



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Havnebygning på blød bund

Sørensen, Carsten Steen; Nielsen, C. Q.

*Published in:*  
NGM-88, 10. Nordiske Geoteknikermøde, Oslo 1988

*Publication date:*  
1987

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Sørensen, C. S., & Nielsen, C. Q. (1987). Havnebygning på blød bund. I *NGM-88, 10. Nordiske Geoteknikermøde, Oslo 1988: Artikler og poster-sammendrag*

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

## HAVNEBYGNING PÅ BLØD BUND

C.S. Sørensen

Aalborg Universitet

C.Q. Nielsen

Cowiconsult AS Aalborg

### SYNOPSIS

Artiklen beskriver utraditionelle principper for opfyldning bag spunsvægskonstruktioner. Normalt anvendes tung fyld i form af sand eller grus. Ved dårlige funderingsforhold kan dette princip være uhensigtsmæssigt, idet det kan medføre uøkonomiske spunsvægskonstruktioner. Ved en aktuel havnebygningssag - udvidelse af Lemvig Havn i Vestjylland - var det nødvendigt at udvikle nye udførelsesmetoder, idet bundforholdene på lokaliteten var særdeles ugunstige med op til 47 m postglacial gytje.

De udviklede udførelsesmetoder består i al sin enkelthed i at erstatte den tunge fyld med en lettere fyld. Ved den ene metode anvendes en let fyld med rumvægt mindre end vands rumvægt. Da indbygningen skal foregå vådt, må letfylden ballasteres på plads. Ved den anden metode anvendes en delvis let fyld med rumvægt lidt større end vands rumvægt. Indbygning af denne fyld kan foregå næsten normalt, blot man tager hensyn til den meget lave effektive rumvægt. Begge metoder blev testet i laboratoriet i målestok 1:10. Artiklen omhandler - udover udførelsesprincipper - en teknisk og økonomisk sammenligning af de behandlede utraditionelle udførelsesmetoder, sammenholdt med en "traditionel" udført pælefunderet platformskaj.

### INTRODUKTION

Ved projektering af havnekonstruktioner står man ofte over for at skulle fundere i meget bløde jordarter. Dette kan medføre, at man må vælge dyre og komplicerede konstruktioner for at kunne opfylde funktionsbetingelserne.

Ved restaurering og modernisering af ældre havne, hvor bundforholdene er dårlige, opdager man ofte, at de eksisterende simple bolværker ikke blot kan udskiftes og erstattes af tilsvarende nye, men at de må erstattes af langt dyrere konstruktioner. Ved projektering af en udvidelse og modernisering af en del af Lemvig Havn kunne konstateres, at det eksisterende princip med lette træbolværkskonstruktioner bagfyldt med sten ikke kunne anvendes. Det kunne beregningsmæssigt eftervises at de reelt ingen sikkerhed havde mod brud ( $F=1.0-1.1$ ). Forøgede krav til vanddybde og belastninger sammenholdt med ekstremt dårlige bundforhold medførte at en traditionel spunsvægskonstruktion bagfyldt med sand ikke var mulig. Derfor måtte der tænkes utraditionelt. Artiklen beskriver 3 mulige udførelsesmetoder, hvoraf de 2 er utraditionelle.

### HISTORIK

Lemvig by er i lighed med andre danske købstæder grundlagt i 1100-1200 tallet. På grund af byens af-sides beliggenhed i forhold til søhandelsvejene foretog byens udvikling kun langsomt frem til midten i 1800-tallet. I 1850 etablerede byens købmand Mathildes Pier og kort efter anlagde byen Gl. Havn. I 1907 blev Vesthavnen bygget til brug for fiskefar-tøjer.

