

1990-04 11

01119

OPTIMAL VIBRERINGSINSATS VID BETONGGJUTNINGAR

Ett utvecklingsprojekt med ekonomiskt bidrag från
Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond SBUF

INNEHÅLL

	Sid
SAMMANFATTNING	2
INTRODUKTION	5
LITTERATURSTUDIER AVSEENDE SAMBAND MELLAN PACKNINGS- INSATS OCH KVALITETSEGENSKAPER HOS HÅRDNAD BETONG	7
Allmänt	7
Packningsgrad	7
Tryckhållfasthet	9
Böjdraghållfasthet	10
Vidhäftning mot armeringsjärn	11
Vattentäthet	11
Kloridpermeabilitet	12
Frostbeständighet	13
Stabilitet hos luftporsystem	14
Betongytors blåsighet	16
Hållfasthet på olika nivåer i konstruktionen	17
Inverkan av härdningsförhållanden	19
Sammanfattning av litteraturstudier	19
VAL OCH BESKRIVNING AV PROVNINGSMETODER	20
Bestämning av densitet och hållfasthet på utborrade provcylindrar	20
Bestämning av skyddsporförhållande	21
Densitetsmätningar i färsk betong	22
Bestämning av vattentäthet enligt metod Vuorinen	22
Bestämning av vattentäthet enligt Statens Provningsanstalts metod	22
Bestämning av kloridpenetration	23
Bestämning av saltfrostbeständighet	23
Tunnslip	24

	Sid
FÖRSÖK VID GJUTNING AV FUNDAMENT VID VASAMUSEET (FÖRFÖRSÖK)	24
Introduktion	24
Betong	25
Provgjutningar	25
Hållfasthet, densitet, porositet och vattentäthet	26
Ytornas blåsighet	26
FÖRSÖK VID GJUTNING AV STÖDMUR, NORRA LÄNKEN	27
Introduktion	27
Betong	27
Vibreringsförfarande	27
Hållfasthet, densitet, porositet och vattentäthet	29
Vattentäthet	29
Kloridpermeabilitet	29
Saltfrostbeständighet	30
Tunnslip	30
Ytornas blåsighet	30
SAMMANSTÄLLNING OCH UTVÄRDERING AV FÖRSÖKSRESULTATEN	31
Tryck- och spräckhållfasthet, densitet	31
Vattentäthet	31
Kloridpermeabilitet	32
Frostbeständighet	32
Ytornas blåsighet	34
Effektivare stavvibratörer	35
KONTROLL OCH UPPFÖLJNING AV VIBRERINGSINSATS	35
SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	38
ÖNSKVÄRDA FORTSATT A UNDERSÖKNINGAR	39
LITTERATURFÖRTECKNING	42

FÖRORD

Projektet "Optimal vibreringsinsats vid betonggjutningar" har i huvudsak finansierats av SBUF, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond.

Projektet har drivits av en arbetsgrupp bestående av:

Lars Forssblad, konsult

Per Leckström, NCC

Boris Steorn, Stockholms Gatukontor

Stig Sällström, Svenska Fabriksbetongföreningen, numera konsult

I en referensgrupp har ingått:

Jan Alemo, Vattenfall

Rolf Hörmfeldt, NCC

Stig Jansson, konsult

Stefan Rickne, Skanska

Bror Wuopio, Vägverket

SAMMANFATTNING

Undersökningen har syftat till att få fram underlag för en bedömning av lämplig packningsinsats vid stavvibrering av betong i anläggningskonstruktioner.

Undersökningen har omfattat följande huvuddelar:

- * Litteraturstudier
- * Fältprov
- * Kontroll av vibreringsinsats

Litteraturstudier avseende sambanden mellan packningsinsats och den hårdnade betongens kvalitetsegenskaper har visat att en ökad densitet påtagligt ökar den hårdnade betongens tryck- och böjdraghållfasthet, vidhäftning mot armeringsjärn och motstånd mot kloridinträngning.

Vid bedömning av kvalitetsegenskaperna i färdiga konstruktioner måste man beakta att förutom packningsinsatsen även höjdläget i konstruktionen och stighastigheten vid gjutningen har stor inverkan. Även härdningsförhållandena påverkar i hög grad betongens kvalitetsegenskaper.

Fältproven inleddes med några förförsök vid gjutningar av plintar vid byggnad av Vasamuseet.

Huvudförsöket utfördes vid gjutning av en stödmur vid ett brobygge vid Norra Länken i Stockholm. Där har tre olika vibreringsinsatser (350, 680 och 1 220 s/m³) jämförts. Gjutningen utfördes med anläggningsbetong K40 T med 5,5% lufthalt. Beställare av broprojektet ifråga är Stockholms Gatukontor och entreprenör NCC - SKANSKA.

Genom undersökningar av utborrade kärnor har konstaterats att tyckhållfasthet och vattentäthet genomgående ökat med

ökad vibreringsinsats, dock i avtagande grad mellan 680 och 1 220 s/m³. För spräckhållfasthet, motstånd mot kloridinträngning och saltfrostbeständighet har optimalvärden erhållits inom registret 400 till 600 s/m³, vilket därigenom synes representera en optimal vibreringsinsats för anläggningsbetong av den typ som undersökts.

Tillfredställande grad av blåsfrihet, max 50 st blåsor 5-15 mm per m², synes för anläggningsbetong fordra en minsta vibreringsinsats av 300 till 400 s/m³.

En slutsats av undersökningen är att frågan om instabilitet hos luftporsystem i form av luftavgång och nedsatt saltfrostbeständighet vid långvarig vibrering måste beaktas och helst bli föremål för fortsatta studier.

Ovan angivna vibreringsinsatser är relaterade till de typer av stavvibratorer med 56 å 57 mm tubdiameter som normalt används vid t ex brogjutningar. Med stavar av denna typ motsvarar vibreringsinsatsen 400 till 600 s/m³ en kapacitet per vibrator av 3 till 5 m³ betong per timme vid effektiv användning.

Undersökningen har även omfattat provning och utvärdering av en ny vibrationstidmätare som på initiativ av arbetsgruppen tagits fram av Dynapac Concrete Equipment AB, Ljungby. Mätaren registrerar den totala tid en stavvibrator varit i gång under exempelvis en gjutetapp. Med hänsyn till att stavvibratorm arbetar en viss tid i luft mellan nedsticken i betong måste en reduktionsfaktor användas. Storleken av denna faktor beror på typen av gjutning. Vibrationstidmätare bör med fördel kunna användas för att kontrollera att en förskrivna vibreringsinsats tillämpas.

En sådan kontroll kan utgöra en viktig del av ett kvalitets-säkringsprogram för ett kvalificerat betonggjutningsarbete.

Den här föreliggande rapporten beskriver en första etapp av en föreslagen större undersökning. Fortsatta studier avseende bl a andra typer av betongkonstruktioner föreslås.

INTRODUKTION

Det har sedan lång tid stått klart att en betongkonstruktions kvalitet och livslängd till betydande del är beroende av den skicklighet och noggrannhet som iakttas vid betongmassans gjutning och bearbetning. Speciellt gäller detta sådana kvalificerade betongkonstruktioner som broar, dammar, kraftverk, kajer, vattentorn, parkeringsdäck etc, vilka förutom statiska och dynamiska laster kan vara utsatta för ensidigt vattentryck, frostangrepp, korrosion och andra typer av kemiska angrepp, mekanisk nötning, stora temperaturvariationer o s v.

Under senare år har omfattande betongskador konstaterats, bl a på broar med endast 15 till 30 års ålder, vilket är mycket tidigare än vad som förväntats. Den i många fall avgörande skadeorsaken har varit kloridpenetration genom saltning eller havsvattenkontakt, som dels starkt ökar risken för frostsador i betongen och dels ger upphov till armeringskorrosion. Armeringskorrosion framstår mer och mer som den allvarligaste skadefaktorn när det gäller betongkonstruktioner i salt miljö.

I några fall har arbetsutförandet av brogjutningar varit så bristfälligt att omfattande gjutskador lett till omedelbara stora reparationer eller t o m rivning av vissa konstruktioner eller konstruktionsdelar. Som en följd av ovannämnda problem har man i ökande omfattning börjat uppmärksamma utförande- och kvalitetsfrågor vid kvalificerade betongarbeten. Kurser i detta ämne har arrangerats i samarbete mellan Byggentreprenörerna och Svenska Fabriksbetongföreningen. Utveckling och informationsverksamhet har också bedrivits av Vägverket m fl.

Man vet att packningsarbetet har en mycket stor inverkan på den färdiga betongkonstruktionens kvalitetsegenskaper, men många frågor i detta sammanhang är ännu obesvarade. Finns t ex en optimal vibreringsinsats över vilken en ytterligare vibrering har ogynnsamma effekter? Vibreringsinsatsen uttrycks i detta sammanhang ofta som vibreringstid i sekunder per m^3 betong (s/m^3). Sambanden mellan vibreringsinsats och praktisk gjutkapacitet för en stavvibrator anges i det följande.

Avsikten med ifrågavarande FoU-projekt har främst varit att försöka få fram mera exakta samband mellan vibreringsinsats och hållfasthet, permeabilitet, frostbeständighet och ytkvalitet hos den hårdnade betongen än vad som hittills föreligger. En annan fråga som studerats gäller möjligheterna att på lämpligt sätt följa upp och verifiera den vid en gjutning gjorda vibreringsinsatsen.

Som underlag för projektet föreligger ett försöksprogram daterat 1988-02-10. Försöksprogrammets etapp 1, som omfattade litteraturstudier, orienterande försök och ett huvudförsök (stödmur vid brobygge) har nu genomförts. En etapp 2 har förutsatts i försöksprogrammet och diskuteras i det följande. Projektet har drivits av en arbetsgrupp från början bestående av Lars Forssblad, konsult, Per Leckström, NCC, och Stig Sällström, Svenska Fabriksbetongföreningen. I arbetsgruppen ingår numera också Boris Steorn, Materialprovningen, Stockholms Gatukontor. En referensgrupp bestående av Jan Alemo, Vattenfall, Rolf Hörnfeldt, NCC, Stig Jansson, konsult, Stefan Rickne, Skanska och Bror Wuopio, Vägverket har haft tre sammanträden. Adjungerade deltagare har varit Carl Gustaf Dahlin, Materialprovningen, Bo Glimskär, Byggergolab och Jan-Erik Munke, Vägverket.

LITTERATURSTUDIER AVSEENDE SAMBAND MELLAN PACKNINGSSINSATS OCH KVALITETSEGENSKAPER HOS HÅRDNAD BETONG

Allmänt

Packning innebär att man genom inverkan av yttre krafter minskar ett materials skrymvolym och därmed ökar dess skrymdensitet. För kornformiga material som betong, jordfyllningar och asfaltmassor gäller allmänt att en densitetsökning, d v s en ökad packningsgrad, mycket påtagligt förbättrar materialens kvalitetsegenskaper- hållfasthet, täthet, beständighet etc.

Sambanden mellan densitet och olika kvalitetsegenskaper för olika materialtyper blir successivt allt bättre dokumenterade genom laboriestudier, fältförsök och praktiska erfarenheter.

Sambanden har normalt visat sig vara exponentiella med resultat att varje procents ökning av densiteten vanligtvis ger en kvalitetsförbättring av storleksordningen 5 till 15%. Variationerna när det gäller olika materialtyper och olika kvalitetsegenskaper är dock relativt stora. I det följande behandlas de samband mellan densitet, packningsgrad och olika kvalitetsegenskaper som i litteraturen redovisats för betong.

Packningsgrad

För betong kan packningsgraden definieras med utgångspunkt från nedanstående storheter:

- * Densitet (skrymdensitet) Normalt omkring 2.400 kg/m^3 för väl packad betong utan lufttillsats, respektive ca 2.300 kg/m^3 med lufttillsats.
- * Lufthålrum som i opackad betong kan uppgå till 5 a 20% och i väl packad betong utan lufttillsats till 1 a 2%.

Packningsgraden anger den aktuella densiteten i procentuellt förhållande till den densitet som erhålles vid en definierad packningsinsats t ex vid vibrering av provkroppar på ett vibrationsbord. Den härvid erhållna densiteten definieras motsvara 100% packningsgrad.

$$\text{Packningsgrad} = \frac{\gamma_a}{\gamma_o} \times 100\%$$

där γ_a = densitet hos aktuell betong

γ_o = densitet vid definierad laboratoriepackning

Packningsgraden kan också anges med utgångspunkt från betongens lufthålrums.

$$\text{Packningsgrad} = 100 - (L_a - L_o) \%$$

där L_a = lufthålrums hos aktuell betong, %

L_o = lufthålrums vid definierad laboratoriepackning, %

Direkta samband råder i princip mellan ovan angivna storheter på så sätt att varje procent minskat lufthålrums ger en motsvarande ökning av densitet och packningsgrad.

Tryckhållfasthet

I litteraturen återfinns ett antal undersökningar av sambanden mellan tryckhållfasthet och lufthålrums. Tidigare har man, exempelvis i Betonghandbok/Arbetsutförande (1), sid 205, överslagsvis konstaterat att varje procents kvarstående hålrum på grund av otillräcklig bearbetning resulterar i ca 5% hållfasthetsnedsättning. Som grund låg bl a en artikel av Kaplan (2).

Det synes i detta sammanhang vara mer relevant att ange den hållfasthetsökning som uppnås genom varje procents ökning av densitet eller packningsgrad, alternativt vid varje procents hålrumsminskning.

Enligt en sammanställning av i litteraturen redovisade undersökningar, gjord av Popovics (3), får man i hålrumregistret 0-10% i medeltal 9% ökning av tryckhållfastheten vid varje procents minskning av hålrumsvolymen, se figur 1. Popovics har även diskuterat inverkan på hållfastheten av de mycket små luftporer som tillförs med luftporbildande medel. Det finns undersökningar som indikerat att deras inverkan blir mindre än inverkan av de större porer som kan bli kvar på grund av otillräcklig bearbetning. Popovics anser dock att man, i avvaktan på ytterligare studier, för praktiskt bruk kan räkna med i stort sett samma inverkan på hållfastheten av de två typerna av luftporer.

Enligt en nyligen publicerad undersökning av Nasser och Dolan (4) är sambanden mellan tryckhållfasthet och densitet i mycket hög grad även beroende av betongens hållfasthetsnivå, figur 2. Den 9% hållfasthetsökning som redovisats av Popovics synes kunna gälla för tryckhållfastheter i registret 15 till 25 MPa.

För högre hållfastheter än ca 30 MPa antyder de nya resultaten att hållfasthetsökningen är av storleksordningen 5%, för varje procents densitetsökning.

Ett exempel på de hållfasthetsskillnader som kan uppträda i praktiken har redovisats av Fjeld och Haug (5). Vid en norsk plattformsgjutning erhöles med överform 33% högre hållfasthet jämfört med motsvarande sämre vibrerade parti utan överform, se figur 3. Densitetsskillnaden var 6%. Detta ger en hållfasthetsökning av ca 5% för varje procents densitetsökning. Den stora hållfasthetsskillnaden mellan dåligt och väl vibrerad betong bör också noteras och understryker önskvärdheten av undersökningar avseende optimal vibreringsinsats.

Man har i de flesta länder lägre krav på hållfasthet i färdig konstruktion jämfört med standardprovkroppar. I BBK 79 tillåts i färdiga konstruktioner 77-85% hållfasthet jämfört med standardprovkroppar, sid 252-255 i Betonghandbok/Material (1). Till stor del kan hållfasthetsvariationerna vara betingade av variationer beträffande vibreringsinsatsen, men höjdläget i konstruktionen på vilken hållfastheten bestäms kan också ha stor inverkan, liksom härdningsförhållandena. Dessa frågor behandlas ytterligare i det följande.

En undersökning av betongens hållfasthet i olika delar av ett husbygge har utförts av Statens Institut för Byggnadsforskning (6). En långsam hållfasthetstillväxt (arbetet utfördes vintertid) och en stor hållfasthetsvariation konstaterades, speciellt i bjälklag. Vissa värden låg efter ca 3 månader avsevärt under av BBK angivna minimivärden för hållfastheter i färdiga konstruktioner. Hållfasthetsvärdenas spridning ansågs till stor del bero på ojämn bearbetning av betongmassan.

Böjdraghållfasthet

Kaplan (2) har redovisat erhållna samband mellan böjdraghållfasthet och lufthållrum. Böjdraghållfastheten påverkas på i stort sett samma sätt som tryckhållfastheten.

Vidhäftning mot armeringsjärn

Whiting, Seegebrecht och Tayabiji (7) har undersökt sambanden mellan packningsgrad och tryckhållfasthet, vidhäftning mot armeringsjärn, kloridpermeabilitet och frostbeständighet. Som 100% packningsgrad definierades den densitet som erhöles vid vibrering av provkropparna på vibrationsbord. Utfyllning och vibrering skedde i två lager. Förfarandet följde ASTM C 192.

Varje procents ökad packningsgrad gav 8% ökad tryckhållfasthet. Betongens hållfasthet var av storleksordningen 35 MPa. Vidhäftningen mot armeringsjärnen påverkades i ännu högre grad och varje procents ökad packningsgrad resulterade i ca 16% ökad vidhäftning, figur 4.

Darwin har i en artikel innehållande 42 litteraturreferenser sammanställt de faktorer som påverkar vidhäftningen mot armeringsjärn (8). Allmänt konstateras att hög vibrationsintensitet ökar vidhäftningen mot armeringsjärnen. Detta är speciellt viktigt för lättflytande betongkonsistenser med och utan flyttillsatser.

Vidhäftningen minskar om järnen ligger i övre delen av en hög konstruktion, vid tunna täcksikt och små avstånd mellan järnen. Vidhäftningen kan verksamt förbättras genom återvibrering. Observera dock att när det gäller vidhäftning mot armeringsjärn kan, förutom vibreringsinsatsen, gjuthastighet och sättnings-effekter i den nygjutna betongen ha stor inverkan.

Vattentäthet

Några studier av de direkta sambanden mellan betongens vattentäthet och packningsgrad har ej påträffats i litteraturen. Enligt Powers bör permeabiliteten närmast vara en funktion av betongens kapillära porositet, som i sin tur är en funktion av lufthållrum och vct, sid 126 (9).

Det har också konstaterats att olika porsystem vid samma hålrum kan uppvisa olika grad av vattentäthet.

Kloridpermeabilitet

Med hänsyn till risken för armeringskorrosion är betongens kloridpermeabilitet i många fall en betydelsefull faktor för konstruktionens livslängd.

Undersökningar av Whiting et al (7) har visat en klart minskad kloridpermeabilitet med ökad packningsgrad, figur 5. Den relativa kloridpermeabiliteten minskade i detta fall med i medeltal ca 8% för varje procent ökad packningsgrad.

Undersökningar av kloridpermeabiliteten utförda av Mobasher och Mitchell, (9), visade en kraftigt ökad permeabilitet när lufthalten, tillförd med luftporbildande medel, ökade. Varje procent ökad lufthalt hade samma effekt på kloridpermeabiliteten som en ökning av vct med 0,03. En betong med 5% förhöjd lufthalt och vct 0,45 skulle sålunda i detta avseende vara likvärdig med en betong med vct 0,60 utan lufttillsats.

En större kloridpermeabilitet i betong med lufttillsats jämfört med samma betong utan luftinblandning har konstaterats även vid andra undersökningar, se t ex (10).

