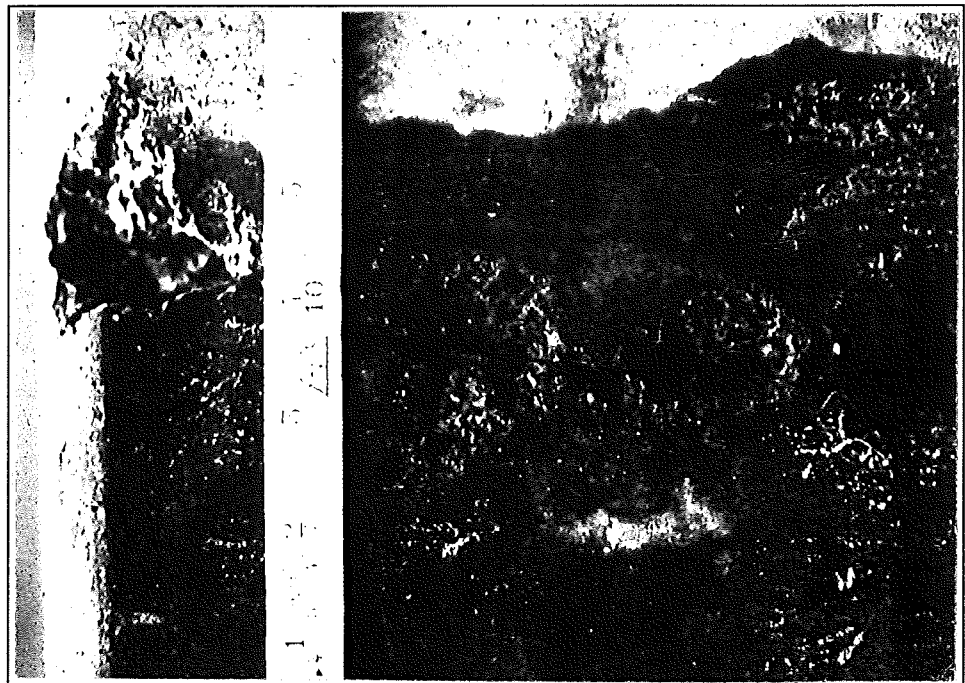


INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Sprickbildning i betongpålar slagna i vatten eller i jordarter med hög permeabilitet



Stig Bernander

rapport 88

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 88

**Sprickbildning i betongpålar slagna i vatten
eller i jordarter med hög permeabilitet**

**Hydraulic fatigue in prefabricated concrete piles
during driving in water or in soils of high permeability**

Stig Bernander

Pris: 145:-

Linköping 1992

ISSN 0347-1047

ISRN IVA/PAL/R--92/88--SE

Förord

Under åren 1978 - 1980 uppmärksammades på ett flertal arbetsplatser i Norden svåra skador på betongpålar under slagning i vatten. Skadornas utseende och omständigheterna kring uppkomsten av desamma förde bl a tankarna till tidigare observerade men icke närmare analyserade skadefall på pålelement av betong. De uppkomna defekterna på pålarna var av sådan natur att allvarlig nedsättning av deras bärighet och beständighet kunde befaras. Då orsakerna till uppkomsten av dessa skador inte kunde anses klarlagda tillsatte styrelsen för IVA:s Pålkommision en utredningsgrupp (nr 83) bestående av:

Övering Stig Bernander (sammankallande)	Skanska Teknik AB, Göteborg (Numera vid CON-GEO AB, Mölndal) Adj professor vid Institutionen för Konstruktions- teknik, Luleå Tekniska Högskola
Övering Lars Hellman	Statens Geotekniska Institut, Linköping (Numera vid Lars Hellman Byggråd AB i Linköping)
Professor Sven Sahlin	Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Byggnadsmekanik (Numera vid Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm)

Arbetsgruppens uppgift var att studera pålar under slagning i vatten och bl a söka identifiera de faktorer som kan föranleda uppkomsten av sådana skador samt att föreslå förebyggande åtgärder.

Utredningsgruppens arbete har omfattat:

- 1) Sammanfattande beskrivning av vissa inträffade skadefall och sannolika orsaker till skadornas uppkomst titulerad

"PM angående skador på pålar i samband med slagning i vatten eller i jordarter med stor vattengenomsläpplighet". (Stig Bernander, 1980-03-03). [9].

- 2) Fältförsök i samband med slagning av pålar för kajanläggning, Södertälje. (Lars Hellman, LH Byggråd - rapport ej färdigställd).

- 3) Laboratieförsök på Institutionen för Byggnadsstatik, KTH. Försöken har redovisats i en rapport av professor Sven Sahlin 1984, benämnd

"Model Tests on Damage of Concrete Piles Driven in Water". Second International Conference on the Application of Stress-Wave on Piles, pp 118-122. (IVA Commission on Pile Research). [14].

- 4) Fältförsök - slagning av pålar i vatten vid Skanska ABs arbetsplats vid Mölndals Lasarett i augusti 1981. Försöken utfördes genom Pålkommissionens försorg, men har även stöttats ekonomiskt och organisatoriskt av Skanska AB. Preliminär delrapport 1984-01-10. Slutrapport avgiven 1986-10-20 benämnd: "Sprickbildning i pålar slagna i vatten. Fältförsök vid Mölndals lasarett, augusti 1991". (Stig Bernander och Håkan Berndtsson, Skanska Teknik AB). [15].

Föreliggande slutrapport utgör en sammanfattning av mom. 1 och 4 samt av under utredningsarbetet gjorda erfarenheter. Preliminär rapportering har ägt rum inför Pålkommissionens ledamöter vid årsmötena 1981-11-10 och 1986-05-26. Slutlig muntlig avrapportering ägde rum 1986-11-19.

Det är författarens förhoppning att konstruktörer och geotekniker med hjälp av denna rapport redan i samband med grundundersökningar - eller vid provpålning - skall kunna identifiera de pålningssituationer, där potentiell risk för hydraulisk utmattning föreligger.

Göteborg i mars 1992

Stig Bernander

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning, slutsatser och rekommendationer	6
1. Inledning	9
2. Skadefall	10
3. Orsak till skadorna	28
4. Inverkan av geotekniska förhållanden	36
5. Inverkan av betongteknologiska omständigheter	45
6. Inverkan av konstruktiv utformning av pålelement	47
7. Inverkan av slagningsförhållanden	50
8. Referenser	51
Summary	53

Sammanfattning, slutsatser och rekommendationer

Omständigheter som samverkar till hydraulisk utmattning i pålar

Skador på grund av hydraulisk utmattning eller 'vattensprängning' av betongpålar har samband med följande faktorer:

- * Närvaro av fritt vatten eller grundvatten i jord med hög permeabilitet.
- * Omväxlande stora tryck- och dragspänningar i pålen under slagning, vilket medför utmattning av betongmaterialet. Utmattningsmekanismerna i betong förstärks genom insugning och utpressning av vatten under stort tryck i förekommande spricksystem.
- * Förekomst av genomgående sprickor, anslutande tvärsprickor och mikrosprickor.
- * Sprickviddens variation med hänsyn till i betongen initiiellt förekommande egen-spänningar av temperatur, krympning och volymändringar av hydratation. Sprickor med mot ytskikten avtagande vidd är speciellt ofördelaktiga. Ogynnsam variation hos sprickvidden ökar med tilltagande dimensioner hos pålens tvärsnitt.
- * Betongens tryck- och draghållfasthet jämte andra mekaniska egenskaper hos betongen i pålelementet.
- * Pålens konstruktiva utformning, speciellt m h t armeringens storlek och fördelning över påltvärsnittet. Bygeldelning.
- * Geotekniska förhållanden.
- * Slagningsbetingelser.

Stora tryck- och dragspänningar uppkommer företrädesvis vid hård slagning av långa pålar i relativt fasta leriga eller siltiga friktionsjordarter, varvid situationen kännetecknas av att mantelmotståndet (vanligen på grund av porvattenundertryck) är stort samtidigt som spetsmotståndet är litet eller måttligt. Typiskt för dessa tillstånd är att pålskalens fjädring är stor i förhållande till dess kvarstående sjunkning. (figur 36). Tendenser till uppträdande av stora dragkrafter kan diagnosticeras och övervakas med hjälp av modern stötvågsmätningsteknik.

Till de mest verksamma åtgärderna för att förebygga vattensprängningsskador hör - utöver användande av höghållfast betong - lämpligt anordnande av armeringen i pålens tvärsnitt. Såväl teoretiska överväganden, iakttagelser under utredningsarbets gång som de på arbetsplatsen vid Mölndals lasarett genomförda fältförsöken, visar klart att ökad

och bättre fördelad armering i påltvärnsnittet verksamt minskar risken för uppkomst av skador på grund av hydraulisk utmattning eller vattensprängning. Lämplig fördelning av längsarmeringen inverkar nämligen gynnsamt på dragsprickornas vidd, sprickviddens variation och på kraftöverföringen i dessa sprickor.

Andra lämpliga åtgärder för att undvika den aktuella typen av skador är all sådan modifiering av slagningsbetingelserna, som leder till lägre spänningar under slagningen och till effektivare neddrivning av pålarna, t ex större hejarvikt och mindre fallhöjd.

Erfarenheterna från broarna över Alssundet, Sannsundet, Piteälven, Ekolsund med flera visar vidare att gängse längsgående minsta armeringsmängd enligt Statens Planverks normer (= 1,2%) icke var tillräcklig under rådande svåra slagningsförhållanden, i synnerhet om armeringen ej anordnades på lämpligaste sätt. Vid Alssundsbron och bron över Sannsundet utgjorde armeringen 2% respektive 2,4% av betongtvärnsnittets yta och vid Piteälven icke mindre än 2,7%, dvs avsevärt mer än som föreskrevs av Statens Planverk i SBN 1975:8. Ändock inträffade skadorna. Vid Alssundsbron kunde skadorna undvikas genom bl a ändring av armeringens anordning.

De inträffade skadefallen indikerar också att risken för de aktuella skadorna under slagning i vatten ökar med tilltagande påldimensioner. Detta står i överensstämmelse med de i detta arbete redovisade mekanismerna vid 'vattensprängning'.

Man kan härav dra den i och för sig självklara slutsatsen att pålelement av betong måste dimensioneras för de krafter som verkligen uppkommer vid slagningen av pålarna och då speciellt med hänsyn till utmattning. Konsekvensen är emellertid den att förtillverkade standardpålar ej kan användas generellt. Vid slagning i vatten under ogynnsamma geotekniska betingelser måste dimensioneringen av pålarmeringen ske efter delvis andra grunder än för normenliga standardpålar, varvid de i detta arbete framförda synpunkterna kan tjäna som ledning. Modern stötvågsmätningsteknik tillhandahåller erfarenhetsunderlag och goda möjligheter att bedöma påkänningarna i pålmaterialet under slagningen.

Det är författarens förhoppning att konstruktörer och geotekniker med hjälp av denna rapport redan i samband med grundundersökningar - eller vid provpålning - skall kunna identifiera de pålningsituationer, där potentiell risk för hydraulisk utmattning föreligger. Det är också en förhoppning att, om dylika risker bedömes vara för handen, den intresserade läsaren skall kunna vidtaga förebyggande åtgärder med ledning av i rapporten redovisade resultat och givna rekommendationer, varav några i korthet kan sammanfattas enligt nedan:

Rekommendationer

Slagning

- * Utför provpålning med stötvågsmätning (PDA) för kontroll av slagdon samt tryck- och dragpåkänningar i pålen.

- * Reducera stötvågens intensitet och förläng dess varaktighet t ex genom reduktion av fallhöjden och ökning av hejarvikten, lämpliga dynmellanlägg etc.
- * Minska antalet slag vid neddrivning av påle (Effektiva slagdon, ökning av hejarvikt etc).

Utförande av pålelement

- * Använd betong med hög slaghållfasthet (lågt vattencementtal, högvärdig ballast med god vidhäftning vis à vis cementpasta m m).
- * Tillse att härdningsbetingelserna för betongen är gynnsamma.
- * Öka längsarmeringen med ledning av uppmätta dragkrafter enligt stötvågsmätningar. Klena stångdimensioner eftersträvas.
- * Fördela armeringen i möjligaste mån jämnt över sektionen. I grövre pålar bör en del av längsarmeringen förläggas centralt i tvärsnittet.
- * Håll bygelavståndet litet. Endast spiralbyglar eller slutna rektangulära byglar bör användas.

1. Inledning

I slutet av 1970-talet och början av 1980-talet inträffade vid ett flertal arbetsplatser i Norden svåra skador på förtillverkade pålar i samband med slagning i vatten. Trots att enstaka tidigare fall av liknande skador rapporterats (Hellers & Sahlin 1971, [2]) framstod det som uppenbart att orsakerna till uppkomsten av de nyckfullt uppträdande skadorna inte kunde anses helt klarlagda. Ty, även om skadorna otvetydigt var förknippade med slagning i vatten visade erfarenheten att pålning i vatten normalt kan genomföras utan att problem uppstår.

Vidare hade tidigare studier fokuserats på utmattning i pålmaterialet under inverkan av växlande tryck- och dragspänningar i atmosfärisk miljö. [2]. Enligt författarens mening var det emellertid här fråga om ett mycket större problemkomplex, där det fanns starka skäl att misstänka att vattenmiljön, konstruktiv utformning av pålelementen, egenspanningar i betongen, slagningsbetingelser och geotekniska förhållanden sammantaget kunde förorsaka de aktuella skadorna. [9].

En faktor, som bl a tillmätts stor betydelse i detta arbete, är egenspanningarnas inverkan på sprickviddens variation (sprickans form) hos genomgående tvärsprickor. Med hänsyn till skadornas uppkomstsätt kom de att rubriceras som skador av 'vattensprängning'. En annan mer adekvat benämning kan vara 'hydraulisk utmattning' (hydraulic fatigue), eftersom skadorna uppstår och utvecklas vid upprepade på- och avlastning under slagning av pålar i en akvatisk miljö.

Rapporten, som även omfattar resultat från utförda fältförsök (1984) och erfarenheter från inträffade skadefall efter år 1980, bekräftar i allt väsentligt de teorier och slutsatser som redovisades i ovannämnda "PM angående skador på pålar i samband med slagning i vatten...." från 1980-03-03 [9].

2. Skadefall

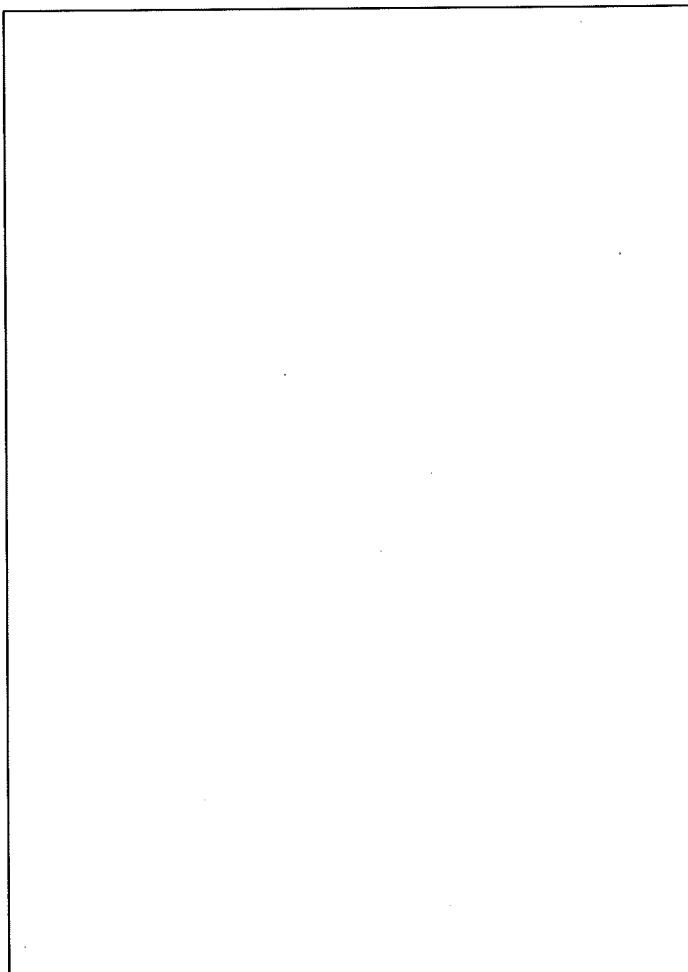
I samband med den publicitet som Pålkommissionens utredningsarbete (grupp 83) kom att tilldra sig, anmälades ett antal icke närmare utredda skadefall som förekommit i samband med tidigare pålningsarbeten och vilka sannolikt hade vattensprängning som orsak. Under utredningstiden har ytterligare ett antal liknande skadefall rapporterats - något som tyder på att problemet är av allmänna natur än vad som inledningsvis antogs vara fallet. På grund av brist på data kommer dessa senare fall dock ej att redovisas här, med undantag för de nedan relaterade intressanta fallen från Sandared och från stöd 3 vid bron över Ekolsundsviken.

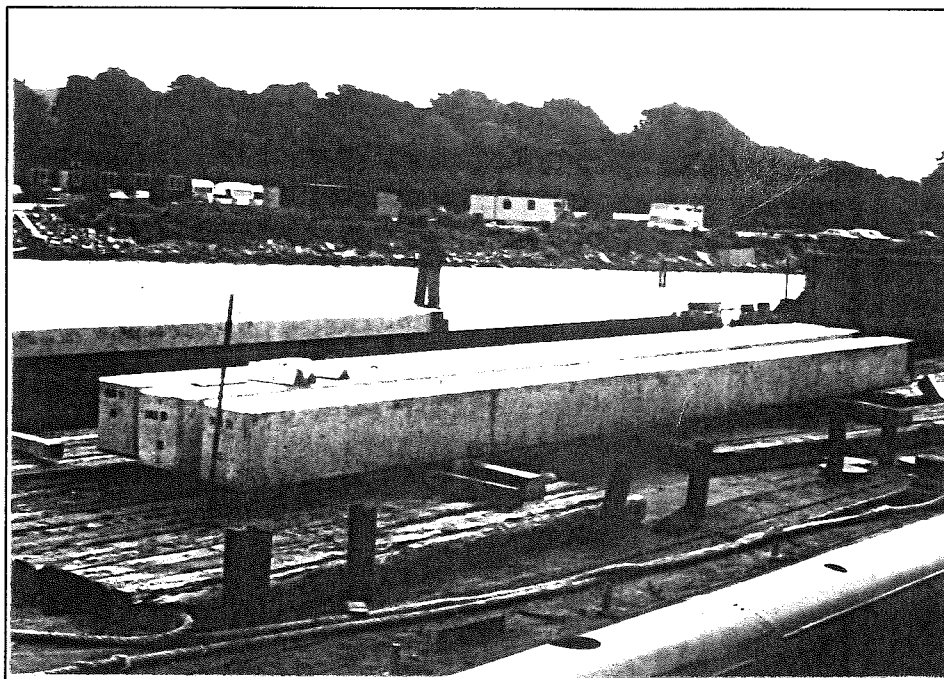
2.1 *Bro över Alssundet, Danmark (1979)*

I samband med slagning av pålar (40 x 50 cm²) för provbelastning vid bron över Alssundet (entreprenör Skanska AB - dåvarande AB Skånska Cementgjuteriet) hade författaren tillfälle att studera skador av denna art, **figur 1 - 5**. Pålelementen var tillverkade av en dansk underleverantör enligt av beställaren tillhandahållna konstruktionsritningar.

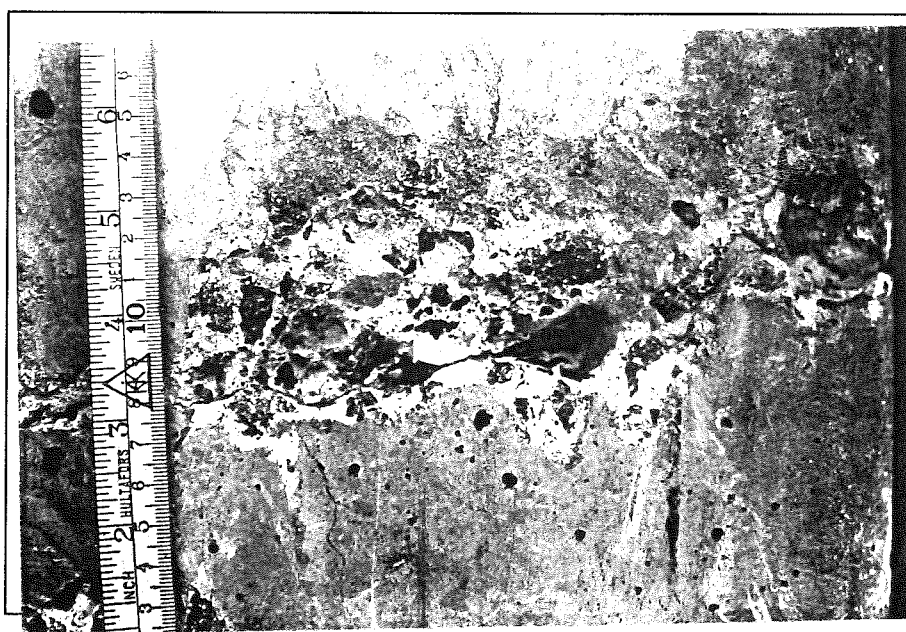
Den längsgående armeringen utgjordes av 8 $\varnothing 25$ Ks 500. Vattendjupet var 10 - 14 m. Undergrunden utgjordes av mäktiga lager av moränlera med betydande inslag av grövre moräner av siltig, sandig eller grusig karaktär. Pålarna slogs till med ledning av provpålningen förutbestämda djup (ca 16 m) i moränlagren. Pålarna drevs med dieselhejare (DELMAG 55) och stagades i vattnet med kraftiga stålrör $\varnothing 800$. Stötvågsmätningar visade att stora dragkrafter uppkom i pålarna under slagningen. Skadebilden varierade mellan mindre skador enligt **figur 3** och svåra skador ledande till brott i pålarna. Jfr **figur 5**.

