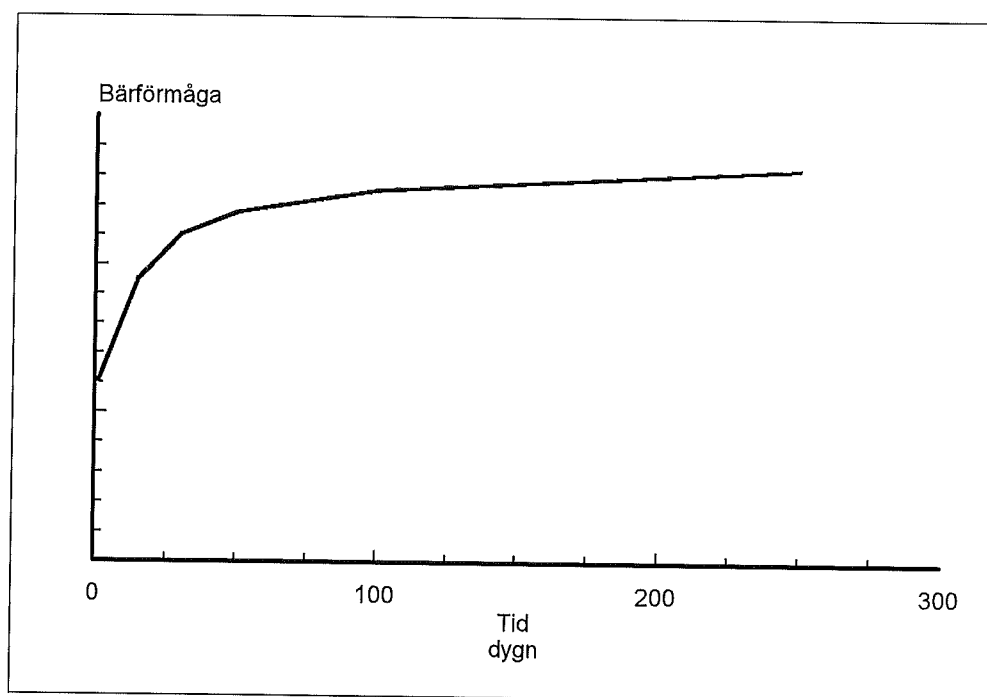


INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

FRIKTIONSPÅLAR - bärförmågans tillväxt med tiden



Björn Åstedt
Lars Weiner
Göran Holm

rapport 91

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 91

FRIKTIONSPÅLAR - bärförmågans tillväxt med tiden

Björn Åstedt
Lars Weiner
Göran Holm

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
851143-8 från Statens råd för byggnadsforskning till
Statens geotekniska institut, Linköping.

Linköping 1994

Rapport	IVA Pålkommisionen 581 93 Linköping
Beställning	Statens geotekniska institut Biblioteket Tel. 013-20 18 04 Fax. 013-20 19 14
ISSN	0347-1047
ISRN	IVA/PAL/R--94/91--SE
Redigering och layout	SGI, Avd för Information och Marknad
Upplaga	400 ex
Tryck	Tryck-Center, Linköping, juli 1994

Förord

För att studera tillväxten i bärformåga hos friktionspålar med tiden efter drivning, startades 1986 ett BFR-finansierat projekt på Statens geotekniska institut. (BFR projektnummer 851143-8). Arbetet inriktades inledningsvis på dels en litteraturstudie, dels försök att finna ett samband mellan tillväxt bestämd genom provbelastningar och jordens sammansättning och fasthet genom en studie av ett antal praktikfall. Resultatet presenterades hösten 1990 i en delrapport till BFR, som i stort sett motsvarar kapitel 3, 5 och 6 i denna rapport.

Det fortsatta arbetet kom framför allt att omfatta studier av tänkbara orsaker till tillväxten i bärformåga hos friktionspålar, samt utnyttjandet av stötvågsmätning på hejarsondstänger för bedömning av tillväxten. De omfattande försök som gjordes i Branäs finansierades dels med anslag från Vägverket och SGI, dels genom en samfinansiering med ett SBUF-finansierat forskningsprojekt rörande pålbarhet. Den slutliga rapporten lämnades in till BFR i februari 1992.

Inför publicerandet av föreliggande rapport, har BFR-rapporten förutom smärre justeringar kompletterats med ytterligare provbelastning av pålar i Branäs, finansierat av Pålkommisionen samt stötvågsmätning på hejarsondstänger i Mellsta, finansierade av Pålkommisionen, Vägverket och SGI. Pålkommisionen har vidare bistått med tryckning och distribution.

Under 1992 har utförts stötvågsmätning på hejarsondstänger i ytterligare två pålprojekt, nämligen bro över Öre älv och Igelstabron, för att studera bärformågens tillväxt. En sammanfattande redovisning av försök med stötvågsmätning på hejarsondstänger kommer att publiceras i en separat rapport från Pålkommisionen.

Avslutningsvis vill författarna tacka alla som har medverkat till rapportens tillkomst och då inte minst personal ute i Vägverkets organisation. Ett speciellt tack vill vi framföra till Håkan Eriksson, Leif Jendeby, Per Löfling och Eskil Sellgren som vid ett flertal tillfällen har delat med sig av sina erfarenheter. Rapporten har redigerats av Jan Lindgren, SGI.

Linköping i maj 1994

Björn Åstedt

Lars Weiner

Göran Holm

Innehållsförteckning

FÖRORD	
SUMMARY	6
SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER	9
1. INLEDNING	13
1.1 Syfte och genomförande	
1.2 Bakgrund	
1.3 Rapportens omfattning	
2. ORSAKER TILL BÄRFÖRMÅGANS TILLVÄXT	14
2.1 Inverkan av porvattenövertryck	
2.2 Teorier rörande packad jords åldrande	
2.3 Kornstudie	
2.4 Sammanfattning	
3. PÅLPROJEKT	28
3.1 Diskussion av felkällor	
3.2 Tillväxt med tiden av totala bärformågan	
3.3 Tillväxt med tiden av specifik bärformåga	
3.4 Formel för bärformågens tillväxt enligt Skov och Denver	
3.5 Tillväxt i bärformåga baserat på sonderingsresultat	
4. STÖTVÅGSMÄTNING PÅ HEJARSONDSTÄNGER	44
4.1 Inledning	
4.2 Provplats Branäs	
4.3 Provplats Orsa	
4.4 Provplats Mellsta	
4.5 Sammanfattning	
5. LITTERATURINVENTERING	57
6. PÅLPROJEKT I SVERIGE	68
6.1 Förutsättningar	
6.2 Branäs, väg 957 bro över Klarälven, Värmland	
6.3 Bredåker, Bro över Lule älv å väg 679, Norrbottens län	
6.4 Deltavägen - Sundsvall (Sörån, Strandbergstrännan)	
6.5 Fittja, Bro över Masmovägen för väg 588	
6.6 Kvissleby, Bro över Ljungan för väg 567	
6.7 Malung, väg 234 Bro över Västerdalälven, Kopparbergs län	
6.8 Mellsta, Bro över Dalälven å väg 70, Kopparbergs län	
6.9 Orsa, Bro över Ore älv för väg 100, Sandhed - Orsa	
6.10 Värnamo, Bro över Lagan å väg 27	
6.11 Västermalmskolan, Sundsvalls kommun	
7. LITTERATUR/REF. LISTA	119

Summary

The increase in bearing capacity of friction piles driven in silty to sandy soils has been studied in a literature review and in a survey of piling projects in Sweden. In one case, piles have been driven especially for the purposes of the research project. In addition, stress wave measurements on ram penetration rods have been performed in three of the reported piling projects. The research project has also sought reasons for the increase in strength by conducting literature studies and laboratory investigations.

In general, it has been found that:

- ☐ an increase in bearing capacity of friction piles in silt and sand has been documented in a large number of cases.
- ☐ the increase in bearing capacity takes place over a long period of time, several months after pile driving.
- ☐ the increase in bearing capacity is often of a considerable size. Depending on the type of soil, an increase of 25-75 % compared with the bearing capacity 24 hours after pile driving, has in many cases been recorded over a period of 1-90 days after pile driving.
- ☐ determinations of bearing capacity at more than two points after pile driving have been obtained in only a few cases, and the time sequence of the increase can therefore only be estimated.

A summary of the measured bearing capacity at different times after pile driving provides a general picture of the time sequence of the increase as shown in **Figure 1**.

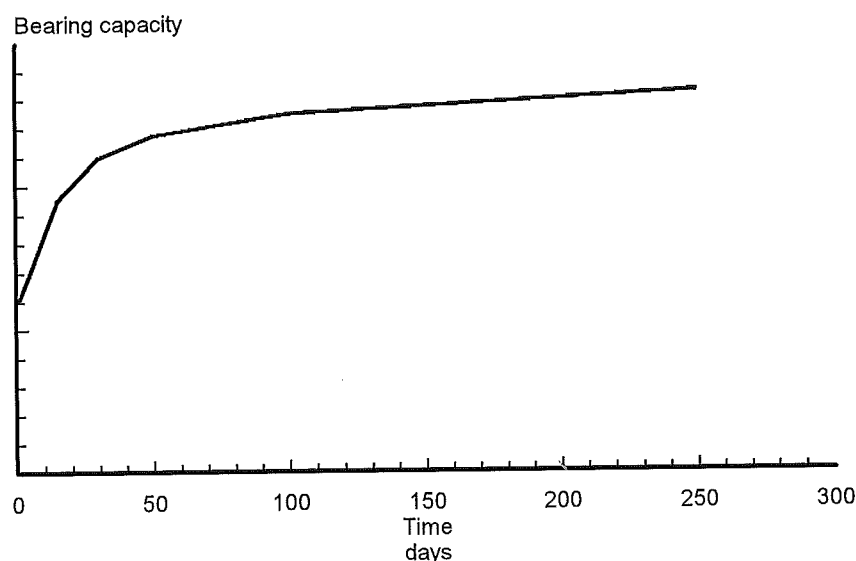


Figure 1. Time sequence of the increase in bearing capacity.

The percentage increase in bearing capacity is given in relation to the bearing capacity measured at redriving about 24 hours after initial pile driving. The bearing capacity of friction piles should not be determined earlier, and this is now generally accepted. The effects of the pore water pressure that builds up during pile driving are thereby eliminated.

The measured increases in specific bearing capacity (skin bearing capacity per unit area of the pile) obtained by CAPWAP analysis in different soils show that during a period of 1-90 days after pile driving, the average specific bearing capacity increased as follows:

- from 17 kPa to 30 kPa, i.e. 75 %, in silt
- from 54 kPa to 80 kPa, i.e. 50 %, in sand

A comparison with penetration resistance measured in ram penetration shows that in the studied projects, the larger increases in specific bearing capacity were obtained in soils with a ram penetration resistance of >10 blows/0.2 m. No clear relationships were found between penetration resistance according to the Swedish weight sounding method and increase in bearing capacity.

The starting point in evaluation of the increase in bearing capacity should be the end of the rapid increase that takes place during the initial hours after pile driving. Otherwise, an incorrect picture of the increase may be obtained. It is also important that the bearing capacity of the pile is mobilised during dynamic test loading, i.e. that the pile is driven enough related to the surrounding soil. The great majority of the piles studied in this report are considered to be mobilised.

Influence of the soil

The project attempted to identify the reasons for the increase in bearing capacity over time, which may be assumed to be due to physical and/or chemical processes in the ground water and soil. The influence of the soil has been studied in regard to relative density, grain size and grain shape, as well as chemical composition. Relative density and grain size have been studied with the aid of results from geotechnical investigations. The results are shown above. Grain shape and chemical composition were studied in soil samples from three of the documented piling projects with the aid of an electron microscope and image analysis system. The soil samples were taken at various depths below ground level where different increase in skin friction had been obtained. The grain analysis did not show any direct relationships with the increase in bearing capacity. However, it should be noted that various grain analyses were performed only on a small scale and must be regarded as pilot studies.

Compaction of sand

Literature studies were also made on the influence of compaction of sand. They show that compaction immediately reduce the penetration resistance of the sand. However, the penetration resistance increases with time and finally becomes higher than before compaction. Explanations for these changes include both friction forces and cohesive forces, but the theories have not been validated to any great extent. The above influence on the

soil and its consequences may be likened to processes in the soil around the pile during pile driving, when a softer zone close to the pile may be created, surrounded by a firmer zone. This firmer zone leads to an arching effect around the pile. The arching effect probably decreases with time, producing greater horizontal stresses against the pile and increasing specific bearing capacity.

Stress wave measurements on ram penetration rods

Stress wave measurements on ram penetration rods have been performed at several points in time after pile driving in order to determine the increase in bearing capacity. A comparison with corresponding measurements in piles indicates that ram penetration measurements are a practical method for predicting the increase in bearing capacity of piles.

Geotechnical investigations for piling projects in soils where an increase in bearing capacity can be expected should be complemented with stress wave measurement on ram penetration rods on at least two occasions after pile driving. This provides a comparatively inexpensive investigation of whether an increase in bearing capacity can be expected. In those cases where the results indicate a considerable increase in bearing capacity, test pile driving is performed, with dynamic test loading on two redriving occasions. Redriving is performed after 24 hours and after the time when a considerable part of the increase in bearing capacity is considered to have taken place. The ram penetration measurements can be used as basis for choosing the time for redriving of test piling.

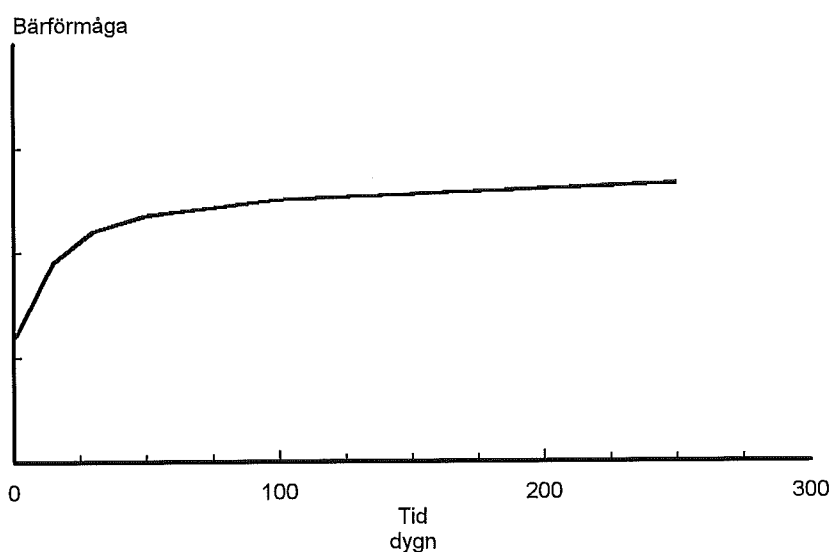
Sammanfattning och slutsatser

Tillväxten i bärförmåga hos friktionspålar slagna i siltiga till sandig jordar har studerats genom en litteraturinventering samt genom studium av utförda pålningsprojekt i Sverige. I ett fall har pålar slagits speciellt för forskningsprojektet. Dessutom har stötvågs_mätning på hejarsondstänger utförts på tre av de redovisade pålprojekten. Man har även inom projektet sökt finna orsaker till tillväxten genom såväl litteraturstudier som olika laboratorieundersökningar.

Vid litteraturinventeringen har 12 artiklar studerats, såväl utländska som svenska. 15 utförda pålningsprojekt i Sverige där tillväxten i bärförmåga har utnyttjats/studerats har påträffats. 11 av dessa har medgett en mer detaljerad analys av tillväxten i bärförmåga. Sammantaget framgår följande

- ☐ tillväxt i bärförmåga hos friktionspålar i silt och sand har dokumenterats i ett stort antal fall.
- ☐ tillväxten i bärförmåga sker under lång tid, flera månader efter drivning.
- ☐ tillväxten i bärförmåga är ofta av betydande storlek. I många fall har en tillväxt av 25-75 %, beroende på jordart, jämfört med bärförmågan 1 dygn efter drivning, konstaterats under tidsperioden 1-90 dagar efter drivningen.
- ☐ bestämningar av bärförmågan vid mer än två tidpunkter efter drivningen finns endast i några fall varför tillväxtens tidsförlopp endast kan uppskattas.

En sammanställning av uppmätta bärförmågor vid olika tidpunkter efter drivning ger en allmän bild av tillväxtens förlopp enligt **Fig. 1**.

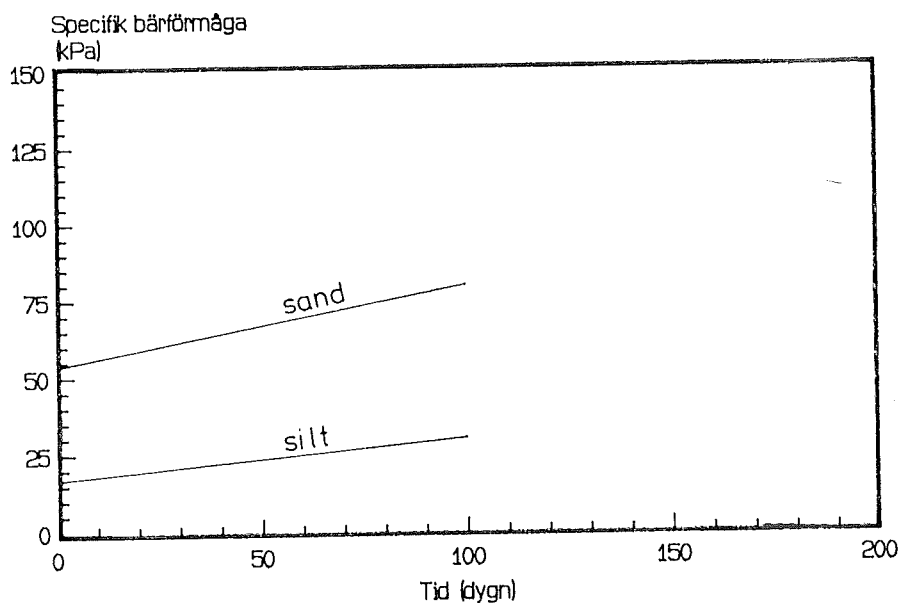


Figur 1. Tillväxtens tidsförlopp.

Bärförmågans procentuella tillväxt anges i relation till bärförmågan uppmätt vid efterslagning cirka ett dygn efter drivning. Bärförmågan hos friktionspålar bör bestämmas tidigast cirka ett dygn efter drivningen, vilket också är praxis idag. Härvid elimineras inverkan av de porvattenövertryck som byggs upp under drivningen.

Konstaterade ökningar i specifik bärförmåga (mantelbärförmåga per ytenhet påle) erhållen genom CAPWAP-analys i olika jordar visar att under tidsperioden 1-90 dagar efter drivningen har i medeltal den specifika bärförmågan (se även **Fig. 2**).

- i silt ökat från 17 kPa till 30 kPa, dvs 75 %
- i sand ökat från 54 kPa till 80 kPa, dvs 50 %

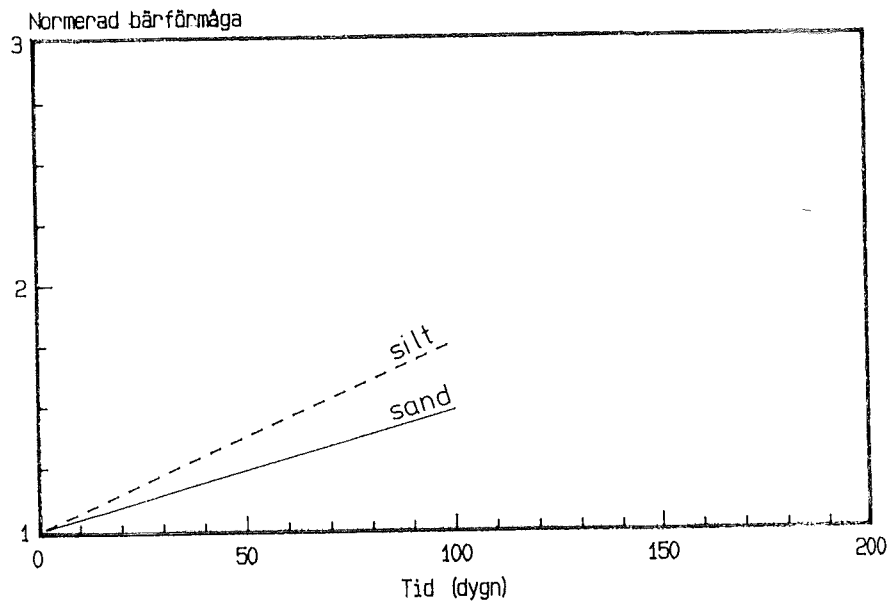


Figur 2. Medelvärde för specifika bärförmågans tillväxt i silt och sand.

Uppmätt bärförmåga normerad i relation till bärförmågan vid första provbelastningen, dvs den procentuella tillväxten, illustreras i **Fig. 3**.

En jämförelse med sonderingsmotstånd enligt hejarsond visar att i de undersökta projekten har de större tillväxterna i specifik bärförmåga erhållits i jordar med hejarsonderingsmotstånd $>10 \text{ sl}/0,2 \text{ m}$. Mellan viktsonderingsmotstånd och tillväxt i bärförmåga har ej konstaterats några tydliga samband.

Vid utvärdering av tillväxt i bärförmåga bör den utgå från den tidpunkt efter drivning då de första timmarnas snabba ökningen av bärförmågan har upphört. Annars kan en felaktig bild av tillväxten erhållas. Viktigt är också att pålens bärförmåga mobiliseras vid den dynamiska provbelastningen, d.v.s. pålen slås loss från den omgivande jorden. Sjunkningen vid mätslaget samt bärförmågans fördelning längs manteln ger en uppfattning hurvida pålen är mobiliserad. Det stora flertalet av de i denna rapport studerade pålarna bedöms också vara mobiliserade.



Figur 3. Procentuell tillväxt av specifika bärförmågan i silt och sand.

Jordmaterialets inverkan

Inom projektet sökte man finna orsaker till bärförmågans tillväxt med tiden. Den kan antas bero på fysikaliska och/eller kemiska processer hos grundvatten och jordmaterialet. Jordmaterialets inverkan har studerats vad gäller lagringstäthet, kornstorlek och kornform samt kemisk sammansättning. Lagringstäthet och kornstorlek har studerats med hjälp av resultat från geoundersökningar. Resultaten har presenterats ovan. Kornform och kemisk sammansättning studerades för jordprover från provplatserna för tre av de dokumenterade pålprojekten, med hjälp av elektronmikroskop och bildanalyssystem. Jordproverna var tagna på några olika djup under markytan där man erhållit olika storlekar på tillväxten av mantelfriktionen. Kornanalysen visade inte på några direkta samband med tillväxten i bärförmåga. Det bör dock påpekas att olika kornanalyser endast utförts i liten skala och är att betrakta som inledande studier.

Packning av sand

Dessutom har litteraturstudier gjorts rörande inverkan av packning av sand. Dessa visar att packningsarbete orsakar ett minskat sonderingsmotstånd i sanden direkt efter packningen. Sonderingsmotståndet ökar därefter med tiden och blir till slut högre än innan packningen. Förklaringar kring vad som orsakar ovan nämnda förändringar omfattar såväl friktionskrafter som kohesiva krafter, men teorierna är inte belagda i någon större omfattning. Ovanstående påverkan på jorden och dess konsekvenser skulle kunna liknas vid vad som sker i jorden kring pålen vid slagning. Vid påslagning kan en lösare zon runt pålen skapas och där utanför en fastare zon. Denna fastare zon ger en valvverkan runt pålen. Med tiden sker troligen en minskning av valvverkan, vilket medför ökande horisontalspänningar mot pålen och större mantelbärförmåga.

Stötvågsmätning på hejarsondstänger

Stötvågsmätning på hejarsondstänger har utförts vid flera tidpunkter efter drivning för

bestämning av tillväxt i bärformåga. Jämförelse med motsvarande mätningar på pålar pekar på att hejarsondmätningar är en användbar metod för att förutsäga tillväxt av pålars bärformåga. Vid utnyttjandet av hejarsondmätningar kan man erhålla indikationer på om tillväxt av bärformågan sker, på vilka djup den erhålls, samt få en ungefärlig uppfattning om dess storlek.

Geoundersökningarna för pålprojekt i jordar där tillväxt eventuellt kan förväntas bör kompletteras med stötvågsmätning på hejarsondstänger vid minst två tillfällen efter drivning. Man erhåller då en förhållandevis billig undersökning om tillväxt kan förväntas på pålarna. I de fall där resultaten pekar på att en betydande tillväxt av pålars bärformåga kan förväntas utförs en provpålning omfattande dynamisk provbelastning vid två efterslagningar. Efterslagningarna utförs dels efter 12-24 timmar, dels efter den tid då man kan förvänta att en betydande del av tillväxten har erhållits. Resultaten från hejarsondmätningarna kan ge underlag för val av tidpunkt för de dynamiska provbelastningarna av provpålar.

1. Inledning

1.1 Syfte och genomförande

Forskningsprojektets syfte var att öka kunskaperna om tillväxten med tiden för friktionspålars bärförmåga, dvs matelburna pålar i silt och sand. Såväl storleken av tillväxten som tidsutvecklingen studerades i olika friktionsjordar.

Projektet baseras på bärförmågebestämningar genom såväl statiska som dynamiska provbelastningar vid olika tidpunkter efter drivningen. En jämförelse mellan resultat av geotekniska och geologiska undersökningar och bärförmågetillväxt görs också för att skapa underlag för att förutsäga tillväxten hos bärförmågan. Dessutom har stötvågsmätning på hejarsondstänger utförts för att studera tillväxten i bärförmåga.

1.2 Bakgrund

Under senare år har bärförmågan hos friktionspålar bestämts främst genom dynamisk provbelastning och inte som tidigare endast genom statisk provbelastning. Dynamisk provbelastning, som är mycket enklare att utföra och mindre kostsam, har givit möjlighet att utföra provbelastningar i större omfattning och vid olika tidpunkter efter drivning. Provbeltastningar utförda efter olika lång tid efter drivningen har visat att bärförmågan hos friktionspålar ökar med tiden efter drivningen i mycket större omfattning och under längre tid än vad som tidigare ansetts gälla. Denna ökning av bärförmågan hos friktionspålar har utnyttjats vid flera pålningsprojekt. Härvid har stora kostnadsbesparingar gjorts genom minskade pållängder och minskat slagningsarbete.

1.3 Rapportens omfattning

Rapporten omfattar:

- ☐ **Studie av orsaker till tillväxt i bärförmåga.**
Litteraturstudie, labundersökningar samt diskussion.
- ☐ **Resultat från geundersökningar kontra tillväxt.**
Jämförelser mellan resultat från geundersökningar och påvisade förändringar i specifik bärförmåga.
- ☐ **Försök med stötvågsmätning på hejarsondstänger.**
Jämförelse med motsvarande resultat från propålning.
- ☐ **Litteraturinventering av praktikfall.**
Utländsk och svensk litteratur.
- ☐ **Praktikfall i Sverige.**
Inventering av pålningsprojekt i vilka tillväxten i bärförmåga hos friktionspålar studerats/utnyttjats.

2. Orsaker till bärförmågens tillväxt

Ett syfte med projektet var att försöka hitta orsakerna till den tidsberoende tillväxten av pålars bärförmåga. Detta fenomen måste orsakas av fysikaliska och/eller kemiska processer. I detta kapitel diskuteras ett antal tänkbara orsakande faktorer. I andra kapitel presenteras jämförelser mellan tillväxten av bärförmåga och jordart, eller jordens fasthet.

2.1 Inverkan av porvattenövertryck

En teori till bärförmågens tidsberoende tillväxt med tiden hos friktionspålar är att den orsakas av avgången av porvattenövertryck utbildat under neddrivningen av pålarna. I kapitel 5 framförs dock tvivel mot denna tanke av Authier och Samson (1985) och Tavenas (1970).

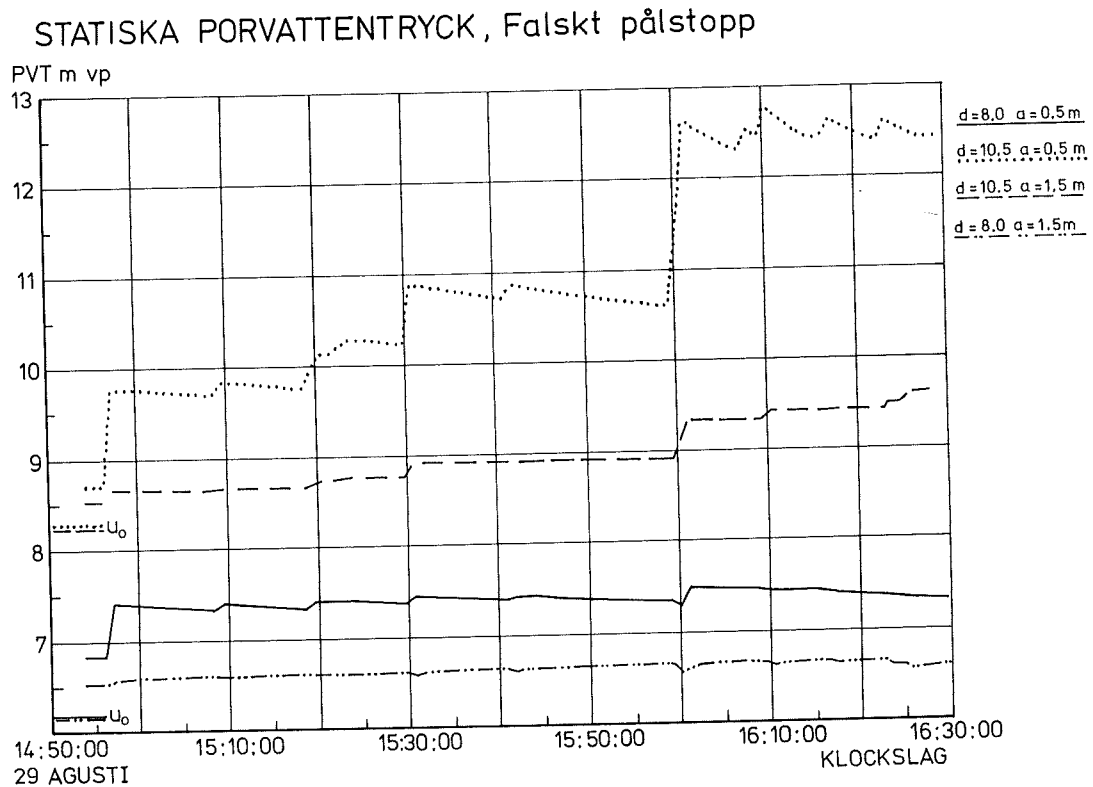
I pålprojektet Deltavägen, Sörån (se kapitel 6.4.3) genomförde SGI porttrycksmätningar under neddrivningen av nio pålar. Porttrycksgivarna var placerade på 15 och 25 meters djup och i horisontalled en meter från respektive påle. Mätningarna under slagningen visade emellertid endast ytterst små porvattenövertryck, vilka dessutom avklingade snabbt.

I samband med forskning kring falskt pålstopp har SGI (Möller 1991) utfört bl.a. mätningar av det statiska porvattentrycket under neddrivning av en provpåle. Provpålen var av stål med diametern 101,6 mm. För att öka friktionen mellan jorden och pålen limmades sand på pålens mantelyta. Försöken utfördes på två provplatser, dels i Fittja dels i Linköping.

Provplatsen i Fittja var belägen i närheten av de i kapitel 6.5 redovisade provpålarna P3 och P4. Jordlagerföljden utgjordes av i stort sett lös till medelfast sand, ibland siltig eller grusig. Pålen slogs till ett djup av 10,5 m. På två nivåer, 8,5 och 11 - 11,5 m under markytan var tre porttrycksgivare installerade på avståndet 0,5, 1,0 och 1,5 m från pålen. De utförda mätningarna visade endast på små kortvariga förändringar av porttrycket, just vid själva slagningen.

I Linköping utgjordes jordlagerföljden av 5 - 6 m torrskorpelera och lera följt av 8 m silt (enligt 1953 års klassificeringssystem, mjällig finmo), bitvis lerig. Silten är att beteckna som medelfast med undantag av ett fast intervall mellan 9,5 - 11,5 m. Provpålen nedslogs till ett djup av 14,5 m. På två nivåer 8,0 och 10,5 m under markytan placerades vardera två porttrycksgivare 0,5 respektive 1,5 m från pålens mantelyta. Efter det att pålspetsen hade nått ned till djupet 12,2 m flyttades de övre givarna ned till djupet 12,7 m under markytan.