De beständighetsproblem som diskuteras i denna rapport är i hög grad internationella. Skador på betongbroar, i stor utsträckning armeringskorrosion, utgör t ex ett mycket allvarligt problem i Canada och de norra delarna av USA, där vägarna vintertid saltas kraftigt. Stora problem uppträder också i havsmiljö, bl a i Mellanöstern. I en nyligen publicerad artikel (11) framhålls att armeringskorrosion utgör den allvarligaste skadefaktorn. Otät betong med gjutsår och poriga ytor p g a otillfredställande vibrering konstaterades vid de flesta allvarliga skadefallen.

Provkroppar gjutna med reducerad vibreringsinsats visade snabbare kloridinträngning. En förlängd härdningstid hade mycket stor effekt för att minska kloridinträngningen.

Frostbeständighet

Frostbeständigheten är betingad av ett antal olika egenskaper hos den hårdnade betongen, bl a ett lämpligt luftporsystem. Några enkla och entydiga samband mellan frostbeständighet och packningsgrad kan knappast förväntas.

Whiting et al (7) fann relativt små skillnader vid frysprov av betongprovkroppar packade till packningsgrader mellan 89 och 102%. Samtliga innehöll 5 till 8% luftporer tillförda med luftporbildande medel.

Vägverket har i en BDa-rapport, (12), redovisat resultat av frostprov utförda på utborrade provcylindrar ur provkroppar gjutna med anläggningsbetong med blandningstiderna 1,5 resp 3,0 min och vibrerade 320 och 560 s/m³, resp 700-1200 s/m³.

Den längre blandningstiden och de längre vibreringstiderna har givit en klart minskad frostavflagning, se figur 6. Förhållandet mellan uppmätt avflagning vid en vibreringsinsats uppgående till 320 resp 700-1200 s/m³, i båda fallen vid 3,0 min blandningstid rör sig om en faktor 4 å 5. Observera dock att alla mätresultat uppfyllde gällande krav på acceptabel frostbeständighet (<1,0 kg/m² vid 56 fryscyklar).

Vid en undersökning utförd av Stockholms Gatukontor (13) gjordes frostprov på betongöverytor som behandlats på olika sätt, varierande mellan endast avdragning med ytvibrator och maskinplaning + maskinglättning + vakuumbehandling. Två olika vibreringsinsatser undersöktes - 400 och 1000 s/m³. Ingen entydig inverkan av vibreringsinsatsen kunde utläsas.

De stora skillnaderna mellan resultaten av på olika håll utförda frostprov är svåra att förklara.

Stabilitet hos luftporsystem

En fråga av stor betydelse för frostbeständigheten är hur långvarig vibrering eventuellt påverkar det luftporsystem som tillförts med luftporbildande medel. Enligt ACIs "Guide for Consolidation of Concrete" (14) är bortvibrering av någon nämnvärd andel inblandad luft osannolik. Enligt "Concrete Manual" från Bureau of Reclamation (15) minskar däremot lufthalten med ca 20% vid betongens transport och vibrering.

Luftporsystemets stabilitet vid långa vibreringstider har bl a undersökts av Fagerlund (16). Lufthalten bestämdes vid olika metoder för vibrering, bl a upp till 4 min lång stavvibrering i lufthaltskärlet. Undersökningarna bekräftade också de även i andra sammanhang erhållna större luftförlusterna vid flytbetong jämfört med trögflytande betong och vid kombinerad användning av luftporbildande och vattenreducerande tillsatser jämfört med enbart luftporbildande tillsatser.

Vid undersökningar som utförts av Skanska (17) bestämdes lufthalterna efter ifyllning av lufthaltsmätaren i två skikt vardera vibrerade 15, 45 och 90 s. En ökning av vibreringstiden från 2 x 15 s till 2 x 90 s resulterade i en nedgång av lufthalten med 0,5 - 1,0%, då lufthaltsmedlet Micro-Air användes. Med kombinationen Micro-Air och vattenreducerare (V33) ökade lufthaltsförlusten till 1,5 - 2,0%. Jämfört med andra tillsatsmedel gav Micro-Air de stabilaste luftporerna. Skanskas undersökning visade också att lufthaltsförlusterna var låga vid transport av den färska betongen, medan pumpning anges kunna ge lufthaltsförluster upp till 1,5%. Praktiska erfarenheter visar dock att den normala luftförlusten vid pumpning ligger inom registret 0,5 - 1,0%

Vid försök utförda i Norge (10) vibrerades betongen i upp till 3 min. Som ett mått på stabiliteten angavs luftförlusten i relation till betongens ursprungliga luftinnehåll. Värden mellan 21 och 28% erhöles, vilket motsvarar 1 a 2% luftgång om man utgår från 5 a 6% utgångshalt.

Örjan Petersson har redovisat resultat av frostbeständighetsundersökningar utförda dels i samband med studier av en ny dansk luftpormätare (18), dels i samband av provning av genomsläpplig formväv av japansk typ (19). I båda fallen användes anläggningsbetong K40 T med 5,5 - 6,8% lufthalt i utgångsläget. Normalt var vibreringsinsatsen ca 900 s/m³.

Vid den förstnämnda undersökningen uppgick lufthalterna efter vibrering bestämda med den danska luftpormätaren och genom tunnslip till endast 2,5 - 3,5%. Med kombinationen Vinsolharts och Melamin erhöles trots den låga lufthalten god frostbeständighet och låg avståndsfaktor. Även ett av två prov med tensid och Melamin hade god frostbeständighet medan övriga alternativ inkluderande alla prov med lignosulfonat ej uppfyllde kraven på acceptabel frostbeständighet.

Vid det projekt som avsåg olika formmaterials inverkan på bl a ytans frostbeständighet erhöles genomgående dåliga värden med plyfaformen. Formväven visade klart bättre resultat. Tillsats av Vinsolharts och Melamin användes.

Som resultat av undersökningar utförda vid Vattenfalls betonglaboratorium har Alemo redovisat en lufthaltsnedgång från 4,5 till 2,5% vid en vibreringsinsats av 400 s/m³ (20). Vid denna vibreringsinsats var saltfrostbeständigheten ej acceptabel. Detta prov utfördes med anläggningsbetong K30 T med vct 0,62, alltså med lägre betongkvalitet än vid övriga relaterade undersökningar utförda med K40.

Sammanfattningsvis synes man kunna konstatera att i de fall betongen först pumpas och därefter utsätts för långvarig vibrering, en lufthaltsförlust av 1 till 3% kan uppträda. Man riskerar härigenom att komma ned till en för saltfrostbeständigheten kritisk gräns. Resultaten är dock inte entydiga. Lufthaltsnedgången och även saltfrostbeständigheten påverkas i avsevärd grad av valet av luftporbildare och vattenreducerande medel.

Betongytors blåsighet

Betongytors blåsighet klassificeras i Sverige genom bestämning av antalet ytporer med storlekarna 5-15 mm resp > 15 mm per m².

Enligt Hus AMA 83 tillåts generellt max 50 st porer 5-15 mm per m² platsgjuten väggyta. Porer > 15 mm får ej förekomma.

Det finns ett stort antal undersökningar som klart visat att en ökad vibreringsinsats minskar antalet ytporer. Antalet ytporer blir också mindre då konsistensen är mer lättflytande. Detta belyses bl a av Bellander och Gregorson (21).

Enligt Fredriksson - Samuelsson (22) kan betongväggar med mindre än 20 st porer/m² lämnas utan åtgärd före målning eller tapetsering. Betongytor med denna kvalitet kan erhållas genom val av lämplig form och formolja, lämplig betongsammansättning (välgraderad ballast, god arbetbarhet) och lämpligt gjutningsförfarande. Betongen bör vibreras med täta stavnedstick nära formen på max 0,2 -0,25 m avstånd och med långsam uppdragning av staven. Detta leder till en vibreringsinsats av minst ca 850 s/m³ vid ett omformningstal < 20 (sättnått 100-150 mm) för att "blåsfria" ytor skall erhållas. Används betong med omformningstal < 10 kan denna vibreringsinsats halveras.

Vattenfalls nyligen utförda undersökning, (20), avseende optimal vibreringsinsats har haft likartad uppläggning med det projekt som redovisas i denna rapport. Vad gäller ytornas blåsighet har den goda effekten av ökad vibreringsinsats klart bestyrkts.

Täckskiktsvibrering mellan form och armering med en 36 mm stavvibrator har gett praktiskt taget blåsfria ytor.

Både för vanliga husbyggen och för anläggningskonstruktioner synes kravet i Hus AMA 83 - max 50 porer per m² - motsvara det utseende- och kvalitetskrav som normalt borde ställas upp.

Hållfasthet på olika nivåer i konstruktionen

Vid bedömning av vibreringens inverkan på hållfasthet och andra kvalitetsegenskaper i färdiga konstruktioner måste man även beakta inverkan av provtagningspunktens höjdläge.

Speciellt vid höga konstruktioner gjutna med hög stighastighet påverkas hållfasthet och andra kvalitetsegenskaper i avsevärd grad av sättningförloppet i den färska betongen. På större djup i formen verkar ett högre tryck än vid ytan vilket kan medföra större densitet och hållfasthet genom kompression i porsystemet (23). En viss vandring av luftporer och vatten mot överytan kan också påverka densitets- och hållfasthetsförhållandena på olika djup. Den lägre hållfasthet som erhålls närmast ytan är i stor utsträckning betingad av att vatten vid betongmassans sättning vandrar uppåt vilket speciellt i höga konstruktioner kan ge upphov till en kraftig vattenseparation ("bleeding"), (24).

Bestämningar av hållfasthet ned till 800 mm djup gjorda i olika typer av konstruktioner av Petersons m fl visas i diagrammet, figur 7 (1). Värdena indikerar att 10 å 20% ökning av hållfastheten ned till 500 mm djup normalt kan förväntas. Stora variationer förekommer dock.

En japansk undersökning (25) har visat att en densitets- och hållfasthetsökning erhålls även på större djup. Hållfasthetsökningen från 0,5 till 3,5 m djup var ca 10% vid den undersökning som redovisats i diagrammet figur 8a. En motsvarande densitetsökning erhöles, figur 8b.

Hållfastheten i en färdig konstruktion kan alltså i hög grad bero på vilken nivå hållfastheten bestäms. Hållfasthetsgradienten varierar mycket från fall till fall. Vilka faktorer som påverkar hållfasthetsgradientens storlek synes inte vara närmare klarlagda, men säkerligen har stighastigheten vid gjutningen stor betydelse.

Med största sannolikhet påverkas betongens andra kvalitets-egenskaper, t ex permeabilitet och frostbeständighet, i minst samma grad som hållfastheten av provtagningspunktens nivå i konstruktionen. Diskuteras samband mellan kvalitets-egenskaper bestämda på särskilt tillverkade provkroppar, t ex provkuber, och motsvarande egenskaper i färdig konstruktion kan alltså det avstånd från överytan på vilket provet tas, vara avgörande för resultatet. Prov tagna på viss nivå från överytan, t ex på 1,0 m djup, är heller inte generellt jämförbara, då hållfasthetsgradienten är mycket varierande, se figur 7 och 8.

Vid gjutning av höga konstruktioner med mycket låg stighastighet t ex med glidform, blir inverkan av sättningseffekter i den färska betongen obetydlig. Därigenom kan också kvalitetsvariationerna i höjddled begränsas och en jämnare betongkvalitet uppnås. Norska erfarenheter från höga glidformsgjutningar för betongplattformar redovisas av Moksnes (26). Förutom en i höjddled jämn betongkvalitet har man uppnått en osedvanligt hög kvalitet i konstruktionerna jämfört med normenligt tillverkade provkroppar. Tryckhållfastheten i utborrade prov har visat sig uppgå till 110 a 115% av normproverna.

Förklaringen till den höga kvaliteten torde vara att den långsamma stighastigheten möjliggör en mycket omsorgsfull vibrering som i flera omgångar kan beröra samma gjutskikt och alltså ge samma effekt som återvibrering. Täcksiktstvibrering tillämpas.

Kvalitetsvariationer kan även förekomma i horisontalled, vilket bl a påvisats av Dewar (27). Täcksikt och ytsikt får ofta lägre kvalitet än konstruktionens inre delar beroende på sättnings- och härdningseffekter.

Inverkan av härdningsförhållanden

Vid alla undersökningar avseende betongens kvalitetsegenskaper, bestämda såväl på speciellt tillverkade provkroppar som i färdiga konstruktioner har härdningsbetingelserna haft stor inverkan på provresultaten. Frågan behandlas bl a i kapitlet "Hållfasthet" i Betonghandbok/Material, sid 252-258 (1). Jämfört med standardiserad härdning av provkuber vars effekt är satt till 1,0 kan hållfasthetsvariationer mellan 0,7 och 1,15 erhållas i färdiga konstruktioner beroende på härdningens utförande. Även när det gäller permeabilitet och frostbeständighet är inverkan av härdningen mycket stor, (10), (28).

Sammanfattning av litteraturstudier

Ett flertal undersökningar har visat att en ökad densitet och packningsgrad ökar den hårdnade betongens tryck- och böjdraghållfasthet, vidhäftning mot armeringsjärn och motstånd mot kloridinträngning. En ökad packningsinsats minskar också ytornas blåsighet.

De relaterade undersökningarna har gett vissa samband mellan packningsgrad och exempelvis tryckhållfasthet. Några generellt giltiga samband har dock inte erhållits och det verkar helt klart att även hållfasthetsnivå/vattencementtal påverkar de erhållna sambanden.

En stor svårighet ligger i det faktum att man i många färdiga betongkonstruktioner uppnår en avsevärt högre densitet och hållfasthet på större djup i konstruktionen. Sannolikt påverkas också betongens andra kvalitetsegenskaper av provtagningspunktens höjdläge.

Även härdningsförhållandena har stor inverkan på betongens kvalitetsegenskaper.

Då hållfasthet och andra kvalitetsegenskaper påverkas såväl av vibreringsinsatsen som av höjdläget i konstruktionen och härdningsförhållandena, blir jämförelser mellan t ex kubhållfasthet och hållfasthet bestämd i en färdig konstruktion svåra att tolka. Sådana jämförelser kan därför inte läggas till grund för några säkra bedömningar huruvida den gjorda vibreringsinsatsen varit tillräcklig. Samma svårigheter gäller en eventuell tillämpning av en normerad packningsgrad. Se vidare avsnitt "kontroll och uppföljning".

VAL OCH BESKRIVNING AV PROVNINGSMETODER

Vid projektets genomförande har följande provningsmetoder tillämpats eller diskuterats.

Bestämning av densitet och hållfasthet på utborrade provcylindrar

Bestämning av densitet och tryckhållfasthet på utborrade provcylindrar är en förhållandevis enkel och relativt billig metod. Provcylindrar med 100 till 150 mm diameter är vanliga. Tryckhållfastheten bestäms normalt på sågade cylindrar med lika längd och diameter. I litteraturen återfinns samband mellan kubhållfasthet och hållfasthet bestämd genom provtryckning av provcylindrar med olika dimensioner, (1). Normalt bestäms densiteten hos utborrade provcylindrar genom mätning av dimensionerna och vägning.

Alternativa metoder för bestämning av hållfasthet i färdiga konstruktioner, t ex utdragsprovning av en ingjuten bult (Lok-test) eller en inborrad bult (Capo-test) har diskuterats men ej ansetts medföra några särskilda tekniska eller ekonomiska fördelar jämfört med hållfasthetsprovning av utborrade provcylindrar. Se bl a (29).

Vid i det följande redovisade undersökningar utförda vid Vasamuseet resp. Norra Länken har densitetsbestämningar på utborrade provcylindrar utförts av Materialprovningen, Stockholms Gatukontor, genom mätning och vägning enligt en finsk standard (SFS 4474) utvecklad av Vuorinen:

- * Vid provningens början
- * Efter torkning vid + 105°C
- * Efter efterföljande vattenlagring vid atmosfärtryck
- * Efter tryckbehandling med ett vattenövertryck uppgående till 15 MPa

Bestämning av skyddsporförhållande (frostbeständighet)

Med ledning av ovannämnda densitetsmätningar kan man beräkna:

- * Volymen av kapillär- och gelporer (P_w)
- * Volymen av skyddsporer (P_a) d v s slutna porer som vattenfylls först vid övertryck.

Skyddsporförhållandet P_r beräknas enligt formeln:

$$P_r = \frac{P_a}{P_w + P_a}$$

Betongens frostbeständighet är enligt finsk standard godtagbar vid ett skyddsporförhållande $> 0,25$.

Densitetsmätningar i färsk betong

En tänkbar kontrollmetod vore bestämning av den färska betongmassans skrymdensitet för att på detta sätt bli fastställt att vibreringsinsatsen varit tillräcklig.

Nukleära densitetsmätningar används i stor omfattning vid jordpacknings- och asfaltarbeten. Nukleära densitetsmätningar har provats vid betongbeläggningsarbeten, där man kan utföra mätningarna på en relativt fast och jämn överyta.

Vid normala betonggjutningar skulle en sond nedstucken från överytan, figur 9, kunna vara en lämplig metod som bli diskuterats med företaget Troxler som specialiserat sig på nukleära densitetsmätningar. Enligt en brevkontakt med professor K W Nasser, University of Saskatchewan, Canada har denne med hänvisning till en opublicerad rapport (30) angett att spridningen vid nukleära densitetsmätningar varit avsevärt större än vad tillverkaren uppger. Fortsatta studier uppgavs vara nödvändiga innan metoden kan anses vara praktiskt användbar. Av detta och andra skäl har nukleära densitetsmätningar ej provats inom ramen för vårt projekt.

Bestämning av vattentäthet enligt metod Vuorinen

Vattentäthetsprov har utförts av Materialprovningen enligt metod Vuorinen. Principen är att man bestämmer vattenavgången ur provcylindrarna efter tryckbehandling. Permeabiliteten kan sedan beräknas med utgångspunkt från teoretiska samband utvecklade av Vuorinen (31).

Bestämning av vattentäthet enligt Statens Provningsanstalts metod

Statens Provningsanstalt utför vattentäthetsprov på utborrade provcylindrar med ca 150 mm diameter och 50 mm längd.

Den genomströmmande vattenmängden vid ett övertryck av 0,8 MPa registreras under en tid upp till 100 h. Provet har utförts på provcylindrar från stödmuren vid Norra Länken och även på provcylindrar borrade ur provkuber.

Bestämning av kloridpenetration

En metod för snabb bestämning av permeabilitet för kloridjoner genom betong har utvecklats i USA (Metod AASHTO T277-831, Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete). Provet utförs på borrhärdar med 95 mm diameter och 51 mm längd. Borrhärdarnas långsidor förseglas med epoxy. Efter vakuumbehandling vattenmättas proverna. Den ena sågade sidan av borrhärdan motfylls med en 3% lösning av Na Cl och den andra sidan med 0,3N Na OH, figur 10. En spänningsskillnad på 60V appliceras via koppartrådsnät.

Den totala laddning, mätt i Coulomb, som passerar provet under 6 h utgör ett relativt mått på kloridpermeabiliteten. Materialprovningen har en utrustning av ovan beskriven typ. Provet har utförts på tre provcylindrar från stödmuren vid Norra Länken.