Figur 1. Pålningsarrangemang vid Alssundsbron. Dieselhejare DELMAG 55.

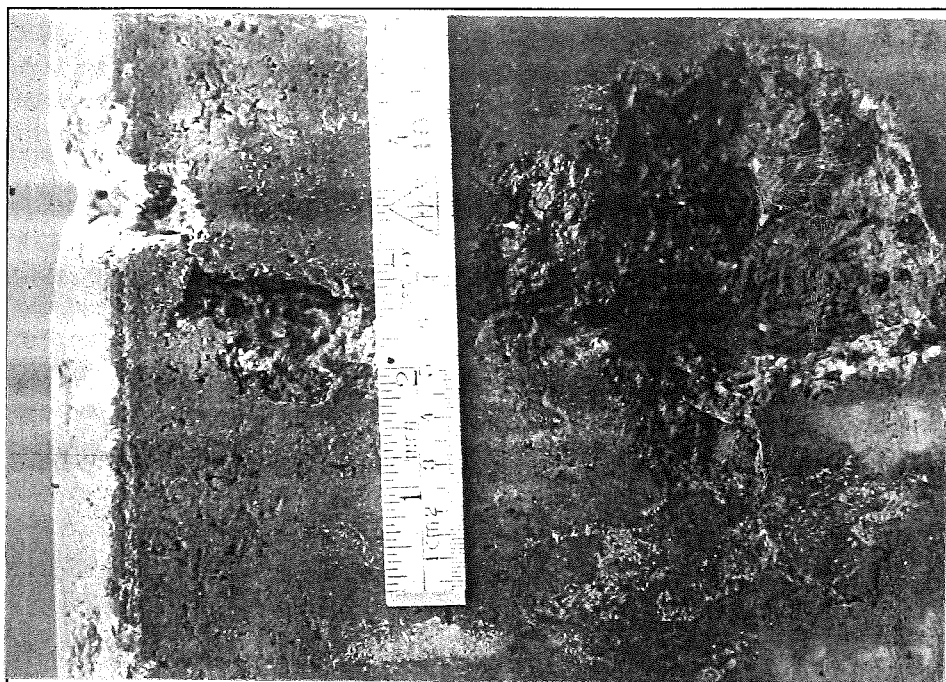




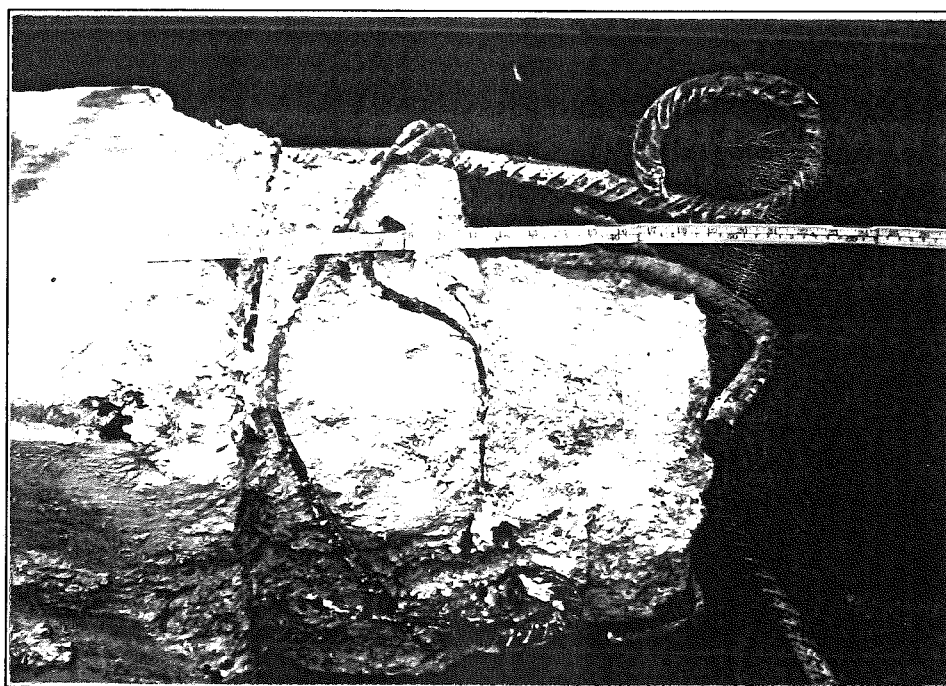
Figur 2. Betongpålar 40 x 50 cm², K50. Armering enligt figur 47 a.



Figur 3. Typiska vattensprängningsskador.

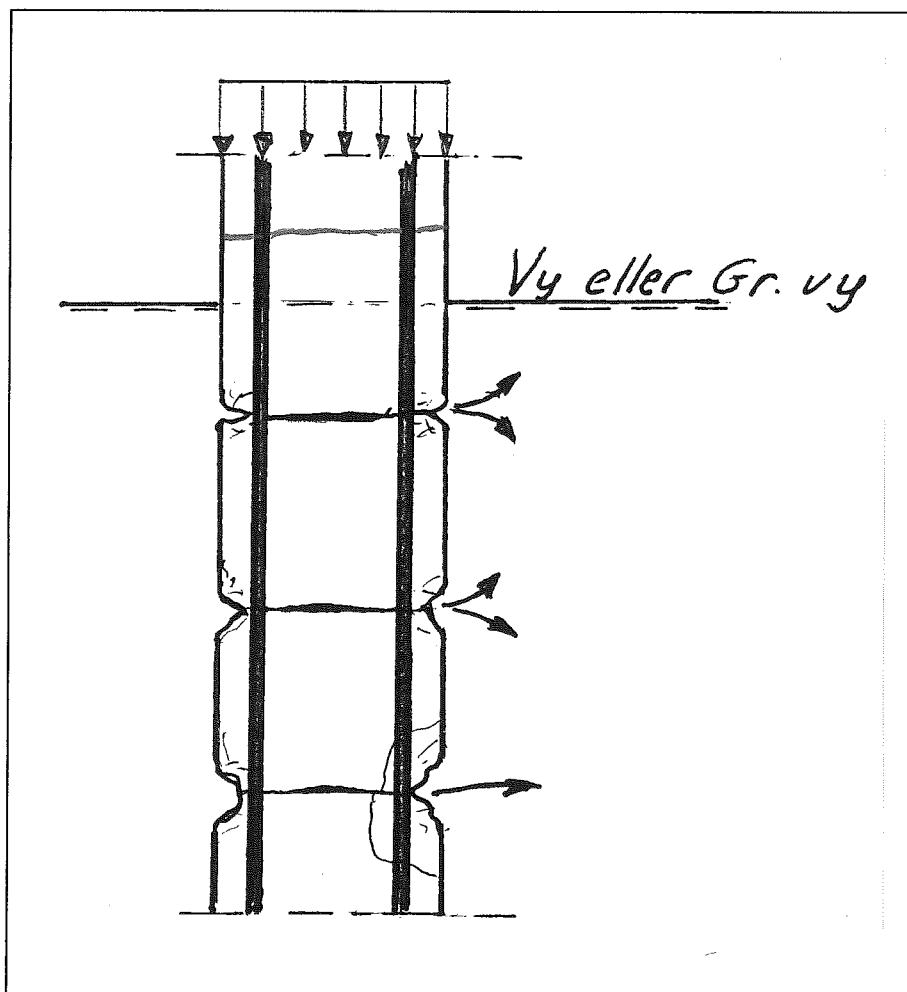


Figur 4. Typisk skada. Observera den flacka brottytan tydande på att stora tryckpåkänningar förekommit i ytskikten.



Figur 5. I vissa fall ledde vattensprängningen till brott i pålen.

De tänkbara orsakerna till skadorna analyserades omgående under perioden mellan provpålningen och produktionspålningen, med påföljd att påldimensionering, påtillverkning och slagningsförhållanden modifierades. Vid det fortsatta egentliga påslag-ningsarbetet erhöles därför inga skador, utom vid de tillfällen då pålar ur den ursprung-liga pålproduktionen kom till användning. Av detta framgår att skadornas uppkomst åtminstone delvis kan hänföras till defekter i pålmaterialet och/eller pålens konstruktiva utformning och att det icke således enbart var slagningsbetingelserna och de geoteknis-ka förhållandena som hade betydelse för skadornas uppkomst.



Figur 6. Hydraulisk utmattning (vattensprängning) av påle. (Principfigur).

Vid Alssundsbron vidtogs således ett antal åtgärder i syfte att undvika skador under det egentliga pålningsarbetet, nämligen:

I betongteknologiskt avseende:

- a) utbyte av ballastmaterial. (Krossmaterial av Rönnegranit utbyttes mot makadam från Helsingborg. Rönnegranit är en bergart huvudsakligen bestående av kvarts och glimmer, dvs halten av fältspat är liten).

- b) ändring av ballastgraderingen genom ökning av stenhalten och stenmaterialalets finhetsmodul.
- c) sänkning av vattencementtalet med hjälp av flyttillsatsmedel.
- d) ändring av härdningsbetingelserna för de nygjutna pålelementen.

I konstruktivt avseende:

- a) tätare bygghelning - förbättring av bygglarnas förankring så att desamma effektivt fungerade som slutna bygglar.
- b) arean hos längsgående armering ökades med 25% (4 ϕ 16 extra).
- c) längsarmeringen fördelades jämnare över påltvärsnittet.

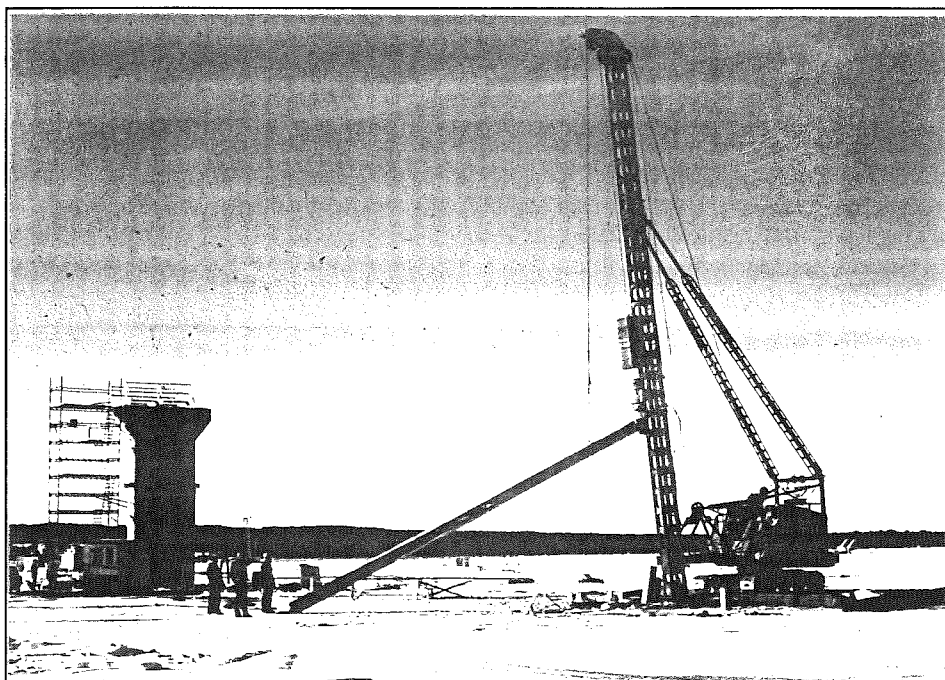
I slagningshänseende:

- a) inlägg av extra lager av dynträ mellan knekt och påle och mellan dyna och knekt.
- b) sänkning av fallhöjden genom reduktion av bränsleinsprutningen i dieselhejaren (DELMAG 55).

Den sammanlagda effekten av ovannämnda åtgärder medförde att skador helt kunde undvikas under det fortsatta pålningsarbetet. Vilken eller vilka åtgärder som mest bidragit till detta goda resultat är emellertid icke närmare klarlagt. Som ovan nämnts erhöles dock skador vid de enstaka tillfällen då pålelement ur den ursprungliga pålproduktionen användes - något som i och för sig var tillåtet med hänsyn till att dessa pålelement formellt uppfyllde beställarens kravspecifikation. Man torde härav kunna dra slutsatsen att de konstruktiva och betongtekniska åtgärderna med avseende på pålelementens utformning här spelat en viktig roll och att ändringen av slagningsbetingelserna inte var utslagsgivande.

2.2 Bro över Sannsdet, Jämtlands län, (1979 - 1981)

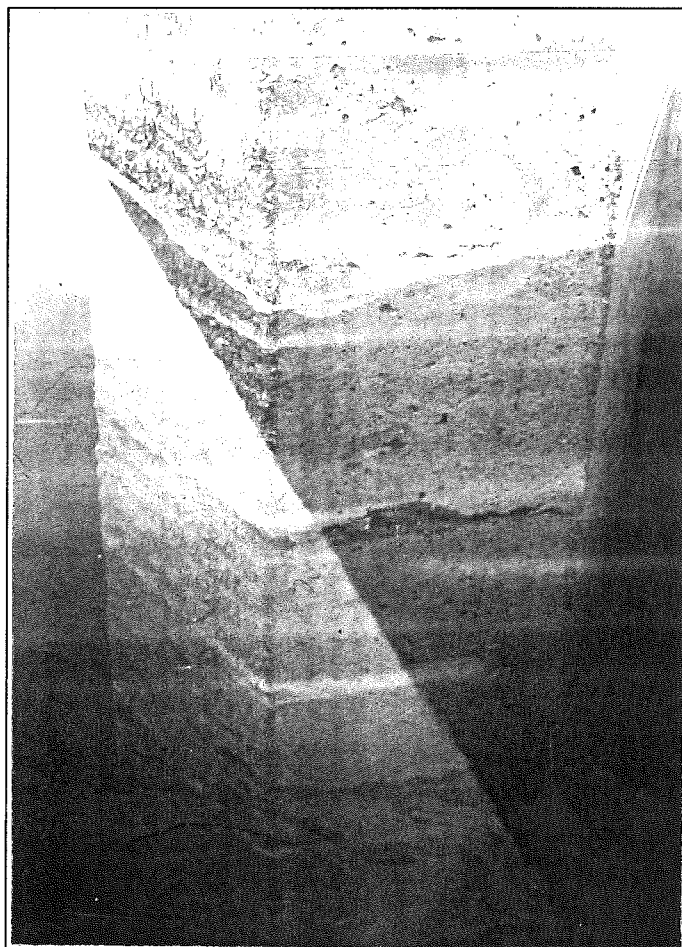
Vid slagning av pålarna för brostöden till bron inträffade skador på pålarnas täckskikt i form av kilformade fördjupningar runt pålarna. Pålarna var i detta fall av typen Hercules 1200 (K50), d v s med hexagonalt tvärsnitt och tvärmåttet 37,5 cm, **figur 7 - 10**. Pålarna slogs vintertid från isen med 4-tons lin-fallhejare. Längsarmeringen utgjordes från början av 12 ϕ 16 Ks 600 (24 cm², = 2%) men utökades under den andra pålslagningssäsongen (vintern 1980 - 1981) till 16 ϕ 16 (32 cm²), dock utan att detta ändrade vare sig skadefrekvens eller skadornas art annat än i kvantitativt avseende, d v s djup och bredd hos de kilformiga dikena i pålarnas täckskikt minskade något. Till skillnad från vad som var fallet vid bron över Alssundet lyckades man ej, trots mycket experi-



Figur 7. Pålarna slogs från isen.

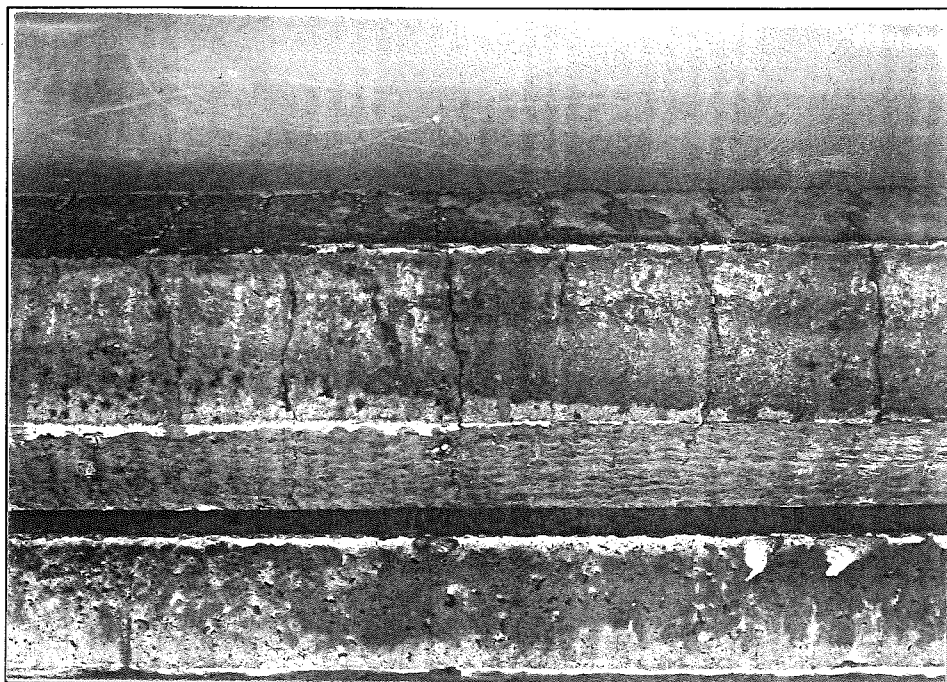
menterande med slagdonen och nämnda ökning av armeringsarean, uppnå en situation då risken för vattensprängningsskador kunde anses vara under kontroll. Bl a användes

den s k tallriksfjäderdynan med ringa framgång.

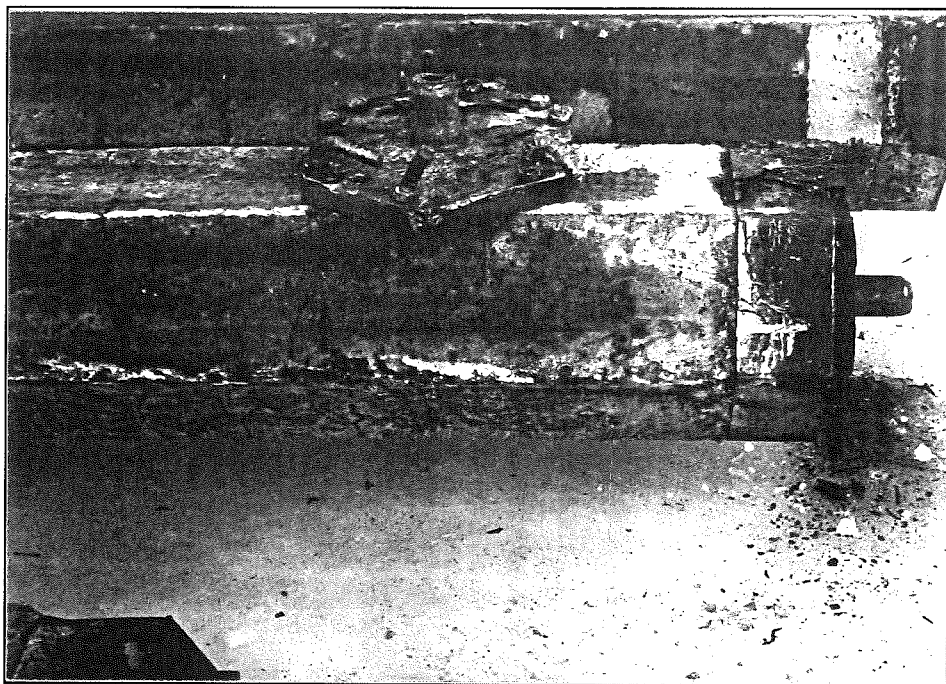


De geotekniska förhållandena - med relevans till uppkomsten av skador på pålarna - kännetecknades av mäktiga siltiga sand- och grusformationer som, då de erbjöd stort friktionsmotstånd under slagningen, inte var tillräckligt hårt lagrade för att ge tryckreflexer från pålspetsen. Vid Sannsundet förelåg således den situation som visat sig vara typisk för uppkomst av stora dragkrafter under pålslagning, nämligen då det totala drivningsmotståndet är stort samtidigt som spetsmotståndet är måttligt eller ringa.

Figur 8. Ovan vattenytan förekom fina dragsprickor i pålen. Under vattenytan utvecklades dessa sprickor till djupa diken i täcksiktet.



Figur 9. Typiska skador på pålar typ Herkules 1200. Bro över Sannsundet.



Figur 10. Skador i närheten pålskarv. Observera att inga sprickor förekommer inom den del av pålen som förstärks av hanbeslagets förankringsstål.

De av Skanska AB för Sannskonsortiet utförda stötvågsmätningarna visade också att stora dragkrafter uppkom i pålarna på grund av dragreflexer från pålspetsen.

