



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT

No 34



Kalksten som fyllningsmaterial

Limestone as fill material

Jan Hartlén
Bengt Åkesson

LINKÖPING 1988



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT

No 34

Kalksten som fyllningsmaterial
Limestone as fill material

Jan Hartlén, SGI
Bengt Åkesson, Malmö fastighetskontor

Projektet har finansierats av Byggforskningsrådet,
forskningsanslag 851000-6, Malmö kommun och SGI.

LINKÖPING 1988

ISSN 0348-0755

AB ÖSTGÖTTATRYCK LKPG 1988

FÖRORD

Bristen på grus och sand som fyllningsmaterial i flera regioner i Sverige innebär att man söker alternativa material. Sådana material är exempelvis finkorniga schaktmassor och restprodukter från förbränning (aska och slagg) och metallurgi (masugnsslagg). Som alternativa material kan även räknas kalksten, som är ett mjukt och vattenkänsligt berg i jämförelse med i Sverige normalt förekommande graniter och gnejser.

I samband med utfyllning i Malmö hamn beslutades att använda kalksten för utfyllning för såväl grundläggning av en industribyggnad som färdigställande av hamnytor. En litteratursökning visade att de internationella erfarenheterna att använda kalksten för kvalificerade ändamål är begränsade, varför omfattande provningar i fält och laboratorium genomfördes. Under entreprenadarbetenas genomförande företogs en omfattande kontroll. Sättningarna har följts fram till december 1987, motsvarande ca 2 år efter industribyggnadens färdigställande.

Fastighetskontoret i Malmö har varit beställare av fyllningsarbetena. Man konstaterade att de stora erfarenheter man fått genom arbetena i Malmö hamn borde sammanställas och spridas. Detta har speciellt intresse, då svenska entreprenörer ofta träffar på sedimentärt berg vid utlandsarbeten. Det beslutades därför om att ta fram denna rapport.

Statens råd för byggnadsforskning (BFR) har finansierat rapportframställningen och Malmö fastighetskontor har bekostat provningarna och tillåtit publicering av materialet. Björn Möller, SGI, och Håkan Petersson, Scandiaconsult (tidigare HB Consult) har medverkat aktivt vid försökens genomförande och även givit underlag till här presenterad text. Alf Lindmark, SGI, har svarat för den geologiska bedömningen och ritich-metoden och Tom Lundgren, SGI, för tunnslipsanalyser och bedömning av kalkbergets beständighet. Tekn dr Lars Forssblad, tidigare Dynapac, har givit värdefulla råd under arbetets gång och Margareta Danell och Eva Dyrenäs, SGI, har svarat för utskrift.

Författarna vill framföra sitt varma tack till dessa personer och organisationer utan vars hjälp denna rapport ej varit möjlig att ta fram.

Malmö och Linköping mars 1988

Författarna

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
SUMMARY	7
SAMMANFATTNING	11
1. BAKGRUND	13
2. KALKSTEN	14
2.1 Beskrivning av Limhamns kalkbrott	14
2.2 Kalkbergets egenskaper	15
2.2.1 Ritchmetoden - hållfasthetsbestämning	15
2.2.2 Hållfasthetsegenskaper	17
2.2.3 Kornanalys	18
2.2.4 Kompressionsförsök	18
2.2.5 Kornfördelning	21
2.3 Beständighet	22
2.3.1 Erosion av strömmande vatten	22
2.3.2 Frostvittring	23
2.3.3 Kemisk vittring	23
3. PROV FYLLNING	25
3.1 Bakgrund	25
3.2 Uppbyggnad av provfyllningen	25
3.3 Försöksprogram	28
3.4 Plattförsök	31
3.5 Pressometerförsök	34
3.6 Fallviktsförsök	37
3.7 Jämförelse mellan olika kontrollmetoder	39
4. GENOMFÖRDA FYLLNINGSRARBETEN	42
4.1 Allmänt	42
4.2 Utfyllning och packning i torrhet (kv Verkö)	44
4.3 Utfyllning direkt i vatten	47

5.	ERFARENHETER FRÅN FYLLNINGSARBETENA.....	48
5.1	Kapaciteter.....	48
5.2	Materiallegenskaper.....	48
5.3	Kontroll av välpackad fyllning, kv Verkö.....	49
5.4	Kontroll av i vatten ändtippad fyllning,..... Nyhamnen och Norra hamnen	54
5.5	Uppföljning av sättningar.....	57
5.5.1	SwedeChromes anläggning.....	57
5.5.2	Sättningar i Nyhamnen.....	59
6.	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER.....	61
7.	LITTERATUR.....	63

SUMMARY

In connection with a filling project in Malmö harbour, a decision was made to use limestone as fill material both for the foundation for an industrial building and for finishing harbour yards. A literature survey showed that international experience of using limestone for advanced purposes is limited, and extensive tests in both the field and the laboratory were therefore undertaken. During the course of the subcontracted work, comprehensive inspections were made. The settlements have been followed up as far as December 1987, 2 years after the industrial buildings were completed.

The subcontracted work was carried out in two stages as follows:

- The limestone was drilled and blasted at the Cementa quarry in Limhamn and was loaded onto trucks carrying 85 tons each.
- The limestone was transported to a newly built 300 m pier in Limhamn. Here it was loaded onto a 130 m barge with a capacity of 10,000 tons.
- The barge was towed once a day 10 km to the filling site. Here it was unloaded by two wheel-loaders onto a number of trucks also carried on the barge.

The limestone was placed in two different ways in three areas. On the Verkö site, a process industry was to be built and the requirements on bearing capacity and resistance to settlements were therefore very high. Filling was carried out after pumping the enclosed area dry. The limestone was placed in layers about 1 m thick. Each layer was compacted with a number of runs by a tractor-drawn vibrating roller applying a roller weight of 10-15 tons. The total height of the fill varied between 5 and 7 m.

In the other two areas, the limestone was end-tipped directly into the water until it reached a level of about 1 m above the surface of the water. The fill was then compacted with a vibrating roller applying 10-15 tons vibrating weight and making 8 runs. A new layer was

deposited at a level about 2.3 m above the surface of the water, after which compaction was performed in the same way as with the first layer. The depth of water in the Nyhamnen harbour was about 7 m and in the Norra hamnen harbour between 2 and 4 m.

The results in both applications have been very satisfactory. The total settlements beneath the heaviest loaded foundations of the industrial building in the Verkö block amount to about 8 mm, just over 2 years after the building was completed.

The following recommendations can be made on the basis of this experience:

Properties of limestone fill

- The fine soil content should not exceed 10-15% calculated from the weight of material with a grain size of 0.06-60 mm.
- The firmness of the grains should be so high that a stable stone skeleton is obtained. This means that the larger part (at least 2/3) of the grains should have a compressive strength of at least 10 MPa.
- During blasting, measures should be taken to ensure that the material has the nature of blasting stone.

The following requirements should be met when **filling in dry conditions** where each layer is compacted:

- Layer thickness of compacted material should be ≤ 1.0 m, depending on the type of roller used.
- At least 8 runs with a 10-ton vibrating roller should be made.
- The material should be homogeneous, with no local conglomerations of boulders or fine soil.
- The material should have a suitable water content before compaction.

- The limestone should not be laid in unfavourable weather, such as heavy precipitation or severe cold.

By fulfilling these conditions, a loading of 300 kPa could be permitted in this particular case.

When filling in water, the same recommendations on materials as in dry conditions may generally be applied. In regard to that part of the fill which is above the water surface, compaction should be performed in accordance with the requirements set out above.

It has been found that settlements can be calculated with great accuracy on the basis of pressometer measurements. The pressometer is also very suitable for checking the quality of the work. Over 400 tests were made.

SAMMANFATTNING

I samband med utfyllning i Malmö hamn beslutades att använda kalksten som fyllningsmaterial för såväl grundläggning av en industribyggnad som för färdigställande av hamnytor. En litteratursökning visade att de internationella erfarenheterna att använda kalksten för kvalificerade ändamål är begränsade, varför omfattande provningar i fält och laboratorium genomfördes. Under entreprenadarbetenas genomförande företogs en omfattande kontroll. Sättningarna har följts fram till nu, motsvarande ca 2 år efter industribyggnadens färdigställande.

Entreprenadarbetena genomfördes i stora drag på följande sätt. Kalkberget borrhades och sprängdes i Cementa AB:s kalkbrott i Limhamn och lastades på truckar med en lastförmåga av ca 85 ton. Transporten skedde till en nyanlagd 300 m lång pir i Limhamn. Här lastades massorna på en pråm som var 130 m lång och tog ca 10.000 ton kalksten per gång. Pråmen bogserades en gång per dygn den ca 10 km långa sträckan till utfyllningsområdet. Utlastningen från pråmen skedde med två hjullastare på några av truckarna som medföljt pråmen.

Utläggning av massorna skedde på två olika sätt inom tre delområden. På Verkötomten skulle en processindustri uppföras varför kraven på bärrighet och sättningsfrihet var stora. Utfyllningen skedde i torrhet med en lagertjocklek av ca 1 m, där varje lager packades för sig genom ett flertal överfarter med en traktordragen vibrovält med en valsvikt av 10-15 ton. Utfyllningshöjden varierade mellan 5 och 7 m.

I de två andra områdena tippades kalkstenen direkt i vattnet som ändtippning tills man nådde en nivå av ca 1 m över vattenytan. Därefter packades fyllningen med vibrovält med 10-15 tons vibrerande vikt och 8 överfarter. Ett nytt lager påfördes till nivån ca 2,3 m över vattenytan, varefter packning skedde på samma sätt som på första nivån. Vattendjupet var i Nyhamnen ca 7 m och i Norra hamnen mellan 2 och 4 m.

I båda tillämpningarna har resultaten blivit mycket goda. För industribyggnaden på kv Verkö uppgår de totala sättningarna som mest till ca 8 mm drygt 2 år efter byggnadens färdigställande.

I rapporten ges rekommendationer hur man bör utföra och kontrollera dessa typer av fyllningsarbeten. Speciellt viktigt är att beakta att andelen finmaterial har stor betydelse och att kalkstenen är vattenkvotskänslig. Det har framkommit att sättningar kan beräknas med stor noggrannhet utifrån pressometerförsök. Fallviktsförsök tycks vara en metod lämplig att kontrollera den ytligare delen, motsvarande några meters mäktighet.

Vunna erfarenheter av utförda fyllningsarbeten kan sammanfattas på följande sätt:

- Kalksten kan användas för kvalificerade fyllningsändamål.
- Mark med mycket hög bärighet och ringa sättningstendenser kan skapas genom utläggning och packning i lager.
- Kalkstens speciella egenskaper måste beaktas vid såväl projektering som arbetsutförande och provning.
- Materialets finmaterialhalt och vattenkvot måste anpassas.
- Metoden har begränsad tillämpning vid ogynnsamma väderleksförhållanden såsom riklig nederbörd och sträng kyla.
- Vid fyllning i vatten är det ej helt klarlagt vilken nedbrytning som kan ske i ett lång tidsperspektiv.

Genom de pågående fyllningsarbetena skapar Malmö nya markområden där även tung industri kan lokaliseras utan att kostnadskrävande grundförstärkningsåtgärder behöver vidtas. Med sitt läge intill en djuphamn, ganska nära stadens centrala delar och med nära anslutning till goda väg- och järnvägsförbindelser blir området attraktivt för skilda slag av industrietableringar.

1. BAKGRUND

I anslutning till skapandet av den nya djuphamnen i Malmö skall genom utfyllningar nya markområden för industri- och hamnändamål erhållas genom utfyllning i havet. Enligt en av kommunstyrelsen godkänd områdesplan blir det färdiga området cirka 150 hektar stort. För utfyllningarna krävs tillförsel av nya massor av storleksordningen 10 milj m³.

Framför allt i sydvästra delen av Skåne råder underskott av fyllningsmassor. Även de marina täkterna av sand och grus i Öresund är knappa och möjligheterna att utnyttja dem begränsas starkt av miljömässiga hänsyn. Olika möjligheter att använda ersättningsmaterial måste därför undersökas. Malmö fastighetskontor har under de senaste åren genomfört ett omfattande utvecklingsarbete i samarbete med bl a SGI, Lunds tekniska högskola och privata konsultföretag vid att använda moränlera för kvalitativa fyllningsarbeten. Under en 10 års period har således genom fyllning med moränlera iordningställts cirka 2 milj m² mark för byggnadsändamål.

Under lång tid har överskottsmaterial från Limhamns kalkbrott använts för enklare fyllningsändamål. Däremot har man varit mycket restriktiv med att använda kalksten som fyllningsmaterial, där större krav på bärighet förelegat. På uppdrag av Malmö fastighetskontor har HB-Consult och SGI genomfört omfattande undersökningar rörande egenskaper hos kalkstensfyllningar. Utredningarna har omfattat bl a uppförande av flera provytor som packats på olika sätt. I samband härmed har även undersökts olika kontrollmetoder såsom plattförsök, pressometer- och fallviktsförsök. Resultaten var så lovande att Malmö kommun beslutade att genomföra utfyllning med kalksten av sammanlagt ca 400 000 m² uppdelat på tre delområden i Malmö hamn. För utfyllningarna åtgick drygt 1,8 milj m³, mätt som färdig packad volym.

Statens råd för byggnadsforskning (BFR) har givit ett anslag för att sammanställa erfarenheterna. Det bedöms vara av intresse för export av svenskt markbyggande att arbete av aktuell storleksordning dokumenteras, eftersom sedimentärt berg är normalt förekommande utomlands.

2. KALKSTEN

2.1 Beskrivning av Limhamns kalkbrott

Kalksten har hämtats från Limhamns kalkbrott i utkanten av Malmö, se Fig. 1. Kalksten har brutits under lång tid för cementframställning.



Fig. 1. *Limhamns kalkbrott*
Limhamn limestone quarry.

Den typ av kalkberg som använts som fyllningsmaterial härrör från kritsystemets yngsta led, Danien. Danienkalken underlagras av mäktiga lager av skrivkrita (Maastrichtien). Gränsen mellan dessa formationer återfinns ungefär på nivån -67 m. Danienkalkberget är sammansatt av många olika typer av sediment med stora egenskapsskillnader. Flintinnehållet är betydande, halten kan variera men minskar generellt sett mot djupet.

Vid en uppdelning av Danienkalkberget faller Kokkolitkalksten, Bryozokalksten och korallkalksten ut som dominerande undergrupper. Av dessa är den grå eller gulvita Kokkolitkalkstenen dominerande. Namnet har den fått därför att den förutom mikroskopiskt små kalkspatkorn och foraminiferer innehåller rikligt med Kokkoliter, dvs skivformiga kalkplåtar från mikroorganismer av gruppen flagellater. Kokkolikkalksten kan uppträda som allt från hård kalksten till lös kalksten och kalksand.

Brozokalkstenen har fått namn från de kolonier av Bryozoa eller mossdjur som bygger upp bergarten. Hårdheten kan variera starkt. Färgvariationen inskränker sig till skiftningar i vitt, gråblått eller gult. Skikt av mörk och lera uppträder i Bryozokalken. Korallkalkstenen är som namnet antyder uppbyggd av koraller. I vissa fall har korallstockarna helt lösts upp och istället kvarstår håligheter.