Bestämning av saltfrostbeständighet

För bestämning av betongens saltfrostbeständighet tillämpas ett standardiserat förfarande SS 137244 varvid avskalningen efter 7, 14, 28, 42 och 56 fryscyklar bestäms. Frostbeständigheten är acceptabel om avskalningarnas medelvärde vid 56 cykler är mindre än 1,0 kg/m². SS 137244 har tillämpats vid frystest utförda på provcylindrar från stödmur vid Norra Länken av Materialprovningen.

Tunnslip

Mikroskopisk analys av tunnslip används för bestämning av den hårdnade betongens luftporstruktur. Genom sådan analys bestäms lufthalt, lufthalt i cementpastan, luftporernas specifika yta (luftporernas sammanlagda yta dividerad med deras totala volym) samt porsystemets avståndsfaktor (som är halva genomsnittliga avståndet mellan två intilliggande luftporer). Tunnslipprov har utförts av Statens Provningsanstalt på tre provcylindrar från stödmuren vid Norra Länken och även på en provkub.

FÖRSÖK VID GJUTNING AV FUNDAMENT VID VASAMUSEET (FÖRFÖRSÖK)

Introduktion

Några orienterande fältförsök utfördes augusti 1988 vid byggnad av Vasamuseet. Entreprenör för detta arbete var ABV (NCC). Vid försöken erhöles all tänkbar medverkan av arbetsledning och gjutarlag.

En undersökning avseende inverkan av olika vibreringsinsatser kunde göras vid gjutning av två av de fundament som bär upp bottenkassunen för Vasa. Fundamenten hade dimensionerna (B x L x H) 0,6 x 3,0 x 1,8. Gjutningen utfördes 1988-08-29. Avsikten med försöken var:

1. Undersökning av lämpliga metoder för bestämning av hållfasthet, skrymdensitet och porositet, permeabilitet och ytblåsighet i färdiga konstruktioner. Provbörning och laboratorieundersökningar utfördes av Materialprovningen.
2. Praktisk utprovning av vibrationstidmätare för vibratorstavar.

Betong

Betongen levererades från AB Betongindustris fabrik i Värtan. Vid försöket med varierande vibreringsinsats användes betong av typ K 40 T utan lufttillsats och 32 mm stenmax. Vct 0,56. Normalt användes betong K 40 HF vid gjutningarna för Vasamuseet.

Provgjutningar

Vid gjutning av fundament 7 gjordes en så liten vibreringsinsats som bedömdes möjlig utan att man riskerade fundamentets funktion. Den effektiva vibreringstiden i betong uppgick härvid till endast ca 19% av den totala gjuttiden motsvarande en vibreringsinsats av 94 s/m^3 . Man göt $7,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Betongen lades ut i ca 1 m lager och stighastigheten var hög, ca 4 m/h.

Vid gjutning av fundament 8 gjordes en avsevärt större vibreringsinsats med djupa nedstick på 20 - 25 cm inbördes avstånd efter formsidorna. I detta fall uppgick den effektiva vibreringstiden i betong till 53% av den totala gjuttiden och vibreringsinsatsen till 310 s/m^3 . Här göt man $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Samma lager-tjocklekar och stighastighet som vid gjutning av fundament 7.

Vid försöken bestämdes vibreringstiden med vibrationstidsmätare. Den effektiva vibreringstiden i betong bestämdes med tidtagarur som adderar "avklockade" tider. Stavvibratorer av fabrikat Dynapac med i tuben inbyggd elmotor och med 56 mm diameter användes.

Hållfasthet, densitet, porositet och vattentäthet

Materialprovningen utförde i vardera fundamentet borrhning av 6 st 140 mm borrhkärnor för bestämning av tryckhållfasthet, densitet och porositet samt vattentäthet enligt Vuorinens metod. Motsvarande borrhningar och undersökningar gjordes i sex st 150 mm provkuber tillverkade av den levererade betongen. Tre för den sats som användes vid gjutning av fundament 7 och tre för den sats som användes vid gjutning av fundament 8. Provkuberna tillverkades genom Betongindustris försorg. De vibrerades på vibrationsbord. Ifyllning gjordes i två lager vardera vibrerade 15 s (SS 137244). Förutom de provkuber i vilka provkärnor borrades ut trycktes tre kuber ur varje serie vid 28 dygn vid Materialprovningen. Placering av de borrade hålen samt erhållna tryckhållfastheter och volymvikter framgår av bilaga 1 och 2.

Ytornas blåsighet

Antalet ytblåsor på de båda fundamentens långsidor räknades med nedanstående resultat.

	<u>Fundament 7</u>	<u>Fundament 8</u>
	" 90 s/m ³ "	" 310 s/m ³ "
Ytblåsor > 15 mm	10 st/m ²	1 st/m ²
Ytblåsor 5 - 15 mm	59 st/m ²	35 st/m ²

Den ökade vibreringsinsatsen vid gjutning av fundament 8 resulterade sålunda i en kraftig reduktion av antalet ytblåsor, inte minst vad gäller de större blåsorna.

En sammanställning och utvärdering av samtliga försöksresultat återfinns i ett följande avsnitt.

FÖRSÖK VID GJUTNING AV STÖDMUR, NORRA LÄNKEN

Introduktion

Med utgångspunkt från det orienterande fältförsöket vid Vasamuseet utfördes i det följande beskrivna huvudförsök vid gjutning av en stödmursmonolit vid Norra Länken, som utgör en ny trafikled mellan Essingeleden - Klarastrandsleden och E4/Uppsalavägen. Entreprenör för detta arbete var NCC - SKANSKA och beställare Stockholms Gatukontor. Liksom vid Vasamuseet erhöles all tänkbar medverkan av arbetsledning och gjutarlag. Gjutningen utfördes 1989-03-09. Den gjutna stödmurssektionen var 15 m lång och ca 4 m hög. En sidovy och tvärsektion visas i figur 11. Volymen uppgick till 27.0 m³.

Betong

Betongen levererad från AB Betongindustris fabrik i Hornsberg, bestod av K 40 T, anläggningscement, 5,5% luft, 32 mm stenmax och vct 0,45. Cementhalten var 390 kg/m³. Som lufttillförande medel användes Betokem L och som plasticerande medel Rescon P (mod. lignosulfonat). Kapaciteten vid gjutningen uppgick till ca 7 m³/h och stighöjden till 1 m/h.

Vibreringsförfarande

Vibreringsförfarandet var noga planerat och väl förberett. Den 15 m långa stödmuren indelades i tre 5 m långa sektioner med avsikt att vibreringsinsatsen i varje sektion skulle bli 300, 600 resp 1000 s/m³. Vid 300 s vibrering gjordes nedstick på 37 cm avstånd mitt i formen (medelbredd 45 cm). En stav användes. Vid 600 s vibrering gjordes nedstick i två rader så nära formsidorna som vibreringen medgav. Avstånden i varje rad var 37 cm. Då nedsticken saxades blev det minsta avståndet i längd mellan två nedstick 18,5 cm. En stav användes.

Vid 1000 s vibrering minskades avstånden mellan nedsticken i varje rad till 22 cm eller totalt till 11 cm. Två stavar erfordrades. I samtliga fall uppgick nedstickstiden i betong per nedstick till 20 s. Sektionerna för respektive stavnedstick fanns utmärkta vid formens överkant.

Den totala tid stavvibratorerna arbetade i betong bestämdes med stoppur av en tidtagare för varje stavoperatör. Tidtagaren beordrade också uppdragning av staven efter 20 s vibrering. Stavarnas totala gångtid bestämdes med vibrationstidmätare inkopplade mellan stav och frekvensomformare. Stavvibratorer fabrikat Wacker med inbyggd elmotor med 57 mm diameter användes. Betongen lades ut i 40 cm lager, vilket kontrollerades med speciell tolk. Lagertjocklekarna efter vibrering blev 36 cm. Stighöjden var 1,0 m/h. Enligt de avklockade och med tidmätare uppmätta vibreringstiderna erhöles följande resultat:

	" 300 s/m ³ "	" 600 s/m ³ "	" 1000 s/m ³ "
Total gångtid för vibratorerna	3 250 s	5 906 s	9 709 s
Vibr. tid i betong	2 314 s	4 368 s	7 648 s
Vibreringsinsats	350 s/m ³	680 s/m ³	1 220 s/m ³
Vibr. tid i betong/gångtid	71%	74%	79%

De verkliga vibreringstiderna i betong blev sålunda något högre än de förberäknade. Vibreringstiden i betong jämfört med den totala gångtiden för vibratorerna mätt med tidmätarna varierade vid denna gjutning mellan i medeltal 71 och 79%. Värdena varierade mellan 65% och 85% om man även tar med de lägsta och högsta partierna av den 4 m höga formen. Ju djupare formen är desto längre tid går åt för att lyfta och sänka vibratören, varigenom effektivitetsfaktorn sjunker.

Hållfasthet, densitet, porositet och vattentäthet

På nivån 1 m från överytan borrades genom Materialprovningens försorg i varje sektion tre st 100 mm cylindrar som tryck- och spräckprovades vid 28 dygns ålder. Densiteten bestämdes genom mätning och vägning. Dessutom borrades tre 140 mm cylindrar för bestämning av skrymdensitet, porositet och vattentäthet enligt Vuorinens metod. Tre 100 mm cylindrar borrades också ur provkuber tagna ur sista lasset vid gjutningen genom Betongindustris försorg. Dessa cylindrar har också provats beträffande hållfasthet och densitet av Materialprovningen. Tre stycken 150 mm kuber har också tryckts vid Materialprovningen.

Vattentäthet

Tre provcylindrar ur varje sektion har provats vid Statens Provninganstalt i Borås med avseende på vattentäthet.

Kloridpermeabilitet

Ett prov för varje sektion har provats av Materialprovningen vad avser kloridpenetration enligt den i USA utvecklade metoden.

Saltfrostbeständighet

Saltfrostbeständigheten för tre provcylindrar ur varje sektion har provats vid Materialprovningen enligt metod SS 137244.

Tunnslip

Tunnslipsprov har utförts vid Statens Provningsanstalt i Borås på en provcylinder från varje sektion och även på en provcylinder borrad i en provkub.

Ytornas blåsighet

Räkning av antalet ytblåsor utfördes i en rad av 15 rutor med bredden 1,0 m och höjden 1,75 m. Rutornas överkant låg 0,75 m under murens överkant. Ytblåsor med 5-15 mm storlek resp. > 15 mm räknades med följande resultat:

	" 350 s/m ³ "	" 680 s/m ³ "	" 1 220 s/m ³ "
Klingsågat virke,			
Mv	31-1 st/m ²	36-1 st/m ²	36-0 st/m ²
Plyfa, Mv	37-1 st/m ²	21-0 st/m ²	15-0 st/m ²

Blåsigheten ökade betydligt närmare överytan, speciellt i sektion "350 s/m³".

Stödmurens framsida formsatt med klingsågat spontat virke uppvisade delvis mycket porfria och fina ytor. Partier med mycket blåsor och bitvis retarderade ytor (där cementhuden släppt vid formlossningen) förekom också. Det kan bero på att trähartserna från formvirket, bl a lignosulfonater, retarderat betongen i ytan. Problemen med ytsläppning vid formlossningen har blivit mindre vid återanvändning av virket. Stödmurens baksida formsatt med plyfa såg mycket bättre ut, men här är blåsigheten delvis dold av en tunn skålla av cementbruk. Vid räkning av blåsorna har cementhuden petats loss där man kunnat ana en blåsa.

SAMMANSTÄLLNING OCH UTVÄRDERING AV FÖRSÖKSRESULTATEN

Tryck- och spräckhållfasthet, densitet

Betongens tryckhållfasthet bestämd på utborrade provcylindrar har genomgående ökat vid ökad vibreringsinsats, dock i avtagande grad mellan 680 och 1 220 s/m³, figur 12. Av samma figur framgår att spräckhållfastheten har ökat vid en ökning av vibreringsinsatsen från 350 till 680 s/m³, men sedan sjunkit något vid ytterligare ökad vibreringsinsats. Resultat av densitetsbestämningar, figur 13, visar att värdena genomgående ökat vid ökad vibreringsinsats. Jämför man densitetsökningarna med ökningarna av tryckhållfastheten finner man att 1% densitetsökning i stort sett gett en hållfasthetsökning av ca 5% i god överensstämmelse med resultaten av litteraturgenomgången. Det gäller såväl försöken vid Vasamuseet som vid Norra Länken.

Vattentäthet

Betongens vattentäthet bestämd enligt två olika metoder, metod Vuorinen tillämpad av Materialprovningen och Statens Provningsanstalts metod, har gett samband av samma typ som hållfasthetsbestämningarna, figur 14. En ökning av vibreringsinsatsen från 350 till 680 s/m³ har gett en viss permeabilitetsminskning medan en fortsatt ökning till 1 220 s/m³ enligt Vuorinens metod gett en mindre minskning och vid SPS undersökning oförändrad permeabilitet. Vid Vasamuseet, där betong utan lufttillsats användes, blev vattentätheten bättre än vid Norra Länken med lufttillsatt betong i överensstämmelse med resultaten av litteraturgenomgången.

Prov enligt Vuorinens metod gav större täthet än prov enligt SPs metod. Vid Vuorinenprovet utgår man från en betong, där vatten tidigare tryckts in i porerna med högt tryck, vilket kan förklara de bättre täthetsvärdena.

Kloridpermeabilitet

Bestämningar av kloridpermeabilitet på provcylindrar från Norra Länken, figur 15 och 16 visar ett optimalvärde vid vibrationsintensiteten 680 s/m^3 . Kloridpermeabiliteten vid vibreringsinsatsen 350 s/m^3 , klassificeras som hög medan värdena vid vibreringsinsatserna 680 och $1\ 220 \text{ s/m}^3$ klassificeras som "måttliga". Dessa resultat stämmer överens med slutsatsen av tidigare undersökningar enligt vilka en relativt hög luftporhalt inverkar negativt på betongens täthet.

Frostbeständighet

Resultaten av frostbeständighetsproven, figur 17-19 är mer svårtolkade. Vid vibreringsinsatsen 350 s/m^3 har de tre provkropparna från Norra Länken gett god till acceptabel saltfrostbeständighet. Vid vibreringsinsatserna 680 och $1\ 220 \text{ s/m}^3$ har i båda fallen två av de tre proven gett god till acceptabel frostbeständighet, medan ett av proven gett dålig frostbeständighet. Medeltalsvärdena indikerar också en inte acceptabel frostbeständighet.

En förklaring kan vara den nedgång av betongens lufthalt som konstaterats vid ökad vibreringsinsats och som till överraskande stor del gällt de skyddsporerna, figur 20. Det kriterium som gäller minsta skyddsporförhållande ($> 0,25$) indikerar att betongen i detta fall enligt det i Finland använda kriteriet riskerar att ha dålig beständighet vid vibreringsinsatser över 420 s/m^3 , figur 21.

SPs tunnslip ger mer gynnsamma gränsvärden. Tabell 1 samt figur 22 och 23 visar att vibreringsinsatsen 350 s/m³ gett ur frostbeständighetssynpunkt bättre värden (avståndsfaktor och specifik yta) än såväl provkuben som de större vibreringsinsatserna.

Tabell 1

Tunnslipprov utförda vid Statens Provningsanstalt.
Kvantitativ mikroskopisk analys

Beteckning	Provkub 2	Provbeteckning		
		300-19 " 350 s/m ³ "	600-12 " 680 s/m ³ "	1000-6 " 1220s/m ³ "
Lufthalt (vol-%)	8,5	4,0	3,3	3,4
Lufthalt (vol-% av pasta inkl luft)	21,0	9,0	9,0	8,0
Specifik yta (mm ⁻¹)	18,0	47,0	39,0	25,0
Avståndsfaktor (mm)	0,21	0,13	0,16	0,27

En största godtagbar avståndsfaktor på 0,18 anger otillfredställande frostbeständighet över 780 s/m³, figur 22. En minsta godtagbar specifik yta på 30 mm⁻¹ anger otillfredställande frostbeständighet först över 1 000 s/m³, figur 23.

I tunnslipet från provkuben (se figur 24), finns en hel del stora luftporer sannolikt beroende på otillräcklig vibrering. Vid vibreringsinsatsen 350 s/m³ finns i huvudsak små luftporer. Vid vibreringsinsatserna 680 och 1 220 s/m³ har de små luftporerna bildat större porer, mer utpräglat vid den största vibreringsinsatsen.

Frysproven och framförallt analyserna av tunnslipproven, figur 22 och 23, indikerar en optimal saltfrostbeständighet i registret 400 till 500 s/m³.

Lufthaltsnedgången visad i figur 20 och det finska beständighets-kriteriet, figur 21, indikerar å andra sidan att man redan i ovannämnda register kan komma in i en riskzon vad beträffar frostbeständigheten. Se också avsnitt "Stabilitet hos luftpor-system" i litteraturstudien. En slutsats måste bli att frågan om stabiliteten hos luftporsystem vid långvarig vibrering måste nogt beaktas.

Ytornas blåsighet

Undersökningsresultaten har bekräftat att antalet ytblåsor normalt minskar påtagligt med ökad vibreringsinsats. Ett diagram visande samband mellan antal ytblåsor 5 - 15 mm och vibreringsinsats visas i figur 25.

Vid försöket på Norra Länken har dock form av klingsågat virke visat en i stort sett oförändrad blåsfrekvens vid ökad vibreringsinsats. Detta stämmer ej med resultaten av Vattenfalls undersökning, (22), där även klingsågat virke erhållit en klart minskad blåsfrekvens vid ökad vibreringsinsats. Formoljat klingsågat virke har för övrigt vid denna undersökning gett mindre antal ytblåsor än form av plyfa och bräder.

Den minsta vibreringsinsats som erfordras för att erhålla en blåsfrekvens av max 50 st 5-15 mm blåsor per m^2 är enligt föreliggande undersökningsresultat av storleksordningen 300 - 400 s/m^3 . Inbördes variationer beroende bl a på betongsammansättning, typ av formmaterial och dess behandling förekommer dock.

Blåsor större än 15 mm får ej förekomma och det verkar som om förekomsten av sådana större blåsor blir mycket begränsad om antalet blåsor 5 - 15 mm maximeras till 50 st/m^2 .

Antalet blåsor på ytorna av utborrade provcylindrar har minskat med ökad vibreringsinsats. Framförallt har det gällt vibreringsinsatsen 1 220 s/m^3 .

	<u>Antal ytblåsor per provcylinder (medeltalsvärden)</u>		
	"90 s/m ³ "	"310 s/m ³ "	
Vasamuseet	7 - 1	7 - 0	
	"350 s/m ³ "	"680 s/m ³ "	"1220s/m ³ "
Norra Länken	7 - 1	5 - 0	1 - 1

Effektivare stavvibratorer

De i text och figurer angivna vibreringsinsatserna är relaterade till de använda stavvibratorerna, samtliga med 56 eller 57 mm diameter. Vid användning av andra typer och storlekar av stavvibratorer ger samma vibreringsinsatser angivna i s/m³ väsentligt andra resultat, vilket nogga måste beaktas vid studier och tillämpning av denna rapport.

Kravet på en relativt stor vibreringsinsats vid gjutning av anläggningsbetong väcker frågan om möjligheterna att använda stavvibratorer med bättre packningsverkan jämfört med de nu vanliga stavvibratorerna med i tuben inbyggd elmotor och 56 eller 57 mm tubdiameter. Tidigare användes modeller med böjlig drivaxel och ofta med 63 mm tubdiameter hade en bättre packningsverkan men var samtidigt mer svårhanterliga. Önskemålen beträffande effektivare stavvibratorer bör framhållas för leverantörerna av vibreringsutrustning. En mekanisering av stavvibratorernas hantering har också diskuterats inom referensgruppen och arbete med detta bedrivs nu inom ramen av ett annat SBUF-projekt.