Vid Sannsundsbron gjorde författaren den intressanta iakttagelsen att uppdragna pålelement, som erhållit vattensprängningsskador längs hela sin längd, lokalt var oskadade i området närmast skarvbeslagets handel (skarvtyp Herkules) enligt **figur 10**. Detta område kännetecknas av att skarvdonets förankringsstänger dels utgör ett kraftigt tillskott till påltvärsnittets totala armeringsarea, dels att dessa stänger genom sin mer centriska placering medför en jämnare fördelning av armeringen över tvärsnittet. Förhållandet överensstämmer med erfarenheterna från bron över Alssundet och senare erhållna resultat från försöken vid Mölndals lasarett, nämligen att ökad armering och jämnare fördelning av den över påltvärsnittet verksamt bidrar till att reducera risken för uppkomst av vattensprängningsskador och hydraulisk utmattning. Jfr sid 34-35 under kap 3.1 respektive kap 6.

En annan viktig iakttagelse vid Sannsundsbron gällde de brant kilformiga dikena runt pålen, som kännetecknade skadebilden. Dikena var i detta fall ekvidistanta och överensstämde exakt med lägena hos de mycket fina - knappt synbara - dragsprickor, som pålelementet kunde visas vara behäftat med redan innan detsamma - i samband med slagningen - kom under vattenytan, **figur 8**.

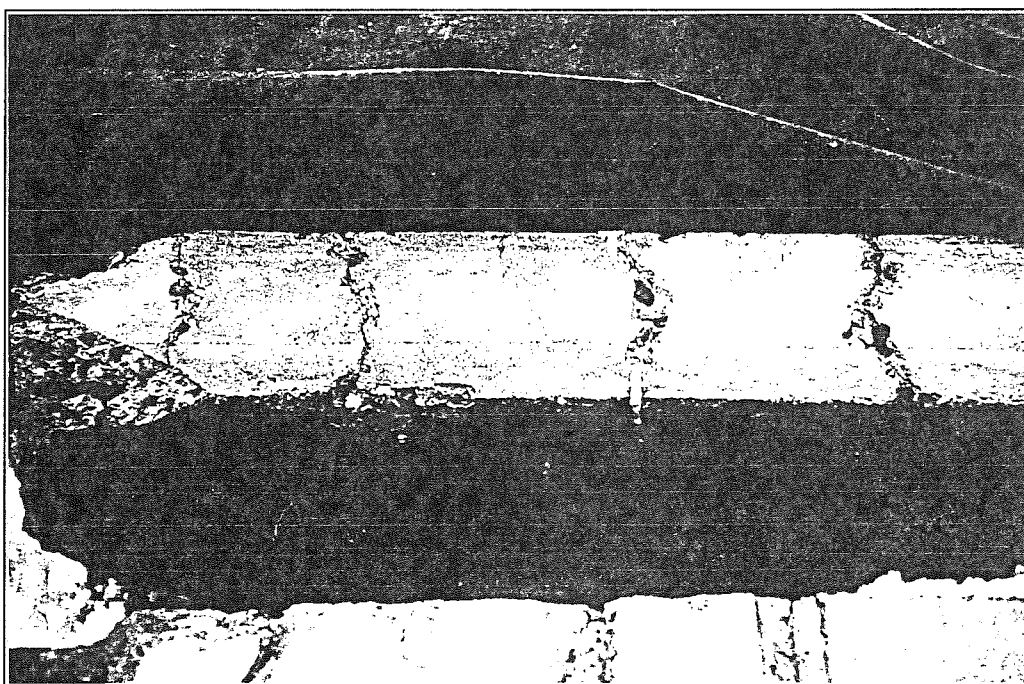
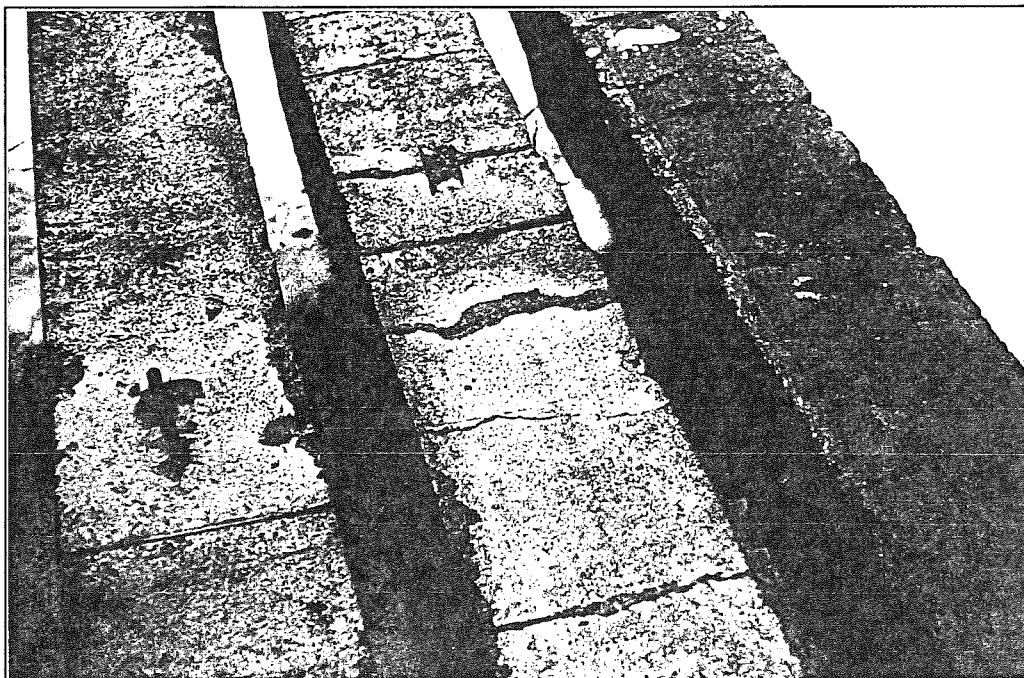
När skadorna först upptäcktes antogs att de kunde ha samband med att böjsprickor eventuellt uppkommit på grund av otillräcklig stagning av pålarna i vattnet under slagningen. Det visade sig emellertid, sedan pålarna stagats med stålbalkar på sin fria längd i vattnet, att denna åtgärd ej hade någon påvisbar effekt på skadefrekvensen. Detta förhållande överensstämde med erfarenheterna från bron över Alssundet där skadorna inträffade trots en mycket effektiv stagning med kraftiga foderrör.

Man kan således bestämt fastslå att böjsprickor på grund av bristande stagning av pålarna icke utgjorde den primära anledningen till skadorna vid broarna över Alssundet respektive Sannsundet.

2.3 *Bro över Piteälven vid Älvsbyn 1979*

Vid pålning för mellanstöden till bron uppstod skador på pålarna i stöd 2 och 3, **figur 11 och 12**. Enligt uppgift slogs pålarna med 4-tons fallhejare och med fallhöjder varierande mellan 20 och 60 cm. Längsarmeringen utgjordes av 4 $\varnothing 25$ Ks 400 (= 2,7%) och bygelarmeringen av spiralbockad kalldragen tråd $\varnothing 5$. Den geotekniska undersökningen visade att marklagren ned till 4 à 5 meters djup under pålavskärningsplanet utgjordes av lera och finkornig friktionsjord. För jordlagren under denna nivå finns ingen dokumentation av jordens sammansättning annat än att den med ledning av hejarsonderingen bedömts som stenig. Hejarsonden har trängt ner till ca 19 meters djup (stöd 2) respektive 25 meters djup (stöd 3), där sonderingen har avbrutits på grund av krökning av sonden.

Även om marken beskrivits som stenig utesluter detta givetvis inte att jorden på samma sätt som vid den steniga moränen vid Mölndals lasarett (se nedan) i huvudsak består av finkornig friktionsjord. (Jfr även Kalixmorän).



Figur 11 - 12. Bro över Piteälven. Skador på pålar 27x27 cm².

Pålplintarnas u k låg i båda stöden på samma nivå. De längsta pålarna mätte ca 25 m. I stöd 2 var 15 pålar längre än 20 m och 3 st var kortare än 15 m. Motsvarande pålantall i stöd 3 var 8 respektive 3 st.

Det finns drag i den allmänna geotekniska situationen vid bron över Piteälven, som liknar de förhållanden som karaktäriserat övriga platser där s k vattensprängningsskador förekommit och då särskilt förhållandena vid Mölndals lasarett enligt nedan. Skadornas utseende vid broarna över Piteälven, Sannundet och Ekolsundsviken samt vid fältförsöken i Mölndal är likartat.

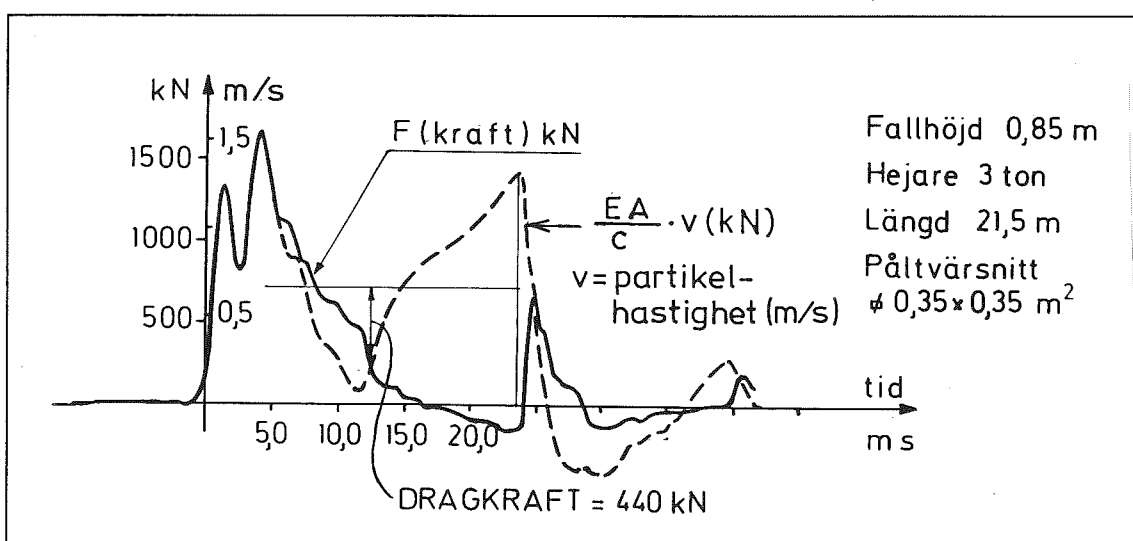
2.4 Fältförsök vid Mölndals lasarett, augusti 1981

Resultatet av dessa försök har redovisats i detalj i [15].

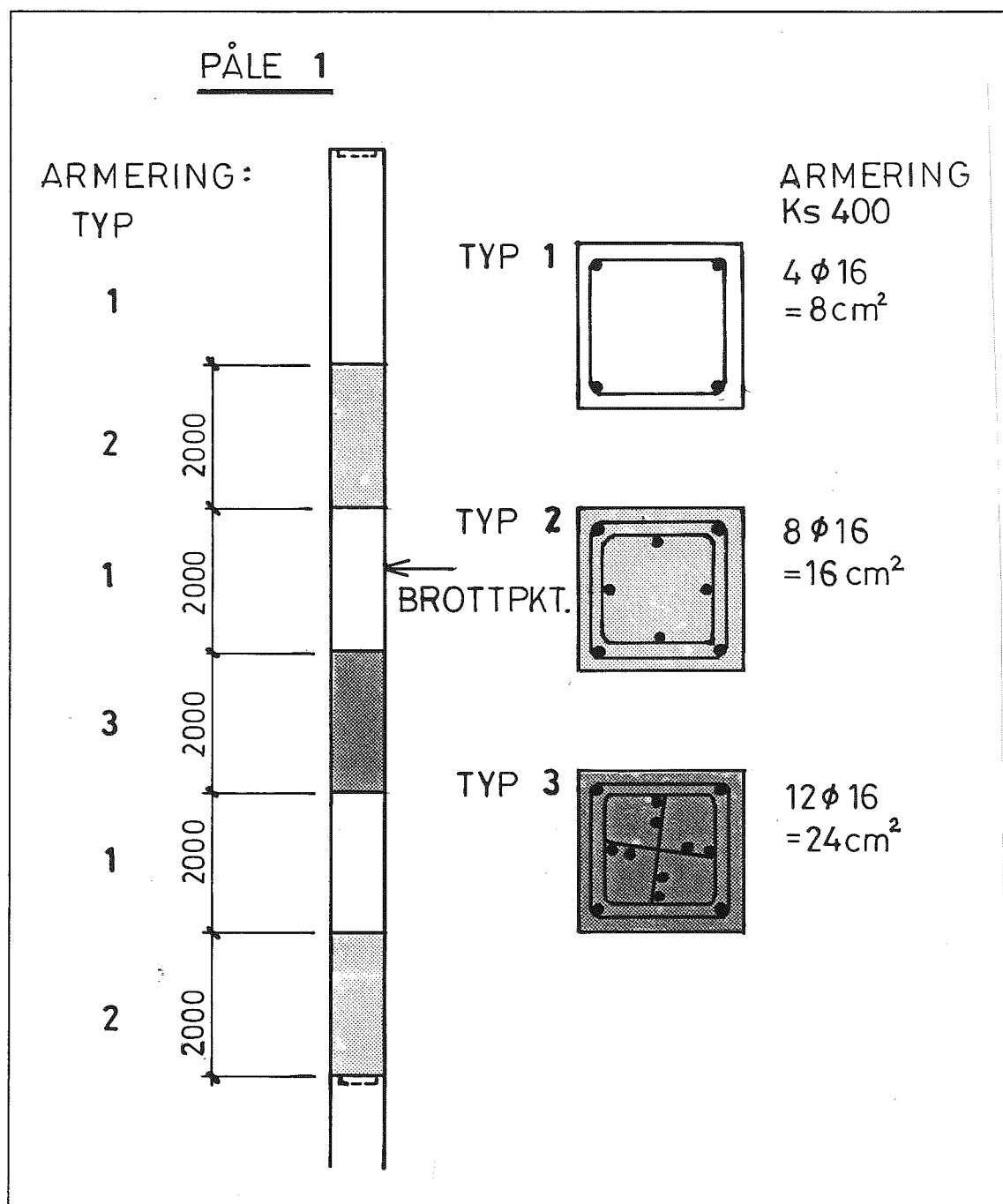
Kortfattad beskrivning

Vid de försök som IVA:s Pålkommission lät utföra vid Mölndals lasarett studerades inverkan av armeringsmängd och armeringens fördelning över påltvärsnittet, eftersom dessa faktorer i [9] postulerats som betydelsefulla i sammanhanget.

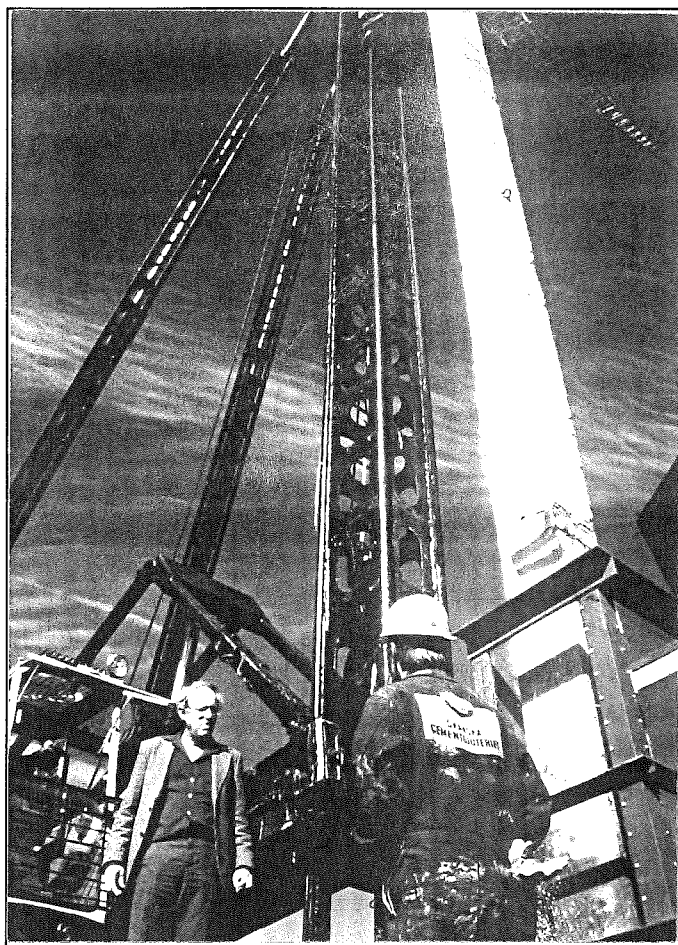
Stötvågsmätningar under tidigare utförda pålningsarbeten hade visat att man vid neddrivning av pålar på denna arbetsplats erhöll mycket stora dragkrafter i pålarna varför den ansågs vara en lämplig försökslokal, jfr figur 13. Vid försöken användes ett antal tidigare för ändamålet tillverkade specialpålar, hos vilka ett och samma pålelement försetts med tre olika typer av armering i 2 meters etapper längs pålen, enligt figur 14.



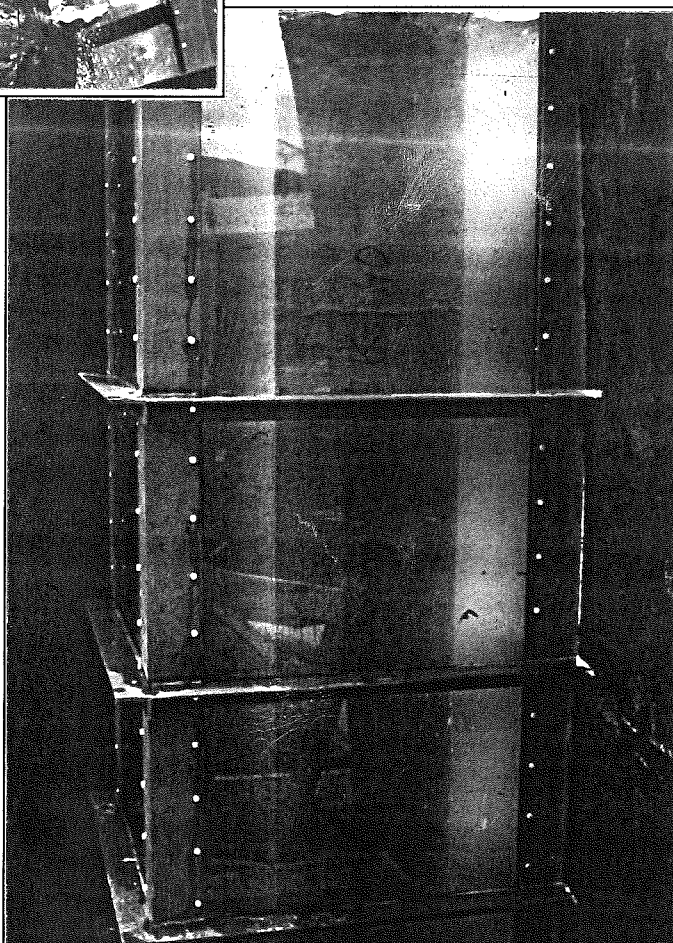
Figur 13. Exempel på resultat av stötvågsmätningar vid slagning av pålar 35 x 35 cm², Mölndals lasarett.



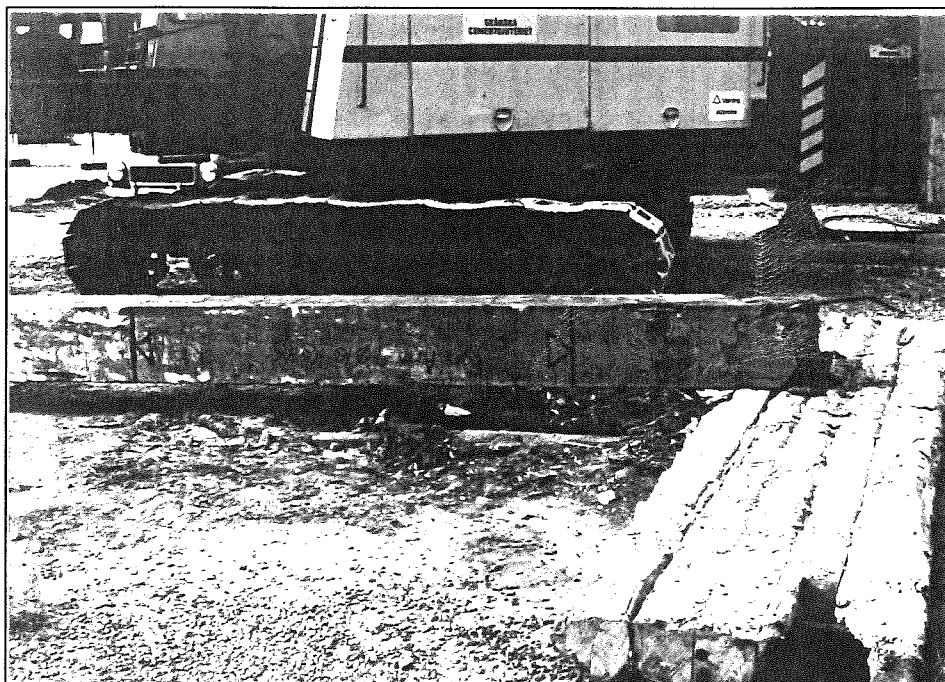
Figur 14. Armering i försökspålar vid Mölndals lasarett. Pålelementen försågs omväxlande med olika armeringstyper i 2 meters längder utmed pålen. Tre olika armeringsarrangemang användes enligt sektionerna i figuren. Betong K50.