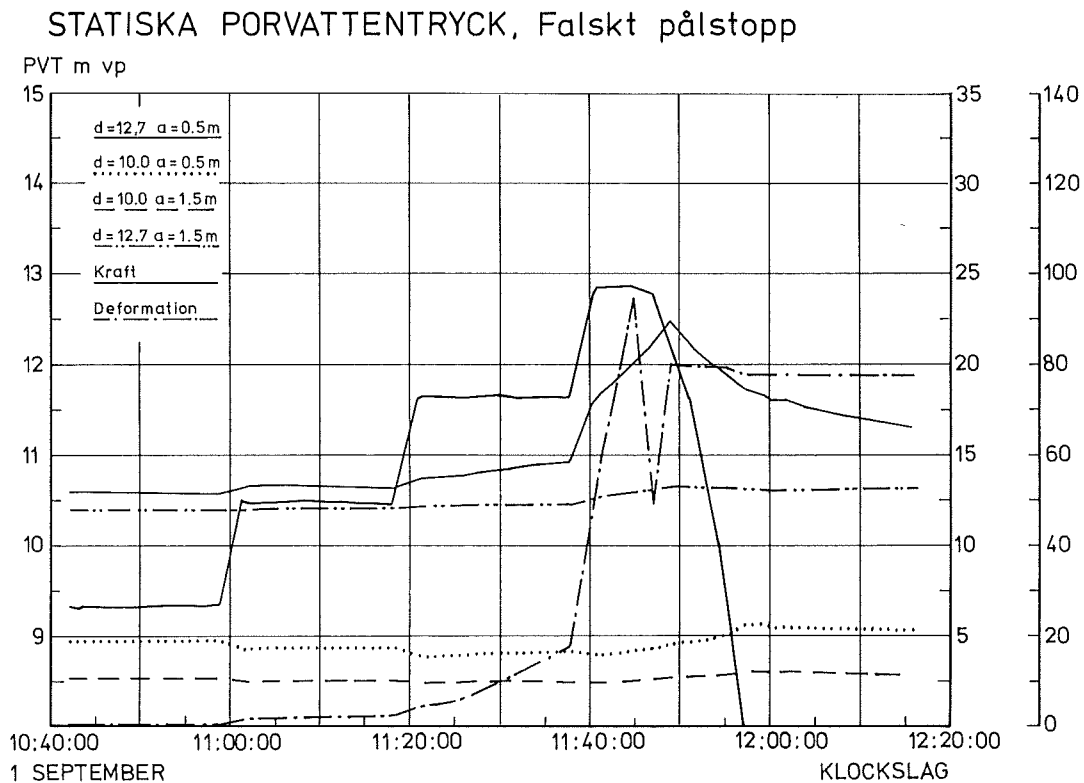
Till skillnad från i Fittja erhöles en betydligt kraftigare portrycksförändring vid slagningen. Främst var det märkbart i de intervall som innehöll lera där också avklingningstiden var betydligt längre. Således var tiden för 25 % avklingning i fast lerig silt 8,5 timmar och i medelfast silt 55 min. I **Fig. 2.1** ges exempel på hur porvattentrycket byggs upp under en slagserie (10-11 slag) från den jungfruliga nivån.



Figur 2.1 Exempel på mätning av porvattentrycket under drivning av provpåle i lerig silt. Pålspe-
sens djup under markytan mellan 9,2 - 10,0 m. Uppe till höger anges portrycksgivarnas
placering i djupled (d) och avstånd från pålens mantelyta (a). (Möller 1991)

Under uppehåll i drivningen provbelastades pålen även statiskt. Intressant att notera är att porvattentrycket närmast pålen påverkades kraftigt även vid denna typ av provbelastning, se **Fig. 2.2**. En dylik portrycksökning kan eventuellt medföra att det vid statisk provbelastning erhållna värdet på bärförmågan är lägre än det verkliga.

Ovanstående resonemang visar att avgången av porvattenövertryck inte bör vara någon förklaring till den tidsberoende tillväxten av bärförmågan, som sker efter tiden ett dygn från slagningen. Samtidigt visar dock försöken i Linköping att i mycket finkorniga jordar kan inverkan av förhöjda porvattentryck, åtminstone veckan närmast efter slagningen, inte uteslutas.



Figur 2.2 Porvattentryckets variation under en statisk provbelastning. Pålspetsen 12,25 m under markytan. (Möller 1991)

2.2 Teorier rörande packad jords åldrande

En möjlig väg till problemets lösning kan vara att inte enbart titta på vad som händer i jorden vid pålning utan att istället generellt studera hur jord som har utsatts för en störning förändras med tiden. Det som inträffar i jorden när en påle drivs ner, sönderslagning av befintlig jordlagerstruktur och därmed kornkontakter samt en viss packning, är till stora delar detsamma som sker när exempelvis en naturligt eller artificiellt lagrad jord packas och sedan för en tid lämnas utan påverkan. En litteraturstudie rörande detta ämnesområde visar att fenomenet med "åldrande" friktionsjorðar har uppmärksamats åtminstone sedan fyrtioalet.

Ett flertal artiklar påträffades, ett ännu större antal utgjorde referensmaterial till dessa, men tyvärr har det inom ramen för projektet inte varit möjligt att genomföra en fullständigt heltäckande litteraturstudie. Nedan ges enbart en summarisk sammanfattning av den studerade litteraturen.

Man har i flera fall observerat hur en jords sonderingsmotstånd ökar med tiden efter att ha blivit utsatt för någon störning, t ex packning eller omlagring. Denna fasthetökning har många gånger skett utan någon ökning av densiteten (Mitchell och Solymar 1984).

Mitchell påpekar vidare att även ren sand kan uppvisa sensitivitetsliknande egenskaper. Vid ett dammbygge utfördes packning i sand. Det visade sig då att spetstrycksmotståndet (CPT) var lägre strax efter packning än före trots att man med packning erhållit en ökad lagringstäthet. CPT-resultat från senare tillfällen visade på att en avsevärd ökning av sonderingsmotståndet hade erhållits efter en längre tidsperiod. Andra liknande utförda undersökningar visar enligt Mitchell på att packning av en vattenmättad ren sand kan orsaka en minskning av sonderingsmotståndet. Minskningen följs därefter av en tidsberoende ökning av fastheten till värden högre än innan packningen.

Mitchells förklaring till detta skeende är att sanden direkt efter initieell lagring uppträder som ett material utan bindningar mellan kornen. Dylka bindningar utbildas sedan under de närmaste veckorna eller månaderna därefter.

Jendeby (1990) redogör för liknande iakttagelser där, efter packning med vibrovinge av sand i två testytor, sonderingsmotståndet vid spetstryckssondering ökade mellan mättillfällena ett dygn och tre månader efter packningen. Däremot noterades ingen ökning av sättningsmodulen vid dilatometermätning. De uppmätta porövertrycken sjönk mycket snabbt i samband med att vibrovingen drogs upp.

Teorin förs fram även av andra forskare och ett stort antal förslag till bidragande orsaker finns. Dessa kan grovt hänföras till två olika modeller, nämligen ökade friktionskrafter mellan kornen eller uppkomsten av kohesiva krafter. Många gånger är gränsen mellan de bägge begreppen svår att bestämma.

2.2.1 Kohesiva krafter

Den kohesiva modellen förutsätter således kohesion även i sand, vilket förklaras med att redan i nyligen avsatt/packad sand existerar de processer, vilka ingår i litiferingen (hårdnandet) till sandsten. Det är givetvis fel att börja tala om någon form av diagenes (bergartsbildning) redan på detta stadium, men i kornkontakterna börjar redan nu en del korn att gå i trycklösning för att fällas ut i angränsande porutrymme. Teorin behandlas med utgångspunkt från praktiska fall av bl.a. Bely m.fl. (1975) och av Mitchell (1986). Båda utnyttjar elektronmikroskopfotografier visande sandkorn med rå och fjällig yta som antas vara resultatet av tryckutlösning och återutfällning.

Kohesionsmodellen har vidare studerats i laboratorieförsök av bl.a. Denisov (1961) som gjorde skjuvförsök med ett sandkorn på en kvartsplatta, och av K Lee (1977) och Miura (1978). De två sistnämnda utsatte sand för triaxialförsök för att därefter studera den komprimerade sandens sönderfall. De tryck som användes motsvarar emellertid effektivspänningar vilka påträffas först på flera hundra meters djup. Direkta jämförelser med pålningsförhållanden är därför svåra att göra.

Andra teorier som tas upp hävdar att förekomsten av järnoxid på kvartskornen kan verka hämmande på deras förmåga att gå i trycklösning, liksom att amorft kisel lättare skulle gå i lösning än kristallint. Känt är dessutom att fältspater löser sig i vatten redan vid normalt tryck och temperatur, om än i synnerligen liten omfattning. Fältspaterna har dessutom lägre hårdhet än kvarts.

Ytterligare teorier är tillämpbara för såväl den kohesiva modellen som friktionsmodellen. Sålunda konstatera Bely m.fl. (1975) att kornens morfologi styr såväl de fysisk/mekaniska som de fysisk/kemiska förhållandena emellan. En annan teori är att jordens tidsberoende hårdnande är större i osorterade jordar, d.v.s. där jorden är kompaktare uppbyggd och den totala kornkontaktytan större.

2.2.2 Friktionskrafter

Tanken att friktionskrafter mellan kornen skulle vara den avgörande faktorn förs fram av Schmertmann (1989), varvid han stödjer sig på försök gjorda i en av honom själv framtagen försöksmetod, s.k. IDS-test. Försöket är till stora delar identiskt med triaxialförsök, där ett sandprov utsätts för konstant deformation. Skillnaden är att Schmertmann under försökets gång momentant låter ändra porttrycket och därmed effektivtrycket. Härvid erhålles två spänningskurvor för en och samma deformation. När spännings/deformationsskurvan har stabiliserats, höjs så porttrycket igen. På detta sätt kan en Mohr-Coulombs brottlinje konstrueras och värdena på jordens hållfasthetsparametrar bestämmas vid det då rådande deformationsförhållandet. Proceduren kan sedan upprepas för olika deformationer.

Genom att göra sina tester med prover av samma sand men inpackad vid olika tillfällen visar han att kohesionskraften förblir opåverkad av provets ålder. Men han förnekar alltså inte förekomsten av kohesiva krafter i sand utan bara att de skulle tillta med tiden.

I samband med detta kan Duseault och Morgenstern (1979) studeras. Författarna har i fyra fall av visserligen mycket gammal sand (prover från Jura till preglacial tid) men ändå olitifierad erhållit skjuvhållfasthetens värde till noll i skjuvboxförsök. Trots detta har man i elektronmikroskop kunnat konstatera såväl uppträdandet av trycklösningar som återutfällning. Däremot har det saknats cementfylld mellan kornen.

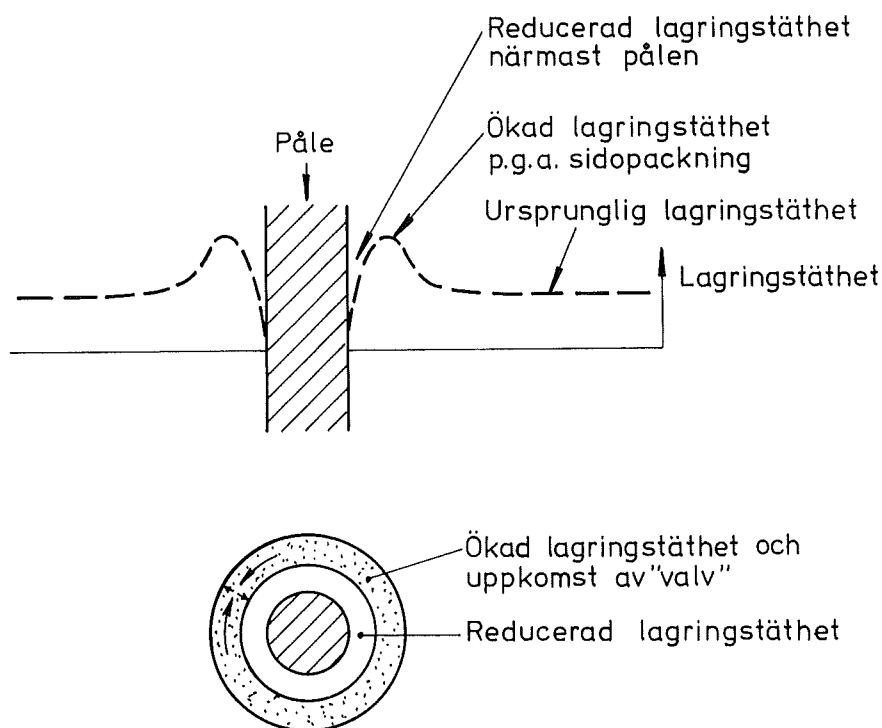
En tänkbar teori som ligger lite utanför de övriga berörs av Robinsky och Morison (1964). Genom att slå ned (eg. trycka ned) modellpålar i en pålbox lyckas man visa att sandens densitet allra närmast pålen är lägre efter drivning än före. Däremot har densiteten ökat i en zon utanför samt nere runt pålspetsen. Författarnas förklaring är att sand skjuvas loss av pålen och dras med ned.

I stället för denna förklaring kan man enligt Viberg (1991) tänka sig att pålen under nedslagningen rör sig i sidled vid varje slag. Sidledsrörelsen medför packning av materialet vid sidan av pålen. Genom att pålen återgår till "raklinjen" efter varje slag har det vid slagningens avslutande närmast pålen bildats en relativt lucker zon, som i sin tur är omgiven av ett fastare lager som kan ta upp tangentiella spänningar. Därigenom hålls normaltrycket mot pålen relativt lågt.

Den övre figuren i **Fig. 2.3** visar hur lagringstätheten på grund av sidopackning ökar ett stycke från pålen, och hur lagringstätheten i en zon närmast pålen minskar jämfört med ursprunglig lagringstäthet.

Den undre figuren visar det bildade "valvets" läge. Direkt efter pålslagning råder relativt

höga tangentiella tryckspänningar och relativt små radiella spänningar i valvet. Valvet är emellertid instabilt och kollapsar successivt med ökande radiella spänningar som följd och därmed också ökande bärförmåga hos pålen.



Figur 2.3. Illustration av hypotes angående friktionspålars tillväxt med tiden på grund av successivt kollapsande valv.

Teorierna är således många och mycket mer finns sannolikt att hämta. Men man måste dock vara försiktig med att dra paralleller mellan uppträdandet hos packad sand i en jorddamm och sand packad i laboratorieförsök vid tryck motsvarande 600 meters djup. Ett modellförsök är bara ett försök att efterlikna det naturliga förhållandet.

2.3 Kornstudie

Som tidigare nämnts måste vissa fysikaliska och/eller kemiska processer existera för att förklara tillväxten. På samma sätt måste vissa fysiska och kemiska betingelser ligga till grund för dessa processer, och dessa förutsättningar måste återfinnas antingen hos grundvattnet (endast kemiska) eller i jordmaterialet. Vad det gäller det sistnämnda kan detta endast studeras ur tre synvinklar, jordpartiklarnas inbördes förhållanden, d.v.s. jordens täthet, kornens kemiska sammansättning samt deras storlek och morfologi. Av dessa faktorer har tätheten redan studerats m h a de klassiska sonderingsmetoderna, utan att något samband har funnits. Även kornstorleken har studerats med samma resultat.

Att genomföra några mer detaljerade studier ryms inte inom ramen för projektet. Däremot är det av intresse att försöka utröna några lämpliga undersökningsmetoder inför fortsatta studier samt även om så är möjligt finna tendenser till samband mellan t.ex

sandkornens rundningsgrad och tillväxten av bärformågan, i syfte att kunna förutsäga tillväxten av bärformågan.

I de studerade artiklarna hade man använt sig av elektronmikroskopering och röntgen. Härigenom kan i första hand de ingående sand- och siltkornens storlek och form studeras, men med röntgen låter sig även en kemisk analys utföras. Tyvärr är metoderna relativt dyr, speciellt om kemisk analys samtidigt skall utföras. I detta projekt har därför analys i elektronmikroskop (ej röntgen) endast provats på tre prover.

2.3.1 Kemisk analys

En enkel och snabb metod som ändå ger en god uppfattning om den kemiska sammansättningen är mineralkornsräkning. Härvid klassas ett statistiskt godtagbart antal mineral-korn, genom bedömning i vanligt mikroskop, eller bättre i stereomikroskop, in i olika mineralgrupper. Emellertid var metoderna i vårt fall inte tillämpbar för korn i siltfraktionen eftersom maximal förstoring i stereomikroskop (80 ggr) inte räckte och 400 gångers förstoring i vanligt mikroskop endast gav en svart-vit bild. Dessutom vill silten gärna klumpa ihop sig i aggregerat. För finsand användes 50-60 gångers förstoring och för mellansand 30 gångers förstoring. Enligt praxis från gruskornsräkning räknades 200 korn i varje fraktion.

I silt och sand utgörs vanligen majoriteten av kornen av kvarts. Då kvarts har en kom-paktdensitet på $2,65 \text{ t/m}^3$ kan indikationer på en mer ovanlig kemisk sammansättning erhållas genom just bestämning av kompaktdensiteten.

2.3.2 Analys av kornmorfologi

Elektronmikroskopering: Undersökningarna utfördes i ett Link SEM-EDX mikroskop i förstoringar från 100 gånger upp till 1500 gånger. Studierna inriktades på en karaktäri-sering av ytstruktur och kornform. De här redovisade undersökningarna har utförts av SGU, Lund.

Metoden användes på ett prov från Branäs och två från Orsa.

Mätning av rundningsgrad: Innovativ Vision AB i Linköping har tagit fram ett bild-mätningssystem kallat LabEye. Systemet är tillämpbart för såväl mätning i satellitbilder som i vårt fall av siltkorn.

Kortfattat består utrustningen av ett mikroskop till vilken en stillbildskamera är kopplad. Fotografierna från kameran förs sedan upp på en PC-skärm. De på skärmen synliga kornen kan sedan mätas med avseende på längd i x- och y-led, area, omkrets, ljusintensi-tet etc. I fall ett eller flera korn ligger ihop, vilket ofta är fallet i silt, kan operatören manuellt utesluta kornen från räkning eller särskilja dem på frihand.

Med utgångspunkt från de mätta parametrarna kan ett antal enheter beräknas. Vi kom att använda oss av en redan existerande formel som karakterisera rundningsgraden genom angivandet av en s.k. formfaktor $F = (\text{omkrets} \cdot \text{omkrets}) / (4 \pi \cdot \text{arean})$, vilket för en

cirkel ger värdet 1 och för en kvadrat $4/\pi$.

Fördelarna med kornanalys i LabEye är att metoden är mycket snabb. Gentemot elektronmikroskopering är dessutom tiden för preparatens förberedande väsentligt mycket kortare.

Nackdelarna är att systemet bara mäter i två dimensioner, men att mäta i tre dimensioner som låter sig göras på grus, torde vara omöjligt i sand och silt. För att kompensera mot ovanstående måste en desto större mängd korn analyseras. Vid mycket stora förstoringar blir dessutom kanterna på kornen diffusa och det blir då nödvändigt att skärpa till kanterna på konstlad väg. Detta innebär att för korn i siltfraktionen går en del av den fina ytstrukturen förlorad.

Proverna analyserades med olika fraktioner, omfattande vardera cirka 200 korn, var för sig. Fördelningen av värdena för formfaktorn kan anses vara lognormalfördelade. De nedan redovisade analyserna utfördes på institutionen för Byggmateriell, Lunds Tekniska Högskola.

2.3.3 Resultat av kornanalys

I det nu aktuella projektet har tre pålprojekt ägnats speciell uppmärksamhet, Branäs, Mellsta och Orsa varvid bl.a. kornanalys har utförts på upptagna prover. Bakgrunden till dessa projekt redovisas i kapitel 6.2, 6.8 och 6.9.

■ Provplats Branäs

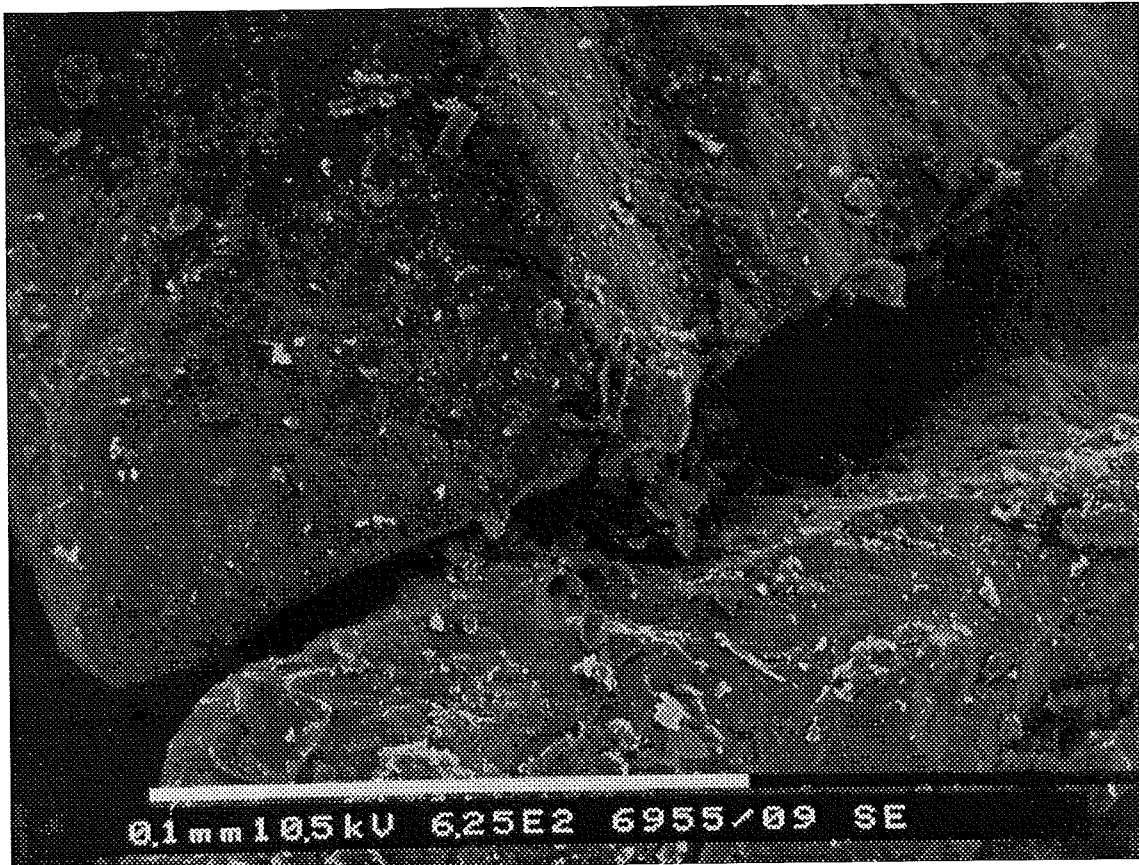
Arbetet underlättades av att redan tagna jordprover kunde erhållas från vägförvaltningen i Värmland. Jorden på pålplatsen består nästan genomgående av silt.

För studier valdes dels ett prov taget på djupet 12,4 - 13,0 meter, där tillväxten hade varit obefintlig, samt ett prov från nivån 17,4 - 18,0 meter, där specifika bärförmågan hade tredubblats.

Sedimentationsanalys visade att materialet bestod av ren silt och då framför allt mellan-silt. Kompaktdensiteten var för de båda proverna lika, 2,73 resp. 2,74 t/m³.

Undersökning i elektronmikroskop utfördes på ett bulkprov från nivån 17,4 - 18,0 m under markytan. Provet innehöll en hög andel kantigt material av lermineral och finkornig silt som dels satt fästade på de större kornens ytor, se **Fig. 2.4**, dels förekom mellan kornen. Synbarligen är det mekaniska krafter som orsakar vidhäftningen. Det är troligt att denna vidhäftning kan medföra en höjning av friktionsförmågan mellan siltkornen.

Eftersom mellansilt var den förhärskande fraktionen utfördes endast mätning av rundningsgraden på korn i denna fraktion. För intervallet 12,4 - 13,0 meter erhöles formfaktorn 1,30 med standardavvikelsen 0,16 och för intervallet 17,4 - 18,0 meter erhöles värdena 1,28 respektive 0,15, se **Fig. 2.6 a-b**. Undersökningarna visar att någon nämnvärd skillnad i formfaktor inte erhöles mellan proven från det djup där tillväxt uppmätts, respektive inte uppmätts..



Figur 2.4. I 625 gångers förstoring visas hur framför allt lerpartiklar sitter fästade genom mekaniska krafter på ett sandkorn. Varje skalstreck representerar 0,1 mm. Foto SGU.

■ Provplats Mellsta

I stöd 6 (påle P1 och P2), på norra älvstranden, skedde tillväxten av bärformågan framförallt inom djupintervallet 12-18 meter under markytan. Av denna anledning togs med provtagare Ø 50 mm prover på nivåerna 8,0-8,3, 15,0-15,3 och 20,0-20,5 meter.

På andra sidan älven i stöd 1 (P3 och P4) hade bärformågan för båda pålarna tillvuxit mellan djupen 10 och 15 meter under markytan, varför ett prov togs inom detta intervall på nivån 13,5-13,8 och ett annat för jämförelse skull på nivån 20,0-20,3 meter under markytan.

Siktanalys av proverna visade att dessa i stöd 6 utgjordes av ensorterad finsand medan sanden i stöd 1 innehöll cirka 30 % mellansand.

Några beräkningar av kompakt densiteten gjordes inte.

Mineralkornsräkning gav följande resultat:

Nivå	Procentuellt mineralinnehåll					
	Fraktion	Kvarts	Fältspat	Glimmer	Övriga	
<i>Stöd 1</i>						
13,5-13,8	Saf	40	33	4	23	Tillväxt
20,0-20,3	Saf	61	27	1	11	
	Sam	27	57	-	17	
<i>Stöd 6</i>						
8,0-8,3	Saf	60	23	1	16	Tillväxt
15,0-15,3	Saf	42	42	2	14	
20,0-20,3	Saf	42	44	3	11	

Dessutom noterades följande:

- Kali- och natronfältspat förekom i lika mängd.
- Korn av kalifältspaterna ofta något större än dito av såväl kvarts som natronfältspat.
- Ungefär lika rundade korn (fältspat och kvarts).
- Vedämnerna förekom ej.
- Till gruppen övriga hänfördes: kalcit, epidot, serpentin, amfibolit och malmmineral.

Resultatet från mätningar av kornens rundningsgrad redovisas nedan.

Nivå	Formfaktor		medelv.	standardav.	
	Fraktion				
<i>Stöd 1</i>					
13,5 - 13,8	Saf	0,12 - 0,25	1,28	0,11	Tillväxt
20,0 - 20,3	Saf	0,12 - 0,25	1,25	0,09	
<i>Stöd 6</i>					
8,0 - 8,3	Saf	0,06 - 0,12	1,29	0,11	Tillväxt
	Saf	0,12 - 0,25	1,28	0,11	
15,0 - 15,3	Saf	0,06 - 0,12	1,29	0,10	
	Saf	0,12 - 0,25	1,27	0,10	

Undersökningarna visar att mineralinnehållet i jorden inte förefaller indikera i vilka jordar som tillväxt erhöles. Inte heller i detta fall har någon nämnvärd skillnad i formfaktor erhållits i jordlagren med respektive utan tillväxt.

■ Provplats Orsa

I Orsa var tillväxten i bägge pålarnas bärformåga distinkt koncentrerad till ett intervall på djupet 8-16 meter. Senare dynamiska provbelastningar av hejarsondstänger gav samma resultat. För att försöka finna eventuella skillnader i jordens uppbyggnad togs därför prover med hjälp av en provtagare Ø 50 mm på nivåerna 8,4-8,8, 10,2-10,5 och 18,4-18,7 meter under markytan.

Siktning av proverna visade att materialet nästan uteslutande utgjordes av välsorterad fin- och/eller mellansand. För de båda djupare proverna bestämdes kompaktdensiteten, som i bägge fallen befanns vara lika med den för ren kvarts, nämligen 2,65 t/m³ för det övre provet (med hög tillväxt) och 2,66 t/m³ för det undre (med låg tillväxt).

Mineralkornräkning gav följande resultat:

Nivå	Procentuellt mineralinnehåll					
	Fraktion	Kvarts	Fältspat	Glimmer	Övriga	
8,4 - 8,8	Saf	48	39	4	10	Tillväxt
	Sam	43	43	2	12	Tillväxt
10,2 - 10,5	Saf	52	35	1	12	Tillväxt
	Sam	47	37	2	14	Tillväxt
18,4 - 18,7	Saf	49	33	4	14	
	Sam	42	39	1	18	

Dessutom gjordes följande noteringar:

- Kalifältspat dominerade av fältspaterna
- Natronfältspat förekom
- Kvartskornen är relativt runda jämfört med fältspatskornen
- I mellansanden gick det lättare att se spaltplanen hos fältspaterna
- I samtliga prover påträffades vedrester, speciellt i 10,2-10,5 med 0,7 viktprocent.

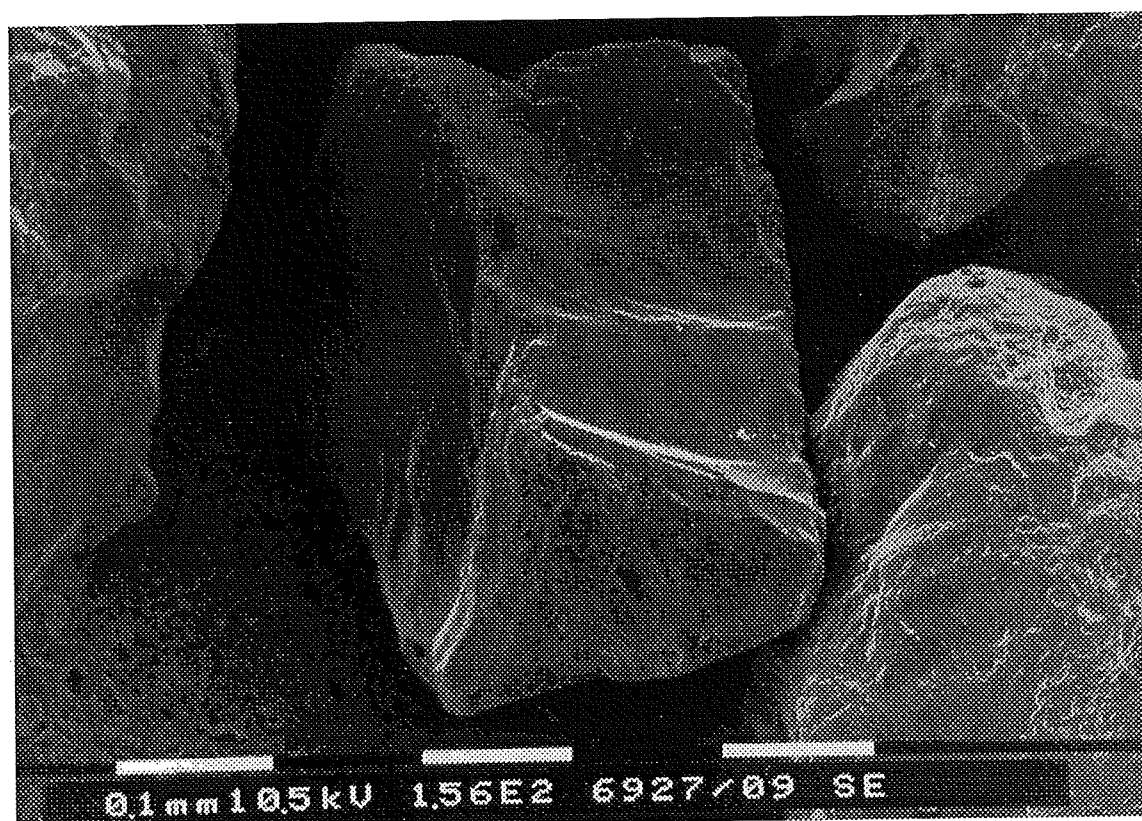
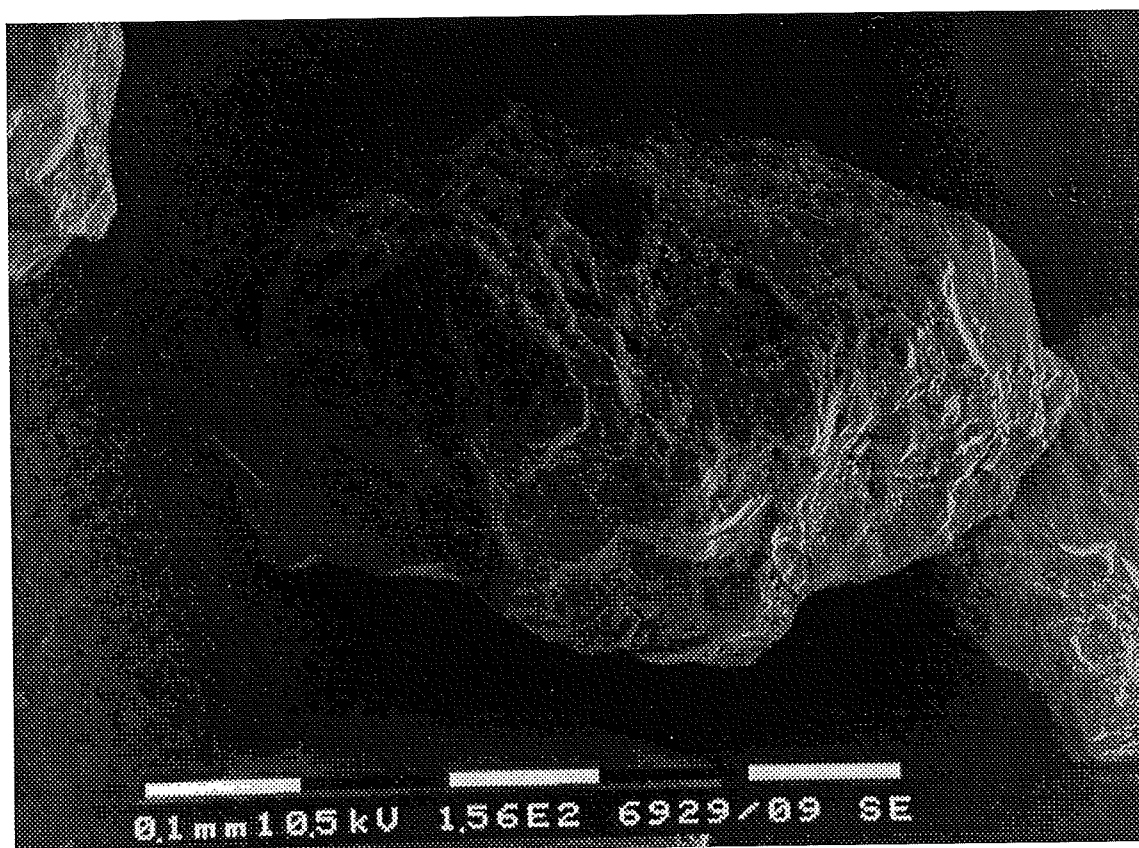
Resultatet från mätningar av kornens rundningsgrad redovisas nedan. Eftersom mängden av mellansanden i det djupaste provet bara var 15 % har den inte analyserats. Resultatet av mätningarna av kornens rundningsgrad (formfaktor) redovisas i **Fig. 2.6 c-d**.