KONTROLL OCH UPPFÖLJNING AV VIBRERINGSINSATS

Vid jordfyllnings- och asfaltarbeten tillämpas vid större och viktigare arbeten oftast resultatkontroll vilket innebär att man i fält bestämmer det packade materialets densitet.

Detta värde relateras till den densitet som erhållits vid laboratorieinstampning av samma material enligt ett normerat förfarande oftast s k Proctorinstampning för jord och Marshallinstampning för asfalt. En minsta tillåten packningsgrad, t ex 95% Proctor, fastställs för olika typer av objekt.

För betong finns standardiserade packningsförfaranden för t ex tillverkning av provkuber på vibrationsbord som man skulle kunna använda som utgångspunkt för en resultatkontroll avseende densitet och tryckhållfasthet i färdig konstruktion. I vår ansökan gällande ifrågavarande forskningsprojekt var vi inne på tanken att undersöka huruvida en sådan resultatkontroll skulle kunna vara tillämplig för kvalificerade betongprojekt. Som framgår av litteraturstudien är emellertid den densitet och hållfasthet som erhålls i en färdig betongkonstruktion i hög grad beroende på vilken nivå provtagningen utförs (beroende på bindnings- och sättningsförloppet i den färska massan) Densitets- och hållfasthetsgradienten varierar. Som ovan nämnts kompliceras bilden ytterligare av att även härdningsförhållandena påverkar hållfasthetsutvecklingen. Förutsättningarna att för betong införa en resultatkontroll baserad på föreskriven packningsgrad av samma typ som tillämpas för jord- och asfaltarbeten verkar sålunda ej att föreligga.

Det alternativ som då kommer ifråga är utförandekontroll som innebär övervakning av lagertjocklekar, stighastighet och vibreringsinsats. Vibreringsinsatsen (tillfört vibreringsarbete) kan kvantifieras av vibreringstid per m^3 varvid typ och storlek av stavvibrator måste vara fastställd. Vibreringstid för en stavvibrator kan relativt enkelt bestämmas med den inom projektets ram provade och utvärderade vibrationstidmätaren, figur 26.

Mätaren har på arbetsgruppens initiativ tagits fram av Dynapac Concrete Equipment AB, Ljungby. Då mätaren i fråga registrerar vibratorns totala gångtid måste man införa en reduktionsfaktor som tar hänsyn till vibreringstid i luft mellan stavnedsticken.

Denna faktor har vid utförda fältundersökningar konstaterats vara av storleksordningen 0,7-0,9 varvid 0,7 gäller djupare formar och 0,9 bjälklag och plattor.

Genom bestämning av total vibreringstid angiven i s/m^3 betong kan man få en verifikation att en viss vibreringsinsats utförts vid gjutetappen i fråga. Denna uppgift kan bli en viktig del av den dokumentation som bör ingå i ett kvalitetssäkringsprogram för kvalificerade betonggjutningar.

Vid en effektiv vibreringsinsats kan man räkna med att staven är igång upp till 60 - 70% av den totala gjuttiden. Med hänsyn till vibreringstiden i luft blir den effektiva vibreringstiden i betong 40 till 60% av den totala gjuttiden vid effektiv användning av staven. Sambanden mellan vibreringsinsats angiven i s/m^3 och kapacitet per stav angiven i m^3/h visas i figur 27.

En stavvibrators packningsverkan (verkningsradie) i betong är beroende av tubens diameter och vikt samt av frekvens och amplitud. För de normalt använda typerna av stavvibratorer med en i tuben inbyggd elmotor bestäms frekvensen av strömmens period-tal, normalt 200 Hz (12 000 vibr/min). Den för betongeffekten viktiga amplituden kan enkelt mätas med en "mätkil" som klistras på tuben, figur 28.

SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Enligt de undersökningar som utförts vid Norra Länken har betongens tryckhållfasthet genomgående ökat vid en ökning av vibreringsinsatsen upp till 1 220 s/m³, dock i avtagande grad över 680 s/m³. Vattentätheten har ökat mycket lite över vibreringsinsatsen 680 s/m³.

För spräckhållfasthet, motstånd mot kloridinträngning och saltfrostbeständighet har optimalvärden erhållits inom registret 400 till 600 s/m³.

Ett krav på begränsning av antalet ytblåsor 5 - 15 mm till max 50 st/m² synes för anläggningsbetong fordra en minsta vibreringsinsats av 300 - 400 s/m³. Ett sådant krav torde samtidigt utgöra en viss säkerhet för full formutfyllning och fullgod vibrering av konstruktionens ytterdelar.

Ovanstående undersökningsresultat pekar mot en optimal vibreringsinsats för anläggningsbetong av storleksordningen 400 till 600 s/m³. Detta avser den vanligaste storleken av vibratorstavar d v s 56 -57 mm diameter. Kapaciteten per stav blir då ca 3 - 5 m³ betong per timme vid effektiv användning.

Vid undersökningen har en ogynnsam inverkan på betongens luftporsystem vid långvarig vibrering konstaterats. Man riskerar därigenom att redan vid ovannämnda vibreringsinsats hamna i en riskzon beträffande frostbeständigheten, vilket är en fråga som måste noga beaktas och fordrar ytterligare studier. En viktig slutsats är att goda resultat av frostprov på särskilt tillverkade provkroppar ej utgör någon garanti för motsvarande frostbeständighet i den färdiga konstruktionen.

En kontroll och verifikation av att vibreringsinsatsen varit tillräcklig kan göras med hjälp av de vibrationstidmätare som utvecklats inom projektets ram.

Täckskiktets tjocklek är en avgörande faktor för konstruktionens livslängd. Speciell täckskiktstvibrering mellan form och ytarmering har resulterat i mycket täta och blåsfria ytor, (20). Risken för att även en del av de luftporer som tillförts med tanke på frostbeständigheten vibreras bort måste dock beaktas.

ÖNSKVÄRDA FORTSÄTTA UNDERSÖKNINGAR

Som inledningsvis påpekats har försöksprogrammets etapp 1 nu genomförts. Som man kunde förvänta återstår efter denna etapp ett antal obesvarade frågor:

1. En av de viktigaste av dessa frågor gäller luftporsystemens stabilitet vid långvarig vibrering. Det syns önskvärt att mera systematiskt än hittills genom förprov försöka fastställa denna stabilitet för olika betongblandningar och tillsatsmedel. En standardiserad provningsmetod för bestämning av luftporsystemets stabilitet borde fastställas. Det är också önskvärt att genom prov i betongkonstruktionen undersöka vilket luftporsystem som erhålles efter transport, pumpning och vibrering. En dansk metod för in-situ bestämning av halten små luftporer är under utveckling, (18). Ett annat alternativ är att borra ut provcylindrar på vilka man sedan utför tunnslipanalys. En öppen fråga gäller huruvida luftporsystemet påverkas av höjdläget i konstruktionen. Det är sannolikt att det tryck som uppstår på större djup kan påverka luftporernas storlek och därmed förändra porsystemets karaktär.

En fråga som aktualiserats av projektet gäller motsatsförhållandet mellan saltfrostbeständighet som fordrar ett lämpligt luftporsystem och kraven på betongens täthet med hänsyn till risken för armeringskorrosion. En hög luftporhalt ökar påtagligt kloridpermeabiliteten.

I vilken utsträckning behövs saltfrostbeständiga konstruktioner? Eftersom frostsador är sällsynta på vertikala konstruktionsdelar utan upprepad vatten- och saltkontakt kan användning av lufttillsats i sådana konstruktioner ifrågasättas.

De problem som diskuterats under punkt 1 motiverar enligt vår uppfattning fortsatta studier.

2. Fortsatta studier avseende optimal vibreringsinsats även för i första hand ett industribygge och ett husbygge är önskvärda. Vid t ex husbyggen blir andra kvalitetsegenskaper än vid anläggningskonstruktioner utslagsgivande.
3. Fortsatta fältförsök med vibrationstidmätare vore önskvärda på olika typer av gjutningar för att fastställa dels lämpliga vibreringsinsatser, dels samband mellan verkliga vibreringstider i betong och vibratorernas totala gångtid.
4. En förenklad metod för bestämning av betongytors blåsighet är önskvärd. En dataanalys av videoupptagningar av sådana ytor vore en tänkbar utvecklingslinje, som diskuterats vid Statens Institut För Byggnadsforskning i Gävle.
5. Metoder för mekaniserad hantering av vibratorstavar studeras vid ett SBUF-projekt bedrivet av NPL och Byggergolab.
6. Den relativt stora vibreringsinsats som bedömts önskvärd för anläggningsbetong, 400 till 600 s/m³, ställer frågan om möjligheterna att få fram stavvibrater med bättre packningsverkan i betong än de nu vanliga modellerna med 56 - 57 mm diameter.
7. Det praktiska utförandet av täckskiktstvibrering och betydelsen härav med hänsyn till konstruktionens kvalitet och livslängd bör ytterligare studeras.

8. Svårigheter föreligger att vibrera brokantbalkar till önskvärd packningsgrad. Frågan om utförande och gjutning av kantbalkar borde ytterligare studeras.

Stockholm 1990-04-18

Lars Forssblad

Per Leckström

Boris Steorn

Stig Sällström

LITTERATURFÖRTECKNING

1. "Betonghandbok/Material/Arbetsutförande", Svensk Byggtjänst, 1980
2. Kaplan, M. F. "Effects of Incomplete Consolidations on Compressive and Flexural Strength, Ultrasonic Pulse Velocity and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete". ACI Journal, Proceedings, March 1960
3. Popovics, S. "New Formulas for the Prediction of the Effect of Porosity on Concrete Strength". ACI Journal, March-April 1985
4. Nasser, K. W. och Dolan, D. E. "Considerations for Potential Use of Nuclear Density Gages on Concrete". ACI Materials Journal, March-April 1989
5. Fjeld, B. och Haug, A. K. "Produktionsstyrning och kvalitets-säkring". Kompendium, Fortbildningskurs i kvalificerad betongteknik, Högskolan i Luleå, 1987
6. Kalmar, G. "Betonghållfasthet en fallstudie av BBK 79" Statens Institut För Byggnadsforskning. Meddelande M85: 28.
7. Whiting, D., Seegebrecht, G. W. och Tayabiji, S. "Effect of Degree of Consolidation on Some Important Properties of Concrete". ACI, Consolidation of Concrete, SP-96, 1987
8. Darwin, D. "Effects of Construction Practice on Concrete-steel Bond". ACI, Lewis H. Tuthill International Symposium on Concrete and Concrete construction SP-104, 1987
9. "Permeability of Concrete". ACI, SP 108, 1988
10. Sällström, S med flera. "Betongs beständighet. Permeabilitet, luftporsystem och härdning". Byggforskningsrådet R 89: 1988
11. Rasheeduzzafar, Al-Gathani, A. S. och Al-Saadoun S. S. "Influence of Construction Practices on Concrete Durability". ACI Materials Journal, Nov-Dec 1989
12. "Bearbetning fria betongytor". Vägverket BDa-rapport 86304-32, Borlänge 1987
13. "Undersökning av betongöverytors egenskaper vid olika bearbetningsgrad". Delrapport Augusti 1988". Stockholms Gatukontor, Bro 88, Borlänge

14. American Concrete Institute (ACI). "Guide for Consolidation of Concrete". Detroit 1988
15. Bureau of Reclamation. "Concrete Manual". U. S. Department of The Interior. Washington 1975
16. Fagerlund, G. "Betongens beständighet mot frost och salt". Cementa 1984
17. Nyqvist, H. "Saltfrostbeständig betong". Skanska 1989
18. Petersson, Ö. "Frostsäkerhetsbestämning av färsk betong". Stråbruken 1988. SBUF-projekt
19. Petersson, Ö. "Laboratieförsök med genomsläpplig formväv (Japansk typ)". Stråbruken 1988. SBUF-projekt
20. Alemo, J. "Optimal vibreringsinsats för anläggningsbetong". Vattenfall 1989
21. Bellander, U. och Gregorson, M. "Betongytors porighetssymtom och medicin". CBI Ra 6: 80
22. Fredriksson G. och Samuelsson P. "Optimering av betongegenskaper med hänsyn till vintergjutning", Byggeforskningsrådet, R 17: 1986
23. Sällström, S. "Sättnings effekter i nygjuten färsk betong". Opublicerad rapport
24. Hoshino, M. "Relationship between Bleeding, Coarse Aggregate, and Specimen Height of Concrete". ACI Materials Journal, March - April 1989
25. Takahashi, H. och Nakane, S. "Strength of Concrete in Structures and Factors Contributing to Strength Differentials". Quality Control of Concrete Structures. Rilem-seminarium 1979, Stockholm
26. Moksnes, J. "Concrete Platforms in the North Sea Two Decades of Experience with High Strength Concrete". ERMCO-kongress, Stavanger, 1989
27. Dewar, (J. D.) "Testing Concrete for Durability". Concrete, Juni 1985
28. Andersson, C. och Petersson, P.-E. "Härldningens inverkan på betongs permeabilitet och beständighet". Statens Provningsanstalt Rapp 1987: 07
29. Ingvarsson, H. "Oförstörande provning av betongkonstruktioner". Nordisk Betong 6: 1989

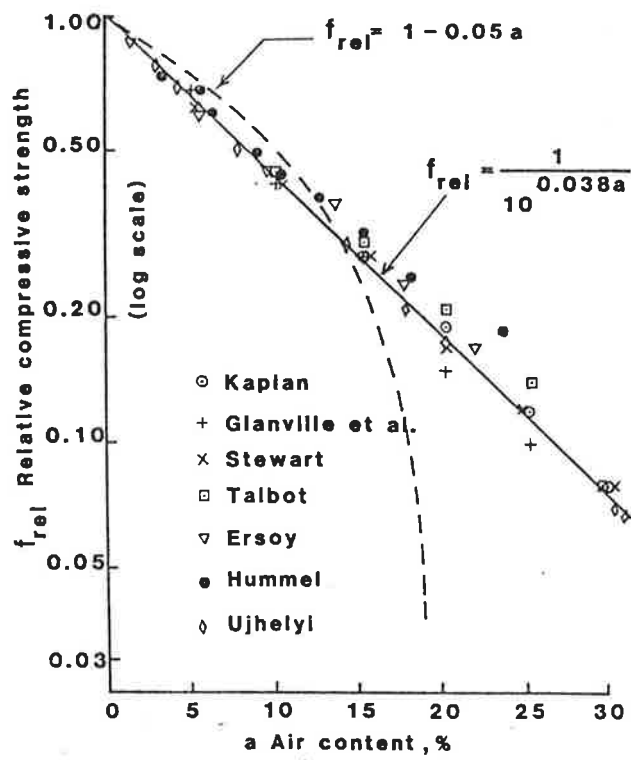
30. Nasser, K.W. och Dolan D.E. "Experimentation with a Nuclear Density Gauge on Concrete in the Laboratory". Opublicerad rapport
31. Vuorinen, J. "Application of Diffusion Theory to Permeability Tests on Concrete". Part I och II. Magazine of Concrete Research, Vol. 37, No 132, sept 1985

FUNDAMENT 7

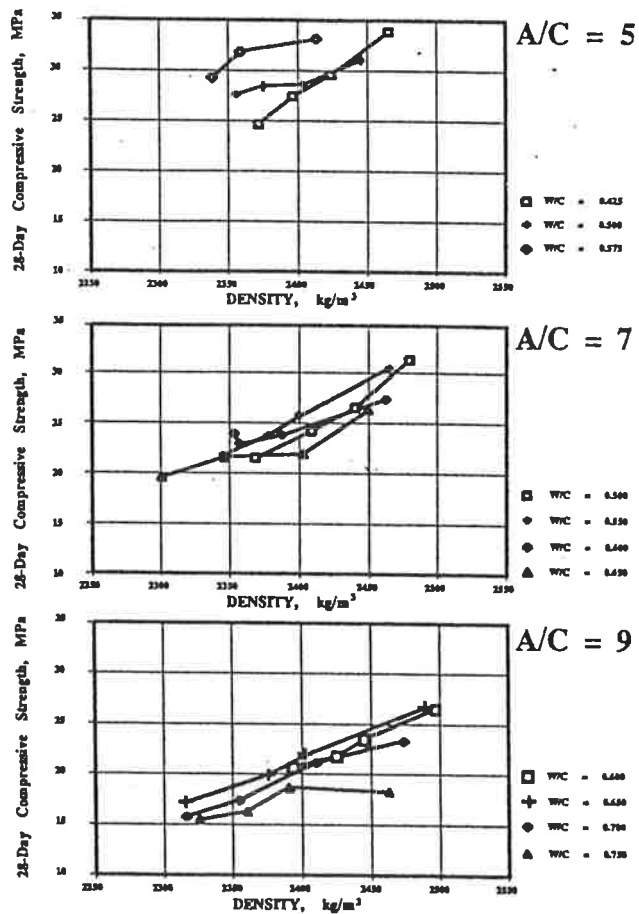
Tryckhållfasthet SS 13 72 10		Tryckhållfasthet utborrade kärnor ur fundament	
Kub nr	Densitet kg/m ³	Densitet kg/m ³	MPa
1	2370	2375	33.1
2	2380		
3	2365		
Medel	2370	Medel 1-6	33.1
<p>1. ⊕ Tryckhållfasthet utborrade kärnor</p> <p>Densitet MPa</p>			
1	2385	34.3	
<p>2. ⊕</p> <p>Densitet MPa</p>			
	2390	34.6	
<p>3. ⊕</p> <p>Densitet MPa</p>			
1	2380	37.1	
2	2390	37.8	
3	2385	36.8	
Medel	2385	37.3	
<p>4. ⊕</p> <p>Densitet MPa</p>			
	2370	32.7	
<p>5. ⊕</p> <p>Densitet MPa</p>			
	(5) 2370	32.0	
	(6) 2375	32.7	

FUNDAMENT 8

Tryckhållfasthet SS 13 72 10		Tryckhållfasthet utborrade kärnor ur fundament	
Kub nr	Densitet kg/m ³	Tryckhållfasthet MPa	Densitet kg/m ³
1	2360	41.8	2425
2	2405	43.4	2425
3	2370	41.6	2425
Medel	2380	42.3	2425
Tryckhållfasthet utborrade kärnor ur normprover		Medel 1-6	
Prov nr	Densitet	Tryckhållfasthet MPa	MPa
1	2405	38.4	35.4
2	2405	39.1	
3	2415	32.7	
Medel	2410	36.7	
Tryckhållfasthet utborrade kärnor ur fundament		Medel 1-6	
1. \oplus	2. \oplus	3. \oplus	4. \oplus
Tryckhållfasthet Densitet	Tryckhållfasthet Densitet	Tryckhållfasthet Densitet	Tryckhållfasthet Densitet
2420 2420	2445 2445	2390 2390	2430 2430
35.9 35.9	37.0 37.0	35.2 35.2	35.7 35.7
Medel 1-6		Medel 1-6	
2425	2425	2425	2425
35.4	35.4	35.4	35.4
5. \oplus 6. \oplus		5. \oplus 6. \oplus	
Densitet	Densitet	Densitet	Densitet
(5) 2380	(5) 2380	(5) 2380	(5) 2380
(6) 2490	(6) 2490	(6) 2490	(6) 2490
33.3	33.3	33.3	33.3
35.1	35.1	35.1	35.1

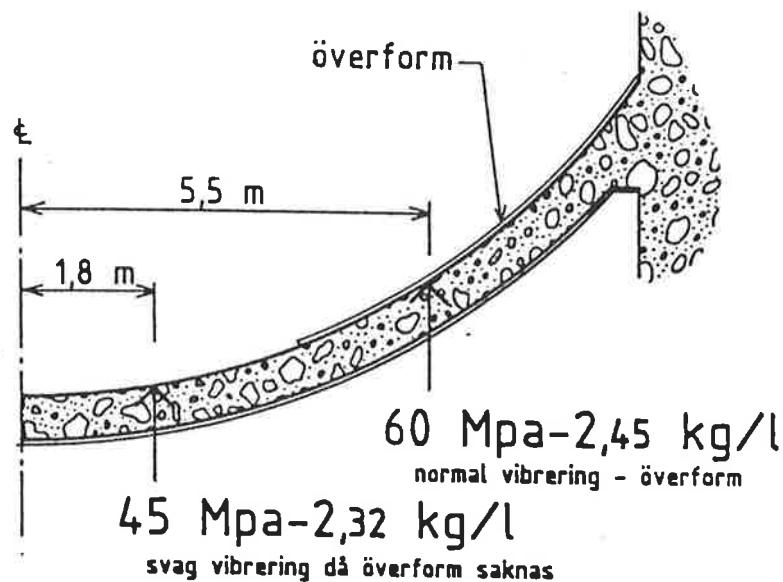


Figur 1. Samband mellan relativ tryckhållfasthet och lufthållrum enligt Popovics, (3).



