, light weight deflectometer, density gauge/SDG200, and water/sand volume meter measurement test. By comparing results from different methods of measurement, it may indicate a relationship between these.

Test area 3 consists of two smaller test areas which have different water content. The bearing capacity (Young's modulus) and the degree of compaction were measured after each roller passage. Different relationships were obtained between the amount of roller overpass, with Young's modulus of material; as well as degree of compaction.

It was found in this study that limestone from Gotland (Hejdeby) maintain its position as construction material for the unbound layers of the road. The result from static plate load which indicated high E_{V2} values (Young's modulus) was obtained from the field, and it suggests that a fine bearing capacity can be achieved in the use of limestone.

KEY WORDS: Limestone, road constructure, unbound base-course, static plate loading, water content, degree of compaction and Young's modulus.

SAMMANFATTNING

En vägkonstruktion dimensioneras på ett sätt så att den kan klara av de påkänningar från trafiken den utsätts för och samtidigt ska den kunna motstå klimatpåverkan. En vägkropp delas in i delarna under- och överbyggnad, gränsen mellan de kallas för terrassyta. Vid nybyggnation av de nedre obundna lagren (bär- och förstärknings lager) i överbyggnaden, säkerställs alltid att materialet klarar kraven för bärighet och packningsgrad. Dessa kontrolleras med ett antal laboratorieförsök och kotrollmetoder. För att få en ökad kunskap om materialet innan det packas i fält, utförs laboratorietester för bestämning av materialets egenskaper.

Ett bärlagermaterial 0/32 mm kalksten från Gotland (Hejdeby) har undersökts i denna studie. För bestämning av materialets egenskaper utförs laboratorietesterna: proctorpackning, Micro-Deval, Los Angeles och kornstorleksfördelningskurva. För att studera hur kornstorleksfördelningen påverkar materialets tekniska egenskaper har 0/32 mm materialet modifierats till ytterligare två andra prover som har kornstorleksfördelningen 2/32 mm utan finmaterialhalt respektive 0+/32 mm med förhöjd finmaterialhalt. Avsikten var att studera materialets beteende under proctorpackning, materialets optimala vattenkvot samt hur den maximala torrdensiteten ändras. Som referens för kalkstenens egenskaper har ett traditionellt 0/32 mm tonalistiskt material från Vällstaverket testats vid proctorundersökningen. Materialets nötning och motstånd mot fragmentering undersöks med Micro-Deval och Los Angeles och resultaten jämförs med andra bergmaterial.

Vidare kontrollerades materialets bärighet genom att undersöka deformationsmodul (E-modul), packningsgrad samt egenskaper som vattenkvot, torrdensitet vid tre försöksytor på Gotland . Detta utförs med ett antal metoder statisk plattbelastning, som lätt fallvikt. densitetsmätare/SDG200, samt vatten- och sandvolymmeterprov. Genom att jämföra mätresultaten från olika metoder kan dessa metoder verifieras och samband erhållas.

På försöksyta 3 uppmättes bärigheten (deformationsmodul) och packningsgrad av två testytor med olika vattenkvoter efter varje vältöverfart med de olika mätmetoderna. En relation erhålls mellan antal vältöverfarter och materialets deformationsmodul och packningsgrad.

I studien konstaterades det att kalksten från Gotland (Hejdeby) hävdar sig väl som ett byggmaterial för vägens obundna lager. De höga E_{V2} -värdena från

statisk plattbelastning som erhållits i fält tyder på att god bärighet kan uppnås vid användandet av kalksten.

Nyckelord: Kalksten, vägkropp, obundna bärlager, statisk plattbelastning, vattenkvot, packningsgrad och deformationsmodul.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	AB	STRAC	Г:i
	SAMMANFATTNING iii		
]	INNEHÅLLSFÖRTECKNINGv		
]	BILAGEFÖRTECKNINGix		
]	FÖ	RORD	xi
]	BE	TECKN	INGAR xiii
]	FÖ	RKORT	NINGARxv
	1	Inledni	ng1
		1.1	Bakgrund1
		1.2	Syfte2
		1.3	Metod
		1.4	Avgränsningar
-	2	Litterat	urstudie5
		2.1	Vägkonstruktion
		2.1.1	Slitlager
		2.1.2	2 Bindlager
		2.1.3	Bundna bärlager
		2.1.4	Obundna bärlager
		2.1.5	5 Förstärkningslager7
		2.1.6	5 Skyddslager7
		2.1.7	7 Påkänningar i vägöverbyggnad7
		2.2	Obundna granulära material
		2.2.1	Fasta beståndsdelar
		2.2.2	2 Porvatten
		2.2.3	B Porgas
		2.2.4	Begrepp och definitioner
		2.2.5	5 Friktionsjord och kohesionsjord10
		2.2.6	5 Deformationsegenskaper av obundna granulära material10
		2.2.7	7 Faktorer som påverkar permanenta deformationer12

	2.3	Packning 1	6
	2.3.1	Packningsgrad1	7
	2.3.2	Packningsmetoder 1	7
3	Metod.	2	1
	3.1	Laboratoriemetoder	2
	3.1.1	Kornstorleksfördelning genom siktningsanalys2	2
	3.1.2	2 Proctorpackning	3
	3.1.3	Los Angeles2	5
	3.1.4	Micro-Deval	7
	3.2	Kontrollmetoder	8
	3.2.1	Statisk plattbelastning (SPLT)2	8
	3.2.2	2 Lätt fallvikt (LWD)	1
	3.2.3	B Densitetmätare/SDG200	3
	3.2.4	Vatten- och sandvolymmeterprov	4
	3.2.5	5 Ytvågsseismik	5
	3.3	Projektbeskrivning	7
	3.3.1	Försöksyta 1	7
	3.3.2	2 Försöksyta 2	8
	3.3.3	Försöksyta 3	9
4	Resulta	t av laboratoriemetoder4	1
	4.1	Konstorleksfördelning	1
	4.2	Proctorpackning	-2
	4.3	Los Angeles	.7
	4.4	Micro-Deval	8
5	Resulta	t av kontrollmetoder vid fältförsök5	1
	5.1	Försöksyta 15	1
	5.2	Försöksyta 2	3
	5.3	Försöksyta 3	6
6	Utvärde	ering och diskussion av resultat5	9
7	Slutsats	er8	3
8	Rekom	mendationer	5
9	Referer	1ser8	8
Bila	iga 1. B	eräkningar för proctorkurvor9	1

Bilaga 2. Kornstorleksfördelningskurvor för tre olika försök	95
Bilaga 3. Lätt fallvikt	
Bilaga 4. Vatten- och sandvolymmeterprov	129
Bilaga 5. Densitetsmätningar med SDG200	131
Bilaga 6. Skiss över cirkulationsplatsen för del A, B och C	135
Bilaga 7. Bärighetskrav för bärlager	
Bilaga 8. Specifikationer för vält SD70D	139
Bilaga 9. Ytvågsseismiska mätningar	140

BILAGEFÖRTECKNING

Bilaga 1. Beräkningar för proctorkurvor	91
Bilaga 2. Kornstorleksfördelningskurvor för tre olika försök	95
Bilaga 3. Lätt fallvikt	98
Bilaga 4. Vatten- och sandvolymmeterprov	129
Bilaga 5. Densitetsmätningar med SDG200	131
Bilaga 6. Skiss över cirkulationsplatsen för del A, B och C	135
Bilaga 7. Bärighetskrav för bärlager	138
Bilaga 8. Specifikationer för vält SD70D	139
Bilaga 9. Ytvågsseismiska mätningar	140

FÖRORD

Detta examensarbete består av två delar (laboratorietester respektive fältmätning) och har genomförts för Väg- och banteknik, institutionen för Transportvetenskap vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Examensarbetet som har handlat kring kalksten i obundna bärlager har utförts i samarbete med Skanska Sverige AB.

Vi vill rikta ett varmt tack till vår handledare Roger Nilson på Skanska Teknik, för all hjälp och stöd under hela arbetets gång. Vi vill också tacka vår examinator Professor Björn Birgisson och våra handledare Michael T. Behn samt Denis Jelagin vid avdelning för Väg- och banteknik. Vi vill även tacka Lars Stenlid som hjälpt till med laboratorietesterna i Vällstaverket och Jan Englund som kommit med goda förslag. Vi riktar även ett stort tack till Skanska väg – och anläggning på Gotland som bidrog med att vår vistelse blev både lärorik och minnesvärd. Slutligen vill vi tacka alla som har kommit med goda synpunkter och engagerat sig.

Stockholm, September 2011 Haval Rashid Ahmad Serafettin Tüdes

BETECKNINGAR

ρ	Skrymdensitet
т	Massa
v	Volym
$ ho_s$	Kompaktdensitet
m_s	Fasta substans massa
v_s	Fasta substans volym
$ ho_k$	Korndensitet
m_k	Kornens massa
v_k	Kornens volym
$ ho_d$	Torrdensitet
v	Fasta substans volym
W	Vattenkvot
m_w	Vattnets massa
S _r	Vattenmättnadsgrad
v_w	Vattnets volym
v_p	Porvolym
n	Porositet
σ_{x}	Horisontellkraft
σ_y	Vertikalkraft
τ_{xy}	Skjuvspänning
Ν	Belastningscykel
σ_0'	Effektivspänning
σ_0	In Situ-spänning i materialet
u	Portryck
ρ_{dmax}	Maximal torrdensitet
R _d	Packningsgrad
q	Statisk linjelast
Q	Kraften från vältvals
l	Valsens bredd

σ	Vertikaltryck som välten inverkar mot marken
D	Valsdiameter
k_1	Koefficient beroende på underlagrets egenskaper
т	Fallviktens massa
Н	Fallviktens höjd
Ev	Deformationsmodul
E _{v1}	Deformationsmodul vid första belastningen
E _{v2}	Deformationsmodul vid andra belastningen
S	Sättning (SPLT)
σ_0	Normalspänning under plattan (SPLT)
a ₀ , a ₂ , a ₃	Konstanter i andragradspolynomet (SPLT)
r	Belastningsplattans radie (SPLT)
σ_{1max}	Maximal normalspänning
E_{vd}	Dynamisk deformationsmodul (LWD)
a	Lastplatans radie (LWD)
d_0	Deformation i belastningscentrum (LWD)
σ_0	Spänning under plattan (LWD)
f	Spänningsfördelning
V	Poisson`s tal
Ε	Skjuvmodul
G	Kompressionsmodul
R	Determinantkonstanten
E _{max}	Deformationsmodul vid seismiska mätningar

FÖRKORTNINGAR

ATB VÄG	-Allmän teknisk beskrivning
SS-EN1097-1	-Svensk standard för Micro-Deval metoden
SS-EN1097-2	-Svensk standard för Los Angeles metoden
LA-värde	-Los Angeles värde
VVTBT	-Vägverkets teknisk beskrivning för obundna lager
EIS	-Impedansspektroskopi
EN 132876-2	-Europeisk standard för proctorpackning
LWD	-Light Weight Deflectometer
SPLT	-Statisk plattbelastning
SDG	-Soil Density Gauge
RLT	-Repeated Load Triaxial

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Infrastrukturen har stor betydelse för ett lands utveckling, en god infrastruktur bidrar till kostnadseffektiva och säkra transporter. Eftersom vägar utgör stor del av infrastrukturen har den stor påverkan på landets ekonomi.

I dagens samhälle byggs vägar och gator för att transportera gods och människor mellan olika platser på ett säkert och miljövänligt sätt. För att en väg skall fylla sin funktion, måste den dimensioneras för de trafik- och klimatbelastningar den utsätts för. Vägar byggs med olika antal lager och material beroende på vilket ändamål de kommer att användas för. Ett av de viktigaste lagren i en vägkonstruktion är det obundna bärlagret.

Obundna bärlager kan byggas av olika obundna granulära material som naturgrus, krossat stenmaterial, slagg etc. Eftersom naturgrus är en begränsad naturresurs som har stor betydelse för vattenförsörjning, används krossat stenmaterial och alternativa material som uppfyller samma krav. Vid byggnation av vägar i Sverige används ofta bergarter med hög hållfasthet som magmatiska och metamorfa bergarter t.ex. granit, och sedimentära bergarter. Sedimentära bergarter används främst på Gotland. En viktig faktor som det skall tas hänsyn till i detta sammanhang är att det ska användas tillgängligt material i syfte att minska kostnaderna samt miljöbelastningen som uppkommer från materialtransport. Där det inte finns bergarter med hög hållfasthet måste det byggas med de material som finns tillgängliga, t.ex. på Gotland byggs vägar med kalksten trots att det har en lägre hållfasthet.

Vägar uppbyggda med kalksten har ibland uppvisat skador efter några års trafikering (Skanska teknik, 2011). I detta examensarbete undersöks kalkstenens tekniska egenskaper med hjälp av laboratorietester respektive fältundersökningar. Detta för att undersöka hur materialet skall packas och hanteras för att ta vara på materialets egenskaper samt förbättra kvalitet.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att:

- Utvärdera kalksten packningsegenskaper med olika laboratorietester.
- Utvärdera bärlagrets bärighet och packningsgrad med olika kontrollmetoder i fält.
- Ge rekommendationer för packning och hantering av materialet.
- Ge förslag till utförande av fältmätningar.
- Öka kunskapen om kalksten i vägöverbyggnad

1.3 Metod

Följande metoder användes för att bestämma kalkstenens tekniska egenskaper i laboratorium:

- Proctorpackning (EN 13286–2:2 004: E)
- Kornstorleksfördelningskurva (SS-EN 933-1, 2005)
- Los Angeles (Svensk standard SS-EN 1097-2, 2003)
- Micro-Deval (Svensk standard SS-EN 1097-1, 2004)

De kontrollmetoder som användes för bestämning av materialets bärighet och packningsgrad är följande:

- Statisk plattbelastning (SPLT)
- Lätt fallvikt (Dynatest, 3031 LWD)
- Densitetsmätare (SDG200)
- Vatten- och sandvolymmeterprov
- Ytvågsseismik

1.4 Avgränsningar

- Endast kalksten från Gotland (Hejdeby) med kornstorleken 0/32 mm undersöktes. Undersökning av annan typ av kalksten och olika gradering skulle ge ett annat resultat.
- Mätningarna genomfördes under varma och torra väderförhållanden, vilket gör att effekter av varierad temperatur och nederbörd inte undersökts.
- Vid mätningar med lätta fallvikten användes belastningsplatta med diameter 300 mm och fallvikt 10 kg, vilket påverkar djupverkan av utrustningen vid mätningarna.
- Mätningarna med seismik utfördes endast på testyta 2. Detta kan begränsa möjligheten att jämföra mätresultatet med andra metoder.
- Vatten- och sandvolymeterprov metoden utfördes med sand.

2 Litteraturstudie

2.1 Vägkonstruktion

En vägkonstruktion måste kunna klara påkänningar från trafiken, den ska även kunna motstå klimatpåverkan. Vid dimensionering av en vägkonstruktion skall det därför tas hänsyn till detta.

En vägkropp är byggd i över- och underbyggnad. Överbyggnaden består av olika lager där varje lager har funktionen att ta upp och fördela trafikens belastning. Dessa lager skall reducera spänningarna då en deformation av underlagret inte är uppkomma.

En vägöverbyggnad består av följande lager:

- 1. Slitlager
- 2. Bindlager
- 3. Bundna bärlager
- 4. Obundna bärlager
- 5. Förstärkningslager
- 6. Packad undergrund

En principiell uppbyggnad av överbyggnadslager framgår av figur 2-1.



Figur 2-1 Lagerföljd i en flexibel vägöverbyggnad.

2.1.1 Slitlager

Slitlagret som är det översta lagret och utsätts för påfrestningar under hela dess livslängd. Ur ett ekonomiskt och miljövänligt perspektiv eftersträvas maximal livslängd, därför är materialet som används för slitlagret en viktig faktor för detta. Slitlagret består av stenmaterial och bindningsmedel (bitumen). En viktig egenskap är att lagret inte ska släppa genom vatten samtidigt som den ska ha hög friktion. Andra önskvärda egenskaper är att den ska ha bra ljusförhållanden, god ytvattenavrinning, samt låga buller- och dammnivåer (Asfaltboken, 2002).

2.1.2 Bindlager

Ibland kan översta delen av det bundna bärlagret utformas som ett bindlager. Bindlager används för avjämning av underliggande bärlager. Detta leder till att slitlagret blir jämnt, samt att lasten fördelas på underliggande lager. Bindlager består av grov graderad asfaltbetong, finmaterial eller bärlagergrus, detta lager är dock inte alltid förekommande (Asfaltboken, 2002).

2.1.3 Bundna bärlager

Det bundna bärlagret är uppbyggt av stenmaterial och bitumen. Lagrets funktion är att uppta och fördela lasten så att underliggande lager inte utsätts för stora krafter som kan leda till deformationer (Asfaltboken, 2002).

2.1.4 Obundna bärlager

Detta lager uppbyggs av obundna granulära material. Lagrets funktion är att fördela och reducera lasterna från trafiken, så att de underliggande lagren och undergrundet inte deformeras. Packningen är mycket viktig då materialets uppförande beror dels av packningsmetod och dels av packningsgenomförande. Precis som de ovanliggande lagren bör lasten fördelas eftersom det är viktigt i detta lager att undvika deformationer som i sin tur kan leda till spårbildning. Härmed är lastfördelningen beroende av materialets kvalitet och lagrets tjocklek. Det obundna bärlagret ska även kunna dränera bort vatten både under och efter byggtiden så att inget vatten samlas i vägkonstruktionen, eftersom vatten minskar bärigheten.

Materialet i detta lager skall vara frostbeständigt så att inga tjälskador uppstår. Lagrets ingående material ska uppfylla funktionskraven vad gäller hållfasthetsegenskaper, kornstorleksfördelning och packning. Materialet ska därtill inte nötas för mycket under sin livslängd eftersom nednötning förändrar materialets kornkurva och friktionen mellan stenpartiklarna. Dessutom ska materialet vara välgraderat så att det blir stabilt och tätt, och samtidigt väldränerat och ha en hög friktion mellan partiklarna (Hannson, 2003).

2.1.5 Förstärkningslager

Förstärkningslager används då bärlagret inte ensamt kan reducera spänningarna från trafiken på undergrunden. Andra funktioner är att tillsammans med övriga lagren fördela trafiklaster till undergrunden. Förstärkningslager byggs upp av krossat jord- eller bergmaterial. Det kan även användas material med lägre kvalitet än de överliggande lagren då påkänningarna är lägre på detta lager (Asfaltboken, 2002).

2.1.6 Skyddslager

Detta lager ska motverka tjällyftning i områden som har hög tjälfarlighet och köldmängd. En annan funktion är också att försöka undvika att få det finkorniga materialet att trängas upp i förstärkningslagret. Detta lager ersätts ofta med ytterligare förstärkningslager och fiberduk (Asfaltboken, 2002).

2.1.7 Påkänningar i vägöverbyggnad

När en vägkropp utsätts för trafiklaster uppkommer vertikala och horisontella spänningar samt skjuvspänningar. Under fordonspassage ändras storlek och riktning av horisontella, vertikala och skjuvspänningarna i obundna granulära material med tiden. På grund av detta uppstår en rotation av huvudspänningarna vid hjullast, detta illustreras i figur 2-2 (Werkmeister, 2003).



Figur 2-2 Visar rotationen av huvudspänningar vid påverkan av hjulbelastningar, samt förhållande mellan huvudspänningar och skjuvspänningar (Werkmeister, 2003).

Ovanstående spänningsbeskrivning av rörlig hjullast är svår att ta hänsyn till. I de vanliga dimensioneringsprogrammen samt laboratorietester och fältundersökningar görs därför förenklingar.

2.2 Obundna granulära material

Obundna granulära material består av korn, vatten och gas som skildras i figur 2-3. Kornen skapar tillsammans ett lastbärande kornskelett vid belastning. Hålrummen, s.k. porer, mellan kornen är fyllda med antingen vatten (porvatten), gas (porgas) eller en kombination av dessa (Sällfors, 2001).



Figur 2-3 Uppbyggnad av ett jordmaterial (Forssblad, 2000).

2.2.1 Fasta beståndsdelar

Egenskaper som hållfasthet, vittringsgrad och ytegenskaper hos olika mineraler har stor inverkan på de obundna granulära materialens tekniska egenskaper. Den strukturella uppbyggnaden hos materialets kornskelett, beror på relationen mellan hålrummen, fasta partiklar, hur kornen är fördelade och hur materialet har utsatts för olika belastningar under dess livslängd (Sällfors, 2001).

2.2.2 Porvatten

Vatten som samlas mellan de fasta beståndsdelarna innehåller en mindre del suspenderat mineral, lösta salter (eller joner), gas samt organiska ämnen. En ändring av salthalten kan påverka materialets egenskaper (Sällfors, 2001).

2.2.3 Porgas

De mineralkorn som inte är fyllda med vatten innehåller gas (luft). Gasen kan antingen finnas i form av gasbubblor eller som löst i porvatten (Sällfors, 2001).

2.2.4 Begrepp och definitioner

Ett materials geotekniska egenskaper är beroende av mängdförhållandet mellan fast substans, porvatten och porgas. Detta illustreras i figur 2-3. För att om få en kännedom hur ett material är uppbyggt utförs laboratorieundersökningar och bestämning av en rad olika storheter som skrymdensitet, kompaktdensitet, korndensitet, torrdensitet, vattenkvot, vattenmättnadsgrad och porositet. Dessa storheter beskrivs i ekvationerna 2.1-2.7 (Sällfors, 2001).

Densitet

Skrymdensitet ρ - Beräknas som förhållande mellan materialets massa *m* och volym *v*

$$\rho = \frac{m}{v} \qquad [kg/m^3] \qquad [2.1]$$

Kompaktdensitet ρ_s - Kompaktdensitet är den fasta substansens densitet och är kvoten mellan fasta substansens massa m_s och volym v_s .

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} \qquad [kg/m^3] \qquad [2.2]$$

Korndensitet ρ_k - Beskriver förhållande mellan ingående kornens massa m_k och dess volym v_k

$$\rho_k = \frac{m_k}{v_k} \qquad [kg/m^3] \qquad [2.3]$$

Torrdensitet ρ_d - Torrdensiteten är förhållande mellan fasta substansens massa, m_s och dess volym, v.

$$\rho_d = \frac{m_s}{v} \qquad [kg/m^3] \qquad [2.4]$$

Porvatten

Vattenkvot w-Naturliga vattenkvoten beskriver kvoten mellan vattnets massa, m_w och fasta substansens massa, m_s

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \qquad [\%] \qquad [2.5]$$

Vattenmättnadsgrad s_r - Vattenmättnadsgrad anger hur stor del av porvolymen som är fylld med vatten.

$$s_r = \frac{v_w}{v_p} \times 100 \qquad [\%] \qquad [2.6]$$

Porvolym

Porositet n - Beskriver porvolymens andel av totala volymen.

$$n = \frac{v_p}{v} \tag{2.7}$$

2.2.5 Friktionsjord och kohesionsjord

För att skilja mellan friktionsjord och kohesionsjord används begreppet hållfasthet. Grovkorniga jordarter benämns som friktionsjordar (sand, grus, block och stenmaterial). Skjuvhållfastheten byggs upp av den huvudsakliga friktionen mellan partiklarna som ligger i direkt kontakt med varandra. Dessa jordar saknar draghållfasthet men har däremot hög permeabilitet vilket innebär stor vattengenomsläplighet (Hansbo, 1975).