Nivå	Formfaktor		medelv.	standardav.	
	Fraktion				
8,4 - 8,8	Saf 0,06-0,12	1,36	0,16		Tillväxt
	Saf 0,12-0,25	1,29	0,11		Tillväxt
	Sam	1,30	0,10		Tillväxt
10,2 - 10,5	Saf 0,06-0,12	1,28	0,11		Tillväxt
	Saf 0,12-0,25	1,28	0,10		Tillväxt
	Sam	1,23	0,10		Tillväxt
18,4 - 18,7	Saf 0,06-0,12	1,31	0,14		
	Saf 0,12-0,25	1,30	0,11		

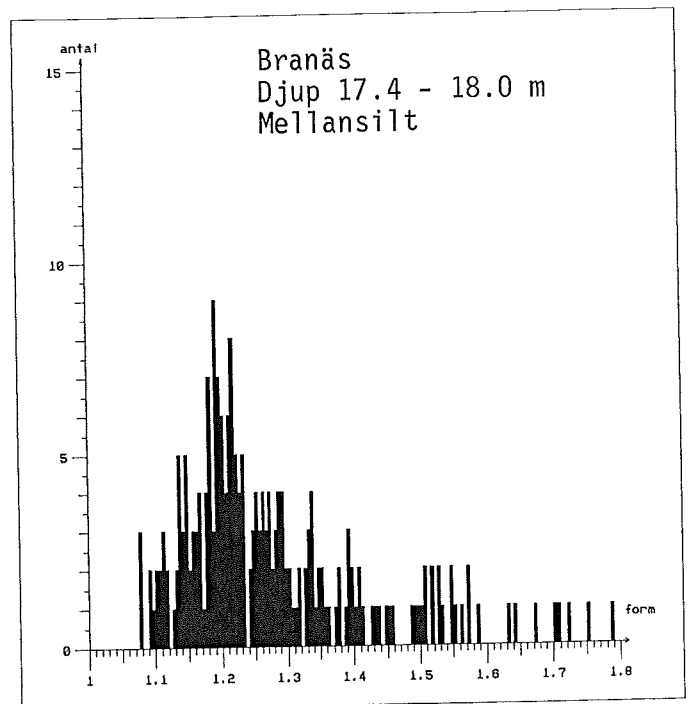
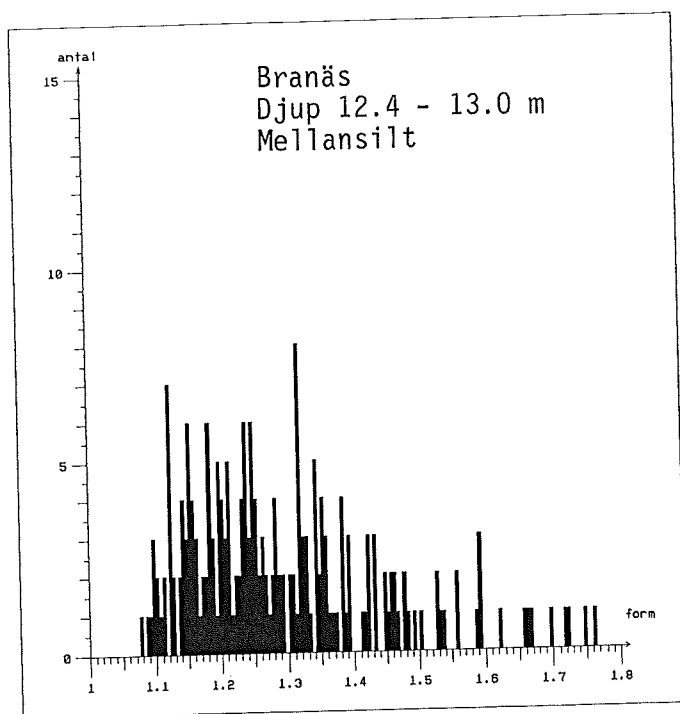
Som framgår av tabellerna går det alltså inte att särskilja i vilka jordar tillväxt uppkommer respektive inte uppkommer.

Undersökningarna i elektronmikroskop utfördes på mellansand från nivån 10,2-10,5 meter under markytan och på finsand från nivån 18,4-18,7 meter under markytan. Det kunde därvid noteras att de flesta kornen hade en kantig kornform, om än något mindre iögonfallande för det djupare provet. Generellt sett hade fältspatskornen en mera kantig kornform jämfört med bergartsfragmenten. I det djupare provet hade dock en del fältspatskorn en kraftig relief på grund av vittringsgenererade skador.

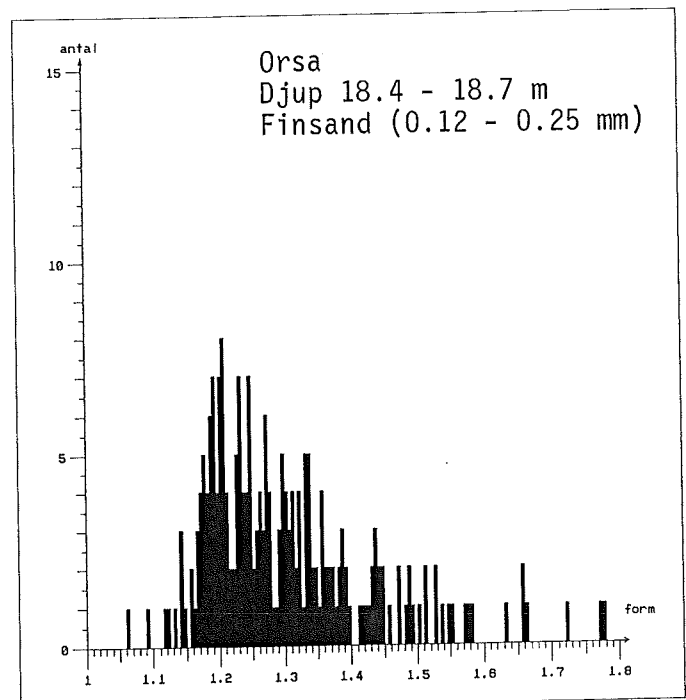
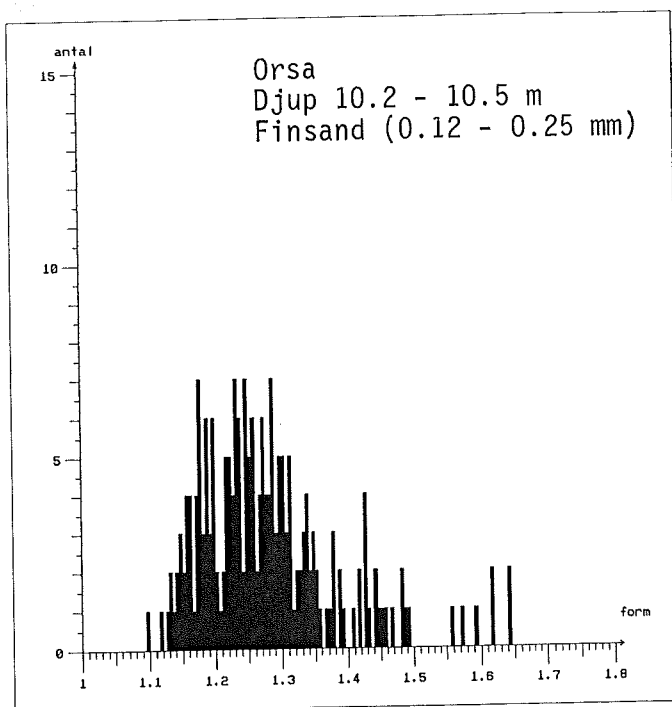
Vad som också framgick var att ett sandkorn som i lågskalig bedömning klassas som runt, i en större förstoring, kan ha en mycket skrovlig yta och vice versa vilket illustreras av **Fig. 2.5 a-b**.



Figur 2.5 a-b. Sandkornet på foto a (överst) är till sin helhet betydligt mer rundat än det på foto b (underst), men har å andra sidan en skrovligare ytförm. Förstoringen är för bägge bilderna 156 gånger och ett skalstreck representerar längden av 0,1 mm. Foto SGU.



Figur 2.6 a-b. Formfaktorns fördelning för proverna från Branäs.



Figur 2.6 c-d. Exempel på formfaktorns fördelning för prover från Orsa.

2.4 Sammanfattning

Enligt de i kapitel 2.1 redovisade försöken bör avgång av, under drivningen uppbyggt, porvattenövertryck kunna uteslutas som möjlig orsak till tillväxten av bärförmågan. Reservation måste dock göras för en viss tidsinverkan i de mest finkorniga friktionsjordarna.

Som det framgår av kapitel 2.3.3 har det inte gått att finna samband mellan kornanalys och den tidsberoende tillväxten av bärförmågan. Huvudsyftet var emellertid att finna lämpliga metoder för vidare studier. Det studerade antalet objekt är dock än så länge allt för litet för att några säkrare slutsatser skall kunna dras.

En viktig begränsning i de utförda undersökningarna har varit att endast de enskilda kornen har kunnat studeras, inte kornkontakterna in situ. Dessutom har proverna efter provtagning transporterats i plastpåsar, siktats samt i vissa fall tvättats rena på oljeföröreningar från provtagaren, varvid alla spår av eventuella cementeringar och från grundvattnet utfällda salthinnor bör ha hunnit försvinna från kornen.

En möjlig lösning på detta problem kan vara att använda en provtagningsmetod som ger rimligt ostörda prover och därefter genomföra tunnslipsstudie av proverna. Härigenom har man såväl möjlighet att studera kornkontakter som att göra kemiska analyser.

Då det inte har varit möjligt att se något samband mellan tillväxt och silt-, sandkornens kemi eller morfologi har vi ännu mindre kunnat uttala oss om de i kapitel 2.2 redovisade teorierna. Kapitlet får ses som en sammanställning, om än långt ifrån komplett, av hittills framlagda teorier till gagn för framtida studier och försök.

3. Pålprojekt

En studie har gjorts av ett antal svenska pålprojekt. Detta kapitel är ämnat som en sammanställning av dessa studier. Dels jämförs den totala bärförmågens tillväxt, dels den specifika bärförmågens (mantelbärförmåga per ytenhet påle) tillväxt mot aktuell jordart eller sonderingsmotstånd (jordens fasthet).

Dessutom lämnas en diskussion om eventuella felkällor samt kommentarer till en formel för tillväxtens förutsäggande, framtagen av Skov och Denver, se även kapitel 5.

3.1 Diskussion av felkällor

I de i här gjorda jämförelserna mellan motsvarande tillväxtkurvor från olika projekt visar det sig att kurvorna i många fall skiljer sig, i varierande grad, från varandra. Av kapitel 6 framgår att även inom ett och samma pålprojekt kan tillväxten gentemot ett visst sonderingsresultat eller jordart skilja mellan pålarna. Dessa skillnader kan givetvis, åtminstone delvis, bero på verkliga skillnader i bärförmågens tillväxt, men även ett antal möjliga felkällor måste beaktas.

Dels kan fel föreligga vid de geotekniska undersökningarna. Detta gäller speciellt bestämmandet av jordens fasthet då nästan uteslutande vikt- och hejarsondering har funnits att tillgå. Vid jämförelsen tillväxt contra jordart har det ibland varit nödvändigt att göra vissa generaliseringar vid alltför komplexa jordlagerföljder. En förutsättning för en riktig analys är givetvis att jordartsklassificeringen är korrekt gjord.

Dels kan ett antal felkällor vara aktuella vid bestämmandet av bärförmågan, nämligen:

- En osäkerhet på 10-15 % i själva mätförfarandet vid såväl statisk- som dynamisk provbelastning.
- Pålen har inte mobiliserats fullständigt. Om så är fallet vid första provbelastningen och om bättre mobilisering av pålen sker vid följande provtillfällen erhålles en överdriven bild av tillväxten. Blir förloppet det motsatta, dvs full mobilisering vid första tillfället men ej vid det följande, erhålles ett för litet värde på tillväxten. Men framför allt ges en felaktig bild av tillväxtens fördelning längs med pålen och därmed i relation till jordart och sonderingsmotstånd. En indikation på fel av denna typ kan dock fås från CAPWAP-analysen. Om bärförmågens fördelning längs manteln visar på mycket liten specifik bärförmåga längs pålens nedre del kan detta vara ett tecken på ofullständig mobilisering. En annan indikation på ofullständig mobilisering kan vara om bärförmågan, vid andra mättillfället, minskat längs pålens nedre del och ökat längs den övre delen. De studerade pålarna har på detta sätt bedömts vara i stort sett mobiliserade i flertalet fall.

En annan indikation på ofullständig mobilisering är att pålen inte har förskjutits tillräckligt under mätslaget, d.v.s. den har inte slagits loss från den omgivande jorden. Den kvarstående sjunkningen vid mätslaget har redovisats för de olika pålarna (uppgiften saknas dock för vissa mätningar). Det framgår att det stora flertalet av pålarna uppfyller normalt uppställda krav på en minsta sjunkning om 3-5 mm. De kan alltså betraktas som i det närmaste fullt mobiliserade.

- Att en provbelastning med några få enstaka slag inte behöver hämma bärförmågens tidsberoende tillväxt visas av Skov och Denver (1988), artikeln refereras som nr 11 i kapitel 5.
- Vid CAPWAP-analysen av dynamiskt provbelastade pålar kan fel uppstå vad gäller bärförmågens mer precisa fördelning utmed pålen och därmed erhålls en felaktig relation mellan tillväxt av specifik bärförmåga och fasthet/jordart. Emellertid påverkas inte den totala bärförmågan.
- Inverkan av påhängslaster från omgivande jord kan ge en felaktig bild av bärförmågens fördelning utefter pålen, med följder som i ovanstående punkt.
- Efter ett slag på pålen kan denna ibland stå inspänd i jorden, beroende på att pålen trycks samman vid belastningen men förhindras att återta sin ursprungliga längd, på grund av stor mantelfriktion. Om stötvågsmätning utförs vid nästa slag på pålen, då denna står inspänd i jorden, kommer analysen att ge en felaktig bild av mantelfriktionens verkliga fördelning längs pålen. Däremot anses inte bestämningen av totala bärförmågan påverkas av eventuell inspänning.

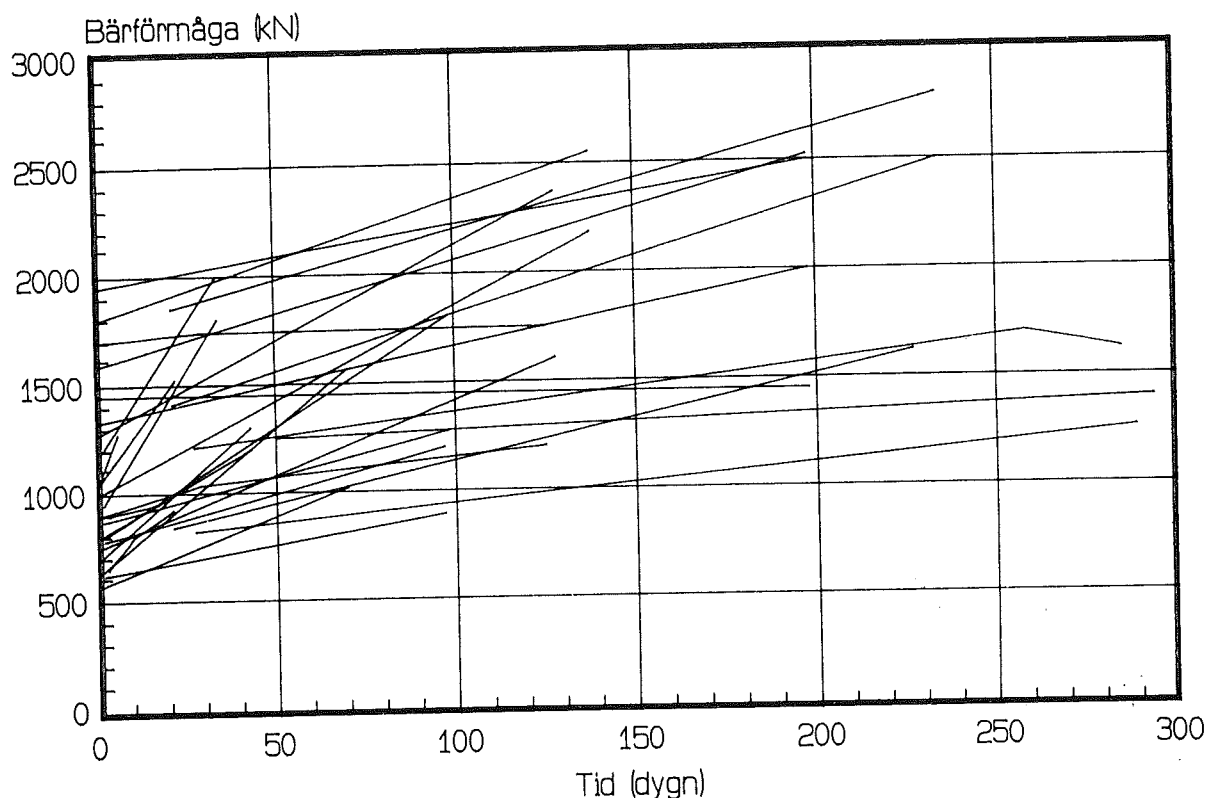
Hänsyn till inspänning har inte tagits med i CAPWAP-analyserna. (I de flesta fall saknades denna möjlighet i CAPWAP-programmen när analyserna utfördes.) Däremot har hänsyn till eventuell inspänning tagits med i tolkningen av resultaten från CAPWAP-analyserna. Om man tar med flera på varandra efterföljande slag i analysen och tolkningen fås en bättre bild av eventuell inspänning. Man minskar då osäkerheten i bedömningen av mantelfriktionens fördelning längs pålen.

- Tidpunkten för den första provbelastningen. Vi vet att en stor ökning av bärförmågan sker under en tid av cirka ett dygn efter drivning. Beroende på när den första provbelastningen sker (normalt 12 - 36 timmar efter drivning) kan tillväxtkurvans utseende påverkas väsentligt.

Av ovanstående punkter bedöms den sistnämnda ha störst inverkan.

3.2 Tillväxt med tiden av totala bärförmågan

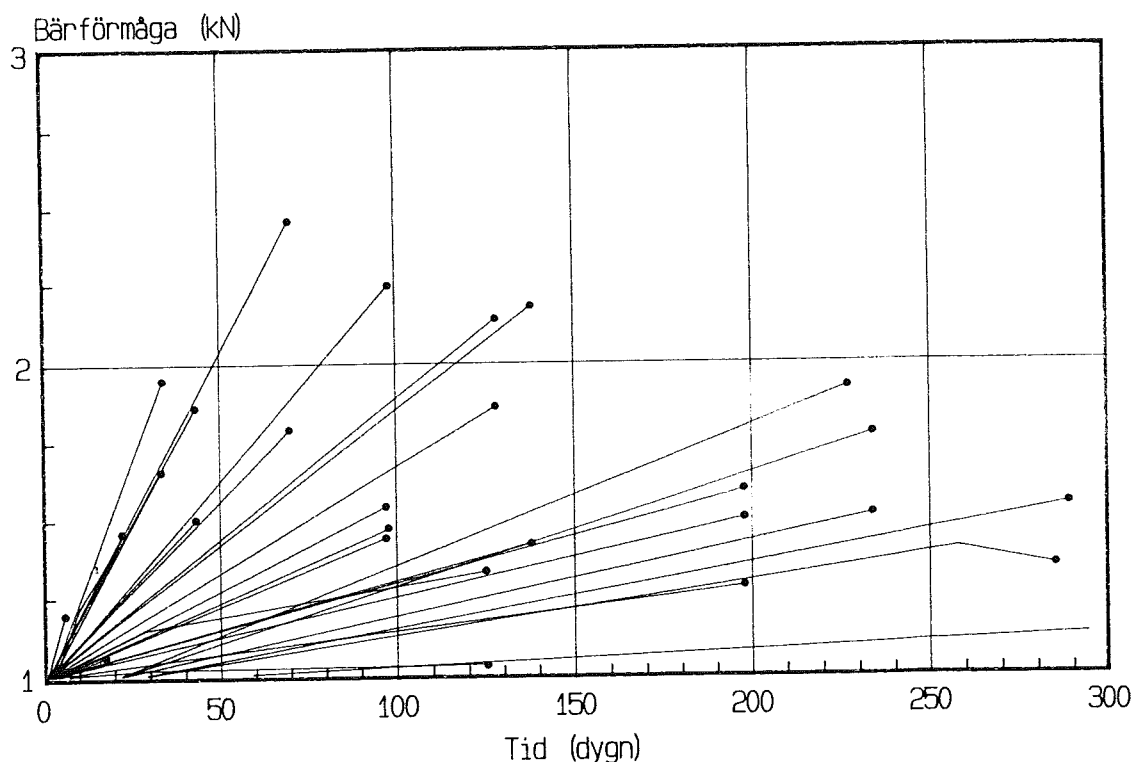
Den totala bärförmågens tillväxt med tiden efter drivning har sammanställts i **Fig. 3.1**. Härav framgår att en tillväxt i bärförmåga har erhållits i samtliga fall. Projektet Deltavägen, Sörån, delen stöd 1 och 2 har ej medtagits eftersom oklarheter finns rörande



Figur 3.1. Sammanställning av de i kapitel 6 studerade pålarnas tillväxt i total bärförmåga.
(Deltavägen och Kvissleby undantagna)

vattenströmningsförhållandena och huruvida dessa påverkar pålarnas bärförmåga. Inte heller Kvissleby har medtagits, då pålarna inte mobiliserades helt vid ena provbelastningen. För att erhålla en mer strikt jämförelse redovisas i **Fig. 3.2** de uppmätta värdena normerade i relation till bärförmågan vid första provbelastningen, som alltså har värdet 1.

Tillväxten i bärförmåga är i flertalet fall 30-40 % om bärförmågan vid 1 dag respektive ca 120 dagar efter drivningen jämförs. **Fig. 3.2** visar att bärförmågan för ett mindre antal pålar t o m. fördubblas under loppet av mindre än ett halvår. I nästan samtliga fall har provbelastningen av pålarna skett endast vid två tidpunkter. Av de fall provbelastning skett vid tre tidpunkter framgår dock att tillväxt sker under lång tid, några veckor till månader, efter drivningen. De längre kurvornas flackare lutning beror, i de allra flesta fall, inte på lägre tillväxt, utan att en längre tid har förflutit mellan provbelastningarna. Den flacka lutningen visar dock att tillväxten upphör eller minskar kraftigt efter en tid.



Figur 3.2. Bärkraftens tillväxt redovisad i relation till den vid första provbelastningen uppmätta bärkraften. Observera att alla linjerna inte utgår från tiden 1 dygn. (Deltavägen och Kvissleby undantagna)

3.3 Tillväxt med tiden i specifik bärkraft

CAPWAP-analys av en dynamisk provbelastning ger som resultat bland annat bärkraftens fördelning längs pålens mantelyta. Därefter kan den specifika bärkraften (mantelbärkraft per ytenhet påle) för olika jordlager bestämmas. Eventuell inspanning eller ofullständig mobilisering av pålen vid provbelastningstillfället påverkar bärkraftens fördelning. Detta innebär en osäkerhet vid bestämningen av den specifika bärkraften, se kapitel 3.1.

Den specifika bärkraften i silt, sandig silt, siltig sand och sand har sammanställts i **Fig. 3.3, 3.5-3.7**. Figurerna visar förändringen med tiden efter drivning. Någon uppdelning med hänsyn till jordens fasthet har ej gjorts i denna redovisning. Pålprojekten Kvissleby och Deltavägen Sundsvall delen stöd 1 och stöd 2 har inte medtagits, av de skäl som nämnts i kapitel 3.2.

För tillväxten i silt och sand har dessutom normerade diagram i ordning ställt, **Fig. 3.4** och **3.8**.

Silt

I silt visar flertalet pålar en markant ökning av den specifika bärförmågan, **Fig. 3.3**. Den är i medeltal ca 17 kPa en dag efter drivning och ökar till ca 30 kPa tre månader efter drivning, dvs en ökning på ca 75 %. De två pålar som visar låg specifik bärförmåga och låg tillväxt hänför sig till pålprojekt Fittja. Här bedöms upprepade provbelastningar samt ett visst lerinslag i jorden ha orsakat den låga specifika bärförmågan och tillväxten.

Av det normerade diagrammet, **Fig. 3.4**, framgår att drygt en tredjedel av pålarna har erhållit en dubblering av den specifika bärförmågan efter en tid av cirka ett halvt år. Observera att en del linjer inte utgår från tiden direkt efter slagningen utan 20-30 dagar senare. Dessa kurvor hade troligen varit brantare om de hade utgått från tiden ett dygn efter slagning.

Sandig silt

För sandig silt finns endast sex pålar. Resultaten visar på en stor spridning i såväl specifik bärförmåga som förändring med tiden, se **Fig. 3.5**. Några generella slutsatser är svåra att dra.

Siltig sand

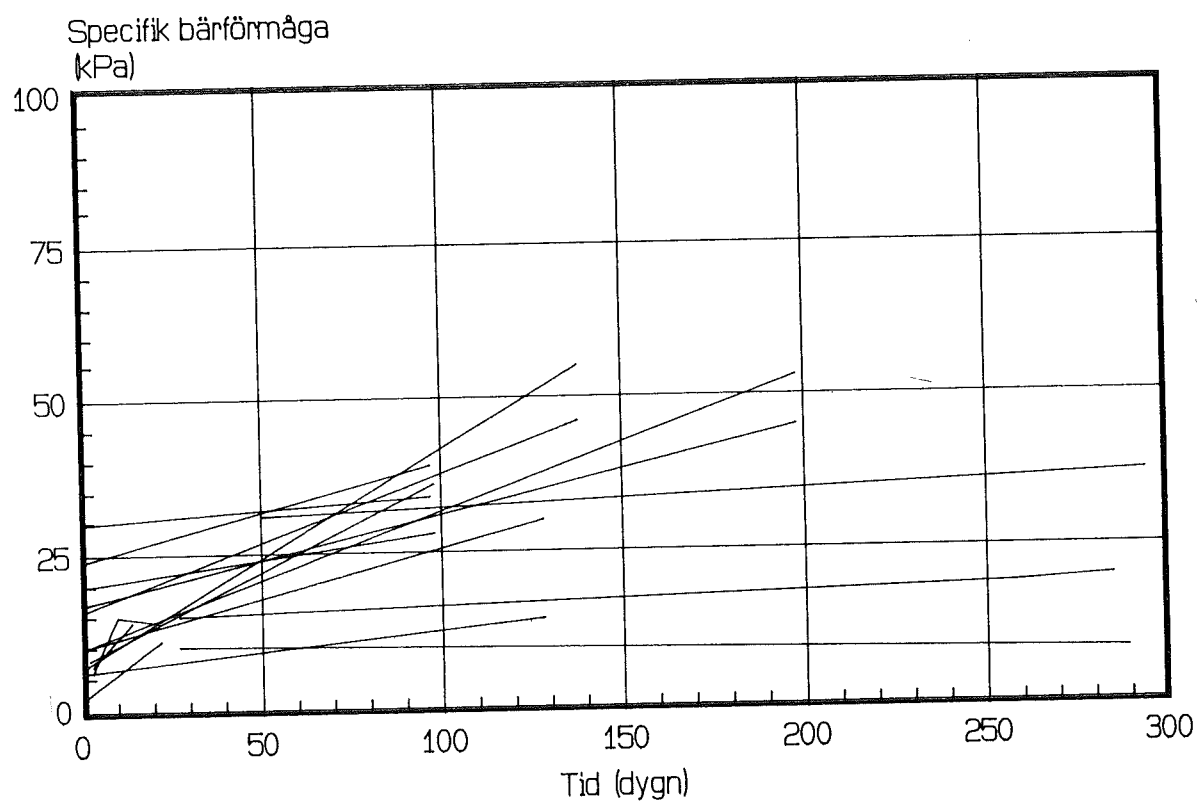
I siltig sand visar flertalet pålar på en ökning av den specifika bärförmågan, **Fig. 3.6**. En stor spridning i specifik bärförmåga har erhållits. I medeltal är den specifika bärförmågan ca 40 kPa en dag efter drivningen och ökar till ca 50 kPa tre månader efter drivningen dvs en ökning på ca 25 %.

En påle i pålprojekt Västermalmskolan uppvisar först en ökning under en tid av 27 dagar för att knappt hundra dagar senare ha sjunkit markant. Denna påles totala bärförmåga var densamma vid de två provbelastningarna.

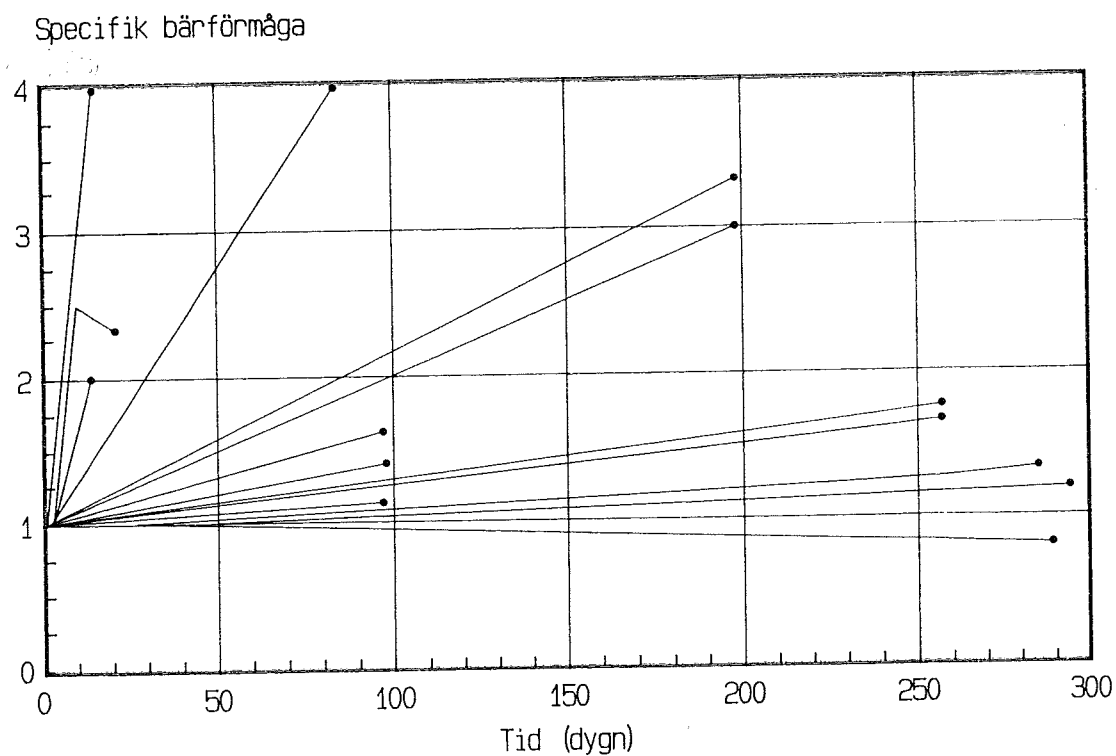
Sand

I sand visar flertalet pålar en ökning av den specifika bärförmågan, se **Fig. 3.7**. För några pålar är ökningen markant, för några är den mindre. Den erhållna spridningen i specifik bärförmåga är stor. Exkluderas extremvärdena är den specifika bärförmågan i medeltal ca 54 kPa en dag efter drivning och ökar till ca 80 kPa tre månader efter drivningen, dvs ökar ca 50 %.