Danienkalkstenens övre del kan genom sin uppspruckenhet vara starkt vattenförande. Vatteninläckaget till dagbrottet i Limhamn är dock av liten omfattning, vilket tyder på relativt tätt berg mot djupet samt förmåga till självtätning.

2.2 Kalkbergets egenskaper

2.2.1 Ritchmetoden - hållfasthetsbestämning

Bestämning av egenskapsbeskrivande parametrar hos kalkberg i Malmöregionen kräver ett speciellt handhavande både i fält och vid undersökningarna på laboratorium. Här behandlas inte hur man vid användning av standardmetoder i fält och på laboratorium anpassar dessa till denna bergart. Istället redovisas en översiktlig undersökningsmetod för hårdhet, **Ritchmetoden**, samt en sammanställning av SGI:s erfarenheter från undersökningar av kalkbergets egenskaper.

I vissa sammanhang är det viktigt att snabbt kunna göra översiktliga bedömningar av stora kalkbergsvolymers hållfasthetsegenskaper. Kravet på en fyllning kan t ex vara ställt så att tillåten mängd ingående kalkberg som underskrider en viss enaxiell tryckhållfasthet är begränsad för att säkerställa att ett stenskelett erhålls. En metod som genom repning ("ritchning") av bergytan ger en grov uppfattning om kalkbergets enaxiella tryckhållfasthet har utvecklats av SGI. Erfarenheter från Danmarks geotekniska institut har också legat till grund för utvecklingen av ritchmetoden. Ritchmetoden bygger på empiriska samband mellan kalkbergets ythårdhet (repbarhet) och enaxiell tryckhållfasthet.

Repbarheten för olika ritchningsmaterial som funktion av enaxiell tryckhållfasthet redovisas i Fig. 2.

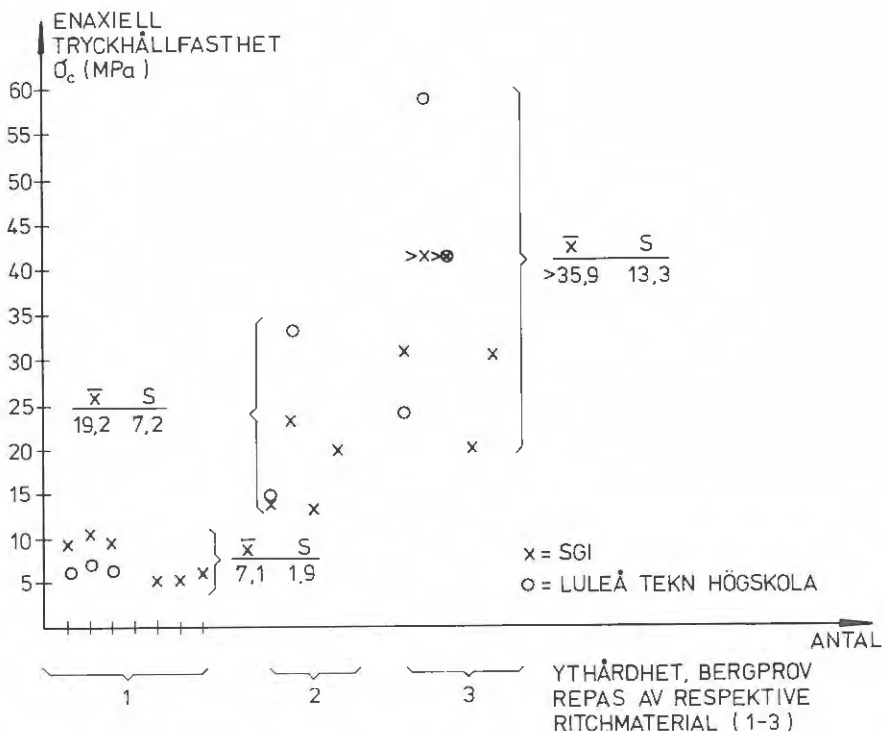


Fig. 2. Material som repar ytan hos kalkstensprov. Material 1 är nagel, material 2 är mässing och material 3 är järn. Symbolerna x och s anger medelvärde resp standardavvikelse.

Material causing scratches on the surface of limestone samples. Material 1 is a nail, material 2 is brass and material 3 is iron. The symbols x and s indicate mean and standard deviation respectively.

Vid ritchningen av kalkbergsproverna görs repningsförsök med tre olika material, nagel, mässing och järn. Det material som repar kalkstensprovet och har det lägsta ordningsnumret blir styrande vid bedömningen av provets hållfasthet. Som representativa hållfastheter för de olika ritchningsmaterialen har följande intervall använts:

järn	35 ± 15 kPa
mässing	20 ± 10 kPa
nagel	<10 kPa

Ritkning, som en metod att på ett överslagsmässigt och snabbt sätt bestämma hårdhet hos kalkberg, kan användas på kärnborrhoprover eller direkt i fält. Kalkberg vittrar i ytan, vilket medför att hårdhetsbe-

dömningen i fält bör göras på "färska" bergytor. En nysprängd bergpall lämpar sig väl för ritichförsök. I samband med ett stort berguttag i Limhamns dagbrott gjordes ritichförsök i ca 20 m höga bergpallar.

2.2.2 Hållfasthetsegenskaper

Den största delen av Danienkalkstenen (ca 80%) har en enaxiell tryckhållfasthet mellan 2-50 MPa. Hårdare skikt av kalksandsten, förkislad kalkberg och flinta förekommer på alla nivåer i Danienkalkstenen. Tryckhållfastheten för dessa kan variera mellan 40-400 MPa. Vid betraktande av större bergvolym är flintinnehållet ca 3-5%.

Inte överraskande har det visat sig finnas empiriska samband mellan flertalet av kalkbergets egenskapsbeskrivande parametrar. Densitet som funktion av enaxiell tryckhållfasthet visas i Fig. 3.

Liknande samband mellan vattenkvot och tryckhållfasthet eller densitet som funktion av draghållfasthet har erhållits.

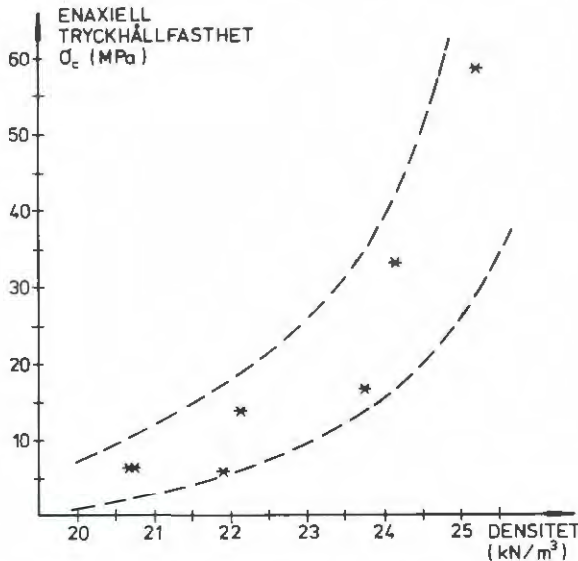


Fig. 3. Tryckhållfasthet som funktion av densitet. Försöken är utförda på bergmekaniklaboratoriet, Tekniska Högskolan i Luleå.

Compressive strength as a function of density. The tests were made at the Rock Materials Laboratory, Umeå College of Technology.

2.2.3 Kornanalys

Kornanalys gjordes på tunnslip tagna från knytnävsstora stenar, vilka tidigare utsatts för kompression i en jätteödometer, se avsnitt 2.2.4. Proven slipades ner till 30 µm tjocklek, vilket tillåter mikroskopering i genomfallande ljus.

Någon analys av ingående mineral gjordes inte, eftersom dominerande mineral är kalcit. I de uttagna kalkstensproverna löpte band där porositeten är något högre än genomsnittet. I dessa band var även frekvensen av sekundär kvarts och inslag av en andra mineral högre än genomsnittet. Bandens bredd varierade mellan 2 och 5 mm. Banden hade diffusa gränser och tycktes ej vara sammanhängande över längre sträckor utan verkade i stället ligga "omlott". Banden utgör svaghetszoner vid sönderbrytning. Mellan banden är bergarten ställvis mycket kompakt i den meningen att porer praktiskt taget saknas eller är mycket små.

I den mån kemisk vittring kunnat konstateras i de analyserade proverna i form av utlösning av karbonater har denna tydligen kompenenserats av att kvarts bildats i dessa porer.

2.2.4 Kompressionsförsök

Kompressionsförsök utfördes i en stor ödometer (diameter 590 mm, höjd 900 mm) för att studera sättningsegenskaperna. Tre försök utfördes på kalksten och ett på en blandning av knadder och slamsten. Knadder och slamsten är restprodukter erhållna vid cementframställning. Kalkstenen inpackades till densiteterna ca 1,2 t/m³ (ett försök) och 1,8-1,9 t/m³ (två försök).

Vid två av försöken utfördes pålastning i steg till 200 kPa med efterföljande avlastning, pålastning och ny avlastning. Därefter tillsattes vatten och en pålastning gjordes ånyo till 200 kPa. Som framgår av Fig. 4 har kalkstenen helt "glömt" sin tidigare spänningshistoria efter det att vatten tillsatts. Vid återupplastningen, innan vatten tillsatts, blev kompressionen ca 0,1%. Vid efterföljande pålastning, när vatten tillsatts, blev däremot tilläggskompressionen större än den vid ursprunglig upplastning (2 à 4 gånger större).

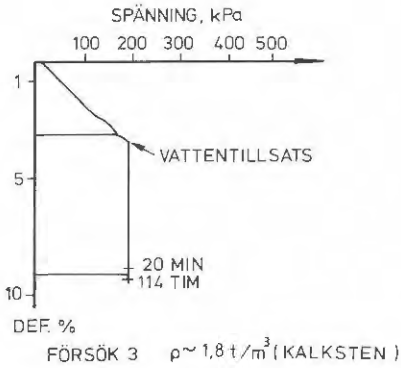
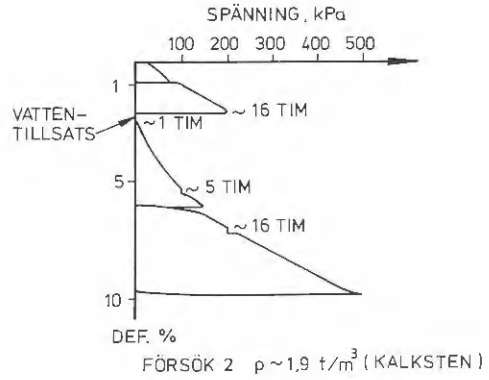
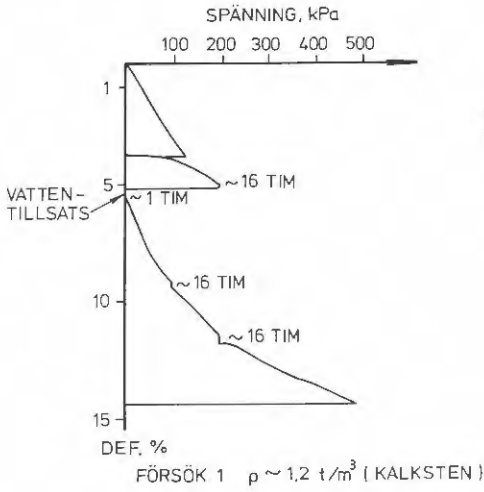


Fig. 4. Ödometerförsök på kalksten vid olika densitet. Belastning påfördes först på naturfuktigt material.

Oedometer tests on limestone of different density. The loading was applied first to naturally moist material.

Vid ett av försöken på kalksten valdes att stegvis lasta upp till 200 kPa, varefter vatten tillsattes under bibehållen last och kompressionen följdes under ca 5 dygn. I detta fall erhöles en kollaps i strukturen.

Vattentillgången har således stor betydelse för att i ett långtidsperspektiv erhålla en stabil fyllning. Samma förhållande gäller för finkorniga fyllningsmaterial såsom siltmoräner och lermoräner. Om en morän är för torr fås inte en "hopknådning" av materialet. När sedan vatten kommer in i fyllningen bryts dessa "klumpar" ned med risk för kollaps eller åtminstone stora sättningar. Å andra sidan får inte vattenkvoten vara för hög. I sådant fall blir finmaterialandelen flytbenägen. Vid hög vattenkvot sker dessutom en successiv uppmjukning av kalkstensblocken. Det är således viktigt att arbeta inom ett väl avgränsat vattenkvotsintervall. Man kan således betrakta en kalkstensfyllning på liknande sätt som finkorniga fyllningar. Skillnaden är att en kalkstensfyllning får en högre bärighet genom att tillskapa en sprängstensstruktur, där finmaterialet fyller hålrummen.

Inverkan av vatten på kalkstensfyllningens egenskaper har studerats i Mexico (Marsal, 1977). De fann att om mer än 300 à 400 l vatten tillsätts varje m³ fyllning, så förändras ej egenskaperna vidare. Vid de mexikanska försöken erhöles också en tilläggskompression när vatten tillsattes och liksom vid våra försök erhöles ny stabilitet efter kort tid, ca 4 minuter.

Den totala kompressionen blev lika stor vid samma densitet (1,8-1,9 t/m³) oberoende av spänningsvägen, Fig. 4. Densiteten (graden av packning) har normalt betydelse för sättningsbenägenheten. Med ökande densitet avtog också sättningsbenägenheten vid försöken på kalksten.

Det är inte rekommenderbart att bestämma kompressionsmodulerna utifrån ödometerförsöken med hänsyn till att väggarna och stämplarna är styva, vilket innebär krossning vid ökande belastning. Kompressionsmodulen underskattas som en följd härav.

2.2.5 Kornfördelning

Vid utsprängning skall tillses att ett välgraderat material erhålls. Därigenom kan senare en stabil fyllning erhållas med mindre risk för kollaps.

Största stenstorlek beror av packningsredskapet och således lagertjockleken. Vid användande av tung vibrerande vält (15 ton) kan skiktjockleken sättas till 1,0 m, varför största stenstorlek bör begränsas till 600 mm. För att erhålla en god packningseffekt bör finmaterialandelen ej överstiga ca 10%. Vid packning av sedimentärt berg sker en nedkrossning, vilken ökar finmaterialhalten.

För att kalkstenspartiklarna även efter packning skall bilda ett stenskelett måste materialet ha en viss lägsta hållfasthet. Som framgätt tidigare, varierar egenskaperna mycket i ett kalkberg. I det aktuella fallet bedömdes att minst 2/3 av utsprängt kalkberg skulle ha en tryckhållfasthet överstigande 10 MPa.

Fig. 5 redovisar kornfördelningen hos utsprängd kalksten. I ett fall grävdes en stor provgrop i färdigpackad fyllning. Även detta material siktades. Som framgår av figuren har en viss nedkrossning ägt rum.