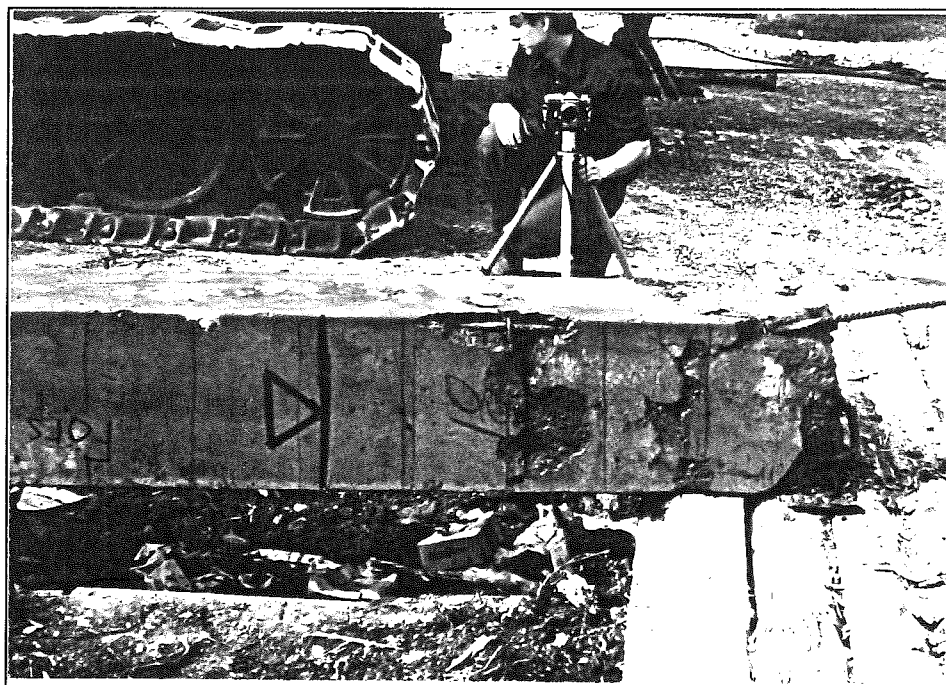
Figur 15. Anordningar vid slagning.



Figur 16. Detalj av vattenbehållare under slagning av påle.



Figur 17. Påle visande olika skadebild vid olika armering i pålen.



Figur 18. Detalj av påle i figur 17.

Armering i skadad del: 4 $\varnothing 16$ (Arm 1) enl figur 14.

Armering i oskadad del: 8 $\varnothing 16$ (Arm 2) enl figur 14.

Vid försöken slogs pålen genom en vattenbehållare med genomskinliga väggar ner i marken. Arrangemanget möjliggjorde okulärt iakttagande och filmning av skadornas uppkomst och utveckling. Vid försöken kunde följande tidigare postulerade omständigheter fastslås:

- * Dragsprickor medförde skador av ifrågavarande slag endast sedan desamma hamnat under vatten.
- * Armeringens mängd och fördelning i påltvärsnittet hade en utslagsgivande inverkan på risken för uppkomst av vattensprängningsskador. Skillnaden i armering enligt typ 1 och 2 (enligt **figur 14**) motsvarade i försöksresultaten differensen mellan helt oskadade pålar och totalt sönderslagna pålar, se **figurerna 17 och 18**.

Pålarna drevs tills dess att brott uppstod. I båda försöken uppstod brottet just där man genom glasväggarna i behållaren i ett tidigare skede kunnat observera den svåraste vattensprängningsskadan. Denna omständighet tyder på att vattensprängning kan vara en primär faktor vid bortslagning av pålar.

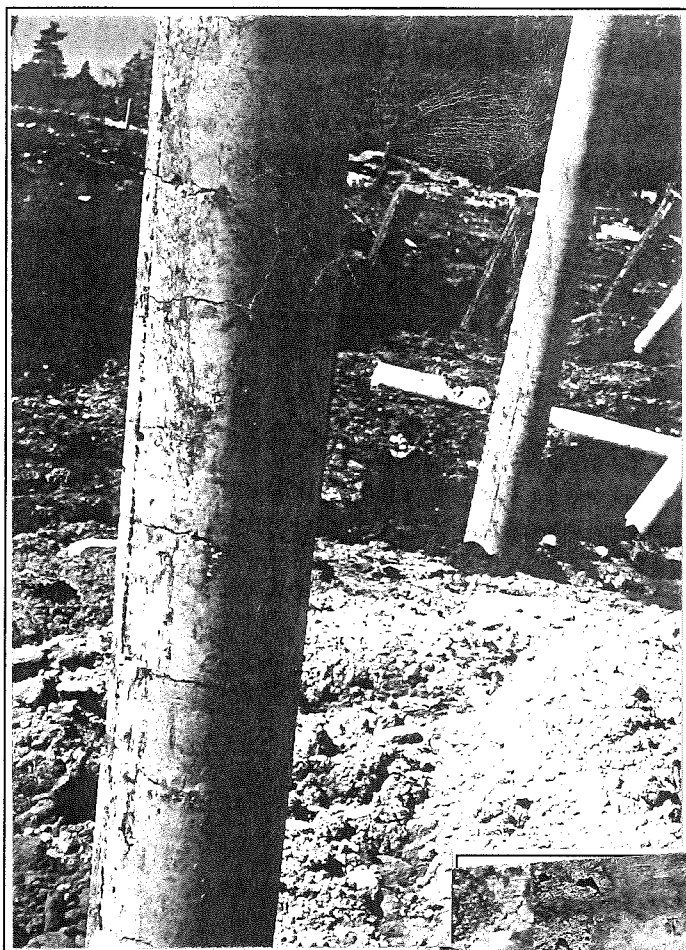
2.5 *Idrottshall i Sandared, 1968*

Vid grundläggning av en idrottshall i Sandared slogs pålarna genom ca 3-5 meters dytorv. Vid schakt i torvlagren inträffade emellertid skred, vilka medförde att vissa av pålarna frilades på den del av sin längd som befann sig i torvjorden. Pålarna, som var runda med diametern 28 cm, företedde de typiska kilformiga diken, som observerats vid slagning i fritt vatten.

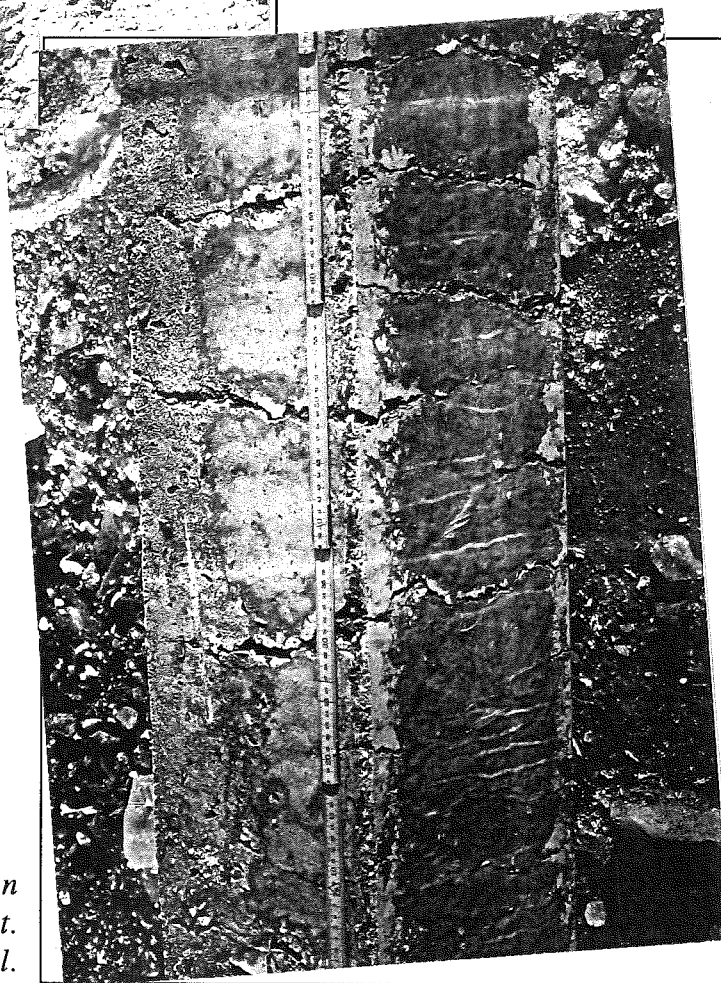
Sandaredsfallet är av speciellt intresse eftersom det är ett dokumenterat fall där vattensprängning ägt rum i starkt vattengenomsläpplig jord. Pålarna var för övrigt förspända, jfr **figur 19**.

2.6 *Bro över Ekolsundsviken, 1986*

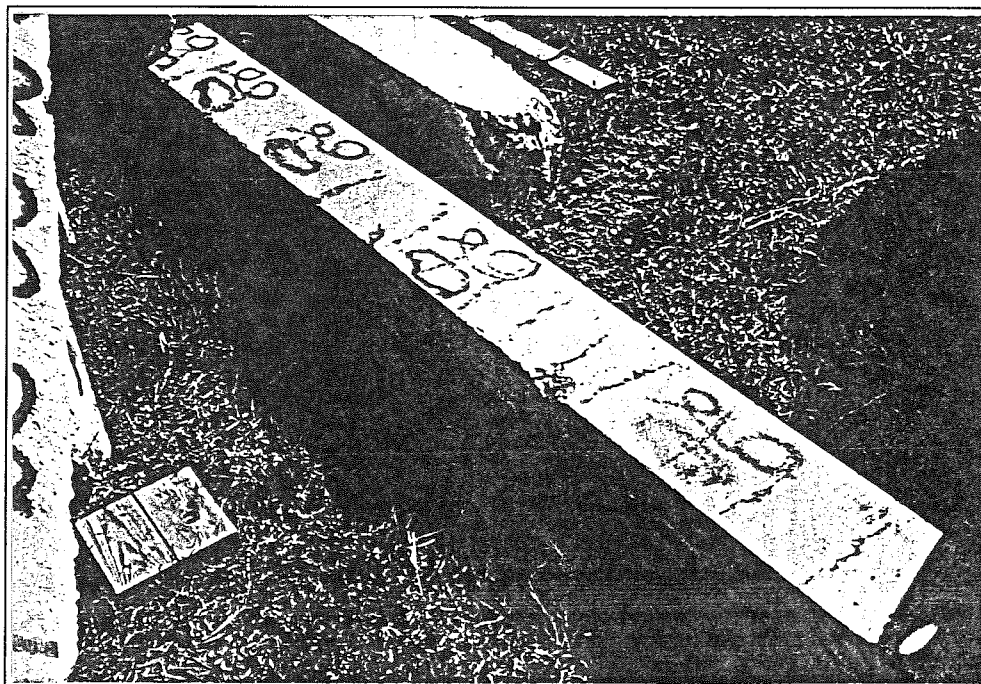
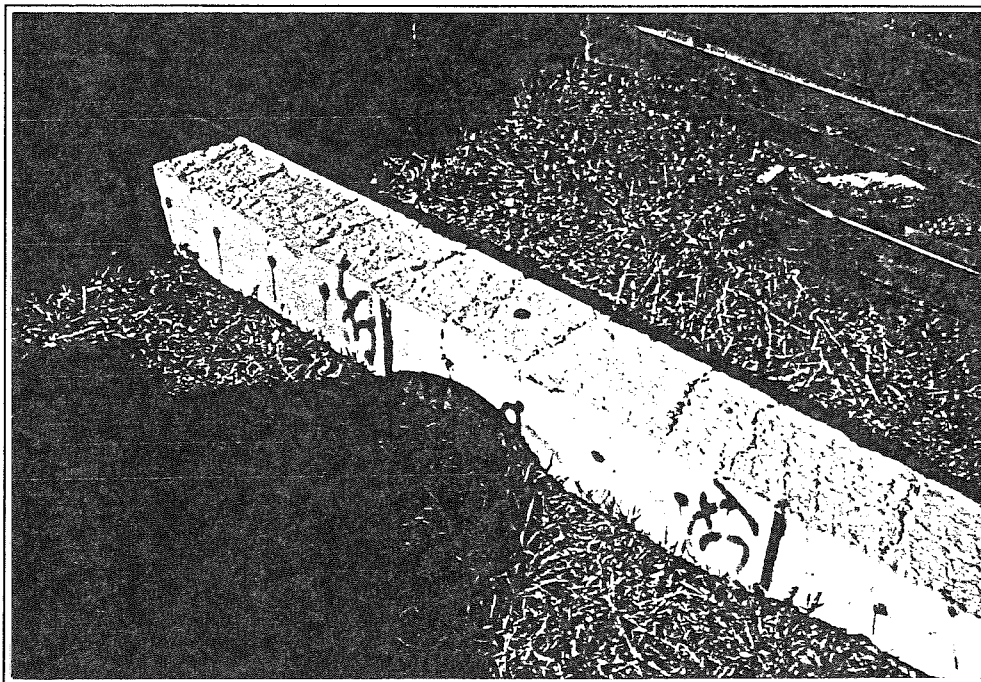
Vid slagning av betongpålar 27,5 x 27,5 cm² armerade med 8 ø16 Ks 600, erhöles typiska vattensprängningsskador, jfr **figurer 21 och 22**. Längsarmeringen var fördelad så att fyra stänger var placerade i hörnen, under det att övriga fyra stänger låg mitt på varje sida. Pålarna, med en total längd av 39 m, slogs 20-25 m ned i friktionsjord under geotekniska förhållanden som påminner om dem vid Sannsundsbron. Slagningen utfördes med pålkranen monterad på en flytande ponton. Antalet slag för de pålar för vilka slagräkning utförts framgår av tabell I. Det stora antalet slag tyder på att skadorna uppkommit som resultat av utmattning av betongen i närvaro av vatten.



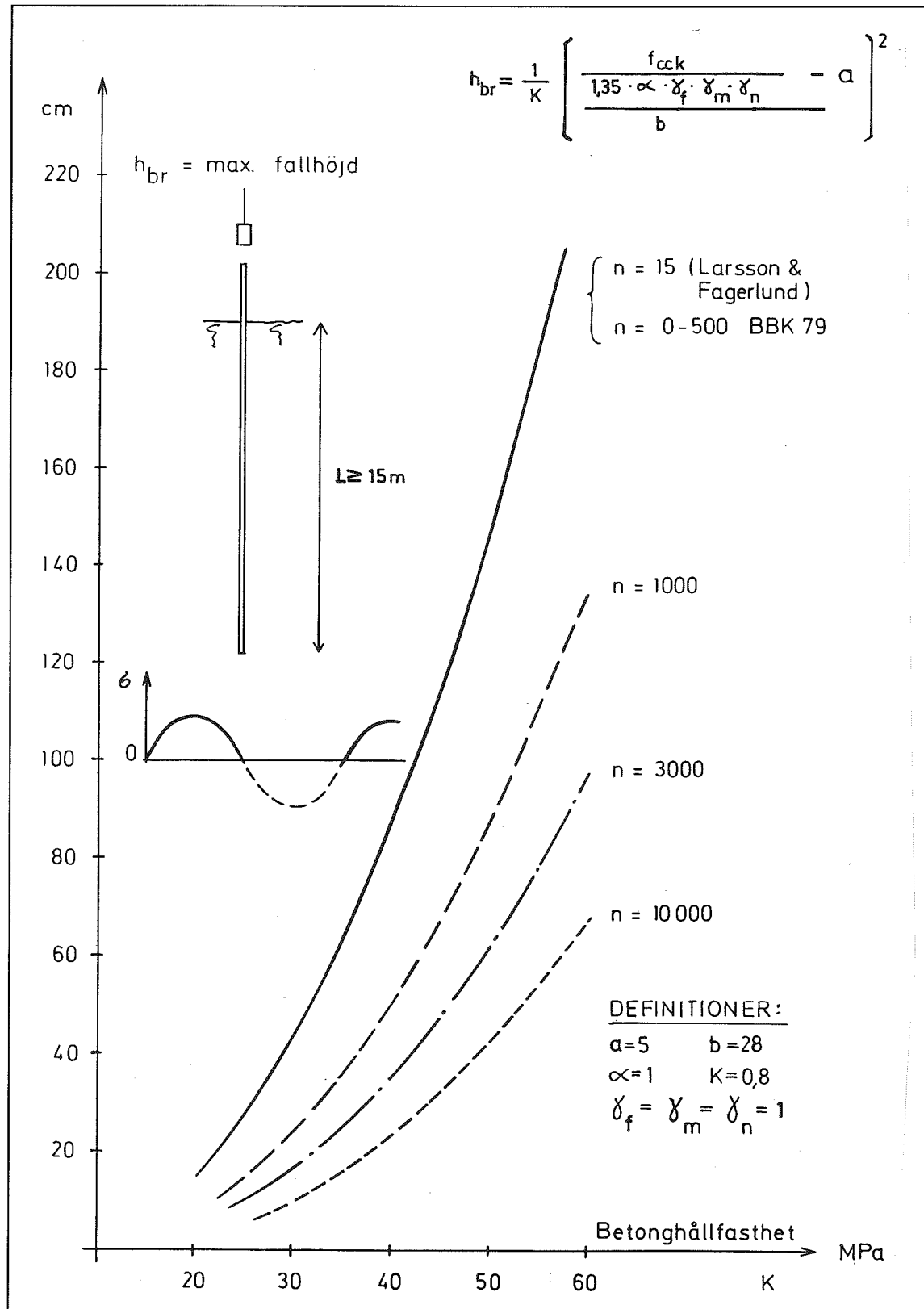
*Figur 19. Idrottshall Sandared.
Skador på en förspänd
betongpåle slagen i torvjord
med hög permeabilitet.*



*Figur 20. Skador på påle slagen
i jord med hög permeabilitet.
Okänd lokal.*



Figur 21 - 22. Bro över Ekolsundsviken (E 18). Pålar med typiska skador av hydraulisk utmattning.



Figur 23. Utmattning av betongpåle vid slagning i luft. Samband mellan fallhöjd, betonghållfasthet och antal slag till brott för betongpåle med måttligt spetsmotstånd ($l > 15$ m). Parametervärden enligt rapport nr 75, IVA:s Pålkommision. Betongens utmattningshållfasthet enligt BBK 79 (Betonghandboken [20]).

Tabell I. Fördelningen av antal slag på de pålar för vilka slagantalet angivits i pålprotokollet till stöd 3.

Antal slag	1000- 2000	2000- 3000	3000- 4000	4000- 5000	>5000
Antal pålar	8	15	11	3	2

2.7 Sammanfattning

Vid de arbetsplatser där skador på grund av vattensprängning särskilt uppmärksammas, har de geotekniska förhållandena i vissa avseenden varit påtagligt likartade.

Gemensamt är de mäktiga förhållandevis fasta, siltiga sandlagren ofta med visst innehåll av ler. Ett annat gemensamt drag är den relativt stora pållängden. Situationen kännetecknas vanligen av stort neddrivningsmotstånd på grund av mantelfriktion, medan det vid drivningen mobiliserade spetsmotståndet är måttligt eller ringa. Vid skadefallen vid Alssundet, Sannsundet och Mölndals lasarett har under påslagningen osedvanligt stora dragkrafter uppmätts med PDA, (stötstågmätning).

3. *Orsak till skadorna*

I flera av skadefallen har avsevärda tryck- och dragpåkänningar uppmätts i pålarna, d v s påkänningar av sådan storleksordning att risk för utmattningsbrott enligt BBK79 kapitel 3.3 kunnat anses föreligga.

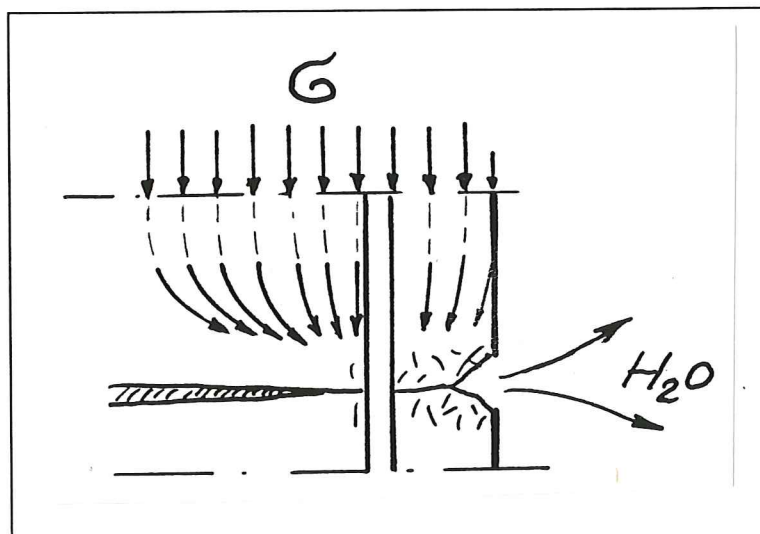
Skadornas art och det sätt på vilket de uppträder och utvecklas gör dock att man kan utgå från att den på betongen direkt nedbrytande mekanismen starkt påverkas av den sprängverkan som uppstår då tryckvågen i pålen passerar vattenfyllda sprickor i betongen. Då tryckvågen passerar en spricka pressas vattnet ut under stort tryck, vilket kan bli av samma storleksordning som trycket i betongen.