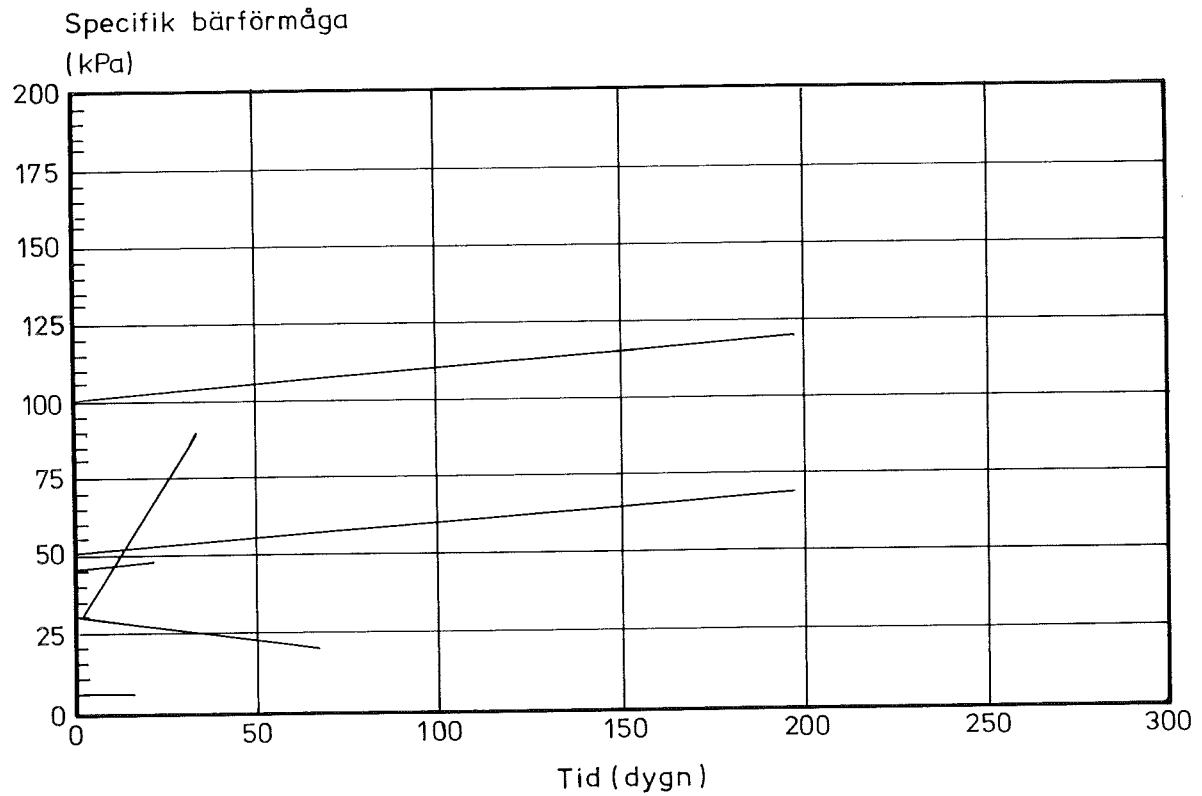
I **Fig. 3.8** visas hur drygt en tredjedel av pålarna har ökat sin specifika bärförmåga i sand till det dubbla på en tremånadersperiod. Spridningen är stor.



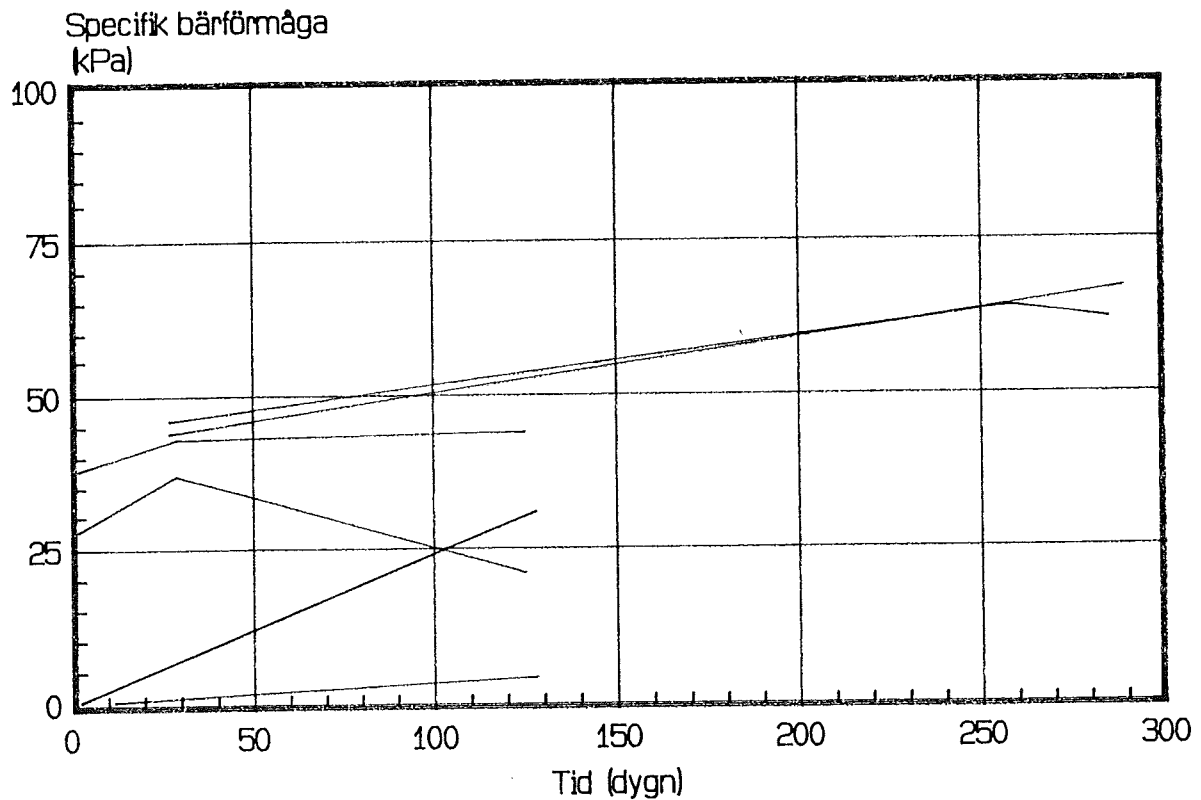
Figur 3.3. Sammanställning av specifika bärförmågens tillväxt i silt för de i kapitel 6 studerade projekten.



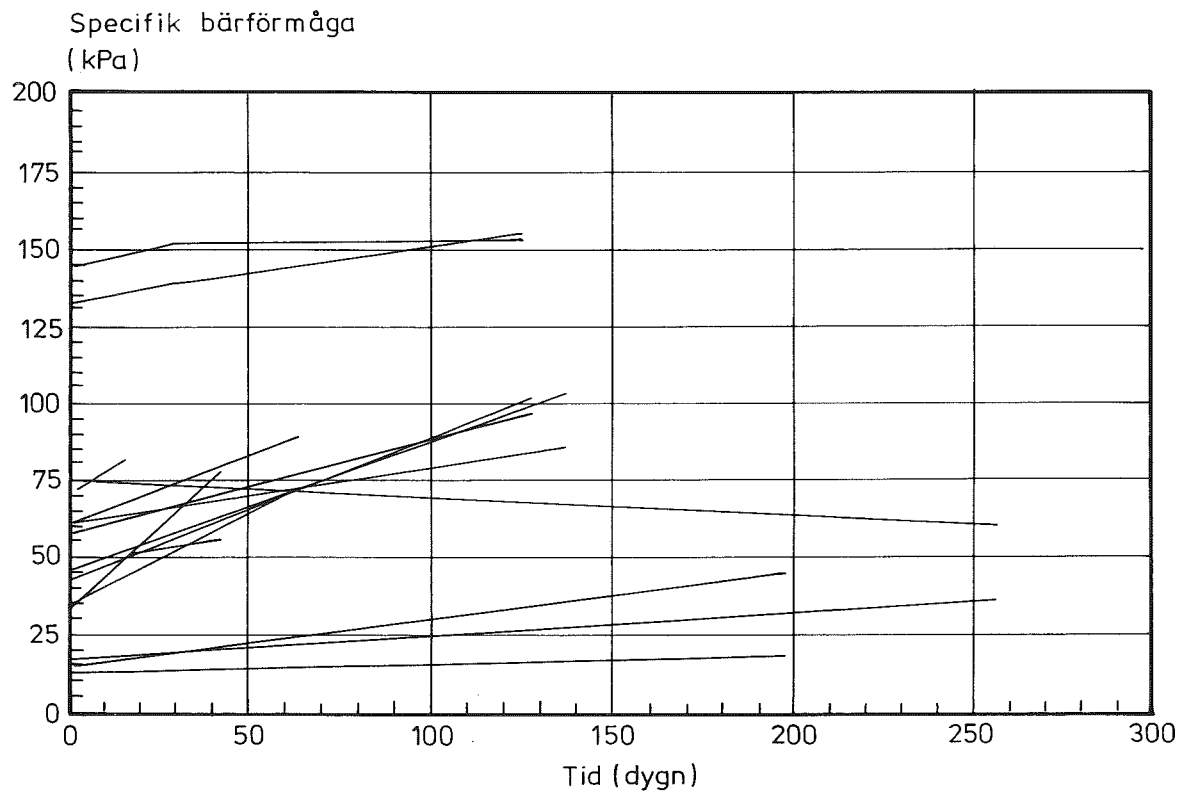
Figur 3.4. Specifika bärförmågens tillväxt i silt redovisad i relation till den vid första provbelastningen uppmätta bärförmågan.



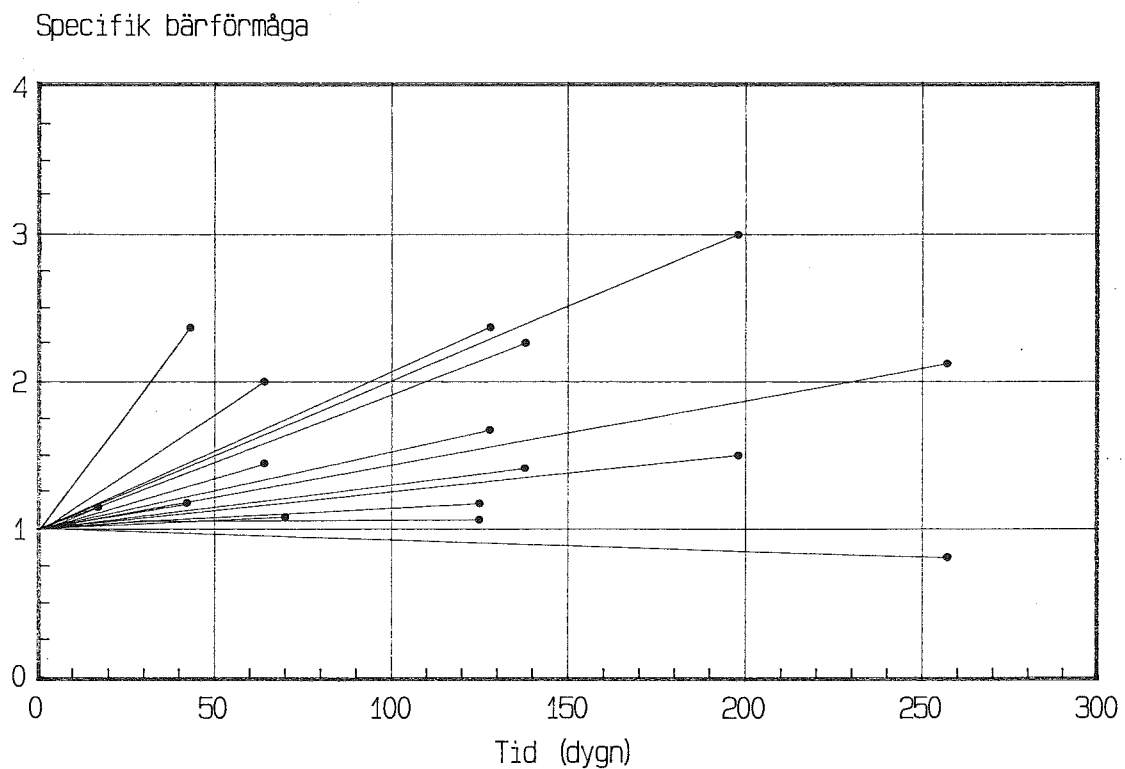
Figur 3.5. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt i sandig silt för de i kapitel 6 studerade projekten.



Figur 3.6. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt i siltig sand för de i kapitel 6 studerade projekten.



Figur 3.7. Sammanställning av specifika bärförmågens tillväxt i sand för de i kapitel 6 studerade projekten.



Figur 3.8. Specifika bärförmågens tillväxt i sand redovisad i relation till den vid första provbelastningen uppmätta bärförmågan.

3.4 Formel för bärformågens tillväxt enligt Skov och Denver

I kapitel 5 redogjordes för en av Skov och Denver (1988) presenterad formel $Q/Q_0 - 1 = A \cdot \log(t / t_0)$ (se artikel 11 i kapitel 5), för beräkning av tillväxten i total bärformåga. Faktorn A är enligt författarna beroende av jordart och anges till 0,2 för sand och 0,6 för lera. För pålprojekten i Sverige presenterade i denna rapport erhålls, även sedan de mest extrema värdena på A tagits bort, stora intervall för de olika jordarterna, nämligen 0,04-0,99 för sand och 0,2-2,0 för silt. Generella A-värden baserat på jordart kan således ej anges med erforderlig noggrannhet.

Snarare måste A betraktas som en parameter inte enbart beroende av rådande jordart utan även jordens fasthet, förekomsten av flera olika jordarter m m. Faktorn A är specifik för varje enskilt pålprojekt och bestäms genom provbelastning vid två tidpunkter. För att verifiera värdet på A bör en tredje provbelastning ske vid en senare tidpunkt. Den första provbelastningen måste göras kort efter det att pålen slagits, vid tiden $t = t_0$, enligt Skov och Denvers definition vid den tid från vilken kvoten Q/Q_0 är linjärt beroende av funktionen $\log(t/t_0)$.

Tiden t_0 är alltså den tid vid vilken under drivningen uppbyggda porvattenövertryck har avklingat (se kapitel 2.1), och den allra första mycket snabba ökningen av bärformågan har upphört. Rent praktiskt har våra försök visat att det viktiga är att mätningen " t_0 " utförs efter det att dessa effekter har slutat verka. Om det sedan, för exempelvis sand, sker vid exakt tiden 0,5 dygn eller efter 0,7, 1,0 eller 1,5 dygn är av mindre betydelse.

Eftersom tre mättillfällen erfodras för att verifiera formeln har det endast varit möjligt att tillämpa den på två studerade pålprojekt. För Branäs, påle P112, bestämdes enligt formeln bärformågan till 886 kN efter 21 dygn, medan den uppmätta bärformågan var 834 kN. A-faktorn bestämdes till 0,43, i en ren siltjord. För Västermalmskolan var värdena för P1 1200 respektive 1110 kN och för P2 1750 respektive 1761 kN efter 27 dygn. Faktorn A bestämdes till 0,13 respektive 0,02. Jorden utgörs av siltig sand till sand.

På motsvarande sätt användes Skov och Denvers formel på resultaten från stötvågsmätningar på hejarsondstänger (se kapitel 4.3 och 4.4) i Orsa och Mellsta. I Orsa gav efterslagning 1 och 2 på sond 2 $A=0,30$. Detta gav i sin tur den beräknade bärformågan 60 kN efter 35 dygn. Uppmätt bärformåga vid stötvågsmätning var 57 kN. För sond 1 gav samma värde på A bärformågan 68 kN efter 56 dygn. Uppmätt bärformåga var vid samma tidpunkt 65 kN. I Mellsta stöd 6 erhöles med $t_0=0,7$ dygn A-faktorn till 0,46 varefter beräknad respektive uppmätt bärformåga för sond 3 och 4 blev 55/66 kN och 88/57 kN. I stöd 1 erhöles faktorn A inte större värde än 0,044 vilket endast gav en beräknad bärformåga efter 55 dygn på 49 respektive 46 kN för sond 1 och 2, jämfört med de uppmätta värdena, 56 kN för bägge sondstängerna. Användes däremot A-faktorn från stöd 6 erhöles bärformågorna 84 och 79 kN, alltså nu betydligt över de uppmätta värdena efter 55 dygn.

För provpålarna P1 och P8 i Orsa erhöles värdena 0,44 respektive 0,49 på faktorn A.

Jorden i Orsa utgörs av sand. I Mellsta där jorden också utgjordes av sand erhöles A-faktorn till 0,41 och 0,54 i stöd 6 samt 0,19 och 0,55 i stöd 1. En sammanställning av beräkningarna lämnas i **tabell 3.1**. Delobjekt Deltavägen, Sörån stöd 1 och 2 har ej medtagits.

Sammanfattningsvis framgår att faktorn A måste bestämmas för varje enskilt pålprojekt. Vissa resultat bekräftar dock formelns tillämpbarhet.

Tabell 3.1. Jämförelse mellan uppmätt bärförmåga och beräknad enligt Skovs och Denvers formel.

	Tid efter drivning (dygn)	Bärförmåga, kN Uppmätt, dynamisk provbelastning	Beräknad enligt Skovs formel	Beräknad A-faktor	Jordart
■ Pålar:					
<u>Branäs</u> P112	21	834	886	0,43	Si
<u>Västermalm</u> P1	126	1200	1110	0,13	siSa, Sa
P2	125	1750	1761	0,02	-"-
<u>Orsa</u> P1	-	-	-	0,44	Sa
P8	-	-	-	0,50	-"-
<u>Mellsta</u> stöd 1:3	-	-	-	0,19	Sa
stöd 1:4	-	-	-	0,55	-"-
stöd 6:1	-	-	-	0,41	-"-
stöd 6:2	-	-	-	0,54	-"-
■ Hejarsonder:					
<u>Orsa</u> sond 2	35	57	60	0,30	Sa
sond 1	36	65	73	-"-	-"-
<u>Mellsta</u> stöd 1:1	55	56	49	0,04	Sa
stöd 1:2	55	56	46	-"-	-"-
stöd 6:3	55	60	66	0,45	Sa
stöd 6:4	55	57	87	-"-	-"-

3.5 Tillväxt i bärförmåga baserat på sonderingsresultat

Hejarsondering

De provbelastade pålarna har grupperats utgående från sonderingsmotstånd. De intervall på sonderingsmotståndet som använts är 0-5, 5-10, 10-25, > 25 slag/0,2 m. Den specifika bärförmågans tillväxt med tiden redovisas i **Fig. 3.9 - 3.12**. Härav framgår att de större tillväxterna i specifik bärförmåga erhållits där hejarsonderingsmotståndet varit > 10 slag/0,2 m. Dock finns några fall med stora tillväxter där sonderingsmotståndet varit lägre.

Viktsondering

De intervall på sonderingsmotståndet som använts vid grupperingen av sonderingsmotstånd är 0-10, 10-30 och 30-60 hv/0,2 m. Specifika bärförmågans tillväxt redovisas i **Fig. 3.13 - 3.15**. Liksom tidigare har inte Deltavägen, Sörån, delen stöd 1 och 2 samt Kvissleby medtagits, se kapitel 3.2. Sammanfattningen visar inte på något tydligt samband mellan sonderingsmotstånd och tillväxt i specifik bärförmåga.

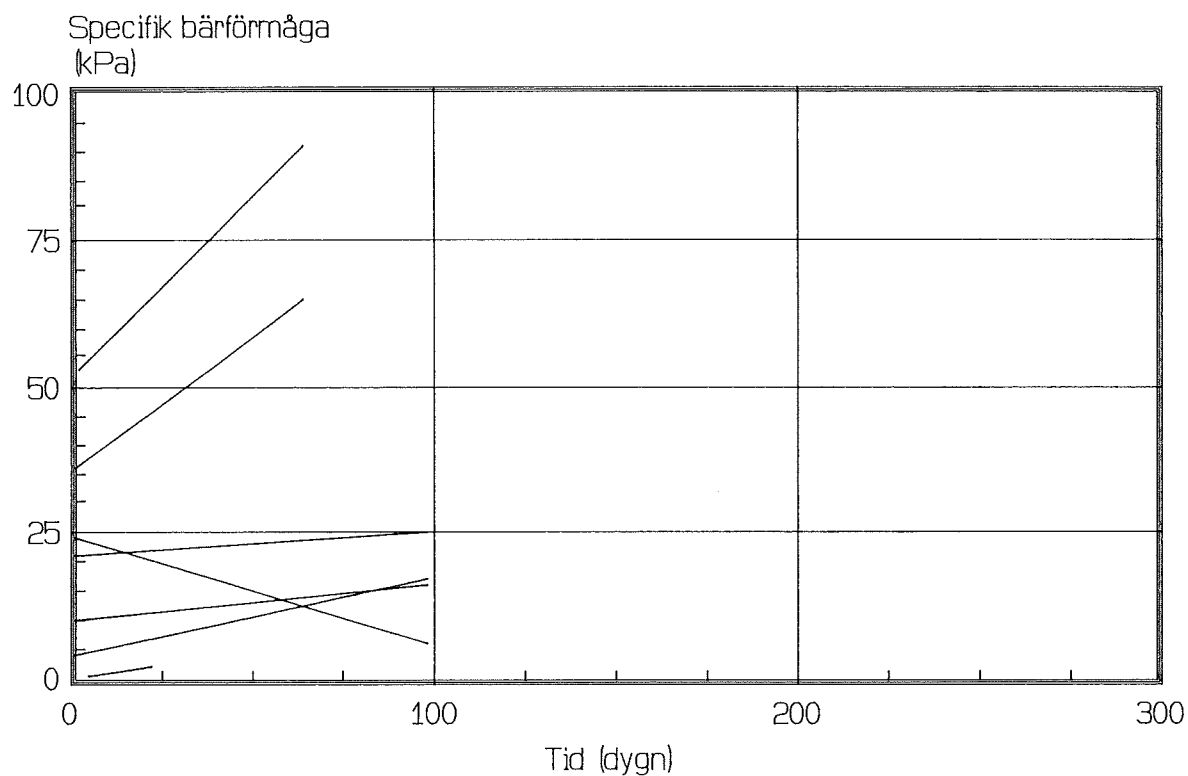
Nyare undersökningsmetoder

I några pålprojekt har en komplettering av den ursprungliga geotekniska undersökningen skett med nyare undersökningsmetoder, nämligen CPT, dilatometer och stötvågsmätning på hejarsondstänger.

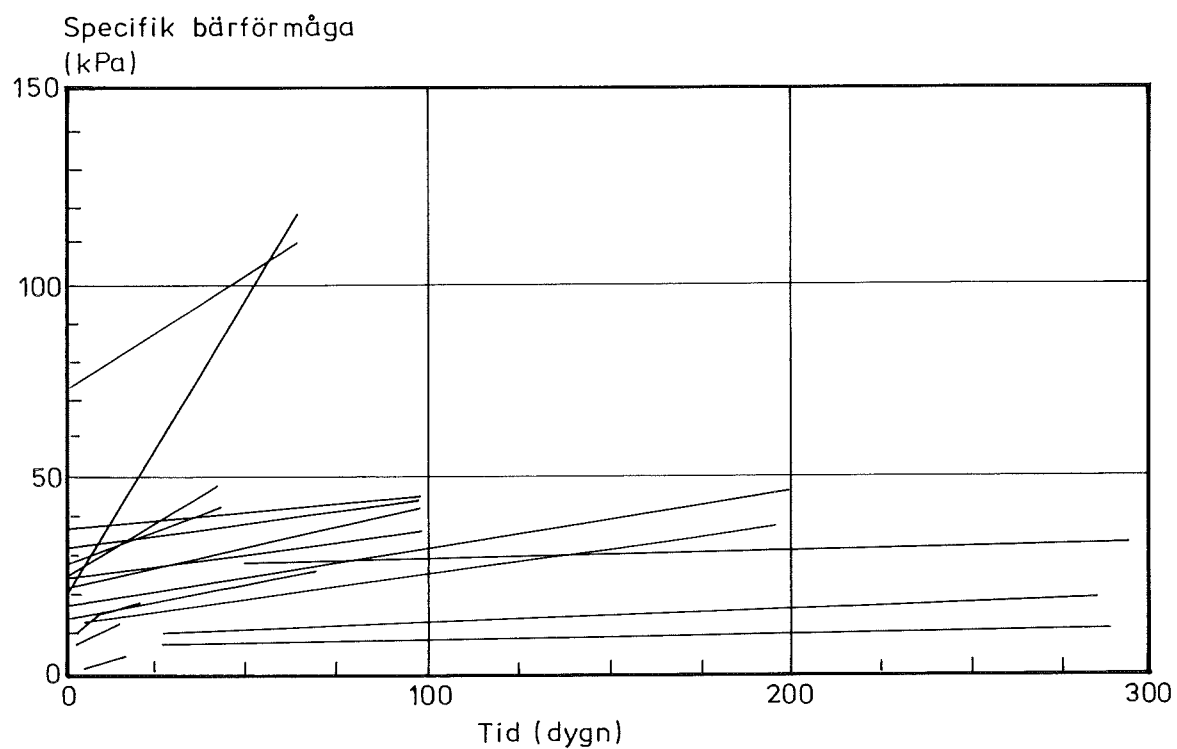
Dessa undersökningar visar att dilatometern är lämplig för bestämning (nästan kontinuerlig) av jordart. En god överensstämmelse har erhållits med provtagningar i såväl pålprojekten Branäs som Orsa.

Pålarna har grupperats utgående från sonderingsresultaten vid CPT både med avseende på spetsmotstånd och mantelfriktion. CPT-sonderingar har utförts endast vid Branäs och Västermalmskolan, se **Fig. 3.16 - 3.17**. Resultaten visar inte på något direkt samband med sonderingsresultat och tillväxt i bärförmåga. Något samband har inte heller stått att finna mellan tillväxten och den från dilatometerförsök utvärderade kompressionsmodulen.

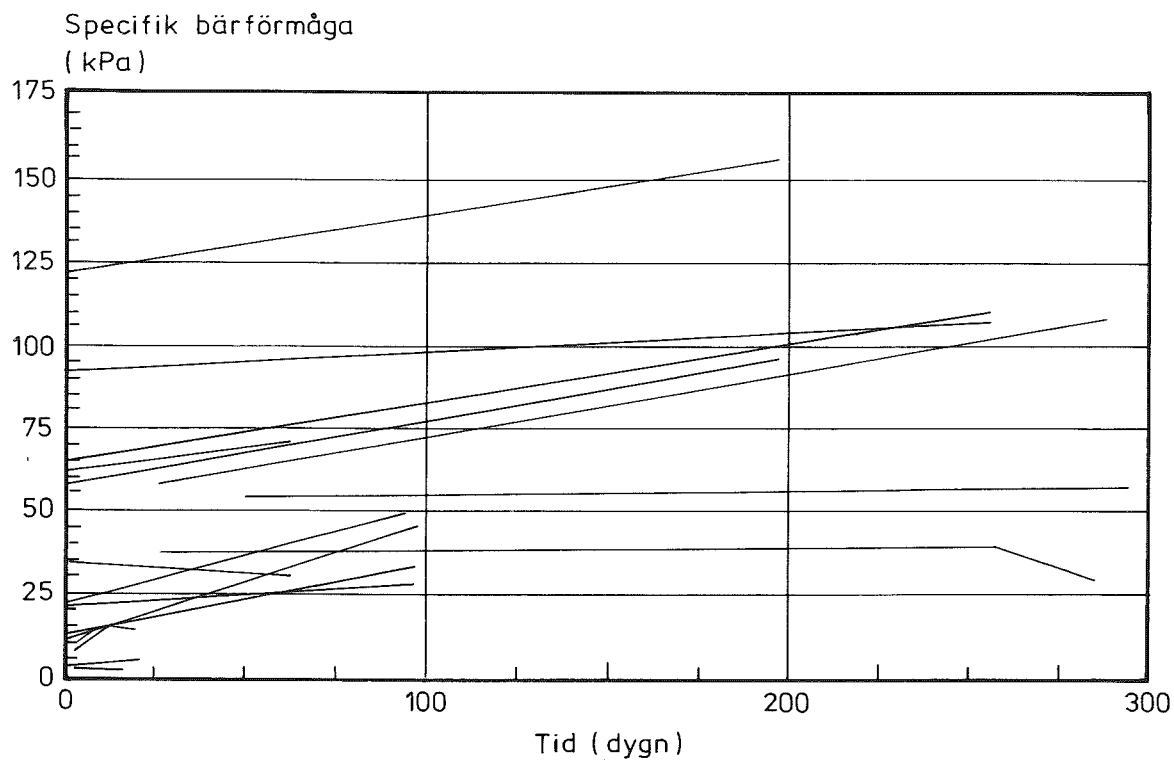
Inom projektet har stötvågsmätning på hejarsondstänger utförts på tre platser. Resultaten visar att metoden lämpar sig väl till att förutsäga tillväxt i bärförmåga. Försöken redovisas separat i kapitel 4.



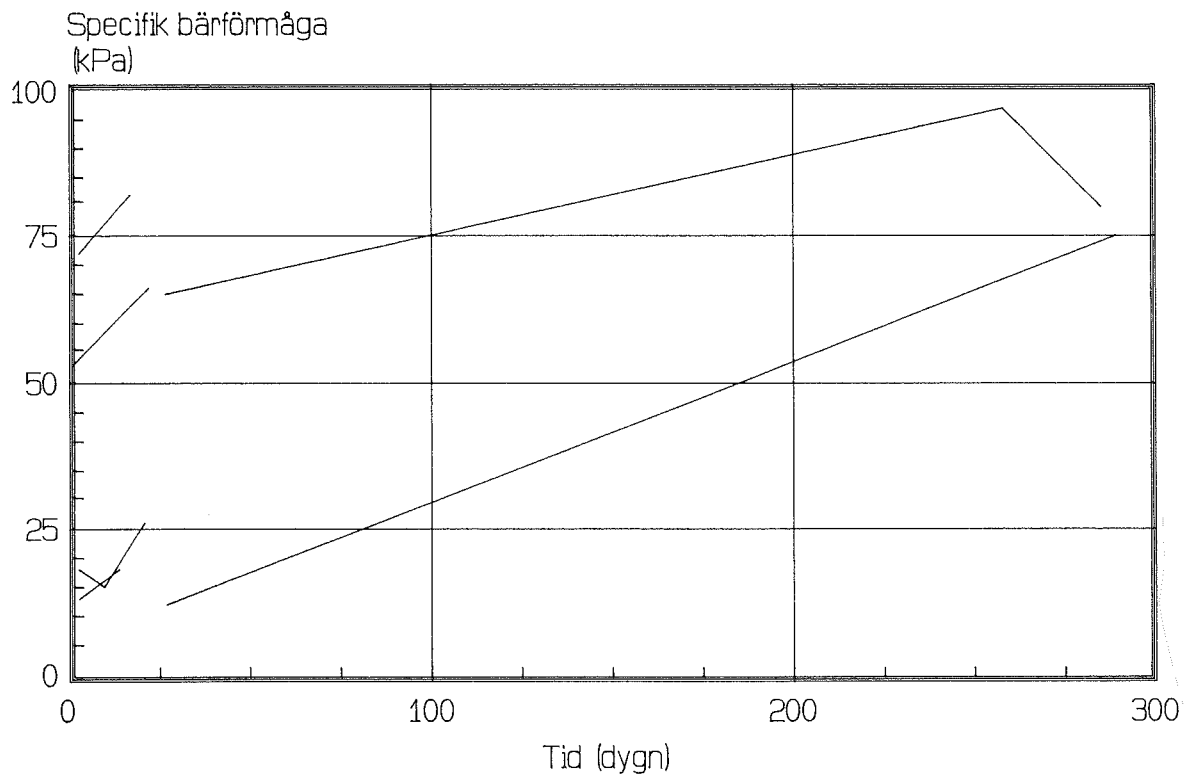
Figur 3.9. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt med tiden vid hejarsonderingsmotstånd 0-5 slag/0,2m.