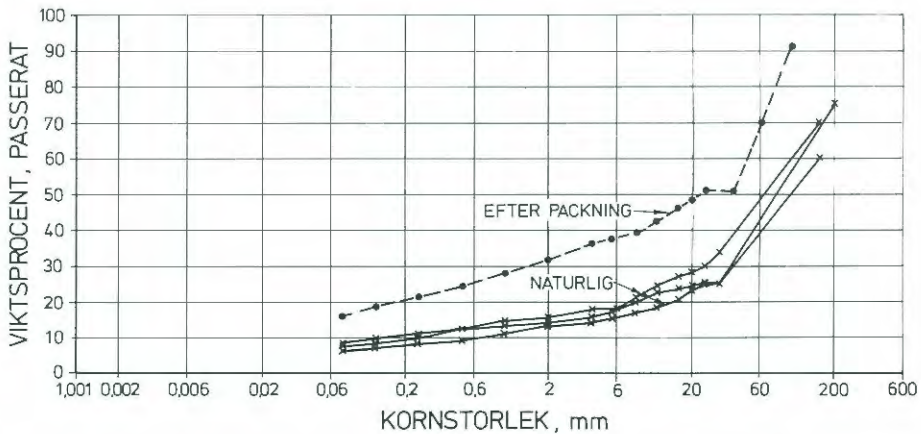


Fig. 5. Erhållna siktcurvor hos nyligen utsprängd kalksten samt efter packning.

Grading curves obtained on newly blasted limestone and after compaction.

Vid regn och när kalksten är mjuk kan finmaterialandelen bli så hög att porutrymmet i stenskelettet ej räcker till. I sådana fall skedde en upptransport av finmaterial till fyllningens överyta. När detta lösa lager blev tjockare än ca 1 dm skrapades det bort.

2.3 Beständighet

Fyllningsmaterialet kommer att utsättas för olika yttre krafter som i princip kan verka nedbrytande på materialet. Följande tre processer är därvid de viktigaste:

- o Erosion av strömmande vatten
- o Frostvittring
- o Kemisk vittring, dvs utlakning och bortförsl av karbonat.

2.3.1 Erosion av strömmande vatten

Kalksten som används som fyllningsmaterial blir relativt månggraderad. Genom att lägga ut och packa den i lager kan en tät struktur erhållas.

Erosion av strömmande vatten uppkommer för det fall vattnets strömningshastighet är hög i förhållande till materialets skjuvhållfasthet. Hos en välpackad kalkstensfyllning är permeabiliteten relativt låg, vilket innebär att strömningshastigheten blir låg vid de hydrauliska gradienter som kan uppträda till följd av infiltrerande nederbörd och ändringar av havsytans och grundvattenytans nivå. Beräkningsmässigt blir hastigheten i en packad fyllning maximalt 1 mm/h. På grund av den välpackade, månggraderade strukturen kommer materialets skjuvhållfasthet att vara relativt hög. Någon materialtransport bedöms därför inte äga rum utom möjligen i samband med enskilda stråk med förhöjd permeabilitet, där mycket små partiklar kan tänkas bli borttransporterade. Detta torde inte få någon praktisk betydelse.

Kalksten är däremot mindre lämpligt att använda som erosionsskydd i direkt kontakt med havet. Det sker en viss nedbrytning med tiden, bl a en viss frostsprängning.

Kalksten har använts för utfyllning direkt i Öresund för att utvinna nya områden i Norra hamnen, se kapitel 4. Det har med tiden skett en

viss utfläckning av slänten, samtidigt som det synes ha byggts upp ett naturligt filter som motverkar fortsatt erosion.

Om en slänt skall bibehålla en brant lutning erfordras att fiberduk utläggs på kalkstenen och att ett normalt erosionskydd byggs upp utanför med block av urbergstyp.

2.3.2 Frostvittring

Den verkan som tjälningen och upptiningen har på kalkstensfyllningen bör skiljas från frostvittringsprocessen. Den senare påverkar i princip beständigheten i materialet genom att det sönderdelas och att möjligheterna för materialtransport och utlakning därmed ökar.

Kalkstensmaterialet har en viss benägenhet att frostvittra, vilket sannolikt beror av en intern ogynnsam porositetsstruktur och förekomsten av kvarts som fyller ut vissa porer och småsprickor i materialet. En effektiv frostvittring kräver tillgång på vatten. Genom olika åtgärder, t ex kapillärbrytande skikt, asfaltering och dränering kan vattentillgången begränsas.

Mot bakgrund av erfarenheterna i Limhamns kalkbrott bedöms frostvittringen huvudsakligen yttra sig som en finpartikulär avspjälkning från större kalkstensfragment. Inom överskådlig tid (säg 100 år) bör frostvittringen inte leda till betydelsefulla sättningar eller reduktion av bärigheten i en välpackad fyllning.

Om en kalkstensfyllning ej erhåller optimal packning eller om den exponeras direkt för väder och vind sker dock en successiv nedbrytning, detta gäller speciellt om fyllningen utsätts för trafik.

2.3.3 Kemisk vittring

Utlakning och bortförsl av upplöst material är vanlig i kalksten som utsätts för strömmande, färskt vatten. Där sådant vatten fått bearbeta kalkstenen under långa tidsrymder, kan materialförlusten yttra sig som kanalbildningar i berggrunden (slukhål och grottor). Trots dessa effekter rör det sig om långsamma processer sett från anläggningsteknisk synpunkt, vilket framgår av följande beräkningsexempel:

Antag att halten av kalciumjoner i det utgående vattnet motsvarar den i havsvatten (400 mg/l) och att halten karbonatjoner motsvarar denna halt (760 mg/l). Antag vidare att nederbördsinfiltrationen pga bebyggelsen och hårdgörningen är begränsad till 50 mm/år (l/m^2 , år). Den totala materialtransporten från fyllningen blir då:

$$50 \times 1,16 \text{ g/år, m}^2 = 58 \text{ g/år, m}^2.$$

Detta motsvarar en årlig ökning av porvolymen (kompaktdensitet $2,6 \text{ t/m}^3$) med $0,022 \text{ dm}^3/\text{m}^2$. Om detta fördelas jämnt över en 2 m mäktig fyllning (över grundvattenytan), ökar således inte porositeten med mer än 0,1% av den totala volymen under en 100-års period. En så liten materialtransport bedöms inte få någon praktisk betydelse.

3. PROVFYLLNING

3.1 Bakgrund

För att studera egenskaperna hos väl packad kalkstensfyllning utfördes provfyllningar i två sammanhang. Nedan beskrivs försöken som utfördes på en del av den blivande byggnadsytan för SwedeChrome inom kv Verkö. Syftet med undersökningen var att bestämma

- kalkstenens packbarhet
- tillåtet grundtryck
- sättningsegenskaper
- lämpliga kontrollmetoder
- omfattning av kontroll.

3.2. Uppbyggnad av provfyllningen

Provytan byggdes upp i 4 lager om ca 1 m mäktighet vardera och med en yta av ca 20 x 20 m² vid färdigställandet av översta lagret Fig. 6.

Före utläggning av första lagret bortschaktades organiskt material och lösare sediment i botten.

Materialet, kalkstenen, sprängdes ut från kalkbrottet i Limhamn och transporterades till platsen med lastbil. Största blockstorlek begränsades till ca 0,6 m. Kalkstenen bladades ut med bandschaktare för lager 1 och 2 och med hjullastare för lager 3 och 4, Fig. 7.

Kalkstensytan packades med 10 tons traktordragen vibrovält. Vattenkvoten på kalksten var vid framkomsten mycket varierande pga väderlek (sol, regn) och inläckage av grundvatten vid delar av brytfronten i kalkbrottet. När materialet hade för låg vattenkvot, tillsattes vatten genom spolning på materialet.

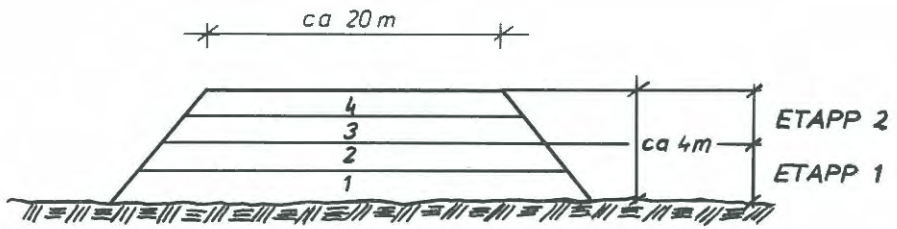


Fig. 6. Principskiss av uppbyggnaden av provfyllningen.
 General diagram of structure of test fill



Fig. 7. Uppbyggnad av provfyllningen på SwedeChromes byggnadsområde.
 Structure of test fill at SwedeChrome's building site.

Utläggning och packning skedde enligt följande schema:

- Lager 1: Utläggning
Vattning efter utläggning
Ytan avvägdes
Packning, 8 överfarter
Ytan avvägdes
- Lager 2: Utläggning och vattning utfördes samtidigt
Ytan avvägdes
Packning, 8 överfarter
Ytan avvägdes
- Lager 3: Utläggning och vattning utfördes samtidigt
Ytan avvägdes
Packning, 4 överfarter
Ytan avvägdes
- Lager 4: Utläggning och vattning utfördes samtidigt
Ytan avvägdes
Packning, 2 överfarter
Ytan avvägdes
Pga vattenöverskott vid packningsarbetet bestod överytan av ett "kalkslam". Detta "slam" skrapades bort, mosvarande ca 0,1 - 0,2 m.

Sättningar erhållna av packningen mättes genom avvägning. För lager 1 erhöles en kompression på i genomsnitt 7 cm, i lager 2 på ca 2 cm och i lager 3 och 4 varierade mätvärdena, men i genomsnitt blev kompressionen i stort sett försumbar. Variationen i uppmätta sättningar berodde på svårigheten att mäta på grund av spårbildning m m. Detta gällde speciellt för lager 3 och 4, där ett visst vattenöverskott förelåg. Lager 3 och 4 packades dessutom med ett mindre antal överfarter än lager 1 och 2. En bidragande orsak till att små sättningar erhöles av packningen bör vara att bandschaktaren arbetade på en liten yta, varför antalet överfarter av denna blev stort, innan packningen med vält utfördes.

Försök gjordes att bestämma densiteten. På grund av fyllningens karaktär med sten och block krävs stora provvolymen för att erhålla representativa värden. En stor spridning blev följden vid en provvolym på

gandet att stickproven är normalfördelade kan delytans normalfördelningskurva bestämmas. I Fig. 10 visas exempel på normalfördelningskurva bestämda med 5 pressometerförsök i välpackad respektive sämre packad fyllning.

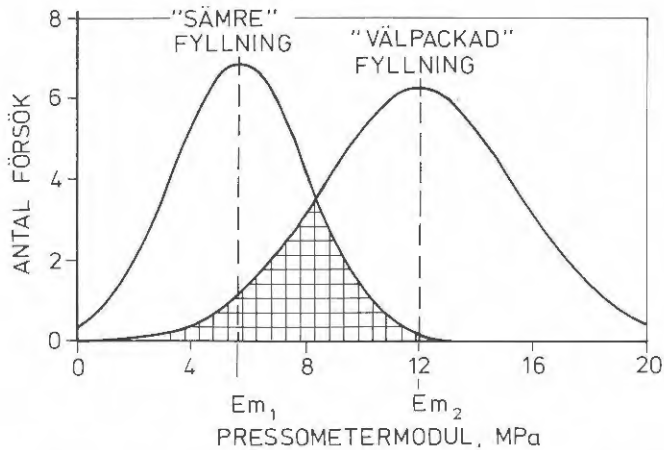


Fig. 10. Exempel på normalfördelningskurva från två nivåer på packningsarbete bestämda med fem stickprov per nivå.

Example of normal distribution curve from two levels in compaction determined from five random samples per level.

Ytan under en normalfördelningskurva är alltid lika med 1. Det innebär att ju större spridningsvärde desto lägre blir det aritmetriska medelvärdet och desto inhomogenare är fyllningen. Vidare har konstaterats att om man endast tar ett stickprov och det hamnar i den skrafferade zonen i figuren, vars yta är gemensam för normalfördelningarna för de båda delytorna, kan ingen slutsats dras om till vilken fördelning stickprovet hör och därför blir enpunktskontroller meningslösa i denna typ av fyllning.

Sammanfattningsvis kan sägas att för att öka säkerheten i bedömningen kan antalet provningar utökas. Dessutom kan det vara värdefullt att använda olika metoder parallellt.

I nedan beskrivna provningar vid provytan visade det sig att fem stickprov i varje delyta väl beskrev förhållandena.

3.4 Plattförsök

För att klargöra kalkstensfyllningens kompressionsegenskaper och i viss mån bärförmåga utfördes statistiska plattförsök på provfyllningens båda försöksnivåer. Av ekonomiska och tidsmässiga skäl användes förhållandevis små plattor i förhållande till de i den färdiga konstruktionen och till fyllningens kornstorlek. Försöken utfördes som korttidsförsök. Ändock bör plattförsöken ge en god bild av förväntade slutsättningar för den tänkta konstruktionen.

Totalt utfördes 10 plattförsök med cirkulära betongplattor med diametern 0,615 m utom i ett fall då diametern var 1,0 m. Lasten påfördes med domkrafter. Dragstagen förankrades i underliggande lermorän (etapp 1) respektive naturligt kalkberg (etapp 2).

Vid en av försökstyperna (ML) upplastades stegvis till maximalt värde (1200 kPa) med hänsyn till förankring och utrustning. Vid den andra försökstypen (CL) upplastades i steg till 400 kPa, varefter en serie av- och pålastningar gjordes mellan 200 kPa och 400 kPa. Lasterna fick normalt verka i 16 min utom vid de cykliska belastningarna, då tiden reducerades till 4 eller 8 min. Last-sättningskurvor från de två försökstyperna återges i Fig. 11.

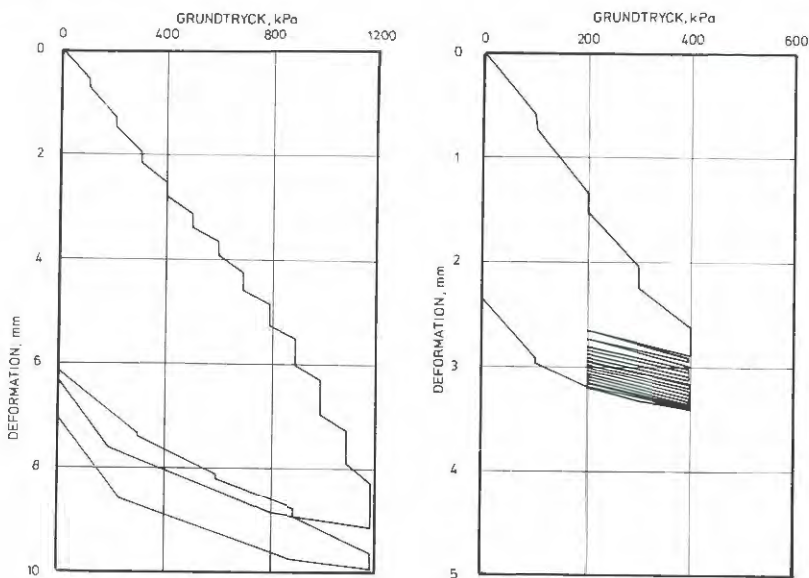


Fig. 11. Last- och sättningskurvor erhållna vid stegvis upplastning och vid cykliska försök.