Trycket verkar i eventuella håligheter och porer, i mikrosprickor samt i till huvudsprickor anslutande mindre sidosprickor och kan under ogynnsamma betingelser successivt spränga sönder betongen. I det fall att tryckvågen följs av en dragreflex uppstår ett undertryck i sprickorna, som står i relation till dragvågens amplitud (dragspänning) och således med stor effektivitet suger vatten tillbaka in i spricksystemet. Växlingen mellan alternerande stora tryck och dragspänningar i betongen medför accelererad utmattningsav betongmaterialet.

Vattnets möjlighet att kunna tränga ut och in i en spricka mellan hejarslagen påverkas av följande faktorer:

- * Närvaro av fritt vatten eller vatten i form av porvatten i en öppen jordart, t ex torv eller grovt grus.
- * Sprickans form, speciellt med hänsyn till egenspanningar av krympning och av temperaturförlopp vid betongens hårdnande.
- * Uppkomst av dragspänningar under slagningen på grund av geotekniska förhållanden.
- * Hejarens fallhöjd och andra slagningsdata.
- * Temperaturförhållanden i pålmaterial och omgivning under slagningen.

Vid ogynnsam sprickform uppkommer stora tryck- och spjälkpåkänningar i pålens ytskikt. Under inverkan av extremt stora vattentryck stöts betongfragment successivt ut från betongytan invid befintliga dragsprickor, varvid v-formiga diken tenderar att bildas längs sprickorna. Sedan fria ytor vinkelrätt stötvågens fortplantningsriktning på så sätt uppkommit, inträffar i fortsättningen reflektion av tryckvågorna vid dessa ytor, varvid ytterligare betongfragment kan stötas ut från betongytorna. Detta reflektionsfenomen kan förklara den gradvisa tillväxten av de kilformiga skadorna till allt djupare 'diken'. Spänningskoncentrationer och därmed sammanhängande överpåverkan hos betongen i dikenens botten bidrar sannolikt verksamt i denna process, se **figur 24**.

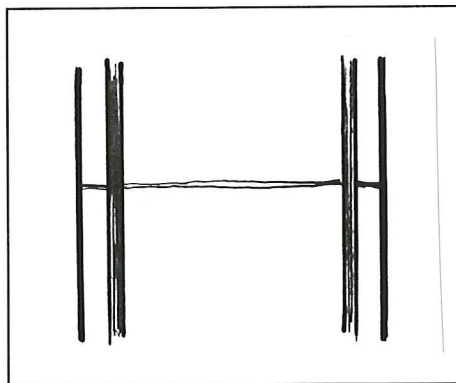


Figur 24. Den kilformiga skadan i täcksiktet leder i kombination med sprickans form till stora spänningskoncentrationer.

3.1 Teori

En förklaring till att vattensprängning inträffar är följande förlopp.

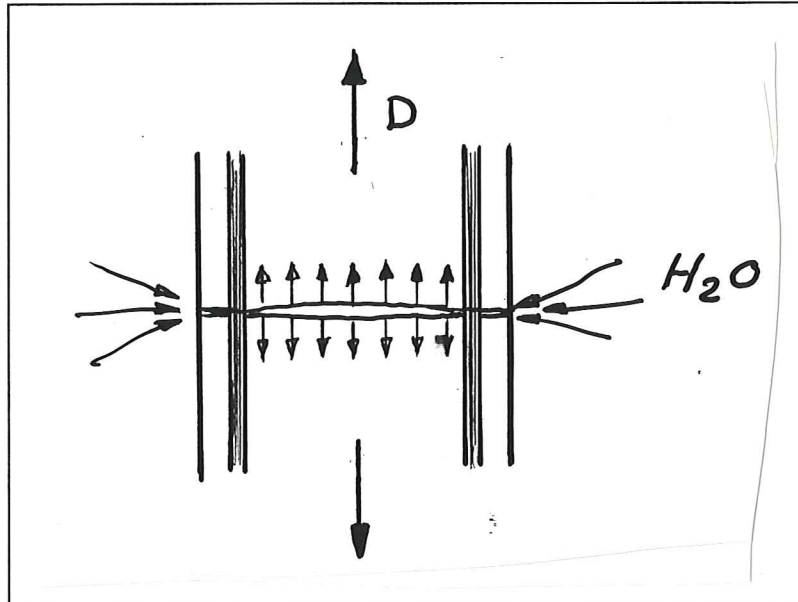
- Dragsprickor uppkommer i pålen vid slagningen främst på grund av dragreflexer från påspetsen, **figur 25**.



Figur 25. Vanlig form hos dragspricka i pålelement. (Variation hos sprickvidden visad i överdriven skala).

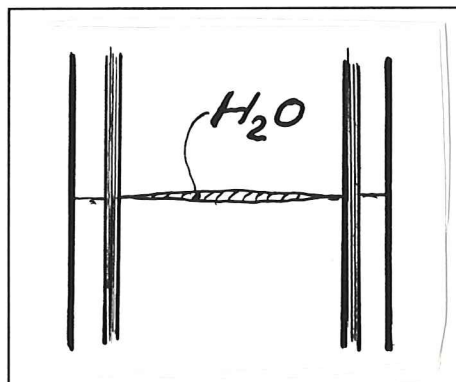
- Beroende på egenspanningar från hydratationsprocessen (den hårdnande betongens värmeutveckling) eller från krympning i betongen, kan sprickorna anta olika form. En spricka kan vara t ex jämbred. I andra fall kan den trattformigt vidga sig mot betongytorna eller - vilket är mycket vanligt i grova pålar - vara vidare i betongkroppens inre delar än vid armeringen i de yttre skikten. (Jfr **figurerna 30 - 32 och 33**.)

- Beroende på dragvågens intensitet kan sprickan öppna sig mer eller mindre. Ett kraftigt undertryck kan uppstå, varvid vatten sugas in i sprickan, **figur 26**. (Dragspänningar upp till $6,7 \text{ MN/m}^2$ uppmättes vid Sannsundet).



Figur 26. När dragvågen passerar öppnar sig befintliga sprickor och vatten sugas in på grund av de stora undertryck som då uppkommer.

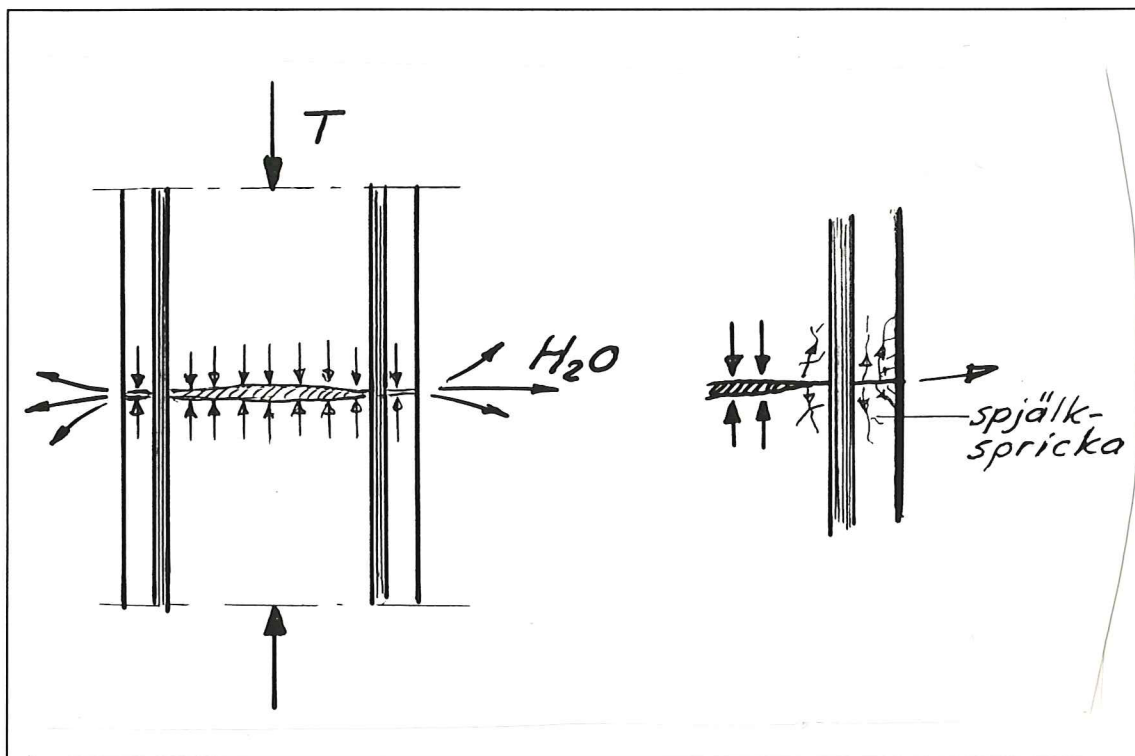
- Situationen efter det dragvågen passerat framgår av **figur 27**.



Figur 27. Vattenfylld spricka efter dragvågens passage.

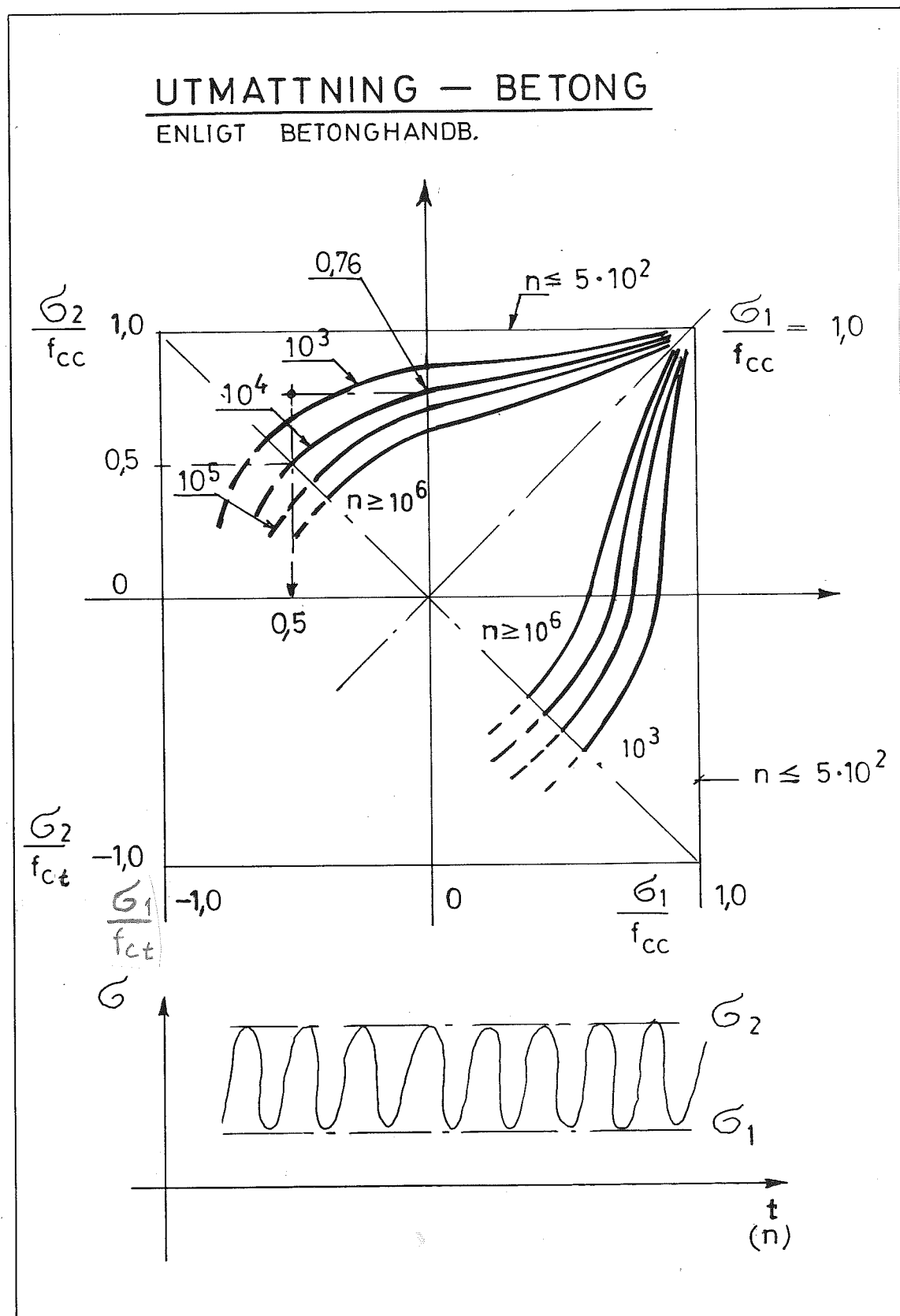
- När tryckvågen från nästa hejarslag träffar sprickan med en intensitet av t ex $15\,000 \text{ kN/m}^2$, "jettas" vattnet med ett stort tryck utåt samtidigt som sprickan tenderar att sluta sig i ytskikten.

I slutskedet av tryckvågens passage uppstår en situation där pålsektionens yttre delar får stora tryckspänningar - vilka redan i sig kan föranleda spjälkning - samtidigt som extremt stora vattentryck verkar i porer och spricksystem i betongen. En uppenbar risk för sprängning av betongen föreligger, figur 28. De mycket "flacka" brott som ofta kan iakttas intill djupare kilformade skador tyder på att stora tryckspänningar förekommit i ytskikten. Jfr Bron över Alssundet.



Figur 28. Hydraulisk utmattning - vattensprängning.

Växlingen mellan stora tryck- och dragspänningar innebär att utmattning av betongen måste utgöra ett viktigt inslag i skadebildningen. **Figur 29** visar ett utmattningsdiagram för betong (i luft) enligt Betonghandboken 1980. Av detta kan man t ex utläsa att vid en spänningsväxling mellan $\sigma_2 = 0,76 f_{cc}$ (tryck) och $\sigma_1 = 0$ tål materialet ca 10 000 belastningscykler. Om emellertid σ_1 exempelvis minskas till $-0,5 f_{ct}$ (drag) sjunker antalet tillåtna belastningscykler till mindre än 1 000, d v s värden på antal slag som är högst aktuella vid slagpålning. Exemplet illustrerar således spänningsamplitudens dramatiska effekt på utmattningshållfastheten hos ett pålelement. Se även diagram i **figur 23**.



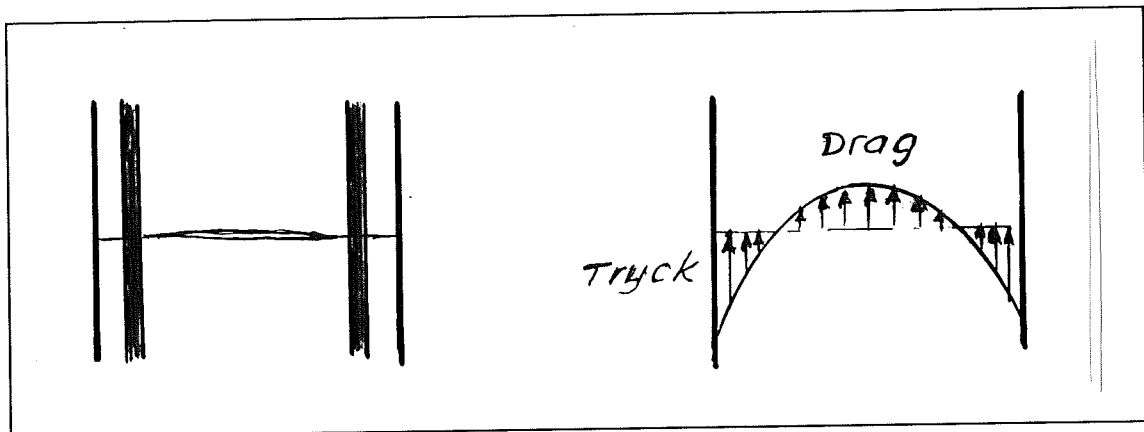
Figur 29. Utmattningsdiagram enligt Betonghandboken 1980 [20] utan närvaro av vatten. n = antal lastväxlingar, f_{cc} = betongens cylinderhållfasthet, f_{ct} = betongens karakteristiska draghållfasthet.

• **Inverkan av sprickviddens variation.**

Av ovanstående framgår vidare att sprickans form är av särskild betydelse. Risken för att vatten i en spricka skall kunna inestängas under stort tryck är självklart mindre om sprickvidden inne i betongkroppen är liten och successivt ökar mot yttersidorna. Möjligheten att stänga in vatten i en normal böjspricka torde därmed vara små. Råder däremot det motsatta förhållandet, nämligen att sprickan är tunnast vid ytorna och vidgar sig inåt betongpålens centrala delar, är förutsättningarna för att vatten blir inneslutet vid tryckvågens passage optimala. Det finns emellertid flera omständigheter av betongteknologisk natur som just föranleder sprickor av sistnämnda typ, varvid tendensen till ojämn sprickvidd ökar med betongelementets tvärmått, se nedan.

- **Egenspänningar av temperaturförlopp under hydratationen enligt figur 30.**

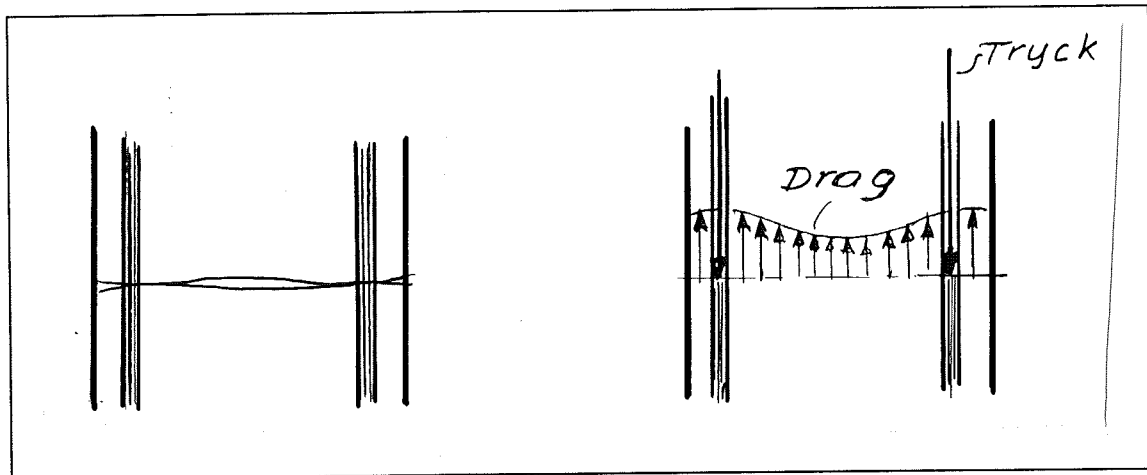
Tryckspänningar tenderar alltid att uppstå i ytskikten av en betongkropp i slutet av hydrationsprocessen under det att betongkroppens inre delar blir dragna. Detta innebär att om en genomgående dragspricka uppkommer blir sprickvidden större i betongelementets mitt genom att brottytorna vid utlösningen av egenspanningarna där drar sig längre från varandra.



Figur 30. Sprickform p g a hydratationsspänningar.

- **Egenspänningstillstånd sammanhängande med krympning i betongen.**

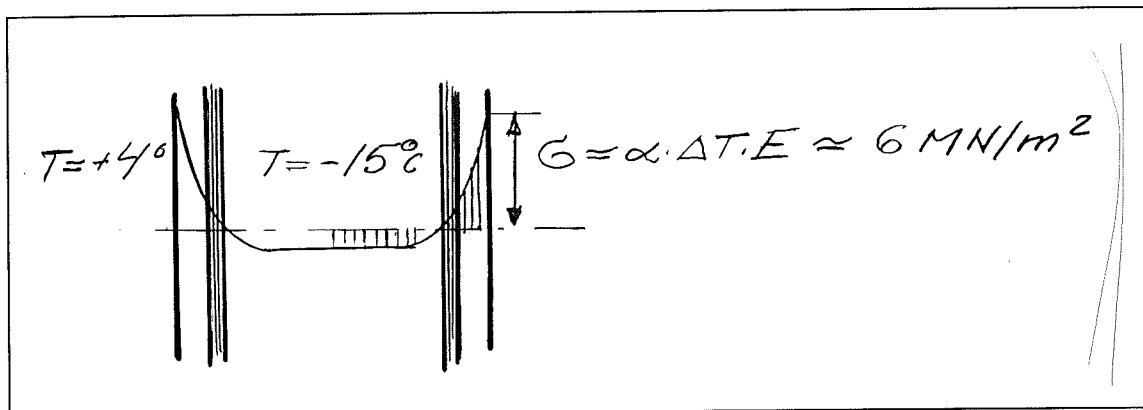
På liknande sätt som vid utlösning av spänningstillstånd på grund av hydratation blir vidden hos en krympspricka variabel. Exempelvis befanns enligt Michalik [17] på teoretisk väg att sprickvidden vid ytan var lika med sprickvidden i sektions mitt om den cirkulärt placerade armeringen låg på avståndet 0,65 r från centrum. Sprickvidden är dock minst i närheten av armeringsstängerna som så att säga lokalt 'snörper åt' sprickan, **figur 31**.



Figur 31. Sprickform p g a krympning i betongen.