Med kohesionsjord menas finkorniga jordarter som lera samt de organiska jordarterna dy, torv och gyttja. Skjuvhållfastheten uppstår av kohesionen vid snabba belastningar. Dessa jordar har ganska låg draghållfasthet och mycket låg permeabilitet.

Mellanjord innefattar silt och de blandkorniga jordarterna (finjordshalt 10-40%). Skjuvhållfastheten byggs upp av både friktionen mellan kornen och kohesionen (Hansbo, 1975).

2.2.6 Deformationsegenskaper av obundna granulära material

Deformation av obundna granulära material beror på spänningen som materialet utsätts för. Figuren 2-4 belyser ett typiskt beteende för ett obundet granulärt material under spänning. Då spänningarna ökas leder detta till ett minskat motstånd mot deformationer (Werkmeister, 2003).



Figur 2-4 *Spänning -töjning beteende av ett obundet granulärt material under last (Werkmeister, 2003).*

Vid låga spänningsnivåer ökar materialets styvhet när lasten ökar (strain hardening). Spänningar på denna nivå packar materialet mer och rörelsen hos partiklarna i materialet minskar avsevärt. Efter en viss töjningsnivå ger spänningarna en minskad styvhet (strain softening). Efter detta skede blir det brott (Werkmeister, 2003).

Obundna granulära material utsätts för ett stort antal belastningscykler under dess livstid. På grund av cyklerna skapas deformationer på resilienta (elastiska) och permanenta (plastiska) sätt. De resilienta deformationernas effekt försvinner efter att lasten avlägsnats medan de permanenta deformationerna kvarstår även efter lasten avlägsnats. I figur 2 -5 illustreras en typisk belastningscykel (Werkmeister, 2003).



Figur 2-5 Illustrerar en hysteresisloop för ett visko-elastisk permanent beteende (Werkmeister, 2003).

Arean under hysteresisloopet är deformationsarbetet per volymenhet. Stor del av arbetets energi förvandlas till värme och endast en liten del av energin som frigörs leder till deformationer. De elastiska deformationerna uppstår på grund av att kornen i det obundna materialet har deformerats. De permanenta deformationerna uppstår i och med att kornen har krossats eller intagit nya positioner i materialet då dessa har glidit mot varandra (Werkmeister, 2003).

2.2.7 Faktorer som påverkar permanenta deformationer

När ett material belastas uppkommer permanenta deformationer. Dessa deformationer är beroende av materialet som används. I detta avsnitt behandlas faktorer som påverkar materialets permanenta deformationer.

Antal belastningscykler

Det är dock inte bara belastningscykler som påverkar permanenta deformationer, utan hänsyn ska även tas till spänningsnivåer under relaterade deformationer. Om intensiteten av belastningscyklerna inte är för hög, kommer permanenta töjningar vid en viss spänningsnivå att avta och närma sig asymptotiskt till ett gränsvärde med ökande antal belastningscykler. De permanenta deformationerna närmar sig mot noll för varje spänningscykel se Figur 2-6.a. En ökning av belastningscykler efter gränsvärdet, kan det leda till ytterligare permanenta deformationer, se figur 2-6b.



Figur 2-6 (a) visar hur de permanenta deformationer stabiliserar sig, (b) visar ökningen av permanenta deformationerna efter ökat antal belastningscykler (Werkmeister, 2003).

Inverkan av vattenkvot

I praktiken finns det alltid vatten i obundna granulära material även om de är dränerade. Denna vattenmängd i granulära material beskrivs med vattenkvot. En viss mängd fukt har i regel en positiv effekt på hållfasthets och deformationsegenskaper i obundna granulära material. En kontinuerlig ökning av vattenhalt kan leda till utveckling av positivt tryck i porerna under upprepade belastningar. Vid höga porvattentryck minskar effektivspänningarna, σ'_0 , vilket resulterar i minskning av materialets deformationsmotstånd. Negativt portryck, *u*, ökar materialets motståndskraft mot deformationer (Werkmeister, 2003).

$\sigma_0 = \sigma_0 - u$	[kPa]	[2.8]
0 0		

σ_0 = effektivspänning	[kPa]
-------------------------------	-------

σ_0 = In Situ-spänning i materialet	[kPa]
--	-------

u = portryck [kPa]

Ett försök av Werkmeister har utförts för att visa vattnets effekt på materialens motståndskraft mot deformationer. I figur 2-7 beskrivs två prover som har samma vattenhalt och belastas med samma spänningar. Det ena provet är dränerat medan det andra är odränerat. I det odränerade provet uppstår betydligt mer permanenta deformationer samtidigt som effektivspänningarna minskar på grund av ökningen av portrycket.

En annan studie som utfördes av Holubec konstaterades att små ökningar av vattenkvoten ger större permanenta deformationer. Vid ett triaxelförsök ökades vattenkvoten från 3,1 % till 5,7 %. Under 1000 belastningscykler steg de totala permanenta deformationerna med en ökning på 300 % (Werkmeister, 2003).



Figur 2-7 Deformation vid dränerad respektive odränerat materialprov. (Werkmeister, 2003)

Spänningshistoria

Den permanenta deformationen av obundna granulära material är direkt kopplat till spänningshistoria. Om obundna granulära material initialt belastats med låga laster, erhåller materialet en s.k. spänningshistoria vilket minskar effekten av eventuella högre belastningar. Material som packas i fält får en spänningshistoria som minskar effekten av framtida deformationer som uppkommer av högre laster. Figur 2-8 visar effekten av spänningshistoria på permanenta deformationer hos granulära material. Permanenta deformationer till följd av en successiv ökning av spänningsnivån är betydligt mindre än belastningen som uppstår, när den högsta spännigen tillämpas som en enda puls (Werkmeister 2003).



Figur 2-8 Illustrerar effekten av spänningshistoria hos permanenta deformationer (Werkmeister, 2003).

Densitet

Densitet är en av de viktiga faktorerna som påverkar permanenta deformationer i obundna granulära material. Motståndet mot permanenta deformationer kan förbättras genom ökning av densiteten. För obundna granulära material, kan effekten av densitet beskrivas som packningsgrad (Lekarp, 1998).

Barksdale studerade effekten av densiteten på permanenta deformationer hos granulära material. Detta gjordes genom att använda RLT (Repeated Load Triaxial) test med repetitiva belastningar och under konstant tryck. Resultat blev att den permanenta axiella töjningen blev 185 % större när materialen var packad vid 95 % istället för 100 % av maximala kompakta densiteten, se figur 2-9.



Figur 2-9 Densitetens effekt på permanent töjning (Barksdale, 1972).

Spänningsnivå

Storleken av permanenta deformationer påverkas stort av spänningsnivån. Deformationen ökar när deviatorspänningen, σ_1 - σ_3 , ökar vilket beror på minskning av huvudspänningen, σ_3 (Werkmeister 2003).

2.3 Packning

Packning är en metod som används för att förstärka samt förbättra egenskaperna hos jord- och bergmaterial. Packning är en viktig del i byggprocessen och definieras som metod att mekaniskt öka jordens täthet. Packning går ut på att genom tillförsel av yttre krafter öka ett materials densitet i syfte att förbättra dess bärighet samt minska vattengenomsläpligheten och risken för skadliga eftersättningar.

Vid packning sker två saker, en omlagring av mineralkornen och en krossning av kornens skarpa hörn och kanter. Genom omlagringar kommer luftporsvolymen att minska och vatten kan pressas ut om materialet är fridränerat, vilket innebär att materialet får en tätare lagerstruktur. Genom krossningen kan stora kontaktytor skapas, vilket leder till att kontaktrycket minskar mellan kornen. Båda fallen leder till en volymminskning av materialet (Hansbo, 1990).

Vid uppbyggnad av obundna vägöverbyggnadslager som bärlager och förstärkningslager, har packningen avgörande betydelse för den färdigställda vägkonstruktionens bärighet, livslängd, och underhållskostnader. I vilken omfattning bärigheten ökar för dessa material beror på materialets uppbyggnad, packningsmetod, vattenkvot och underlagrets fasthet. Bärigheten för en packad fyllning med obundna granulära material är 5-10 gånger större än för fyllningen i icke packat tillstånd.

Fridränerade friktionsjordar som exempelvis sprängsten, krossmaterial, grus och sand är lättare att packa, därför kan önskade packningsresultat uppnås med hög bärighet. Även i regnig väderlek kan materialen packas jämfört med kohesionsjordar som kräver mycket packningsarbete samt att packningen måste ske i mindre lagertjocklekar (Forssblad 2000).

2.3.1 Packningsgrad

För att kontrollera packningen på obundna granulära material, används begreppet "packningsgrad" angiven i procent, se sambandet nedan i ekvation 2.9. Packningsgraden anger förhållandet mellan torrdensiteten, ρ_d , som erhålls i fält och den maximala torrdensiteten, ρ_{dmax} , bestämd vid tung laboratorieinstampning som utgångspunkt. För obundna bärlager och förstärkningslager rekommenderas internationellt att minsta packningsgrad bör ligga 95 % respektive 90 % vilket även är Trafikverkets krav.

$$R_D = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100$$
 [%] [2.9]

2.3.2 Packningsmetoder

Packning av obundna granulära material sker med tre olika metoder, statiskt tryck, stöt och vibrationspackning (dynamisk packning). Metoderna illustreras i figur 2-10.



Figur 2-10 Olika metoder för packning av jord- och stenfyllningar (Forssblad, 2000).

Statiskt tryck

Marken utsätts för statiskt tryck och pressar ned underliggande partiklar, se figur 2-10. Statiskt tryck ges av olika typer av packningsmaskiner som till exempel statiska slätvältar. Packningsverkan bestäms med den statiska linjelasten q vilket valsen utövar mot markytan. Trycket som slätvältar utövar mot marken är beroende av valsdiameter, materialets styvhet, och valsens nedsjunkning. Vid en ökning av valsdiametern minskar trycket mot marken och ju mjukare material är desto större kontaktyta mellan valsen och marken. Boussinesq's teorier används för att matematiskt kunna beräkna tryckpåkänningar under välten på olika djup. Ekvation 2.10 beskriver storleken på linjelasten.



Figur 2-11 a) Slätvals och gummihjul, b) linjelast för välttrumma. (Forssblad, 2000).

$$q = \frac{Q}{l}$$
 [kN/m]

[2.10]

Q = Kraften från vältvals (kN)

l =Valsens bredd (m)

Stöt

Genom stötverkan belastas marken för större krafter än vid statiskt tryck. Metoden är gammal och har tillämpats i många länder vid byggnation av bland annat motorvägar och flygplatser. Vid denna typ av packning släpps en tung fallvikt, från en given höjd fritt mot markytan. Vid stöten mot marken skapas en kraftig tryckvåg som tränger djupt ned i marken. Packningsverkan är beroende av tyngdens massa, bottenyta och fallhöjd.

Vibrering

Den dynamiska packningen bygger på att vibrationsvältar eller vibrationsplattor utsätter materialet för återkommande dynamiska belastningar. Utgående tryckvågor som skapas från ytan, se figur 2-10, sätter materialet i rörelse varvid materialets hållfasthet minskar och friktionen mellan kornen reduceras eller upphör. Då materialet sätts i rörelse sker en omlagring av kornen och densiteten ökar.

Med hjälp av excenterns varvtal, massa och storlek bestäms amplitud och frekvens. Fördelen med vibrationspackningen är att högre tryck uppnås i materialet och lägre friktion mellan kornen som underlättar omlagringen till tätare struktur, vilket gör att bättre packningsresultat kan uppnås.



Figur 2-12 Vibrationsvält (Forssblad 200).
3 Metod

För att uppnå tillräcklig bärighet i en vägkonstruktion krävs att de ingående materialen har de rätta egenskaperna. Obundna bärlagers vattenkvot, torrdensitet, hållfasthet och kornkurva har stor påverkan på en vägkonstruktions bärighet och livslängd, se även kapitel 3.1. Ett sätt att kontrollera materialets bärighet är att undersöka deformationsmodul och packningsgrad. Detta utförs med ett antal kontrollmetoder som beskrivs i kapitel 3-2. Genom att jämföra resultaten av olika kontrollmetoder, kan dessa metoder verifieras och eventuella samband finnas. De kan också mäta deformationsmodulen vid olika belastningar och töjningsnivåer. Val av lämpliga metoder baseras på litteraturstudier. I examensarbetet diskuteras även observationer som gjordes i fält under packningsarbetet. Figur 3-1 visar schematiskt de metoder som används i denna studie.



Figur 3-1 Schema för metoder.

3.1 Laboratoriemetoder

3.1.1 Kornstorleksfördelning genom siktningsanalys

Vid siktanalys används ett seriesikt av olika maskvidder för bärlager, se figur 3-2. Materialets analysprov torkas och vägs. Efter att analysprovet tvättats och torkats på nytt, siktas provet i olika fraktioner med hjälp av seriesiktet. Materialet i varje sikt vägs och beräknas i passerande viktprocent av hela provet. Resultaten från siktanalysen sammanställs i en kornstorleksfördelningskurva.

En kornstorleksfördelningskurva togs fram i laboratoriet för bärlagermaterialet 0/32 mm från Gotland. Därefter togs det även fram ytterligare två kornstorleksfördelningskurvor genom att modifiera bärlagermaterialet 0/32 mm till 2/32 mm och förhöjd finandel 0+/32 mm.



Figur 3-2 Seriesikt för kornkurva (Soil compaction handbok, 2011).

3.1.2 Proctorpackning

Proctorpackning, även kallat Proctorinstampning, genomförs för att bestämma ett materials optimala vattenkvot och motsvarande maximala torrdensitet i laboratorium. Internationellt förekommer många olika instampningsmetoder, medan i Sverige vanligtvis används två olika metoder, modifierad standard proctormetod och proctormetod. Standard proctormetoden innebär mindre packningsarbete jämfört med den modifierade proctormetoden. Ökande trafiklaster och trafikmängder har medfört högre packningskrav vilket har gjort att användningen av den modifierade proctormetoden blivit allt vanligare. Metodernas tillvägagångssätt går till på det sättet att ett materialprov som placeras i en packningscylinder utsätts för en tyngd som faller upprepade gånger. Materialet packas i flera skikt med olika tyngder och fallhöjder, detta visas i figur 3-3. Eftersom cylinderns diameter är 100 mm har provets största konstorlek begränsats till 20 mm. För att möjliggöra instampningsförsök av grövre material med större konstorlekar än 20 mm kan föreskriven Europastandard med packningscylindrarna på 100, 150 och 250 mm i diameter tillämpas.



Figur 3-3 Standard- och modifierad proctorpackning. (Soil Compaction Handbook, 2011).

Instampningsförsök utförs vid olika vattenkvoter. Dessa försök resulterar i en sambandskurva mellan vattenkvoten och den maximala torrdensiteten. Den optimala vattenkvoten kan därmed bestämmas. Sambandskurvorna mellan torrdensitet och vattenkvot för olika jordarter beskrivs i figur 3-4. Kurvorna är erhållna genom laboratoriepackningsprov och är olika för grovkorniga (grus, sand) jämfört med finkorniga (silt, lera) och blandkorniga (morän). De fridränerade jordmaterialen, sand och grus, pressas samman vid packning och densitetskurvorna går inte ned vid höga vattenkvoter.



Figur 3-4 Samband mellan torrdensitet och vattenkvot för olika typer av jordmaterial (Forssblad, 2000).

Utförande av proctorpackning

Proctorpackningen har utförts enligt Europeisk standard EN 132876-2. Bärlagermaterialet 0/32 mm från Gotland (Hejdeby) undersöktes med den modifierade proctormetoden. För bärlagermaterialet 0/32 mm bestämdes optimal vattenkvot, w, och motsvarande maximala torrdensitet, $\rho_{d,.}$ För att studera hur kornstorleksfördelningen påverkar materialets tekniska egenskaper har 0/32 mm materialet modifierats genom att ta bort finmaterialhalten 0/2 mm. Fraktionen utan finmaterialhalt benämns härefter 2/32 mm och fraktioner med förhöjd finandel benämns för 0+/32 mm. Som referens för kalkstenens egenskaper har ett traditionellt 0/32 mm tonalitisk (granit) material från Vällstaverket testats.

0/32 mm materialet från Gotland neddelades till ett antal jämförbara prov, se figur 3-5. Efter fördelningen tillsattes vatten till de olika proven så att ett spektrum av vattenkvoter, w, erhölls. Proven stampades enligt den modifierade proctormetoden i fem lager, där varje lager utsattes för 56 slag med en hammare på 4,5 kg. Efter packningen torkades proven och vägdes. Laboratorieinstampningarna utfördes vid olika vattenkvoter. En kurva över torrdensitet, ρ_d , som funktion av vattenkvot, w, uppritades vid varje försök. För beräkningar av optimal vattenkvot och maximal torrdensitet för alla försök se bilaga 1.



Figur 3-5 *Proctorpackningsprocedur: (A,B,C) materialet delas i neddelningsapparaten; (D) vatten tillsätts till varje prov; (E) proven stampas i fem lager i packningscylinder; (F) packat prov.*

3.1.3 Los Angeles

Materialets motstånd mot fragmentering testas genom Los Angelesmetoden. 5 kg materialprov med fraktionen 10-14 mm läggs i Los Angelestrumman med 11 stycken stålkulor, där varje stålkula skall väga mellan 400 och 450 gram. Trumman är försedd med lyftbalk som har samma längd som cylindertrumman och består av samma material, se figur 3-6. Med hjälp av en motor sätts trumman i rotation med hastigheten 31-33 varv/min i 500 varv. Under rotationen lyfts stenprovet till trummans topp och får falla fritt med stålkulorna mot trumman som i sin tur leder till att materialet krossas. Materialet nöts sedan dels mot trummans periferi, och dels av stålkulorna genom rullning och glidning. Efter utförd test i trumman siktas material på 1,6 mm sikten, och det material som passerar uttryckt i viktprocent av det ursprungliga materialprovet är det s.k. Los Angeles-värdet. Enligt kraven i Trafikverkets VVTBT 2009 skall Los Angeles-värdet vara under 40 för bärlager. Ju högre Los Angeles-värdet, desto sämre motstånd mot fragmentering har ett material (Stenlid, 1996).



Figur 3-6 Los Angeles-trumman och principbild över materialrörelsen under ett varv (Stenlid, 1996).

Utförande av Los Angeles

Testet utfördes enligt Svensk standard (SS-EN 1097-2). Bärlagermaterialet siktades med fraktionen 10-14 mm. 1,65 kg material erhölls från fraktionen 10-11,2 mm, 1,65 kg material erhölls från fraktionen 11,2-12,5 mm och 1,7 kg material erhölls från fraktionen 12,5-14 mm, detta gav sammanlagt 5 kg. Fraktionerna tvättades var för sig och torkades i torkskåp vid 115 °C tills materialen vara torra. Fraktionerna blandades till ett enda materialprov och roterades i trumman med hastigheten 31-33 varv/min i 500 varv. Analysprovet tömdes noggrant ur trumman, all finmaterial avlägsnades och

siktades för 10,0 8,0 4,0 2,0 och 1,6 mm. Los Angeles-värdet beräknades enligt ekvation 3.1 nedan:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$
[3.1]

m- är vikten hos det material som ligger kvar på sikten 1,6 mm i gram

3.1.4 Micro-Deval

Micro-Deval är en undersökningsmetod som utförs i laboratorium i syfte att bestämma nötningsegenskaper för obundna granulära material. Metoden utvecklades i Frankrike på 1960-talet för att bestämma kvaliteten hos kärnborrat berg. Metoden går till på så vis att två materialprov, 500 gram var, med fraktionen 10-14 mm placeras i två trummor med 500 gram nötande stålkulor och 2,5 liter vatten. Provet kan även utföras i torrt tillstånd. Trummorna roterar i Micro-Deval apparaten tillsammans med stålkulor och vatten i 12000 varv med en definierad hastighet i 2 timmar. En bild av Micro-Deval apparaten visas i figur 3-7. Under roterandet uppstår nötning på grund av friktionen mellan materialkornen och stålkulorna i den roterande trumman. Den del av det ursprungliga provet (uttryckt i procent) som efter nötning reducerats till mindre än 1,6 mm är det s.k. Micro-Devalvärdet. För bärlager skall det vara under 20, om ej trafikerat tillåts upp till 25 enligt Trafikverkets krav (Stenlid, 2000).



Figur 3-7 Micro-Deval apparaten.

Utförande av Micro-Deval

Svensk standard SS-EN 1097-1 har tillämpats vid utförande av detta prov. Bärlagermaterialet 0/32 mm siktades med 10 mm, 11,2 mm, 12,5 mm och 14 mm siktar. Varje fraktion tvättades var för sig och torkades i torkskåpet vid 115 grader tills materialen bedömdes vara tillräckligt torra. Fraktionerna blandades efter torkningen till två modifierade 10-14 mm laboratorieprov, där varje prov vägde 500 gram. Proven placerades i två trummor med 500 gram nötande stålkulor och 2,5 liter vatten som sedan roterades i Micro-Deval apparaten i 1200 varv i två timmar. Proven torkades efter testet och siktades sedan med 1,6 mm. Micro-Devalvärdet beräknades som ett medelvärde för de två analysproven.

3.2 Kontrollmetoder

När packningsarbetet är utfört görs ofta någon form av packningskontroll. som ställs på packningsarbete måste givetvis anpassas efter Krav packningssyfte. För kontroll av packningsarbete i fält används antingen metoden resultatkontroll eller metoden utförandekontroll. Vid resultatkontroll kontrolleras det packade materialets eller fvllningens bärighet. deformationsmodul, alternativ densitet, packningsgrad mot föreskrivna krav. Utförandekontroll tillämpas för kontinuerliga övervakningar av lagertjocklekar och antal överfarter för bankfyllningar för vägar (Forssblad, 2000).

Mätvärdena från dessa kontroller ska klara de gränsvärden som Trafikverket föreskriver i VVTBT 09:117.