Loading and settlement curves obtained in incremental loading and in cyclical tests.

Erhållna last-sättningskurvor är linjära eller svagt krökta. Inte i något fall har brott således erhållits. Detta var ej heller avsikten, då endast sättningsproblematiken avsågs att studeras.

I Tabell 1 har väsentliga data från försöken sammanställts. Krypdeformationen är utvärderad som skillnaden mellan deformationsvärdet mätt vid 8 resp 16 min.

Kompressionsmodulen M har utvärderats enligt Jaky

$$M = qB/2s \quad (1)$$

där

q = aktuellt grundtryck

B = plattdiameter

s = sättning vid grundtrycket q.

Tabell 1. Sammanställning av resultat från plattförsök på packad kalkstensfyllning utfylld i torrhet. ML betecknar stegvisa och CL cykliska försök.

Summary of results from plate tests on compacted limestone fill tipped during dry conditions. ML indicates incremental and CL cyclic tests.

Platta nr	Försökstyp	Initiell deform. vid 300 kPa (mm)	Modul $\frac{q \cdot B}{2s}$ (MPa)	Återuppl. deform. vid 300 kPa (mm)	Modul $\frac{q \cdot B}{2s}$ (MPa)	Krypning (mm)	Antal cykler (st)	Cyklisk def. (mm)
Etapp 1	1	ML	1,96	47	1,24	74	0,043	-
	2	CL	1,52	61	-	-	0,038	15
	3	ML	2,16	43	1,24	74	0,053	-
	4	ML	2,00	46	1,37	67 ¹⁾	0,037	-
	5	CL	2,25	41	-	-	0,052	25
		MV	1,98	47,6	1,28	71,7	0,044	-
	S	0,28	7,9	0,07	4,0	0,008	-	
Etapp 2	6	ML	5,83	15,8	1,35	68	0,113	-
	7	CL	11,29	8,2	-	-	0,263	25
	8	CL	17,92	5,2	-	-	0,423	23
	9	CL ²⁾	5,06	29,8	1,33	113	0,088	20
	10	ML	11,88	10,4	2,95	42	0,223	-
		MV ³⁾	11,73	9,9	2,15	55	0,256	-
	S	4,9	4,5	1,13	18,4	0,128	-	

1)Utvärderat i intervallet 0-400 kPa

2)Plattdiameter 1,0m

3)Platta 9 ej medräknad.

Av tabellen framgår att vid grundtrycket 300 kPa erhålls en medelsättning för de 5 plattförsöken i etapp 1 på 1,98 mm med en standardavvikelse på 0,28 mm. Detta motsvarar en Jaky-modul på i medeltal 47,6 MPa med standardavvikelsen 7,9 MPa och variationskoefficienten 17%. Motsvarande medelmodul för etapp 2 blev 9,9 MPa med standardavvikelsen 4,5 MPa och variationskoefficienten 45%. I dessa siffror har ej försök nr 9 medtagits pga dels dess större diameter och dels att ett block var beläget alldeles under plattan.

Resultaten visar att vid god packning (etapp 1) blir inte enbart fastheten avsevärt större utan även homogeniteten blir bättre, vilket återspeglas i en mindre variationskoefficient än vid etapp 2.

Kompressionsmodulerna har också framräknats för återupplastningen i försök 1, 3 och 4 i etapp 1. Medelvärdet blir 71,7 MPa och standardavvikelsen 4,0 MPa. I etapp 2 erhålls medelmodulen 53 MPa från försök 6 och 10.

Om medelmodulen från etapp 1 sätts in i sambandet (1), erhålls för grundtrycket 300 kPa sättningen

$$s = 3,15 B \text{ (mm)}$$

dvs sättningen blir ca 3 mm per plattmeter vid grundtrycket 300 kPa. För en kvadratisk platta med ytan 16 m^2 blir sättningen då ca 12 mm.

Avsikten med de cykliska försöken var att söka uppskatta de sättningar som uppkommer pga att lasten varierar under grundkonstruktionens livslängd. I etapp 1 utfördes två cykliska försök med 13 respektive 25 lastväxlingar. Tillskottssättningen i dessa försök blev 0,33 respektive 0,50 mm. Motsvarande resultat för etapp 2 blev 1,60 mm (25 lastväxlingar) respektive 2,50 mm (23 lastväxlingar). En grov uppskattning av förväntade sättningar från ett större antal lastcykler har gjorts. Vid 10^4 lastcykler skulle sättningen tillväxa med ca 65% (etapp 1) respektive 75% (etapp 2) i förhållande till sättningar efter korttidslast.

3.5 Pressometerförsök

Pressometerförsöket bedömdes vara en lämplig metod att in situ bestämma sättningsegenskaperna hos en kalkstensfyllning. En speciell teknik för håltagning och utförande av provning utvecklades i förberedande försök, Fig. 12. Ur uppmätt pressometerkurva kan pressometermodul och gränstryck bestämmas. För att erhålla en uppfattning om metodens naturliga spridning och fyllningens inhomogenitet utfördes normalt 5 försök på varje nivå.

I etapp 1 utfördes 5 st försök på vardera 0,75 m och 1,5 m djup under fyllningens dåvarande överyta. I etapp 2 utfördes samma antal försök på djupen 0,75, 1,5, 2,5 och 3,5 m under fyllningens överyta. På så sätt kunde provningen ske i mitten av varje enmetersskikt utom i det översta, vilket pga influensen från överytan valdes att placeras i skiktets nedre tredjedel. De färdigpackade skikten visade sig dock bli endast 0,85 m mäktiga. På så sätt kom provning på 3,5 m nivån inte att hamna i nedersta skiktets mitt utan i fyllningens underkant.

Utvärderingen av gränstrycket p_1 har utförts enligt tre olika metoder, nämligen enligt up-side-down, Lemée och log-log metoden. Samtliga metoder är redovisade i Baguelin (1978). Pressometermodulen har utvärderats enligt samma källa som största modul i ett visst definierat intervall.



Fig. 12. Utförande av pressometerförsök.

Performing the pressometer tests.

Resultaten i form av medelvärde, standardavvikelse och variationskoefficient för de olika skikten i etapp 1 och 2 framgår av Tabell 2 och Fig. 13.

Tabell 2. *Pressometermoduler (E) och gränstryck (P_l) uppmätta i provfyllningen.*

Pressometer moduli (E) and pressure limits (P_l) recorded in the test fill.

E T A P P 2								
Skikt	Antal överf.	\bar{E} MPa	s MPa	v %	\bar{P}_l MPa	s MPa	v %	E_m/P_l -
4	2	5.6	2,3	41	1.1	0.44	40	5.1
3	4	15.1	2.5	17	2.28	0.38	17	6.6
2	8	12.8	2.0	16	2.42	0.38	16	5.3
1	8	11.5	2.7	23	1.42	0.12	8	8.1
E T A P P 1								
Skikt	Antal överf.	\bar{E} MPa	s MPa	v %	\bar{P}_l MPa	s MPa	v %	E_m/P_l -
4	2	-	-	-	-	-	-	-
3	4	-	-	-	-	-	-	-
2	8	11.2	2.7	24	1.68	0.41	24	6.7
1	8	10.7	4.7	44	1.59	0.38	24	6.7

Standardavvikelsen för pressometermodulen är 2,0-2,7 MPa för såväl etapp 1 som etapp 2 utom i ett fall, nämligen skikt 1 under etapp 1, där lägsta resultat var 6,1 MPa och högsta 18,1 MPa. Om dessa två mätningar utesluts, erhålls en standardavvikelse i samma intervall som för övriga försöksserier. Medelvärdet för pressometermodulen i skikt 2-4 varierar mellan 11,2 och 15,1 MPa. Som tidigare omtalats, är resultaten från nedersta skiktet (skikt 1) i etapp 1 osäkra pga att provningarna utfördes i gränsskiktet mellan fyllning och underliggande jord.

Kvoten E_m/P_l anses vara jordartsberoende. För den aktuella kalkstenen blev den 5,1-8,1.

Ett mått på spridningen i resultat utgör variationskoefficienten, vilken definieras som standardavvikelsen dividerad med medelvärdet, dvs

$$v = s/m_v \quad (2)$$

där

v = variationskoefficient

s = standardavvikelsen

m_v = medelvärdet

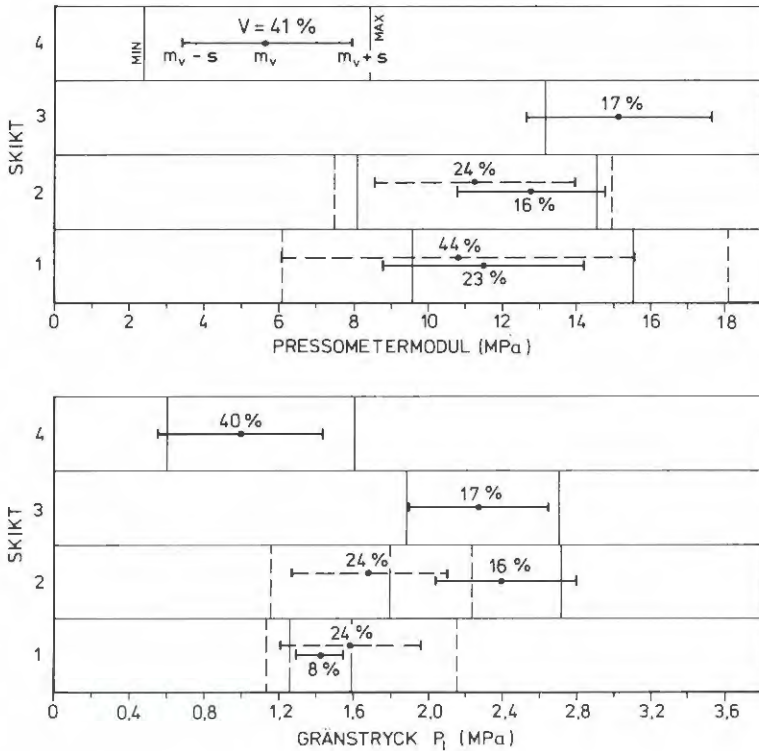


Fig. 13. Sammanställning av resultat från pressometerförsök på olika nivåer. Streckad linje innebär att försöken utfördes när endast skikt 1 och 2 packats upp.

Summary of results from pressometer tests at different levels. The broken line indicates that the tests were performed when only layers 1 and 2 had been compacted.

För provfyllningen synes variationskoefficienten vara 15-25% om skikt 4, packad med endast 2 överfarter, utelämnas. Detta tyder på att fyllningen är relativt homogen samt att provningsmetoden är lämplig. Intressant att notera är att variationskoefficienten ökar till dubbla värdet i det översta dåligt packade skiktet. Detta visar att pressometemetoden är känslig för homogenitetsskillnader.

3.6 Fallviktsförsök

Fallviktsförsök utfördes på provfyllningen utlagd och packad i torrhet genom att en fallvikt på 720 kg med diametern 495 mm släpptes från olika fallhöjder på den packade fyllningen, se Fig. 14. Vid nedslagsögonblicket mättes kraft och retardation i fallvikten. Fallvikten penetration i fyllningen bestämdes genom avvägning. För att erhålla en uppfattning om det dynamiska grundtrycket i förhållande till det statiska utfördes provningar med olika fallhöjd. Under entreprenaden utfördes dessutom försök med en 3,5 tons fallvikt med en diameter på 1,0 m.

Ur ett fallviktsförsök beräknas ett spännings-deformationssamband, ur vilket dynamiska moduler och brottgrundtryck kan utvärderas. Utvärdering av dynamisk modul utfördes enligt Jaky, se ekvation (1), sid 32.

Fig. 15 visar resultatet från försök på skikt 2. Släppen utfördes i samma träffyta i ordningen 0,3-0,6-1,0 m fallhöjd. Av figuren framgår att maximalt mobiliserat grundtryck ökar med ökande fallhöjd (ökande energi). Vidare framgår konsolideringseffekten från föregående släpp. Således återfinns på kurvan från fallhöjden 0,6 m inverkan av fallhöjden 0,3 m vid maximalt grundtryck från det försöket. På motsvarande sätt återfinns inverkan från fallhöjd 0,6 m på kurvan för fallhöjden 1,0 m. I Tabell 3 redovisas väsentliga data från fallviktsförsöken.



Fig. 14. Utrustning för utförande av fallviktsförsök. Fallvikt 720 kg.

Equipment for performing tests with a falling weight of 720 kg.

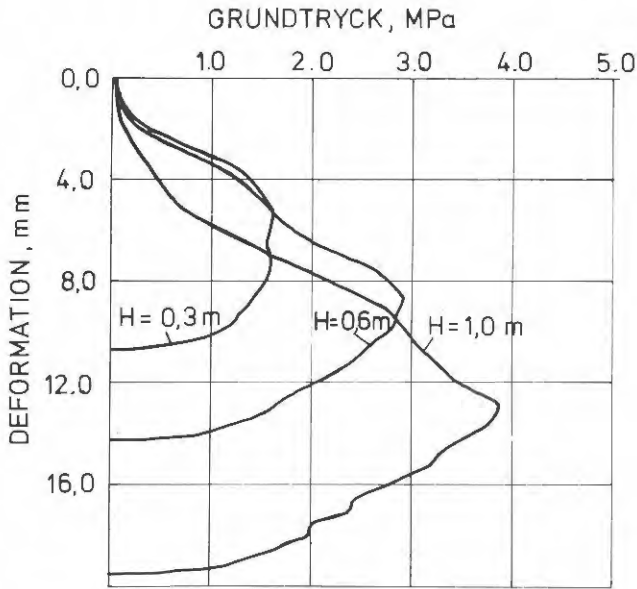


Fig. 15. Kraft-deformations samband för varierande fallhöjd. Släppen är utförda i samma yta i ordningen 0,3, 0,6 och 1,0 m fallhöjd (etapp 1).

Force-deformation relations for varying drop height. The drops were made on the same surface with drop heights of 0.3, 0.6 and 1.0 in this order (Stage 1).

Tabell 3. Data från fallviktsförsök utförda under etapp 1.

Data from falling weight tests during Stage 1.

Fallhöjd m	Modul MPa	q_{max} Mpa	Sättn. uppm. mm	Retar- datation g	Max. hast. m/s
0.3	138	1.6	0	43.0	2.5
0.6	128	2.9	2.3	78.8	3.5
1.0	138	3.8	3.0	103.2	4.6

Modulen blev således oberoende av fallhöjden, medan övriga parametrar såsom maximalt mobiliserat grundtryck, maximal retardation och maximal hastighet hos fallvikten ökade med ökande fallhöjd. Samma förhållande noterades för försök på skikt 4, dvs det skikt som erhöll minst packningsarbete, se Tabell 4.

Tabell 4. Data från fallviktsförsök utförda under etapp 2.
Data from falling weight tests during Stage 2.