- Inverkan av temperatur

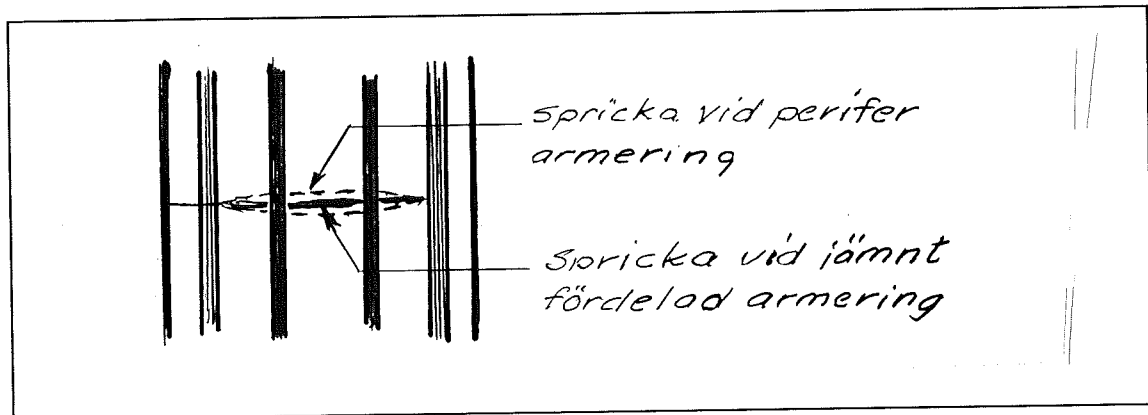
Om vidare ett pålelement nedsänkes i vatten vid kall väderlek (t ex -10°C) uppstår tryckspänningar i ytskikten varvid eventuella sprickor tenderar att sluta sig i ytan. Detta kan medföra att vatten förhindras att tränga in i sprickan men, nota bene, också att vatten som av någon orsak - t ex en kraftig dragreflex från pålspetsen - redan trängt in i sprickan också lättare blir inneslutet, **figur 32**. Temperaturfenomenet bör dock ej ses som en nödvändig förutsättning för den beskrivna sprängmekanismen, bl a med hänsyn till att vattensprängning inträffat även sommartid. Temperaturökning i ytskikten kan dock givetvis öka risken för skador. Jfr SannsunDET.



Figur 32. Exempel på spänningar av temperaturchock.

- Ovan redovisade mekanism för vattensprängning medför att **stora betongtvärsnitt med armeringen koncentrerad till ytskikten** har stor benägenhet för att erhålla sådana skador. Vid bron över Alssundet användes grova pålar $40 \times 50 \text{ cm}^2$, vid SannsunDET Herkules 1200 cm^2 och vid Mölndals lasarett $35 \times 35 \text{ cm}^2$. Det är emellertid fullt klarlagt att skador kan inträffa även på pålar med standardtvärsnitt (bro över Piteälven, kaj vid Rönnskärsverken, Sandared, bro över Ekolsundsviken m fl).

Vid den ovannämnda modifieringen av pålelementen ($40 \times 50 \text{ cm}^2$) vid bron över Alssund beaktades detta på så sätt, att den extra armering som pålelementen förstärktes med, förlades i påltvärsnittets mittparti. Åtgärden var ägnad att, dels förbättra kraftflödet vid dragvågens passage av sprickan, dels minska den vattenvolym som vid tryckvågens passage måste forceras ut genom att den centriska armeringen minskar sprickvidden i pålens inre, **figur 33**.

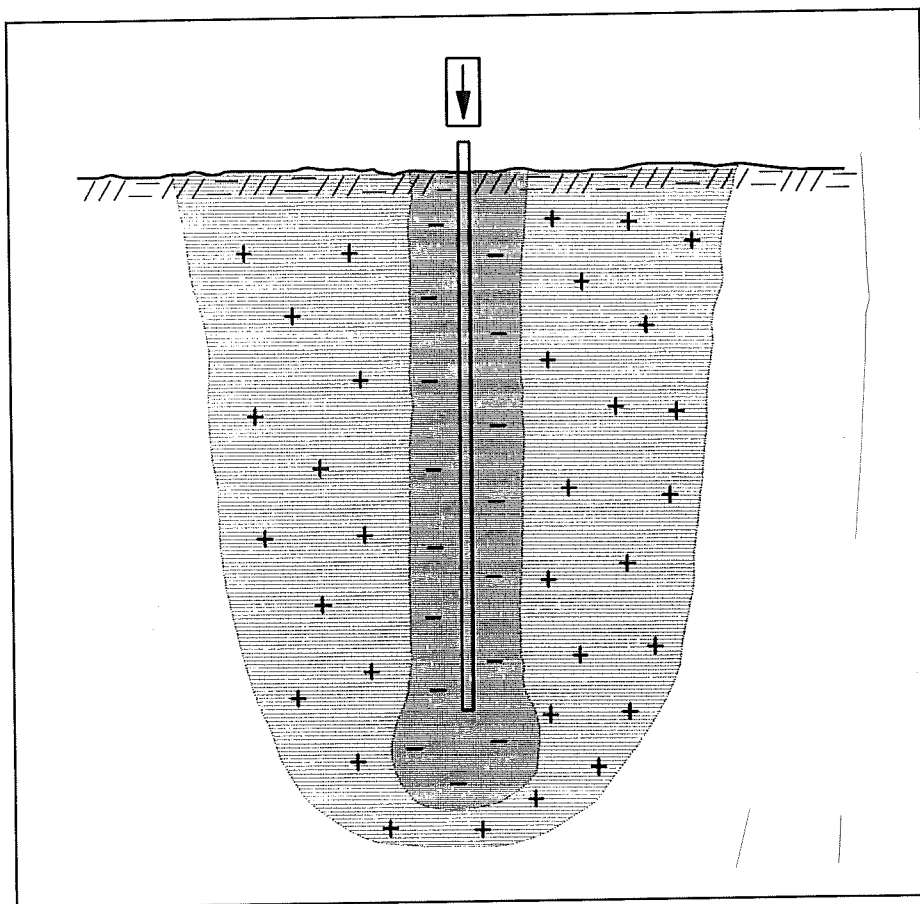


Figur 33. Spricktyper vid olika fördelning av armeringen.

4. Inverkan av geotekniska förhållanden

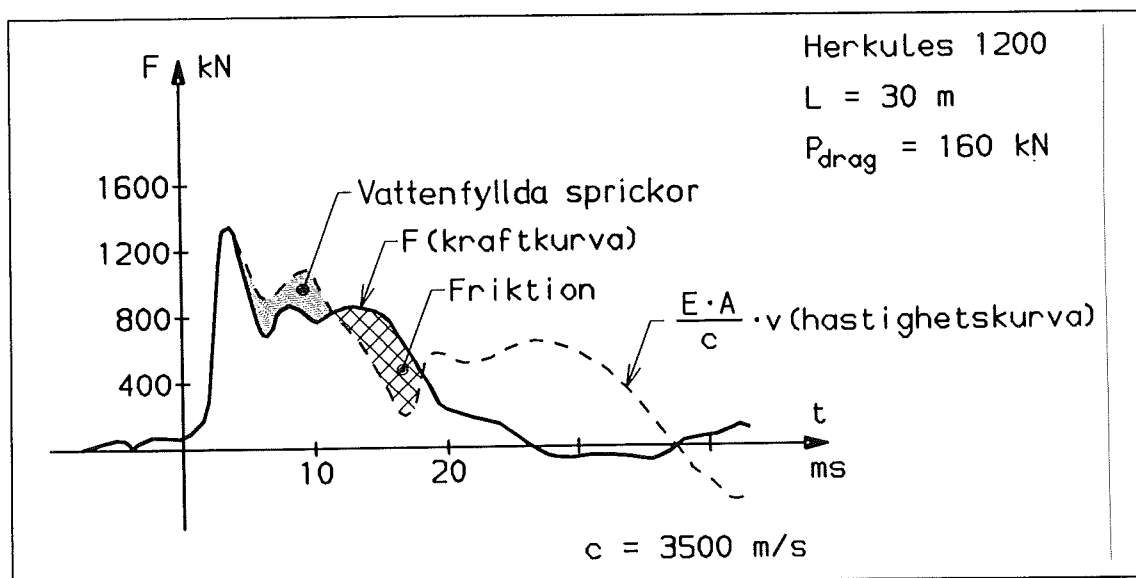
Som tidigare nämnts har de geotekniska förhållandena i de lokaler där skador på grund av vattensprängning dokumenterats i vissa avseenden varit påtagligt likartade. Gemensamt är de mäktiga, relativt fasta, siltiga sandlagren, ofta med visst innehåll av ler. Vanligen har det varit fråga om användande av långa friktionspålar, varför slagarbetet varit stort. Jfr borrhöjningar från bron över Sann Sundet och från Mölndals lasarett, se figurerna 37 - 39.

Vidare kännetecknas situationen ofta av att jordarten är dilatant vid kraftig skjuvdeformation, under det att den uppvisar kontraktans vid små upprepade skjuvdeformationer. Detta medför att vid drivning av en påle uppstår negativa porvattenövertryck närmast pålen, under det att positiva porövertryck successivt byggs upp under slagningen på större avstånd från pålen, där markens E-modul således riskerar att minska drastiskt, jfr figur 34.



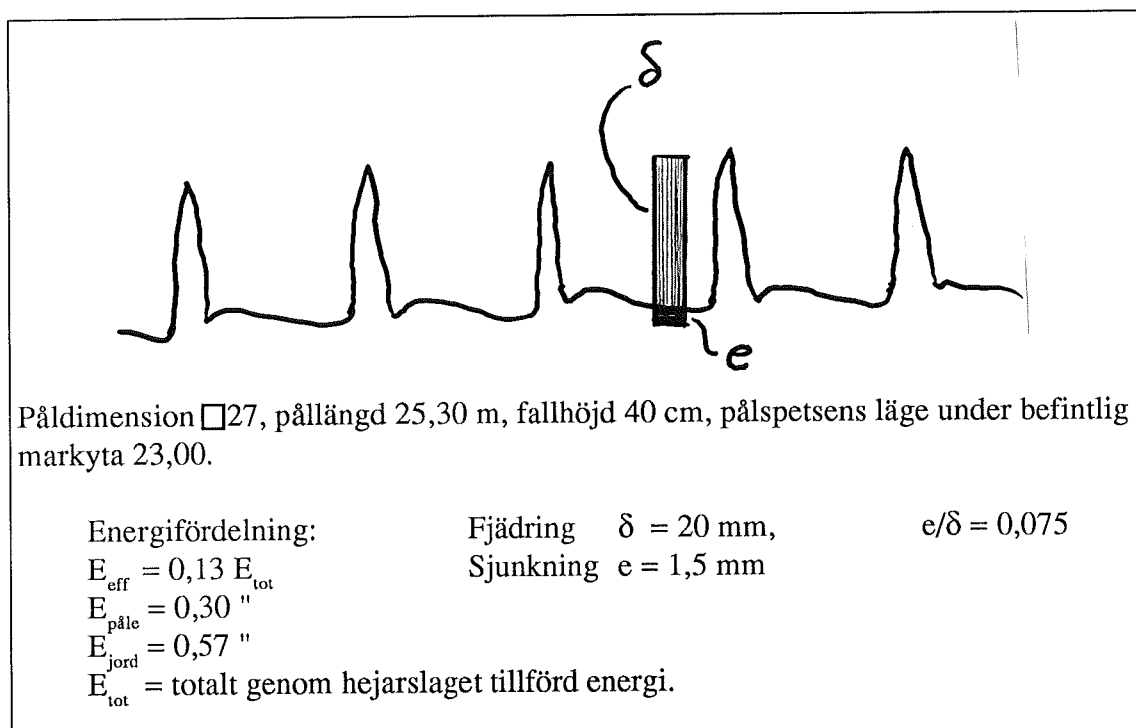
Figur 34. Porvattentryckändringar vid slagning i tät jord med relativt fast lagring.

Detta medför i sin tur att friktionen längs pålen (drivmotståndet) blir stor under det att omgivande mark tenderar att ge en markerat fjädrande respons på grund av stor deformabilitet (låg E-modul). Pålarna kräver i dessa fall hård slagning för att överhuvudtaget kunna drivas ner i jordlagren, samtidigt som motståndet vid spetsen är litet eller måttligt. Risken för stora dragkrafter i pålarna är under dessa betingelser påtaglig. Jfr stötvågmätningarna i figurerna 13 och 35 vilka indikerar stora dragspänningar.

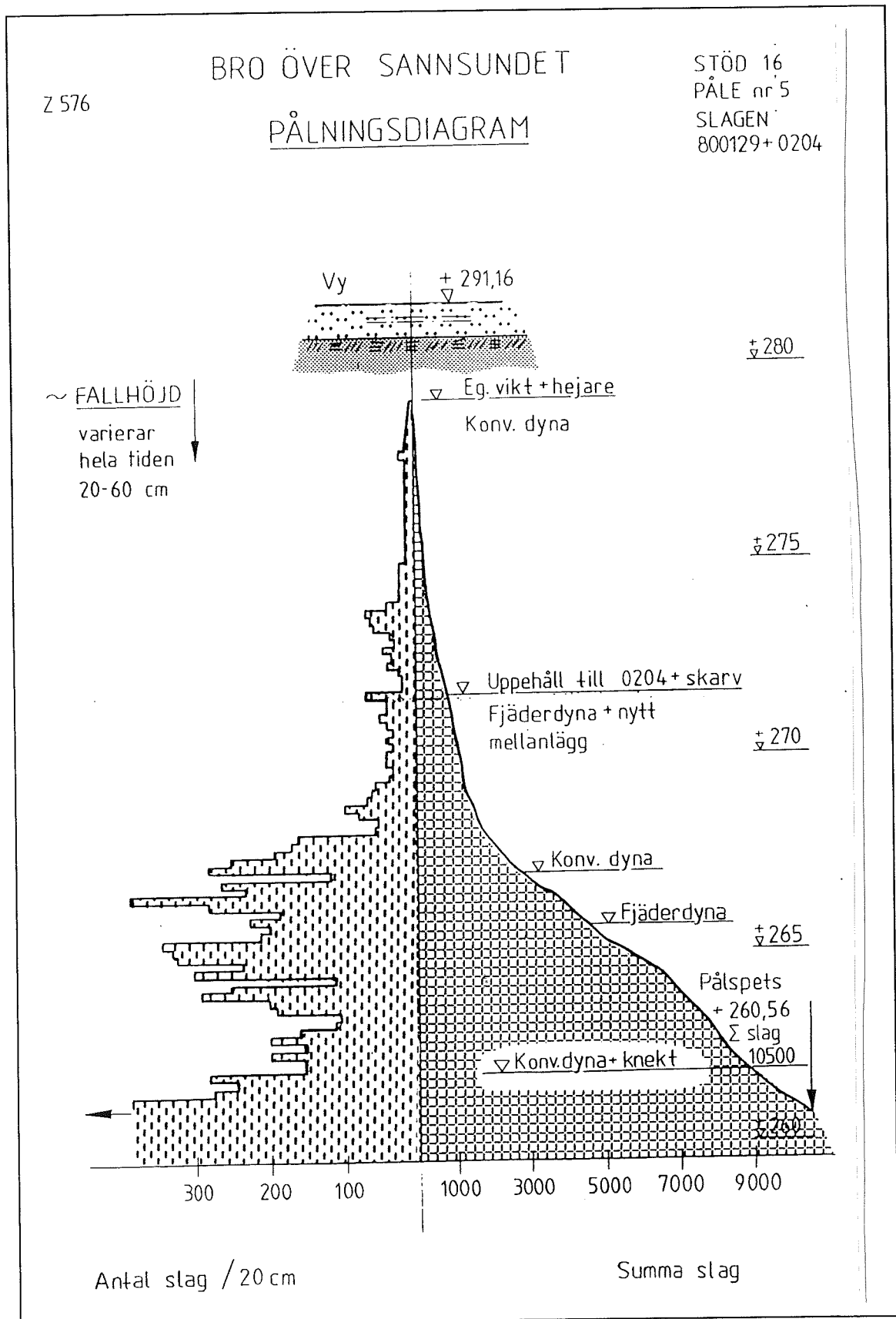


Figur 35. Stötvågsmätning vid Sannsundet.

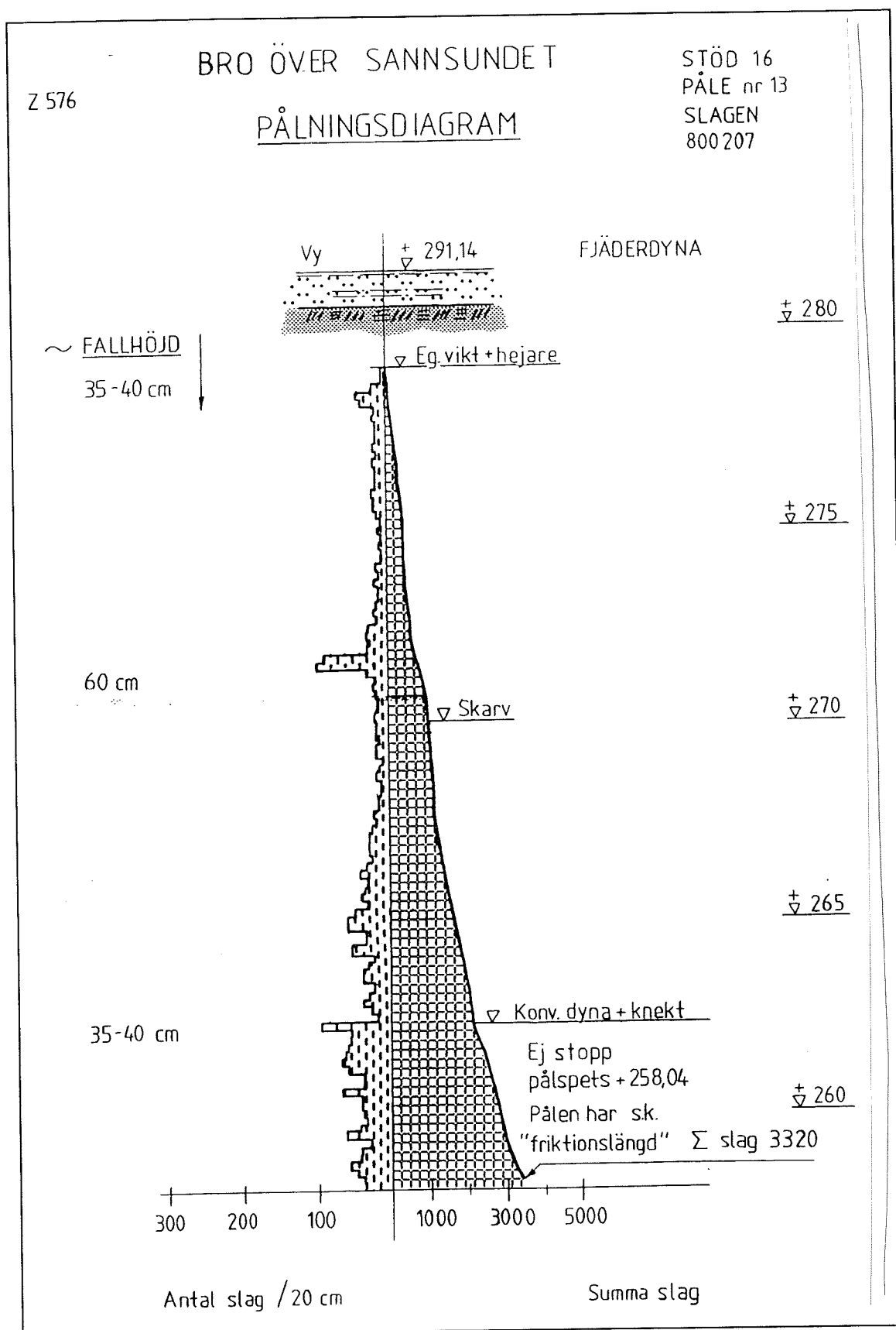
Vid Mölndals lasarett var den karakteristiska jordarten en fast lagrad lerig, siltig morän, som vid stor skjuvdeformation var utpräglad dilatant. Vid skakning uppvisade jorden emellertid en viss kontraktans med kraftig minskning av E-modulen som följd. Ehuru neddrivningen av pålarna således krävde hård slagning och stort totalt slagarbete, var markens respons på hejarslagen starkt fjädrande. Situationen karakteriseras av att pålskallens permanenta sjunkning är liten i relation till dess elastiska rörelse. (Jfr figur 36). Jordens stora elastiska deformation (s k 'quake') vid pålspetsen medför att tryckvågen reflekteras vid pålspetsen som en kraftig dragvåg (se figur 13). Dragvågens betydelse för skadornas uppkomst har belysts närmare i kapitel 3.