I årene 1924-27 blev Østhavnen anlagt. Dette projekt var og er stadig set ud fra et geoteknisk synspunkt interessant. Under indpumpning af sandfyld i 1925 kunne konstateres store initiale bevægelser i gytjen, som ophørte da sandfyldningen var tilendebragt. Senere, da man i 1927 var ifærd med at uddybe foran og i fyldningen, skete der et egentligt stabilitetsbrud. Igen i 1983, da man ville udvide landområdet vest for Vesthavnen, skete der et stabilitetsbrud. Disse to brud vidner om store problemer og dermed store udfordringer ved fundering på gytjen i Lemvig. Begge brud er analyseret i forbindelse med dette projekt.

### PROJEKTORGANISATION

Bygherre: Lemvig kommune

Rådgivende  
Ingeniør: Cowiconsult,  
Rådgivende Ingeniører AS

Entreprenør: Aug. Jørgensen & Troelsen A/S

Herudover var der tilknyttet følgende  
specialkonsulenter:

Geoteknisk  
Institut: Bundundersøgelser  
og styrkeparametre

AUC,  
Institut 5: Modelforsøg med bølgeuro i havnen og  
indbygning af letfyld

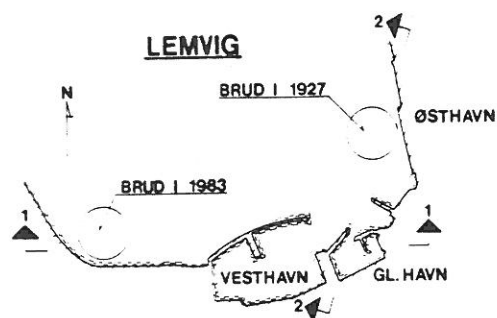


Fig. 1 Lemvig Havn

## GEOLOGI

Lemvig ligger kun få kilometer nord for Weichsel - istidens hovedopholdslinje og var således dækket af is under sidste nedisningsperiode.

Tunneldalen, som udgør Lem Vig, og som byen Lemvig ligger midt i, blev dannet af kraftige smeltevandsstrømme under isen. Materiale transporteret af smeltevandet blev aflejret syd for Lemvig og en hedeslette blev dannet.

Da isen var smeltet steg havet således, at de lavestliggende områder i dalen i Postglacial-tiden var oversvømmet af Littorinahavet. Littorinasedimenterne består overvejende af marin gytje med et vandindhold i dag varierende fra 50 til 150%.

Fig. 2 viser geologiske snit ved Lemvig Havn. Som det fremgår, findes der på projektlokaliteten marin gytje til en dybde af ca. 40 m.

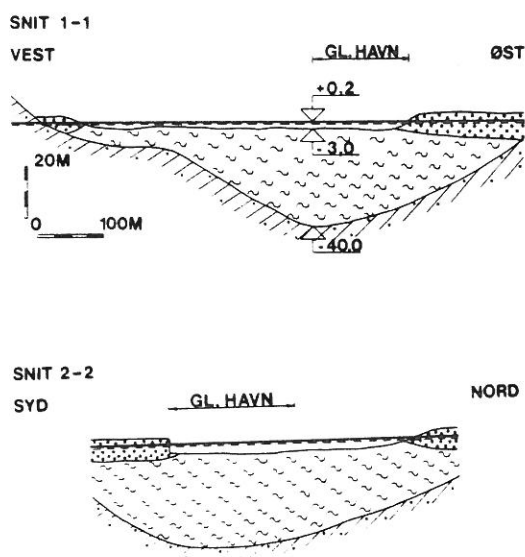


Fig. 2 Geologiske snit ved Lemvig Havn

## GYTJENS STYRKEPARAMETRE

Gytjens styrke er vurderet ud fra følgende:

- vingeforsøg i borer
- triaxialforsøg på intakte gytjeprøver
- vurdering af stabilitetsbrud i Østhavnen i 1927
- vurdering af stabilitetsbrud vest for Vesthavnen i 1983

$c_v$ :

Fig. 3  
Gytjens vingestyrke fandtes at kunne udtrykkes som

$$c_v = 7.5 + 1.5 \times D \quad (\text{kPa})$$

hvor D er dybden i m under havnebunden. I borer tæt ved land er dog ikke fundet  $c_v$ -værdier under 30 kPa, årsagen skyldes konsolideringseffekt fra tætliggende konstruktioner og opfyldninger.