A/C anger viktsförhållandet ballast till cement

Figur 2. Samband mellan tryckhållfasthet och densitet för olika betongkvaliteter, (4). Kurvorna har i stort sett lika lutning men ligger på olika nivå i hållfasthetsregistret.

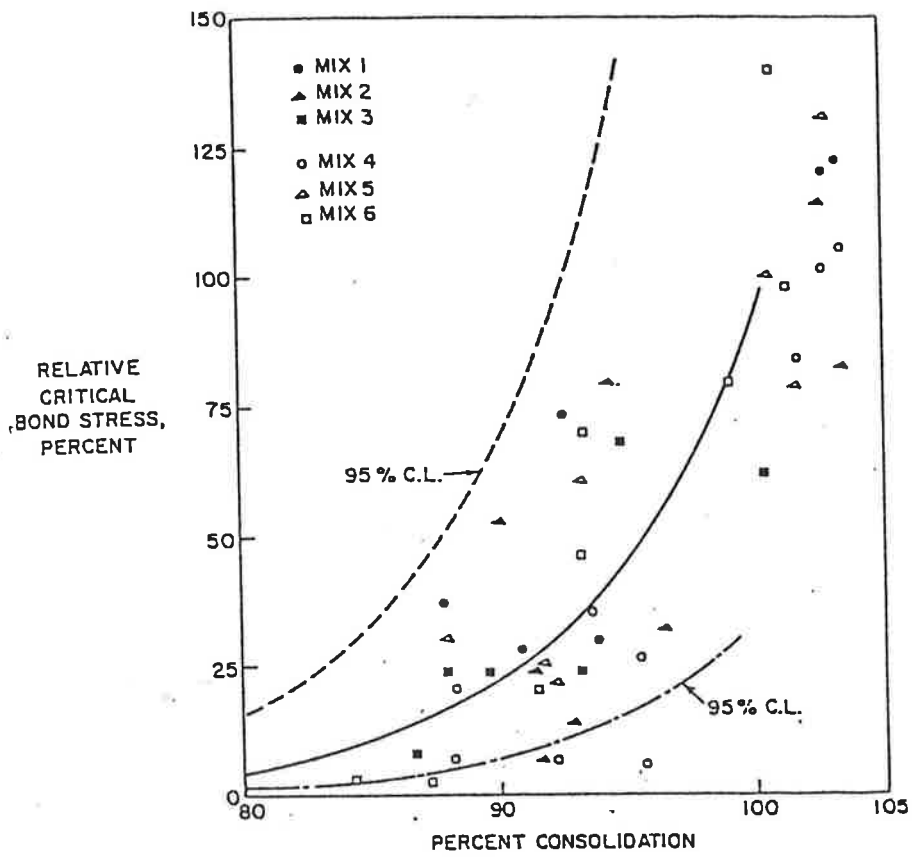


Exempel från norskt plattformsbysgge

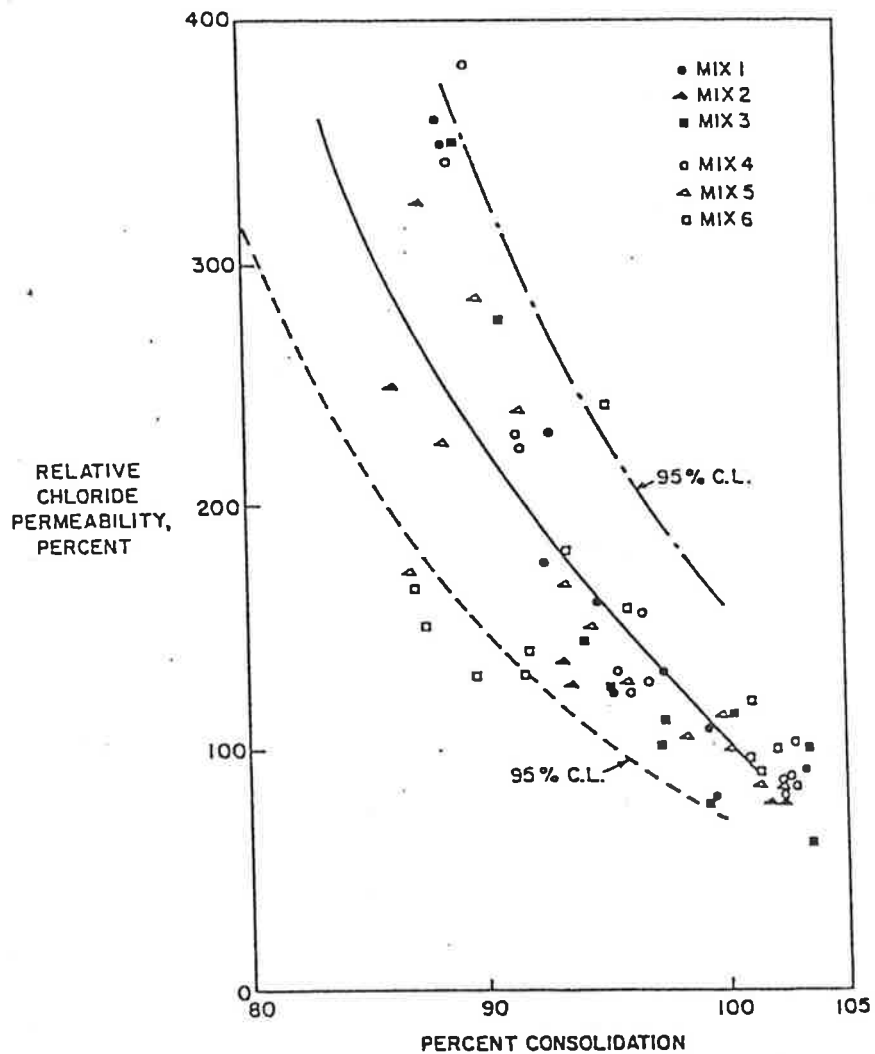
Med överform som möjliggör effektiv vibrering erhöles hög tryckhållfasthet och densitet bestämd genom utbörning av provcylindrar.

Utan överform flyter betongen ut och endast en kortvarig vibrering blir möjlig, speciellt som flytbetong användes. Avsevärt lägre tryckhållfasthet erhöles.

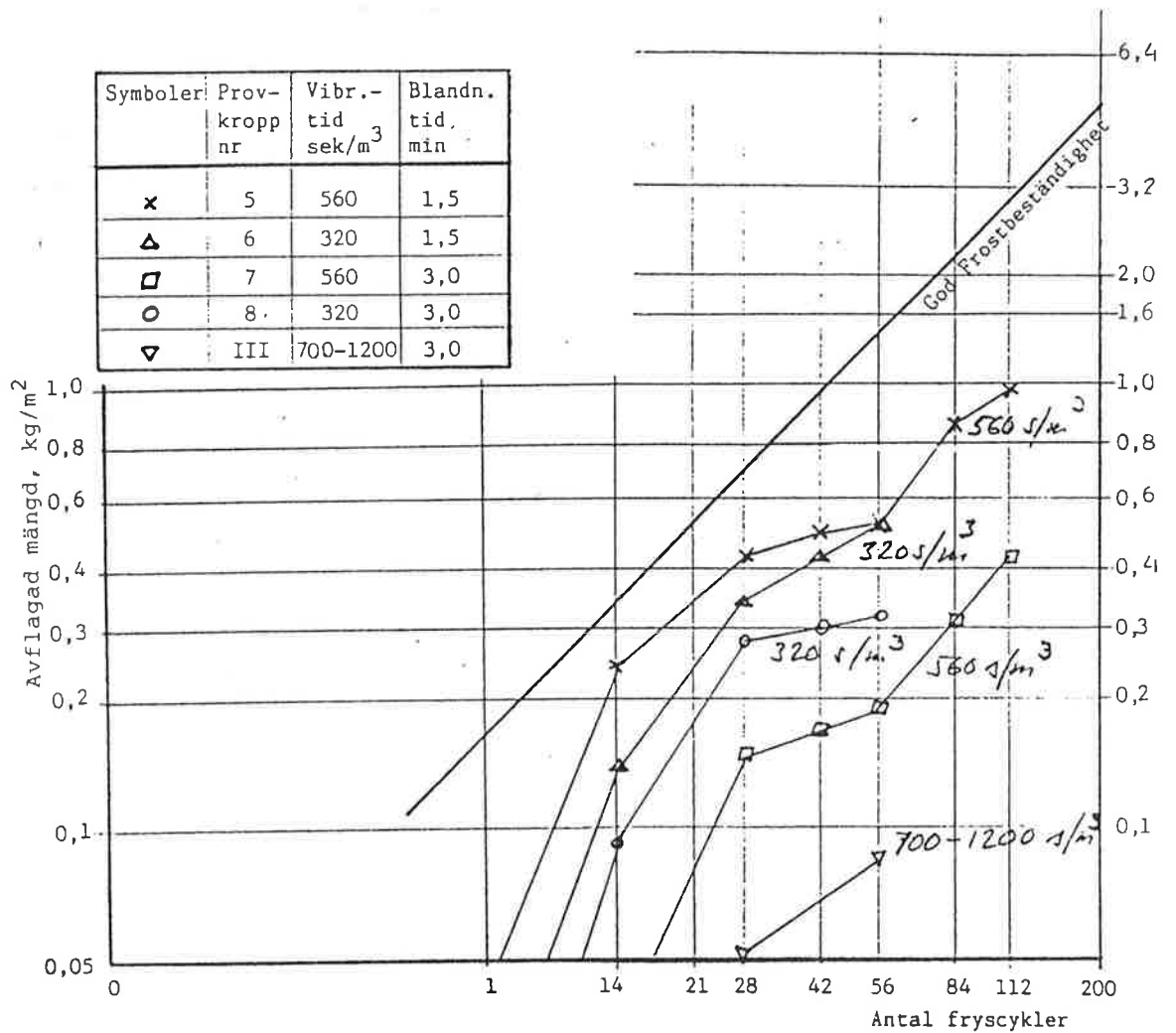
Figur 3. Tryckhållfasthet och densitet vid god resp dålig packningsinsats, (5).



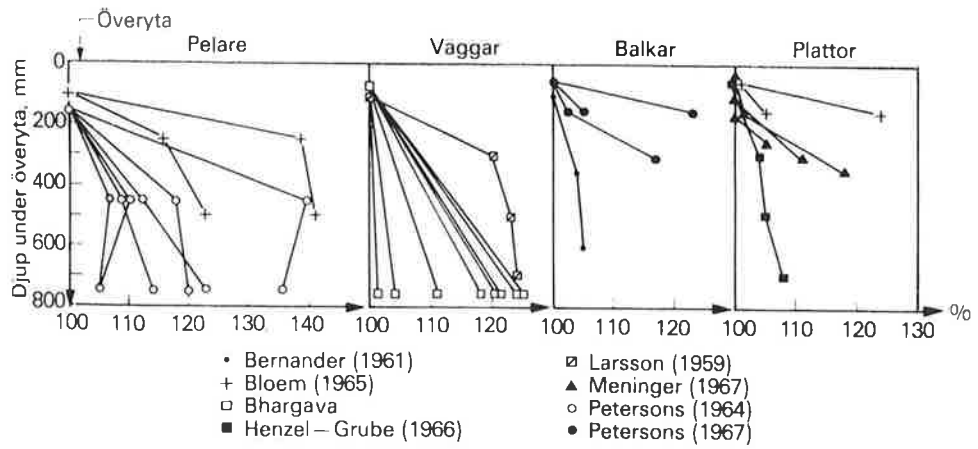
Figur 4. Samband mellan vidhäftning mot armeringsjärn och packningsgrad enligt Whiting et al, (7).



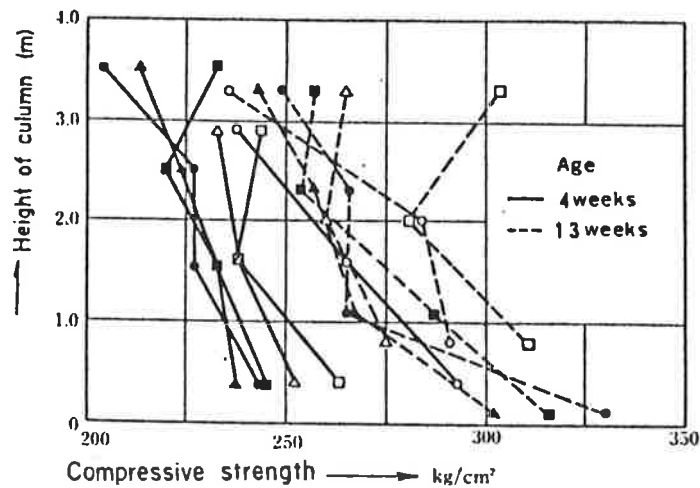
Figur 5. Samband mellan kloridpermeabilitet och packningsgrad enligt Whiting et al (7).



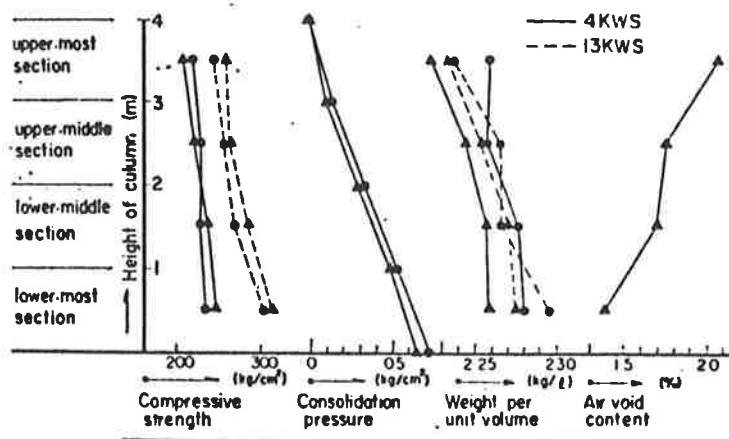
Figur 6. Avflagnings vid frostprov vid olika blandningstider och vibreringsinsatser enligt undersökningar utförda av Vägverket, (12).



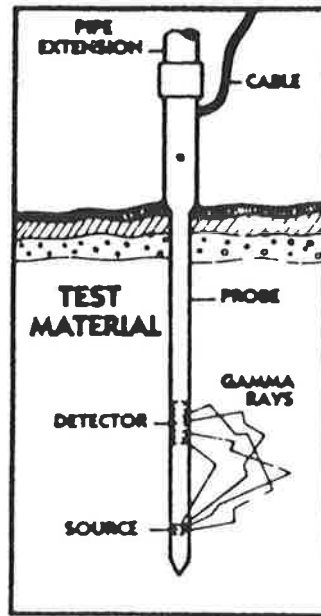
Figur 7. Variation av betongens hållfasthet med djup under överytan i olika typer av konstruktioner. Hållfastheten strax under överytan har satts till 100%. (1).



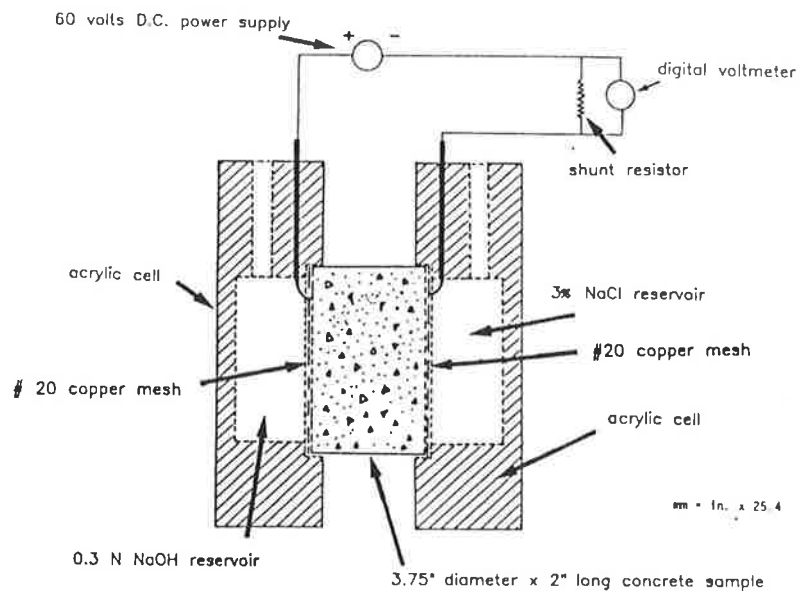
Figur 8a. Variation av betongens tryckhållfasthet med djup under överytan. Pelare. (25).



Figur 8b. Variation av betongens densitet med djup under överytan. Pelare. (25).

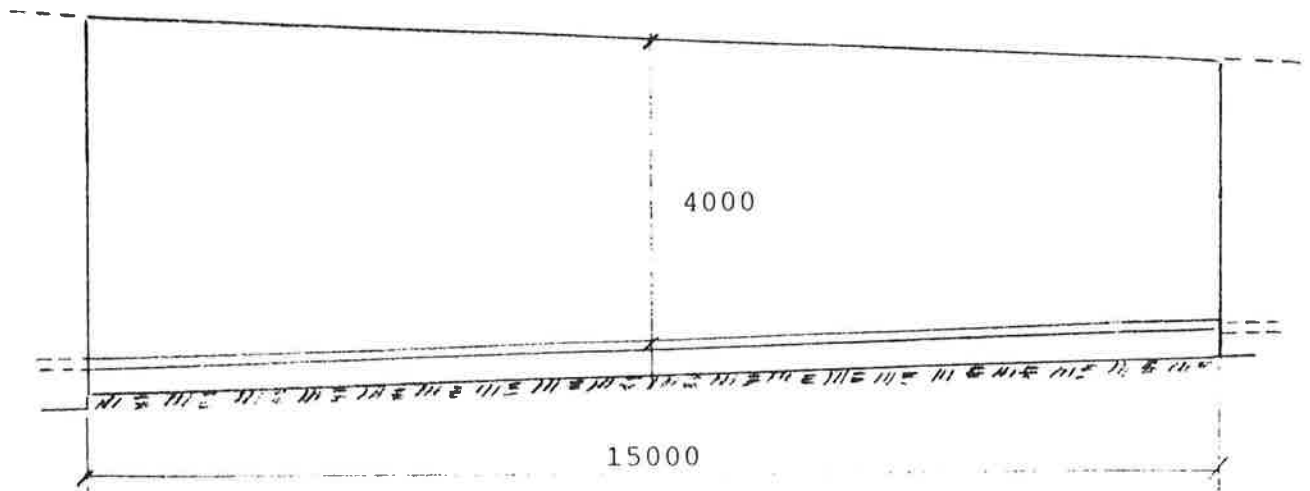


Figur 9. Sondrustning för nukleär densitetsmätning främst avsedd för jordmaterial.