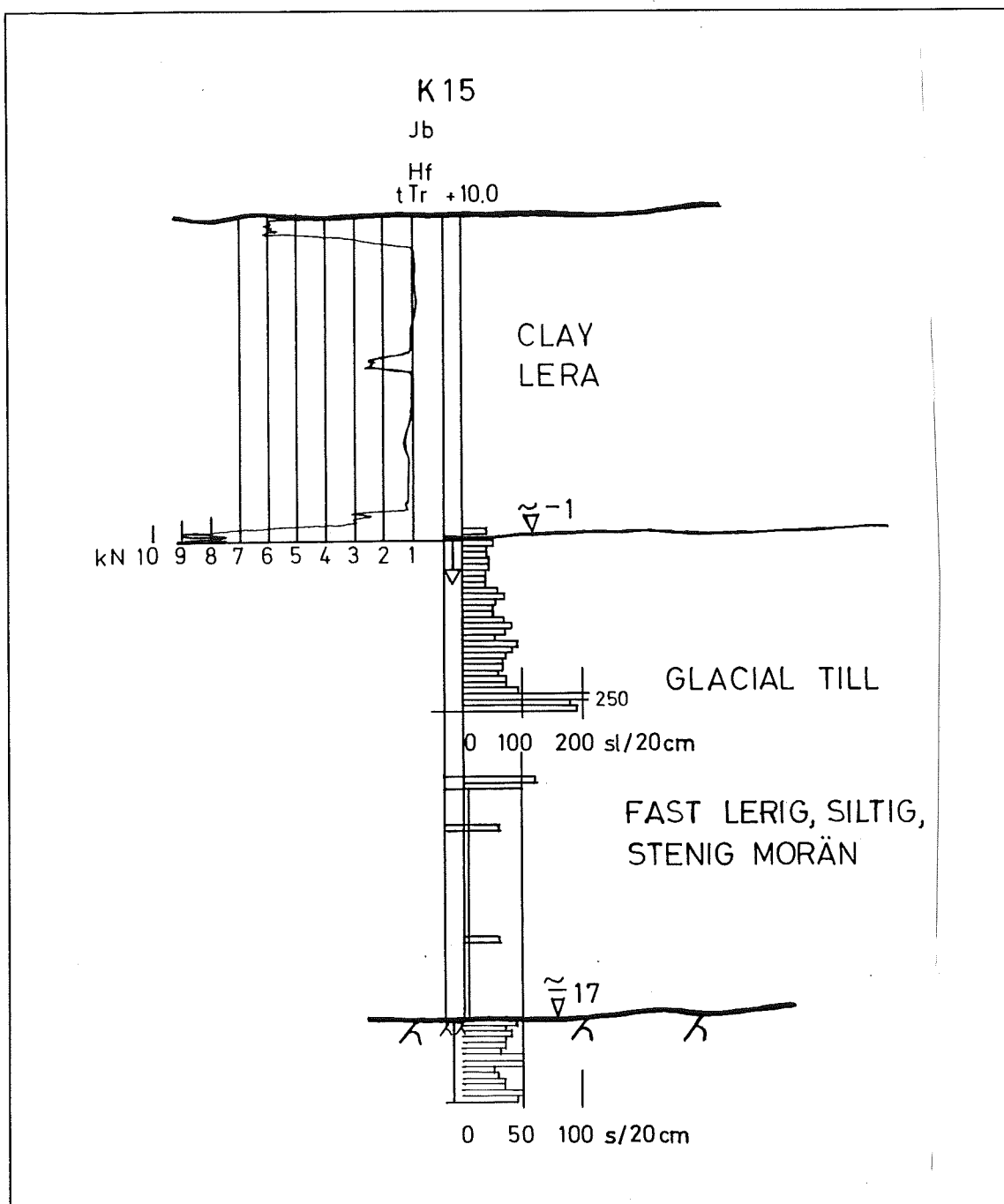
Figur 36. Fjädringsmätning på slagna pålar, Mölndals lasarett.



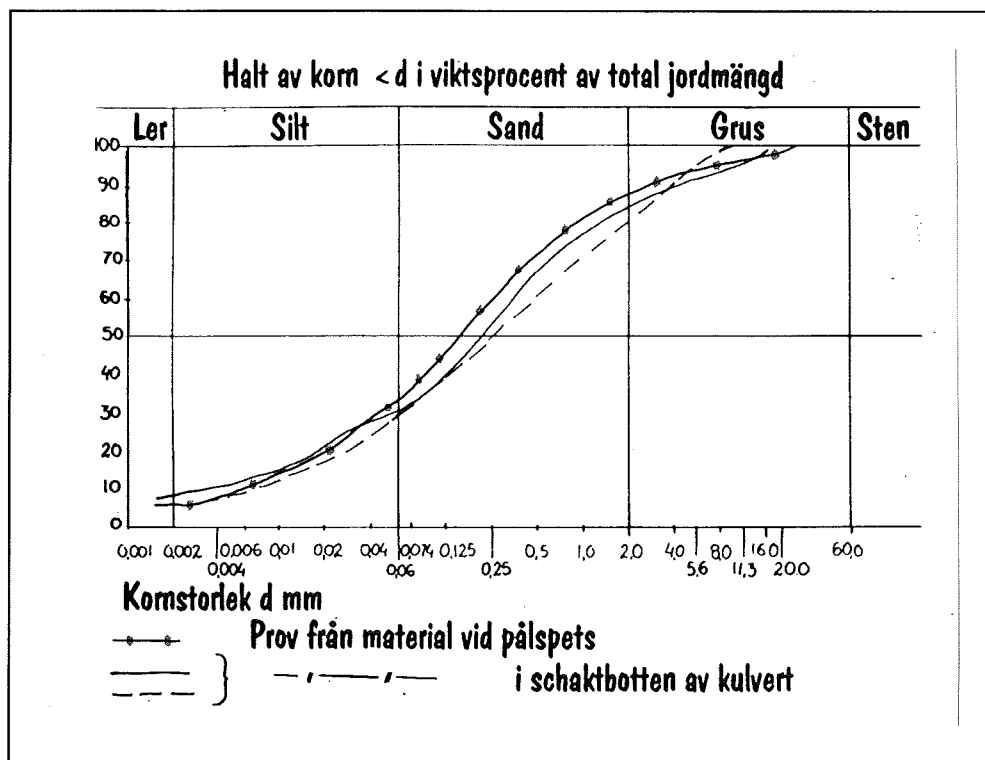
Figur 37. Slagdiagram från provpålning vid stöd 16 vid bron över Sann Sundet. Grundförhållandena karakteriseras av siltigt friktionsmaterial till stort djup.



Figur 38. Slagdiagram från provpålning vid stöd 16 vid bron över Sannsundet. Grundförhållandena karakteriseras av siltigt friktionsmaterial till stort djup.



Figur 39. Slagsonderingsdiagram från Mölndals lasarett. Ett ca 8 m tjockt lager av sensitiv lera underlagras av en fast lerig, siltig, stenig morän.

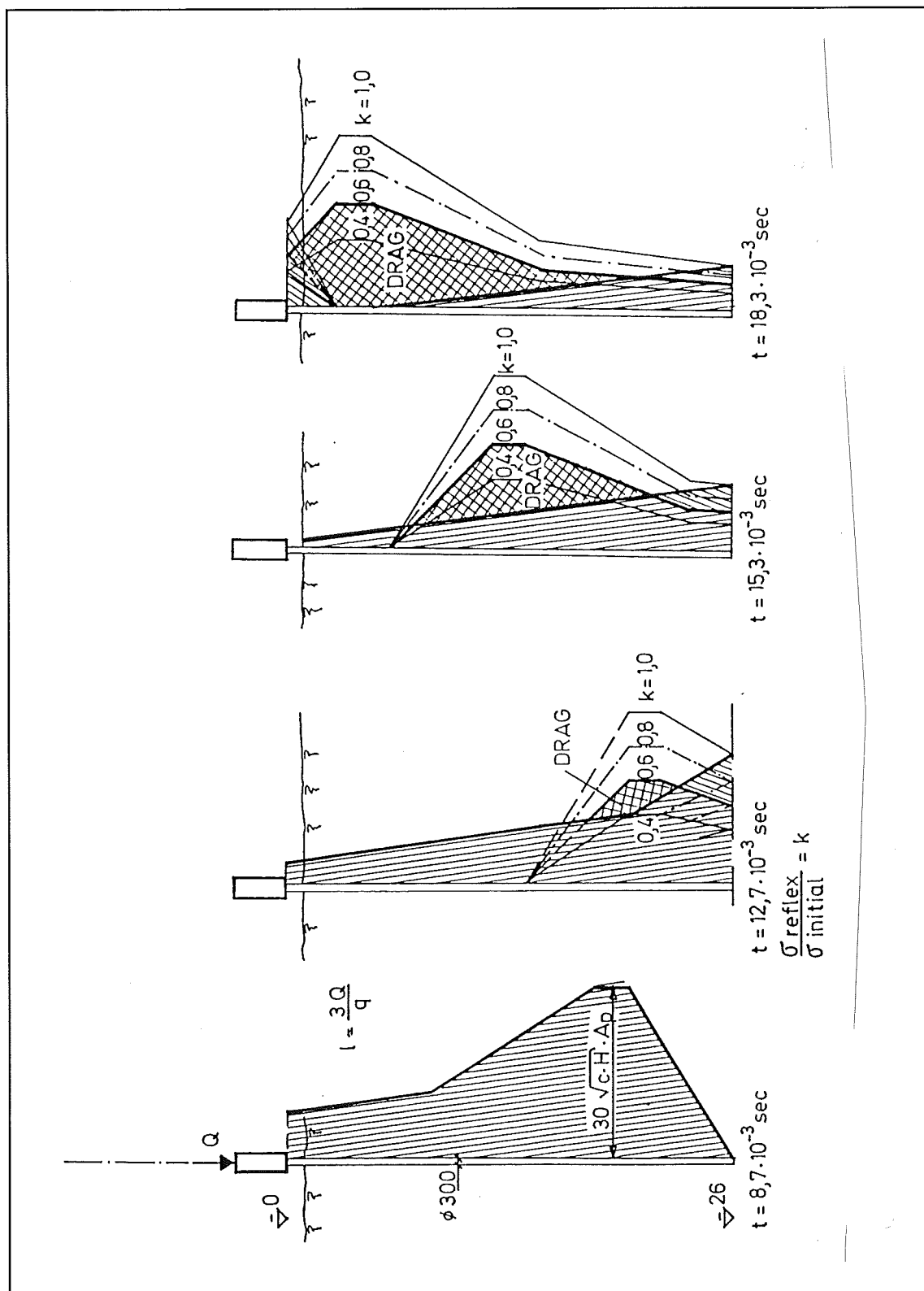


Figur 40. Kornfördelning hos moränen vid Mölndals lasarett.

I **figur 41** exemplifieras hur nedåtgående och reflekterad stötvåg överlagras vid olika tidpunkter i stötvågsförloppet för olika värden på reflektionskoefficienten (k). **Figurerna 42 a och b** visar maximal dragspänning längs pålen vid stötvågsförlopp enligt **figur 41**.

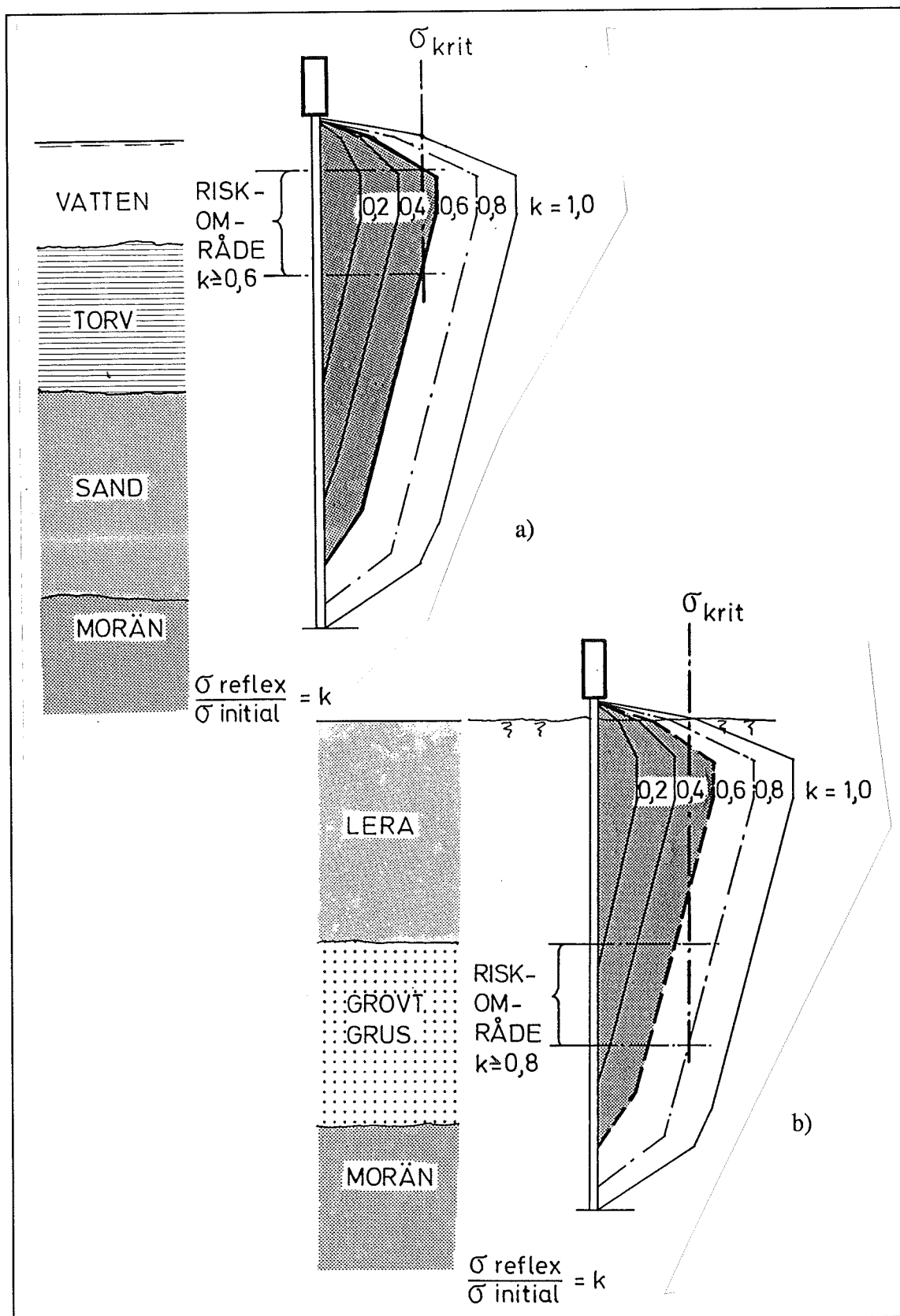
Figureerna understryker ett viktigt förhållande, nämligen att de största dragspänningarna tenderar att uppstå i pålens övre del, d v s på den del av pålen som riskerar att i slagningens slutskede befinna sig i fritt vatten där detta förekommer. I det fall som illustreras i **figur 42 a** kan man således under ogynnsamma betingelser förvänta skador på de delar av pålen som omgives av vatten respektive torv. Man kan emellertid också här dra den viktiga slutsatsen att om vattensprängning ej inträffar på den del av pålen som befinner sig i vatten är sannolikheten för att skador uppkommit längre ner i jordlagren utomordentligt små.

Vid en jordlagerföljd enligt **figur 42 b** är risken för skador i den del av pålen som befinner sig i täta jordlager mycket liten. I de permeabla jordlagren kring pålens nedre del kan dock risk för vattensprängningsskador föreligga för $k \geq 0,8$, i vilket fall skadorna torde vara svåra att upptäcka.



Figur 41. Schematiserat stötvågsförlopp och uppkomst av dragkrafter i pålar vid hård slagning i jord med starkt elastisk respons.

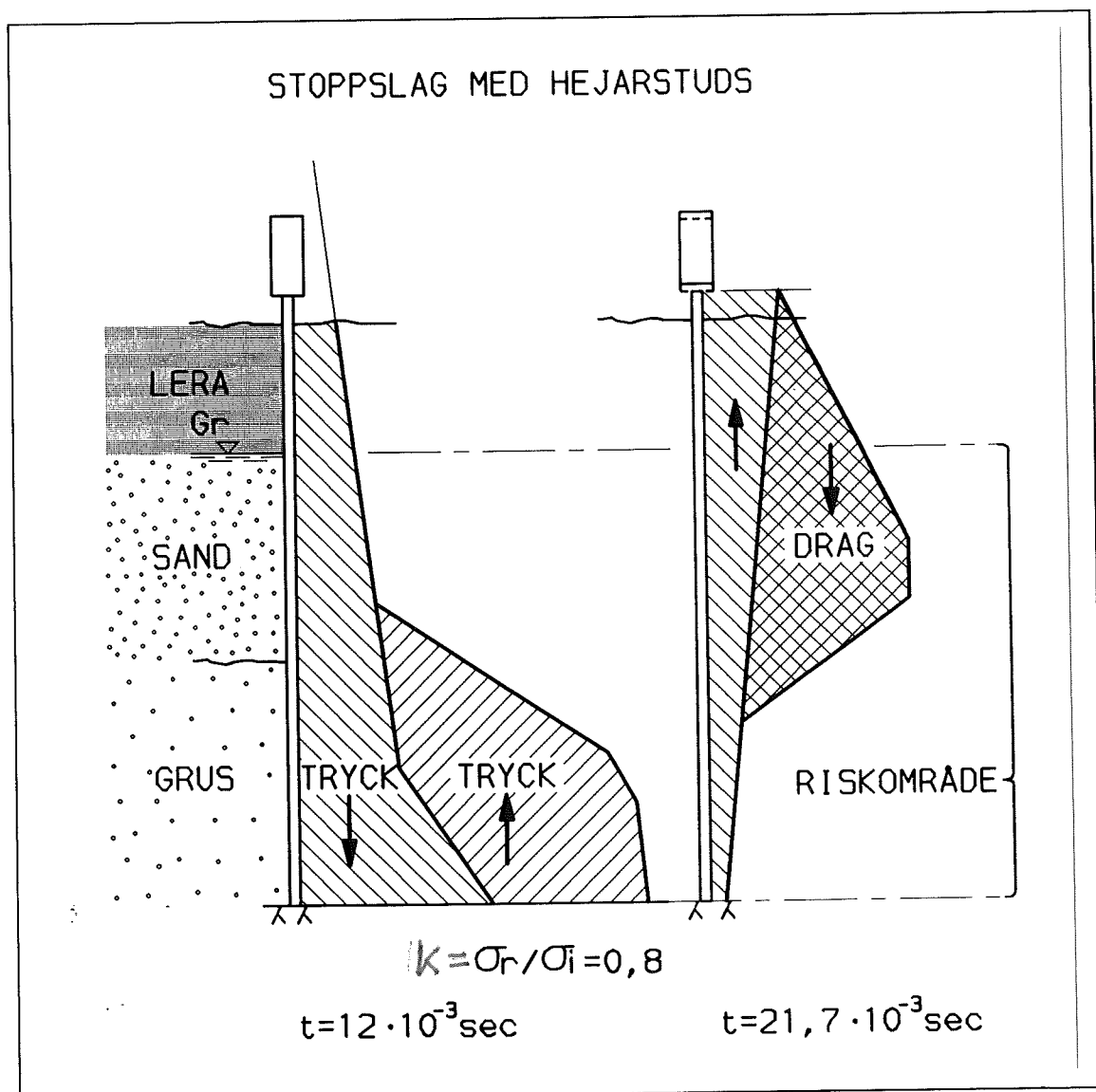
Beteckningar: h = fallhöjd (m), c = koefficient = 1 vid frifallshejare,
 A_p = pålens area (m²). Initial stötkraft $P = 30\sqrt{c} h A_p$



Figur 42. Hård drivning av pålar i jord med starkt elastisk respons i två olika geotekniska situationer. Figuren utvisar vilka delar av pålen där risk för hydraulisk utmattning föreligger. $\sigma_{initial} = 30\sqrt{c \cdot h}$

Det bör vidare poängteras att de ovan beskrivna geotekniska förhållandena inte är de enda under vilka dragvågor kan uppkomma i pålar under slagning. Ett annat intressant fall är situationen vid sk hejarstuds, då den nedåtgående tryckvågen från hejarlaget reflekteras vid spetsen som en uppåtgående tryckvåg. Denna reflekteras åter vid pålskallen som dragvåg, om hejaren på grund av studsens inte ligger an mot pålen. Vid regnig väderlek har man under dylika betingelser, t ex vid stoppslagning, kunnat iaktta hur regnvatten på pålens yta omväxlande 'sugits' in och ut vid dragsprickor och hur slutligen ett 'slam' av vatten och cementpartiklar runnit i rännilar nedför pålen.

Figur 43 illustrerar stötvågsförloppet vid hejarstuds. Uppkommande dragkrafter i pålen utgör en säker förutsättning för skador på grund av vattensprängning.



Figur 43. Stötvågsförlopp och uppkomst av dragkrafter vid stoppslagning med hejarstuds.