Fall- höjd m	Modul MPa	q_{max} MPa	Sättn. uppm. mm	Retar- dation g	Max hast. m/s
0.3	16.1	0.7	10.5	18.6	2.4
0.6	15.8	1.0	12.5	25.8	3.4
1.0	23.1	1.3	17.0	35.7	4.4
1.5	24.6	2.0	20.3	53.4	5.4

3.7 Jämförelse mellan olika kontrollmetoder

En kontrollmetod skall ge ett entydigt svar. Detta innebär att metoden i sig skall vara lämplig och inte resultera i stor spridning i mätdata i en "homogen" fyllning. Vidare skall metoden vara känslig för variationer hos den parameter som skall värderas. Nedan har jämförelse gjorts mellan resultat erhållna från plattförsök med resultat från pressometerförsök och fallviktsförsök.

Moduler beräknade enligt Jaky från fallviktsförsöken relaterade till moduler från de statistiska plattförsöken redovisas i Fig. 16. Mittpunkten i ellipserna visar medelvärde för respektive metod medan ellipsens axlar visar standardavvikelsen. Siffrorna utanför ellipsens periferi redovisar metodens variationskoefficient. Även om spridningen synes vara stor, så är upplösningen god och skillnaden mellan olika packningsarbeten tillräcklig. Viktigt att notera är att variationskoefficienten blir liten för den välpackade fyllningen, vilket anger att provningsmetoden bör vara relevant. Fallviktsförsök bör därför vara en metod som med framgång kan användas för kontroll av packad kalkstensfyllning.

På motsvarande sätt har resultat från pressometerförsök relaterats till modulerna erhållna vid plattförsöken, se Fig. 17.

Figuren visar att en god upplösning också fås med pressometermetoden och att skillnaden mellan litet och stort packningsarbete är tillräcklig och därför bedöms också pressometermetoden vara en lämplig metod för kontroll av packad kalkstensfyllning. Variationskoefficienten är liten för den väl packade fyllningen.

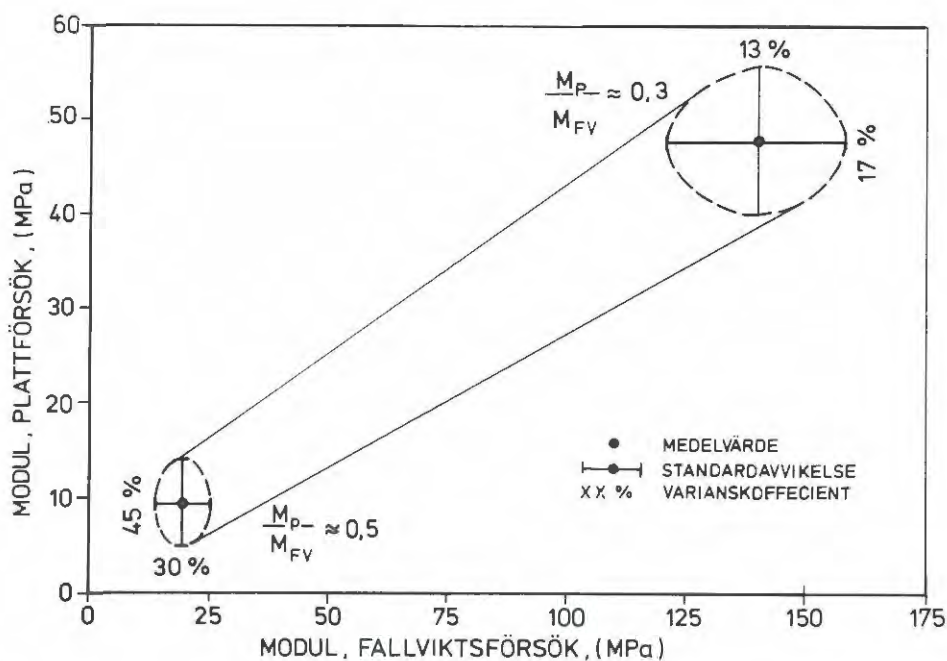


Fig. 16. Jämförelse mellan Jaky-moduler från plattförsök och fallviktsförsök.

Comparison between Jaky modules from plate tests and falling weight tests.

Variationskoefficienten för den välpackade respektive den lösare fyllningen blev mycket olika. Däremot visar statistiskt plattförsök, fallviktsförsök och pressometerförsök i stort samma variationskoefficient för respektive fyllningstyp vilket är noterbart.

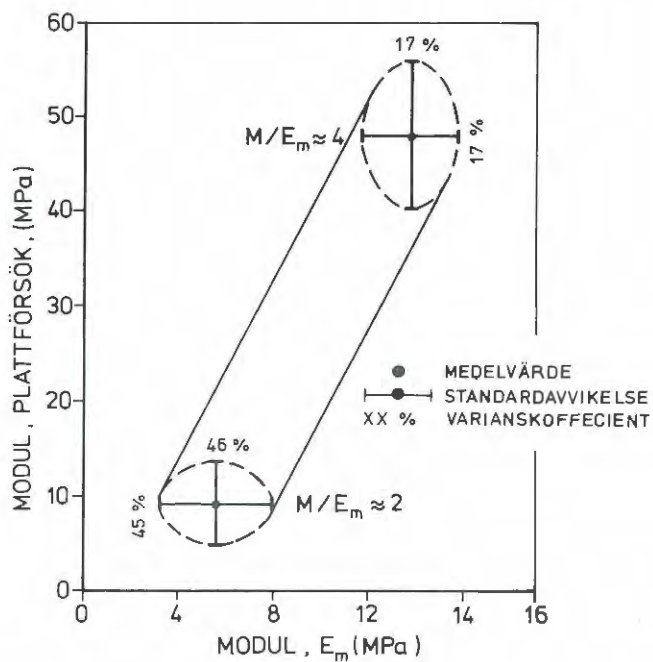


Fig. 17. Jämförelse mellan moduler erhållna från plattförsök och pressometerförsök.

Comparison between modules obtained from plate tests and pressometer tests.

4. GENOMFÖRDA FYLLNINGARBETEN

4.1 Allmänt

De aktuella fyllningsarbeten, som Malmö stad låtit genomföra, avser i huvudsak tre olika delområden. Det område som först kom till utförande var ett ca 40.000 m² stort område på kv Verkö vid Östra hamnen där SKF Steel Engineering AB sedermera uppfört ett ferrokromverk för SwedeChrome AB:s räkning. Delområde 2 avser några smärre ytor i Nyhamnen avsedda för containeruppställning resp järnvägsspår för färjetrafiken. Det tredje området utgör ca 30 hektar, som har utvunnits genom utfyllning direkt i Öresund och är avsett för hamn- resp industriändamål i anslutning till SwedeHarbour i Norra hamnen. För detta senare område utfördes enligt krav från vattendomstolen först en omslutande vall innan området i övrigt utfylldes.

Arbetena har utförts på entreprenad av byggföretaget JCC:s Malmöförvaltning i konsortium med LKAB, där det senare bolaget främst svarat för transportresurser i form av truckar med förare. Arbetena påbörjades i augusti 1984 och pågick till juli 1986 då sammanlagt drygt 1,8 milj m³, mätt som färdigpackad volym, hade utfyllts.

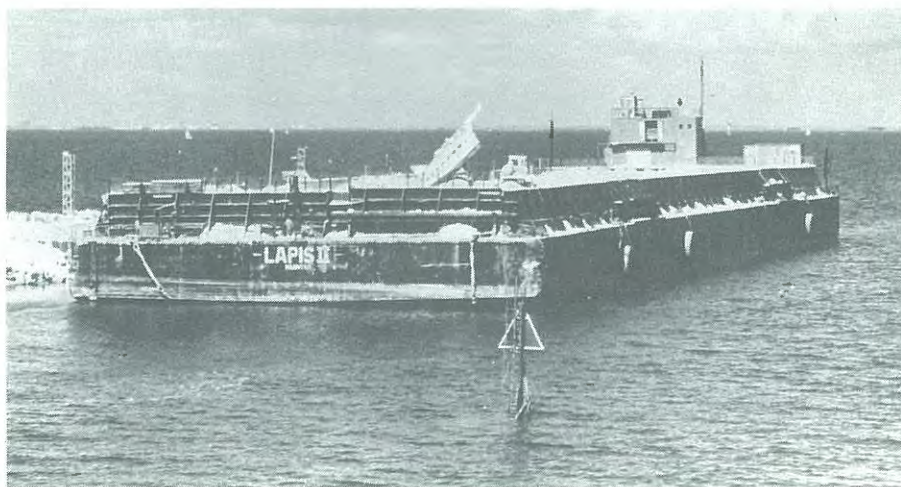
Entreprenadarbetena genomfördes i stora drag på följande sätt:

- Kalkberget borrhades och sprängdes i Cements AB:s kalkbrott i Limhamn och lastades på truckar av typ Euclid resp Terex med en lastförmåga av ca 85 ton, Fig. 18 a.
- Transporten skedde från sprängplatsen, som låg på en nivå av ca 65 m under marknivån, den 3 km långa sträckan till en nyanlagd 300 m lång pir i Limhamn. Här lastades massorna på en pråm som är 130 m lång och lastar ca 10.000 ton kalksten per gång, Fig. 18 b.
- Pråmen bogserades en gång per dygn den ca 10 km långa sträckan till utfyllningsområdet. Utlastning från pråmen skedde med två hjullastare på några av truckarna som medföljt pråmen.



a. Utlastning av kalksten i kalkbrottet.

Loading limestone at the quarry.



b. Prämtransport av kalkstenen.

Transporting limestone by barge.

Fig. 18. Utlastning och transport.

Loading and transport.

4.2 Utfyllning och packning i torrhet (kv Verkö).

Utläggning av massorna har skett på två olika sätt inom de tre delområdena. För Verkötomten var kraven på bärighet och sättningsfrihet särskilt stora och den tidigare havsbotten hade ett ansevärt lager av löst material. Efter invallning länsades därför hela området och de lösa massorna urschaktades och borttransporterades. Utfyllningen skedde sedan i torrhet med en lagertjocklek av ca 1 m, där varje lager packades för sig genom ett flertal överfarter med en traktordragen vibrovält med en valsvikt av 10-15 ton, Fig. 19. Utfyllningshöjden varierade mellan 5 och 7 m.

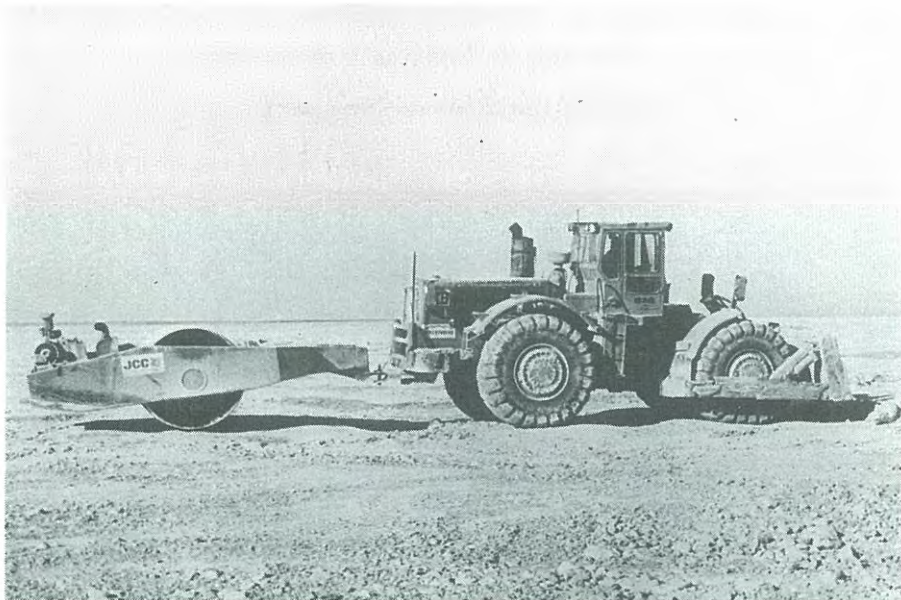


Fig. 19. Packning av kalkstensfyllningen med en 15 tons vibrovält.

Compaction of the limestone fill with a 15-ton vibrating roller.

På kv Verkö har efter fyllningens färdigställande SKF Steel Engineering AB låtit uppföra ett ferrokromverk. Genom en unik process baserad på plasmateknik skall vid full drift ca 80.000 ton ferrokrom framställas per år.

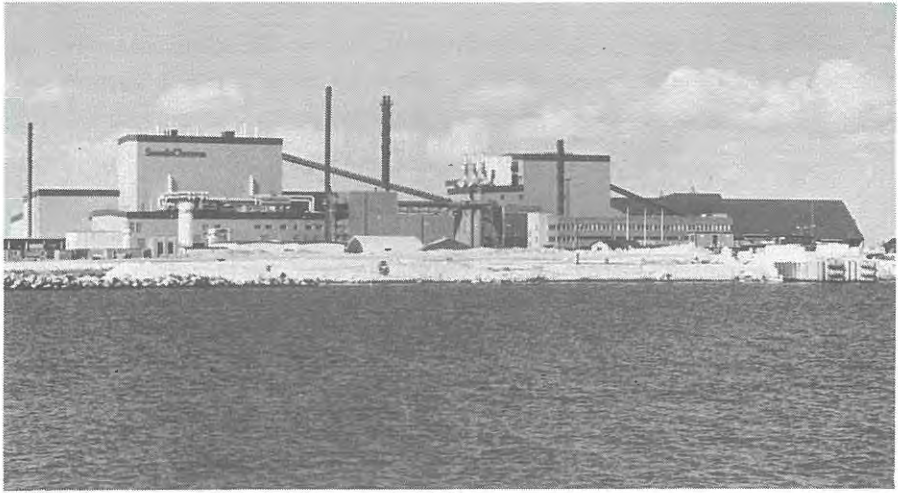
Anläggningen har en byggnadsvolym på drygt 200.000 m³ och utgörs av ett tiotal byggnader fördelade på centralverk, materialberedningsverk, kromit- och kokslager samt kontor, Fig. 20. Byggtiden uppgick till drygt ett år och anläggningen slutbesiktigades till huvudsaklig del i juni 1986.

Byggnaderna har normalt en stålstomme. Processugnarna är upphängda i stommen. Grundläggning skedde med separata plattor i kalkstensfyllningen, Fig. 20b. Tillåten påkänning valdes till 200 kPa med hänsyn till att kunskapen om kalkstensfyllning då var mycket begränsad. Man kan i efterhand konstatera att ett högre grundtryck kunde valts utan att orsaka skadliga sättningar.

En väsentlig fråga var vilken överbyggnadstyp som skulle väljas. Om dimensioneringen skulle utgå från den höga finjordsandelen skulle en tjock överbyggnad behöva väljas. Om man å andra sidan kunde förlita sig till en sprängstensstruktur kunde överbyggnaden göras tunn.

Två provgroppsgrävningar utfördes. Karaktären hos fyllningen bedömdes motsvara den för en ordinär bergbank. Halten finjord bedömdes ej negativt påverka fyllningens bärighet. Vidare noterades att variationen i vattenkvot borde få liten inverkan i den färdigpackade fyllningen. Förekomsten av ett mjukt ytskikt bedömdes emellertid ge en negativ påverkan på överbyggnadens bärighet. Det föreskrevs därför att tjockare lager av löst material än 5 cm skulle tas bort.