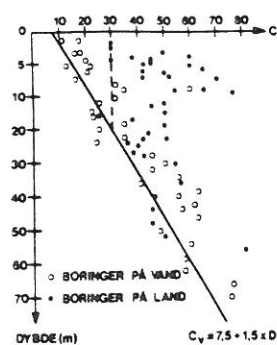


Fig. 3 Gytjens vingestyrke,  $c_v$

$c_u$ :

Gytjens udråned kohæsion er fastlagt ved udråned triaxialforsøg og ved gennemregning af de 10 stabilitetsbrud. De fundne  $c_v$ -værdier er sammenlignet med de fundne  $c_u$ -værdier. Her fandtes, at

$$c_u = k \times c_v$$

hvilket er i overensstemmelse med DS 415, hvoraf fremgår, at k kan beregnes efter formlen:

$$k = \frac{1.2}{1 + 0.01} \times I_p$$

hvor  $I_p$  er plasticitetsindekset.

Værdier for de beregnede k-værdier fremgår af følgende tabel:

Triaxialforsøg	0,80
Brud i 1927	0,54
Brud i 1983	0,75
DS 415	0,75

Erfaringsmaterialet bag formelen i DS 415 er omfattende, og da to uafhængige vurderinger (triaxialforsøg og bruddet i 1983) giver næsten samme værdi, synes DS 415 værdien at være korrekt.

Tilbage står værdien bestemt ud fra bruddet i 1927 som er ca. 30% lavere. Der er flere usikkerheder forbundet med denne værdi, f.eks.  $c_v$ -værdier, last- og brudgeometri m.v.

Det blev besluttet at anvende den lave k-værdi til stabilitetsundersøgelser og at anvende den højde k-værdi til dimensionering af spuns m.v.

$c'/\phi'$ :

Gytjens effektive styrkeparametre blev vurderet af DGI ud fra resultater fra udførte  $c_{u=0}$ -triaxialforsøg og ud fra egne erfaringer.

Følgende værdier blev anvendt til dimensionering af spuns væggen:

aktivt brud	$c'/\phi' = 0 \text{ kPa}/300$
passivt brud	$c'/\phi' = 0 \text{ kPa}/110$

## UDVIDELSESPLEANER

Lemvig Havn har som tidligere beskrevet gennemgået en langsom anlægsteknisk udvikling. Udviklingen er hovedsagelig foregået omkring de ældre havneanlæg med mindre udvidelser af kajkonstruktioner og landarealer.

Havnen er efterhånden omkranset af byen, og der er således ikke rummelige bagarealer til havnens brugere. Vedligeholdelsestilstanden af mange af havneanlæggene er så dårlig, at en egentlig hovedindsættelse er påkrævet. Lemvig kommune har derfor i 1982 udarbejdet en havneplan, som beskriver havnens fremtidige udbygning og vedligeholdelse.

Det aktuelle projekt omhandler renovering af Gl. Havn, hvor sydkajstrækningen drejes således, at der etableres nyt landareal i det sydøstlige hjørne. Parallelt med østkajstrækningen etableres en ny reparationspier afsluttet med en ny dækmole. Bestående pladsarealer hæves, og havnebassinet uddybes.