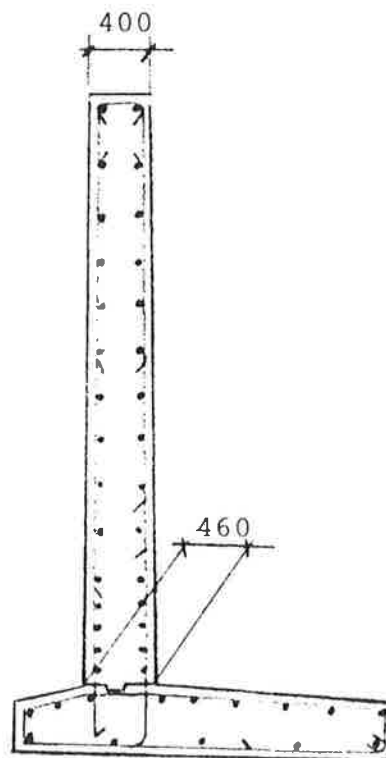


Figur 10. Apparat för laboratoriebestämning av kloridpermeabilitet i betong.

NORRA LÄNKEN
BIRKATUNNELN - SOLNABRON
OBJEKT 13
MONOLIT 5

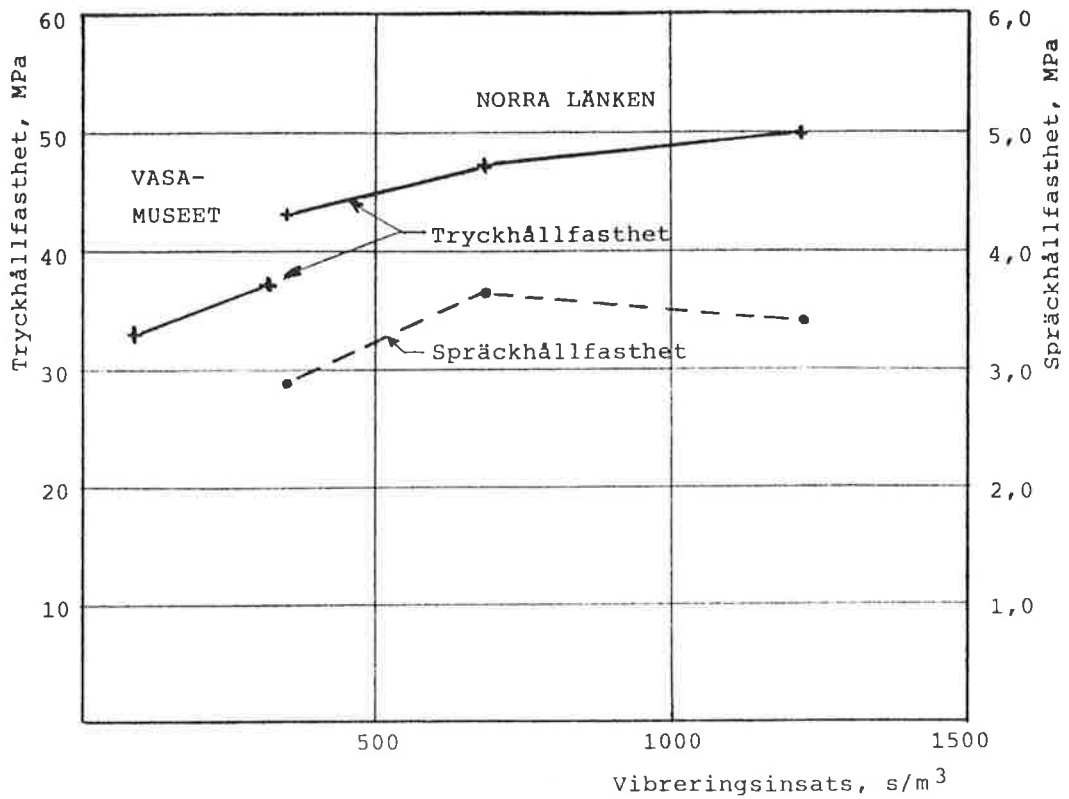


Sidovy
Skala 1:100

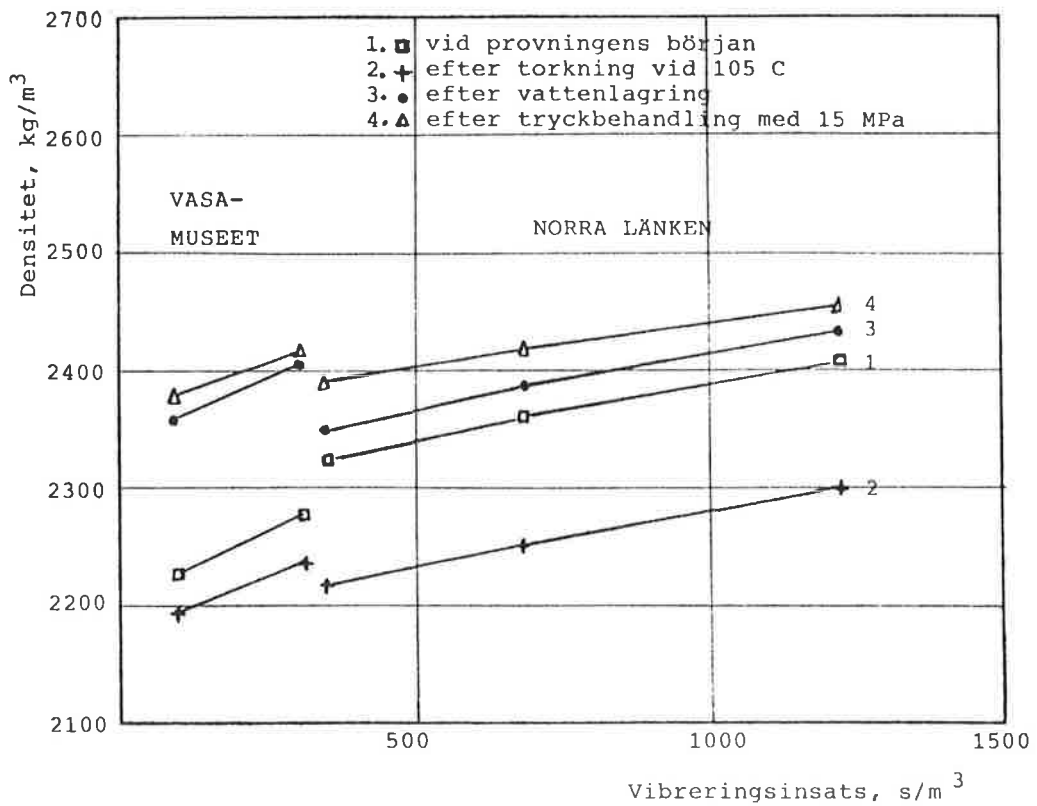


Tvärsektion
Skala 1:50

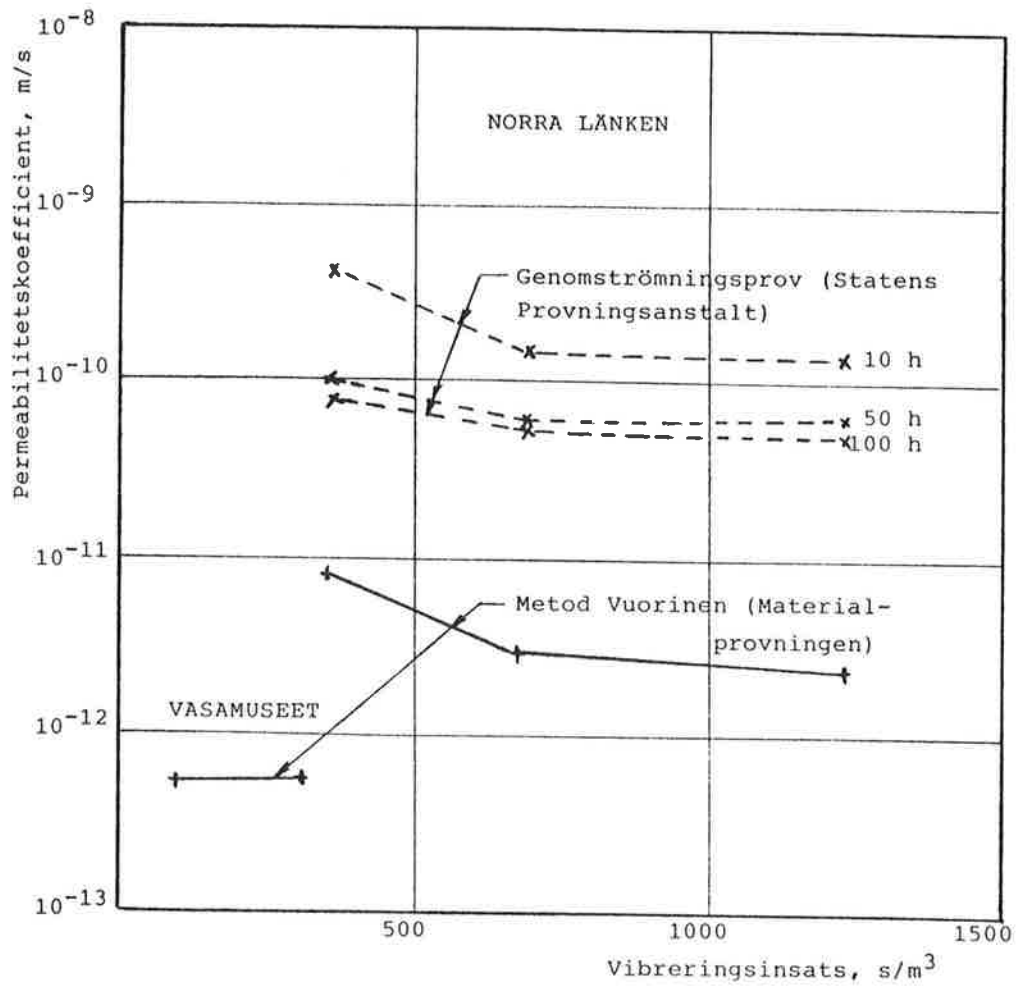
Figur 11. Stödmur vid Norra Länken. Konstruktion vid vilken huvudförsöket utfördes.



Figur 12. Samband mellan tryckhållfasthet respektive spräckhållfasthet och vibreringsinsats.

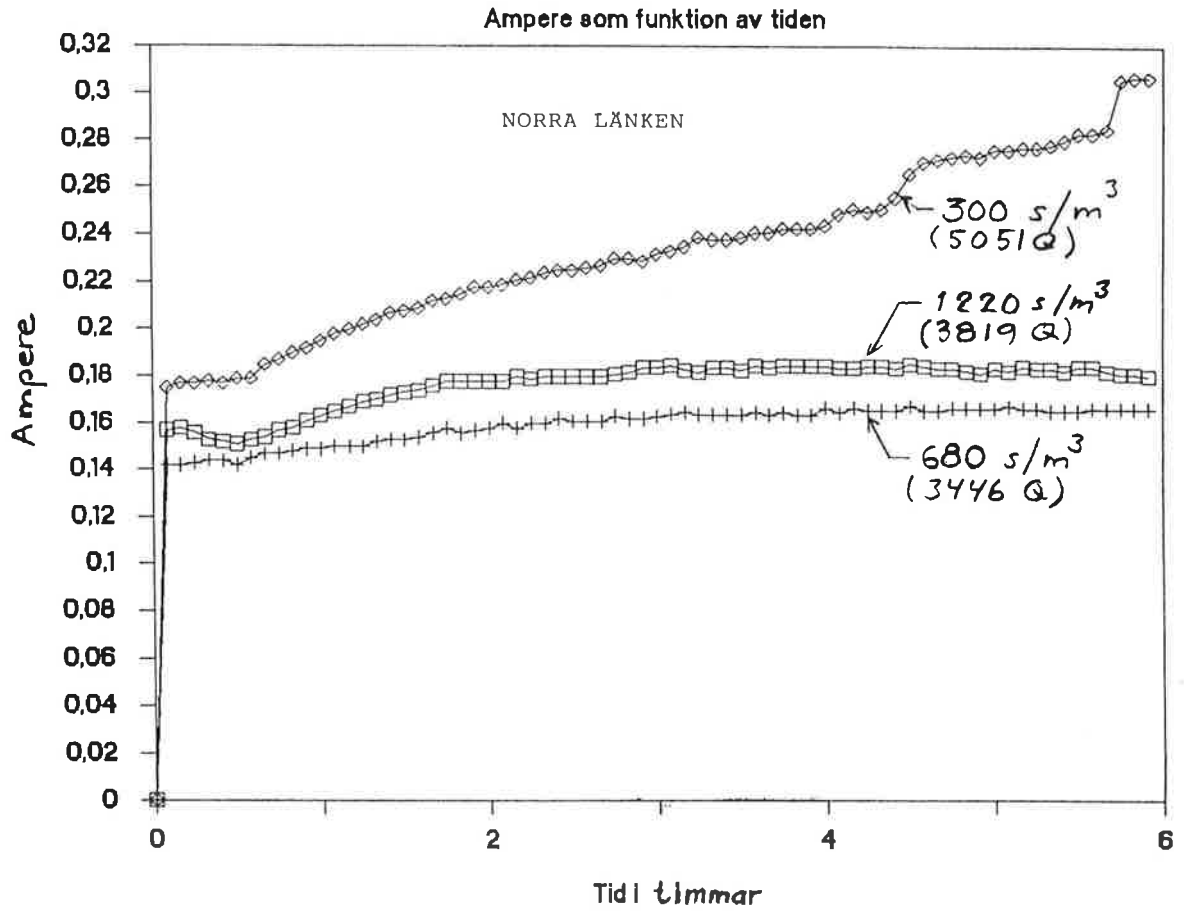


Figur 13. Samband mellan densitetsvärden och vibreringsinsats

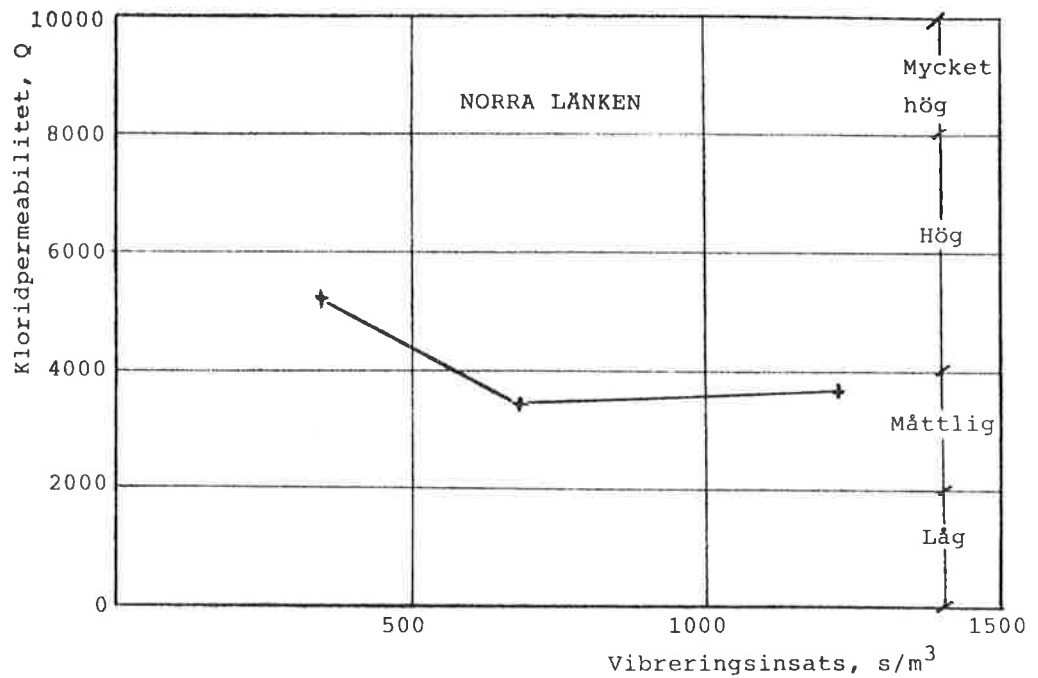


Figur 14. Samband mellan vattentäthet uttryckt som permeabilitetskoefficient och vibreringsinsats.

Kloridpermeabilitet AASHTO T277-831



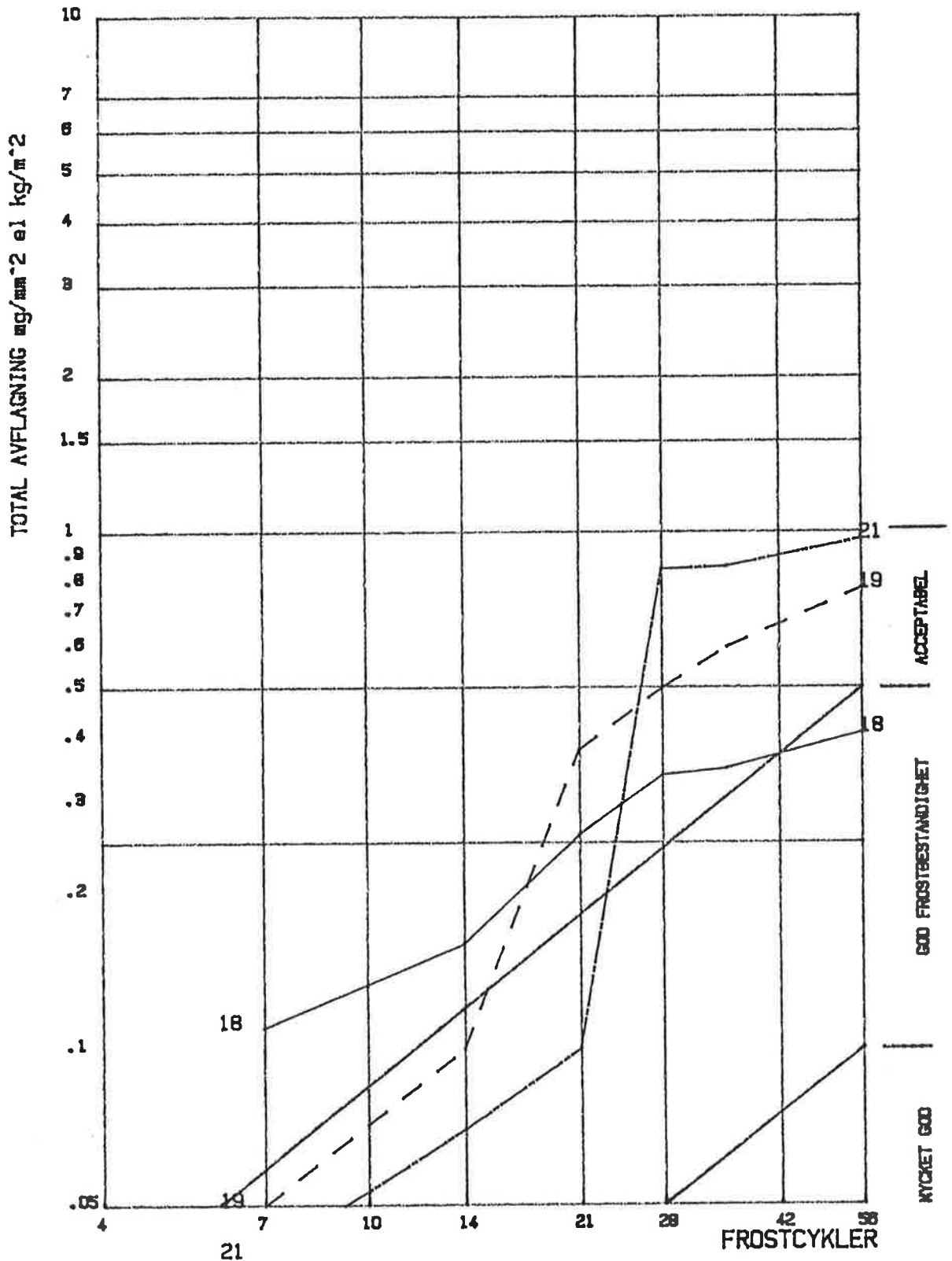
Figur 15. Bestämningar av kloridpermeabilitet.