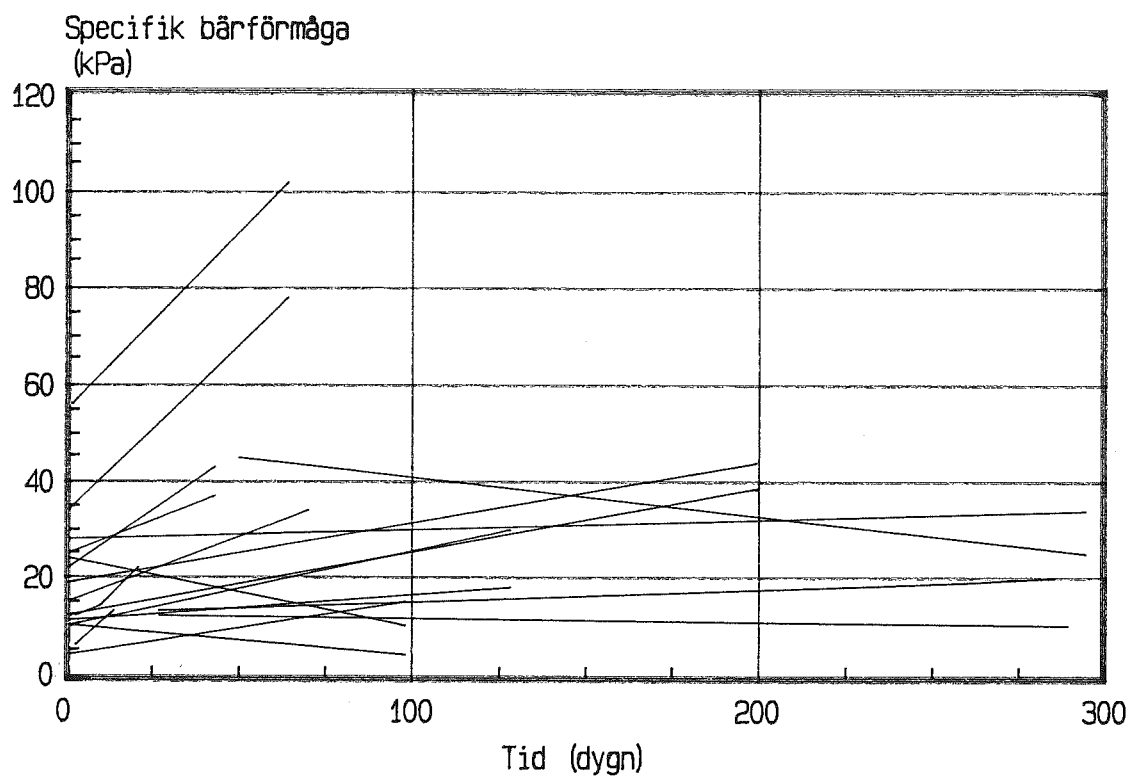
Figur 3.10. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt med tiden vid hejarsonderingsmotstånd 5-10 slag/0,2m.



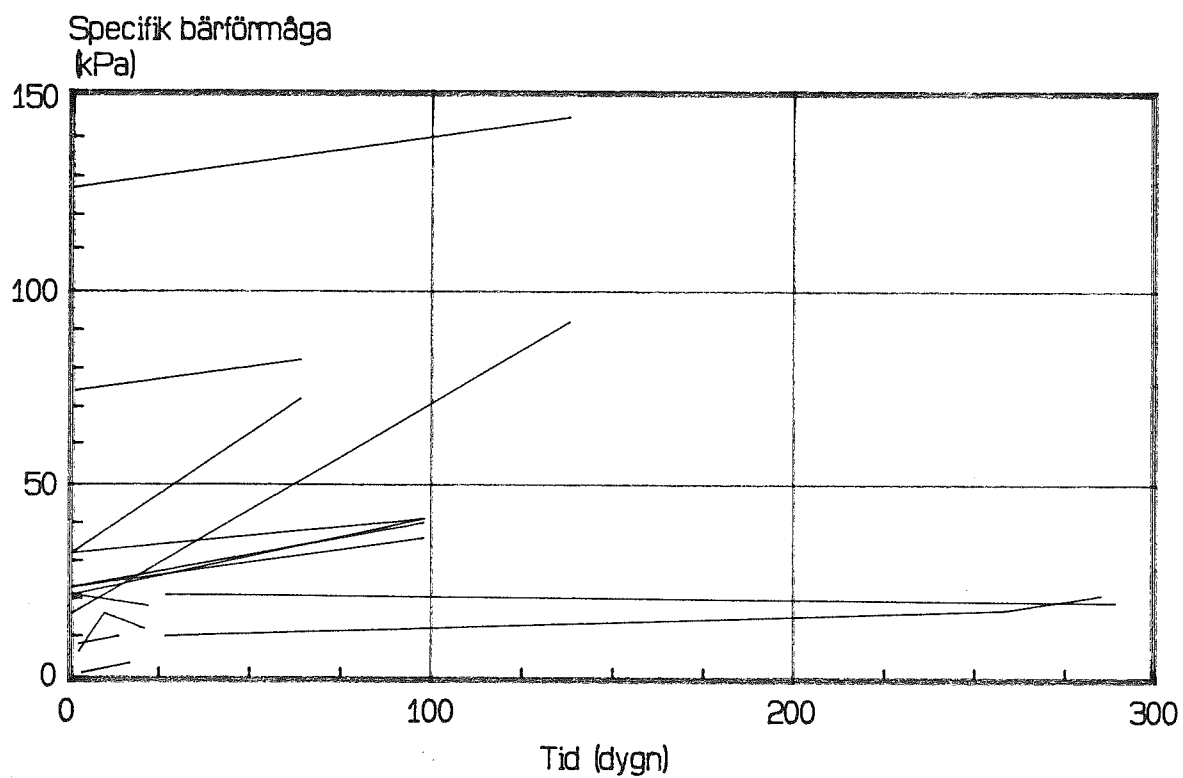
Figur 3.11. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt med tiden vid hejarsonderingsmotstånd 10-25 slag/0,2m.



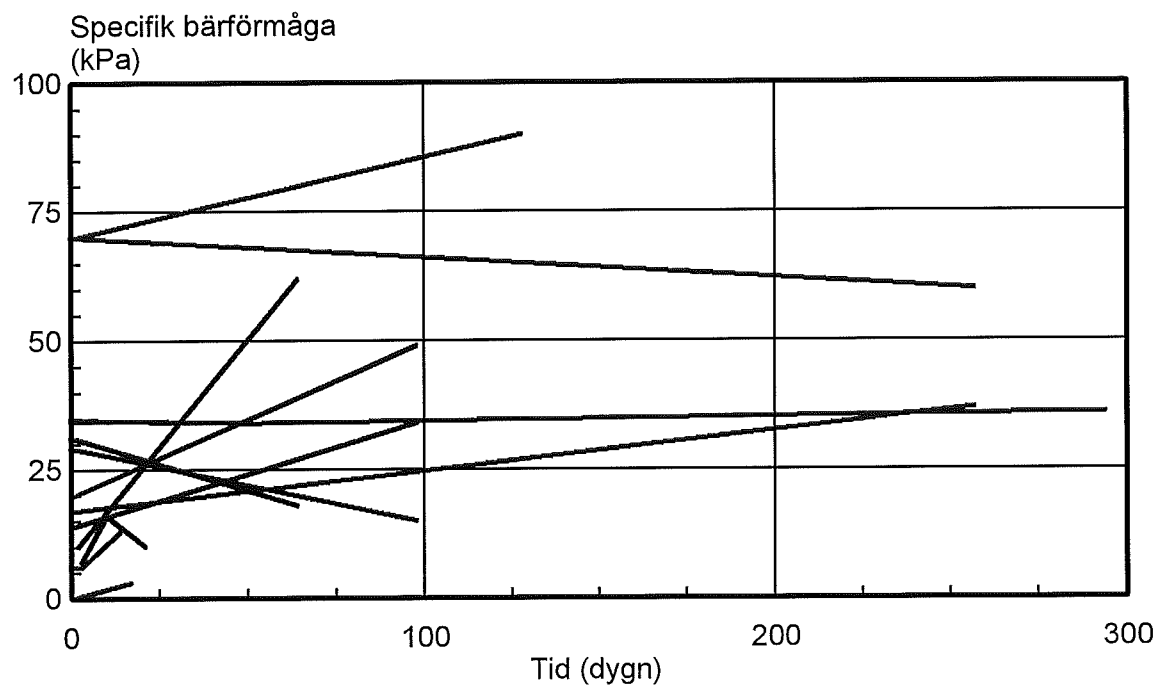
Figur 3.12. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt med tiden vid hejarsonderingsmotstånd >25 slag/0,2m.



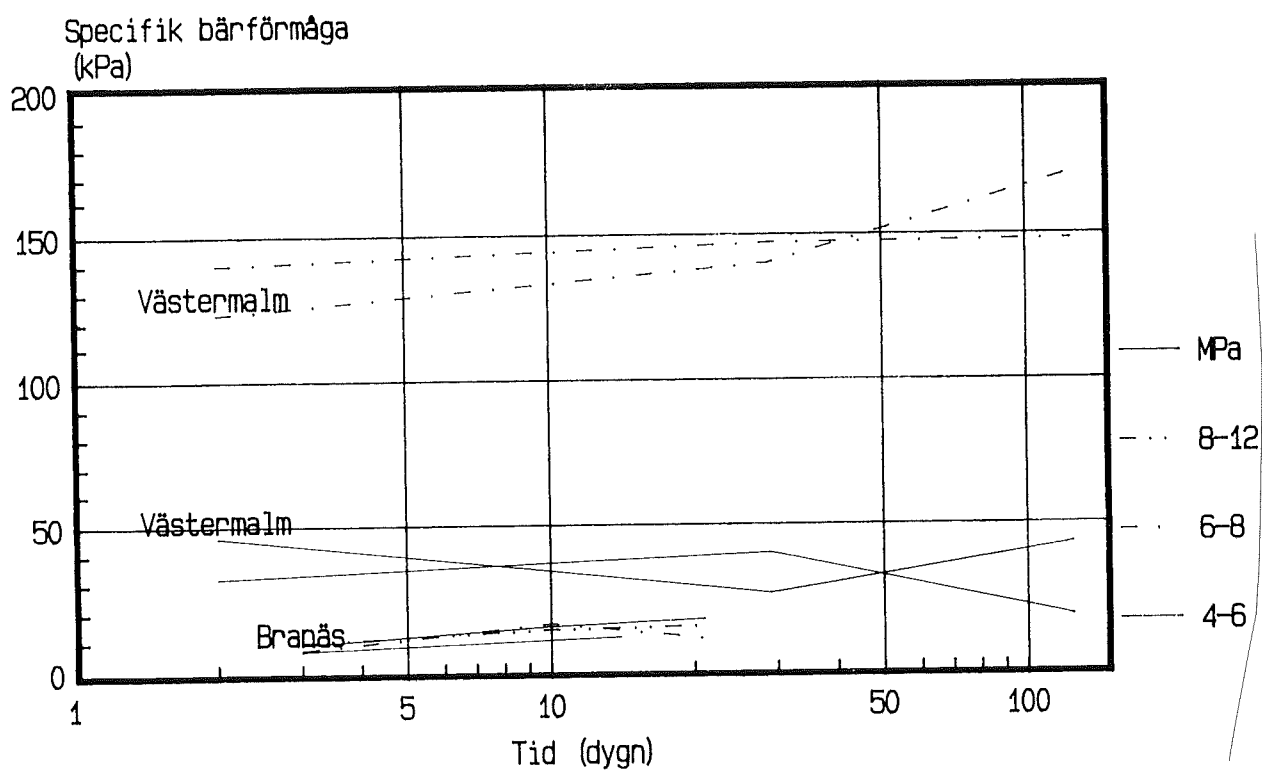
Figur 3.13. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt med tiden vid viktsonderingsmotstånd 0-10 hv/0,2m.



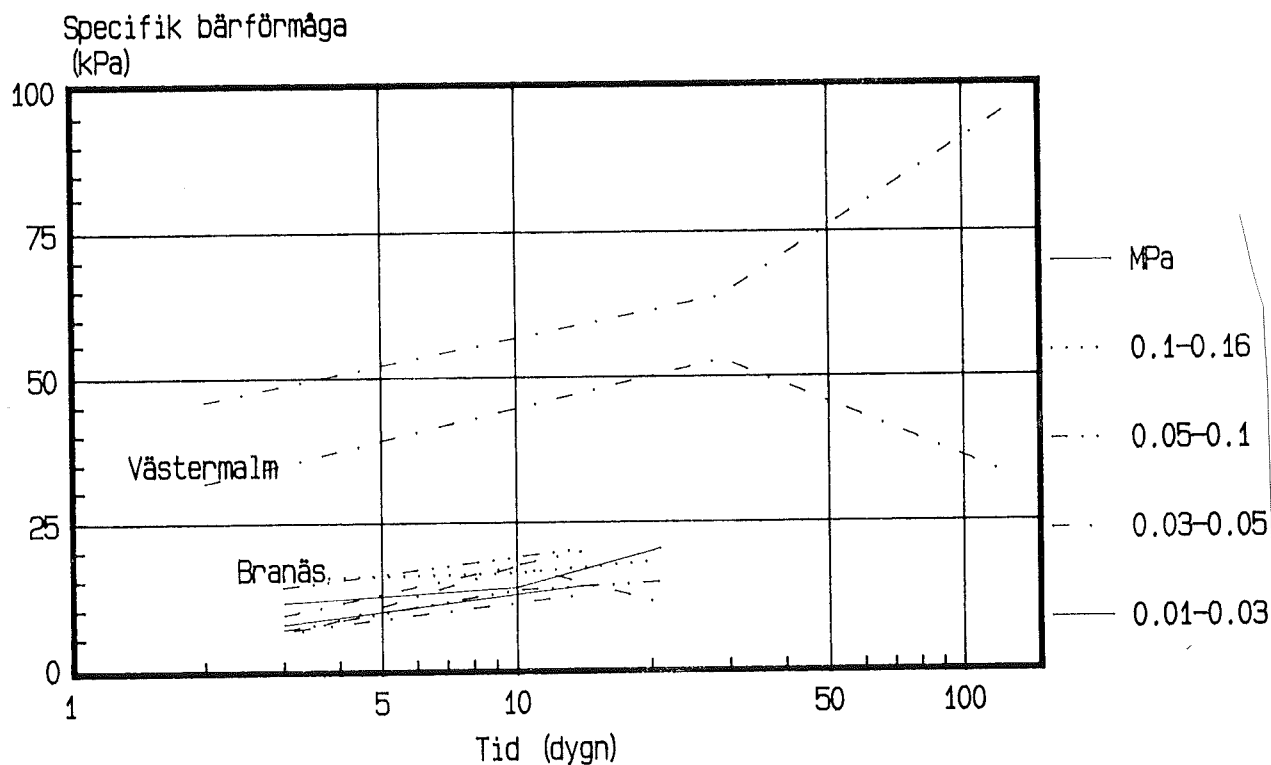
Figur 3.14. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt med tiden vid viktsonderingsmotstånd 10-30 hv/0,2m.



Figur 3.15. Sammanställning av specifika bärförmågans tillväxt med tiden vid viktsonderingsmotstånd 30-60 hv/0,2m.



Figur 3.16. Sammanställning av specifika bärformågens tillväxt med tiden i relation till spetsmotstånd, q_c (CPT)



Figur 3.17. Sammanställning av specifika bärformågens tillväxt med tiden i relation till mantelfriktion, f_s (CPT)

4. Stötvågsmätning på hejarsondstänger

4.1 Inledning

Stötvågsmätning på hejarsondstänger är en ny geoteknisk undersökningsmetod, presenterad av Eriksson (1992). Målsättningen med metoden är att utifrån mätresultat från hejarsondstänger kunna förutsäga bärförmågan hos pålar. Utvecklingsarbete pågår fortfarande för att bättre klarlägga sambanden mellan resultaten från stötvågsmätning på hejarsondstänger och från mätningar på pålar.

Avsikten med att utföra stötvågsmätningar på hejarsondstänger inom tillväxtprojektet var att utröna om detta kunde vara ett sätt att förutsäga när tillväxt av bärförmåga kan förväntas, samt i vilken storleksordning tillväxten kan bli. Hejarsonden användes således i princip som en liten provpåle.

Stötvågsmätning på hejarsondstänger tillgår i princip på samma sätt som vid mätning på pålar. Givare för kraft och acceleration skruvas fast på ett stångelement med förborrade hål. Detta stångelement placeras överst på sondstängerna (massivt stål, Ø 32 mm). Som slagningsutrustning vid stötvågsmätningen användes i de här redovisade fallen standard-hejare för hejarsondering metod A (fallvikt 63,5 kg, fallhöjd 0,5 m).

Mätningar utförs dels vid efterslagning 12-24 timmar efter neddrivning av sondstängerna, dels vid ytterligare minst ett tillfälle. Bärförmågan och dess fördelning längs sondstängernas mantelyta bestäms vid båda mättillfällena. Man kan sedan studera tillväxten i total bärförmåga och förändringar av bärförmågens fördelning längs mantelytan. Dessa resultat jämförs sedan med motsvarande resultat från pålar på samma plats. Av praktiska orsaker har sonderorna stått kortare tid i jord mellan första och sista efterslagning än motsvarande pålar. Detta borde dock inte påverka resultaten i någon hög grad, eftersom man kan anta att största delen av såväl pålarnas som sonderornas tillväxt redan erhållits vid sista efterslagningen (med undantag för Branäs där andra efterslagningen skedde efter kort tid). Dessutom kan man anta att tillväxtförloppet sker snabbare för sond jämfört med påle eftersom sondens dimensioner är mycket mindre.

Jämförelserna mellan påle och sond avser främst lastfördelningarnas profiler och den procentuella ökningen av mantelfriktionen med tiden. Storleken på mantelfriktionen skiljer sig oftast avsevärt mellan påle och sond (pålarnas mantelfriktion är upp till fyra gånger större än hejarsonderornas). Detta beror på skillnaderna i storlek, form och material mellan påle och sond.

Efter ett slag på hejarsonden kan man anta att denna ibland står inspänd i jorden på samma sätt som för pålar. Detta borde inte påverka totala bärförmågan för sonden. Mantelfriktionens fördelning kan däremot påverkas, och därmed blir bedömningen av

inom vilka djupintervall tillväxten sker något osäkrare. Analys av flera på varandra efterföljande slag kan ge bättre uppfattning om eventuell inspanning och därmed minska osäkerheten. Detta har gjorts i de tre fall som presenteras här.

Vid utnyttjandet av hejarsondmätningar kan man erhålla indikationer på om tillväxt av bärförmågan sker, på vilka djup den erhålls, samt få en ungefärlig uppfattning om dess storlek. Detta utan att direkt behöva finna sambanden som kopplar ihop bärförmågan hos en hejarsond med bärförmågan hos en påle. Det medför en stor fördel eftersom metoden i princip kan användas direkt oberoende av om man funnit precisa samband enligt ovan eller inte.

Bland de pålprojekt som redovisas i kapitel 6 valdes tre stycken ut för att jämföras med resultat från stötvågsmätning på hejarsondstänger. De tre provplatser som studerats är, i kronologisk ordning Branäs, Orsa och Mellsta.

4.2 Provplats Branäs

Allmänt

Resultaten från prov- och produktionspålningen för bro över Klarälven vid Branäs pekade på att denna provplats kunde vara intressant för vidare studier av bland annat pålars tillväxt och jordens pålbarhet. Man utförde kompletterande geoundersökningar och en separat provpålgrupp för dynamisk och statisk provbelastning installerades. Jordlagerföljd och provpålning beskrivs i kapitel 6.2. Vi beslutade att även utföra stötvågsmätningar på hejarsondstänger för att studera om detta kunde vara en användbar metod för att förutsäga tillväxt.

Utförande och resultat

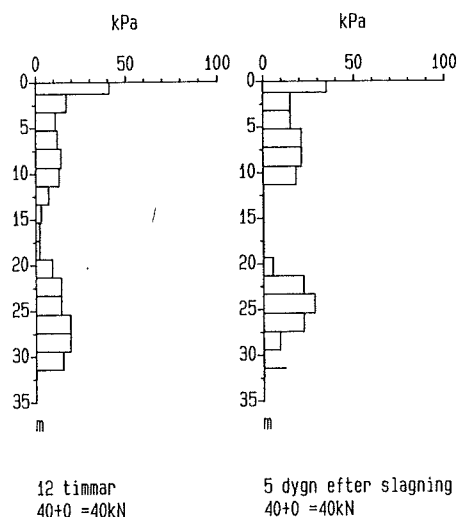
Två hejarsondstänger slogs ned, en i anslutning till vardera stöd 1 och 4 på varsin sida av älven. Hejarsonden i stöd 1 slogs ned till 31,4 m djup och i stöd 4 till 24,4 m djup under markytan. Spetsnivåerna motsvarade i stort pålspetsnivåerna i stöd 1 respektive stöd 4.

Stötvågsmätning utfördes både på olika nivåer under drivning samt vid efterslagning efter ca 12 timmar och efter 5 dygn. I **Fig. 4.1** redovisas mantelfriktionens fördelning för hejarsonder i stöd 1 och 4. Den totala bärförmågan har inte ökat mellan första och andra efterslagningen, varken vid stöd 1 eller stöd 4. Emellertid har vid båda stöden en förändring av bärförmågens fördelning längs mantelytan erhållits. Tendensen pekar åt att i de jordlager där den största mantelfriktionen uppmättes vid första efterslagningen, där har en tillväxt av mantelfriktionens storlek erhållits. För hejarsonden vid stöd 1 har tillväxten framför allt erhållits på djupet 22-27 m under markytan, samt på 5-12 m djup. Hejarsonden vid stöd 4 har erhållit störst tillväxt på 18-22 m djup under markytan.

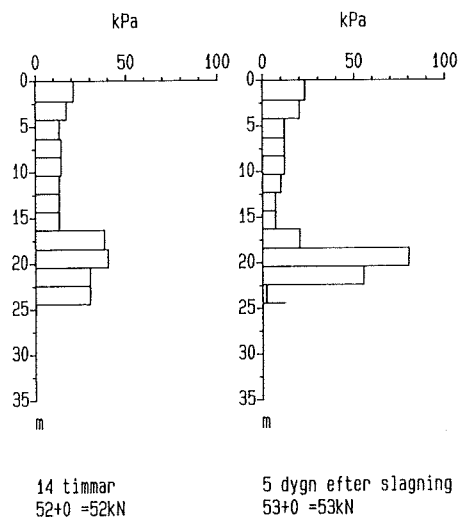
Dessa resultat kan sedan jämföras med de från pålarna P112 och P118 i stöd 1, samt P412 och P416 i stöd 4. I **Fig. 4.2** och **4.3** redovisas mantelfriktionens fördelning för dessa pålar. I stöd 1 erhöll påle P112 totalt sett en ökning av bärförmågan både mellan 3 och 10 dygn och från 10 till 21 dygn efter slagning. Mellan 3 och 10 dygn skedde ök-

ningen i princip på 2-20 m djup med de största ökningarna på 5-12 m djup. Mellan 10 och 21 dygn erhöles den största tillväxten på 27-30 m djup, medan på 6-14 m djup hade mantelfriktionen minskat. Påle P118 i stöd 1 hade drivits ytterligare ca 7 m mellan första och andra efterslagningen. Resultaten är därmed inte direkt jämförbara, och bör användas med urskiljning. Studerar man enbart förändringen av bärförmågan ned till den ursprungliga spetsnivån så har denna ökat längs hela längden. Störst ökning har erhållits på 8-23 m djup. Den största mantelfriktionen finns i jordlagren på 15-25 m djup.

Branäs hejarsond, stöd 1

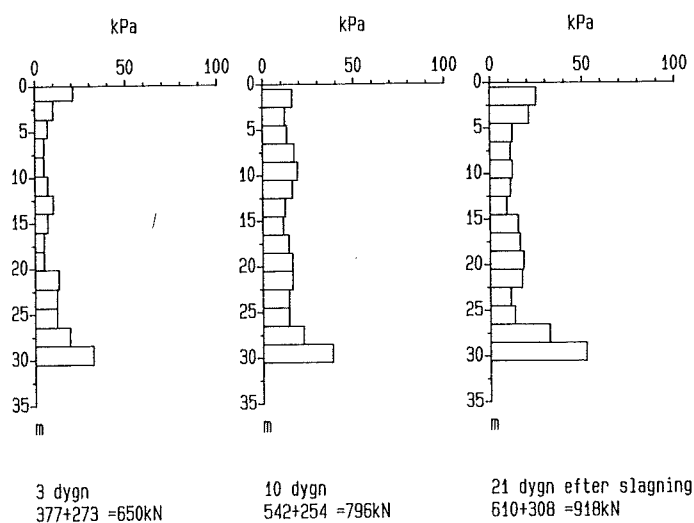


Branäs hejarsond, stöd 4

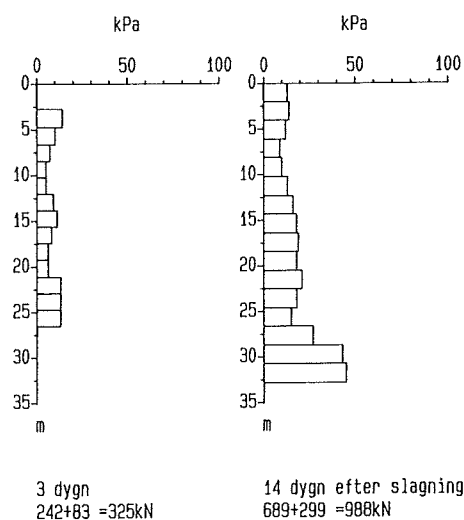


Figur 4.1. Mantelfriktionens fördelning för hejarsond i stöd 1 och stöd 4, Branäs.

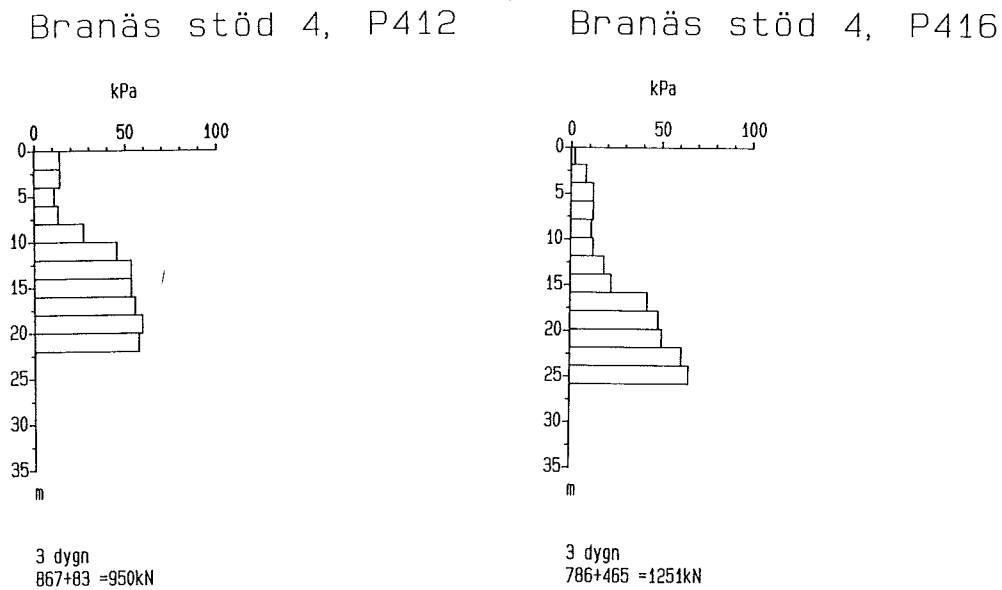
Branäs stöd 1, P112



Branäs stöd 1, P118



Figur 4.2. Mantelfriktionens fördelning för påle P112 och P118 i stöd 1, Branäs. OBS att P118 har drivits ytterligare 7 m mellan första och andra mättilfället.



Figur 4.3. Mantelfriktionens fördelning för påle P412 och P416 i stöd 4, Branäs.

Jämförelse mellan resultaten från stötvågmätningen på hejarsonden och på pålarna gav följande resultat. En relativt god överensstämmelse mellan resultat från andra efterslagningen på sonden och påle P112 vad gäller fördelning och tillväxt kan påvisas. Tredje efterslagningen på P112 avviker dock från dessa resultat. För påle P118 är överensstämmelsen mera tvetydig. Denna påle är dock inte direkt jämförbar då den drivits vidare mellan efterslagningarna.

I stöd 4 har inga pålar provbelastats mer än en gång. Provb belastningen utfördes 3 dygn efter drivning. Den jämförelse vi kan göra mellan hejarsond och pålar gäller därför enbart bärformågens fördelning längs manteln.

Påle P412 har övervägande delen av bärformågan jämnt fördelad inom djupintervallet 10-22 m. För påle P416 ligger huvuddelen av bärformågan från djupet 15 m och därefter succesivt ökande till 26 m djup.

En jämförelse mellan fördelning för hejarsonden och den för pålarna visar på en relativt god överensstämmelse. Hejarsonden har sin största mantelfriktion i de jordlager där pålarna har största mantelfriktionen. För hejarsonden har största tillväxten även erhållits i dessa lager.

4.3 Provplats Orsa

Allmänt

Provplatsen vid bron över Ore älv valdes ut bland pålprojekten eftersom man erhållit en stor tillväxt på båda provpålarna under tiden 2 till 64 dygn efter slagning. Jordlagerföljd och provpålning beskrivs i kapitel 6.9.

Utförande och resultat

Två hejarsondstänger drevs ned ca 25 m söder om landfästet och 10 m från älven. Avståndet mellan hejarsonderna var ca 5 m. Spetsdjupet för båda sonderna var 24,4 m. Provpålarna hade spetsdjupen 24,6 resp. 28,0 m. Stötvågsmätning utfördes på olika nivåer under drivningen samt vid efterslagning. På sond 1 utfördes efterslagning efter 15 timmar och 36 dygn efter slagning. Sond 2 efterslogs efter 18 timmar, 5 dygn samt 35 dygn efter slagning.

Tabell 4.1. Resultat från stötvågsmätning på hejarsondstänger i Orsa.

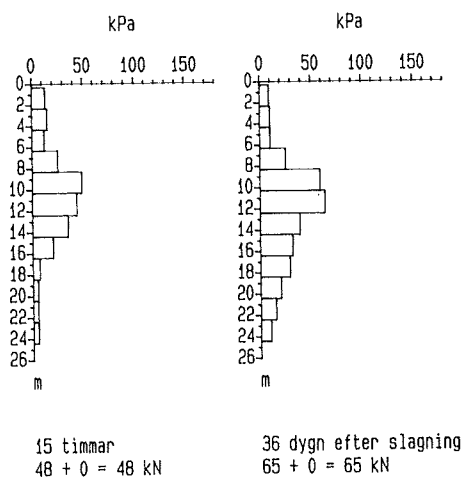
	Tid efter drivning	Bärförmåga (kN)
Sond 1	15 timmar	48 kN
	36 dygn	65 kN
Sond 2	18 timmar	40 kN
	5 dygn	50 kN
	35 dygn	57 kN

Den totala bärförmågan har ökat för både sond 1 och sond 2. Ökningen har varit kraftig och i samma storleksordning för båda hejarsonderna (35 respektive 43 %). I **Fig. 4.4** redovisas mantelfriktionens fördelning för hejarsond 1 och 2. Det är en mycket god överensstämmelse mellan fördelningen för sond 1 och för sond 2, vid såväl första som sista efterslagningen. För sond 1 har största tillväxten av mantelfriktionen erhållits på 8-22 m djup. För sond 2 hade mantelfriktionen sin största ökning på 6-14 m djup.

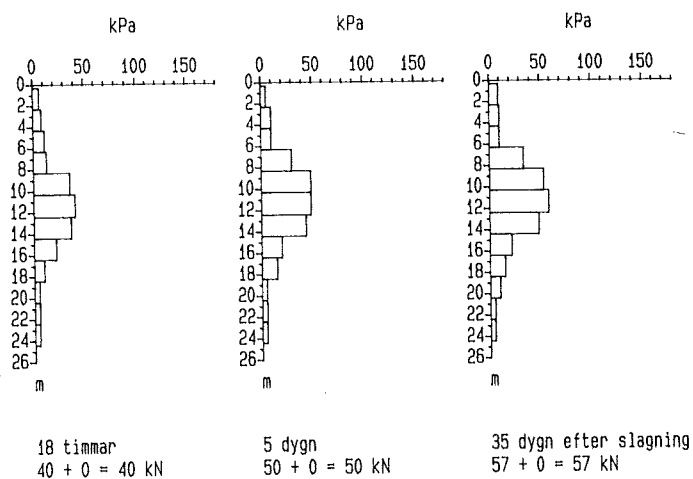
Pålarna P1 och P8 hade haft en ökning av totala bärförmågan på ca 70 resp. 90 % under tiden från 1 resp. 2 dygn till 64 dygn efter drivning. I **Fig. 4.5** redovisas mantelfriktionens fördelning för pålarna P1 och P8. För påle P1 har den största tillväxten av mantelfriktionen erhållits på 6-17 m djup. Påle P8 hade största tillväxten på djupet 9-19 m under markytan.

En jämförelse mellan resultaten från stötvågsmätningarna på hejarsonderna med resultaten från pålarna kan nu göras. Jämförelse mellan tillväxten för hejarsonderna respektive pålarna visar på en god överensstämmelse. De djup under markytan där hejarsonderna hade sina största tillväxter faller inom motsvarande intervall för pålarna. Även fördelningen av mantelfriktionen ger en likartad bild vid jämförelse mellan sonder och pålar även om pålarna har en större specifik bärförmåga än sonderna. Bästa överensstämmelse fås när sista efterslagningarna jämförs.