3.2.1 Statisk plattbelastning (SPLT)

Statisk plattbelastning är en kontrollmetod för bestämning av styvhet och packning i jordlager. I Sverige används denna metod för kontroll av terrassytor och obundna överbyggnadslager i syfte att mäta det packade lagrets deformationsmodul, E_v . Vid utförandet belastas den cirkulära plattan med diametern 300 mm stegvis med en kraft, och de uppkomna deformationerna registreras. Sättningarna utgörs av både elastiska och plastiska deformationer. Belastningen förs på i två omgångar med en mellanliggande avlastning. Från första och andra belastningen fås då deformationsmodulerna, E_{v1} , respektive, E_{v2} . E_{v2} är ett mått på bärighet och bärighetskvoten E_{v2}/E_{v1} beskriver det uppnådda packningsresultatet hos materialet, som bör vara så lågt som möjligt. Ett högt värde på denna kvot anger att packningen är relativt dåligt. Uppmätta värden från deformationsmodulen, E_{V2} , och bärighetskvoten E_{V2}/E_{V1} utvärderas och jämförs med Trafikverkets krav.

För varje mätpunkt redovisas resultat enligt följande:

- Tryck och sättningsdiagram.
- Deformationsmoduler från första och andra belastningsserien (E_{v1} och E_{v2}).
- Kvoten mellan deformationsmodulerna (E_{V2}/E_{V1})

Vid varje spänningsnivå, medelnormalspänning, σ_0 , registreras deformationen, s, (pålastningen avbryts då sättningen överskrider 5 mm) som sedan plottas i ett tryck- sättningsdiagram. Figuren 3-8 visar ett exempel på hur ett tryck- sättningsdiagram vid statisk plattbelastning kan se ut.



Figur 3-8 *Trycksättningslinje vid packningskontroll (Vägverkets metodbeskrivning, 606:1993).*

Ur sambandet mellan tryck och sättning kan tryck- sättningslinje beräknas med hjälp av ekvationen 3.2 nedan som är ett andragradspolynom där konstanterna kan bestämmas med minsta kvadratmetoden.

$$S = a_0 + a_1 \sigma_0 + a_2 \sigma_0^2$$
 [mm] [3.2]

 σ_0 = medelnormalspänning under plattan [MN/m²]

 a_0 , a_1 , a_2 = konstanter i andragradspolynom

Utifrån tryck- spänningslinje beräknas deformationsmodulen, $E_{V_{i}}$ enligt ekvation 3.3 nedan:

$E_{v} = \frac{1.5 \cdot r}{a_{1}a_{2}\sigma_{1max}}$	[MPa]	(3.3)
r = belastningsplattans radie	[mm]	
σ_{1max} = maximal medelnormalspänning vid första belastningen	[MN/m ²]	

Utförande av statisk plattbelastning

Vid mätningar av statisk plattbelastning användes en hjullastare på över 4,5 ton som motvikt med en svetsad balk på bakdelen, se figur 3-9. För att erhålla en jämn yta jämnades markytan av med ett tunt sandlager över mätpunkterna före varje mätning. Belastningen påfördes i två omgångar med en mellanliggande avlastning. Sättningarna men även värden för deformationsmodulerna E_{V1} och E_{V2} samt kvoten $E_{V2/}E_{V1}$ registrerades i mätdatorn.



Figur 3-9 Mätning med statisk plattbelastning, hamnen på Gotland.

3.2.2 Lätt fallvikt (LWD)

Principiellt fungerar metoden genom att en fallvikt på 10-15 kg släpps från olika höjder och faller sedan längs stången mot belastningsplattan som är mellan 150-300 mm i diameter, se figur 3-10. Stöten tas upp av ett fjäderelement. En kraft skapas på ungefär 7 kN under en belastningstid på längre än 18 ms än vid odämpat stöt. Fallvikten är utrustad med en dator eller annan mätutrustning där deflektion och nedslagskraft för varje belastning registreras. Den maximala spänningen som bildas under plattan är beroende av plattans storlek, fallhöjd och fallvikt. Dynamiska deformationsmodulen, E_{vd} , beräknas med hjälp av ekvationen 3.4 (Larsson, 2010).



Figur 3-10 Principiell skiss av lätt fallvikt Dynatest 3031 LWD.

$$E_{vd} = \frac{f^*(1-v^2)*\sigma_0*a}{d_0}$$
[3.4]

a = lastplattans radie 150-300[mm] d_0 = deformation i belastningscentrum[mm] σ_0 = spänning under plattan[MPa] f = spänningsfördelning (2 eller $\pi/2$)	$E_{vd} = dynamisk deformationsmodul$	[MPa]
d_0 = deformation i belastningscentrum[mm] σ_0 = spänning under plattan[MPa] f = spänningsfördelning (2 eller $\pi/2$)	a = lastplattans radie 150-300	[mm]
σ_0 = spänning under plattan [MPa] f = spänningsfördelning (2 eller $\pi/2$)	d_{θ} = deformation i belastningscentrum	[mm]
$f = \text{spänningsfördelning (2 eller } \pi/2)$	σ_{θ} = spänning under plattan	[MPa]
	$f = spänningsfördelning (2 eller \pi/2)$	

v =Poisson's tal

Tidigare studier har påvisat att det inte finns några starka samband mellan deformationsmoduler utförda med lätt fallvikt och statisk plattbelastning. Som ett riktvärde för sambandet, anger Forssblad, 2000 att det för blandkorniga och finkorniga är sambandet $E_{vd} = 0.7$ à $1.2E_{V2}$, och för grovkorniga är sambandet $0.5E_{V2}$. Fördelen med lätt fallvikt är att den kan användas på mjuka ytor där annan utrustning inte kan användas, oförstörande provning till låga kostnader och att den är lätt att förflytta. Vid höga bärighetsvärden som till exempel på bärlagerytor krävs det tunga fall viktsmätare då metodens noggrannhet minskar på grund av de små deformationer som uppstår (SGF, 2004).

Utförande av lätt fallvikt

Lätt fallvikt av typen Dynatest 3031 LWD med fallvikt på 10 kg och belastingsplatta med diametern 300 mm användes vid mätningarna, se figur 3-11. Mätningsproceduren inleddes med en förbelastning där tre slag från höjden 83 cm som inte registrerades. Därefter släpptes vikten tre gånger från höjdnivåerna 28, 58, och 83 cm. Höjderna mättes från överkant av dämparen till underkant av fallvikten. Deformationsmodulerna för de tre olika spänningsnivåerna registrerades i mätdatorn och medelvärdet av sättningen *s* och deformationsmodulen E_{vd} beräknades för varje höjd.



Figur 3-11 Mätning med lätt fallvikt Dynatest 3031 LWD.

3.2.3 Densitetmätare/SDG200

Densitetsmätaren SDG200 används för bestämning av packningsgrad, R_D , skrymdensitet, ρ_m , torrdensitet, ρ_d , och vattenkvot, w, genom använda EIS (elektrisk impedansspektroskopi). Utrustningen visas i figur 3-12 (A). Densitet och packningsgrad mäts genom förändringarna i elektriska impedansen för olika lager. Eftersom luftens permittivitet är lägre än materialets beståndsdelar kan luftmängden beräknas. På välpackade ytor minskar porvolymen mellan materialets fasta beståndsdelar och då ökar permittiviteten. Det är viktigt att mätytan ska vara så plan som möjlig, samt fri från allt löst och stört material. Innan mätningarna utförs måste en materialbeskrivning på det aktuella materialet matas i apparaten. Denna materialbeskrivning är som graderingstal, C_u (kornfördelningskurvans lutning), krökningstal, C_c (är ett mått på kornfördelningskurvans form), maximal torrdensitet och optimal vattenkvot från proctorpackning och kornfördelningskurva.

Utförande av desitetsmätare/SDG200

Det utfördes fem mätningar för varje mätpunkt, se figur 3-12 (B). Första mätningen, mätning 1, utfördes på mätpunkten och resten av mätningarna utfördes runt den. Medelvärdet av alla mätningarna gavs automatiskt av utrustningen.



Figur 3-12 Densitetsmätare SDG 200.

Fördelen med SDG200 är att den är lätt att använda och tidssparande. Nackdelen är att mätdata som fås är ungefärliga värden, men de kan användas som relativa värden mellan mätpunkter. Det finns andra sorters densitetsmätare, till exempel isotopmätare (nukleära metoder). Nackdelen med isotopmätare är bland annat att de ger ifrån sig radioaktiv strålning vilket ställer högre säkerhetskrav på hantering. SDG200 använder elektromagnetiska vågor och är därför att föredra.

3.2.4 Vatten- och sandvolymmeterprov

Vatten- och sandvolymeterprovet är en metod för bestämning av torrdensitet och vattenkvot hos det packade materialet i fält. Metoden utförs genom att gräva ett hål med diameter 150-200 mm och cirka 150 mm djupt. Det uppgrävda materialets vikt bestäms både före och efter torkning. Vid vatten- och sandvolymeterprovet bestäms hålets volym genom att det fylls med torr sand med känd densitet.

Utförande av vatten- och sandvolymmeterprov

Vid vatten- och sandvolymmeterprovet användes sand för att utföra mätningar då utrustning för vattenvolymmeterprov inte var tillgänglig. För bestämning av torrdensitet och vattenkvot i fält utfördes mätningar på ett antal valda punkter för försöksyta 1 (kajen) och försöksyta 2 (cirkulationsplatsen).

Ett hål ner till ytan på förstärkningslagret med en diameter på cirka 150 mm grävdes för varje mätpunkt, se figur 3-13. För att bestämma hålets volym fylldes det med torr sand med känd densitet. Det uppgrävda materialet från varje hål torkades och vägdes både före och efter torkningen. Med kännedom av det uppgrävda materialets torrdensitet, ρ_d , vattenkvot, w, och hålets volym, V, kunde packningsgraden, R_D, beräknas.



Figur 3-13 Utförande av vatten- och sandvolymmeterprovet.

3.2.5 Ytvågsseismik

Ytvågsseismik mätmetod är en relativt ny kontrollmetod för oförstörande provning för bestämning av deformationsmodul vid små töjningsnivåer (Rydén, 2009). Metoden innebär att en puls induceras med liten hammare på mätpunkternas yta, slagen sker med definierade avstånd till accelerometern. Vid mätningarna registreras olika typer av våghastigheter t.ex. Rayleighvågshastighet, V_R, och kompressionsvågshastighet, V_p, som sedan plottas i ett avstånd/tidsdiagram, se figur 3-14. Dessa hastigheter används för att beräkna skjuvvågshastighet, V_s, och deformationsmodulen, E.

Följande beräkningsgång används för att utvärdera mätningarna för obundna granulära material: (Rydèn och Mooney, 2009)

- 1. Bestäm våghastigheterna V_p och V_R från mätdata som erhålls från fältdatorn genom att bestämma lutningen i diagrammet.
- 2. Ange densitetsvärdet (uppmätt eller uppskattat) för det material som ska undersökas.
- 3. Ett preliminärt värde på Poisson's tal antas.
- 4. Beräkna V_s med ekvationen 3.5.
- 5. Beräkna en preliminär deformationsmodul (E-modul) med utgångspunkt från V_s , densitet och Poisson's tal med hjälp av ekvation 3.6.
- 6. Beräkna V_p enligt ekvation 3.7.
- 7. Justera Poisson's tal tills den beräknade $V_p = V_{phalf space}$ från mätdata.

$$V_{\rm S} = V_{\rm R} \frac{(1+\nu)}{((0.87+(1.12\cdot\nu)))}$$
[3.5]

$$E = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot (1+\nu) \tag{3.6}$$

$$V_{phalf space} = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\nu)}{\rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}}$$
[3.7]



Figur 3-14 Mätuppställning och avstånd/tidsdiagram ytvågsseismik. (Rydèn, 2009)

Utförande av ytvågsseismik

Seismiska mätningar utfördes endast på Testyta-2 på grund av strul med hammaren. Tre mätningar utfördes, första mätningen på opackat material och de andra två mätningarna utfördes efter materialet hade packats. Vid mätningarna gjordes först ett hål i ytan för att på ett enklare sätt få ner accelerometern. Sedan mättes ett avstånd 2,5 m från accelerometern. Hammaren slogs fem gånger i 25 slagpunkter med ett inbördes avstånd om 1 dm mellan slagpunkterna. Efter avslutad mätning bestämdes V_P och V_R i fältdatorn. För bestämning av de andra parametrarna användes beräkningsgången i avsnitt 3.2.5.



Figur 3-15 Ytvågsseismik mätning på bärlager, (Nils Rydèn, 2009).

3.3 Projektbeskrivning

För att studera kalkstenens egenskaper, hantering av materialet och packningsarbete i fält utfördes tre fältförsök på två pågående anläggningsprojekt. Det ena omfattar en utbyggnad av kajen i hamnen (försöksyta 1), och det andra en större cirkulationsplats (försöksyta 2 och 3) vid infarten till handelsområdet ICA Maxi på Gotland. Vid fältmätningarna användes olika kontrollmetoder på bärlager och delvis utlagt förstärkningslager. I försöksyta 1 och 2 har bärlagret dynamiskt packats med 6 vältöverfarter och hög amplitud med SD70D. Specifikationer för SD70D återfinns i bilaga 8.

3.3.1 Försöksyta 1

Detta försök utfördes på kajen för bärlager som var packat och väntade på att beläggas. Ytan delades upp i 24 mätpunkter. Figur 3-16 beskriver vilka kontrollmetoder som användes på mätpunkterna. Vid fältförsöken användes statisk plattbelastning, lätt fallvikt, densitetsmätare/SDG200 och vatten- och sandvolymmeterprov.



Figur 3-16 Skiss över mätpunkter för försöksyta 1.

3.3.2 Försöksyta 2

Detta försök utfördes på en del av cirkulationsplatsen vid handelsområdet. Mätytan delades upp på tre delar A, B och D, se figur 3-17. Ett antal mätpunkter markerades på dessa delar. Vid fältförsöken användes statisk plattbelastning, lätt fallvikt, densitetsmätare/SDG200 och vatten- och sandvolymmeterprov. På del A utfördes mätningar på förstärkningslagret, och på del B och del D utfördes mätningarna på bärlagret. För detaljerad information om vilka kontrollmetoder som användes vid mätpunkterna på del A, B och D se bilaga 6.



Figur 3-17 Skiss över cirkulationsplatsen del A, B och D vid försöksyta 2.

3.3.3 Försöksyta 3

I slutet av fältundersökningen utfördes två testytor (bärlager), Testyta-1 och Testyta-2 på Försöksyta 3, se figur 3-18. Syftet var att ta fram en packningsmetodik genom att mäta utvecklingen av materialets bärighet (deformationsmodul, E) respektive packningsgrad med olika kontrollmetoder efter varje vältöverfart.



Figur 3-18 Skiss över mätpunkter för testyta 1 och 2 vid försöksyta 3.

Yttre förhållanden

Mätningarna utfördes mellan 10-21 april 2011. Under dessa dagar var det 10-15 °C och det förekom ingen nederbörd, vilket gav goda förutsättningar för bärighetsmätningar.

4 Resultat av laboratoriemetoder

I följande kapitel presenteras samt diskuteras resultat från laboratoriemetoder

4.1 Konstorleksfördelning

Vid utvärdering av resultaten används Trafikverkets krav på kornstorleksfördelning för bärlagermaterial, se figur 4-1. Vid kornstorleken 0/32 mm är finmaterialhalten mer än 10 % och enligt kraven ska det ligga mellan 2 % och 7 %. Orsaken till detta är att materialet innehöll större andel finhalt redan innan provningen. Ett välgraderat bärlagermaterial med exakt kornstorleksfördelning kan i praktiken vara svårt att erhålla för kalksten. Kornstorleksfördelningskurvor för alla tre försök återfinns i bilaga 2.



Figur 4-1 Krav för kornstorleksfördelning för bärlager (Trafikverket, VVTBT 2009:117).

4.2 Proctorpackning

Proctorförsök 1, 0/32 mm: Försöket utfördes på bärlagermaterialet från Gotland (omodifierat). Resultaten från sju olika prov med vattenkvoter på 3,8 % - 7,7 % redovisas i figur 4-2, där en tydlig maximun samt "terasspunkt" ses. Optimal vattenkvot uppmättes till 4,6 % och maximal torrdensitet till 2305 kg/m³. En orsak till "terasspunkten" mellan 6,4 % och 6,9 % kan vara att det är svårt att erhålla helt likvärdiga prover och att innehåll av stenfraktionen kan ha gett ett något avvikande prov. Det är också vanligt att det ibland erhålls proctorkurvor som inte är helt perfekta. Det kan också bero på att materialet krossas så mycket att det inte längre är fridränerande och därmed kan få problem med permeabiliteten i fält. Eftersom finmaterialhalten är hög, mer än 10 %, kan också ett porvattentryck har byggts upp i materialet. För att uppnå optimal packningsgrad i fält är det därför viktigt att materialets vattenkvot ligger så nära den optimala vattenkvoten som möjligt, vilket innebär mindre packningsarbete.



Figur 4-2 Proctorkurva för kalksten med kornstorlek 0/32mm.

Proctorförsök 2, 2/32 mm: Försöket utfördes på bärlagermaterialet från Gotland (modifierat utan finmaterialhalt 0/2 mm). Resultaten från sex olika prov med vattenkvoter på 3,2 % - 9,9 % redovisas i figur 4-3. Optimal vattenkvot uppmättes till 8,8 % och maximal torrdensitet till 2160 kg/m³. Genom att ta bort 0/2 mm delen minskar torrdensitet med cirka 6 %.

En lägre densitet och högre optimal vattenkvot fås jämfört med det omodifierade materialet 0/32 mm. För detta material krävdes betydligt mer vatten för att komma upp till den optimala packningen. Detta är på grund av förekomsten av större porvolymer. Vid högre vattenkvoter pressades vattnet ut när det packades och det var svårare att få en avtagande densitetskurva. Detta försök är kanske inte helt jämförbart med fältpackning för att ett sådant material inte skulle kunna hålla lika mycket vatten i fält. Som resultat av detta är det nästan omöjligt att uppnå den optimala packningsgraden eftersom tillfört vatten dräneras ur materialet. Dessutom ökar risken för nedkrossning om materialet packas för mycket.



Figur 4-3 Proctorkurva för kalksten med kornstorlek 2/32mm utan finmaterialhalt .

Proctorförsök 3, hög finmaterialhalt 0+/32: Försöket utfördes på bärlagermaterialet från Gotland (modifierat med förhöjd finmaterialhalt 0/2 mm). Resultaten från fem olika prov med vattenkvoter på 3,1 % - 8,9 % redovisas i figur 4-4. Optimal vattenkvot uppmättes till 4,9 % och maximal torrdensitet till 2333 kg/m³. Finmaterialet som siktades bort från försök 2 tillsattes i dessa prov.

Försöket visar att materialets kornstorleksfördelning har stor betydelse för packningen i fält. En ändring i materialets kornstorleksfördelning påverkar den optimala vattenkvoten och torrdensiteten hos materialet. Nackdelen med att ett material har en högre finmaterialhalt är att det är svårare att packa vid högre vattenkvoter, till exempel under regniga väderförhållanden. När ett sådant material packas med hög vattenkvot pressas stora stenar ner och finpartiklar stiger upp till vtan. Under normala förhållanden, hantering och utläggning av bärlagret är det inte sannolikt att materialet får lika hög finmaterialhalt. Laboratorietestet utfördes med ovanligt hög andel finmaterialhalt i syfte att belysa vad som kan ske vid en separation av bärlagret där finmaterialet ansamlats i vissa partier. Eftersom materialet här har ett finmaterialhalt på över 15 % är materialet inte längre friktionsmaterial utan bör betraktas som en jord. Då en jord har lägre permeabilitet än friktionsmaterial, vilket gör att materialet håller mer vatten och bildar ett porvattentryck. Som tidigare nämndes i kapitel 2.2.7 kan en hög porvatten tryck minska materialets deformationsmotstånd.



Figur 4-4 Proctorkurva för kalksten med kornstorlek 0+/32 mm hög finmaterialhalt.

Proctorförsök 4, tonalistikt material 0/32 mm: Försöket utfördes på traditionellt 0/32 mm tonalistiskt materialet från Vällstaverket. Resultaten från fem olika prov med vattenkvoter på 5,3 % - 7,5 % redovisas i figur 4-5. Optimal vattenkvot uppmättes till 6,3 % och maximal torrdensitet till 2 300 kg/m³. Tonalistiskt material har hög hållfasthet och är ett bra bärlagermaterial, men i denna undersökning visas att en ändring av vattenhalten för tonalistiskt material påverkar torrdensiteten avsevärt.



Figur 4-5 Proctorkurva för granit (tonalistiskt) med kornstorlek 0/32 mm från Vällstatäkten.

Jämförelse mellan tonalistiskt material och kalksten samt mellan försök 1,2 och 3

Jämförelse har också gjorts mellan kalksten (0/32 mm) från Gotland och tonalistiskt material (0/32 mm) från Vällstatäkten för att undersöka hur kalkstenen beter sig under packningen jämfört med ett traditionellt bärlagermaterial. Figur 4-6 visar att det krävs mindre vatten för kalkstenen för att uppnå den maximala torrdensiteten. En högre maximal torrdensitet för kalkstenen uppnås jämfört med tonalistiskt material för samma packningsenergi. En ändrig i vattenkvoten för kalksten påverkar inte torrdensiteten lika mycket jämfört med en ändring av vattenkvoten för ett tonalistiskt material. I figur visar detta förhållande genom att kalksten har breddare spann än tonalistiskt material. Detta kan även bero på att det saknas en provpunkt mellan 4,6 % och 5,7 % för kalkstenen.



Figur 4-6 Jämförelse mellan kalksten 0/32mm från Gotland och tonalistiskt material 0/32 mm från Vällstatäkten.

Jämförelse mellan de tre proctorkurvorna för kalkstenen visas i figuren 4-7. Kornstorleksfördelningen har stor betydelse för ett material, ju högre finmaterialhalt, desto högre maximal torrdensitet och högre vattenkvot uppnås det. Som tidigare nämnts innehåller 0/32 mm bärlagermaterialet från Gotland vikt-10 % finmaterialhalt vilket ger högre torrdensitet, detta kan ses i figur 4-7 genom skillnaden mellan 0/32 mm och 0+/32 mm. Med 2/32 mm materialet erhålls en lägre maximal torrdensitet som beror på att bärlagermaterialet saknar finmaterial. Bristen på finmaterialet gör även att det blir svårare att packa materialet i fält. Proctorförsök 3 (2/32 utan finmaterialhalt) borde leda till en lägre optimal vattenkvot för att permeabiliteten är större än de andra proctorförsöken. Anledningen till den höga vattenkvoten i proctorförsök 2 kan bero på att vattnet i packningscylindern inte dränerades bort som det brukar göra i fält.