Figur 16. Samband mellan kloridpermeabilitet och vibreringsinsats.

FRYSTEST SS 137244
FORFARANDE
VAG V. NORRA LÄNKEN

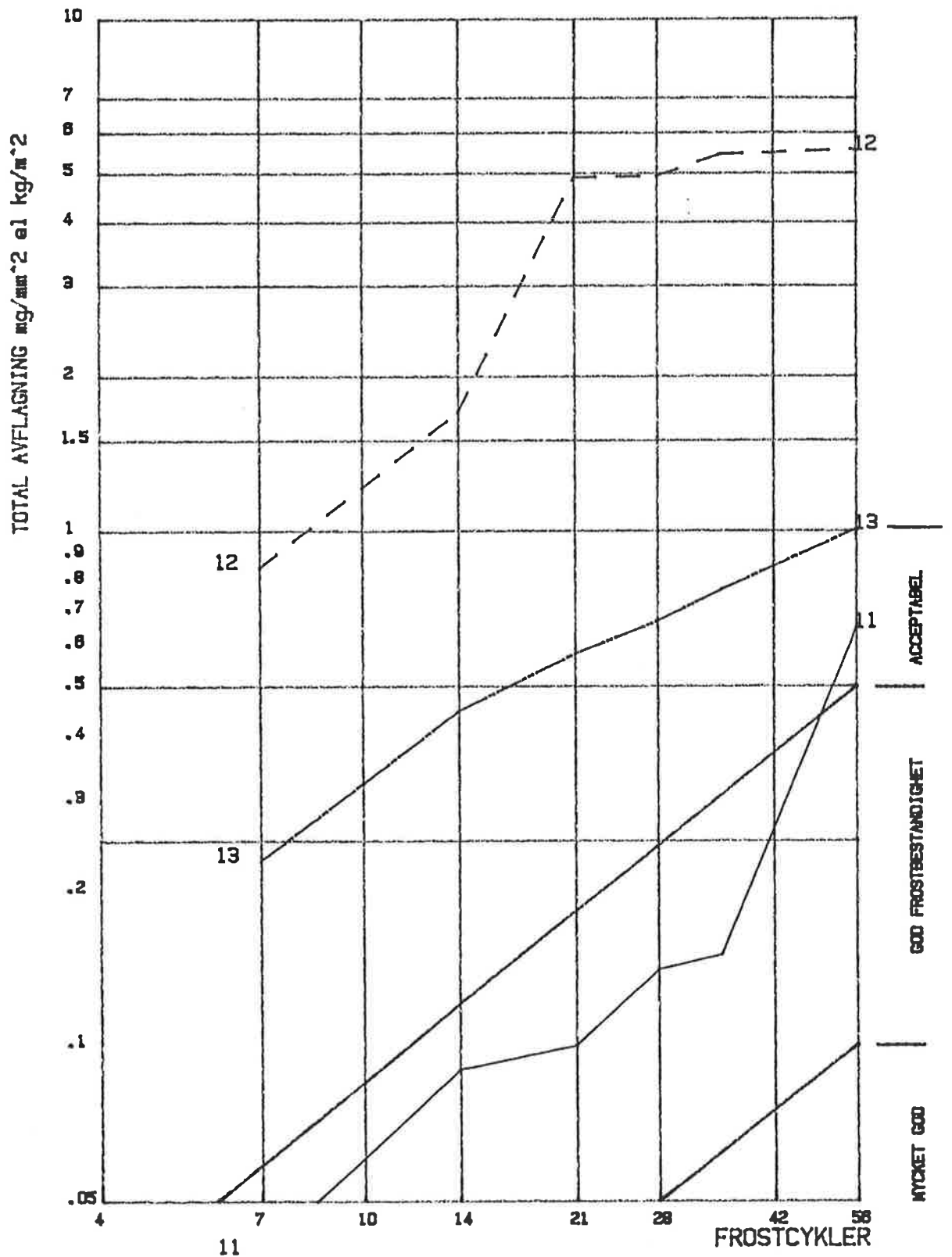
DIAGRAM: 1
PROV NR: 300/18 19 2
ARB NR: 3432
891211



Figur 17. Resultat av frystest. Vibreringsinsats 350 s/m³

FRYSTEST SS 137244
FORFARANDE
VAG V. NORRA LÄNKEN

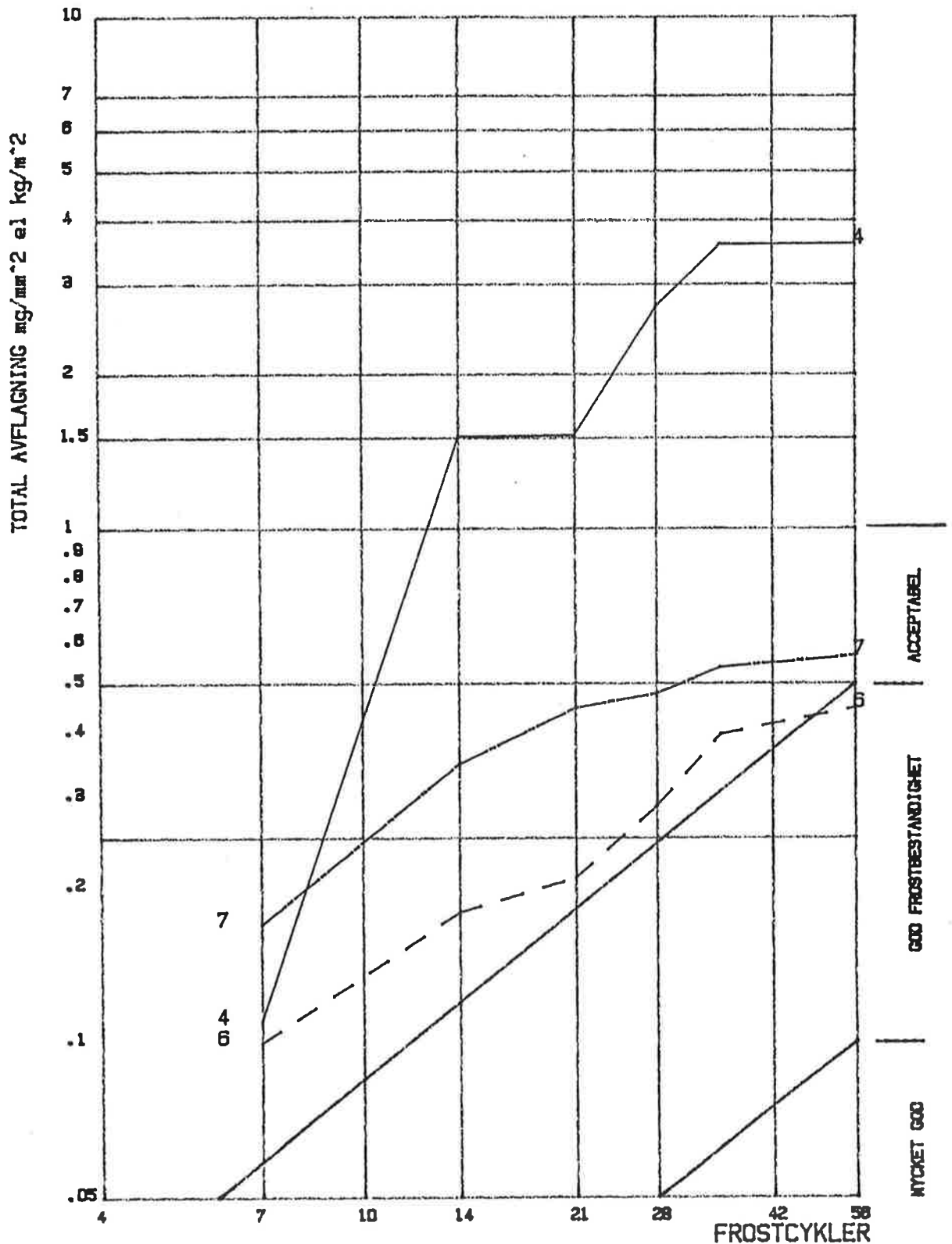
DIAGRAM: 2
PROV NR: 600/11 12 1:
ARB NR: 3432
891211



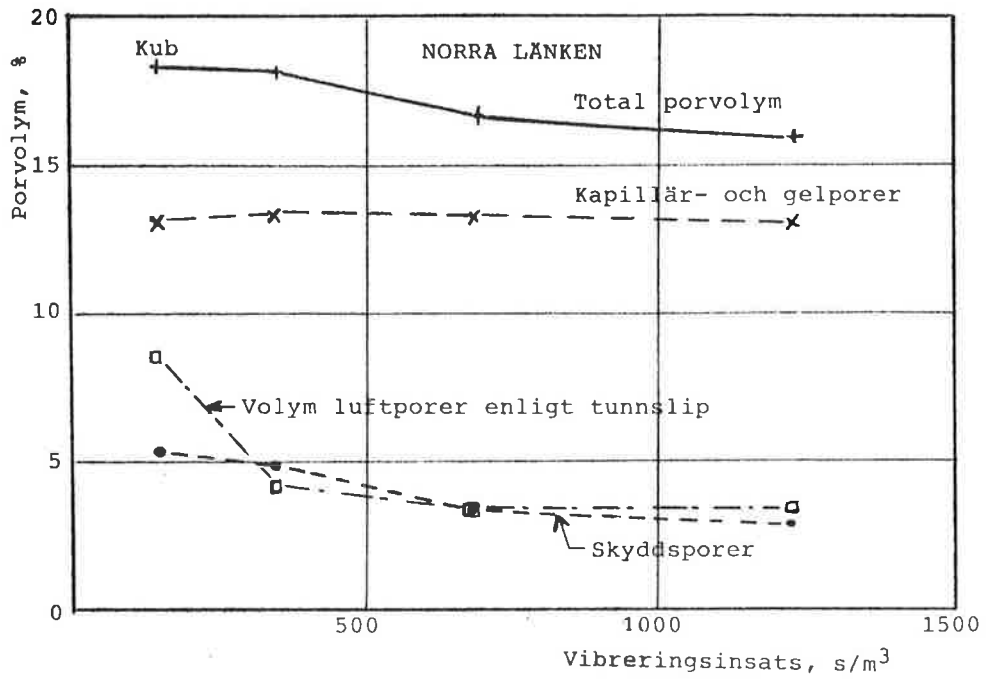
Figur 18. Resultat av frystest. Vibreringsinsats 680 s/m³

FRYSTEST SS 137244
FORFARANDE
VAG VERKEN NORRA LANKEN

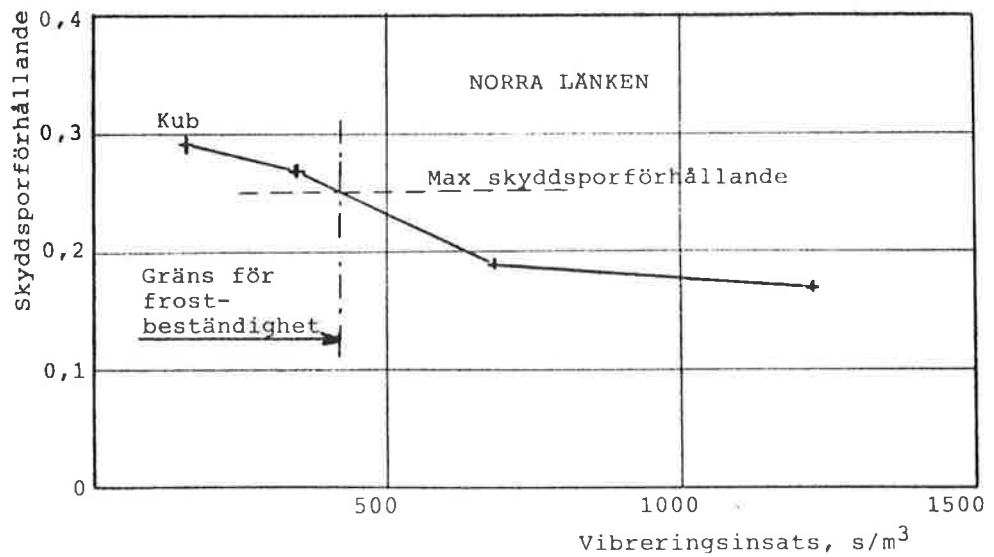
DIAGRAM: 3
PROV NR: 1000/4 6 7
ARB NR: 3432
891211



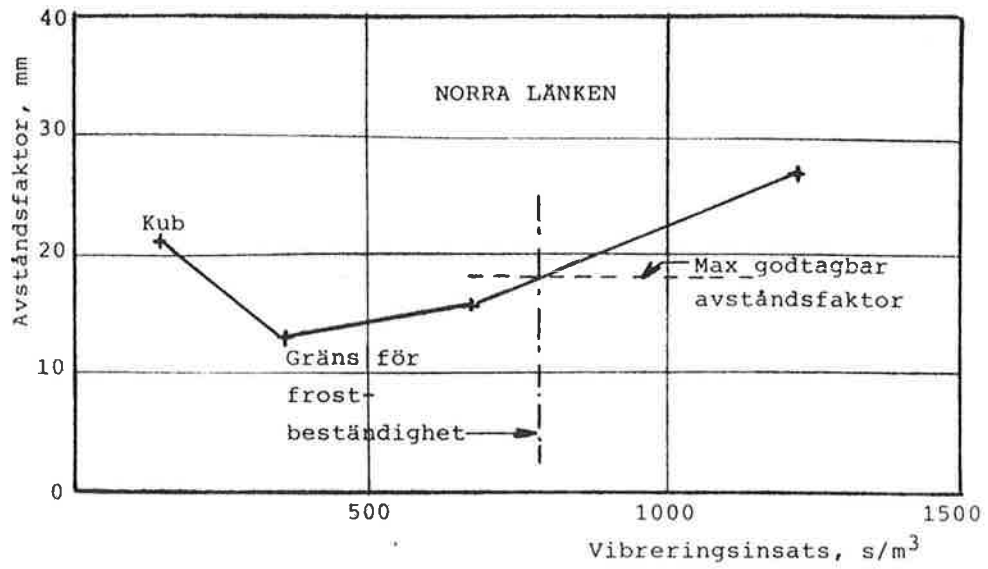
Figur 19. Resultat av frystest. Vibreringsinsats 1220 s/m^3



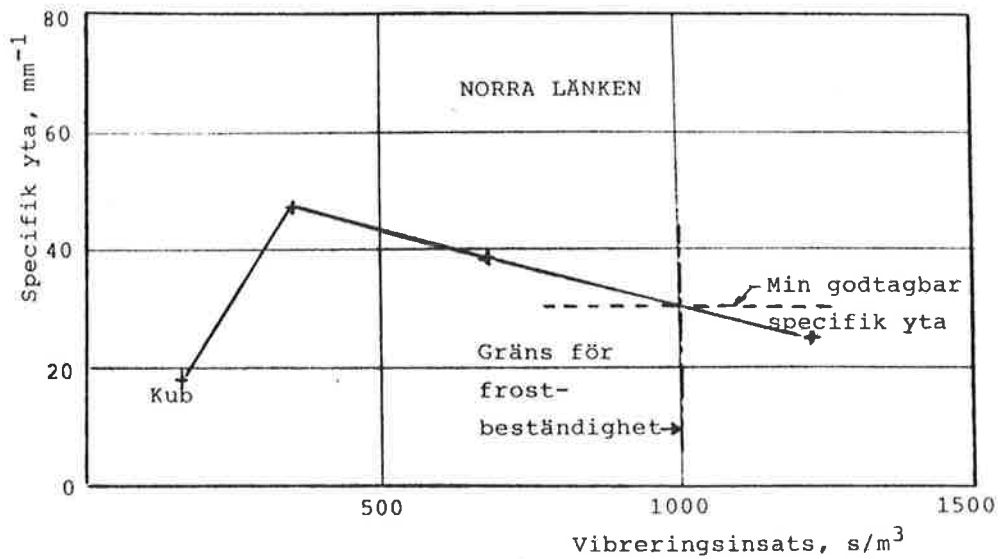
Figur 20. Samband mellan porvolym och vibreringsinsatser.



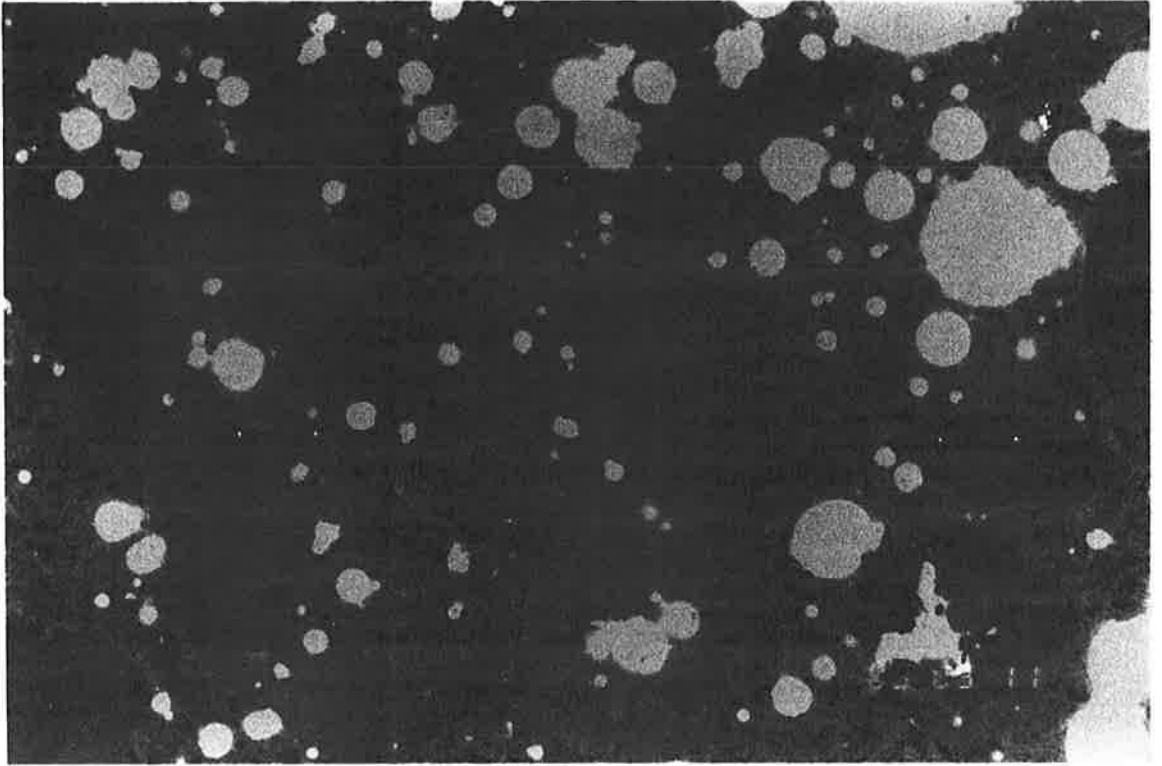
Figur 21. Samband mellan skyddsporförhållande och vibreringsinsats.