Överbyggnaden, som slutligen valdes, består av en grusbitumenöverbyggnad.



a. SwedeChromes anläggning.

The plant.



b. Grundläggningsarbeten.

Foundation laying.

Fig. 20. SwedeChromes anläggning.

SwedeChrome's plant.

4.3 Utfyllning direkt i vatten

För övriga områden tippades kalkstenen direkt i vattnet som ändtipping till man nådde över vattenytan, Fig. 21. Vattendjupet var i Nyhamnen ca 7 m, medan det i Norra hamnen varierade mellan 2 och 4 m.

En första yta färdigställdes upp till en nivå av ca 1 m över vattenytan. Därefter packades fyllningen med vibrovält med 10-15 tons vibrerande vikt och 8 överfarer. Ett nytt lager påfördes till nivån ca 2,3 m över vattenytan, varefter packning skedde på samma sätt som på första nivån.

I Nyhamnen har del av ytan hårdgjorts med SF-sten och använts för uppställning av biltrailers. För övriga ytor har olika överbyggnader utförts beroende på nyttjandesättet.



Fig. 21. Utfyllning av vattenområde genom ändtipping.

Filling the water-filled area by end tipping.

5. ERFARENHETER FRÅN FYLLNINGARBETENA

Här beskrivs såväl praktiska erfarenheter av arbetenas genomförande som erhållen kvalitet hos utförda arbeten.

5.1 Kapaciteter

Sedan entreprenören skaffat sig erfarenheter av såväl transportapparater som materialegenskaper och arbetsmetoder kunde arbetet under hela senare delen av entreprenadtiden drivas på ett kontinuerligt och effektivt sätt. Således utlades under de sista 12 månaderna en kvantitet som varierade mellan 160 och 230 tusen ton per månad, alltså i medeltal ca 100.000 m³ färdig volym per månad.

Arbetet bedrevs då så att sprängning och lastning skedde under tiden kl 06-16 varefter pråmen transporterades till utfyllningsområdet. Lossning och utläggning påbörjades kl 16 och pågick 6 à 8 tim, varefter pråmen återgick.

För arbetet användes i huvudsak följande maskiner:

- För lastning i brottet, en grävmaskin PH 1.500 med 6 m³ skopa samt en grävmaskin RB 31 med 4,5 m³ skopa.
- För lastning från pråmen, 2 hjullastare Cat 992 B.
- För transport till pråmen, 7 truckar Euclid R 85 85 tons last.
- För transport till utläggningsplatserna, 3 à 5 truckar som medföljde pråmen.

5.2 Materialegenskaper

Kartering i kalkbrottet hade visat på stor variation i förhållandet hård kalksten - lös kalksten - kalksand. Med hänsyn härtill var det önskvärt att välja ut partier med hög halt hård kalksten. Detta visade sig i praktiken icke möjligt med hänsyn till krav på rationell sprängning, utlastning och transport. Egenskaperna hos kalkberget skiftade snabbt i såväl sida som djup varför man av ekonomiska skäl fick nyttja stora sammanhängande partier. Någon sortering efter sprängning var inte heller praktiskt genomförbar.

Kornfördelningen hos det utsprängda materialet och då särskilt finmaterialhalten kunde påverkas i ganska stor utsträckning genom val av borravstånd, laddningsstorlek och typ av sprängmedel. Sprängningsarbetet genomfördes av Cementas erfarna personal, som prövade sig fram till bästa resultat. Trots detta visade det sig svårt att hålla nere finmaterialhalten i önskvärd omfattning. En ökad finmaterialhalt innebär att vattenkvoten får en större betydelse för bearbetbarheten av massorna. Ökad vattenkvot vid hög finmaterialhalt leder till svårigheter med packningen.

Truckar och traktorer bearbetar ytan vid utläggning och packning varigenom en viss nedbrytning av ytskiktet sker med ansamling av finmaterial i ytan. Vattenövermättnad i denna leder till svårigheter med effektiv packning, varför det är nödvändigt att vid stor nederbörd sörja för god vattenavrinning.

Framför allt arbetena på Verkötomten drabbades av den stränga vintern 1985. Även då utsprängning skedde omedelbart före lastning och transport visade sig värmekapaciteten i massorna inte tillräcklig för att förhindra tjälning efter utläggning när temperaturen gick väsentligt under 0°. Redan vid -5° och måttlig vind uppstod betydande svårigheter och vid lägre temperatur och ökande vind omöjliggjordes arbetena helt. Möjligheter till uppvärmning av massorna eller täckning av utlagda massor är starkt begränsad av ekonomiska skäl med hänsyn till de kapaciteter och ytor det i allmänhet här är fråga om.

5.3 Kontroll av välpackad fyllning, kv Verkö

Försöken på provytorna visade att egenskaperna hos en kalkstensfyllning är beroende av många olika faktorer såsom kalkbergets hårdhet och sammansättning, mängden finmaterial i massorna, vattenkvoten, lagertjockleken och packningssättet. Provingarna visade också att med lämplig sammansättning på materialet och med anpassad fyllnings- och packningsmetodik kan man erhålla en fyllning med hög bärighet.

Med tanke på svårigheterna i det praktiska utförandet och den begränsade erfarenhet av denna typ av fyllningar som förelåg genomfördes omfattande kontroll- och provningsåtgärder under entreprenadarbetena.

Härigenom kunde tidigt avslöjas sådana områden som ej erhållit erforderlig packning. Kompletterande packning, eventuellt efter verkställd lokal urschaktning och förnyad fyllning, kunde ske innan ytterligare lager påfördes.

På Verkötomten bestod kontrollen i första hand av pressometerförsök. På framschaktade grundläggningsytor användes för kontroll fallviktsförsök. Även packningsmätare provades men i liten omfattning.

Densitetsbestämning

Densitetsbestämningar har skett genom urschaktning med vägning av bortschaktat material och volymbestämning genom vattenfyllning. Provvolymer var ca 5-6 m³. Följande värden erhöles: 2,07, 2,11 och 2,11 t/m³. Bestämning av densiteten hos prover tagna med kärnboringar från fast berg i brottet gav värdet cirka 2,3 t/m³. Detta visar att man erhållit en synnerligen välpackad fyllning.

Pressometerförsök

Pressometerförsök utfördes successivt, när varje enskilt lager lagts ut. Utfyllnaden utfördes i tre etapper inom Verkötomten, med hänsyn till tidplanen för grundläggningsarbetena.

Totalt utfördes ca 400 pressometerförsök. Medelvärde och variationskoefficient har beräknats för respektive lager. I Fig. 22 har en uppdelning gjorts mellan de tre etapperna. Man konstaterar att medelmodulerna ökar med antalet påförda lager utom för etapp 1. Det är normalt så att fastheten bör öka med ökande fyllningshöjd, när underliggande naturlig schaktbotten är relativt mjuk.

En orsak till den förhållandevis stora spridningen är att hänföra till fyllningsmassornas varierande kornstorlek, från finjord till block. Pressometermodulerna är genomgående av samma storleksordning som de som erhöles vid provpackningen, se Fig. 13. Däremot kan man konstatera att spridningen, uttryckt med variationskoefficienten, blev större under entreprenadarbetena. Orsakerna är flera och i första hand är det varierande väderleksförhållanden som kyla och regn. Man kan dock konstatera att variationskoefficienten avtog med ökande antal utlagda lager.

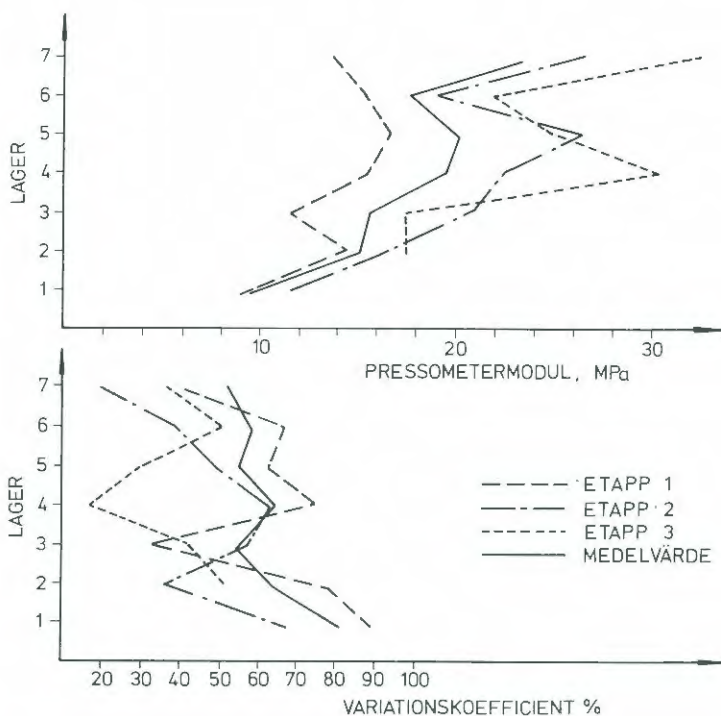


Fig. 22. Uppmätta pressometermoduler och tillhörande variationskoefficienter vid entreprenadarbetena på kv Verkö.

Recorded pressometer moduli and associated coefficients of variation in contractors' work on the Verkö block.

Fallviktsförsök

Fallviktsförsök kalibrerades i samband med provfyllningen, kap 3.6. Vid schaktning i plattlägena, efter avslutad uppäckning av fyllningen, provades fallvikten för att klargöra att schaktningen inte resulterade i en uppmjukning av fyllningen. Efter viss utprovning valdes att avjämna provytan med 10-20 mm packat grus före fallviktsförsöket.

Försöken utfördes med en ca 720 kg fallvikt med diametern 495 mm och höjden 1000 mm. Fallvikten som är instrumenterad med 2 st accelerometrar släpptes först från 0,3 m höjd. På så sätt erhöles en tillplattning och utjämning av provytan. Själva försöket utfördes med 1,0 m fallhöjd varvid accelerationen mättes och lagrades på en mätbandspelare för senare utvärdering. Fallviktens intryckning av släppytan mättes också.

Kraven för att godkänna grundläggningsytan definierades vara en kompressionsmodul på minst 100 MPa och ett bestående intryck på max 7 mm.

Försöken visade att arbetsförfarandet normalt gav en acceptabel schaktbotten.

Fallviktsförsök utfördes även på färdig fyllningsyta. Syftet var att söka ett samband mellan fallviktsmodul och compactometervärde, se nedan.

Packningsmätarförsök

För att studera compactometerns känslighet att detektera dåligt packade ytor utfördes en begränsad försöksomgång, när fyllningen färdigställdes. Compactometern registrerar mätvärden kontinuerligt framräknade ur accelerationsförloppet hos välttrumman, Fig. 23. Compactometervärdet (CMV) är dimensionslöst och kan närmast relateras till undergrundens styvhet.

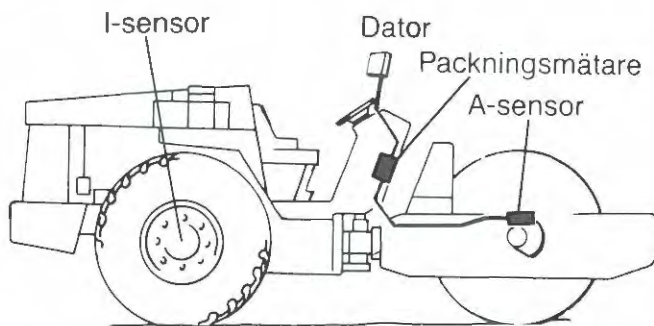


Fig. 23. Compactometer framtagen av Geodynamik AB.

Compactometer produced by Geodynamik AB.

Compactometervärdena registrerades i tre på varandra följande vältöverfarter, Fig. 24. Man kan notera att i punkt 3 ökade inte CMV-värdet med ökande antal överfarter. Det berodde på att fyllningen hade hög finjordhalt med hög vattenkvot. I punkt 9 ökade däremot CMV-värdet till samma medelnivå som för mätsträckan efter ytterligare överfarter.

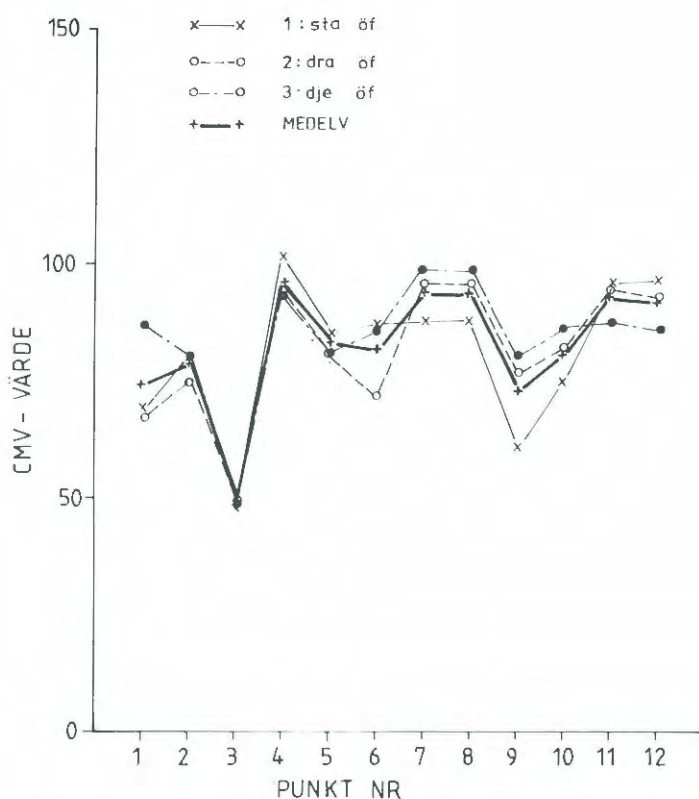


Fig. 24. Uppmätta compactometervärden under tre överfarter.

Recorded compactometer values during three roller runs.

Genom jämförelser mellan compactometer och fallvikt har vi försökt finna samband mellan compactometervärden och dynamisk elasticitetsmodul. En första sammanställning är gjord i Fig. 25. Om detta samband går att klarlägga tydligare, skulle de dyrare pressometer- och fallviktsförsöken eventuellt kunna ersättas med den betydligt billigare compactometermetoden. Dessutom har compactometern den stora fördelen att det sker en kontinuerlig registrering. Osäkerheten med compactometern är dock att registrerade värden är starkt beroende av vattenkvoten. För en kalkstensfyllning har detta inte samma betydelse som för finkorniga jordfyllningar.