Figur 4-7 Jämförelse mellan proctorkurvor försök 1, 2, och 3 för kalksten från Gotland.

4.3 Los Angeles

Uppmätt LA-värdet för 0/32 mm bärlagermaterialet (kalksten) är LA(33). Enligt Trafikverkets krav (VVTBT, 2009:117) ska LA-värdet ligga under 40 för bärlager. I Figur 4-8 jämförs kalksten från Gotland med andra material och visar att kalksten från Gotland har ett sämre motstånd mot fragmentering (krossning) men klarar kravet ändå. I en studie av Stenlid 1996 presenteras Los Angeles-värdet för tre olika kalkstenar 37,8/35,2 27. En av faktorerna som påverkar materialets motstånd mot fragmentering är kornens form. De korn som har vassa kanter och hörn ger höga Los Angeles-värden på grund av mer krossning.



Figur 4-8 Jämförelse mellan Gotlands kalksten och andra bergmaterial med Los Angeles 10-14 mm (värdena för andra bergsmaterial är hämtade från Stenlid, 1996).

4.4 Micro-Deval

Vid utvärdering av resultatet från Micro-Devalvärdet användes Trafikverkets krav (VVTBT, 2009:117), som är 25 för bärlager då det inte trafikeras. Detta medelvärde för de två analysproven uppfyller inte kraven. Resultaten visar att kalkstenen har sämre nötningsegenskaper. I samma studie av Stenlid 2000 presenteras Micro-Deval värdet för tre olika kalkstenar, värdena är 21,2 28,5 och 36,6. Men kalkstenarna bör kunna godkännas om statisk plattbelastning är OK . I studien diskuteras också att det inte finns något samband mellan Los Angels-metoden och Micro-Devalmetoden (våt). Figur 4-9 är en jämförelse mellan Gotlands kalksten och andra material. Resultatet av Micro-Deval värden och medelvärdet, kan ses i tabell 4-1.

Tabell 4-1: Beräkningar av Micro-Deval värdet

Invägning inför provning						
Sikt	Prov A	Prov B				
(mm)	(g)	(g)				
14			Invägning efter p	rovning		
12,5	175	175		Prov A	Prov B	Medelvärde
12,5 11,2	175 150	175 150	Vikt före malning (g)	Prov A 500	Prov B 500	Medelvärde
12,5 11,2 10	175 150 175	175 150 175	Vikt före malning (g) Vikt efter malning (g)	Prov A 500 342,9	Prov B 500 343,8	Medelvärde



Figur 4-9 Jämförelse mellan Gotlands kalksten och andra bergmaterial med Micro-Deval 10-14 mm (våt) (värdena för andra bergmaterial är hämtade från Stenlid, 2000).

5 Resultat av kontrollmetoder vid fältförsök

Resultat från de olika kontrollmetoderna för försöksyta 1, 2 och 3 presenteras i följande kapitel samt i slutet i detta kapitel görs jämförelser mellan kontrollmetoderna.

5.1 Försöksyta 1

Standardavvikelse

På denna yta utfördes mätningarna vid två tillfällen. Innan mätning 2 packades bärlagret med två vältöverfarter statisk packning i syfte att få bort ytuppluckringen av bärlagret som kan ha förekommit under dynamisk packning. Vid mätning 2 genomfördes mätningar på fåtal mätpunkter med statisk plattbelastning, lätt fallvikt och densitetsmätare/SDG20.

Statisk plattbelastning

Resultaten från statisk plattbelastning för mätning 1 redovisas i tabell 5.1 och för mätning 2 i tabell 5-2. Mätningen på mätpunkten L7-1 kunde inte utföras på grund av pågående arbete vid mätning 1.

 Tabell 5-1 Mätresultat från statisk plattbelastning vid mätning 1 vid försökyta 1.

Punkt	E _{V1}	E _{V2}	E_{v_2}/E_{v_1}	Punkt	Evı	E _{v2}	E_{v_2}/E_{v_1}
Nr	(MPa)	(MPa)	-	Nr	(MPa)	(MPa)	-
L1-1	35,5	156,7	4,42	L7-1	-	-	-
L1-2	37,2	173,5	4,67	L7-2	57,9	194,2	3,35
L1-3	32,7	148,1	4,52	L7-3	48,9	202,2	4,14
L1-4	38	157,2	4,14	L7-4	60,1	208,6	3,47
L3-1	47,5	176,8	3,72	L9-1	34,7	134,6	3,87
L3-2	44	203,8	4,64	L9-2	58,8	219,3	3,73
L3-3	38,9	185,6	4,77	L9-3	54,6	182,4	3,34
L3-4	41,4	141,1	3,41	L9-4	73,1	255,5	3,49
L5-1	61,5	202,1	3,29	L11-1	49,7	212	4,26
L5-(1-2)	54,5	188	3,45	L11-2	52,3	216,1	4,13
L5-2	46,6	215,8	4,63	L11-3	49,8	202,4	4,07
L5-3	52,1	182,3	3,5	L11-4	39,6	231,2	5,84
L5-4	68,7	243,1	3,54				
		E _{V1}	E _{V2}	E _{V2} /E _{V1}			
		(MPa) (MPa)	-	-		
Medelvär	den	49,0	9 193,03	4,02			

31,12

10,84

0,63

 Tabell 5-2 Mätresultat från statsikt plattbelastning för mätning 2 vid försöksyta 1.

Punkt	Evı	E _{v2}	E_{v_2}/E_{v_1}
Nr	(Mpa)	(Mpa)	-
L5-3	114,5	230	2,01

Densitetsmätare/SDG200

Mätresultaten för torrdensitet, ρ_d , skrymdensitet, ρ_m , vattenkvot, w, och packningsgraden, R_d , från densitetsmätningar för mätning 1 och 2 redovisas i bilaga 5.

Vatten- och sandvolymmeterprov

Mätresultaten för torrdensitet, ρ_d , vattenkvot, w, och packningsgraden, ρ_d , från vatten- och sandvolymmeterprovet för mätning 1 och 2 redovisas i bilaga 4.

Lätt fallvikt

Resultat fån lätt fallviktsmätningar för mätning 1 och 2 följer enligt tabellen 5-3 och 5-4. Här redovisas också $E_{vd,medel}$ för de tre olika höjderna för respektive punkt. Samtliga registrerade deflektioner och spänningsnivåer för varje enskilt släppfall och punkt kan se i bilaga 3.

Punkt	Evd(medel 28cm)	Evd(medel 58cm)	E _{vd(medel 83cm)}	Punkt	Evd(medel 28cm)	Evd(medel 58cm)	Evd(medel 83cm)
Nr	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	Nr	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
L1-1	102,3	99,3	104,7	L7-1	247,3	205,0	201,7
L1-2	298,0	256,7	283,7	L7-2	365,0	342,3	333,3
L1-3	276,3	208,3	207,3	L7-3	77,3	71,3	73,0
L1-4	279,7	245,3	233,0	L7-4	243,3	233,0	239,7
L3-1	348,3	240,0	276,3	L9-1	221,0	172,3	198,3
L3-2	270,7	225,3	226,0	L9-2	357,7	318,7	324,0
L3-3	319,0	281,0	242,0	L9-3	140,0	130,7	136,0
L3-4	140,7	114,7	120,7	L9-4	158,3	127,0	146,7
L5-1	201,3	174,0	180,0	L11-1	379,3	357,3	329,3
L5-2	188,7	194,3	201,3	L11-2	279,0	235,7	212,3
L5-3	259,7	199,3	203,7	L11-3	374,7	274,7	290,7
L5-4	209,0	176,7	208,7	L11-4	259,7	257,7	284,7

Га	bell	5-3	3 M	lätresul	ltat frð	in lätt	fallvikt	vid	mätning 1	l vid	försök	syta	1.
----	------	-----	-----	----------	----------	---------	----------	-----	-----------	-------	--------	------	----

Punkt		E _{vd(medel28cm)}	E _{vd(medel58cm)}	E _{vd(medel83cm)}	
	Nr	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
	L1-3	166,6	159,0	151,7	
	L5-2	251,3	184,7	180,0	
	L5-3	294,7	237,3	235,7	

Tabell 5-4 Mätresultat från lätt fallvikt vid mätning 2 vid försöksyta 1.

5.2 Försöksyta 2

Här presenteras mätresultaten från kontrollmetoderna för de olika delarna vid cirkulationsplatsen.

Del A

På den här delen undersöktes bärigheten på förstärkningslager med både statisk plattbelastning och lätt fallvikt. Mätningar med statisk plattbelastning kunde inte utföras på grund av stora sättningar som var större än 5 mm. Genom att vattna förstärkningslagret och packa ytterligare med först två dynamiska vältöverfarter och därefter två statiska vältöverfarter kunde mätningarna utföras. Mätresultaten från statisk plattbelastning för tre mätpunkter och lätt fallvikt för nio mätpunkter redovisas i tabellerna 5-5 och 5-6. I bilaga 3 kan samtliga registrerade deflektioner och spänningsnivåer för varje enskilt släppfall och punkt från lätt fallvikt betraktas.

Tabell 5-5 Mätresultat från statisk plattbelastning för mätning 2 vid försöksyta 2 (del A).

Punkt	E _{V1}	E _{v2}	E_{v_2}/E_{v_1}
Nr	(MPa)	(MPa)	-
Mitt-1(efter packning+vatten)	43,5	229,2	5,27
Mitt-2(efter packning+vatten)	62,1	161,6	2,60
Mitt-3(efter packning+vatten)	52,3	189,4	3,62

Punkt	E _{vd(medel 28cm)}	E _{vd(medel 58cm)}	E _{vd(medel 83cm)}
Nr	(MPa)	(MPa)	(MPa)
12-1	52,67	59,33	63,67
I2-(1-2)	64,00	58,67	63,67
12-2	49,67	56,00	63,00
I2-(2-3)	24,33	30,00	33,00
12-3	48,67	52,33	49,33
I2 (3-4)	76,33	82,67	88,33
12-4	34,67	79,67	88,00
11-1	50,33	59,00	63,67
11-4	22,00	22,70	22,67

 Tabell 5-6 Märresultat från lätt fallvikt för mätning 1 vid försöksyta 2 (del A).

Del B

Här redovisas mätresultaten för del B från statisk plattbelastning i tabell 5-7, och lätt fallvikt i tabell 5-8. Resultaten från SDG200 mätningar finns i bilaga, och resultaten för vatten- och sandvolymmeterprovet finns i bilaga 4. Samtliga registrerade deflektioner och spänningsnivåer för varje enskilt släppfall och punkt från lätt fallvikt återfinns i bilaga 3.

 Tabell 5-7 Mätresultat från statisk platt belastning vid försöksyta 2 (del B).

Punkt	Evı	E _{v2}	E_{v_2}/E_{v_1}	Punkt	Evı	E _{v2}	E_{v_2}/E_{v_1}
Nr	(MPa)	(MPa)	-	 Nr	(MPa)	(MPa)	-
1	30,70	153,70	5,01	9	64,80	202,90	3,13
2	28,30	141,20	4,99	10	60,50	155,80	2,58
3	38,00	160,60	4,23	11	58,00	178,60	3,08
4	57,20	173,90	3,04	12	64,60	174,10	2,69
5	33,80	148,90	4,41	13	29,00	136,10	4,69
6	59,70	175,60	2,94	14	49,40	161,20	3,27
7	70,10	182,70	2,61	15	61,20	158,90	2,60
8	Ingen			 16	79,30	164,90	2,08

Punkt	Evd(medel 28cm)	E _{vd(medel 58cm)}	E _{vd(medel 83cm)}	Punkt	Evd(medel 28cm)	E _{vd(medel 58cm)}	Evd(medel 83cm)
Nr	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	Nr	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
1	276,33	207,67	212,00	9	317,33	226,00	227,00
2	232,00	213,00	205,00	10	226,00	167,33	161,67
3	209,00	188,67	176,33	11	258,67	194,00	187,67
4	301,33	250,67	242,33	12	213,33	161,67	163,00
5	164,00	134,67	135,33	13	130,00	118,33	121,33
6	214,00	175,67	179,67	14	145,00	125,67	125,33
7	202,33	198,33	203,67	15	141,67	129,00	132,67
8	249,33	180,33	169,33	16	322,67	215,67	208,33

 Tabell 5-8 Mätresultat från lätt fallvikt vid försöksyta 2 (del B).

Del D

Mätresultaten från lätt fallvikt för del D redovisas i tabell 5-9. Mätresultaten från SDG200 redovisas i tabell 5-10 och mätresultaten från vatten- och sandvolymmeterprovet i tabell 5-11. Samtliga registrerade deflektioner och spänningsnivåer för varje enskilt släppfall och punkt från lätt fallvikt finns i bilaga 3. Beräkningar av torrdensitet, vattenkvot och packningsgrad för vatten- och sandvolymmeterprovet representeras i bilaga 4.

Tabell 5-9 Mätresultat från lätt fallvikt vid försöksyta 2 (da	el D)	ł.
--	-------	----

Punkt	E _{vd(medel 28cm)}	E _{vd(medel 58cm)}	E _{vd(medel 83cm)} (MPa)	
Nr	(MPa)	(MPa)		
1	109,33	106,33	105,33	
2	68,67	67,67	71,67	
3	78,00	69,67	75,33	
4	125,67	112,33	110,67	

Tabell 5-10 Mätresultat från sdg200-mätningar vid försöksyta 2 (del D).

Punkt	${\boldsymbol{\rho}}_{d}$	ρ _m	W	\mathbf{R}_{D}
Nr	(kg/m³)	(kg/m³)	(%)	(%)
1	2 042,3	2 203,6	7,9	88,6
2	1 971,5	2 112,1	7,1	85,5
3	2 030,1	2 187,4	7,8	88,1
4	2 082,1	2 254,2	8,3	90,3
Punkt	$\mathbf{\rho}_{d}$	W	R _D	
-------	---------------------	------	----------------	
Nr	(kg/m³)	(%)	(%)	
1	2 079,65	3,94	90,21	
2	2 059,99	1,85	89,36	
3	2 113,90	3,78	91,70	

Tabell 5-11 Mätresultat från vatten- och sandvolymmeterprov vid försöksyta 2 (del D).

5.3 Försöksyta 3

Packningsarbetet består av olika moment, efter varje moment utfördes mätningarna med SDG200 och lätt fallvikt. Slutligen gjordes mätningen med statisk plattbelastning på tre testpunkter på Testyta-1 och en mätning på Testyta-2. Vältöverfarter för varje moment för båda testytorna presenteras i tabell 5-12 och 5-13. Med överfart innebär i detta fall att välten körde fram. Fram och tillbaka till samma punkt där det började packas innebär därför två överfarter i det här fallet.

Med vibb och slät menas här då vältöverfarter med dynamisk och statisk packning. Det utfördes fem moment på Testyta-1 på grund av att materialet var torrare och det krävdes mer packningsarbete än i Testyta-2. Mätresultat för statisk plattbelastning för testyta 2 redovisas i tabell 5-14. Mätresultat från seismiska mätningar för Test-2 redovisas i bilaga 9. Samtliga registrerade deflektioner och spänningsnivåer för varje enskilt släppfall och punkt från lätt fallvikt samt medelvärdet av deformationsmodulen återfinns i bilaga 3. Beräkningar av torrdensitet, vattenkvot och packningsgrad för vatten- och sandvolymmeterprovet redovisas i bilaga 4. För Mätresultat från densitetsmätare/SDG200 för båda testytor presenteras i bilaga 5.

Testyta-1		Mätpu	ınkt
Moment	Välöverfarter	SDG200	lätt fallvikt
0	ingen	1,11,21,32	1,11,21
1	1 vibb	2,12,22,31	2,12,22
2	1 vibb	3,13,23,32,33	3,7,13,23
3	1 vibb och 2 slät	4,14,24	4,14,24
4	2 vibb och 2 slät	5,15,25	5,15,25
5	3 vibb och 3 slät	6,16,26	6,16,26

Tabell 5-12 packningsprocedur för försöksyta 3 vid testyta 1.

Testyta-2	Mät	punkt	
Moment	Välöverfarter	SDG200	lätt fallvikt
0	ingen	1	någonstans
1	1 vibb och slät	1,2,3,4,5,6	1,6
2	2 vibb och 2 slät	1,2,3,4,5,6	2,5
3	3 vibb och 2 slät	1,2,3,4,5,6	3,4,5,6

 Tabell 5-13 packningsprocedur för försöksyta 3 vid testyta 2.

 Tabell 5-14 Mätresultat från statisk plattbelastning för försöksyta 3 vid testyta 2.

Punkt	E _{v1}	E _{v2}	E _{v2} /E _{v1}	
Nr	(MPa)	(MPa)		
mitt	57,2	151,4	2,65	

6 Utvärdering och diskussion av resultat

I detta kapitel diskuteras och utvärderas kalkstenens packningsegenskaper och bärighet, med hjälp av mätresultaten från kontrollmetoderna med kunskap från både laboratoriemetoder och fältmätningar.

- Statisk plattbelastning (SPLT)
- Lätt fallvikt (LWD)
- Densitetsmätare/SDG200
- Vatten- och sandvolymmeterprov
- Ytvågsseismisk mätmetod

Statisk plattbelastning (SPLT)

Statisk plattbelastning är en av de vanligaste kontrollmetoderna och ett krav från Trafikverket. Vid utvärdering av bärigheten från statisk plattbelastning används Trafikverkets kravnivåer, se bilaga 7. I detta projekt har dock betydligt fler provningar utförts än vad som krävs.

Vid försöksyta 1 utfördes mätningarna på samtliga 25 mätpunkter och 9 mätpunkter klarade bärighetskraven, se tabell 5-1. Resultaten visar höga Ev_2 och låga Ev_1 värden vilket är tecken på att stora deformationer har inträffat vid första belastningen. Eftersom materialet redan deformerats och fått mer kompakt struktur kunde högre Ev_2 -värden åstadkommas under andra belastningen. Stor skillnad mellan Ev_2 och Ev_1 gör att kvoten blir stor mellan dem.

Mätresultaten för försöksyta 2 vid cirkulationsplatsen del B uppfyllde inte bärighetskraven för mätpunkterna 1,2,3,5 och 13, se tabell 5-7. Dessa mätpunkter låg vid släntkanten och förklaringen kan vara att välten inte riktigt kunde komma åt mätpunkterna. Resten av de 16 mätpunkterna uppfyllde bärighetskraven. I figur 6-1 visas E_{V1} och E_{V2} för att ge en bättre översikt.



Figur 6-1 Deformationsmoduler för mätpunkter vid försöksyta 1.



Figur 6-2 Deformationsmoduler för mätpunkter vid försöksyta 2 del-B.

En av de faktorer som gör att stora deformationer uppstår under första belastningscykeln på försöksyta 1 kan vara att bärlagrets övre del har luckrats upp under den dynamiska packningen. För att undvika uppluckring är det viktigt att materialet slätvalsas samt att det innehåller en vattenkvot så nära som möjligt den optimala vattenkvot som erhålls i laboratoriet. Det är även av stor betydelse att packningen inte sker med allt för hög amplitud, då även krossning kan undvikas.



Figur 6-3 Jämförelse mellan E_{v2} -värden för försöksyta 1 och försöksyta 2, del B. E_{v2} -värden för försöksyta 1 och 2 har sorterats om i storleksordning för att underlätta jämförelsen mellan dessa ytor, numreringen stämmer därför inte på mätpunkterna.

Om deformationsmodulen E_{V2} från försöksyta 1 jämförs med försöksyta 2, så har högre E_{V2} -värden uppnåtts i försökyta 1, se figur 6-3. Mätningarna på försöksyta 1 utfördes ungefär en vecka efter bärlagret hade packats, vilket kan bidragit till att materialet har hunnit torka under tiden och därmed blivit styvare på grund av cementeringseffekten (om finmaterialet från kalksten kommer i kontakt med vatten bildas det en hård kompakt struktur med tiden). Ett högre E_{V2} -värde för försöksyta 1 har uppnåtts jämfört med försöksyta 2 och 3. Mätningarna togs en dag efter materialet packats för försöksyta 2, mätningarna för försöksyta 3 togs samma dag som bärlagermaterialet packades. Denna cementeringseffekt kan försämras med ökande vattenhalter. Exempelvis vatten som kommer in i en vägkonstruktion av kalksten kan vara en orsak till att deformationer bildas senare i vägkonstruktionen, se figur 6-4.



Figur 6-4 Samband Ev2 (SPLT) och w sandvolymmeterprov för försöksytor.

Mätning 2 på L5-3 (som var icke godkänd vid mätning 1) visar att Ev_2 och Ev_1 ökar med 27 % respektive 119 % samt att kvoten Ev_2/Ev_1 minskar från 3,5 till 2,01. Därmed uppnås bärighetskraven. Detta visar att packning som avslutas med statisk packning kan bidra till högre bärighet.

Vid de första mätningarna på förstärkningslagret (försöksyta 2, del A) var sättningarna för stora och därför kunde det inte erhållas något mätresultat från dessa mätningar. En orsak kan vara de variationer av stenmaterialets gradering. Packning av sådant lager kräver mycket packningsarbete samt vatten för att uppnå den optimala packningsgraden. Detta problem uppmärksammades även under proctorförsök 2 då även det försöket krävde mycket vatten för att uppnå den optimala packningen, se kapital 4.2. Innan mätning 2 vattnades förstärkningslagret och packades ytterligare med tre vältöverfarter, och det kan konstateras att bättre resultat kunde erhållas från statisk plattbelastning.

Lätt fallvikt (LWD)

Mätresultaten visar stora variationer mellan mätpunkterna för försöksyta 1, där E_{vd} varierar mellan 73 MPa upptill 333 MPa (fallhöjd 83 cm), se tabell 5-3. Detta kan bero på att det översta delen av bärlagret har luckrats upp och att det kan ha förekommit variationer av lagertjockleken. En annan anledning kan vara att belastningsplattan inte får fullständigt kontakt med testytorna på grund av uppluckringen. För att få bort ytuppluckringen kan mätytorna statiskt packas. Variationer av denna storlek kunde inte ses i andra mätningen då materialet hade slätvalsats innan mätningarna påbörjades. E_{vd} -värden varierar mellan 152 MPa och 230 MPa (fallhöjd 83cm), se tabell 5-4.



Figur 6-5 Samband mellan deformationsmodul för lätt fallvikt, Evd, och vattenkvot, w, med sandvolymmeterprov för försöksytor.

 E_{vd} -värdena från lätt fallvikt och vattenkvot från sandvolymmeterprovet mellan olika försöksytor jämförs i figur 6-5. På grund av cementeringseffekten fås också högre deformationsmodul, E_{vd} , för försöksyta 1. Deformationsmodulen minskar med ökande vattenhalt enligt figur 6-4 och 6-5.