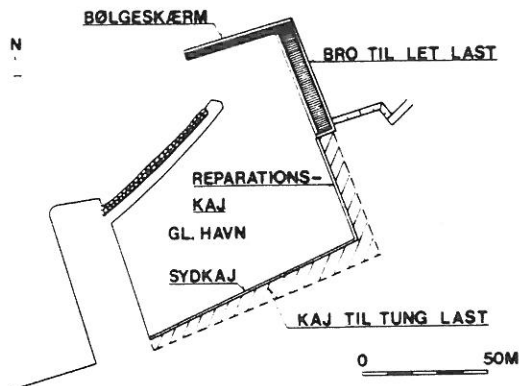


Fig. 4 Gl. Havn

#### LØSNINGSMULIGHEDER

Resultatet af de geotekniske undersøgelser viser at jordbundsforholdene ved Gl. Havn må betegnes som meget ugunstige selv i forhold til de generelt problematiske forhold i Lemvig Havn. Dette medfører at de påtænkte nye kaj anlæg ikke kan udføres på traditionel vis. Det har derfor været nødvendigt at gennemarbejde skitsemæssige løsningsforslag for mulige konstruktioner, for derved at finde frem til mere utraditionelle løsningsforslag.

Af økonomiske årsager har det været nødvendigt at opdele de søværts anlæg i tre afsnit, der henvises til fig. 4.

- en kaj til tung last (20 t mobilkran)
- en bro til let last (3,5 t lastbil)
- en bølgeskærm med løbebro (ingen trafiklast)

I denne artikel behandles kun kajkonstruktionen for tung last. På grund af forskellen mellem gytjens styrke- og deformationsparametre inden- og udenfor den nuværende Gl. Havns begrænsninger er det valgt at placere de tunge kajstrækninger indenfor Gl. Havns nuværende afgrænsning. Af mulige konstruktionsløsninger har vi vurderet at følgende tre konstruktionsudformninger var realiserbare for syd- og reparationskajen:

#### Betonkaj

Konceptet er en platformskaj med overbygning i instutstøbt beton - slapt armeret, funderet på Ø 711 x 12,5 mm stålrovspæle med pælespids i moræneleret kote - 44 a - 48 m. Afstand mellem pæleåg ca. 10 m. Til sikring af eksist. kajindfatning etableres en kort stålspuns. Vandrette kræfter på overbygningen optages ved et ankerspunsarrangement inde i baglandet.

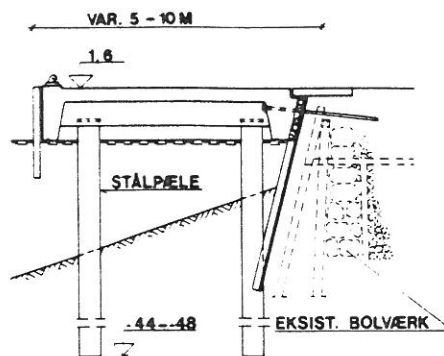


Fig. 5 Betonkaj

Den ny konstruktion er enkel i sin opbygning og virkemåde og er i princippet sætningsfri. Differenssætninger mellem eksist. bagland og ny konstruktion udlignes ved hjælp af en demonterbar sætningsplade.

Entrepreneurudgifter ca. 75.000 kr/lbm. kaj.

#### Spunskaj med letfyld

Konstruktionen består af en traditionel rammet stålspunsvæg fastholdt af et ankerspunsarrangement i eksist. bagland. Spunsvæggens spidskote er - 11,30 m og er således "svævende" i gytjen.

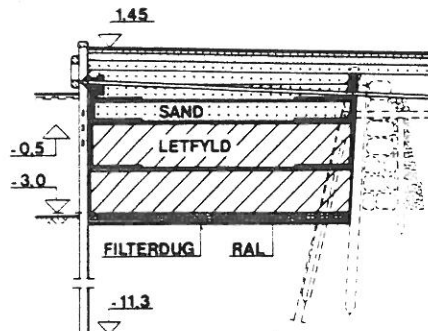


Fig. 6 Spunskaj med letfyld

Det utraditionelle ved denne løsning er opfyldning på vand bag den nye spunsvæg, idet der her anvendes letklinker med rumvægt mindre end vands. Fordelen ved denne løsning er umiddelbart at de effektive tillægs-spændinger i gytjen minimeres. Herved reduceres dels spunsvæggens længde og dimension samt sætninger af det nye bagland.