Orsa hejarsond 1

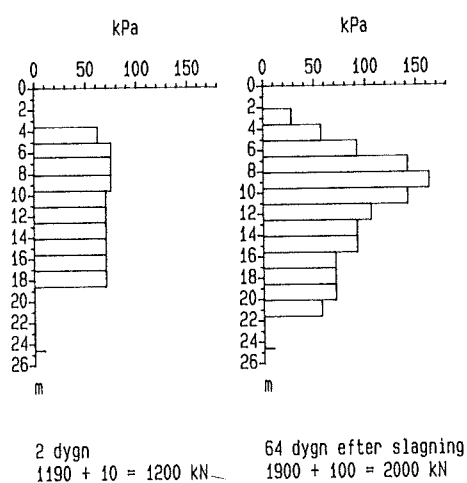


Orsa hejarsond 2

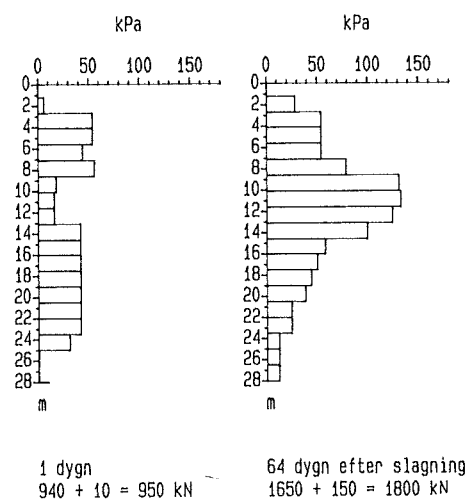


Figur 4.4. Mantelfriktionens fördelning för hejarsond 1 och 2, Orsa.

Orsa påle 1



Orsa påle 8



Figur 4.5. Mantelfriktionens fördelning för påle P1 och P8, Orsa.

4.4 Provplats Mellsta

Allmänt

Provpålningen för bro över Dalälven vid Mellsta visade på en kraftig tillväxt i bärförmågan med tiden. Detta tillsammans med relativt homogen jordlagerföljd bestående av i huvudsak sand gjorde platsen lämpad för fältförsök med stötvågsmätning på hejarsondstänger. För pålarna har ökningen i bärförmågan uppmätts mellan 1 och 138 dygn efter slagning. Jordlagerföljd och provpålning beskrivs i kapitel 6.8.

Utförande och resultat

Totalt fyra hejarsonder drevs ned, två vid vardera stöd 1 och 6. Vid stöd 1 söder om älven placerades sonderna ca 30 m väster om landfästet med ett inbördes avstånd på ca 5 m. Spetsdjupet för båda sonderna var 29,4 m under markytan. Provpåle 3 och 4 hade spetsdjup 27,9 respektive 19,9 m under markytan vid första efterslagningen. Mellan första och andra efterslagningen på pålarna fylldes markytan upp ca tre meter. Pålarnas längd i jord ökade då till 30,9 respektive 22,3 m. Spetsnivåerna var dock oförändrade. Vid stöd 6 norr om älven placerades sonderna cirka 20 m väster om landfästet, med ett inbördes avstånd av cirka 5 m. Spetsdjupet för båda sonderna vid stöd 6 var 25,4 m. Provpåle 1 och 2 hade spetsdjup 26,1 respektive 18,9 m.

Stötvågsmätning på hejarsondstängerna utfördes på några nivåer under drivningen samt vid efterslagning. På sond 2 utfördes efterslagningen efter 15 timmar, 7 respektive 55 dygn efter slagning. Sond 2 efterslogs efter 15 timmar och 55 dygn. Sond 3 efterslogs efter 16 timmar, 6 respektive 55 dygn. Sond 4 efterslogs efter 16 timmar och 55 dygn.

Tabell 4.2. Resultat från stötvågsmätning på hejarsondstänger i Mellsta.

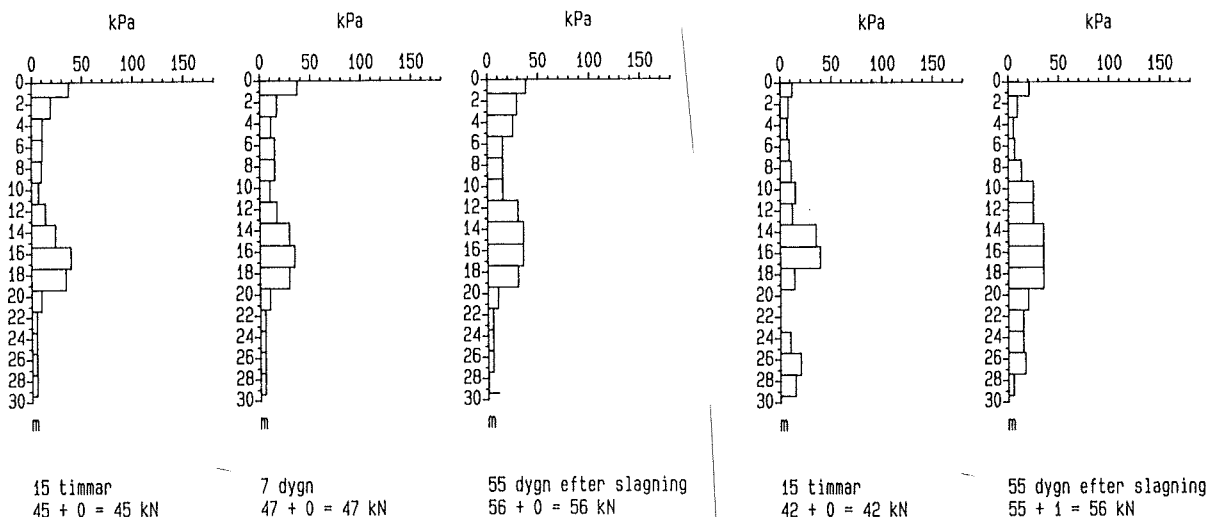
	Tid efter drivning	Bärförmåga (kN)	Procentuell tillväxt
Stöd 1 (södra)			
Sond 1	15 timmar	45 kN	24 %
	7 dygn	47 kN	
	55 dygn	56 kN	
Sond 2	15 timmar	42 kN	33 %
	55 dygn	56 kN	
Stöd 6 (norra)			
Sond 3	16 timmar	35 kN	71 %
	6 dygn	50 kN	
	55 dygn	60 kN	
Sond 4	16 timmar	47 kN	21 %
	55 dygn	57 kN	

Stöd 1, södra

Sond 1 och 2 i stöd 1 har båda en ökning av bärförmågan med tiden. Ökningen har varit i samma storleksordning (24 respektive 33 %). Mantelfriktionens fördelning för sond 1 och 2 redovisas i **Fig. 4.6**.

Mellsta hejarsond 1

Mellsta hejarsond 2



Figur 4.6. Mantelfriktionens fördelning för sond 1 och 2, stöd 1, Mellsta.

Det är som synes en god överensstämmelse mellan sond 1 och 2 med avseende på såväl mantelfriktionens fördelning som totala bärförmåga, vid både första som sista efterslagningen.

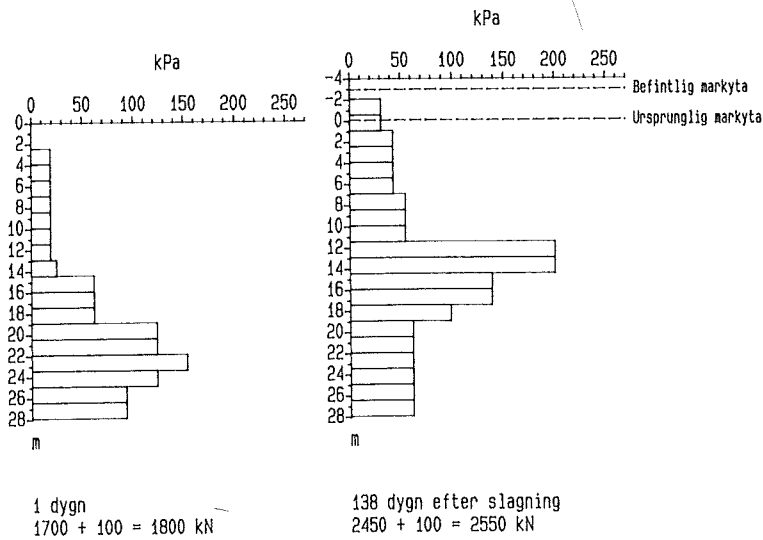
För sond 1 har största tillväxten av mantelfriktionen erhållits på 2-15 m djup. För sond 2 har största tillväxten erhållits på 9-13 respektive 17-23 m djup.

Påle 3 och 4 i stöd 1 erhöll en tillväxt i bärförmåga på ca 42 respektive 118 % under tiden från 1 till 138 dygn efter drivning. I **Fig. 4.7** redovisas mantelfriktionens fördelning för pålarna 3 och 4.

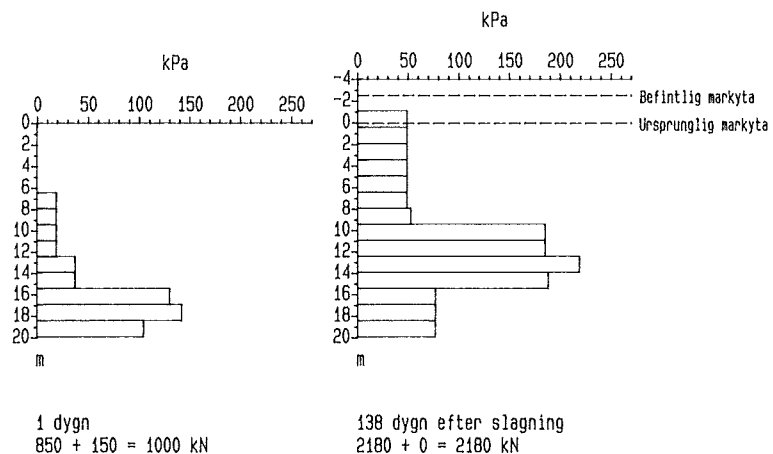
För påle 3 har den största tillväxten av mantelfriktionen erhållits på 0-20 m djup. Därunder har mantelfriktionen minskat mellan första och andra efterslagningen. Påle 4 hade största tillväxten på djupet 0-15 m under markytan. Därunder har även för denna påle mantelfriktionen minskat.

Minskningen i mantelfriktion längs pålens nedre del vid andra efterslagningen kan vara orsakad av att pålen inte blev helt mobiliserad vid stötvågsmätningen. Dvs, man förmodade inte förskjuta pålen tillräckligt i förhållande till jorden vid mätslaget. Detta på grund av att pålen hade erhållit så hög bärförmåga längs sin övre del att energin i mätslaget vid andra efterslagningen var för liten för att förskjuta hela pålen.

Mellsta påle 3 stöd 1



Mellsta påle 4 stöd 1



Figur 4.7. Mantelfriktionens fördelning för påle 3 och 4, stöd 1, Mellsta.

Jämförelse mellan resultaten från stötvågsmätningen på hejarsondstängerna och på pålarna i stöd 1 gav följande resultat:

- Vid första efterslagningen på påle 3 erhöles huvuddelen av bärformågan på större djup än för hejarsonderna. Vid andra efterslagningen hade fördelningen för påle 3 ändrats radikalt med huvuddelen av bärformågan ca 7 m högre upp längs manteln. Detta kan bero på att efter första efterslagningen på pålarna fylldes markytan upp ca 3 m, vilket påverkar förhållandena i jorden. Motsvarande ändring av fördelningen, dock i något mindre utsträckning, erhöles även för påle 4.
- Båda hejarsondstängerna slogs lång tid efter att uppfyllnaden utförts och vid sidan om densamma, och bör alltså inte ha påverkats av denna. Vid jämförelse av mantelfriktionens fördelning från andra efterslagningen erhöles en god överensstämmelse mellan sonder och pålar. Störst vikt bör också läggas vid resultaten från andra efterslagning-

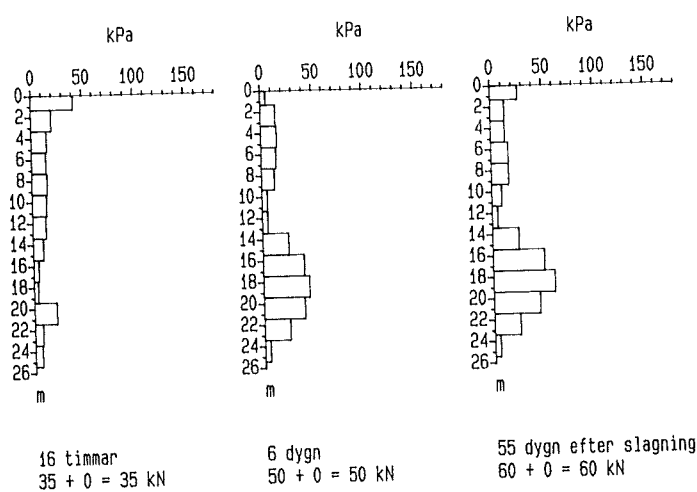
en på pålarna eftersom jordförhållandena vid det tillfället bättre bör motsvara de som rådde vid försöken med hejarsonder.

Stöd 6, norra

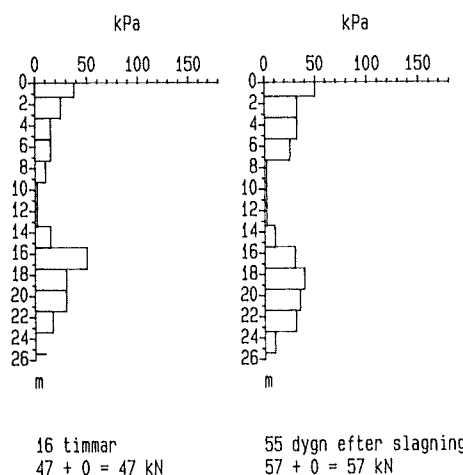
Sond 3 och 4 i stöd 6 har båda fått en ökning av bärförmågan med tiden. Ökningen har varit 71 % för sond 3 och 21 % för sond 4. Storleksskillnaden beror främst på olika bärförmågor vid första efterslagningen. Vid den andra efterslagningen är bärförmågorna för sond 3 och 4 i samma storleksordning.

I **Fig. 4.8** redovisas mantelfriktionens fördelning för sond 3 och 4.

Mellsta hejarsond 3 stöd 6



Mellsta hejarsond 4 stöd 6



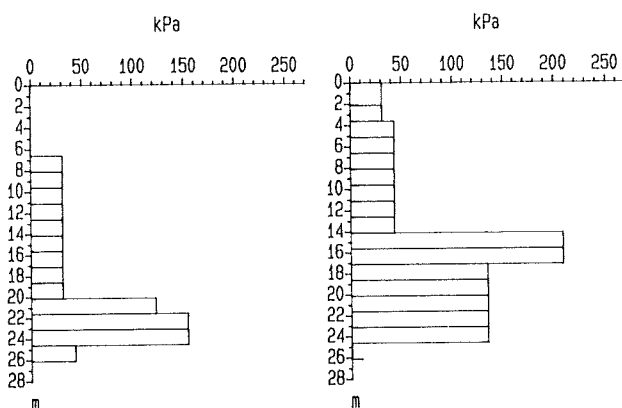
Figur 4.8. Mantelfriktionens fördelning för sond 3 och 4, stöd 6, Mellsta.

Överensstämmelsen mellan fördelningarna för sond 3 respektive 4 vid första efterslagningen är god vad gäller de övre två tredjedelarna av sondaerna. Längs de nedre delarna skiljer de sig dock markant. Sond 3 har här en mycket liten mantelfriktion jämfört med sond 4. Vid andra efterslagningen erhålls en i stora drag god överensstämmelse längs hela sondlängderna.

Ovannämnda skillnader gör att tillväxten ser olika ut för de två sondaerna. Sond 3 har en mycket stor ökning av mantelfriktionen på 14-23 m djup. För sond 4 har största ökningen inträffat på djupet 0-7 m under markytan, medan ökningen på djupet 14-23 m är liten.

Påle 1 och 2 i stöd 6 har ökat sina bärförmågor med 86 respektive 114 % under tiden 1 till 128 dygn efter drivning. Ökningens storlek är alltså relativt lika för pålarna. Skillnaden i bärförmåga mellan påle 1 och 2 är dock stor vid såväl första som andra efterslagningen. I **Fig. 4.9** redovisas mantelfriktionens fördelning för påle 1 och 2.

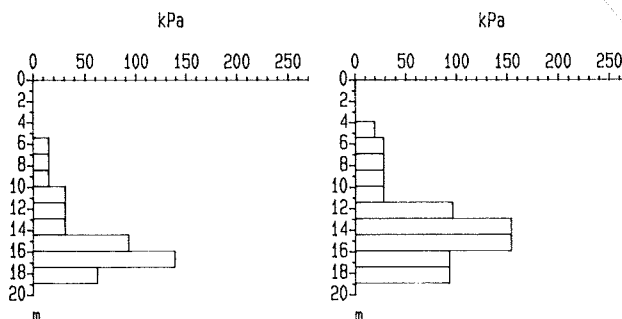
Mellsta påle 1 stöd 6



1 dygn
1225 + 50 = 1275 kN

128 dygn efter slagning
2370 + 0 = 2370 kN

Mellsta påle 2 stöd 6



1 dygn
700 + 50 = 750 kN

128 dygn efter slagning
1555 + 50 = 1605 kN

Figur 4.9. Mantelfriktionens fördelning för påle 1 och 2, stöd 6, Mellsta.

Påle 1 och 2 har i stora drag likartade profiler på mantelfriktionens fördelning vid båda efterslagningarna om man i första hand ser till pålarnas längd och inte till djup under markytan. (Pålarna har olika längd, 26 respektive 19 m, under markytan). Båda pålarna har klart störst mantelfriktion på de nedersta 5-6 meterna. Det är också längs den nedre delen av pålarna som den största tillväxten sker. För påle 1 är tillväxten störst på de nedersta 10 meterna. För påle 2 erhålls största ökningen 7 meter från pålspets och uppåt. För båda pålarna erhålls största mantelfriktionen vid andra efterslagningen längs den del av pålen som hade största ökningen av mantelfriktionen med tiden.

Om man istället utgår från djup under markytan så får påle 1 respektive 2 sin största mantelfriktion på olika djup vid första efterslagningen. Påle 1 har största värdena på 19-26 m djup, alltså under pålspetsnivå för påle 2. Vid andra efterslagningen sammanfaller nivåerna för största mantelfriktion för påle 2 (så djupt den når) med motsvarande nivåer för påle 1. Den klart största ökningen av mantelfriktionen har för båda pålarna erhållits från ca 12-13 m under markytan och ned till pålspets.

Jämförelse mellan resultat för sonder och pålar i stöd 6 gav följande resultat. Vid första efterslagningen på sond 3 avvek mantelfriktionens fördelning från pålarnas. Den största ökningen i mantelfriktionen med tiden erhöles dock på i stort sett samma djupintervall för sond 3 och för båda pålarna. Överensstämmelsen mellan fördelningarna hos pålarna och sond 3 vid andra efterslagningen är därför god.

För sond 4 erhöles största tillväxten längs sondens övre del, vilket dåligt motsvarar resultatet för pålarna. Studerar man mantelfriktionens fördelning längs sondens nedre två tredjedelar och jämför med pålarna så är överensstämmelsen relativt god vid första efterslagningen och god vid den andra.

4.5 Sammanfattning

Försöken med stötvågsmätning på hejarsondstänger vid flera tidpunkter efter drivning för bestämning av tillväxt gav gott resultat. Jämförelsen med motsvarande mätningar på pålar visade att hejarsondsmätningar är en användbar metod för att förutsäga tillväxt av pålars bärformåga i aktuell jord. Försöken visar att metoden med stötvågsmätning vid flera tidpunkter efter drivning kan användas för att:

1. förutsäga om tillväxt av bärformågan hos pålar i aktuell jord är trolig.
2. indikera i vilka jordlager tillväxten erhålls.
3. ge en ungefärlig uppskattning av tillväxtens storlek.

Fler jämförelser mellan resultat från stötvågsmätningar på hejarsonder respektive pålar behöver utföras för att underbygga och förbättra precisionen i ovanstående påståenden. Fortsatta studier av resultat från jämförelser kan ge bättre förutsättningar för en noggrannare bestämning av de jordlager där tillväxt kan förväntas. Ytterligare jämförelser erfordras också för kalibrering av resultaten från hejarsondsmätningar med resultat från stötvågsmätningar på pålar. Detta för att få underlag för en mer tillförlitlig bedömning av tillväxtens storlek.

De hittills framkomna resultaten pekar på att metoden är användbar redan i nuläget. Geoundersökningarna för pålprojekt i jordar där tillväxt eventuellt kan förväntas bör kompletteras med stötvågsmätning på hejarsondstänger vid minst två tillfällen efter drivning. Man erhåller då en förhållandevis billig undersökning om tillväxt kan förväntas på pålarna. Metoden är relativt enkel att använda då man endast behöver utnyttja en vanlig hejarsonderingsutrustning samt traditionell utrustning för stötvågsmätning på betong- och stålålar. I de fall där resultaten pekar på att en betydande tillväxt av pålars bärformåga kan förväntas utför man en provpåling. På provpålarna utförs dynamisk provbelastning vid två efterslagningar. Efterslagningarna utförs dels efter 12-24 timmar och dels efter den tid då en betydande del av tillväxten har erhållits. Resultaten från hejarsondmätningarna kan ge underlag för val av tidpunkt. I praktiken utförs andra efterslagningen oftast efter ca en vecka för att inte fördröja övrigt arbete i större utsträckning.

Resultaten från stötvågsmätningar på hejarsondstänger i Branäs, Orsa och Mellsta avses att redovisas mera fullständigt i en separat rapport i Pålkommissionens serie, tillsammans med ytterligare två provplatser, Öre älv och Igelstabron, stöd 9. I rapporten skall vidare en sammanfattande analys göras av resultaten från de fem provplatserna.

5. Litteraturinventering

I litteratursökningen har, förutom SGI:s egen databas SGILINE, följande internationella databaser genomsköts, ASIAN GEOTECHNOLOGY, COMPENDEX, NTIS och PASCAL. Endast 12 artiklar har bedömts som intressanta utifrån syftet med detta projekt. Redovisningen nedan skiljer sig något åt, beroende på hur artiklarna har varit skrivna, men också på hur intressanta de är för detta projekt.

Kapitlet avslutas med några sammanfattande kommentarer.

Inledningsvis bör det påpekas att det i artiklarna tyvärr sällan framgår om det är samma påle som har testats två gånger eller om det är olika pålar samt om det är fråga om fristående pålar eller pålar i grupp. Observera att alla påståenden i detta kapitel är hämtade från den artikel som behandlas, om inte annat anges.

- **1. J Authier, L Samson:** *Change in pile bearing capacity with time: case history.* 38th Canadian Geotechnical Conference. Edmonton 1985, pp 21 - 27.

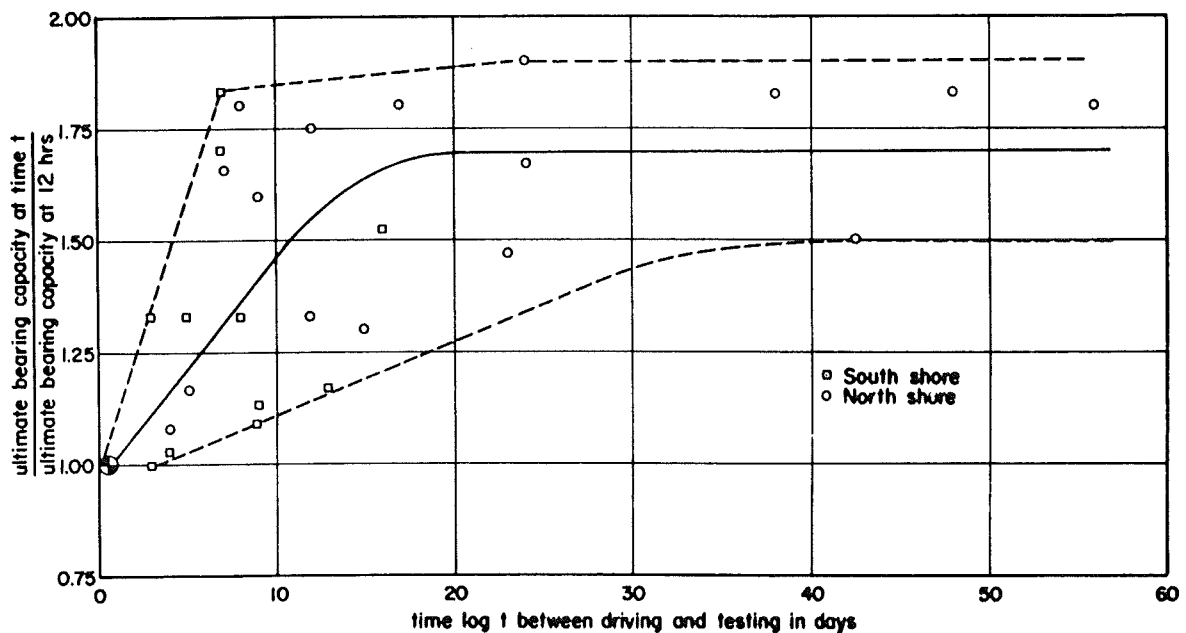
Två fall av med tiden ökande bärförmåga för friktionspålar i sand beskrivs. Dessutom beskrivs två fall där bärförmågan har avtagit med tiden för spetsburna pålar.

Det första fallet av tillväxt gäller ett pålningsarbete för anläggandet av en skyddsvall utmed St. Charles Rivers båda sidor, Quebec City. Pålarna är hexagonala betongpålar mätande 305 mm i ekvivalent diameter. Längderna varierar mellan 8,5 - 13 meter.

Jordlagerföljden utgörs av 5,0 meter fyllning som överlagrar 17 meter sand (fin-/mellansand). Sandens permeabilitet är 10^{-4} m/s. Grundvattenytan ligger på djupet 5,5 meter.

Totalt testades 45 pålar genom statisk provbelastning vid vardera två tillfällen. Först tolv timmar efter slagning och sedan ytterligare en gång, upp till åtta veckor efter slagning (se **Fig. 5.1**). Under de två-tre veckorna närmast efter slagningen ökade pålarnas bärförmåga med omkring 70 %, varefter den förblev på samma nivå.

Författarna konstaterar att perioden två till tre veckor innan full bärighet uppnås, är för lång för att kunna bero på en avgång av porvattenövertryck. I sanden med dess höga permeabilitet borde detta snarare ske inom loppet av några timmar. Ökningen av bärförmågan anses istället bero på förändringar i sandens struktur närmast pålen. Slutligen påpekas att man inte konstaterade några förändringar i drivningsmotståndet när provpålarna efterslogs två dagar efter drivning. Detta skulle enligt författarna bekräfta teorin om att bärförmågens ökning är oberoende av porvattentrycket.



Figur 5.1 Diagram visande bärförmågans relativa ökning med tiden. (Quebec city)

Det andra fallet gäller en bro över en järnväg, 15 km norr om Jasper Alberta. Mätningarna utfördes på en provpåle av stål (HP 310 x 79) med en längd i jord av 14 meter.

Jordlagerföljden utgjordes av 4 meter sand och grus varunder följde ett minst 24 meter mäktigt lager med mellansand. I sanden förekom enstaka lager med mer eller mindre siltig finsand. Grundvattenytan påträffas 5 meter under markytan.

Dynamisk provbelastning utfördes direkt efter avslutad slagning samt 1 1/2 dag senare. Härvid noterades en ökning av bärförmågan från 335 till 445 kN. CAPWAP-analys visade att ökningen främst skedde i sandlagret. 51 dagar efter slagning utfördes en statisk provbelastning som gav en bärförmåga på 620 kN. Författarna menar slutligen att ökningen av bärförmågan från andra till tredje tillfället inte kan bero på någon avgång av övertryck i porvattentrycket.

Samma fall finns dessutom behandlade i:

- **2. J Authier, L Samson:** Canadian Geotechnical Journal vol. 23, no. 2, 1986.

I det närmaste exakt samma artikel som ovan.

- **3. F Tavenas, R Audy:** *Limitations of the driving formulas for predicting the bearing capacities of piles in Sand.* Canadian Geotechnical Journal vol.9, No. 47 1972.

Artikeln är främst en teoretisk utläggning rörande giltigheten för olika pålformler. Som referensobjekt behandlas St. Charles River. Tidsaspekten tas också upp. Artikeln ligger till grund för de ovan två nämnda artiklarna.

- **4. F Tavenas:** *Discussion to "tests on instrumented piles, Ogeechee River site"* by A.S. Vesic, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 1970, 96 (SM6).

I diskussionen tas St. Charles River upp, eller mer korrekt en del av de pålar som har behandlats i ovanstående artiklar. Redan här påpekas att tillväxten inte enbart kan bero på avgång av ett porvattenöverttryck.

- **5. P-E Bengtsson, B Jansson, L Hellman, G Holm:** *Provbelastning av grova stålrörspålar, Södertälje, Sverige.* NGM 1988, Oslo sid 315-319.

Inför ett brobygge för en järnväg söder om Stockholm slogs tre provpålar (stålrörspålar med diametern 508 mm). Platsen för pålningen var ön Fläsklösa som utgör en topp på en undervattensås i Hallsfjärden. Åsjorden består av sten, grus och sand, med en total mäktighet på 60 meter. Den underlagras av flera meter morän. Åsjorden är löst lagrad ner till 20 meters djup. En av pålarna slogs ned till berg (70 meter under markytan) medan de andra (P2 och P3) fick en längd av 35-38 meter.

P2 och P3 provbelastades dynamiskt vid två respektive tre tillfällen, en, 33 och (P3) 54 dagar efter drivning. Härvid konstaterades ökning av totala bärförmågan med tio respektive 25 procent. Strax innan den sista dynamiska provbelastningen på P3 hade denna och P2 utsatts för statisk provbelastning. Inför den statiska provningen slogs en spont runt pålarna som mothåll. Härvid uppkom en stor sättningsträtt runt pålarna (som max 0,5 m djup). Detta kan givetvis ha påverkat resultaten från de kommande mätningarna. Nedan i **tabell 5.1** och **5.2**, redovisas resultaten från provbelastningarna. Tabellerna är hämtade direkt från den aktuella artikeln. (Anmärkning: Båda pålarna visar ett minskat spetsmotstånd med tiden, vilket kan tyda på att bärförmågan vid spetsen och pålens nedre del inte är fullt mobiliserad. Den totala bärförmågan skulle i så fall kunna antas vara större än den uppmätta. Detta skulle ge en större tillväxt med tiden än vad som nu konstaterats).

Tabell 5.1. Utvärdering av statisk provbelastning. (Fläsklösa)

Påle nr	Brottlast MN	Kryplast MN	Mantelmotstånd MN
P2	10,0*	5,5	4,0
P3	7,3*	4,1	3,2

*) Extrapolerad

Tabell 5.2. Resultat av CAPWAP-analys. (Fläsklösa)

Påle nr	Datum Efterslagn. nr	Slag	Fallhöjd m	Sjunkning mm	Bärförmåga			Dämpning γ_c		Quake mm	
					Totalt	Mantel	Spets	Mantel	Spets	Mantel	Spets
P2	870703	1	2,5	4	5,35	4,73	0,62	0,98	0,33	3,2	1,0
	870703	4	2,5	6	5,38	4,81	0,57	0,34	0,58	1,4	2,8
	870804	4	3,0	9	5,93	5,24	0,09	0,83	0,40	1,0	1,0
P3	870703	1	3,0	14	3,26	2,78	0,48	0,91	0,12	3,2	3,5
	870703	2	2,5	11	3,30	2,82	0,48	0,86	0,07	3,4	2,0
	870804	3	3,0	12	4,37	3,97	0,40	0,80	0,30	2,5	2,5
	870825	1	3,0	3,5	4,16	3,85	0,31	0,45	0,35	2,0	2,5

■ **6. G Holm, L Bjerin, M Jansson: Tillväxt av bärförmåga hos friktionspålar.**
Nordiska Geoteknikermötet (NGM) 1984 sid 755 - 762.

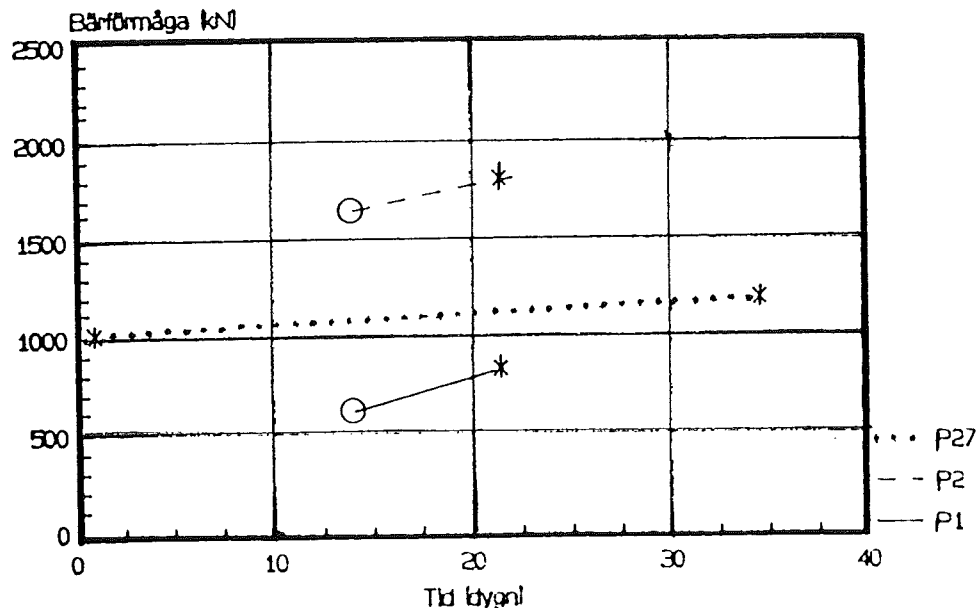
Artikeln behandlar två pålobject, "Djurås, bro över Västerdalälven" samt väg 588 vid Fittja "Bro över Masmovägen". Det sistnämnda objektet beskrivs i detalj i kapitel 6, varför endast Djurås redovisas här.