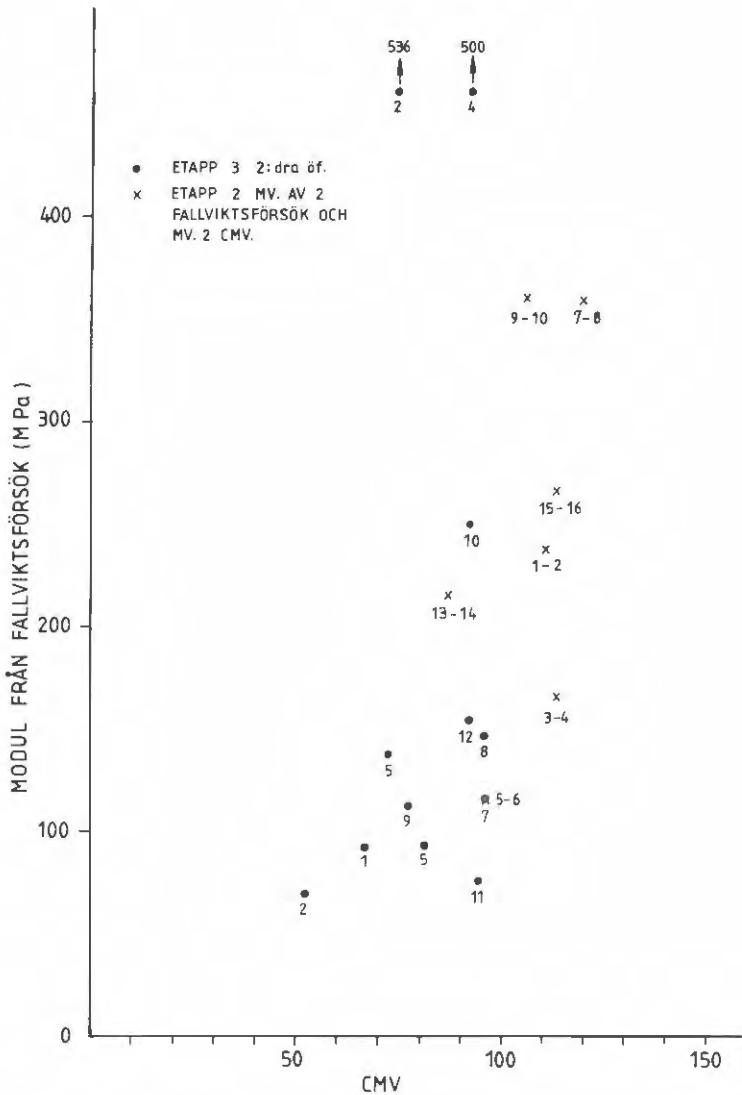


Fig. 25. En jämförelse mellan compactometervärden och moduler från fallviktsförsök (750 kg).

Comparison between compactometer values and moduli from fall-ing weight tests (750 kg).

5.4 Kontroll av i vatten ändtippad fyllning, Nyhamnen och Norra hamnen

Fyllningarna tippades direkt i vattenområde och packades först sedan fyllningen nått ca 1,0 m över vattenytan. En andra packningsomgång genomfördes när fyllningen nått färdig höjd, motsvarande ca 2,3 m över vattenytan.

Inledande försök

I ett initialskede utfördes pressometerförsök före och efter det att packning utförts. Någon signifikant höjning av fastheten konstaterades inte av packningen, vilket torde bero på det stora packningsarbete truckarna utförde vid sina passager, se Tabell 5.

Vid en försöksomgång utfördes pressometerförsök efter utförd packning. Därefter schaktades det översta lagret bort och en förnyad packning gjordes på framschaktad yta. Efterföljande pressometerförsök visade att pressometermodulerna fick en mindre spridning indikerande en mer homogen fyllning.

Tabell 5. Resultat från utvärdering av pressometerförsök utförda på fyllning tippad i vatten.

Results from evaluation of pressometer tests performed on a fill tipped in water.

Nivå	\bar{E}_m MPa	s MPa	v %	E_{max} MPa	E_{min} MPa	\bar{p}_1 MPa	s MPa	v %	Anmärkning
+0.5	21,3	9.4	44	36.4	13.0	2.57	0.63	25	
-0.5	6.9	6.9	100	18.6	2.2	1.17	1.0	86	Före packning
-1.5	2.1	0.95	45	3.7	1.2	0.414	0.142	34	
-2.5	2.1	1.39	67	3.3	0.7	0.344	0.127	37	
+0.5	20.5	10.2	50	35.5	11.2	2.91	0.62	21	
-0.5	8.6	9.0	104	24.4	3.3	1.49	1.14	76	Efter packning
-1.5	2.1	0.6	29	2.1	1.4	0.29	0.12	42	
-2.5	4.2	1.7	40	7.0	2.7	0.64	0.30	47	
-0.5	7.1	0.92	13	0.92	6.0	1.37	0.03		Efter avschaktning och ny packning
-1.5	2.3	0.50	21	0.50	1.8	0.38	0.09	22	
-2.5	2.2	0.35	16	0.35	1.9	0.37	0.07	19	

Densitetsbestämningar

Provgropar togs upp i Norra hamnen. Volymen bestämdes genom att täcka gropen med presenning och gropen vattenfylldes från brandpost. Volymen bestämdes med vattenmätare. Provvolymer varierade mellan 6,8 och 10,7 m³ i fem gropar. Uppmätt densitet blev 1,98-2,02 t/m³.

Pressometerförsök

I samband med utfyllnader i Norra hamnen och Nyhamnen utfördes pressometermätningar. Resultaten från försöken i Norra hamnen är sammanställ-

da i Fig. 26. Resultaten inom olika delar i Norra hamnen varierar förhållandevis litet. Däremot kan man konstatera att fastheten varierar mycket mot djupet, vilket naturligen beror på att packning endast skett över vattenytan. Fyllningen är mycket fast över vattenytan och är där av samma kvalitet som på kv Verkö, där hela fyllningen packades. Under vattenytan avtar fastheten markant och är ungefär konstant från nivå -0,5 m och neråt.

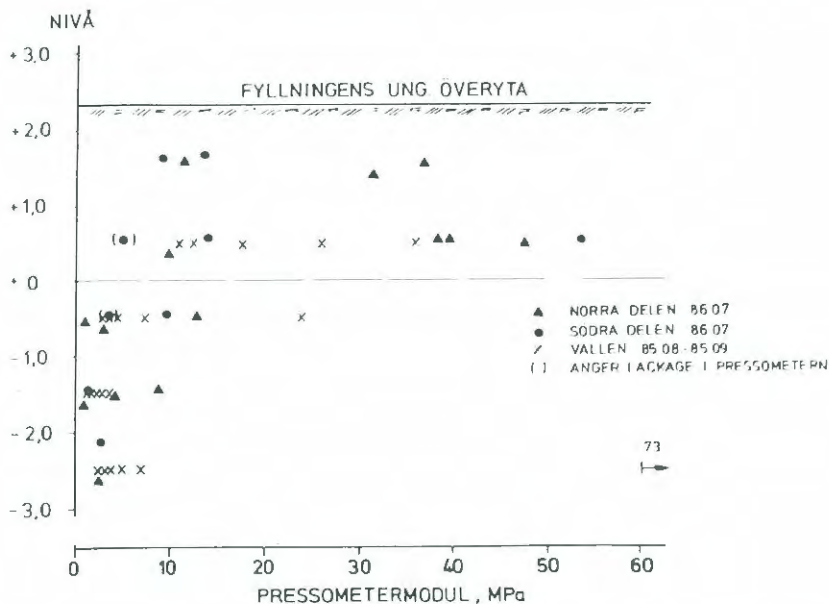


Fig. 26 Sammanställning över pressometermoduler i Norra hamnen. Fyllningen har endast packats från nivån ca +1,0 och +2,3.

Summary of pressometer moduli in the Norra hamnen harbour.
The fill has been compacted only from the +1.0 and +2.3 levels approximately.

I Nyhamnen var vattendjupet ca 7 m mot normalt 3-4 m i Norra hamnen. Pressometerförsöken visade att fyllningen som en följd härav blev lösare i Nyhamnen. Pressometermodulerna varierade mellan 1,0 och 2,6 MPa från 1,5 m vattendjup och neråt. Medelvärdet blev 1,6 MPa och variationskoefficienten 37%.

Kalkstensfyllningens struktur är öppen under vattenytan. För att bedöma vattengenomsläppligheten utförde Scandiaconsult provpumpningar i Norra hamnen. Försöken visade att fyllningen hade en permeabilitet motsvarande ca $3 \cdot 10^{-3}$ m/s. Detta innebär att vid schakt för ledningar m m erfordras stor pumpkapacitet.

5.5 Uppföljning av sättningar

5.5.1 SwedeChromes anläggning

Det bedömdes väsentligt att följa upp sättningarna hos några av de mest belastade plattorna i den färdiga konstruktionen. Detta gjordes på två sätt. Dels avvägdes avvagningsdubbar, dels registrerades sättningarna med SGI-mätare. Den senare metoden innebär att kompression kan registreras från plattan till ett visst djup, Fig. 27. Därmed kunde sättningarna i kalkstensfyllningen och i den underliggande naturliga jorden separeras. Mätningen är enkel och innebär att i ett förborrat hål nedförs en jordskruv. Skruven vrids ner sista biten till önskat djup. Stången omges av ett skyddande rör. I plattan ingjuts ett yttre rör. Med mätklocka registreras hur mycket stången skjuter upp med tiden och sättningen (kompressionen) noteras.

Mätningarna påbörjades 850603, vilket var innan plattorna gjutits. Plattorna hade dimensionen 4,0 m x 2,2 m. Senast gjorda mätning är från 871202, vilket innebär en mätperiod på nästan 3 år, varav knappt 2 år efter byggnadens färdigställande. I Fig. 28 redovisas resultat för en av mätpunkterna.

Tabell 6 redovisar medelsättningen för de två plattor som följts med SGI-mätaren. Totalsättningen har blivit av samma storleksordning för de två plattorna. Av de totala sättningarna har ca 80% utbildats i

Tabell 6. Resultat från sättningsmätningar efter 908 dagar.

Results from settlement measurements after 908 days.

Platta nr	Yta m x m	Sättning i fyllning, mm	Sättning i undergrund, mm	Totalt mm
C5	3,1 x 3,1	5,0	1,7	6,7
D8	4,0 x 3,3	6,5	1,3	7,8

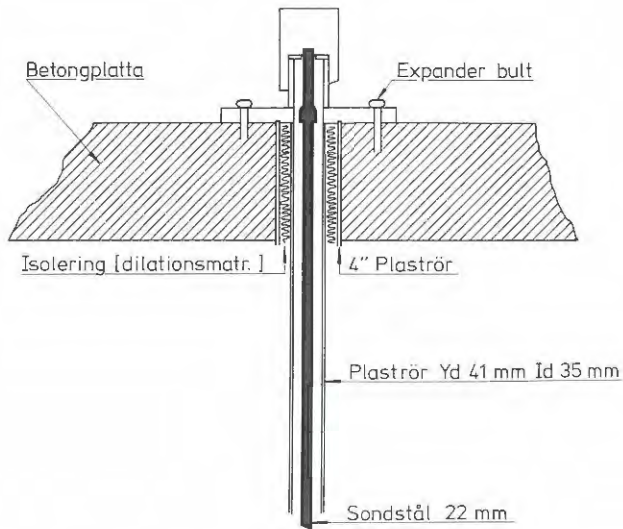


Fig. 27. Sättningsmätning med SGI:s mätare.
Measuring settlements with the SGI recorder.

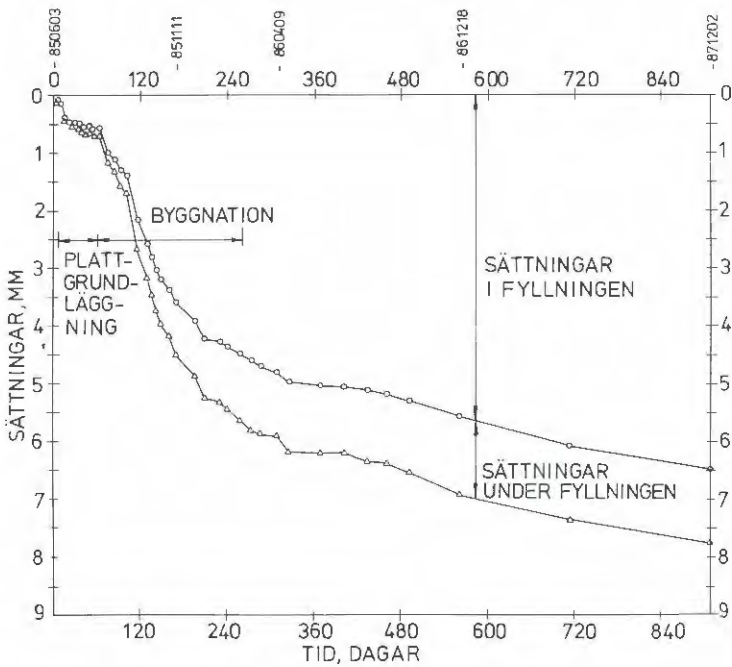


Fig. 28 Uppmätta sättningar hos en grundplatta med dimensionen 4,0 x 3,3 m och dimensionerande medeltrycket 200 kPa.
Recorded settlements in a foundation measuring 4.0 x 3.3 m with dimensioning mean loading 200 kPa.

Sättningstillväxten har varit ungefär konstant under de senaste 20 månaderna, motsvarande ca 0,7 mm/år. Tillväxten sker nästan helt i kalkstensfyllningen.

Genom SwedeChromes försorg har VBB avvägt dubbar i centralverket och materialverket. Under perioden 8511-8609 registrerades sättningar mellan 1 och 6 mm i centralverket och under perioden 8601-8609 mellan 0 och 4 mm i materialverket. En god överensstämmelse råder således mellan mätningarna gjorda av SGI och VBB.

Sättningen har beräknats för en kvadratisk platta, med sidlängden 4,0 m, utgående från pressometerresultaten. Som medelmodul används 12,5 MPa. Vid belastningen 200 kPa blir sättningen ca 7 mm om underliggande jord antas vara lika fast som kalkstensfyllningen. Om hänsyn tas till att underliggande jord är lösare än fyllningen ($E_m=6,0$ MPa) blir sättningen i stället ca 8 mm. Det skall noteras att sättningarna beräknade från pressometerförsök skall motsvara de som fås inom 10 år.

Statiska plattförsök utfördes inom kv Verkö i samband med provfyllningen. För den välpackade fyllningen blev den statiska kompressionsmodulen enligt Jaky ca 48 kPa, se avsnitt 3.4. Denna modul ger för en 3,3 m x 4,0 m platta och 200 kPa belastning en sättning på 8 mm, utan hänsyn tagen till att underliggande jord är lösare än fyllningen.

Man kan sammanfattningsvis konstatera att pressometerförsök, liksom statiska plattförsök, ger en utomordenligt god uppskattning av verkliga sättningar i fyllningen.

5.5.2 Sättningar i Nyhamnen

Sättningarna i hamnplan i Nyhamnen har följts genom avvägning under ca 1,5 år. Sättningarna redovisas i Fig. 29. Det kan konstateras att en viss vertikalrörelse kan hänföras till årstiden. Under vinterperioden fås en mindre tjällyftning med en snabb återgång under våren. Detta gäller åtminstone första vintern.