Med den viste indfyldning er sætningerne beregningsmæssigt vurderet til 0,5-1,0 cm/år. Til sammenligning kan nævnes at sætningsobservationer gennem de seneste 10 år på de eksist. bølværkskonstruktioner viser sætninger på ca. 1,0 cm/år.

Entrepreneurudgifter ca. 40.000 kr./lbm. kaj.

### Spunskaj med "tung" letfyld

Ovennævnte to metoder blev udbudt i licitation. Under kontraktforhandlingerne "fødtes" en ny metode om at anvende et parti frasoorterede letklinker som en af letklinke-værkerne lå inde med. Denne frasoorterede klinke - en såkaldt "tung" letklinke - er karakteristisk ved at være en smule tungere end den almindelige handelsvare, samt at have en rumvægt lidt over vands rumvægt og derved synker til bunds.

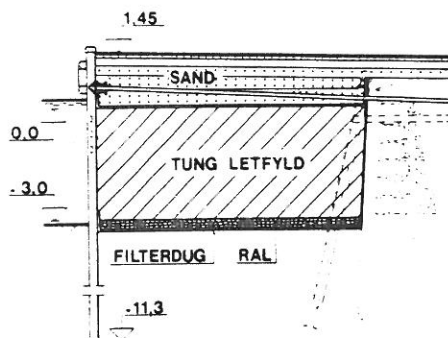


Fig. 7 Spunskaj med "tung" letfyld

Spunsvægskonstruktionen og den principielle opbygning af bagfylden er identisk med den i løsning for spunskaj med letfyld angivne.

Løsningen giver ca. 10-20% større totalsætninger i forhold til letfyldsmetoden.

Entrepreneurudgifter ca. 36.000 kr./1bm. kaj.

### LETFYLDENS EGENSKABER

Som letfyld er forudsat anvendt letklinker, der i Danmark kan leveres fra to værker: Leca-værket og Fibo-værket.

Letklinker er små, lette og stærke korn af klinkbrændt tegl. Råvaren er tertiært ler, som brændes i en roterende ovn ved 1100-1200°C. Ved processen ekspanderer leret. På grund af ovnens rotation formes leret til små afrundede korn af forskellig størrelse.

Letklinker leveres i forskellige handelssorteringer. Til letfyldsmetoden er forudsat anvendt en sortering kaldet nødder med kornstørrelse overvejende fra 10-20 mm. Til "tung" letfyldsmetoden anvendes et usorteret produkt som produceres ved indkøring af roterovnene, produktet kan nærmest betegnes som et spildprodukt.

I nedenstående skema er anført data for de to produkter.

	Letfyld	"Tung" letfyld
<b>Styrke</b>		
$\phi_{tr}$	> 30°	> 30°
<b>Rumvægte</b>		
$t = 0$ $\gamma_d$ , fugtigt kN/m <sup>3</sup>	3.0	7.0
$\gamma_m$	7.0	11.0
$\gamma_m - \gamma_w$	-3.0	1.0
$t = \infty$ $\gamma_d$ , fugtigt kN/m <sup>3</sup>	5.0	9.0
$\gamma_m$	9.0	13.0
$\gamma_m - \gamma_w$	-1.0	3.0
<b>Kornkurve</b>		
Gennemfald:		
5 mm	0%	10%
10 mm	40%	75%
20 mm	98%	98%
30 mm	100%	100%

### INDBYGNING AF LETFYLD

Letfyldens totale lagtykkelse vist i fig. 6 er bestemt udfra følgende betingelser:

- mest mulig letfyld af hensyn til minimering af tillægsspændinger i gytjen.
- min. 1.0 m fra belægningsoverkant til overkant letfyld (gennemlokning og knusning fra tung trafik).
- $\sigma'_1 > 0$  under letfyldslaget ved højvande.
- indbygning af letfylden ved ballastering.