I Djurås studerades tre provpålar (P1, P2 och P27) av betong, typ B600 (270 x 270 mm), med en längd i jord av 23-35 meter. P1 och P2 var placerade vid ena landfästet och P27 vid det andra. Jorden utgörs ned till 29 meters djup av silt och därunder till minst 37 meter av sand.

Pålarna provbelastades såväl statiskt som dynamiskt, med början 14 dagar efter slagning. Tidpunkter och erhållna resultat framgår av **tabell 5.3** och **Fig. 5.2**. Det måste observeras att innan provbelastningen av P2 1983-09-09 slogs två konstruktionspålar i närheten samtidigt som schaktningsarbeten utfördes. P1 och P2 kapades härvid med nio meter. De nu nämnda konstruktionspålarna anses dock inte ha påverkat P2:s bärförmåga. Ökningen av P2:s bärförmåga till 1983-09-09 beror således på en tidsberoende tillväxt och har skett trots att pålen kapades med nio meter. Produktionspålningen avslutades i början av oktober, och denna senare del anses ha påverkat resultaten från provbelastningarna i oktober.

Tabell 5.3. Tabell utvisande mättillfällen och resultat från provbelastningar.
* avser dynamisk provbelastning. (Djurås)

Påle	Bärförmåga, kN						
	Provbelastningsdatum						
	811214	811221	830630	830803	830909	831010	831013
P1	610	810*				1620*	
P2	1650	1800*			2125*		2450
P27			1020*	1200*			
			Pålning stöd 4				



Figur 5.2. Diagram visande bärförmågans ökning, före produktionspålningen. Med "o" betecknas värde från statisk provbelastning och med * från dynamisk provbelastning. (Djurås). (Bilden modifierad gentemot ursprungsartikeln)

- **7. Hussein J. Al-Sayegh:** *Importance and consideration of dynamic restrike tests on driven piles in calcareous silty sand.* Foundations & Tunnels -89. Proc. Sec.Int. Conf. on Foundations and Tunnels, vol 1, London.

Anledningen till artikeln är att redovisa den i Kuwait första genomförda dynamiska provbelastningen av pålar. Mätningen utfördes på 20 betongpålar (400 x 400 mm samt 300x300 mm). Jordlagerföljden på platsen utgörs av 4-5 meter fyllning, därunder sand som i de övre fem metrarna är medelfast och sedan fast lagrad.

Mätningarna utfördes först en dag och sedan sju dagar efter slagning. Samtliga 20 pålar uppvisade ökad bärförmåga. Dock anges ej hur mycket.

- **8. O. H. Meseck, P Holzmänn:** *Production and testing of 600 reinforced-concrete piles for the Central Bank of Iraq.* Proceedings of the international conference on piling and deep foundations, London 1989.

Två provpålar slogs i en växlande lagerföljd innehållande en hel del lera och för övrigt sand och silt. Såväl dynamiska som statiska provbelastningar utfördes. Åtminstone en av pålarna provbelastades vid fyra tillfällen under en tid av 40 dagar, varvid en sextioprocentig ökning av bärförmågan kunde iakttas. Pålarna står emellertid med spetsen i ett hårt lager varför de har hög spetsbärförmåga.

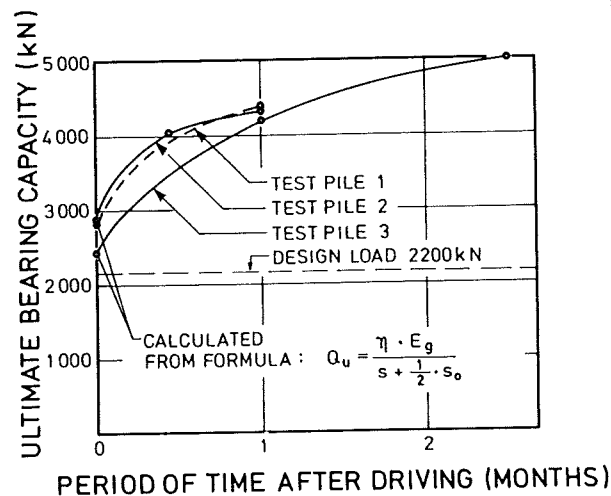
■ **9. D Moe, H Arvesen, O.S Holm:** *Friction bearing pipepiles at Calabar Port*, X ICSMFE Stockholm 1981, pp 781 - 786.

I samband med ett hamnbygge i Calabar, Nigeria slogs tre provpilar. Pålarna var av typen stålrör, slutna i botten, vilka sedan fylldes med betong och armering. Diametern var 711 mm.

Jordlagren blev med djupet allt grovkornigare och lagerföljden utgjordes av sandig lera, lerig sand, siltig sand och sand med lerlager vars mäktighet varierade från några mm upp till 5 meter. Djupet till fast berg antogs vara flera hundra meter. Jorden var överst löst lagrad.

Längden på pålarna varierade mellan 20 - 27 m och redan vid uppehåll (på mellan 20-160 timmar) i slagningen kunde man konstatera att pålarna ville "växa fast".

Provbekastningarna som skedde med statisk metod på samtliga pålar utfördes en månad efter slagning, men för att studera tidsutvecklingen gjordes dessutom dynamisk provbelastning av en påle 2 1/2 vecka efter slagning och en annan 2 1/2 månad efter slagning. Resultaten redovisas i **Fig. 5.3**. Observera att värdena för bärförmågan vid tiden $t = 0$ är beräknade enligt formeln i figuren. Bärförmågens ökning med tiden antogs bero på förekomsten av lerlager.



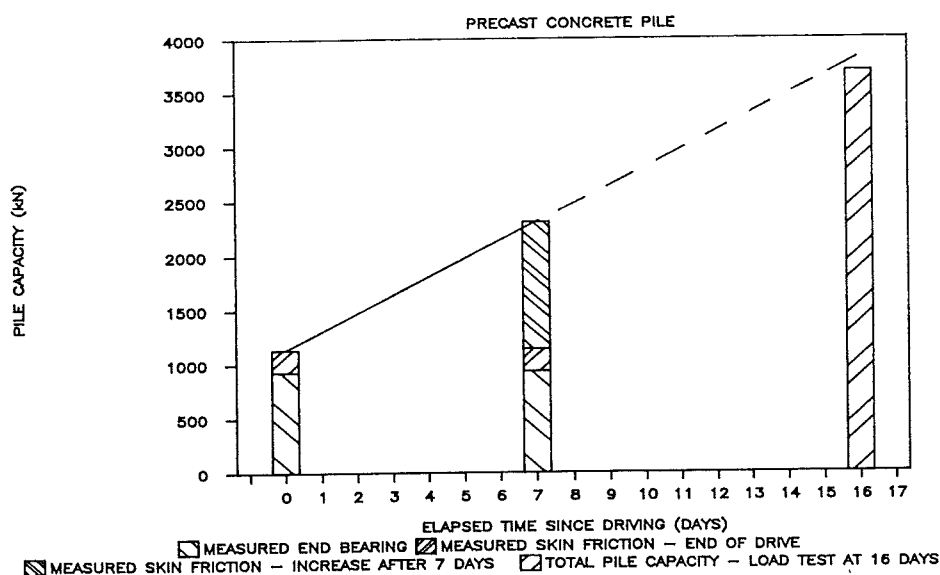
Figur 5.3. Ökning av bärförmågan med tiden. (Calabar Port).

■ **10. M.J. Preim, R March, M. Hussein:** *Bearing capacity of piles in soils with time dependent characteristics*. Proceedings of the International Conference on Piling and Deep Foundation. London 1989.

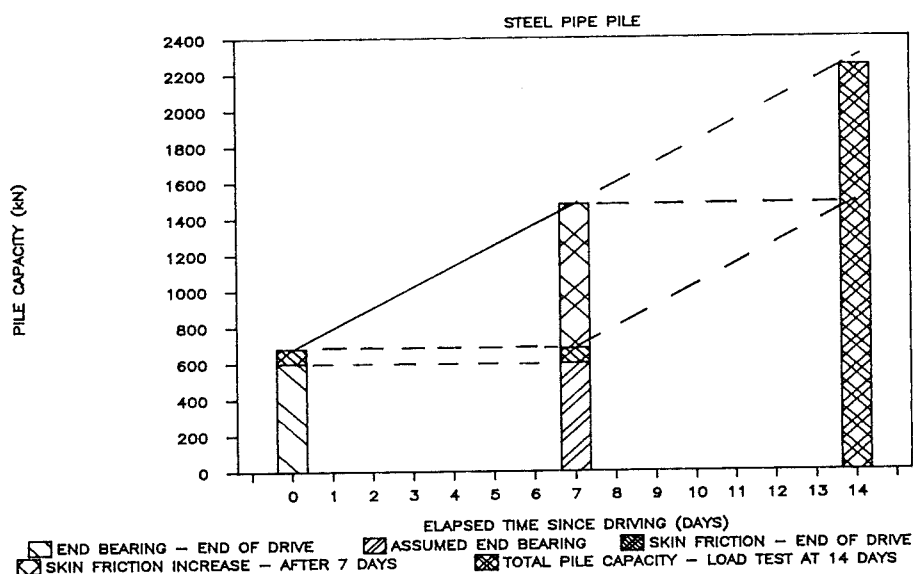
Inför pålningen för en kommunikationsanläggning i centrala Florida, USA, ville man dra nytta av tillväxten i pålarnas bärförmåga. I detta syfte genomfördes ett provpålningssprogram omfattande en stål- och en betongpåle, vilka provbelastades dynamiskt över en tid av 16 respektive 14 dagar. Jorden utgjordes av siltig och lerig finsand. De dynamiska

provb belastningarna utfördes direkt efter slagning och en vecka därefter. Efter ytterligare en vecka gjordes en statisk provbelastning. Resultatet från denna stämmer väl överens med den extrapolerade linjen från de bägge dynamiska mätningarna. Resultaten från försöken framgår av figurerna nedan. Jämförelse görs med teoretiska beräkningar av bärighetstillväxten.

Betongpålens bärformåga tillväxer med 167 kN/dygn och stål pålen med 102 kN/dygn. Orsaken till skillnaden kan vara olikheter i jordens uppbyggnad på platserna för de båda pålarna, men kan också vara betongens högre ytråhet och dess förmåga att absorbera vatten.



Figur 5.4. Bärformågens ökning med tiden för betongpåle. (Florida)

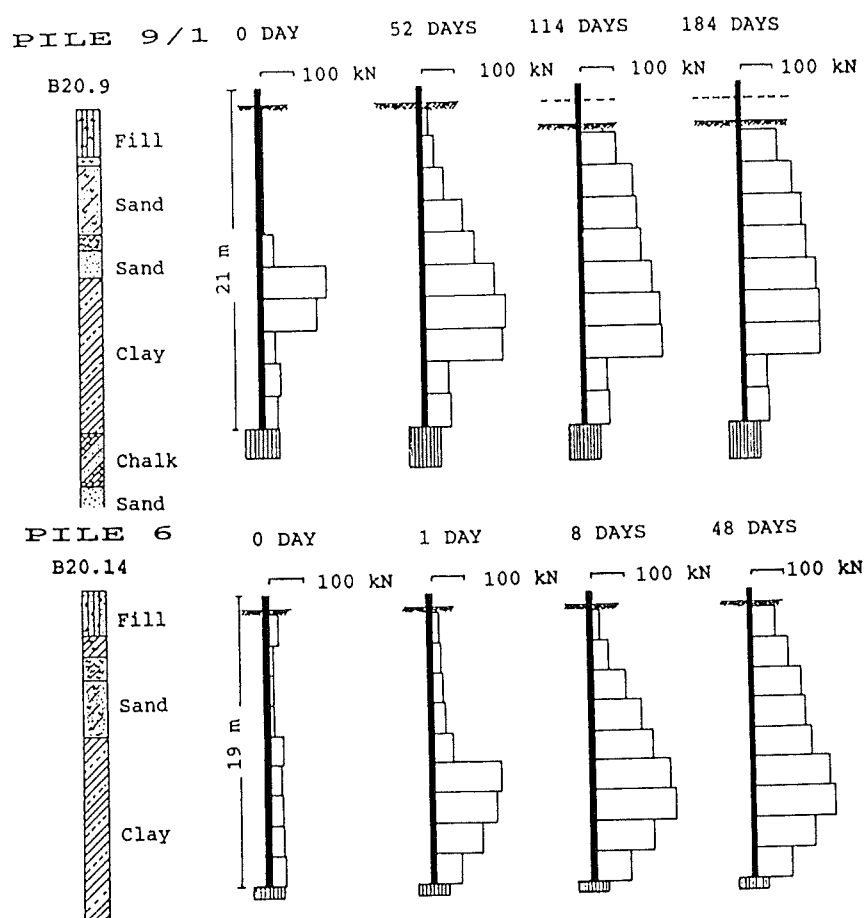


Figur 5.5. Bärformågens ökning med tiden för stål påle. Att spetsbärformågan vid andra tillfället anges som "antagen", beror på att dess värde vid CAPWAP-analysen var lägre än direkt efter drivning, troligen hade den inte mobiliserats till fullo. (Florida)

■ **11. R Skov, H Denver:** *Time-dependence of bearing capacity of piles.* 3:th Int. Conf. Application of stress wave theory to piles. Ottawa 1988 pp 879 - 888.

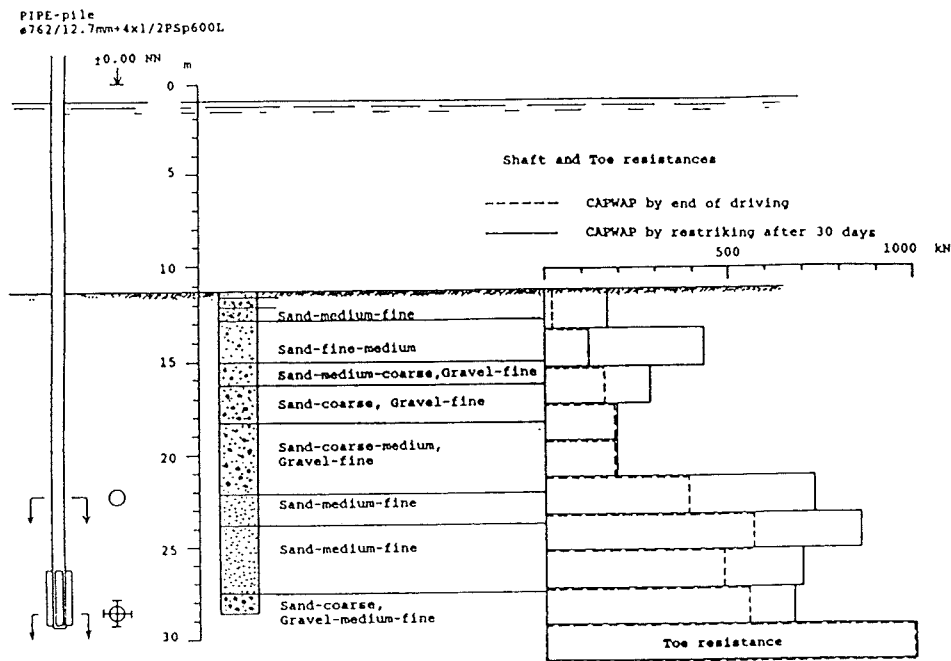
I artikeln beskrivs fyra fall där pålars bärförmåga ökat med tiden efter drivning. Det första gäller grundläggning av ett vattenverk i Ålborg, Danmark. Den använda påltypen var betong 250 x 250 mm. En påle belastades såväl statiskt som dynamiskt vid upprepade tillfällen. För att närmare studera den tidsberoende ökningen provbelastades dessutom sex pålar vid tre olika tillfällen. I varje tidpunkt för provbelastningar var två pålar ostörda sedan neddrivning. Resultatet av de dynamiska provbelastningarna (CAPWAP-analys) för den först slagna av dessa sex pålar samt ovannämnda påle med upprepade provbelastningar redovisas i **Fig. 5.6**. Ur figuren framgår också jordlagerföljden som utgörs av sand överlagrande lera.

Bärförmågan för de sex pålarna ökade relativt likformigt från 220 - 290 kN, direkt efter slagning, till 1410 - 1500 kN efter 48 dagar. Bara ett dygn efter slagningen hade emellertid bärförmågan redan ökat till 770 kN. Provbelastningarna visade att pålarnas bärförmåga är oberoende av om de efterslagits tidigare eller inte. Däremot var förskjutningen mindre för de tidigare efterslagna pålarna.



Figur 5.6. Bärförmågans fördelning utefter pålarna (Ålborg)

Det andra fallet beskriver en pålning för Sydkajen i Hamburg, med stålpålar. Diametern på pålarna var 762 mm och längderna 28-34 m. Såväl statiska som dynamiska provbelastningar utfördes, två exempel redovisas. Bärformågan enligt dynamisk provbelastning (CAPWAP-analys) var 3600 kN direkt efter slagning för att sju dagar senare enligt statisk provbelastning vara 4850 kN, och efter 30 dagar enligt dynamisk provbelastning (CAPWAP-analys) 5170 kN. I figuren nedan visas bärformågens fördelning utefter pålen vid de båda dynamiska provbelastningarna. Av figuren framgår att det främst är i fin- och mellansand som bärformågan tillväxer.



Figur 5.7. Bärformågens fördelning utefter pålen. (Sydkajen, Hamburg)

I de övriga två fallen hade man i vardera fallet en serie på sju betongpålar. Pålarna som var av typ Betong (300 x 300) och (350 x 350) provbelastades sedan vid olika tillfällen, men bara en gång vardera.

I det första fallet (Nykøbing F) med pålarna nedslagna i kalkhaltig jord tillväxte bärformågan kontinuerligt under en tid av 39 dagar, från 230 kN till 1710 kN. Pålarnas längd är 11 meter.

I det sista fallet (för MBB i Hamburg) sker hela tillväxten från 1150 kN till 2310 kN inom loppet av åtta dagar, varav 730 kN under första halva dygnet. Under resten av den studerade perioden som är totalt 23 dagar lång sker ingen förändring. Det mesta av tillväxten sker i sandiga och siltiga lager nära pålspetsen 21 meter under markytan.

Pile type: Prefab. Concrete piles 35 x 35 cm²
 Area: 1225 cm²
 Hammer type: Uddcomb H5H
 Drop weight: 50 kN

Pile No	Length m	0 Days kN	1/2 Day kN	8 Days kN	15 Days kN	19 Days* kN	23 Days kN
72A	21	1150					
72	21		1880				
2	23			2310			
18	21				2380		
19	21				2540		
D2	21					2450	
D2	21						2450

Figur 5.8. Bärförmågans ökning med tiden, mätt på olika, tidigare obelastade pålar (Hamburg).

Denver och Skov nöjer sig emellertid inte med att enbart redovisa gjorda mätningar. Man tar också fram en ekvation för hur bärförmågan tillväxer med tiden för sand-, ler- och kritjordar.

$$Q/Q_0 - 1 = A \cdot \log(t/t_0) \quad \text{där,}$$

Q_0 är bärförmågan vid tiden $t = t_0$ där t_0 är den tid från vilken kvoten Q/Q_0 är linjärt beroende av funktionen $\log(t/t_0)$. I lera har t_0 satts till 1,0 dygn och i sand 0,5 dygn. Q är bärförmågan vid tiden t och A är en konstant, beroende av förekommande jordart. Författarna fann den i sina fall till för sand 0,2, lera 0,6, och krita 5,0. Har man alltså bara bestämt t_0 och har en mätning till att tillgå kan man bestämma A och därigenom förutsäga bärförmågan vid en senare tidpunkt. Författarna påpekar dock att man åtminstone bör ha några extra mätvärden för att kunna konfirmera ekvationens riktighet. Kommentarer till formeln ges i kapitel 3.4.

■ **12. E Slunga:** *Bearing capacity of piles from dynamic measurement and static load test at Malmi, Helsinki.* Väg- och Vattenbyggaren 7-8 1982 sid 12-14.

Dynamisk provbelastning utfördes på fyra betongpålar (250 x 250 mm) i sand och siltig sand. Längden i jord varierade mellan 15 och 21 meter. Syftet med undersökningen var egentligen att bestämma överensstämmelsen mellan statisk och dynamisk provbelastning. Utvärderade bärförmågor varierar lite från påle till påle men enligt dynamisk provbelastning (CAPWAP-analys) utförd någon timme eller som högst något dygn efter slagning kan pålarna karakteriseras som till hälften spetsbärande. Efter 14 till 33 dagar provbelastades pålarna statiskt. Två pålar uppvisade mindre bärförmåga (20-25 %), än vid den första provbelastningen medan de övriga visade på ökningarna runt 20 %. Inget tydde på att just de mer spetsbärande pålarna skulle öka i bärighet eller tvärtom.

Resultaten som framkommit vid litteraturinventeringen har sammanställts i **Fig. 5.9**. Härav framgår att

- ☐ tillväxt i bärförmåga har konstaterats i flera fall i sand och silt. Ökningar på 20-100 % har uppmätts.
- ☐ tillväxten i bärförmåga är betydande för såväl betongpålar som stålplålar.

I flera artiklar framhålls att tillväxten i bärförmåga ej kan bero på porttrycksändringar utan snarare strukturförändringar i jorden.

Objekt	Artikkel nr	Geologi	Påldata	Tillväxt av bärförmåga	Mätintervall	Anm
St Charles River, Quebec City	1-4	5 m fylln 17 m sand	45 sexkants btg.pålar 8,5-13 m	Max 90% Medel 70%	För 70%, 2 veckor	Ökningen anges i förhåll. till teoretisk bärförmåga vid tiden $t = 0$
Jasper Alberta, Canada	1-2	4 m sand o grus 24 m sand	1 stålplåle Hp 310x79 14 m	32% 85%	1,5 d* 51 d**	* Dynamisk belastning ** Statisk belastning
Ön Fläsklösa Stockholm	5	60 m Åsmaterial sand o grus	2 stålörsp. ø=508 mm 35-38 m	11/28%	31/52 d	En påle mätt 3 ggr
Djurås, bro över V Dalälven	7	29 m silt 8 m sand	3 B 600 270x270 mm 23-35 m	18-165%	33 d - 22 mån	
Central Bank of Iraq	9	Växlande lager	1 Betong	60%	40 dygn	
Calabar port, Nigeria	10	Sandig lera mot djupet grövre - sand m lerlager	2 stålörsp.- pålar 20-27 m	10% 15%	Mätt mellan 2,5-4 v 4 - 6 v	Tillväxten förklaras med förekomsten av lera
Florida, USA	11	Lerig finsand	1 stålplåle ø 323 mm 1 btg.påle 235x235 mm	Stålplåle 210% Btg.påle 190%	14 d 16 d	Såväl statisk som dynamisk provbelastning
Ålborg, Danmark	12	4 m fyllning 7 m sand 10 m lera	1+6 btg.pålar 250x250 mm 21/19 m	100%	1-48 dygn	Även kraftig tillväxt i sand
Hamburg, Sydkajen	12	Sand	2 stålplålar ø 762 mm	~ 45%	30 d	
Nykøbing F	12	Kalkhaltig jord	7 btg.pålar 11 m	64%	39 d	
Hamburg	12	Sand o silt		23%	8 d	Största tillväxten sker nära pålspetsen

Figur 5.9. Sammanfattning av de intressantaste fallen i kapitel 5. Om inte annat anges, anges tillväxten av bärförmågan i relation till uppmätt värde 1/2 - 1 dygn efter slagning.

6. Pålprojekt i Sverige

6.1 Förutsättningar

Totalt 15 projekt har påträffats där friktionspålars bärförmåga har bestämts vid minst två tillfällen efter drivning. Sannolikt finns ytterligare ett antal intressanta fall.

Av ovan nämnda 15 projekt har 11 stycken analyserats i detalj. Att inte samtliga projekt har genomgått detaljerad analys beror främst på avsaknaden av resultaten från geotekniska undersökningar och/eller CAPWAP-analyser av dynamiska provbelastningar, eller på svåråtkomligt material. Även för de nu redovisade projekten finns ibland vissa ofullständigheter.

Bärförmågan är till övervägande del bestämd genom dynamisk provbelastning med efterföljande CAPWAP-analys. Bestämning av bärförmågan har i de allra flesta fall gjorts på det första slaget vid efterslagningen, då pålen inte slagits loss från omgivande jord. I övriga fall är bestämningen utförd på något av de tidigaste slagen. I några fall har det varit möjligt att utnyttja resultat från statiska provbelastningar, bärförmågan är då utvärderad enligt anvisningar givna i Pålkommisionens rapport nummer 59 - Anvisningar för provpålning med efterföljande provbelastning. Spridning i resultat mellan statisk och dynamisk provbelastning ligger inom $\pm 30\%$.

Beskrivningen av varje projekt inleds med en kort redogörelse av påltyp, geologi, uppmätta bärförmågor och sättningar, samt andra förhållanden av intresse. Därefter redovisas i diagramform, dels den totala bärförmågans tillväxt dels den specifika bärförmågans tillväxt i relation till jordart respektive viktsonderings- och hejarsonderingsresultat. Med specifik bärförmåga avses mantelbärförmåga per ytenhet påle, uttryckt i kPa, erhållen genom CAPWAP-analys.

I samtliga projekt är det provpålar som har studerats. Dessa har antingen slagits och mätts innan produktionspålningen startat eller på ett avstånd från stödet där de har undgått inverkan från produktionspålningen. Har fyllning eller schaktning företagits i anslutning till provpålarna anges detta.

Tillväxten i bärförmåga baseras på bärförmågan bestämd vid efterslagning ca 1 dygn efter drivningen och inte vid stoppslagningen. Dagens praxis är att bärförmågan hos friktionspålar bestäms vid efterslagning ca 1 dygn efter slagning. Detta eftersom bärförmågan brukar växa till mycket snabbt under första dygnet.

För att bestämma en påles bärförmåga fordras att pålen förskjuts tillräckligt mycket i förhållande till omgivande jord, så att brott uppnås mellan påle och jord vid provbelastningen. Enligt vedertagen praxis anses 3-5 mm sättning (förskjutning) erfordras vid mätslaget för att bestämma brottlasten. Pålens bärförmåga sägs då vara fullt mobiliserad. I de fall då den vid provbelastningen uppmätta sättningen varit mindre, finns risk att

pålen inte är fullständigt mobiliserad. Den uppmätta bärförmågan kan då vara lägre än pålens verkliga bärförmåga. I många fall har olika fallhöjd/fallvikt används vid de olika mättillfällena, vilket kan tyckas försvåra jämförelsen av olika mätresultat med avseende på bärförmågens tillväxt. Det avgörande för mobilisering av mantelburna pålar är dock hur mycket pålen satt sig vid bärförmågebestämningen, dvs vid mätslaget. Man måste alltså kontrollera att pålen sannolikt har mobiliserats - fått en tillräckligt stor sättning i förhållande till omgivande jord vid alla de mättillfällen som skall jämföras. Det är alltså sättningens storlek som i första hand är intressant och inte fallhöjd/fallvikt.

I följande 15 projekt har man registrerat en tidsberoende ökning av bärförmågan hos slagna pålar i friktionsjord. Med ”*” markerade projekt beskrivs utförligt i detta kapitel, fränsett Djurås, som avhandlas i kapitel 5, artikel 6.

- Kv. Borgen Halmstad 1987
- Borlänge, Banverket 1989
- * Branäs, Bro över Klarälven 1990
- * Bredåker, Bro över Lule älv 1986
- * Deltavägen (Sörån/Strandbergstrännan) 1983

- * Djurås, Bro över V Dalälven 1981-83
- Femtån, Bro över Stöllet 1989
- * Fittja, Bro över Masmovägen 1982-83
- * Kvissleby, Bro över Ljungan 1985-87
- Lerum, bro över Säveån 1984

- * Malung, Bro över V Dalälven 1984
- * Mellsta, Bro över Dalälven 1984
- * Orsa, Bro över Ore älv 1982-84
- * Värnamo, Bro över Lagan 1984
- * Västermalmskolan, Sundsvall 1985

6.2 Branäs, väg 957 bro över Klarälven, Värmland

6.2.1 Inledning

Redan i sin inledning framstod Branäs som ett intressant projekt ur såväl bärförmågesynpunkt som ur pålbarhetssynpunkt. På platsen kom därför en rad kompletterande undersökningar att utföras. Nedan redovisas dels på i detta kapitel sedvanligt sätt resultaten från provpålningen inför produktionspålningen, dels resultaten av en provpålsgrupp slagen i forskningssyfte. I kapitel 2.3.3 redovisas analys av tagna jordprover, i kapitel 4.2 mätningar gjorda på hejarsondstänger och i kapitel 3.5 resultaten av CPT- och dilatometerundersökningar.

6.2.2 Platsbeskrivning

Bron över Klarälven i Branäs sträcker sig i väst-östlig riktning över Klarälven, med en total längd av 162 m i tre spann. Stöd 1 utgör det västra landfästet och stöd 4 det östra.

Jordlagerföljd

Markytan i stöd 1 ligger på nivån +146 och i stöd 4 på ca +148. Den naturliga markytan lutar vid stöd 4 kraftigt uppåt från älven.

I stöd 1 inleds jordlagerföljden av tre meter siltig finsand varunder följer silt till åtminstone 18 meters djup. Jorden är ned till sju meters djup löst lagrad för att sedan successivt bli fastare lagrad. Under 18 meters djup är jorden mycket fast lagrad. Viktsondering har drivits ned till 28 meters djup och hejarsondering ned till 40 meter.

I stöd 4 utgörs jorden ned till drygt fem meters djup av grovsilt och sand som underlagras av silt, i regel sandig. Största provtagningsdjup är 17 meter. Jorden kan betecknas som löst lagrad ned till 6,5 meter, och därefter efter en skarp övergång som fast lagrad, längre ner tilltar fastheten ytterligare till mycket fast. Viktsonderingen har drivits till 28 meters djup och hejarsonderingen till 39 meter.

6.2.3 Provpålning inför produktionspålning

Inför produktionspålning slogs enligt arbetshandlingarna två provpålar i varje stöd. Då de kompletterande undersökningarna kom att utföras i stöd 1 och 4 behandlas endast dessa provpålar. Provpålar i stöd 4 provbelastades vid endast vardera ett tillfälle. I stöd 1 provbelastades påle P112 och P118 vid tre respektive två tillfällen.

De studerade pålarna i stöd 1 är P112 med en längd av 30,0 meter i jord och P118 med en längd av 26,5 meter. Pålarna slogs 1990-09-17 men då P118 vid första provbelastningstillfället hade en bärförmåga som kraftigt underskred den förväntade (vilket visas nedan) drevs den vidare till 32,5 meters djup den 1990-09-24.

I stöd 4 slogs 1990-09-17 tre provpålar P412, P416 och P418, P418 slogs dock sönder. Längden i jord var 23 meter för P412 och 25,5 meter för P416.

Pålarna var av typen B600 (270 x 270 mm).

Provbelastning

Dynamisk provbelastning av P112 skedde 3, 10 samt 21 dygn efter slagning. P118 belastades dynamiskt först tre dygn efter slagning och sedan 14 dygn efter det andra neddrivningstillfället. Provbelastningsresultaten för P112 och P118 redovisas i **tabell 6.1**.

I stöd 4 skedde dynamisk provbelastning av pålarna P412 och P416 tre dygn efter slagningen.

Utvärdering

Enligt de dynamiska provbelastningarna (CAPWAP-analyser) förblev spetsbärförmågan för P112 relativt konstant vid de olika mättillfällena, nämligen 277, 250 och 308 kN. För P118 ökade den från 83 till 299 kN (efter fortsatt drivning). Provbelastning av P412 och 416 gav för spetsbärförmågan 82 respektive 66 kN.

Samtidigt har den totala bärförmågan (enligt **Fig. 6.1**), för P112 ökat från 650 till 796 och slutligen 918 kN, och för P118 från 324 till 988 kN (efter fortsatt drivning). I stöd 4 erhöll P412 och P416 bärförmågor på 950 respektive 1250 kN. Med anledning av detta kan pålarna sägas vara till övervägande del mantelburna.

I den fortsatta utvärderingen kommer endast pålarna i stöd 1 att granskas. Dessutom kommer på påle P118 endast pållängden ned till 26 meter att studeras och den kommer då att behandlas som om den har provbelastats vid tre respektive 14 dygn efter slagning.