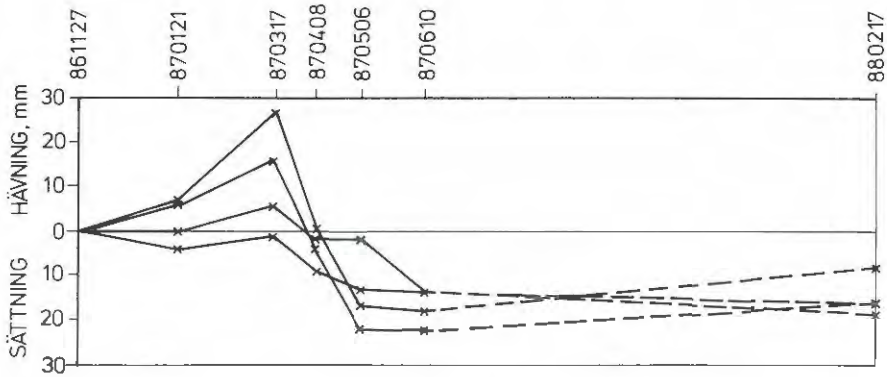


Fig. 29. Registrerade markrörelser i Nyhamnen.

Recorded ground movements in the Nyhamnen harbour.

Sättningarna har uppkommit av egenvikt. Rörelserna är små om hänsyn tas till att fyllningen är 9 m mäktig varav 7 m är opackade under vattnen.

6. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Kalksten har använts som fyllningsmaterial både för färdigställande av grundläggningsyta för tung industri och för utfyllning för nya hamnplaner. I förra fallet har kalkstenen utlagts i torrhet och packats i lager och i senare fallet har materialet ändtippats i vatten och endast packats över vattenytan. I båda tillämpningarna har kalkstenen givit mycket gott resultat.

För Verkötomten valdes en tillåten grundpåkänning av 200 kPa. Med nu vunna erfarenheter kan man i nästa projekt höja påkänningen till minst 300 kPa. En förutsättning är dock att kalkstenen utväljs på lämpligt sätt och att arbetet genomförs med hänsyn till materialets speciella egenskaper och med en noggrann kontroll.

För Verkötomten, där utläggning skedde i lager och varje lager packades, gällde följande rekommendationer:

- Finjordshalten bör ej överstiga 10-15% räknat på vikten material med kornstorlek mellan 0,06 och 60 mm.
- Kornens fasthet bör vara så hög att ett stabilt stenskelett erhålls. Detta innebär att större delen (minst 2/3) av kornen bör ha en tryckhållfasthet på minst 10 MPa.
- Vid utsprängning skall tillses att materialet får sprängstenskarakter.
- Kornstorleken får ej överstiga 600 mm vid utläggning i 1,0 m mäktiga skikt.

Försöken visar också att följande utförandekrav bör gälla för en kalkstensfyllning utförd i torrhet.

- Skikttjocklek för packat material $\leq 1,0$ m, beroende på vältyp.
- Minst 8 överfarter med 10 tons vibrationsvält.
- Krav på homogena massor, ej lokal anhopning av block eller finjord.
- Krav på att materialet har ett lämpligt vatteninnehåll för packning.

Vid fyllning i vatten kan i princip samma rekommendationer följas, när det gäller materialkraven. För den del av fyllningen som hamnar över vattenytan bör packningen ske enligt de utförandekrav som ges ovan.

Det har konstaterats att sättningar kan beräknas med stor noggrannhet utifrån pressometerförsök. Fallviktsförsök tycks vara en metod lämplig att kontrollera den ytligare delen, några meters mäktighet.

Packningsmätare bör kunna var lämplig för kontroll av enskilda lager. Speciellt bör det var möjligt att klargöra var olämpligt material, ex.vis hög finjordhalt, har ansamlats. Det har ännu inte klarlagts hur känslig compactometern är för variationer i fyllningens vattenkvot. Det erfordras således ytterligare studier innan compactometerns värde helt kan klargöras.

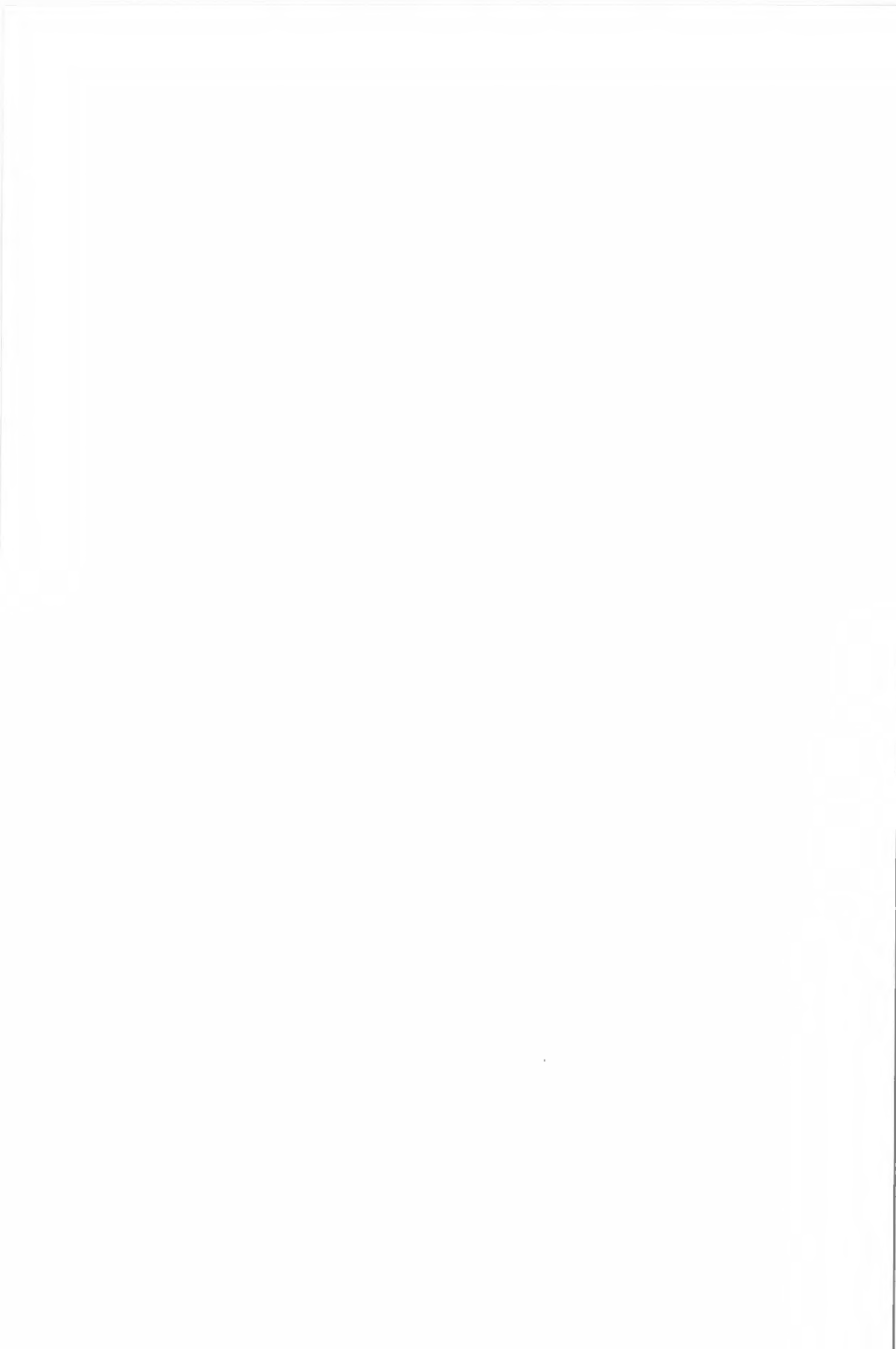
Vunna erfarenheter av utförda fyllningsarbeten kan sammanfattas på följande sätt:

- Kalksten kan användas för kvalificerade fyllningsändamål.
- Mark med mycket hög bärighet och ringa sättningstendenser kan skapas genom utläggning och packning i lager.
- Kalkstenens speciella egenskaper måste beaktas vid såväl projektering som arbetsutförande och provning.
- Materialets finmaterialhalt och vattenkvot måste anpassas.
- Metoden har begränsad tillämpning vid ogynnsamma väderleksförhållanden såsom riklig nederbörd och sträng kyla.
- Vid fyllning i vatten är det ej helt klarlagt vilken nedbrytning som kan ske i ett lång tidsperspektiv.

Genom de utförda fyllningsarbetena har Malmö skapat nya markområden där även tung industri bör kunna lokaliseras utan att kostnadskrävande grundförstärkningsåtgärder behöver vidtas. Med sitt läge intill en djuphamn, ganska nära stadens centrala delar och med nära anslutning till goda väg- och järnvägsförbindelser blir området attraktivt för skilda slag av industrietableringar.

7. LITTERATUR

- Baguelin, F., Jézéquel, J-F. & Shields, D.H., 1978.** The Pressuremeter and Foundation Engineering. Trans. Tech. Publication.
- Forssblad, L., 1983.** Personal communication.
- Hartlén, J. & Pettersson, H., 1983.** Kalksten som utfyllningsmaterial i vatten. Statens geotekniska institut, SGI Varia 124. Linköping.
- Hartlén, J. & Pettersson, H., 1984.** Egenskaper hos kalkstensfyllning. Nordiska Geoteknikermötet, NGM-84, Vol. 2. Linköping.
- Hartlén, J., Möller, B., Pettersson, H. & Karlsson, L-Å, 1987.** Kalksten som fyllningsmaterial. Resultat från provfyllning i kv Verkö. Statens geotekniska institut, SGI Varia 205. Linköping.
- Marsal, R.J., 1977.** Research on Granular Materials. IXth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Tokyo.
- Möller, B. & Hartlén, J., 1988.** Sättningar i en kalkstensfyllning. Sättningsegenskaper och kontrollmetoder. Nordiska Geoteknikermötet, NGM-88. Oslo.
- Orrje, O. & Broms, B., 1970.** Strength and Deformation Properties of Soils as Determined by a Free Falling Weight. Statens geotekniska institut, Proceedings No. 23. Stockholm.
- Åkesson, B., 1986.** Swede Harbour, utfyllning med kalksten. Stadsbyggnad, No. 4.



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
Swedish Geotechnical Institute
S-581 01 LINKÖPING
Tel: 013 - 11 51 00

Serien "Rapport" ersätter våra tidigare serier: "Proceedings" (27 nr),
"Särtryck och Preliminära rapporter" (60 nr) samt "Meddelanden" (10 nr).

The series "Report" supersedes the previous series: "Proceedings" (27 Nos),
"Reprints and Preliminary Reports" (60 Nos) and "Meddelanden" (10 Nos).

RAPPORT/REPORT

No		År
1.	Grundvattensänkning till följd av tunnelsprängning. P. Ahlberg, T. Lundgren	1977
2.	Påhängskrafter på långa betongpålar. L. Bjerin	1977
3.	Methods for reducing undrained shear strength of soft clay. K.V. Helenelund	1977
4.	Basic behaviour of Scandinavian soft clays. R. Larsson	1977
5.	Snabba ödometerförsök. R. Karlsson, L. Viberg	1978
6.	Skredriskbedömningar med hjälp av elektromagnetisk fältstyrkemätning - provning av ny metod. J. Inganäs	1978
7.	Förebyggande av sättningar i ledningsgravar - en förstudie. U. Bergdahl, R. Fogelström K.-G. Larsson, P. Liljekvist	1979
8.	Grundläggningskostnadernas fördelning B. Carlsson	1979
9.	Horisontalarmerade fyllningar på lös jord. J. Belfrage	1981
10.	Tuveskredet 1977-11-30 Inlägg om skredets orsaker.	1981
11a.	Tuveskredet - geoteknik.	1984
11b.	Tuveskredet - geologi.	1981
11c.	Tuveskredet - hydrogeologi.	1981
12.	Drained behaviour of Swedish clays. R. Larsson	1981

RAPPORT/REPORT No	År
13. Long term consolidation beneath the test fills at Väsby, Sweden. Y.C.E. Chang	1981
14. Bentonittätning mot lakvatten. T. Lundgren, L. Karlqvist, U. Qvarfort	1982
15. Kartering och klassificering av lerområdets stabilitetsförutsättningar. L. Viberg	1982
16. Geotekniska fältundersökningar. Metoder - Erfarenheter - FoU-behov. E. Ottosson (red.)	1982
17. Symposium on Slopes on Soft Clays.	1983
18. The Landslide at Tuve November 30 1977. R. Larsson, M. Jansson	1982
19. Släntstabilitetsberäkningar i lera. Skall man använda totalspänningsanalys, effektivspänningsanalys eller kombinerad analys? R. Larsson	1983
20. Portrycksvariationer i leror i Göteborgsregionen. J. Berntson	1983
21. Tekniska egenskaper hos restprodukter från kolförbränning - en laboratoriestudie. B. Möller, G. Nilson	1983
22. Bestämning av jordegenskaper med sondering - en litteraturstudie. U. Bergdahl, U. Eriksson	1983
23. Geobildtolkning av grova moräner. L. Viberg	1984
24. Radon i jord. - Exhalation - vattenkvot - Årstidsvariationer - Permeabilitet A. Lindmark, B. Rosén	1984
25. Geoteknisk terrängklassificering för fysisk planering. L. Viberg	1984
26. Large diameter bored piles in non-cohesive soils. Determination of the bearing capacity and settlement from results of static penetration tests (CPT) and standard penetration test (SPT). K. Gwizdala	1984

RAPPORT/REPORT No	År
27. Bestämning av organisk halt, karbonathalt och sulfidhalt i jord. R. Larsson, G. Nilson, J. Rogbeck	1985
27E. Determination of organic content, carbonate content and sulphur content in soil. R. Larsson, G. Nilson, J. Rogbeck	1987
28. Deponering av avfall från Kol- och torveldning. T. Lundgren, P. Elander	1986
28E. Environmental control in disposal and utilization of combustion residues. T. Lundgren, P. Elander	1987
29. Consolidation of soft soils. R. Larsson	1986
30. Kalkpelare med gips som tillsatsmedel. G. Holm, R. Tränk, A. Ekström Användning av kalk-flygaska vid djupstabilisering av jord. G. Holm, H. Åhnberg Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord. H. Åhnberg, G. Holm	1987
31. Kalkpelarmetoden. Resultat av 10 års forskning och praktisk användning samt framtida utveckling. H. Åhnberg, G. Holm	1986
32. Two Stage-Constructed Embankments on Organic Soils o Field and laboratory investigations o Instrumentation o Prediction and observation of behaviour W. Wolski, R. Larsson et al	1988
33. Dynamic and static behaviour of driven piles Nguyen Truong Tien	1987

The Swedish Geotechnical Institute is a government agency dealing with geotechnical research, information and consultancy.

The purpose of the Institute is to achieve better techniques, safety and economy by the correct application of geotechnical knowledge in the building process.

Research

Development of techniques for soil improvement and foundation engineering. Environmental and energy geotechnics. Design and development of field and laboratory equipment.

Information

Research reports, brochures, courses. Running the Swedish central geotechnical literature service. Computerized retrieval system.

Consultancy

Design, advice and recommendations, including site investigations, field and laboratory measurements. Technical expert in the event of disputes.

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

S-581 01 Linköping, Sweden

Tel. 013-11 51 00, Int + 46 13 115100

Telex 50125 (VTISGI S)

Telefax 013-13 16 96, Int + 46 13 131696