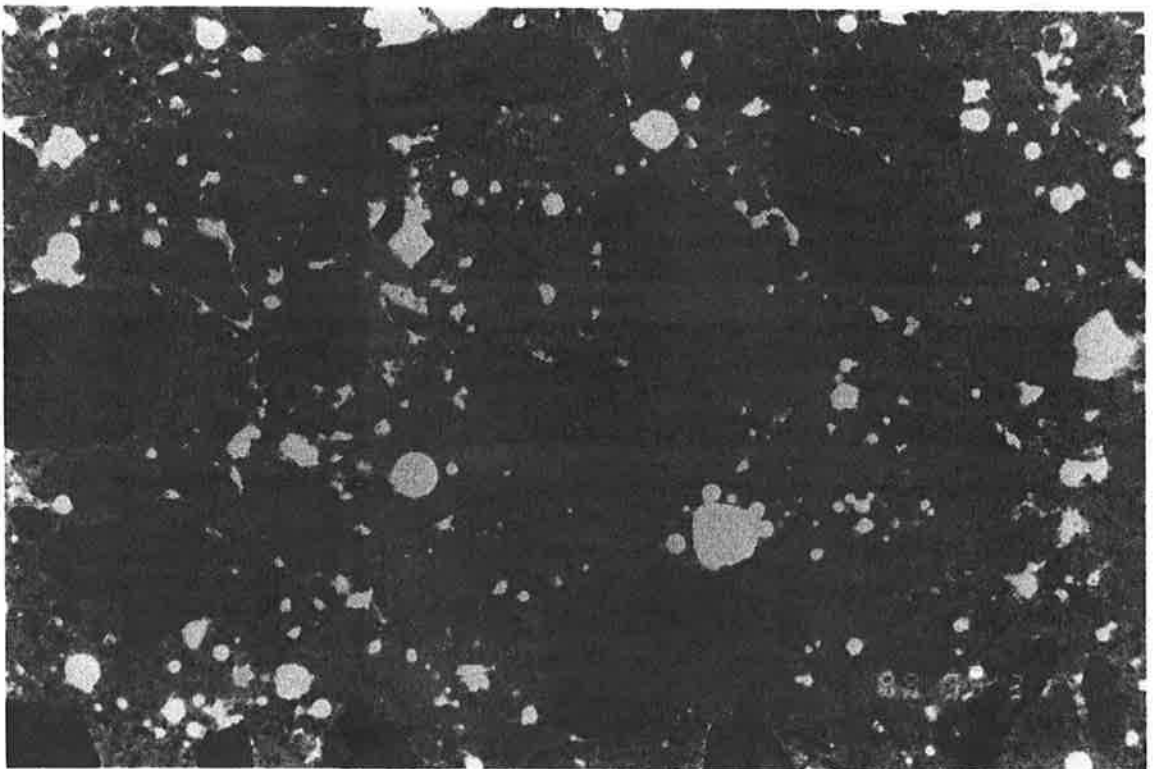
Figur 22. Samband mellan avståndsfaktor och vibreringsinsats.



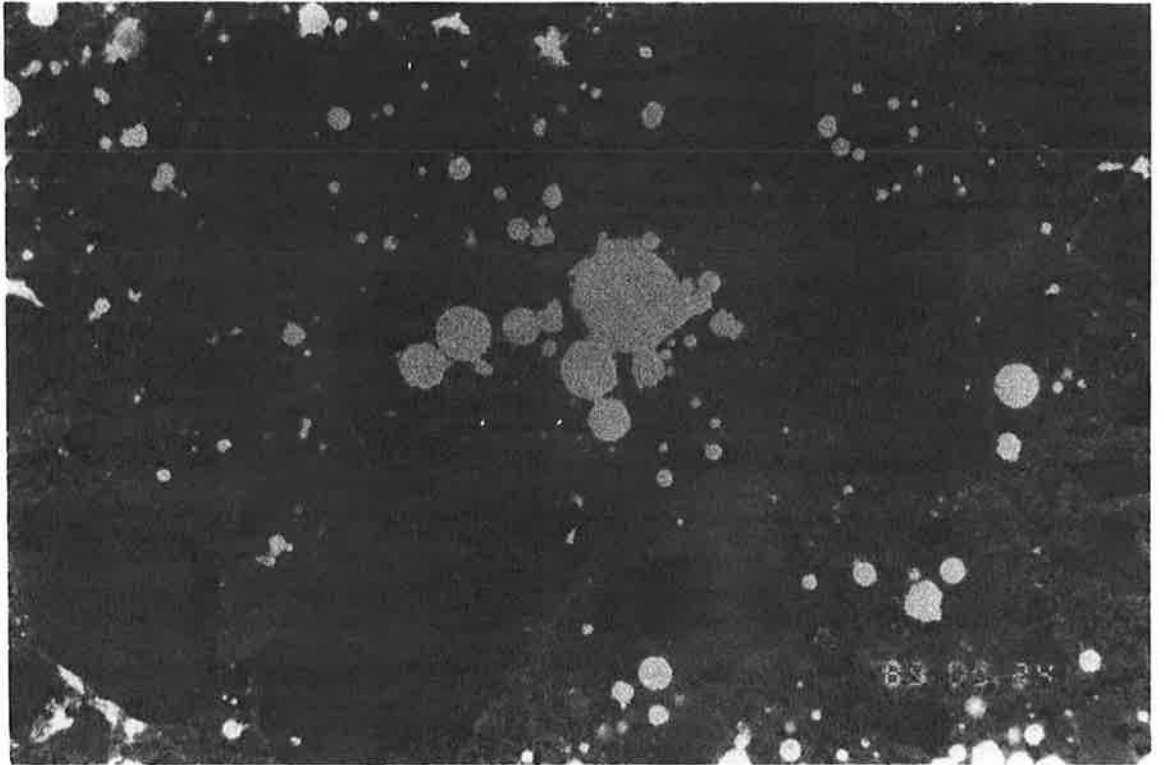
Figur 23. Samband mellan specifik yta och vibreringsinsats.



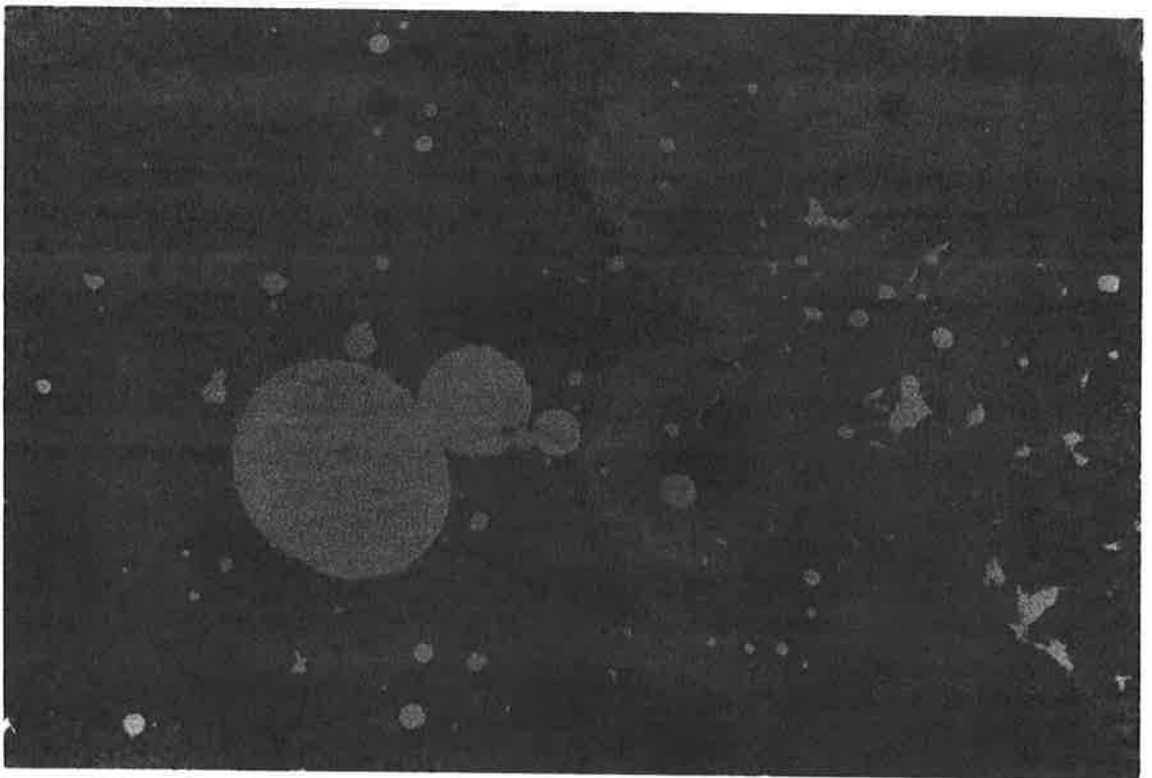
Figur 24 a. Foto av tunnslip Norra Länken. Provkub.



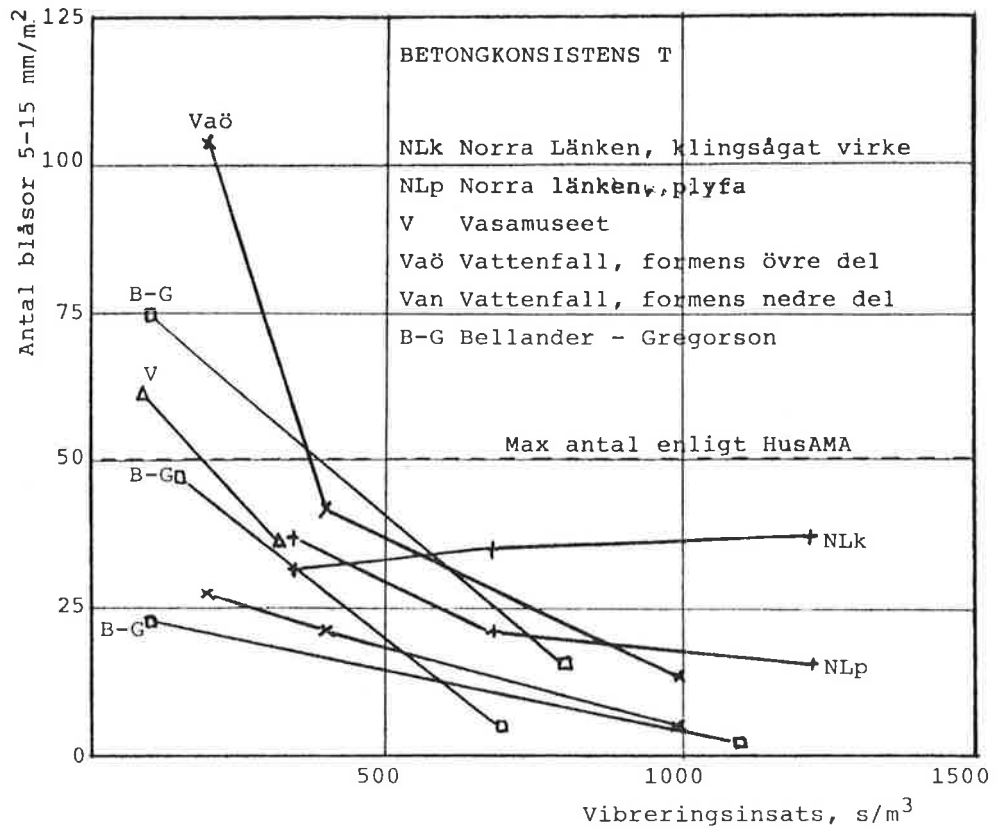
Figur 24 b. Foto av tunnslip Norra Länken. Provcylinder. Vibreringsinsats 350 s/m^3 .



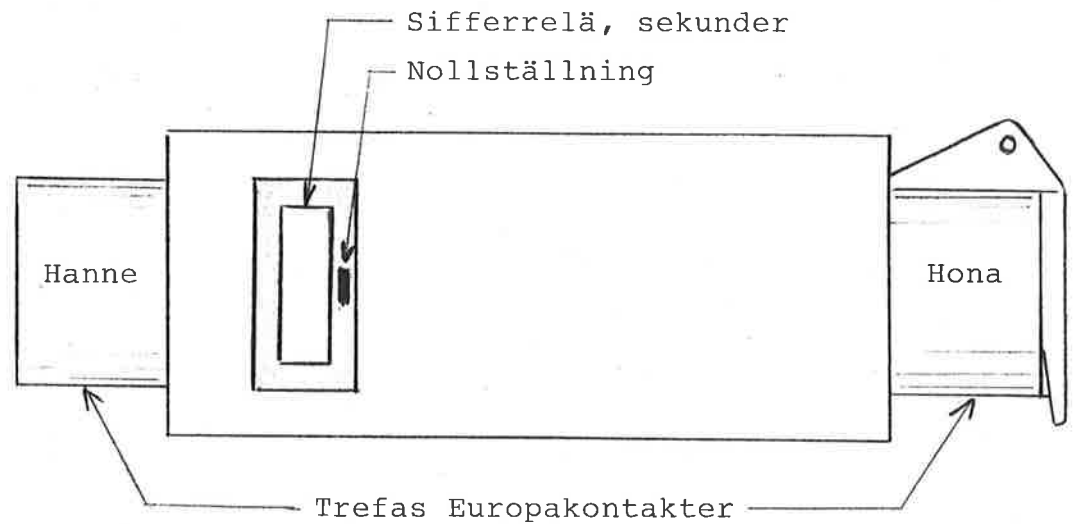
Figur 24 c. Foto av tunnslip Norra Länken. Prov-cylinder. Vibreringsinsats 680 s/m^3 .



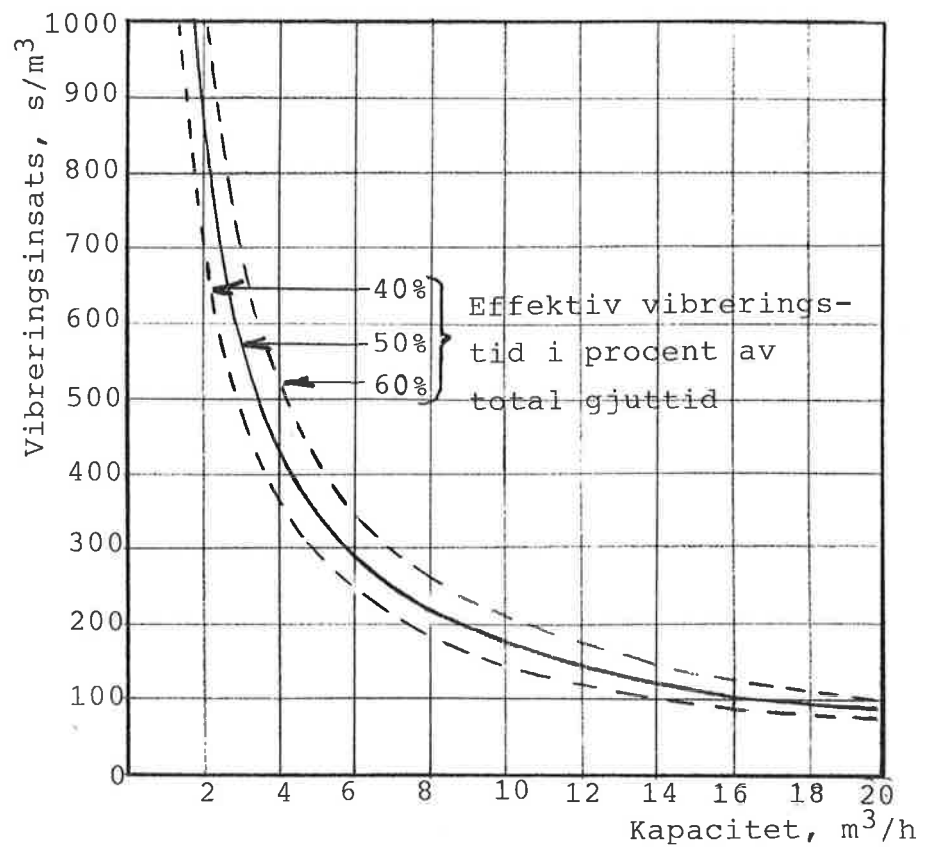
Figur 24 d. Foto av tunnslip Norra Länken. Prov-cylinder. Vibreringsinsats 1220 s/m^3 .



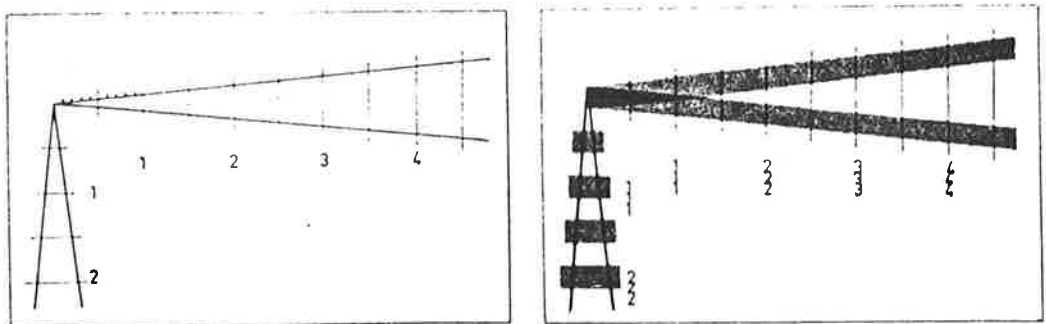
Figur 25. Samband mellan antal ytblåsor 5-15 mm och vibreringsinsats. Trögflytande betong.



Figur 26. Vibrationstidmätare som kopplas in mellan en stavvibrator och dess frekvensomformare. Vibratorns sammanlagda gångtid angiven i sekunder registreras på ett sifferrelä.



Figur 27. Samband mellan en stavvibrators arbetskaperitet angiven i m^3/h och vibreringsinsats angiven s/m^3 .



Figur 28. Mätkil för amplitudmätning på t ex en stavvibrator. Amplitud i detta fall 1,25 mm. Bilden till vänster i vila, bilden till höger under vibrering.