För undersöka fallhöjden att om har någon påverkan på deformationsmodulen, har korrelationssamband mellan E_{vd}-moduler från mätning 1 för försöksyta 1 med fallhöjderna 28, 58 och 83 cm undersökts, se figur 6-6. För varje korrelationssamband anges determinantkonstanten, R², som är ett mått på styrkan för det linjära sambandet. Om $R^2 = 1$ innebär att mätpunkterna sammanfaller exakt med korrelationslinjen. Tabell 6-1 visar att högsta determinantkonstanten, R^2 , uppnås mellan 58 och 83 cm. Determinantkonstanten mellan fallhöjderna är stor. Det uppkommer ändå en viss variation mellan fallhöjderna vilket kan bero på att uppluckrat material på ytan och ändringen av djupverkan som är direkt proportionellt med fallhöjden.

Tabell 6-1 Korrelation mellan olika fallhöjder för mätning 1vid försöksyta 1.

Fallhöjd	28-58 cm	28-83 cm	83-58 cm
R^2	0,90	0,88	0,94



Figur 6-6 Korrelationssamband mellan olika fallhöjder för mätning 1 vid försöksyta 1.



Figur 6-7 Korrelationssamband mellan olika fallhöjder för mätning 2 vid försöksyta 1.

Vid mätning 2 är E_{vd} - modulerna mer stabila vilket beror på att ytan hade slätvalsats innan mätningarna. Här uppnås högre determinantkonstant mellan fallhöjderna 58 och 83 cm jämfört med mätning 1 som har determinantkonstanten $R^2 = 0,99$. Figur 6-7 visar detta. Skillnaden mellan determinantkonstanterna för mätning 1 och 2 är inte så stor, men en viss ökning kan iakttagas efter slätvalsningen. Detta tyder på att ytor med mindre uppluckring ger resultat med mindre variationer mellan mätpunkterna med lätt fallvikt. Det beror på att belastningsplattan får bättre kontakt med testytan och även djupverkan ökar i en tätare lagerstruktur.

Densitetsmätare/sdg200

Densitetsmätningar vid försöksyta 1 gav ganska låga packningsgrader för mätning 1. Medelvärde för packningsgraderna var 77,5 % och medelvärde för vattenkvoten var 4,9 %. En orsak till den låga packningsgraden kan vara att materialet som användes i laboratoriet redan innehöll mer än 10 % finmaterialhalt. Detta kan ha gett en högre maximal torrdensitet i proctorförsök 1. Proctorförsök 3 i kapital 4.2 visar även att material som innehåller mycket finmaterialhalt ger en högre maximal torrdensitet. En annan orsak kan vara att det inte gick att få rimliga värden för C_u och C_c som fås från kornstorleksfördelningskurvan. Vid utförande av metoden har det tidigare nämnts att apparaten SDG200 använder maximal torrdensitet från proctorpackningen och C_u, samt C_c, från kornstorleksfördelningskurvan, se kapitel 3.2.3.

Vid försöksyta 2, cirkulationsplatsen, del B och D är värdena för packningsgraden högre än försöksyta 1, kajen. Detta kan bero på att materialet packades mer vid försöksyta 2 innan mätningarna påbörjades.



Figur 6-8 Jämförelse mellan packningsgrad från mätning 1 och 2 vid försöksyta 1.

Packningsgraden för mätning 1 respektive 2 jämförs för fyra mätpunkter vid försöksyta 1, detta visas i figur 6-8 samt i bilaga 5. Uppluckringen vid mätning 1 medför att packningsgraden blir lägre jämfört med mätning 2. Detta beror på förekomsten av hålrum vid mätning 1. Genom slätvalsning innan mätning 2 minskar hållrummen och resulterar i en högre packningsgrad.

Vatten- och sandvolymmeterprov

Resultaten för mätningarna vid försöksyta 1 visar att packningsgraden varierar mellan 92 % och 121 %. Variationen kan bero på att det uppgrävda materialet från de flesta mätpunkter torkades i mikrougn. Det kan ha medfört att materialet inte torkades riktigt ordentligt och därmed gav varierande packningsgrader. En annan orsak kan vara att vid utförandet av denna metod behövs det stor noggrannhet, speciellt med uppgrävning av material och ersättning med sand. Trots detta är mätresultaten mer rimliga jämfört med SDG200 för detta fall.

Det uppgrävda materialet från cirkulationsplatsen del D torkades i laborationsugn. Resultaten från dessa mätpunkter är mer trovärdiga, men uppfyller ändå inte packningskraven för bärlager, se tabell 5-11. Det kan dels bero på den höga maximala torrdensiteten erhållen i laboratoriet på grund av finmaterialhalten, och dels på grund av mänskliga fel under utförandet. Packningsgraden på del D varierar mellan 89 % och 92 %.

I försöksyta 2 vid cirkulationsplatsen del B är bärlagret packat med ytterligare två vältöverfarter, tre av fyra mätpunkter på denna del är över 95 %, vilket uppfyller kraven för packningsgrad för bärlager, se bilaga 4. Dessa såg ut att inte kunna packas mer. Högre packningsgrad skulle kunna ha uppnåtts om bärlagermaterialet 0/32 mm från Gotland för proctorförsök 1 innehållit mindre finmaterialhalt (mindre än 10 %) och fått en lägre maximal torrdensitet.

Försöksyta 3

Densitetsmätare/SDG200

Relationen mellan packningsgrad och antal vältöverfarter från densitetsmätningar för Testyta-1 och Testyta-2 visas i figur 6-9 respektive 6-10. På en välpackad mätpunkt uppmättes packningsgraden till 87,1 %. Denna packningsgrad ansågs som referensvärde. Mätresultaten för båda ytorna har beräknats om enligt referensvärdet och kallas för B-SDG200, de riktiga värdena benämns för A-SDG200. I figur 6-9 och 6-10 illustreras detta.



Figur 6-9 Samband mellan antal vältöverfarter och packningsgrad med densitetsmätare för testyta 1.

När ett material utsätts för belastning (i detta fall betraktas packningen som last), efter en viss spänningsnivå stabiliserar sig de permanenta deformationerna. Om man övergår till större belastning ökar deformationerna, se kapitel 2.2.7.1. Figur 6-9 visar ett sådant materials beteende vid 1vibb (andra). Deformationerna stabilisera sig upp till 2vibb+2slätt och får en tätare lagerstruktur. Efter denna punkt börjar större deformationer uppstå, vilket innebär att materialet börjar gå sönder eller att en omlagring av materialkornen sker. Även de omberäknade värdena B-SDG200 som ses i figur 6-9 uppfyller inte kravet på 95 %. Detta kan bero på att materialet såg ganska torrt ut och hade en vattenkvot på endast 2,5 %. I bilaga 5 innan packningen visas detta. Denna vattenkvot är mycket liten jämfört med den optimala vattenkvoten 4,6 % från proctorförsök 1erhållet i laboratoriet. Detta

kan leda till att bärlagermaterialet blir svårare att packa och luckras upp lättare, vilket kräver mer packningsarbete. Eftersom materialet har sämre nötningsegenskaper kan mer finmaterial bildas under packningen, se kapitel 4.4. En annan orsak kan vara att den maximala torrdensiteten vid proctorförsök 1 i laboratoriet var ganska högt. Detta påverkade materialbeskrivningen för SDG200 som resulterade i låga packningsgrader.



Figur 6-10 Samband mellan antal vältöverfarter och packningsgrad med densitetsmätare för testyta 2.

För Testyta-2 börjar materialets permanenta deformationer stabilisera sig mellan 1-vibb+1slätt och 3vibb+3slätt. Efter 3vibb+3slätt kan större permanenta deformationer börja uppstå. Materialet börjar gå sönder eller en omlagring av materialkornen sker om materialet forsätter att packas, se figur 6-10. Materialet för Tesyta-2 har högre vattenhalt jämfört med material för Testyta-1. Packningsgrad över 95 % som har uppnåtts vid 1vibb+ 1slät är inte rimlig, denna packningsgrad erhålls enligt de omberäknade värdena med hjälp av B-SDG200. Enligt sandvolymmeterprovet hade bärlagermaterialet för Testyta-2 en vattenkvot på ungefär 3,75 %, se bilaga 4 försökyta 3 testyta-2. Denna vattenkvot ligger under den uppnådda optimala vattenkvoten 4,6 % erhållet vid proctorförsök1 i laboratoriet. Om detta material hade haft en vattenkvot på 4,61 % skulle det inte ha krävts mycket packningsarbete för att uppnå den optimala packningsgraden mellan 95 och 100 % för bärlagret, vilket även skulle innebära minskade kostnader. En slutsats som kan dras är att det är viktigt att material som packas ska innehålla rätt vattenkvot. Den bästa eller maximala packningsgraden uppnås vid 99,1%, se figur 6-10, vilket stämmer ganska bra med packningsgraden 97,3% erhållet vid sandvolymmeterprovet.

Lätt fallvikt

Det är inte stor skillnad mellan 0-vibb och 3-vibb+3-slät för Testyta-1. Ökningen är endast 10 MPa och kan bero på att materialet såg torrare ut, och gick därmed lättare att luckra upp under packningen. Vid 1-vibb och 2vibb+2-slät minskar E_{vd} -modulen. Den stiger inte efter varje vältöverfart som förväntat, se figur 6-11. För Testyta-2 packades materialet direkt när det hämtades från täkten. Man kan se att E_{vd} -modulen stiger efter varje vältöverfart, och att materialet inte luckras upp lika mycket som i Testyta-1, se figur 6-12. Detta är på grund av att materialet innehåller högre vattenkvot samt att det används mer statisk packning.



Figur 6-11 Samband mellan E_{vd} -modul antal vältöverfarter med lätt fallvikt för testyta 1.



Figur 6-12 Samband mellan E_{vd} -modul antal vältöverfarter med lätt fallvikt för försöksyta 3 testyta 2.

I figur 6-12 visas packningsgraden för testyta-2. Packningsgraden vid 3vib+3slät har tagits från sandvolymmeterprovet för två mätpunkter med medelvärdet 96,3 %. Andra packningsgrader har beräknats enligt lutnigen av kurvan. Vid 3vib+3slät är packningsgraden 96,3 %, det ska inte glömmas att bärlagermaterialet i laboratoriet innehöll ungefär 10 % finmaterialhalt som leder till lägre packningsgrad i fält. En annan orsak kan vara att materialet i fält hade en vattenkvot på 3,8 % enligt sandvolymmeterprovmätningarna, se bilaga 4. Det leder i sin tur till mer packningsarbete. Den optimala packningsgraden skulle ligga mellan 2vibb+2slät och 3vibb+3slät, ifall materialet för proctorförsök 1 i laboratoriet innehöll en finmaterialhalt mellan 2-7% och materialet i fält innehöll den optimala vattenkvoten 4,6 %.

Statisk plattbelastning

Kvoten E_{V2}/E_{V1} för Testyta-2 för en mätpunkt uppmättes till 2,65, se tabell 5-14. På Testyta-1 utfördes mätning på tre stycken mätpunkter. Alla mätningar för samtliga mätpunkter för Testyta-1 och Testyta-2 uppfyller Trafikverkets bärighetskrav, se bilaga 7. Om Testyta-1 jämförs med Tesyta-2 efter att resultat erhållits från statisk plattbelastning, kan det ses att vattenkvotens inverkan är stor på ett material under packning. Det gick mer packningsarbete åt Testyta-1 jämfört med Testyta-2 eftersom Testyta-1 innehöll mindre vattenhalt. Ökat packningsarbete medför givetvis ökade kostnader.

Vatten- och sandvolymmeterprov

Packningsgrad och vattenkvot för två utvalda mätpunkter för Testyta-2 mättes till 97,3% och 95,3% respektive 3,9 % och 3,5 %, se bilaga 4 försöksyta 3. Ett gott resultat kunde erhållas här med denna metod eftersom ytan var välpackat och fri från löst och stört stenmaterial som skulle kunna påverka resultatet.

Ytvågsseismik

I tabell 6-2 redovisas deformationsmodulen, E_{max} , för tre seismiska mätningar. E_{V2} är deformationsmodulen från statisk plattbelastning och deformationsmodulen, E_{max} , erhålls vid seismiska mätningar. Skrymdensiteten för mätning 1-opackat är uppskattad och för de andra två mätningarna är skrymdensiteten uppmätt från sandvolymmeterprovet. Töjningsnivån vid ytseismiska mätningar är mycket liten, vilket medför en högre deformationsmodul fås jämfört med statiska plattbelastningsmätningar.

Testyta-2									
Material	Lager	V _R	V_{P}	Vs	ρ _m	v	E _{max}	E _{v2}	E _{V2} /E _{max}
		m/s	m/s	m/s	kg/m ³		MPa	MPa	
1-opackat	BL	142	276	153,69	2041	0,275	123	80	0,65
2-packat	BL	185	400	198,23	2322	0,337	214	151	0,71
3-packat	BL	212	429	228,45	2322	0,302	316	151	0,48

 Tabell 6-2 Beräkningar för seismiska mätningar för försöksyta 3 testyta 2.



Figur 6-13 *Tid- och avståndsdiagram för ytvågsseismik mätning 1-opackat bärlager material för försöksyta 3 testyta 2.*

Figur 6-13 beskriver V_P och V_R för mätning 1-opackat material. För denna mätning uppmätts lägre V_P och V_R, vilket kan bero på att materialet inte har en tät lagerstruktur och då går vågen långsammare genom materialet. Ju tätare en lagerstruktur, desto snabbare går vågen genom materialet. På grund av detta erhålls ett lägre E_{max} . Kvoten E_{V2}/E_{max} är 0,65.



Figur 6-14 *Tid- och avståndsdiagram för ytvågsseismik mätning 2-packat bärlager material för försöksyta 3 testyta 2.*

Mätning 2 och 3 utfördes på packat material. Olika mätresultat erhölls för de båda mätningarna trots att mätningarna utfördes under samma förhållande. Orsaken till lägre deformationsmodul, E_{max} , för mätning 2 än mätning 3 kan bero på att V_P och V_R avgörs genom att för hand bestämma lutningen i avstånd/tidsdiagram i fältdatorn, se figur 6-14 och figur 6-15. Kvoten E_{V2}/E_{max} för mätning 3 uppmättes till 0,48.



Figur 6-15 *Tid- och avståndsdiagram för ytvågsseismik mätning 3 packat bärlager material för försöksyta 3 testyta 2.*

Korrelationssamband mellan kontrollmetoder

I denna del undersöks eventuella samband mellan kontrollmetoderna. Undersökningen av korrelationssambandet baseras på:

- 1. Deformationsmodul, E_{v2} , från SPLT och dynamisk deformationsmodul, E_{vd} , från LWD för försökyta 1 och 2. För denna analys används medelvärden av tre slag för varje fallhöjd från LWD.
 - Jämförelse mellan E_{V2} och E_{vd} , fallhöjd 83 cm.
 - Jämförelse mellan Ev2 och Evd, fallhöjd 58 cm.
 - Jämförelse mellan Ev2 och Evd, fallhöjd 28 cm.



Figur 6-16 Korrelationssamband mellan E_{v2} (SPLT) och Evd (LWD) för fallhöjd 83 cm vid försöksyta 1.



Figur 6-17 Korrelationssamband mellan E_{V2} (SPLT) och Evd (LWD) för fallhöjd 58 cm för försöksyta 1.



Figur 6-18 Korrelationssamband mellan E_{V2} (SPLT) och Evd (LWD) för fallhöjd 28 cm vid försöksyta 1.

Tabell 6-3 Korrelationssamband mellan SPLT och LWD för försöksyta 1.

	E _{vd(28)} -E _{V2}	E _{vd(58)} -E _{V2}	E _{vd(83)} -E _{V2}
R^2	0,007	0,03	0,04

Den lägsta determinantkonstanten, R^2 , i försöksyta 1 som erhålls mellan SPLT och LWD, är för fallhöjden 28 cm med determinantkonstanten $R^2 = 0,007$. För fallhöjderna 83 cm och 58 cm är determinantkonstanten $R^2 = 0,04$ respektive 0,03. I det här fallet finns inget samband mellan kontrollmetoderna för de tre olika fallhöjderna. Det föreligger en trend med ökande R^2 -värde vid ökande fallhöjd, vilket kan bero på ökningen av djupverkan.



Figur 6-19 Korrelationssamband mellan E_{V2} (SPLT) och Evd (LWD) för fallhöjd 83 cm för försöksyta 2 vid cirkulationsplatsen del-B.



Figur 6-20 Korrelationssamband mellan E_{V2} (SPLT) och Evd (LWD) för fallhöjd 58 cm för försöksyta 2 vid cirkulationsplatsen del-B.



Figur 6-21 Korrelationssamband mellan E_{V2} (SPLT) och Evd (LWD) för fallhöjd 28 cm för försöksyta 2 vid cirkulationsplatsen del-B

Tabell 6-4 Korrelationssamband mellan SPLT och LWD för försöksyta 2 vid cirkulationsplatsdel B.

	E _{vd(28)} -E _{V2}	E _{vd(58)} -E _{V2}	E _{vd(83)} -E _{V2}
R^2	0,27	0,23	0,27

Determinantkonstanten på del B som erhålls för fallhöjden 28 och 83 cm är $R^2 = 0,27$ och för fallhöjden 58 cm är $R^2 = 0,23$. Om man jämför korrelationssambanden mellan försöksyta 1 och försöksyta 2, finns det starkare samband mellan SPLT och LWD i försöksyta 2 än försöksyta 1. Anledningen kan vara att testytan vid försöksyta 1 är ostabil på grund av materialets uppluckring.

- 2. Jämförelse mellan SDG200 och sandvolymmeterprov.
 - Jämförelse mellan packningsgraden för försöksyta 1.
 - Jämförelse mellan packningsgraden för försöksyta 2.



Figur 6-22 Korrelationssamband för packningsgrad R_D mellan sandvolymmeterprov och SDG200 för försöksyta 1.



Figur 6-23 Korrelationssamband för packningsgrad R_D mellan sandvolymmeterprov och SDG200 för försöksyta 2 vid cirkulationsplatsen del-B.

Tabell 6-4 Korrelationssamband mellan sandvolymmeterprov och SDG200 för packningsgrad för försöksyta 1 och 2.

	Försöksyta 1	Försöksyta 2
R^2	0,17	0,06

Determinantkonstanten för försöksyta 1 och försöksyta 2 är $R^2 = 0,17$ respektive $R^2 = 0,06$. I detta fall finns svagt samband mellan sandvolymmeterprovet och SDG200 för båda ytorna. SDG200 mäter packningsgraden betydligt mindre än sandvolymmeterprovet, det är stor skillnad på packningsgraden mellan de båda kontrollmetoderna. Detta kan bero på att det uppgrävda materialet för försöksyta 1 torkades i mikrougn, vilket kan ha resulterat i att proven inte torkades ordentligt som i sin tur gett upphov till en hög packningsgrad. För SDG200 användes materialbeskrivning från proctorpackningen proctorförsök 1 med ganska hög torrdensitet som resulterade i en låg packningsgrad. Dessa två orsaker kan vara anledningen till att det inte finns något starkt sambad mellan sandvolymmeterprovet och SDG200 för försöksyta 1. Ett samband för försöksyta 2 kan inte erhållas eftersom mätpunkterna är för få.

Kvoter mellan LWD och SPLT

I tabell 6-5 och 6-6 presenteras kvoter mellan resultaten från lätt fallvikt, statisk plattbelastning och standardavvikelse som ett mått på spridningen. Om de olika värdena ligger samlade nära medelvärdet blir standardavvikelsen låg, medan värden som är spridda långt över och under medelvärdet ger en hög standardavvikelse. Enligt tabellerna nedan tas det fram samband mellan E_{vd} -värdena för alla fallhöjderna och E_{v2} . Sambandet kan skrivas som E_{vd} = (1,0–1,4) E_{v2} . I sambandet används medelvärdet av deformationsmodulerna.

punkt	E_{vd}/E_{V2}	E_{vd}/E_{V2}	E_{vd}/E_{V2}
Nr	28 cm	58 cm	83 cm
1	1,8	1,4	1,4
2	1,6	1,5	1,5
3	1,3	1,2	1,1
4	1,7	1,4	1,4
5	1,1	0,9	0,9
6	1,2	1,0	1,0
7	1,1	1,1	1,1
9	1,6	1,1	1,1
10	1,5	1,1	1,0
11	1,4	1,1	1,1
12	1,2	0,9	0,9
13	1,0	0,9	0,9
14	0,9	0,8	0,8
15	0,9	0,8	0,8
16	2,0	1,3	1,3
Standardavvikelse	0,3	0,2	0,2
medelvärdet	1,4	1,1	1,0

Tabell 6-5 Kvoter mellan lätt fallvikt och statisk plattbelastning för försöksyta 2 del B.

punkt	E_{vd}/E_{V2}	E_{vd}/E_{V2}	E_{vd}/E_{V2}
Nr	28 cm	58 cm	83 cm
L1-1	0,7	0,6	0,7
L1-2	1,7	1,5	1,6
L1-3	1,9	1,4	1,4
L1-4	1,8	1,6	1,5
L3-1	2,0	1,4	1,6
L3-2	1,3	1,1	1,1
L3-3	1,7	1,5	1,3
L3-4	1,0	0,8	0,9
L5-1	1,0	0,9	0,9
L5-2	0,9	0,9	0,9
L5-3	1,4	1,1	1,1
L5-4	0,9	0,7	0,9
L7-2	1,9	1,8	1,7
L7-3	0,4	0,4	0,4
L7-4	1,2	1,1	1,1
L9-1	1,6	1,3	1,5
L9-2	1,6	1,5	1,5
L9-3	0,8	0,7	0,7
L9-4	0,6	0,5	0,6
L11-1	1,8	1,7	1,6
L11-2	1,3	1,1	1,0
L11-3	1,9	1,4	1,4
L11-4	1,1	1,1	1,2
Standardavvikelse	0,5	0,4	0,4
Medelvärde	1,3	1,1	1,2

 Tabell 6-6 Kvoter mellan lätt fallvikt och statisk plattbelastning för försöksyta 1.

7 Slutsatser

.

I följande kapitel dras slutsatser utifrån resultaten från laboratoriemetoderna och kontrollmetoderna.