5. Inverkan av betongteknologiska omständigheter

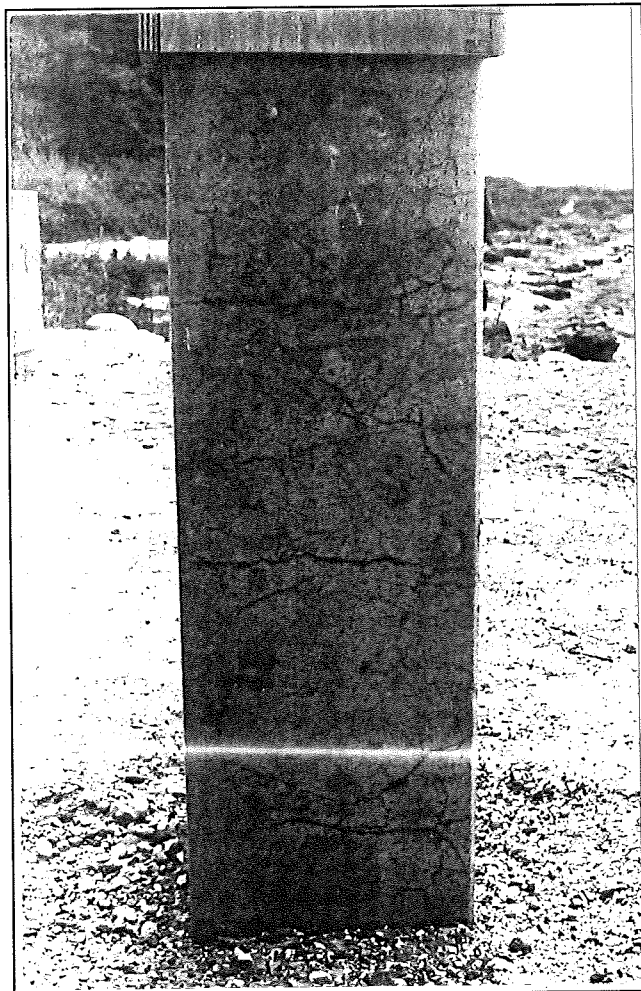
Vid det övervägande antalet pålningsarbeten i vatten uppkommer inte skador på grund av vattensprängning och det är därför troligt att andra faktorer utöver de redan nämnda är av betydelse. De för utmattningsfenomen i allmänhet avgörande parametrarna, som spänningsamplituder och antal lastväxlingar, har påvisats ha en avgörande betydelse. Vidare måste, som ovan nämnts, i betongen förekommande spricksystem - eller betongens benägenhet att utveckla sådana - ha en stor betydelse för vattentryckets möjlighet att verka nedbrytande i materialet i närheten av redan utbildade dragsprickor. Detta gäller företrädesvis i betongpålens ytskikt. I sammanhanget finns anledning att påminna om att materialet "betong" vanligen har sämre hållfasthet än de ingående delmaterialen - cementpasta och ballast. Detta har huvudsakligen sin grund i dels mikrosprickor i cementpastan, dels sprickor i gränserna mellan pasta och ballastkorn. Mikrosprickor uppkommer bl a på grund av krymp- och temperaturspänningar som inträffar i samband med volymändringar under hårdnandet - icke minst intill armering. Mikrosprickor finns således alltid i större eller mindre omfattning i betong och makrosprickbildning i belastade delar uppstår t ex genom att mikrosprickor vid belastning gradvis växer ihop för att till slut bilda en sammanhängande större spricka (Czernin [1], Neville [3]).

Man kan följaktligen utgå från att en betongs förmåga att utstå upprepad belastning (utmattningshållfasthet, slaghållfasthet) har ett direkt samband med de faktorer som påverkar uppkomsten av mikrosprickor och makrosprickor i betong.

Sådana faktorer är t ex:

- (i) cementtyp och malfinhet - påverkar bl a temperaturspänningar och cementpastans tendenser till krympning under hydratationen.
- (ii) vattencementtalet - påverkar betongens hållfasthet, vattenhalt, gjutegenskaper och krymmpotential.
- (iii) ballastmaterialets hållfasthet, flisighetstal och petrografiska sammansättning, ballastkornens form - t ex singel eller krossmaterial. Vidare ger olika ballastmaterial olika vidhäftning med cementpasta. Jfr G Fagerlund, Bo Larsson, 1980 [10].
- (iv) ballastgradering - påverkar porvolym, cementshalt, vattentäthet [10].
- (v) temperaturförhållanden under hårdnandet - volymändringar av temperatur föranleder egenspanningstillstånd och befordrar mikrosprickbildning.

- (vi) härdningsbetingelser vid lagring under tiden närmast efter avformning. Volymändringar av ojämn temperatur (t ex temperaturchock) och ojämna fuktförhållanden kan orsaka ytterligare sprickbildning.



Figur 44. Överdel av nedslagen provpåle vid Faröbroledens norra landfäste på Själland. Enligt författarens mening skulle denna påle om den slagits i vatten och därvid påverkats av omväxlande tryck- och dragkrafter med till visshet gränsande sannolikhet företett skador av vattensprängning.

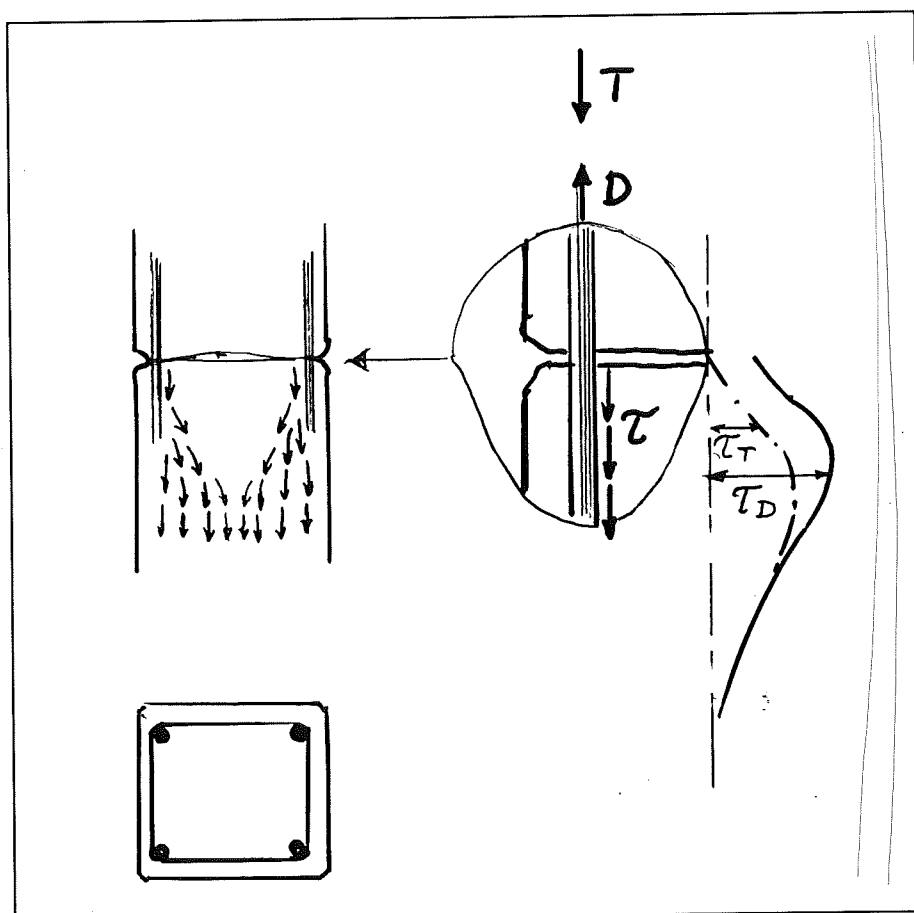
6. *Inverkan av konstruktiv utformning av pålelement*

Som nämnts i kapitel 3 torde sprickvidden och sprickans form vara av väsentlig betydelse för vatteninträngning (insugning) mellan två på varandra följande hejarslag. Än större betydelse har sprickans form för inneslutningen av det vatten som vid tryckvågens passage kan föranleda betongens nedbrytning.

Enligt gängse teorier påverkas sprickvidd i betongelement av följande faktorer:

- a) armeringsmängd och stångdimensioner
- b) armeringens fördelning över tvärsnittet
- c) bygghärdning

Figur 45 demonstrerar en mekanism som även bedömes vara av betydelse - nämligen tillväxt av sprickvidd på grund av upprepad dragbelastning. När dragvågen passerar en spricka måste dragkrafterna genom skjuvning och vidhäftning överföras till armeringen



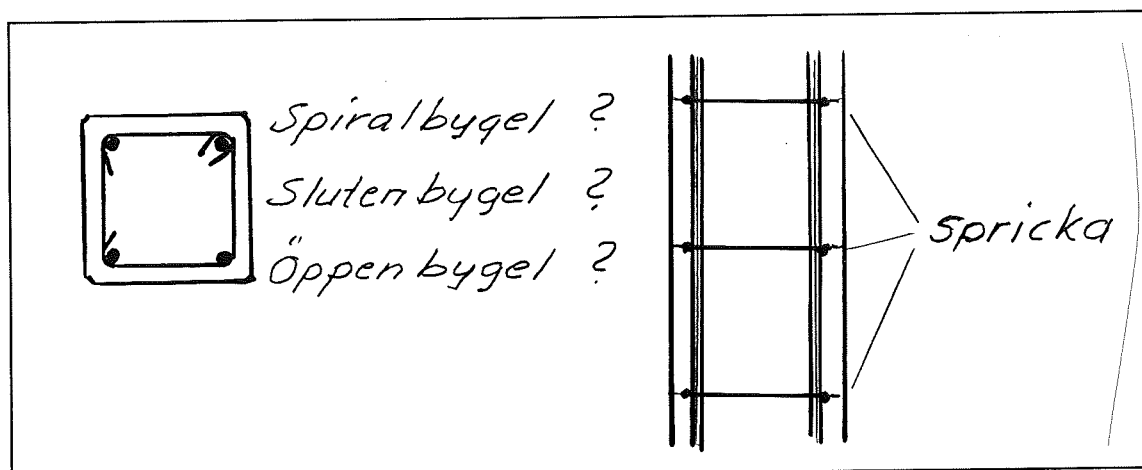
Figur 45. Kraftöverföring vid spricka i påle under växlande tryck- och dragkrafter. T = tryckkraft, D = dragkraft, τ = vidhäftningsspänning.

vid sprickan, för att sedan åter sprida sig över betongtvärsnittet ovan sprickan. Som vid 'utdragsprov' kommer därvid - vid upprepad belastning - armeringsstängerna genom samspel mellan vidhäftningsbrott och friktion i området närmast sprickan i viss mån dragas ur betongen. Detta kan medföra en successiv tillväxt hos sprickans vidd. I de i [12] refererade laborieförsöken tenderade armeringen att förlora vidhäftningen och öppna vattenkanaler utbildades längs armeringsstängerna. Dragkraftens avlänkning mot armeringsstålen medför vidare mycket ojämna spänningsfördelningar, ojämn sprickvidd, komplicerade spänningskoncentrationer, vilka - vid grova påltvärsnitt och med armeringen koncentrerad till hörnen - torde vara särskilt ogynnsamma i utmattningshänseende.

Den gynnsamma inverkan av ökad mängd och jämn fördelning hos längsarmeringen i pålar är klart dokumenterad vid försöken i Mölndal år 1981 [15] samt vid broarna över Alssundet (1979) och Sannsdundet (1979-1981). I ett examensarbete av Saleh [18] (1989) har den gynnsamma effekten av ökad armering även påvisats i modellförsök utförda på institutionen för byggnadsstatik, KTH.

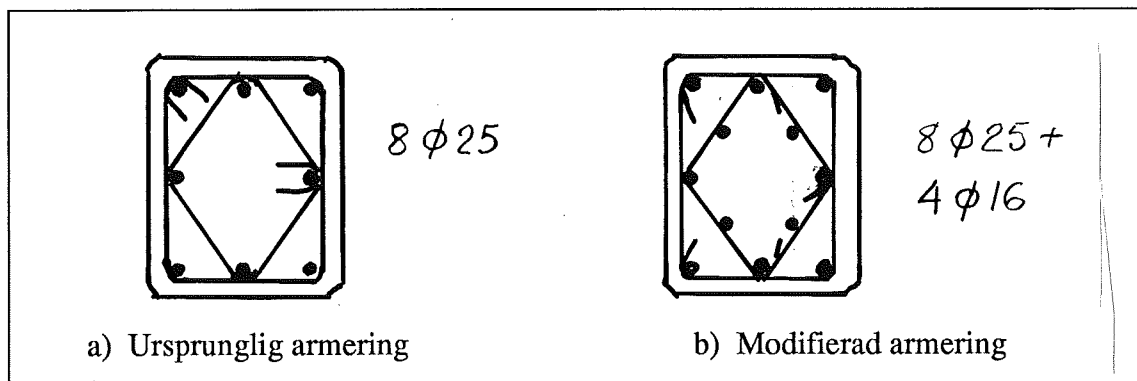
Armeringens fördelning över tvärsnittet är således av särskild vikt och torde inverka på minst två sätt:

- Kraftflödet invid sprickan vid dragning blir vid given armeringsmängd gynnsammare i takt med ökande antal armeringsstänger och jämnare fördelning av dessa över tvärsnittet.
- Centralt placerad armering reducerar sprickvidden i betongtvärsnittets inre delar, något som dels gör sprickans form mindre ogynnsam (jämnare sprickvidd) dels minskar den vattenvolym som vid påslagningen tvingas ut och in i sprickan, jfr mom "Inverkan av sprickviddens variation", sid 33 samt **figur 33**.



Figur 46. Bygelarmeringens utformning.

Som ovan framhållits bör man således generellt eftersträva att armeringen i görligaste mån utgöres av många enheter som fördelas så jämnt som möjligt över betongtvärsnittet. Vid bron över Alssund ändrades armeringen i de påldelar där dragvågor kunde tänkas uppkomma vid slagningen enligt **figur 47**. **Stora täckskikt** är i detta sammanhang fördelaktiga.



Figur 47. Modifierad pålarmering vid bron över Alssund. Fyra extra stänger $\phi 16$ placerades centralt i tvärsnittet. Byglarna utfördes som slutna med normenlig skarvlängd.

7. Inverkan av slagningsförhållanden

Alla slagningsbetingelser som inverkar på uppkomst, storlek och varaktighet av dragkrafter, påverkar såväl utmattningsrisken som möjligheten för vatten att sugas in i spricksystem mellan hejarlagen. Såväl tryck- som dragspänningar i pålen ökar t ex med ökande fallhöjd på känt sätt ($\sigma = \text{konst. } h$) och därmed risken för utmattning av betongen vid stora spänningsamplituder.

Enligt ovannämnda examensarbete av Saleh [18] avseende laboratorieförsök syntes excentriskt lastangrepp ha en ogynnsam inverkan, vilket sannolikt kan ha berott på den spänningsökning som sammanhänger med excentrisk belastning. Som ovan nämnts har emellertid skadorna vid broarna över Alssundet och Sannskapet ej visat sig ha haft något direkt samband med eventuell excentricitet under slagningen.

Om de geotekniska förhållandena dessutom är sådana att benägenheten för uppkomst av dragkrafter i pålarna under slagning är stor bör således åtgärder vidtagas, för att inom ramen för vad som är möjligt vid effektiv slagning, dämpa initialvågens intensitet och öka dess varaktighet.

Sänkt fallhöjd i kombination med ökad hejarvikt och användande av lämpliga dynmellanlägg utgör således effektiva åtgärder som kan rekommenderas i detta sammanhang.

Vid dieselhejare och linfallhejare har det ofta visat sig vara svårt att kontrollera den till pålen tillförda energimängden. Detta bör således beaktas om dessa slagdon används då risk för stora dragkrafter under slagning är uppenbar.

Vid dylika svåra slagningsbetingelser utförs lämpligen stötvågsmätningar såväl i diagnostiskt som kontrollerande syfte. Detta gäller såväl vid provpålning som under produktion.

- sid 51 -

- [11] Sahlin, Sven (1981). Orsaker till skador på armerade betongpålar slagna i vatten. Skandinaviskt Betongforskningsmöte, Helsingfors.
- [12] Hälinen, U and Nygård, Y (1982). Påslagning under vatten. Degree paper at the Dept. of Structural Mechanics and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm 1982.
- [13] Sahlin, Sven och Runesson, Kenneth (1982). Effect of Pore Water Pressure on the Strength of Concrete Subject to Impact Loading and Temperature Gradients. ACI Journal, July-August 1982, pp 251-256. (American Concrete Institute, Detroit).
- [14] Sahlin, Sven (1984). Model Tests on Damage of Concrete Piles Driven in Water. Second International Conference on the Application of Stress-Wave on Piles, pp 118-122. (IVA Commission on Pile Research).
- [15] Bernander, Stig och Berndtsson, Håkan (1984). Sprickbildning i pålar slagna i vatten. Fältförsök vid Mölndals Lasarett, augusti 1981. IVA:s Pålkommission. (Preliminär rapport 1984. Slutrapport 1986).
- [16] Pålkommissionen, IVA Ingenjörsvetenskapsakademin (1984). Förtillverkade betongpålar. Förslag till standard med dimensioneringsunderlag. Rapport nr 75.
- [17] Michalik, Ewa (1986). Datorberäkning av lämplig placering av armeringsstålen i en betongpåle vid slagning i vatten. Examensarbete, KTH, Stockholm.
- [18] Saleh, Abdul-Gader Reinforcement and Damages on Concrete Piles driven in Water. Royal Institute of Technology, Dpt of Structural Mechanics and Engineering, Graduation thesis. Stockholm 1989.
- [19] Pålkommissionen, IVA Fredriksson, Anders Bengtsson, Åke Bengtsson, Per-Evert (1991). Beräkning av dimensionerande bärförmåga för slagna pålar med hänsyn till pålmaterial och omgivande jord. Rapport nr 84.
- [20] Svensk Byggtjänst (1980) Betonghandboken utgåva 1
Svensk Byggtjänst (1990) Betonghandboken utgåva 2

Summary, conclusions and recommendations

Circumstances contributing to hydraulic fatigue during ramming of prefabricated piles.

According to this report, damage due to hydraulic fatigue or "water bursting" of concrete piles is linked with the following factors:

- * The presence of free water or groundwater in permeable soils.
- * Alternate major compressive and tensile stresses in the pile during piling, leading to fatigue of the concrete. The fatigue mechanisms in the concrete are enhanced by great pressures in the crack systems occurring in the process of alternate suction and expulsion of water.
- * The presence of through cracks, tributary cracks and microcracks.
- * The variation in crack width owing to initially induced stresses in the concrete due to temperature, shrinkage and volume changes resulting from hydration. Cracks decreasing in width towards the surface are particularly unfavourable. Unfavourable variation of the crack width - which is a normal condition in concrete piles - increases with growing cross-sectional dimensions.
- * Compressive and tensile strength as well as other mechanical properties of the concrete in the pile element.
- * The structural design of the pile, especially with regard to amount of reinforcement and to its distribution across the pile cross-section. Distance between stirrups.
- * Geotechnical conditions
- * Pile driving conditions.

Large compressive and tensile stresses tend to occur when driving long piles in relatively firm or silty cohesionless soil types, whereby the situation is characterised by high driving resistance from skin friction (normally due to negative pore water pressure) at the same time as the tip resistance is small or moderate. These conditions are typified by a high "quake" in relation to permanent penetration. (Figure 36). Propensity to the development of major tensile forces can be detected and monitored with the aid of modern stress wave measurement techniques.

Apart from the use of high strength concrete, the most effective measure for preventing hydraulic fatigue damage is suitable design of reinforcement over the cross-section of the pile. Theoretical considerations, observations during the current investigation as well as the field experiments carried out on the site at Mölndal Hospital clearly show that increased reinforcement and improved distribution thereof over the cross-section of the pile effectively reduces the risk of damage from hydraulic fatigue or water bursting. Suitable distribution of longitudinal reinforcement has a marked favourable effect on tensile crack width, crack width variation and force transfer in these cracks.

Other appropriate measures for avoiding this studied type of damage are any modifications of the driving conditions, leading to lower stresses and more efficient penetration during piling, such as greater ram weight and reduced height of fall .

The experiences from the bridges over Alssundet, Sannsundet, Piteälven, Ekolsund and other sites indicate that current minimum longitudinal reinforcement in accordance with Statens Planverk's (National Board of Physical Planning and Building) standards (1.2%) was insufficient under the prevailing severe piling conditions, particularly if reinforcement was not applied in the most suitable manner. At the Alssund bridge and the bridge over Sannsundet, the reinforcement amounted to 2% and 2.4% of the concrete cross-section and at the Piteälven bridge no less than 2.7% - i.e. considerably more than specified by Statens Planverk in the Swedish Building Code 1975:8. Albeit this, damage still occurred. At the Alssund bridge, damage was avoided by changing the design of reinforcement among other things.

Experience also indicates that the risk of damage during driving increases with increasing pile dimensions. This is in agreement with the "water bursting" mechanisms reported in this document.

From this report, it is evident that prefabricated concrete pile elements must be designed for the forces that actually occur during driving and in particular with regard to fatigue. Thus, one obvious consequence is that prefabricated standard piles cannot be used generally. When piling in water under unfavourable geotechnical conditions, sizing of the pile reinforcement must be made partly on the basis of other considerations than for standard piles. The information and recommendations expressed in this document may therefore serve as a guide. Modern stress wave measurement techniques offer back up experience and excellent possibilities of assessing the stresses in the pile material during driving.

It is the author's hope that designers and geotechnical engineers will be able to benefit from this report - when performing ground investigations or early stage test piling - in identifying piling situations where there is a potential risk of hydraulic fatigue. It is also hoped that if such risks are deemed to be present, the interested reader will be able to take preventive measures as guided by information in this report and the recommendations contained in it. Of these the following are summarised below:

Recommendations

Driving of piles

- * Perform test piling with stress wave measurements (PDA) for checking the pile driving gear as well as compressive and tensile stresses in the pile.
- * Reduce the intensity of the stress wave and extend its duration e.g. by reducing the height of fall, by increasing the ram weight, by using suitable cushioning pads etc.
- * Reduce the number of blows when driving the pile (e.g. by means of efficient driving equipment, increased ram weight etc).

Design of prefabricated pile segment

- * Use concrete with high impact strength (low water-cement ratio, high quality aggregate with good adhesive properties to cement paste etc).
- * Ensure that the curing conditions for the concrete are favourable.
- * Design the longitudinal reinforcement on the basis of the measured tensile forces according to stress wave measurement data. Thin bar dimensions should be sought.
- * Distribute the reinforcement as evenly as possible over the cross-section. In thicker piles, part of the reinforcement should be placed centrally in the cross-section. Thick cover to reinforcement is generally favourable.
- * Keep small distances between stirrups. Only spiral stirrups or closed rectangular stirrups should be used.