Fig. 8, 9, 10 viser hvordan indbygningen var planlagt.

Efter ramning af spunsvæggen og etablering af ankersystemet forberedes indbygningen af letfylden i bassinet mellem den nye spunsvæg og den eksist. bolværkskonstruktion som følger:

- Først oprenses bunden for slam, herefter udlægges en filterdug og endelig afrettes med ral til bundkote -3,0. Dernæst sænkes vandspejlet 1,0 m i bassinet til kote -0,8. Vandspejlsænkningen er bestemt som det maksimale differensvandtryk den nye spunsvæg uden forankring og det eksist. bolværk kan klare. Vanddybden i bassinet er da 2,2 m.

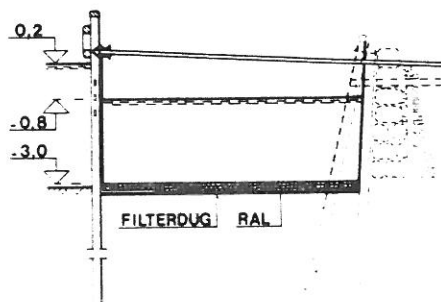


Fig. 8 Vandspejl i bassinet sænkes

- Herefter indbygges to letklinkelag på hver 1,25 m. Letklinkernes rumvægte  $\gamma$  og  $\gamma_m$  medfører at 0,62 m af det første lag vil være under vandspejlets underside til den afrettede bund er da 1,57 m.
- Inden det sidste letklinkelag indbygges udlægges en filterdug på oversiden af det første lag. Filterdugen skal sikre mod stabilitetsbrud under den følgende indbygning og ballastering. Lagets over- og underside befinder sig derefter henholdsvis i kote +0,45 og i kote -2,05. Afstanden fra letklinkelagets underside til bunden er da reduceret til 0,95 m.

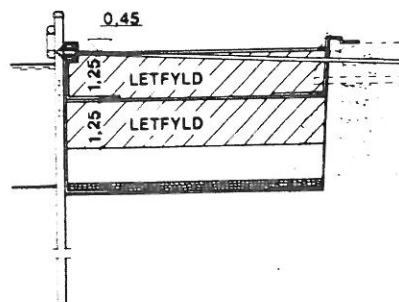


Fig. 9 Efter indbygning af 2,5 m letfyld

- Laget ballasteres ned ved hjælp af sand. Sandlaget armeres med filterduge for at sikre mod gennemløkning ved færdsel med tung trafik på kajen. For at sammenpresse letklinkelaget udføres en kortvarig grundvandsenkning i bassinet til kote -3,0. Efter hævn af grundvandsstanden udføres en traditionel asfaltbelægning.

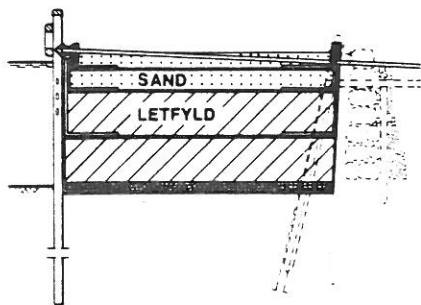


Fig. 10 Efter nedballastering af letfylden med sand

Da en sådan indbygning ikke tidligere var udført var der behov for at få afprøvet ideerne ved modelforsøg. Et sådant forsøg blev udført på Laboratoriet for Fundering på Aalborg Universitet. Indbygning blev udført i et kar med dimensionerne  $l \times b \times h = 2000 \times 700 \times 700$  mm. Karet's dimensioner medførte en forøgsskala 1:10.