Laboratoriemetoder

- En jämförelse av kalksten med de olika kornstorleksfördelningarna 0/32, 2/32 och 0+/32 mm, visar att en ändring i materialets gradering kan påverka packningsresultatet. Därför är det viktigt att material i fält ska vara så välgraderat som möjligt vid packning
- Material med mindre finmaterialhalt kan i fält inte hålla lika mycket vatten jämfört med undersökningar i laboratoriet, eftersom packning görs i en packningscylinder. Därför är det svårare att uppnå den optimala packningsgraden, eftersom tillfört vatten dräneras ur materialet. Dessutom ökar risken för nedkrossning om materialet packas för mycket.
- Materialets optimala vattenkvot och maximala torrdensiteten är beroende av materialets kornstorleksfördelning och packningsenergi.
- Vid ökning av finmaterialhalten ökar materialets optimala vattenkvot och den maximala torrdensiteten.
- Goda packningsresultat kan uppnås om materialet i fält har den optimala vattenkvoten från proctorpackningen
- Kalksten från Gotland uppfyller kravet för bärlager med Los Angelesmetoden.
- Kalkstenen uppfyller ej kravet för bärlager med Micro-Devalmetoden, men bör godkännas om statisk plattbelastning är godtagbar.

Fältmätningar

- Låga E_{V1} värden från mätning 1 från statiska plattbelastningsmätningar tyder på att det finns möjlighet att packa materialet ytterligare. Ett packningsarbete som avslutas med statisk packning kan ge högre E_{V1} , vilket förbättrar bärigheten av bärlager.
- Fallhöjden har inte stor påverkan på E_{vd}-modulen på jämna ytor med kontrollmetoden med lätt fallvikt. Vid mätningar på ytor med löst stenmaterial kan E_{vd}-modulen fås med stora variationer mellan olika fallhöjder och mätpunkter. Mätnoggrannheten kan därför bli mindre god på sådana ytor.
- Materialets egenskaper som bestäms med densitetsmätare SDG200 har stora variationer, men den är å andra sidan en snabb och användarvänlig metod. Värdena används för att jämföra materialets egenskaper mellan mätpunkterna.
- Mätningar med sandvolymmeterprovet kräver mycket noggrannhet vid utförandet. Det är svårare att utföra metoden på obundna granulära material, till exempel för bärlager som kan leda till felaktiga volymberäkningar.
- Packning av material med lägre vattenhalt kräver mer packningsarbete och luckras lättare upp under vibrationspackningen.

Överbyggnad

- Enligt E_{V2} från statiska plattbelastningsmätningar kan hög bärighet uppnås i vägkonstruktioner byggda med kalksten.
- Hanteringen av material från krossning i täkten till och med arbetsplatsen är viktig. Dålig hantering ändrar materialets egenskaper som till exempel vattenkvot och gradering.

8 Rekommendationer

I detta kapitel ges rekommendationer inför fortsatta studier samt för packning och hantering av Gotlands kalksten som bärlagermaterialet.

Inför fortsatta studier

- Kunskaper om materialets egenskaper kan utvecklas genom fler laboratorietester, till exempel Gyratorytest att bestämma krossningen av materialet under olika belastningar.
- Prover kan tas efter varje välöverfart för kornstorleksfördelningskurvan i syfte att se hur mycket material som krossas under packningen i fält.
- Genomföra samma slags tester som på de Testytorna fast på större area med stegvis ökande antal överfarter. Ett specifikt diagram kan då fås för kalkstenen bärighetsutveckling.
- Innan mätningar med lätt fallvikt utförs på ytor med löst stenmaterial, kan ytan slätpackas för att erhålla ett bättre resultat. Vid behov kan ytan vattnas innan packning.

Inför packning och hantering av material i fält

- Materialet som ska packas ska det innehålla ungefär det vattenkvot som erhålls från proctorpackningen. I detta fall 4,6 % för kalksten.
- Det är viktigt att material ska vara välgraderat. Hantering av material som ändrar gradering bör undvikas, till exempel på täkten där materialet tas ifrån.
- Vid packning av granulära material som innehåller låg finmaterialhalt kan extra vatten användas för att underlätta packningsarbetet eller genom att tillsätta finmaterial.
- Packningen bör avslutas med en eller två välöverfarter med statisk packning. Detta för att få bort det lösa stenmaterialet som luckrats upp under den dynamiska packningen, därmed kan en tätare lagerstruktur erhållas.

- Eftersom kalkstenen har sämre nötningsegenskaper, skall det inte packas med allt för höga amplituder vid dynamisk packning för att undvika nötning.
- Material med höga finmaterialhalter bör inte packas vid optimal vattenkvot, eftersom det finns risk för att man stänger in vatten i materialet och skapar ett portryck som i sin tur försvårar packningsarbetet oerhört.

Erfarenheter från studien.

- Det sätt ett material neddelas på inför laboratorietester har stor betydelse, om det förekommer stor variation på kornstorleksfördelningen mellan proven kan det påverka resultatet.
- Inför proctorpackningen bör det antas en hög och en låg vattenkvot som i sin tur kan ge indikationer på inom vilka gränser resten av vattenkvoterna kan antas.
- Innan neddelning av materialet sker i den s.k. neddelningsapparaten, bör en neddelningsschema utföras.
- Ytor med löst stenmaterial kan göra att mätresultaten mellan mätpunkterna varierar mycket med den lätta fallvikten.
- Stor noggrannhet krävs vid utförande av sandvolymmeterprovet, särskilt då det uppgrävda materialet ersätts med sand.
- Eftersom det inte fanns någon motvikt som klarade de spänningsnivåer med statisk plattbelastning, svetsades en balk på bakdelen av hjullastaren.
- Ju finare sand som används för att jämna testytan, desto bättre resultat fås med statiska plattbelastningsmätningar. Ytan bör vara fri från löst stenmaterial för att erhålla ett gott resultat.
- Det tog ungefär 30 minuter att utföra en mätning med statisk plattbelastning. Det var den mest tidskrävande metoden i denna studie.

9 Referenser

AMA anläggning 07-Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten. Svensk byggtjänst 2008. <u>www.byggtjanst.se</u>

Braja M. Das (2006). "Principles of Geotechnical Engineering". *Thomson*, Toronto, USA, ISBN – 13:978-0-495-43870-0, ISBN – 10:0-495-43870-7

Contractors Depot. Soil compaction handbok (nerladdad, 2011) http://www.concrete-catalog.com/soil_compaction.html

Dynapac (1989). "Compaction and paving theory and Practice" *Dynapac AB*, Helsingborg, Sweden.

European standard (2004). Unbound and hydraulically bound mixtures – part 2: Test method for the determination of the laboratory reference density and water content – proctor compaction. *European committee for standardization* EN 13286-2:2004: E

FAS Asfaltboken, (2002). Föreningen för asfaltbeläggningar i Sverige-FAS 2002

Forssblad L. (1981). "Vibratory soil and rock fill compaction". Dynapac Maskin AB Solna, Stockholm, Sverige.

Forssblad L. (2000). "Packning, handbok och packning av jord och bergmaterial". *Svensk byggtjänst*, Stockholm, Sverige, ISBN: 91-7332-932-0

Hannson J. (2003). Marknadsföringsmaterial, *Skanska Asfalt och Betong*, Stockholm, Sverige.

Hansbo S. (1975). "Geoteknik Jordmateriallära", Chalmers Tekniska Högskola – AB Jacobson & Widmark, Lidingö, Stockholm, Sverige, ISBN 91-20-04336-8

Hansbo S. (1990). "Geoteknik, Jordförstärkning" Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige

Harold N. Atkins (1996). "Higway materials, soils, and concretes". *Onandiaga Community College*, New Jersey, USA, ISBN 0-13-212862-4

Hellman F. (VTI notat 7-2011). Packning av obundna material i vägkonstruktioner. *VTI*, Linköping, Sverige.

Hon P. (2010). "Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material". Examensarbete. *Institution för Teknik och samhälle, Avdelning för trafik och väg*, lunds Tekniska Högskola, Lund, Sverige. CODEN:LUTVDG/(TVTT-5165)1-128/2010 ISSN 1653-1922

Lekarp F. (1999). Resilient and permanent deformation behavior of unbound aggregates under repeated loading. Doktorsavhandling. Avdelning för Division of Highway Engineering, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige.

Lindberg D. & Lindfors R. (2008)."Bärighetskontroll av obundna granulära material". Examensarbete. *Institutionen för bygg- och miljöteknik, Avdelning för geologi- och geotekning Gruppen väg och trafik*, Chelmers Tekninksa Högskola, Göteborg, Sverige. 2008:23

SGF notat 1:2004. Arbetsgrupp: Berggren Bo, Bengtsson Jim, Forssblad Lars, Hagert Christer, Hermelin Klas, Nordfelt Ingmar, Sandström Åke och Svenningsson Peter. Packning och packningskontroll av blandkorniga och finkorning jord. *SGF svenska geotekniska föreningen* notat 1:2004

Stenlid L. (1996). Slutrapport SBUF projekt nr 2135, Klassificering av bergarter med Los Angeles - trumma. *Skanska Mellansverige AB väglaboratoriet*, Bålsta, Sverige.

Stenlid L. (2000). Slutrapport SBUF projekt nr 5002, utvärdering av Micro-Devalmetoden. *Skanska Sverige AB vägteknisk centrum Nord*, Bålsta, Sverige.

Svensk standard SS-EN 1097-1 (2004). Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 1: Bestämning av nötningsmotstånd (Micro-Deval). *Swedish standards institute*, fastställd 1997-01-24.

Svensk standard SS-EN 1097-2 (2003). Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 2: Metoder för bestämning av motstånd mot fragmentering. *Swedish standards institute*, fastställd 1998-10-30.

Sälförs G. (2001) "Geotenik, Jordmateriallära, jordmekanik. Göteborg, Sverige, ISBN: 8862082

Werkmeister S. (2003). Permanent deformation behavior of unbound grnular materials in pavement construction. Doktorsavhandling. *Avdelning för pavement engineering*, Dresdens Tekniska Högskola. Dresden, Tyskland, ISBN: 9789513871369

VVMB 1993. Bestämning av bärighets egenskaper med statisk plattbelastning. metodbeskrivning 606:1993. *Trafikverket (vägverket)* publikation 1993:19.

VVTBT 2009. Obundna lager. Trafikverket (vägverket) publikation 2009:117.

	Proctorförsök 0/32 mm									
prov	w _o	m _{agg}	m _{vatten}	m _{plåt}	m _{fukt+plåt}	m _{torr+plåt}	m _{vatten} /m _{torr}	m _{torr} /volymcylinder		
Nr	(%)	(kg)	(g)	(kg)	(kg)	(kg)	w (%)	ρ₄(kg/m³)		
1	4	6,60	264	1,78	6,66	6,48	3,83	2 215,34		
2	5	6,39	320	1,28	6,39	6,17	4,61	2 305,22		
3	6	6,60	396	0,51	5,67	5,39	5,72	2 301,12		
4	6	6,37	382	0,80	5,94	5,66	5,91	2 290,84		
5	7	6,60	462	2,28	7,40	7,09	6,38	2 267,03		
6	8	6,60	528	1,47	6,61	6,28	6,98	2 266,04		
7	9	6,60	594	1,59	6,63	6,27	7,68	2 206,24		

Bilaga 1. Beräkningar för proctorkurvor
	Proctorförsök 2/32 mm												
prov W ₀ m _{agg} m _{vatten} m _{plåt} m _{fukt+plåt} m _{torr+plåt} m _{vatten} /m _{torr} m _{torr} /volymcyline													
Nr	(%)	(kg)	(g)	(kg)	(kg)	(kg)	w (%)	ρ _d (kg/m³)					
1	3,00	6,97	209	1,79	6,65	6,51	3,06	2 226,05					
2	4,00	7,21	288	2,28	7,38	7,18	4,18	2 309,66					
3	4,80	6,69	321	1,79	7,04	6,74	4,87	2 333,19					
4	5,50	6,86	377	1,28	6,43	6,15	5,65	2 298,99					
5	10,00	6,98	698	1,79	6,80	6,39	8,92	2 168,89					

			Proct	orförsö	ök 0+/32	mm hög f	inhaltmaterial					
prov	prov W ₀ m _{agg} m _{vatten} m _{plåt} m _{fukt+plåt} m _{torr+plåt} m _{vatten} /m _{torr} m _{torr} /volymcylinder											
Nr	(%)	(kg)	(g)	(kg)	(kg)	(kg)	w (%)	ρ _d (kg/m³)				
1	3,00	6,97	209	1,79	6,65	6,51	3,06	2 226,05				
2	4,00	7,21	288	2,28	7,38	7,18	4,18	2 309,66				
3	4,80	6,69	321	1,79	7,04	6,74	4,87	2 333,19				
4	5,50	6,86	377	1,28	6,43	6,15	5,65	2 298,99				
5	10,00	6,98	698	1,79	6,80	6,39	8,92	2 168,89				

	Tonalistisk (Granit), Vällstatäkten												
prov	Wo	m _{agg}	m _{vatten}	m _{plåt}	m _{fukt+plåt}	m _{torr+plåt}	m _{vatten} /m _{torr}	m _{torr} /volymcylinder					
Nr	(%)	(kg)	(g)	(kg)	(kg)	(kg)	w (%)	ρ _d (kg/m³)					
1	6,00	5,96	358	1,28	6,22	5,97	5,33	2 210,77					
2	8,00	5,96	477	2,29	7,47	7,16	6,26	2 300,51					
3	12,00	5,96	377	0,53	5,63	5,30	6,78	2 253,00					
4	14,00	5,96	698	0,45	5,46	5,10	6,91	2 197,00					
5	10,00	5,96	596	1,28	6,22	5,88	7,54	2 165,83					

Bilaga 2. Kornstorleksfördelningskurvor för tre olika försök

Kornstorleksfördelningskurva 1 för 0/32 mm





Kornstorleksfördelningskurva 2 för 2/32 mm



Kornstorleksfördelningskurva 3 för 0+/32 mm med hög finmaterialhalt

Bilaga 3. Lätt fallvikt

Försöksyta 1

Mätning 1 hamnen

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
L1-1	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
	28	1	2,1	29,9	36	0	77	102
		2	2,1	29,9	35	0	77	103
		3	2,1	29,9	36	0	77	102
	58	1	3,6	51,3	29	0	138	98
		2	3,6	51,6	30	0	135	100
		3	3,6	51,6	29	0	136	100
	83	1	4,9	69,4	28	0	174	105
		2	4,9	69,2	28	0	177	103
		3	4,9	69,6	28	0	174	106
L1-2								
	28	1	2,2	30,6	35	0	26	306
		2	2,2	30,9	35	0	28	292
		3	2,2	31,1	35	0	28	296
	58	1	3,7	51,9	29	0	54	251
		2	3,7	52,0	30	0	53	259
		3	3,7	52,2	30	0	53	260
	83	1	4,8	68,4	28	0	73	248
		2	4,8	68,4	23	0	51	352
		3	4,8	68,3	28	0	72	251
L1-3								
	28	1	2,0	29,0	35	0	34	224
		2	2,0	27,6	34	0	22	338
		3	1,9	27,2	34	0	27	267
	58	1	3,6	51,5	30	0	66	206
		2	3,7	51,8	30	0	65	210
		3	3,7	51,7	30	0	65	209
	83	1	4,8	68,4	28	0	87	208
		2	4,8	68,4	28	0	85	213
		3	4,8	68,2	28	0	89	201

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L1-4								
	28	1	2,2	30,5	35	0	33	247
		2	2,2	30,8	35	0	32	254
		3	1,6	22,7	39	0	18	338
	58	1	3,6	51,3	29	0	58	234
		2	3,6	51,6	30	0	55	248
		3	3,6	51,5	30	0	53	254
	83	1	4,8	68,1	27	0	77	231
		2	4,6	65,0	28	0	73	234
		3	4,7	66,1	28	0	74	234
L3-1								
	28	1	2,1	30,0	35	0	20	396
		2	2,2	30,5	36	0	25	322
		3	2,2	30,5	36	0	25	327
	58	1	3,6	51,6	30	0	47	289
		2	3,7	52,5	31	0	48	288
		3	3,6	50,9	29	0	48	278
	83	1	4,9	68,7	27	0	66	275
		2	4,9	69,4	28	0	66	278
		3	4,9	68,8	27	0	66	276
L3-2								
	28	1	2,1	30,1	35	0	30	267
		2	2,2	30,5	36	0	29	279
		3	2,2	30,6	36	0	30	266
	58	1	3,7	51,9	29	0	61	222
		2	3,7	51,7	29	0	59	232
		3	3,7	51,9	29	0	62	222
	83	1	4,8	68,5	27	0	80	224
		2	4,9	68,8	27	0	80	225
		3	4,9	69,0	28	0	79	229

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L3-3								
	28	1	2,1	29,8	35	0	25	316
		2	2,1	30,2	36	0	24	326
		3	2,1	29,7	35	0	25	315
	58	1	3,7	51,7	29	0	49	277
		2	3,7	51,7	29	0	48	287
		3	3,7	51,8	29	0	49	279
	83	1	4,8	68,6	27	0	77	235
		2	4,8	68,6	27	0	76	239
		3	4,7	66,8	28	0	70	252
L3-4								
	28	1	2,1	30,1	35	0	57	138
		2	2,1	29,9	35	0	55	143
		3	2,2	30,5	35	0	57	141
	58	1	3,6	50,9	29	0	125	107
		2	3,6	51,5	29	0	117	116
		3	3,6	51,4	29	0	112	121
	83	1	4,8	68,5	27	0	154	117
		2	4,9	68,8	27	0	152	119
		3	4,9	68,8	27	0	143	126
L5-1								
	28	1	2,1	30,3	35	0	41	193
		2	2,1	30,3	35	0	39	206
		3	2,2	30,4	36	0	39	205
	58	1	3,6	51,3	29	0	79	171
		2	3,6	51,5	29	0	77	176
		3	3,6	51,1	29	0	77	175
	83	1	4,9	68,8	27	0	99	183
		2	4,9	69,1	27	0	102	178
		3	4,9	69	27	0	102	179

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L5-2								
	28	1	1,9	27,2	35	0	57	126
		2	2,1	29,5	35	0	38	207
		3	2,1	29,5	35	0	33	233
	58	1	3,7	51,8	29	0	72	190
		2	3,7	52,1	30	0	68	202
		3	3,7	52	29	0	72	191
	83	1	4,9	69,4	27	0	92	198
		2	4,9	69,4	27	0	92	198
		3	4,9	69,4	27	0	88	208
L5-3								
	28	1	2,1	30	35	0	34	232
		2	1,6	22,5	38	0	21	283
		3	2,1	30,1	35	0	30	264
	58	1	3,7	51,7	29	0	73	186
		2	3,7	51,8	29	0	69	199
		3	3,7	51,9	29	0	64	213
	83	1	4,9	68,9	27	0	91	200
		2	4,9	68	27	0	89	203
		3	4,9	68,8	27	0	87	208
L5-4								
	28	1	2,1	29,9	35	0	40	197
		2	2,1	29,9	35	0	38	206
		3	2,1	30,2	35	0	35	224
	58	1	3,6	51,1	29	0	81	167
		2	3,6	51,5	30	0	74	184
		3	3,6	51,5	29	0	76	179
	83	1	4,8	68,5	27	0	89	203
		2	4,8	67,8	27	0	86	208
		3	4,8	68,2	27	0	83	215

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L7-1								
	28	1	2	28,4	34	0	31	239
		2	2	28,7	35	0	30	251
		3	2	28,6	34	0	30	252
	58	1	3,6	50,7	29	0	66	201
		2	3,6	50,9	29	0	65	205
		3	3,6	51,2	29	0	65	209
	83	1	4,9	69,2	27	0	89	204
		2	4,9	69,6	27	0	92	199
		3	4,9	69,7	27	0	91	202
L7-2								
	28	1	2,1	30,3	35	0	19	410
		2	2,1	30,1	34	0	21	376
		3	2,1	30,1	35	0	26	309
	58	1	3,6	51,3	29	0	41	327
		2	3,6	51,5	29	0	39	346
		3	3,6	51	29	0	38	354
	83	1	4,9	68,9	27	0	55	329
		2	4,9	69	27	0	55	330
		3	4,8	68,3	27	0	53	341
L7-3								
	28	1	2,1	29,3	35	0	115	67
		2	2,1	29,9	35	0	106	74
		3	2,1	29,8	35	0	86	91
	58	1	3,6	50,4	29	0	222	60
		2	3,6	51	30	0	171	79
		3	3,6	50,9	29	0	178	75
	83	1	4,8	68,2	27	0	242	74
		2	4,8	68,5	28	0	270	67
		3	4,9	68,7	28	0	233	78

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L7-4								
	28	1	2,1	30,4	35	0	35	226
		2	2,2	30,6	35	0	32	252
		3	2,2	30,6	35	0	32	252
	58	1	3,6	51,1	30	0	58	231
		2	3,6	51,1	29	0	57	235
		3	3,6	51,2	29	0	58	233
	83	1	4,8	68,1	27	0	75	238
		2	4,,8	68,5	28	0	74	245
		3	4,8	68,3	27	0	76	236
L9-1								
	28	1	2,2	30,7	35	0	39	209
		2	2,2	30,8	35	0	36	226
		3	2,2	30,9	35	0	36	228
	58	1	3,7	52	29	0	98	140
		2	3,7	52,5	29	0	76	181
		3	3,7	52,4	29	0	70	196
	83	1	4,9	68,7	27	0	93	194
		2	4,9	69,2	27	0	90	204
		3	4,9	69,1	27	0	92	197
L9-2								
	28	1	2,2	30,9	34	0	22	365
		2	2,2	30,7	35	0	23	357
		3	2	28,3	33	0	21	351
	58	1	3,7	51,7	28	0	43	318
		2	3,7	52,1	29	0	44	315
		3	3,7	52,4	29	0	43	323
	83	1	4,9	69,3	27	0	58	314
		2	4,9	69,1	27	0	55	330
		3	4,9	69,5	27	0	56	328

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L9-3								
	28	1	2,1	30,3	34	0	63	127
		2	1,9	26,3	34	0	43	162
		3	1,8	25,7	33	0	51	131
	58	1	3,6	51,6	29	0	104	131
		2	3,7	51,9	29	0	103	133
		3	3,7	51,8	29	0	106	128
	83	1	4,9	68,9	27	0	137	132
		2	49	69,4	27	0	133	138
		3	4,9	69,3	27	0	132	138
L9-4								
	28	1	2,1	29,9	34	0	53	150
		2	2,1	30,2	34	0	49	163
		3	2,2	30,6	35	0	50	162
	58	1	3,7	51,7	29	0	102	133
		2	3,7	52,1	29	0	111	124
		3	3,7	52,2	29	0	111	124
	83	1	4,9	69,5	27	0	127	144
		2	4,9	69,7	27	0	127	144
		3	4,9	69,8	27	0	121	152
L11-1								
	28	1	2,1	29,9	34	0	23	343
		2	2,1	30,4	35	0	20	399
		3	2,2	30,7	35	0	20	396
	58	1	3,7	52	29	0	40	345
		2	3,7	52,1	29	0	38	360
		3	3,7	52,2	29	0	37	367
	83	1	4,9	69,2	27	0	57	320
		2	4,7	66,7	27	0	53	334
		3	4,9	68,8	27	0	54	334

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L11-2								
	28	1	2,1	29,8	34	0	30	265
		2	2,1	30,1	34	0	28	280
		3	2,1	29,5	34	0	27	292
	58	1	3,6	51,4	29	0	59	228
		2	3,6	51,5	29	0	57	238
		3	3,7	51,8	29	0	57	241
	83	1	4,8	68,2	27	0	87	206
		2	4,8	68,4	27	0	83	216
		3	4,8	68,1	27	0	83	215
L11-3								
	28	1	2	28,7	33	0	20	380
		2	2	28,8	34	0	20	386
		3	2,1	29,3	34	0	22	358
	58	1	3,6	50,4	29	0	57	234
		2	3,6	50,8	28	0	45	298
		3	3,6	51,2	29	0	46	292
	83	1	4,8	68,5	27	0	62	291
		2	4,8	67,8	27	0	61	292
		3	4,7	66,9	27	0	61	289
L11-4								
	28	1	2,1	29,8	34	0	31	256
		2	2,1	30,2	34	0	26	303
		3	3,7	51,8	28	0	62	220
	58	1	3,7	51,8	28	0	51	266
		2	3,7	52	28	0	57	241
		3	3,7	52,2	29	0	52	266
	83	1	4,9	69,3	27	0	67	271
		2	4,8	68,3	27	0	64	283
		3	4,8	68,5	27	0	60	300

Mätning 2 hamnen

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
L5-2	28	1	2,0	28,2	36	0	29	257
		2	2,0	28,4	36	0	30	249
		3	2,0	28,4	36	0	30	248
	58	1	3,6	51,6	30	0	72	190
		2	3,7	51,8	30	0	74	184
		3	3,7	51,9	30	0	72	180
	83	1	4,8	57,3	28	0	98	180
		2	4,9	69,2	27	0	101	181
		3	4,9	69,2	27	0	102	179
L5-3	83	1	2,0	28,0	35	0	25	293
		2	2,0	28,3	35	0	26	284
		3	2,0	28,2	35	0	24	307
	58	1	3,7	51,8	30	0	59	232
		2	3,7	52,0	30	0	59	235
		3	3,7	52,0	30	0	56	245
	83	1	4,9	68,9	28	0	77	236
		2	4,9	69,7	28	0	77	237
		3	4,9	69,5	28	0	78	234

Försöksyta 2

Punkt	Höjd	Sättning	Styvhet
Nr	(cm)	S _{medel} (μm)	E _{vd, medel} (MPa)
12-1	28	189,0	52,7
	58	257,3	59,3
	83	318,7	63,7
I2-(1-3)	28	151,3	64,0
	58	258,3	58,7
	83	323,3	63,7
12-2	28	201,0	49,7
	58	274,0	56,0
	83	274,0	63,0
I2-(2-3)	28	406,3	24,3
	58	517,0	30,0
	83	624,7	33,0
12-3	28	203,3	48,7
	58	289,7	52,3
	83	415,7	49,3
I2 (3-4)	28	130,3	76,3
	58	183,3	82,7
	83	233,0	88,3
12-4	28	290,3	34,7
	58	211,7	79,7
	83	234,7	88,0
11-1	28	197,7	50,3
	58	260,3	59,0
	83	328,0	63,7
11-4	28	456.33	22,0
	58	661,0	22,7
83	905,7	22,7	

Cirkulationsplats del-A för förstärkningslager

Cirkulationsplats del-B

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	\mathbf{E}_{vd}
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
1	28	1	2,1	30,1	36	0	29	273
		2	2,1	30,2	36	0	28	283
		3	2,1	30,2	36	0	29	273
	58	1	3,7	52,3	30	0	66	210
		2	3,7	51,6	30	0	65	209
		3	3,7	52,0	30	0	67	204
	83	1	4,9	68,9	28	0	86	212
		2	4,9	68,9	28	0	92	198
		3	2,5	35 <i>,</i> 6	37	0	41	226
2	28	1	21	29.4	36	0	39	197
-	20	2	2,1	20,4	36	0	32	244
		2	2,1	30,0	37	0	21	244
	58	1	2,2	50,4	30	0	58	235
	50	2	27	51.0	30	0	70	106
		2	27	52.1	21	0	70 66	208
	02	1	رد ۱۵	52,1 60 7	20	0	00	208
	05	1 2	4,9	70.0	23	0	91	201
		2	4,9	70,0 60 5	20	0	09	207
2		5	4,9	09,5	20	0	00	207
5	28	1	21	30.2	36	0	35	226
	20	2	2,1	30.6	60	0	42	190
		2	2,2	30,0	40	0	38	211
	58	1	2,2	51.8	30	0	73	186
	50	2	3,7	53.0	30	0	73	100
		2	20	53,0	60 60	0	7/	100
	Q 2	2 1	,0 ∕	55,5 60.0	20	0	74 100	190
	65	1 2	4,9 5 0	70 /	20 21	0	106	104
		2	5,0	70,4	51 22	0	100	170
		3	5,0	70,3	32	U	109	1/0

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
4								
	28	1	2,1	29,2	37	0	27	290
		2	2,2	30,5	51	0	26	307
		3	2,2	30,7	60	0	26	307
	58	1	3,7	52,7	56	0	58	239
		2	3,8	53,6	60	0	56	253
		3	3,8	53,4	60	0	54	260
	83	1	5,0	70,3	60	0	78	236
		2	5,0	70,6	31	0	76	245
		3	5,0	70,7	32	0	76	246
5								
	28	1	2,1	29,8	36	0	50	157
		2	2,1	30,2	37	0	48	164
		3	2,1	30,1	36	0	46	171
	58	1	3,6	51,6	30	0	104	130
		2	3,7	52,0	30	0	101	135
		3	3,7	52,9	32	0	100	139
	83	1	5,0	71,0	60	0	142	132
		2	5,0	71,4	32	0	137	137
		3	5,0	71,3	31	0	137	137
6								
	28	1	2,1	30,3	36	0	38	208
		2	2,1	30,3	36	0	38	211
		3	2,1	30,4	36	0	36	223
	58	1	3,7	51,9	30	0	80	171
		2	3,7	51,9	30	0	77	178
		3	3,7	52,0	30	0	77	178
	83	1	4,9	69,3	28	0	104	175
		2	4,9	69,5	28	0	100	183
		3	4,9	69,7	28	0	101	181

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
7								
	28	1	2,1	30,2	36	0	41	195
		2	2,1	30,4	36	0	40	200
		3	2,1	30,2	36	0	38	212
	58	1	3,6	51,4	30	0	70	192
		2	3,6	51,6	30	0	69	197
		3	3,7	51,7	30	0	66	206
	83	1	4,9	69,5	28	0	92	200
		2	4,9	69,5	28	0	89	205
		3	4,9	69,8	28	0	89	206
8								
	28	1	2,2	31,7	60	0	38	220
		2	2,0	28,1	60	0	29	256
		3	2,0	28,3	60	0	27	272
	58	1	3,7	52,1	32	0	77	178
		2	3,7	52,7	60	0	77	181
		3	3,7	51,8	31	0	75	182
	83	1	4,9	68,9	28	0	109	167
		2	4,9	69,1	28	0	107	170
		3	4,9	68,9	28	0	106	171
9								
	28	1	2,1	30,3	36	0	28	282
		2	1,3	17,8	41	0	12	400
		3	2,2	30,5	36	0	30	270
	58	1	3,6	51,6	30	0	61	223
		2	3,6	51,6	30	0	61	222
		3	3,7	51,9	31	0	59	233
	83	1	4,9	68,9	28	0	83	218
		2	4,9	69,3	28	0	78	233
		3	5,0	70,2	28	0	80	230

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
10								
	28	1	2,1	30,0	36	0	39	205
		2	2,1	30,0	36	0	38	210
		3	1,3	17,8	57	0	14	323
	58	1	3,6	51,2	30	0	82	164
		2	3,7	51,9	30	0	80	170
		3	3,6	51,6	30	0	81	168
	83	1	4,9	68,9	28	0	114	159
		2	4,9	69,3	28	0	112	163
		3	4,9	69,1	28	0	112	163
11								
	28	1	2,1	29,9	36	0	35	222
		2	1,9	27,3	40	0	24	296
		3	2,2	30,9	60	0	32	258
	58	1	3,7	52,9	38	0	72	192
		2	3,8	53,1	60	0	73	193
		3	3,7	53,0	32	0	71	197
	83	1	4,9	69,1	28	0	96	189
		2	4,9	70,0	28	0	99	187
		3	5,0	70,2	28	0	99	187
12								
	28	1	1,9	27,3	35	0	31	228
		2	2,1	29 <i>,</i> 5	36	0	37	210
		3	2,1	29,8	36	0	39	202
	58	1	3,6	51,1	30	0	87	155
		2	3,7	51,7	31	0	83	165
		3	3,6	51,4	30	0	82	165
	83	1	4,9	70,0	28	0	116	159
		2	5,0	70,2	28	0	112	165
		3	5,0	70,0	28	0	112	165

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
13								
	28	1	2,1	29,8	36	0	64	123
		2	2,1	30,0	37	0	63	125
		3	2,1	29,7	36	0	55	142
	58	1	3,7	51,8	30	0	117	117
		2	3,7	51,7	30	0	112	112
		3	3,7	51,8	30	0	109	126
	83	1	4,9	69,0	28	0	155	117
		2	4,9	69,8	28	0	150	123
		3	4,9	69,9	28	0	148	124
14								
	28	1	2,1	29,3	36	0	53	145
		2	2,1	29,8	36	0	54	146
		3	2,1	29,9	36	0	55	144
	58	1	3,6	51,3	30	0	111	121
		2	3,7	51,7	31	0	106	129
		3	3,7	51,8	30	0	108	127
	83	1	4,9	68,9	28	0	147	124
		2	4,9	69,4	28	0	146	125
		3	4,9	69,2	28	0	143	127
15								
	28	1	2,1	29,9	36	0	57	137
		2	2,1	30,2	36	0	55	145
		3	2,1	30,0	36	0	55	143
	58	1	3,6	50,7	30	0	107	125
		2	3,6	51,4	30	0	104	130
		3	3,6	51,3	30	0	102	132
	83	1	4,9	69,1	28	0	139	131
		2	4,9	69 <i>,</i> 5	28	0	138	132
		3	4,9	69 <i>,</i> 5	28	0	136	135

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E _{vd}
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
16								
	28	1	2,1	29,9	36	0	29	275
		2	2,1	30,1	36	0	29	271
		3	1,3	17,7	40	0	11	422
	58	1	3,6	51,4	30	0	65	208
		2	3,7	51,8	30	0	62	221
		3	3,7	52,0	30	0	63	218
	83	1	4,9	69,0	28	0	88	207
		2	4,9	69,4	28	0	87	209
		3	4,9	69,6	28	0	88	209

Cirkulationsplats del-D

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	Evd
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
1	28	1	2,0	28,6	34	0	69	109
		2	2,1	30,1	35	0	73	109
		3	2,1	30,2	35	0	72	110
	58	1	3,7	51,6	29	0	136	100
		2	3,7	51,6	29	0	126	108
		3	3,6	51,4	30	0	122	111
	83	1	4,9	68,8	27	0	174	104
		2	4,9	69,0	28	0	172	105
		3	4,9	69,0	27	0	170	107

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	Evd
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
2	28	1	2,1	30,1	35	0	121	66
		2	2,1	30,2	35	0	115	69
		3	2,1	30,2	35	0	112	71
	58	1	3,6	51,4	30	0	203	67
		2	3,6	51,4	29	0	198	68
		3	3,6	51,5	30	0	199	68
	83	1	4,9	68,7	27	0	257	70
		2	4,9	69,0	28	0	251	72
		3	4,9	68,8	27	0	247	73
3								
	28	1	2,1	30,2	35	0	107	74
		2	2,1	30,4	35	0	103	78
		3	2,1	30,2	35	0	97	82
	58	1	3,7	51,8	29	0	194	70
		2	3,7	51,9	29	0	197	69
		3	3,7	51,7	29	0	195	70
	83	1	4,9	69,7	27	0	251	73
		2	4,9	69,6	27	0	242	76
		3	4,9	69,8	27	0	238	77
4								
	28	1	2,1	29,9	35	0	62	127
		2	2,1	30,3	35	0	63	127
		3	2,1	30,0	35	0	64	123
	58	1	3,6	51,5	30	0	120	113
		2	3,7	51,9	29	0	120	114
		3	3,7	51,8	29	0	118	115
	83	1	4,9	69,1	28	0	169	108
		2	4,9	69,4	27	0	165	111
		3	4,9	69,2	27	0	162	113

Försöksyta 3

Testyta 1

				Överf	art 0			
Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E _{vd}
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
1								
	28	1	2,2	30,6	36	0	110	73
		2	2,2	30,7	36	0	106	76
		3	2,2	30,7	36	0	107	75
	58	1	3,6	51,3	30	0	189	71
		2	3,6	51,5	30	0	183	74
		3	3,6	51,3	30	0	181	75
	83	1	4,8	68,6	28	0	241	75
		2	4,8	68,5	28	0	233	77
		3	4,8	68,6	28	0	233	77
11								
	28	1	2,1	29,7	35	0	80	98
		2	2,1	29,7	35	0	78	101
		3	2,1	29,7	35	0	71	110
	58	1	3,6	51,0	30	0	143	94
		2	3,6	50,9	30	0	142	95
		3	3,6	50,9	30	0	136	99
	83	1	4,8	68,5	28	0	181	100
		2	4,9	69,0	28	0	179	101
		3	4,9	68,7	28	0	172	105
21								
	28	1	2,1	29,5	36	0	96	81
		2	2,1	29,5	36	0	95	82
		3	2,1	29,4	36	0	90	86
	58	1	3,6	50,8	30	0	164	81
		2	3,6	51,0	30	0	156	86
		3	3,6	50,8	30	0	155	87
	83	1	4,8	67,9	28	0	205	87
		2	4,7	67,1	28	0	202	88
		3	4,8	68,5	28	0	201	89

			Ö٧	verfart-	1 (1vil	ob)		
Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa
2	28	1	2,1	29,4	36	0	147	53
		2	2,1	29 <i>,</i> 8	36	0	136	58
		3	2,1	29,5	36	0	127	61
	58	1	3,6	51,3	30	0	252	54
		2	3,6	51,5	30	0	243	56
		3	3,7	51,7	31	0	238	57
	83	1	4,9	68,8	28	0	310	58
		2	4,9	69,1	28	0	304	60
		3	4,9	69,3	28	0	296	62
12								
	28	1	2,1	29,7	36	0	118	66
		2	2,1	29,9	37	0	104	76
		3	2,1	29,9	37	0	101	78
	58	1	3,7	51,7	31	0	220	62
		2	3,7	51,7	30	0	206	66
		3	3,6	51,6	30	0	221	61
	83	1	4,8	68,6	28	0	258	70
		2	4,8	68,6	28	0	260	69
		3	4,8	68,5	28	0	251	72
22								
	28	1	2,1	29,4	36	0	155	50
		2	2,1	29,6	36	0	148	53
		3	2,1	29,5	36	0	140	55
	58	1	3,6	51,1	30	0	265	51
		2	3,6	51,4	30	0	257	53
		3	3,7	51,8	31	0	247	55
	83	1	4,9	68,6	28	0	327	55
		2	4,9	69,0	28	0	318	57
		3	4,9	69,3	28	0	320	57

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E _{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
31								
	28	1	2,1	30,0	36	0	67	118
		2	2,1	29,5	36	0	68	114
		3	2,1	29,9	36	0	60	132
	58	1	3,6	51,6	30	0	126	108
		2	3,6	51,4	30	0	118	114
		3	3,6	51,6	30	0	121	112
	83	1	4,9	69,0	28	0	163	111
		2	4,9	69 <i>,</i> 4	28	0	167	110
		3	4,9	69,2	28	0	163	112

Överfart-2 (1vibb)

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	\mathbf{E}_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
3								
	28	1	2,1	29,5	37	0	245	32
		2	2,1	29,7	36	0	167	47
		3	2,1	29,9	37	0	164	48
	58	1	3,6	51,6	31	0	296	46
		2	3,7	51,8	37	0	300	45
		3	3,6	51,2	30	0	295	46
	83	1	4,9	68,7	28	0	378	48
		2	4,8	68,6	28	0	354	51
		3	4,9	68,8	28	0	348	52
7								
	28	1	2,1	29,5	37	0	100	78
		2	2,1	29,4	36	0	97	80
		3	2,1	29,4	36	0	96	81
	58	1	3,6	51,4	30	0	185	73
		2	3,7	51,8	30	0	182	75
		3	3,6	51,2	30	0	179	75
	83	1	4,9	69,0	28	0	252	72
		2	4,9	69,0	28	0	246	74
		3	4,9	69,0	28	0	244	74

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E _{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
13	28	1	2,1	29,4	36	0	131	59
		2	2,1	29,3	36	0	121	64
		3	2,0	28,9	36	0	110	69
	58	1	3,7	51,7	30	0	212	64
		2	3,6	51,6	30	0	203	67
		3	3,6	51,6	30	0	199	68
	83	1	4,9	69,2	28	0	264	69
		2	4,9	69,1	28	0	255	71
		3	4,9	69,4	28	0	254	72
23								
	28	1	2,0	28,9	36	0	117	65
		2	2,0	28,9	36	0	105	72
		3	2,1	29,1	36	0	106	72
	58	1	3,7	51,7	30	0	207	66
		2	3,7	51,8	30	0	197	69
		3	3,6	51,6	30	0	192	71
	83	1	4,9	69,0	28	0	255	71
		2	4,9	69,2	28	0	248	73
		3	4,9	69,7	29	0	251	73

Överfart-3(1vibb 2slät)												
Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E _{vd}				
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)				
4												
	28	1	2,1	30,1	37	0	111	72				
		2	2,1	29,8	36	0	108	73				
		3	2,1	30,1	36	0	111	72				
	58	1	3,6	51,3	30	0	197	68				
		2	3,6	51,5	30	0	197	69				
		3	3,6	51,6	31	0	193	70				
	83	1	4,9	69,1	28	0	256	71				
		2	4,9	69,1	28	0	251	72				
		3	4,9	69,0	28	0	249	73				
14												
	28	1	2,1	29,6	36	0	104	75				
		2	2,1	29,1	35	0	98	78				
		3	2,1	29,0	36	0	94	83				
	58	1	3,6	51,0	29	0	181	74				
		2	3,6	50,9	30	0	177	76				
		3	3,6	51,0	30	0	174	77				
	83	1	4,9	69,1	28	0	234	78				
		2	4,9	69,0	27	0	233	78				
		3	4,9	68,7	28	0	227	80				
24												
	28	1	2,1	29,9	36	0	78	91				
		2	1,5	20,9	37	0	30	181				
		3	2,1	29,8	35	0	78	100				
	58	1	3,6	51,1	30	0	155	86				
		2	3,6	51,4	30	0	151	90				
		3	3,6	51,4	30	0	147	92				
	83	1	4,8	68,5	28	0	201	90				
		2	4,9	69,0	28	0	196	93				
		3	4,9	68,8	2,1	0	191	95				

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}				
5	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)				
	28	1	2,1	29,3	35	0	108	71				
		2	2,1	29,6	36	0	101	77				
		3	2,1	29,6	36	0	100	78				
	58	1	3,6	51,2	30	0	191	70				
		2	3,6	51,3	30	0	189	71				
		3	3,6	51,2	29	0	187	72				
	83	1	4,8	68,3	27	0	240	75				
		2	4,8	68,3	27	0	239	75				
		3	4,8	68,3	27	0	233	77				
15												
	28	1	2,1	29,6	35	0	116	67				
		2	2,1	29.6	35	0	111	70				
		3	2,1	29,6	35	0	109	71				
	58	1	3,6	50,7	29	0	200	67				
		2	3,6	51,1	30	0	199	68				
		3	3,6	51,1	30	0	197	68				
	83	1	4,8	68,0	27	0	261	69				
		2	4,8	68,1	28	0	259	69				
		3	4,8	68,3	28	0	258	70				
15-16												
	28	1	2,1	29,7	35	0	110	71				
		2	2,1	29,8	36	0	104	76				
		3	2,1	29,7	36	0	102	76				
	58	1	3,6	50,7	29	0	192	69				
		2	3,6	50,9	30	0	188	71				
		3	3,6	51,1	30	0	185	73				
	83	1	4,8	68,5	28	0	255	71				
		2	4,8	68,2	28	0	255	70				
		3	4,8	68,2	28	0	254	71				

Överfarter-4 (2vibb 2slät)

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E _{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
25								
	28	1	2,1	29,8	35	0	91	86
		2	2,1	30,0	35	0	87	90
		3	2,1	29,9	35	0	86	92
	58	1	3,6	51,3	29	0	165	82
		2	3,6	51,4	29	0	159	85
		3	3,6	51,6	29	0	161	85
	83	1	4,9	68,9	28	0	206	88
		2	4,9	68,8	28	0	206	88
		3	4,9	69,0	28	0	204	89

ä		10 11 1	0.121
Overta	rter-5	(3vibb	(3slat)

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
6	28	1	2,1	29,7	36	0	101	77
		2	2,1	29,9	36	0	98	80
		3	2,1	29,8	36	0	36	81
	58	1	3,6	51,5	30	0	172	79
		2	3,7	51,6	30	0	175	78
		3	3,6	51,4	30	0	170	80
	83	1	4,9	68,8	28	0	225	80
		2	4,9	68,8	28	0	222	82
		3	4,9	68,8	28	0	218	83
16								
	28	1	2,1	29,9	36	0	96	82
		2	2,1	29,8	36	0	93	84
		3	2,1	29,8	36	0	91	87
	58	1	3,7	51,8	30	0	175	78
		2	3,7	52,0	30	0	174	79
		3	3,6	51,4	30	0	172	79
	83	1	4,8	68,5	28	0	224	80
		2	4,8	68,6	28	0	223	81
		3	4,8	68,1	28	0	220	82

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
26								
	28	1	2,1	29,8	36	0	97	81
		2	2,1	29,8	36	0	95	83
		3	2,1	29,7	35	0	87	90
	58	1	3,6	51,6	30	0	165	82
		2	3,6	51,4	30	0	162	83
		3	3,6	51,4	30	0	162	84
	83	1	4,8	67,7	28	0	216	82
		2	4,9	69,1	28	0	209	87
		3	4,9	69,2	28	0	210	87