Erfaringer fra modelforsøget kan sammenfattes i følgende:

- Det er særdeles vigtigt at indbygning af letfylden foregår jævnt, idet en forhøjning på overfladen "spejles" under vandet. Denne bule under vandet forsvinder ikke igen.
- Letfylden kan hænge i bassinets vægge dels på grund af friktion mellem bassinets vægge og letfylden, og dels på grund af buevirkning i letfylden. Ved forsøget kunne denne effekt modvirkes af et let tryk med en hånd på overfladen. I fuld skala skønnes et let tryk fra f.eks. en rendegravers skovl at være tilstrækkelig.

#### INDBYGNING AF "TUNG" LETFYLD

Som letfyld anvendes et produkt med en gennemsnitlig rumvægt lidt større end vands rumvægt. Herved undgås ovennævnte vanskelige indbygningsproces, idet materialet selv synker til bunds. For fremtidig at undgå sætninger - specielt differenssætninger - i fylden er det væsentligt, at materialet lejres ensartet og tæt. Dette kan være vanskeligt på grund af materialets lave effektive rumvægt, ca.  $1 \text{ kN/m}^3$ .

Som det fremgår af fig. 7, skal der indbygges letfyld fra kote -3,0 til kote 0,0. Som før sænkes vandspejlet i bassinet under indbygningen til kote -0,8.

En egnet indbygningsprocedure, fastlagt ved modelforsøg, fremgår af følgende:

- Først opbygges en letlinkeskrænt med topkote 0,0 og med en front vinkelret på den efterfølgende indbygningsretning. Naturlig skråningsanlæg ca.  $45^\circ$ .
- Herefter udlægges letklinker på skræntens top. Uden brud i skrænten skrider det udlagte materi-

ale roligt ned af skrænten og lejres ensartet og tæt.

- Da ca. 10% af letklinkerne er lettere end vand vil dette materiale flyde i vandoverfladen. For ikke at få opbygget en for stor vold af dette materiale foran skrænten må det løbende skovles op og udlægges bag skrænten.

En indbygning, udført i laboratoriet efter ovennævnte procedure, blev prøvebelastet i forskellige punkter på overfladen. Kun ubetydelige differenssætninger kunne konstateres.

#### KONKLUSION

Arbejdet er efter afholdt offentlig licitation i juni 1987 påbegyndt primo august 1987.

Anlægsarbejdet er inddelt i to etaper:

- 1. etape omfatter etablering af de tunge kajstrækninger inde i den nuværende Gl. Havn og er afsluttet medio december 1987.

- 2. etape omfatter etablering af bro til let trafik og bølgeskærm udenfor Gl. Havn og udføres i perioden primo april 1988 - primo juli 1988.

For de tunge kajstrækninger er valgt metoden med "tunge" letklinker, hvilket dels skyldes at metoden var billigst, dels at metoden indebar rent anlægstekniske fordele (indbygningsmæssig) frem for de to øvrige metoder. Den eneste ulempe er, at den giver ca. 10-20% større totalsætninger i forhold til letfyld.

Selve indbygningsprocessen af letfylden er forløbet nøjagtig som under laboratorieforsøgene og er således gennemført uden uheld. I skrivende stund er de tunge kajstrækninger færdiggjort og afleveret.

For løbende at kunne observere sætninger er der på såvel ny spunsvæg som ny kajgade etableret et net af nivellementpunkter.

Som det fremgår er hele udførelsen forløbet uden overraskelser og kan ganske givet anvendes på tilsvarende vanskelige jordbundsforhold.

Selvom det således kun er den "tunge" letfyldsmetode som er afprøvet i praksis kan det stadigvæk anbefales at få afprøvet letfyldsmetoden. Specielt da den "tunge" letklinker er et spilprodukt fra fremstilling af handelsklinker og således sætter en naturlig begrænsning for de tilgængelige mængder.

#### REFERENCER

Kajanlæg på blød bund ved Lemvig Havn af ingeniør Jacob Sørensen  
Artikel i "Ingeniøren" nr. 35 i 1927