Testyta 2

	Överfat 0												
Punkt	Höjd (cm)	släpp	Kraft (KN)	Tryck (Kpa)	puls (ms)	offset	Deflektion	E _{vd}					
någonstans	(ciii)			(itpa)	(1115)	(ciii)	(µ11)	(ivipa)					
	28	1	2,1	30,4	37	0	149	54					
		2	2,2	30,6	37	0	144	56					
		3	2,2	30,5	37	0	135	59					
	58	1	3,7	51,9	31	0	245	56					
		2	3,7	51,9	30	0	227	60					
		3	3,7	52,1	31	0	241	57					
	83	1	4,9	68,7	28	0	337	54					
		2	4,8	68 <i>,</i> 4	28	0	327	55					
		3	4,8	68,5	28	0	316	57					

Overlart 1 (1vib) 1 Siat)												
Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	\mathbf{E}_{vd}				
Nr	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)				
1												
	28	1	2,1	30,3	36	0	97	82				
		2	1,3	17,8	60	0	38	124				
		3	2,1	30,3	36	0	94	85				
	58	1	3,7	52,2	30	0	177	78				
		2	3,7	52,4	30	0	172	80				
		3	3,7	52,3	30	0	167	82				
	83	1	4,9	69,7	28	0	221	83				
		2	4,9	69,8	28	0	223	82				
		3	4,9	69,7	28	0	220	83				
6	28	1	2,1	30,1	36	0	117	67				
		2	2,1	30,3	37	0	110	72				
		3	2,1	30,3	37	0	112	71				
	58	1	3,7	51,7	30	0	194	70				
		2	3,7	51,9	30	0	184	74				
		3	3,7	51,9	30	0	181	76				
	83	1	4,9	69,1	28	0	237	77				
		2	4,9	69,6	28	0	226	81				
		3	4,9	69,0	29	0	216	84				

Överfart 1 (1vibb 1 slät)

Overfart 2 (2 vibb 2 slat)												
Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	\mathbf{E}_{vd}				
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)				
2												
	28	1	2,2	30,5	37	0	97	83				
		2	2,2	30,6	37	0	89	90				
		3	2,2	30,6	37	0	90	89				
	58	1	3,7	52,2	31	0	167	82				
		2	3,7	52,1	30	0	174	79				
		3	3,7	52,3	31	0	163	85				
	83	1	4,9	69,5	28	0	219	84				
		2	4,9	69,8	29	0	222	83				
		3	4,9	69,8	29	0	220	84				
5	28	1	2,2	31,0	37	0	91	90				
		2	2,2	30,9	37	0	84	96				
		3	2,2	31,1	37	0	82	100				
	58	1	3,7	51,7	30	0	155	88				
		2	3,7	52,3	31	0	154	90				
		3	3,7	52,0	31	0	151	91				
	83	1	4,8	67,9	28	0	198	90				
		2	4,9	69,1	28	0	196	93				
		3	4,9	69,3	28	0	195	94				

Överfart 2 (2 vibb 2 slät)

Overfart 3 (3 VIDI 3 Slat)											
Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	\mathbf{E}_{vd}			
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)			
3											
	28	1	2,2	30,8	37	0	97	84			
		2	2,2	30,6	37	0	93	87			
		3	2,2	30,6	37	0	87	93			
	58	1	3,7	52,4	31	0	173	80			
		2	3,7	52,5	31	0	169	82			
		3	3,7	52,2	31	0	166	83			
	83	1	4,9	69,0	28	0	217	84			
		2	4,9	69,1	29	0	212	86			
		3	4,9	69,7	29	0	215	85			
4	28	1	2,1	30,0	37	0	92	86			
		2	2,1	29,9	37	0	85	92			
		3	2,1	30,1	37	0	85	93			
	58	1	3,6	51,6	31	0	168	81			
		2	3,6	51,1	30	0	164	82			
		3	3,6	51,4	30	0	166	81			
	83	1	4,9	69,1	28	0	217	84			
		2	4,9	69,2	28	0	217	84			
		3	4,9	69,0	28	0	216	84			
5	28	1	2,2	30,9	37	0	83	98			
		2	2,2	31,1	37	0	80	103			
		3	2,2	30,9	36	0	79	103			
	58	1	3,7	52,0	31	0	143	96			
		2	3,7	52,1	30	0	145	95			
		3	3,7	52,3	31	0	142	97			
	83	1	4,9	69,0	28	0	184	99			
		2	4,9	68,8	28	0	183	99			
		3	4,9	69,7	28	0	184	100			

Överfart 3 (3 vibb 3 slät)

Punkt	Höjd	släpp	Kraft	Tryck	puls	offset	Deflektion	E_{vd}
	(cm)		(KN)	(Kpa)	(ms)	(cm)	(µm)	(Mpa)
6	28	1	2,2	30,5	37	0	80	100
		2	2,2	30,6	36	0	77	105
		3	2,2	30,7	37	0	75	108
	58	1	3,7	52,6	31	0	155	90
		2	3,7	52,8	31	0	152	91
		3	3,7	52,8	31	0	149	93
	83	1	4,9	69,5	28	0	193	95
		2	4,9	69,7	28	0	189	97
		3	4,9	69,6	28	0	190	96

Medelvärdet	av	deformationsmoduler	E_{vd}	från	lätt
fallviktsmätninga	r för	Testyta-1 och Testyta-2			

Mätresultat från lätt fallvikt för testyta 1

Vältöverfart	Punkt	E _{vd(medel 28cm)}	E _{vd(medel 58cm)}	E _{vd(medel 83cm)}
Antal	Nr	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
0vibb	1	74,67	73,33	76,33
	11	103,00	96,00	102,00
	21	83,00	86,67	88,00
1vibb	2	57 <i>,</i> 33	55,67	60,00
	12	73,33	63,00	70,33
	22	52,67	53,00	56,33
	22-23	121,33	111,33	111,00
1vibb	3	42,33	45,67	50,33
	7	79,67	74,33	73,33
	13	64,00	66,33	70,67
	23	69,67	68,67	72,33
1vibb+2slät	4	72,33	69,00	72,00
	14	78,67	75,67	78,67
	24	124,00	89,33	92,67
2vibb+2slät	5	75,33	71,00	75,67
	15	69 <i>,</i> 33	67,67	69,33
	15-16	74,33	71,00	70,67
	25	89,33	84,00	88,33
3vibb+3slät	6	79,33	79,00	81,67
	16	84,33	78,67	81,00
	26	84,67	83,00	85 <i>,</i> 33
Vältöverfart	Punkt	Evd _(medel 28cm)	Evd _(medel 58cm)	Evd _(medel 83cm)
---------------	-------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------
Antal	Nr	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
0vibb+0 slät	0	56,33	57,67	55,33
1vibb+1 slät	1	83,33	80,00	82,67
	6	70,00	73,33	80,67
2vibb +2 slät	2	87,33	82,00	83,67
	5	95,33	89,67	92,33
3vibb +2 slät	3	88,00	81,67	85,00
	4	90,33	81,33	84,00
	5	101,33	96,00	99,33
	6	104,33	91,33	96,00

Mätresultat från lätt fallvikt för testyta 2

Bilaga 4. Vatten- och sandvolymmeterprov

Försöksyta 1

Hamnen

punkt	m _{fukt}	\mathbf{m}_{sand}	m _{torr}	V _{håll}	${oldsymbol{ ho}}_d$	W	R _D
Nr	(g)	(g)	(g)	(m ³) (10 ⁻⁴)	(kg/m³)	(%)	(%)
L1-1	2 038	1 326	1 999,7	8,0	2 513,3	1,9	109,0
L1-2	2 336	1 530	2 272,0	9,2	2 474,7	2,8	107,4
L1-4	1 819	1 101	1 765,4	6,6	2 672,2	3,0	115,9
L3-3	1 620	931	1 568,7	5,6	2 808,0	3,3	121,8
L3-4	1 773	1 268	1 742,0	7,6	2 289,5	1,8	99,3
L5-1	1 879	1 175	1 828,0	7,1	2 592,7	2,8	112,5
L5-2	1 619	1 241	1 581,1	7,4	2 123,3	2,4	92,1
L5-4	1 1 3 4	768	1 107,1	4,6	2 402,4	2,4	104,2
L7-2	1 1 3 1	822	1 096,9	4,9	2 223,9	3,1	96,5
L7-3	1 337	904	1 293,0	5,4	2 383,7	3,4	103,4
L7-4	1 694	1 136	1 650,0	6,8	2 420,6	2,7	105,0
L9-2	1 191	843	1 155,0	5,1	2 283,3	3,1	99,1
L9-3	1 0 1 1	760	983,3	4,6	2 156,2	2,8	93,5
L9-4	1 493	1 014	1 470,0	6,1	2 416,0	1,6	104,8

Försöksyta 2

Cirkulationsplats del-B

punkt	m _{fukt}	m _{sand}	m _{torr}	V _{håll}	${oldsymbol{ ho}}_d$	w	R _D
Nr	(g)	(g)	(g)	(m ³) (10 ⁻⁴)	(kg/m³)	(%)	(%)
1	1 570	1 132	1 526,6	6,8	2 247,4	2,8	97,5
3	1 623	1 180	1 577,8	7,1	2 228,3	2,9	96,7
6	1 394	1 005	1 361,8	6,0	2 258,2	2,4	98,0
11	1 620	1 214	1 571,3	6,0	2 157,0	3,1	93,6

Cirkulationsplats del-D

punkt Nr	m _{fukt} (g)	m _{sand} (g)	m _{torr} (g)	v _{håll} (m³) (10⁻⁴)	ρ _d (kg/m³)	W (%)	R₀ (%)
1	902	1170	1 125,6	5,4	2 079,7	3,9	90,2
2	1000	1259	1 236,1	6,0	2 060,0	1,9	89,4
3	1182	1556	1 499,3	7,1	2 113,9	3,8	91,7

Försöksyta 3

Testyta 2

punkt	m _{fukt}	m _{sand}	m _{torr}	V _{håll}	ρ _d	W	R _D
Nr	(g)	(g)	(g)	(m ³) (10 ⁻⁴)	(kg/m³)	(%)	(%)
56	1579	1129	1 519,6	6,8	2 243,1	3,9	97,3
45	1516	1110	1 463,8	6,7	2 197,7	3,6	95,3

Proctor					
ρ _{dmax} (kg/m ³) W _{optimal} (%)					
2 305,22	4,61				

Bilaga 5. Densitetsmätningar med SDG200

Försöksyta 1

Mätning 1hamnen

Punkt	$\rho_d (kg/m^3)$	$\rho_m (kg/m^3)$	W (%)	R _D (%)	
L1-1	1 832,1	1 932,3	5,5	79,5	
L1-2	1 712,5	1 776,5	3,7	74,3	
L1-3	1 679,9	1 737,7	3,4	72,9	
L1-4	1 756,9	1 835,9	4,5	76,2	
L3-1	1 806,6	1 899,1	5,1	78,4	
L3-2	1 700,2	1 736,3	3,7	73,8	
L3-3	1 785,0	1 871,7	4,9	77,4	
L3-4	1 799,4	1 890,1	5,0	78,1	
L5-1	1 792,3	1 881,0	4,9	77,7	
L5-2	1 900,6	2 020,6	6,3	82,4	
L5-3	1 836,8	1 938,1	5,5	79,7	
L5-4	1 848,3	1 952,5	5,6	80,2	
L7-1	1 805,5	1 998,5	5,2	78,3	
L7-2	1 771,7	1 854,6	4,7	76,9	
L7-3	1 733,6	1 806,9	4,2	75,2	
L7-4	1 803,2	1 896,3	5,2	78,2	
L9-1	1 791,4	1 880,6	5,0	77,7	
L9-2	1 796,4	1 886,1	5,0	77,9	
L9-3	1 829,2	1 929,5	5,5	79,3	
L9-4	1 826,5	1 926,1	5,5	79,2	
L11-1	1 841,0	1 944,5	5,6	79,9	
L11-2	1 839,6	1 942,9	5,6	79 <i>,</i> 8	
L11-3	1 743,3	1 818,6	4,3	75 <i>,</i> 6	
L11-4	1 651,1	1 699,6	2,9	71,6	

Mätning 2 hamnen

Punkt	$\rho_d (kg/m^3)$	$\rho_m (kg/m^3)$	W (%)	R _D (%)
L5-1	1924	2052	6,7	83,5
L5-2	1979	2123	7,2	85 <i>,</i> 9
L5-3	2007	2158	7,5	87,1
L5-4	1969	2109	7,1	85 <i>,</i> 4

Försöksyta 2

Cirkulationsplats del-B

Punkt	$\rho_{\rm d}$ (kg/m ³)	$\rho_m (kg/m^3)$	W (%)	R₀ (%)
1	1 864.4	1 973.6	5.6	80.9
2	1 861.9	1 970.6	5.8	80.8
3	1 974.3	2 113.9	7.1	85.6
4	1 933.6	2 061.7	, 6.6	83.9
5	1 857.4	1 964.7	5.8	80.6
6	1 982.1	2 124.6	7.2	86.0
7	1 915.3	2 039.8	, 6.5	83.1
8	1 801,6	1 892,1	5,0	78,2
9	1 820,8	1 917,9	, 5,3	, 79,0
10	1 812,3	1 906,4	, 5,2	88,6
11	1 911,6	2 033,0	6,3	, 82,9
12	1 935,0	2 064,3	, 6,7	, 83,9
13	1 915,1	2 038,6	, 6,4	, 83,1
14	1 924,2	2 050,0	6,5	, 83,5
15	1 847,4	1 952,4	, 5,7	80,1
16	1 932,7	2 061,3	, 6,7	, 83,8

Cirkulationsplats del-D

Punkt	ρ _d (kg/m³)	ρ _m (kg/m³)	W (%)	R _D (%)
1	2 042,3	2 203,6	7,9	88,6
2	1 971,5	2 112,1	7,1	85,5
3	2 030,1	2 187,4	7,8	88,1
4	2 082,1	2 254,2	8,3	90,3

Försöksyta 3

Testyta 1

vältöverfarter	Punkt	$\rho_d (kg/m^3)$	$\rho_m (kg/m^3)$	W (%)	R _D (%)
ingen	1	1 629,60	1 670,50	2,5	70,7
	11	1 680,70	1 737,39	3,9	72,9
	21	1 653,70	1 701,50	2,9	71,7
	32	1 670,00	1 722,80	3,9	72,4
1vibb	2	1 782,50	1 867,20	4,8	77,3
	12	1 770,00	1 852,00	4,6	76,8
	22	1 745,10	1 819,30	4,3	75,7
	31	1 732,50	1 804,30	4,1	75,2
1 vibb	3	1 792,30	1 882,30	3,9	74,8
	13	1 688,00	1 746,10	3,4	73,2
	23	1 806,00	1 901,90	5,3	78,3
	32	1 711,10	1 776,20	3,8	76,9
	33	1 772,80	1 855,00	4,6	76,9
1vibb 2 slät	4	1 796,40	1 886,20	5	77,9
	14	1 780,10	1 865,60	4,8	77,2
	24	1 790,00	1 877,30	4,9	77,6
2 vibb 2 slät	5	1 761,10	1 839,60	4,5	76,4
	15	1 852,30	1 957,20	5,7	80,4
	25	1 807,80	1 900,30	5,1	78,4
	56	1 771,20	1 853,80	4,7	76,8
3 vibb 3 slät	6	1 850,10	1 954,20	5,6	80,3
	16	1 865,30	1 973,90	5,8	80,9
	25	1 807,80	1 900,30	5,1	78,4

Testyta 2

vältöverfart	Punkt	ρ _d (kg/m³)	ρ _m (kg/m³)	W (%)	R _D (%)
ingen	1	1 758,90	1 837,00	4,40	76,30
1 vibb 2 slät	1	1 971,00	2 110,00	7,10	85,50
	2	1 958,20	2 093,50	6,90	84,90
	3	1 928,40	2 054,80	6,60	83,70
	4	1 964,80	2 102,20	7,00	85,20
	5	1 893,70	2 010,00	6,10	82,10
	6	1 875,60	1 986,60	5 <i>,</i> 90	81,40
2 vibb 2 slät	1	1 975,10	2 113,90	7,00	85,70
	2	1 959,00	2 092,80	6,80	85,00
	3	1 932,30	2 058,60	6,50	83,80
	4	1 978,00	2 118,30	7,10	85,80
	5	1 927,10	2 052,30	6,50	83,60
	6	1 917,70	2 039,50	6,40	83,20
3 vibb 3 slät	1	2 005,10	2 151,30	7,30	87,00
	2	2 026,20	2 179,00	7,50	87,90
	3	1 956,20	2 089,50	6,80	84,90
	4	2 006,40	2 154,10	7,40	87,00
	5	1 975,30	2 113,40	7,00	85,70
	6	1 966,40	2 101,20	6,90	85,30







Bilaga 7. Bärighetskrav för bärlager

Vid nybyggnation med statisk acceptanskontroll (Trafikverket, 2009).

Acceptansintervall för fle:	xibel konstruktion statistisk acceptanskontroll					
Jordterrass 500 - 550 mm under obunden bärlageryta = underkant f- lagermaterial	$\begin{array}{ccc} n{=}8 & \overline{X}_{E_{V2}}{\geq} 40 + 0.96 \text{ s} \\ n{=}5 & \overline{X}_{E_{V2}}{\geq} 40{+} 0.83 \text{ s} \\ G_f \text{ om } x_{iE_{V2}}{<} 32 \text{ MPa} \end{array}$					
551 – 650 mm under obunden bärlageryta = underkant f- lagermaterial	$\begin{array}{ll} n = 8 & \overline{X}_{E_{V2}} \geq 30 + 0, 96s \\ n = 5 & \overline{X}_{E_{V2}} \geq 30 + 0, 83s \\ G_f \ om \ x_{i E_{V2}} \leq 20 \ MPa \end{array}$					
651 – 750 mm under obunden bärlageryta = underkant f- lagermaterial	$\begin{array}{ll} n{=}8 & \overline{X}_{E_{V2}} \geq 20 + 0, 96 \; s \\ n{=}5 & \overline{X}_{E_{V2}} \geq 20 + 0, 83 \; s \\ G_f \; om \; x_{i \; E_{V2}} {<} \; 15 \; MPa \end{array}$					
Skyddslager >250mm	$\begin{array}{ll} n=8 & \overline{x}_{Ev2} \geq 40 + 0.96 \text{-s} \\ n=5 & \overline{x}_{Ev2} \geq 40 + 0.83 \text{-s} \end{array}$					
	$\label{eq:constraint} \begin{array}{ll} I \mbox{ varje enskild kontrollpunkt:} \\ \mbox{Om } E_{v2} \leq \!$					
Bärlager eller	$G_f \text{ om } x_i \le 32 \text{ MPa}$ $n = 8 \qquad \overline{X}_{Ev2} \ge 140 + 0.96 \cdot s$					
Översta obundna lagret	$n = 5$ $\overline{X}_{Ev2} \ge 140 + 0.83 \cdot s$					
	$\label{eq:constraint} \begin{array}{ll} I \mbox{ varje enskild kontrollpunkt:} \\ \mbox{Om } E_{v2} \leq 140 \mbox{ MPa}: & E_{v2}/E_{v1} \leq 2,8 \\ \mbox{Om } E_{v2} > 140 \mbox{ MPa:} & E_{v2}/E_{v1} \leq 1+0,013 \cdot E_{v2} \\ \mbox{Antal godkända kontrollpunkter ska vara minst 7 av 8,} \\ \mbox{respective minst 4 av 5.} \\ \mbox{C} & = m \mbox{ mode} \leq 125 \mbox{ MPa}. \end{array}$					
	$G_f \text{ om } x_i \le 125 \text{ MPa}$					

Bilaga 8	8. S	pecifikationer	för	vält SD70D	
----------	------	----------------	-----	------------	--

Model Machine Walaht (w/ DODS / EODS)		SD70D
Operating Workht (CECE)	ka (lb)	7.056 (15.556)
Static Weight @ Erent Drum	ka (b)	3 653 (8 053)
Static Workt @ Poar Down	ka (b)	2 402 (7 502)
Static weight ig real bruin	kg (b)	5 9403 (15 094)
Dimonsions	Ng (bb)	0.042 (10,004)
Longth	mm (In)	5 044 (199)
Web	mm (m)	1 970 (74)
Heads (top of DODS / EODS)	mm (ln)	0.000 (112 5)
Wheelbare	mm (m)	2 602 (113.3)
Cuth Clearance	mm (le)	2015 (105)
Inside Turning Dadius (to down adap)	mm (la)	2 240 (120)
During Radius (to dram odge)	Hen (H)	5 249 (126)
Width	mm (In)	1 676 (66)
Demotor	mm (le)	1 010 (49)
Shall Thickney	mm (m)	22 (0 00)
Dismotor Quer Dad Enot	mm (m)	22 (0.88)
Mumber Of Ded Feet	nen (in)	-
Number Of Pag Feet		5
Pad Height	mm (in)	-
Pad Tip Area	cm ⁻ (sq in)	5
Vibration	The former below the second	000 // 050
Max Frequency	Hz (vpm) High Amp	30,8 (1,850)
	Low Amp	33,8 (2,025)
Number of Frequencies		2
Max Centrifugal Force	KN (Ib) High Amp	143 (32,100)
	Low Amp	104 (23,300)
Nominal Amplitude	mm (In) High Amp	1,98 (0.078) 12 (0.047)
Propulsion		
Type		14.9 x 24 - 6PR R3
Type System		Hydrostatic, two-speed motor
Drum Drug		Dispoten or
Travel Second	km/h (mah) Listh	0 - 100 (0 - 69)
maren opeed	Low	0 - 7,5 (0 - 4.7)
Engine		
Make / Model		Kubota V38
Engine Type		Turbocharge
Rated Power @ Installed Speed	kW (hp)	74,0 (99.2)
Electrical System		12 volts DC, negative ground, 9
Brakes		
Service		Dynamic hydrostatic thr
Parking / Secondary		Spring-applied, hydraulically release
Miscellaneous		
Articulation Angle		+/-38°
Oscillation Angle		+/-15°
Fuel Capacity	(gal)	178 (47)
Hydraulic Oil Capacity	(gal)	84 (22)
Gradeability (theoretical)		78%

Bilaga 9. Ytvågsseismiska mätningar

Mätresultat från ytvågsseismiska mätningar.

	IESIYIA-2												
Datum	mätning	Punkt	Lager	V _R	V_{P}	Vs	$\mathbf{\rho}_{d}$	v	E _{max}	E _{v2}	E_{v2}/E_{max}	\mathbf{E}_{vd}	E _{vd} /E _{max}
				m/s	m/s	m/s	kg/m ³		MPa	MPa		MPa	
2011-04-21	1	opackat	BL	142	276	153,69	2041	0,275	123	80	0,65	56	0,46
2011-04-21	2	packat	BL	172	388	183,86	2322	0,355	212	151	0,71	91	0,43
2011-04-21	3	packat	BL	212	429	228,45	2322	0,302	316	151	0,48	91	0,29

TECTVTA 2