Fig. 6.3 och **6.4** visar att specifika bärförmågan för båda pålarna ökar i det översta löst lagrade jordlagret (sonderingsmotstånd 0-10 hv/0,2 m respektive 5-10 slag/0,2 m). I de djupare fastare lagren uppvisar P118 som bara provbelastades två gånger en relativt likformig tillväxt. P112 uppvisar däremot ett mer splittrat beteende, ofta med tillväxt mellan första och andra provbelastningen och sedan recession eller stagnation till den tredje. Totalt sett har dock specifika bärförmågan i samtliga fall ökat mellan första och tredje provbelastningstillfället. Att bärförmågan i hejarsonderingsintervallet 30-50 slag/0,2 m först avtar fram mellan första och andra provbelastningen för att sedan åter öka beror på att den specifika bärförmågan i det understa elementet liksom spetsbärförmågan minskade kraftigt. Eventuellt har den nedre delen av pålen inte mobiliserats vid provbelastningen.

6.2.4 Provpålgrupp

Då de dynamiska provbelastningarna av stöden och i synnerhet i stöd 1 gav avsevärt lägre värden än förväntat, väcktes intresset att göra jämförande studier med statisk provbelastning. I detta syfte beslöts att i Pålkommisionens regi (med delfinansiering från detta projekt) slå en provpålgrupp, bestående av två provpålar och sex mothållspålar. Gruppen slogs ca 80 meter uppströms stöd 1. Provpålarna var av samma typ som tidigare provpålar och med en längd i jord av 31 meter. Mothållspålarnas längd i jord var 31,0 m.

Pålarna slogs 1990-12-03 varvid mothållspålarna slogs före provpålarna. Vid den första dynamiska provbelastningen befanns provpåle P1 vara skadad. Troligtvis har den skadats vid drivningen.

Tabell 6.1. Provb belastningsresultat från Branäs.

	Tid efter drivning (dygn)	Bärformåga, kN		Längd i jord (m)	Fall-höjd (m)	Sjunkning mm/antal slag
		Statisk provbelastning	Dynamisk provbelastning			
PÅLE P112	3 10 21		650 796 918	30,0 ,, "	- - -	
PÅLE P118	3 14 (efter ny drivning)		324 988	26,5 32,5	- -	
PÅLE P2	2 4 17 370	800 1100	470 750 "	31,0 ,, "	- 8/1 5/1	
PÅLE M3	4 17		750 800	31,0 31,0	3/1 3/1	
PÅLE M6	4 17		760 810	31,0 31,0	6/1 6/1	

På platsen för provpålsgruppen utfördes även en hejarsondering, vilken överensstämmande med sonderingen från platsen för stöd 1.

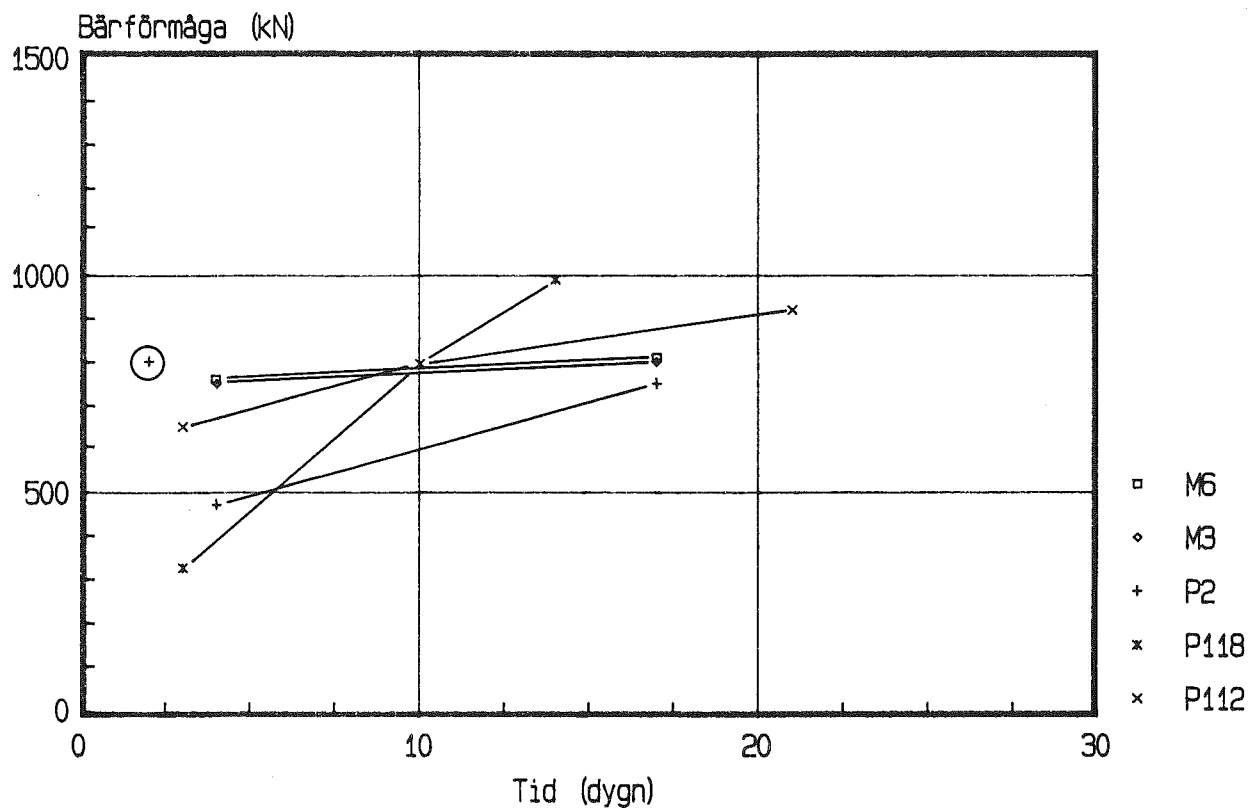
Provb belastning

Statisk provbelastning utfördes första gången på provpålarna två dygn efter slagning. Därefter genomfördes dynamisk provbelastning av provpålarna samt mothållspålarna M3 och M6, fyra respektive 17 dygn efter slagning. Efter ett år utfördes ytterligare en statisk provbelastning av provpålarna.

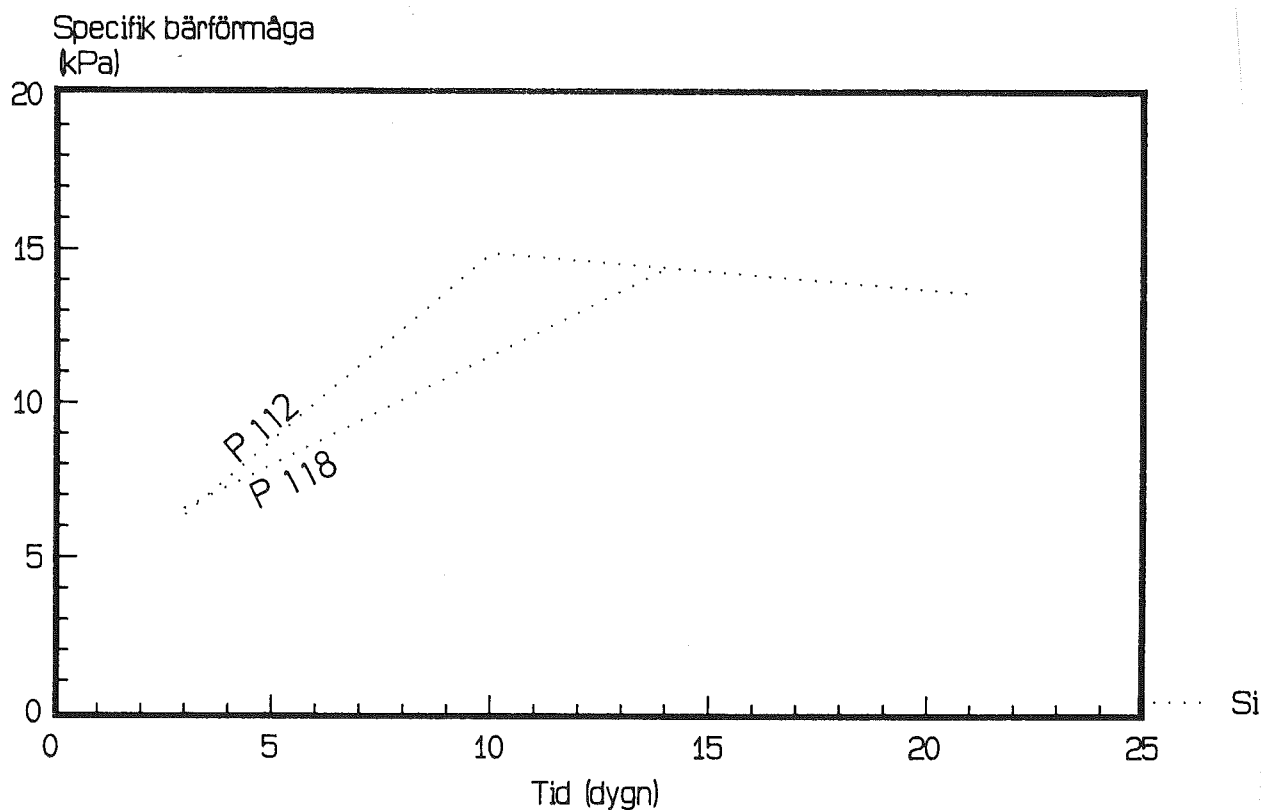
Utvärdering

De vid provbelastningarna erhållna värdena på bärformågan redovisas i **tabell 6.1** samt i **Fig. 6.1**. För provpåle P2 erhöles vid den första statiska provbelastningen bärformågan 800 kN och 1100 kN vid den andra, medan den vid de bägge dynamiska provbelastningarna endast var 470 resp. 750 kN. Skillnaden i bärformåga mellan statisk och dynamisk provbelastning är anmärkningsvärt stor i detta fall. Någon förklaring till den stora skillnaden ges inte. Sättningsvärdena från de dynamiska provbelastningarna ger ingen indikation på att pålen skulle vara ofullständigt mobiliserad. De bägge mothållspålarna uppvisade vid de dynamiska provbelastningarna bärformågor på 750 respektive 800 kN för påle M3 och för påle M6 760 respektive 810 kN.

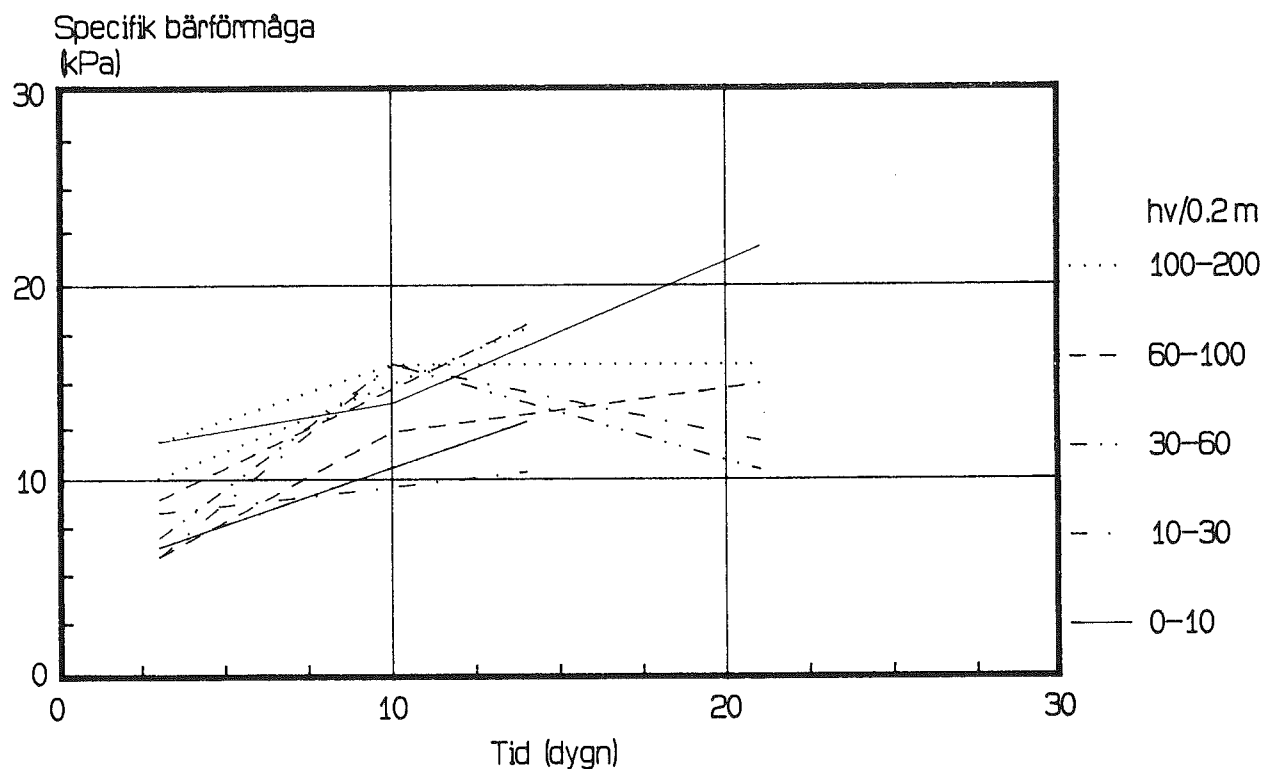
I **Fig. 6.2**, **6.3** och **6.4** visas den specifika bärformågens tillväxt som funktion av jordart respektive sonderingsresultat enligt viktsondering och hejarsondering.



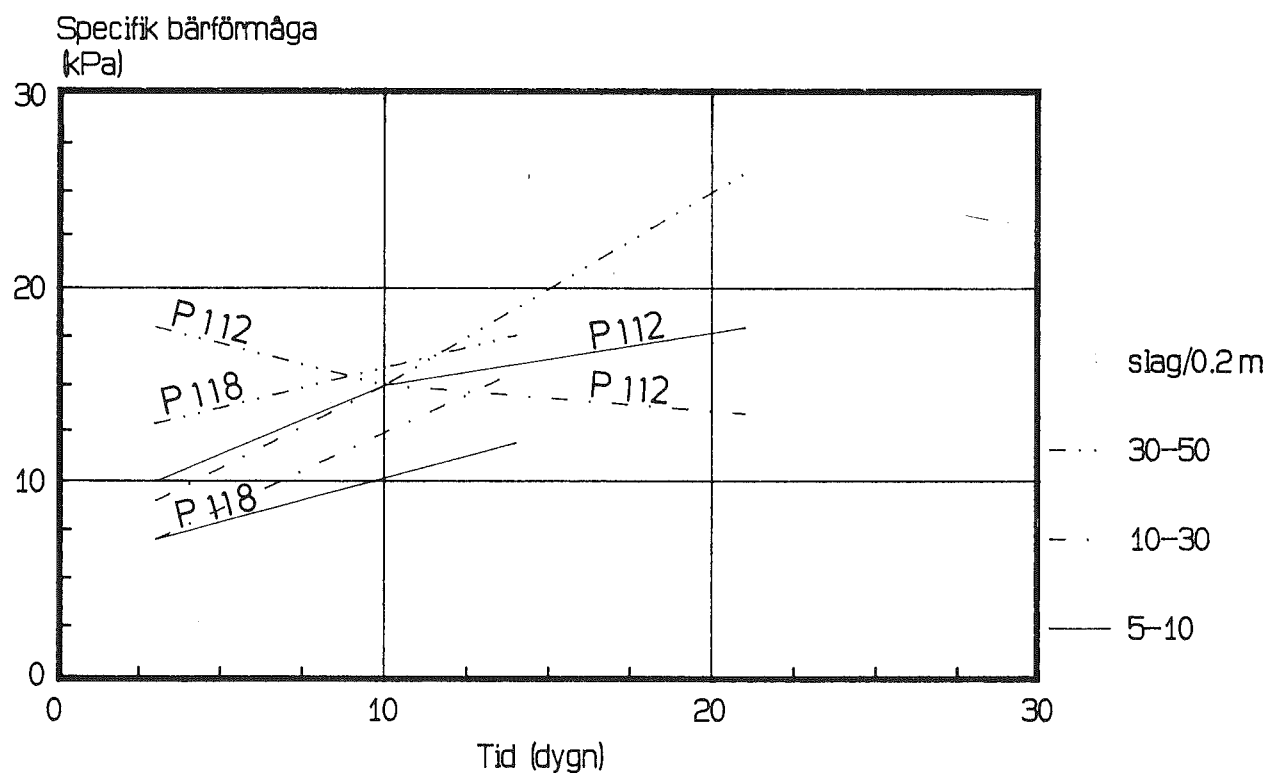
Figur 6.1. Bärformågens tillväxt med tiden. "o" runt tecken innebär värde erhållet från statisk provbelastning. Värdet för P118 vid andra tillfället avser hela pålen. Observera att andra statiska provbelastningen av P2 efter 370 dygn ej är med i diagrammet. (Branäs)



Figur 6.2. Specifika bärformågens tillväxt med tiden i relation till jordart. (Branäs)



Figur 6.3. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Branäs)



Figur 6.4. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat. (Branäs)

6.3 Bredåker, Bro över Lule älv å väg 679, Norrbottens län

Provpålning

Av totalt tolv slagna provpålar är två pålar, P1 och P5 provbelastade vid två tillfällen. Påle P1 slogs vid brons sydvästra landfäste och påle P5 ute i älven på platsen för ett av mellanstöden. Provpålningen utfördes med betongpålar av typ B600 (betong 270 x 270 mm). Påle P1 slogs lutande 3,5:1 i brons längdriktning med pålspetsen ut mot älven. P5 slogs vertikalt. Längden i jord var för P1 34,5 meter och för P5 28,8 meter. Pålningen genomfördes under tiden 1986-02-27--1986-03-10.

Jordlagerföljd

Markytan på platsen för P1 låg på +20 m, och för P5 låg älvbotten på +8 m.

Lagerföljden var mycket komplex och skiljde sig dessutom en del mellan platserna för de två pålarna. Överst låg ett två till fyra meter tjockt lager med sand eller sandig silt. De därefter följande fjorton metrarna utgjordes av silt till siltig lera samt lerig sulfidjord. Härunder följde åter mer renodlad friktionsjord varierande i kornstorlek mellan silt och sand.

Provbelastning

Påle P1 belastades dynamiskt efter ett och 22 dygn efter slagning och P5 dito tre och 17 dygn efter slagning.

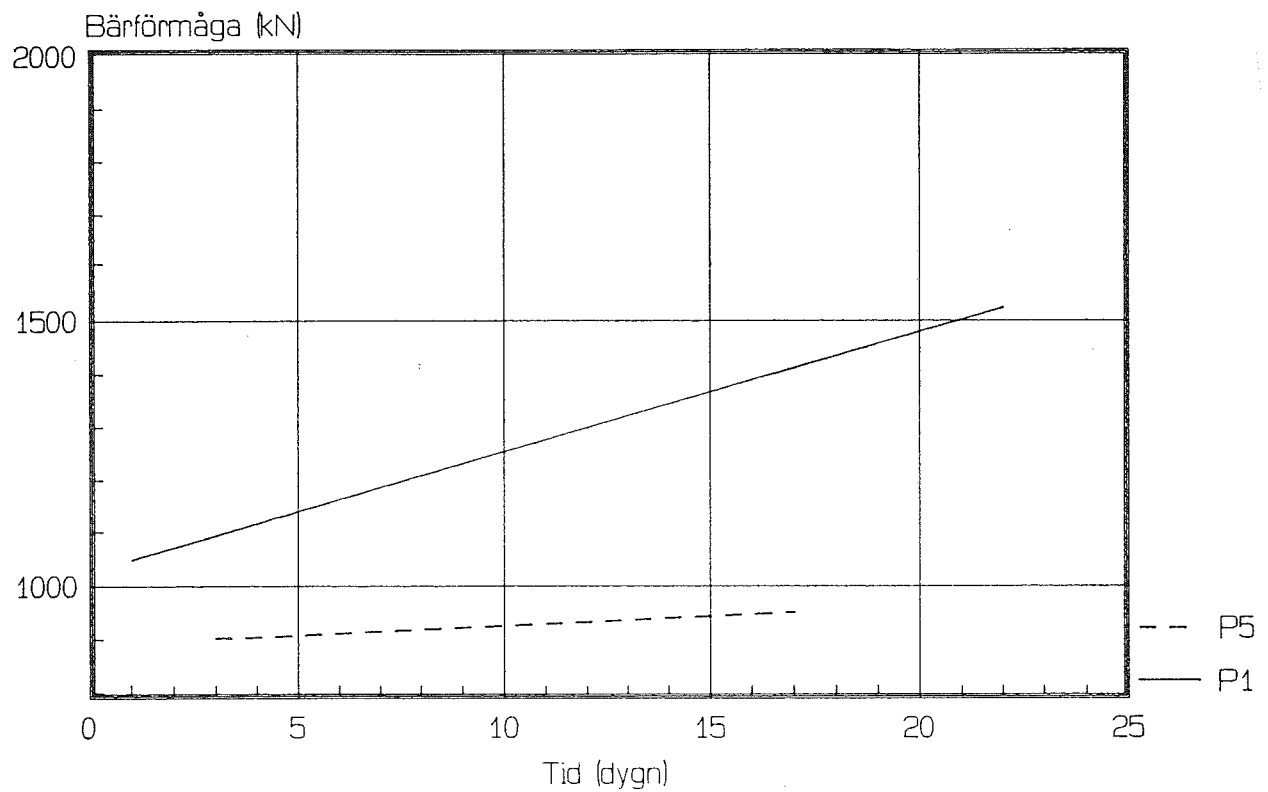
Utvärdering

Av **Fig. 6.5** framgår att det är för påle P1 som bärförmågan har ökat mest (denna är ju också den längsta av de två pålarna), från 1050 till 1520 kN under tidsperioden 1 - 22 dygn efter slagning. Sättningen vid de två mätslagen var 4 respektive 2 mm. Det mesta av ökningen har skett på de nedersta två metrarna samt till viss del i ett lager med lerig sulfidjord. För påle P5 har bärförmågan endast ökat från 900 till 950 kN under tiden 3 till 17 dagar efter drivning. Pålens sättning vid mätslagen var 4 respektive 5 mm.

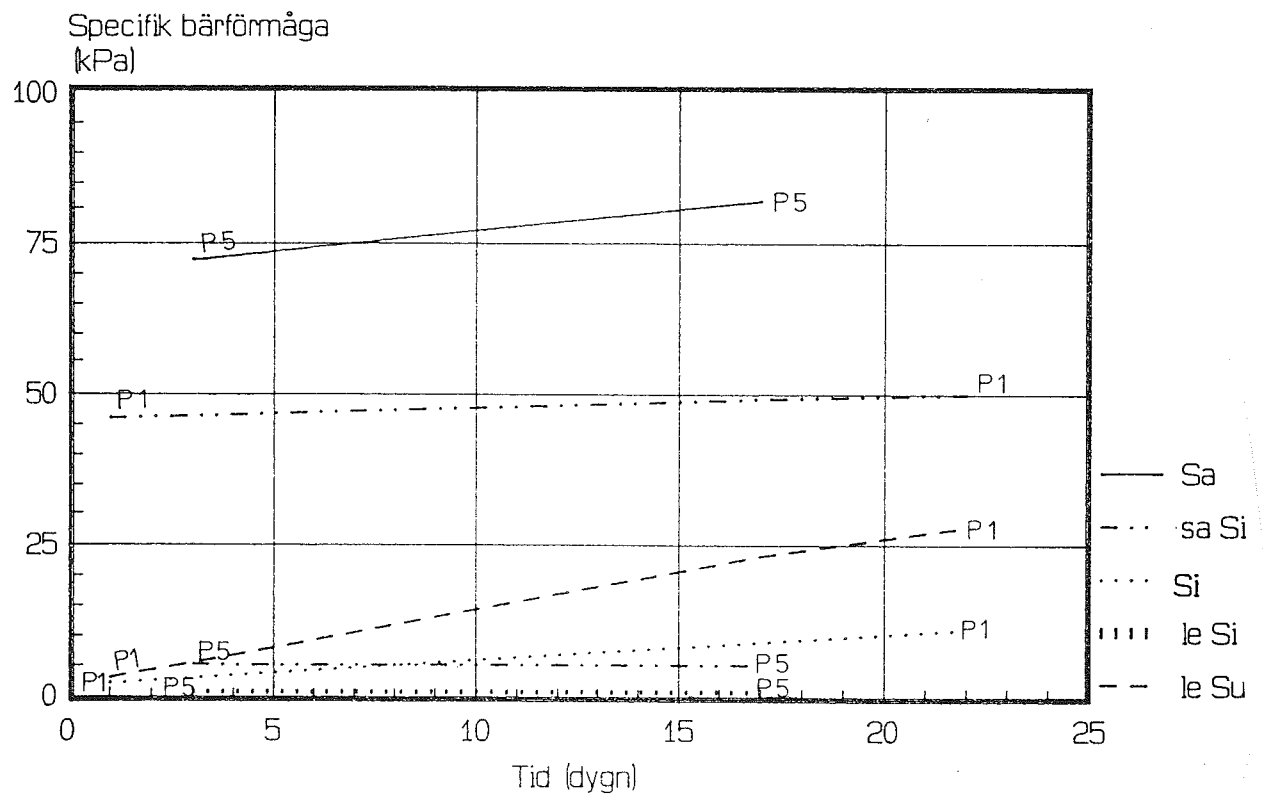
Av **Fig. 6.6 - 6.8** framgår att ökningen i bärförmåga främst har skett i de djupare och fastare lagren ($V_{im} > 30$ hv/0,2m, $H_{fA} > 30$ sl/0,2 m), bestående av sandig silt och sand.

Vid uppritandet av den specifika bärförmågens ökning med tiden har de sonderingsintervall (eller delar av sådana) där jorden domineras av ler- och/eller organiskt material inte medtagits. Däremot har de medtagits i jämförelsen tillväxt-jordartsdiagrammet.

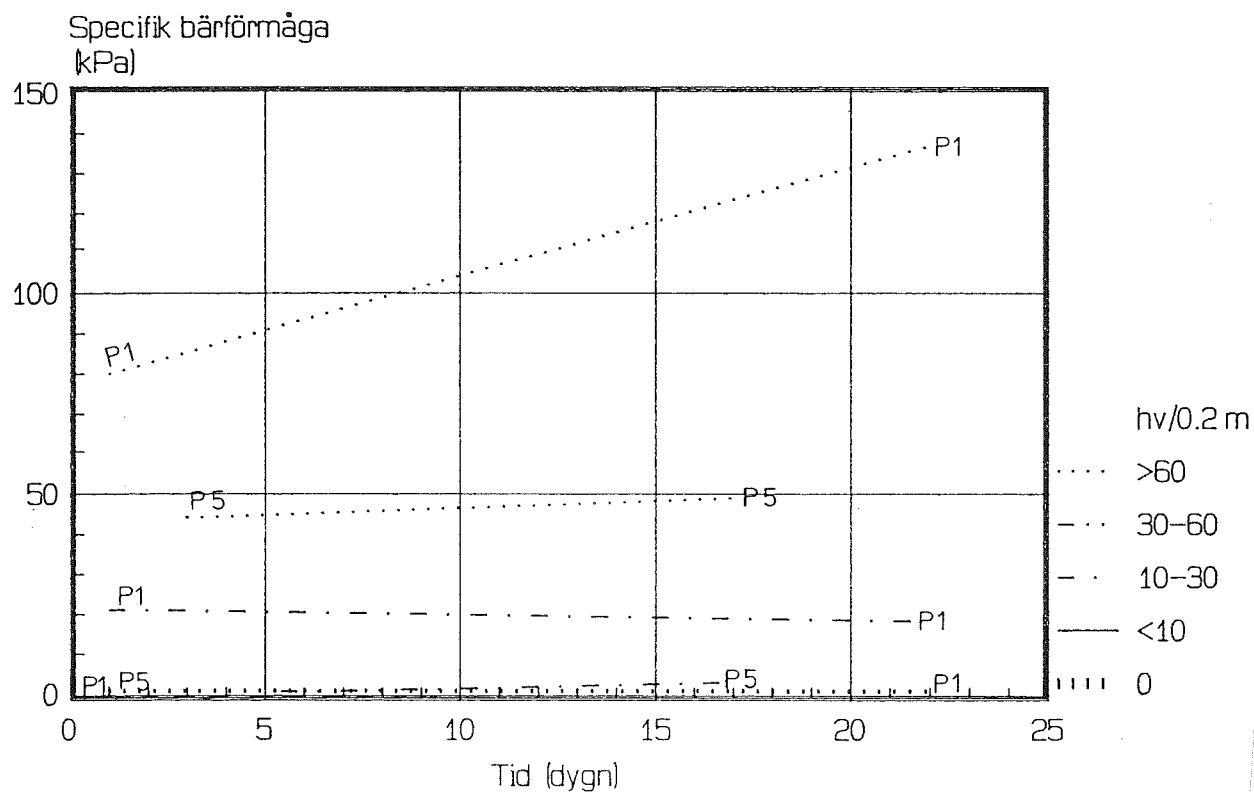
Observera vidare att för P5 utgjordes viktsonderingsintervallet 30-60 hv/0,2 meter av lerig silt och bärförmågan var här vid båda mätningarna försumbar.



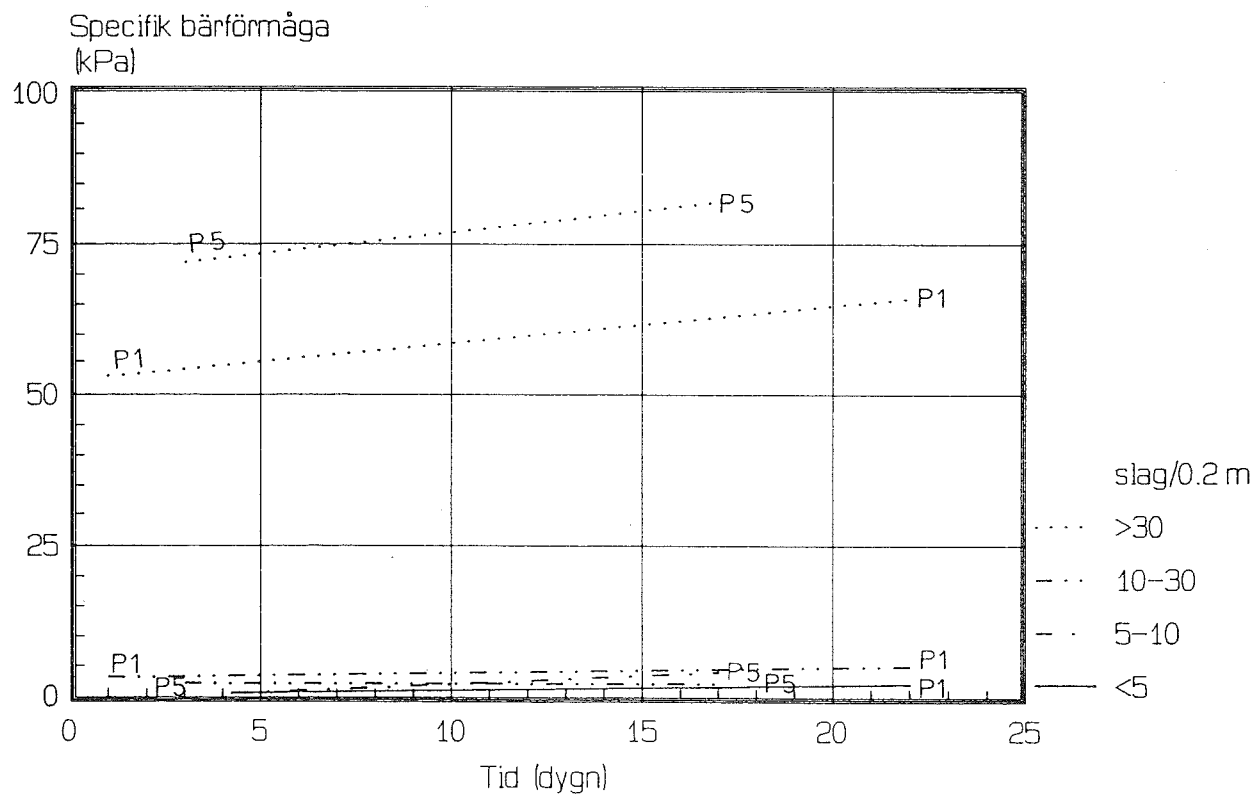
Figur 6.5. Bärformågens tillväxt med tiden. (Bredåker)



Figur 6.6. Specifika bärformågens tillväxt med tiden i relation till jordart. (Bredåker)



Figur 6.7. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Bredåker)



Figur 6.8. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat. (Bredåker)

6.4 Deltavägen - Sundsvall

6.4.1 Platsbeskrivning

Provpålningsplatserna är belägna norr om Sundsvall där väg E4 passerar genom deltaområdet vid Indalsälvens utlopp. Dels vid sydvästra resp nordöstra landfästet för bro över Sörån (stöd 1 och 2 resp stöd 9) och dels vid sydvästra landfästet för bro över Strandbergsrännan.

Översiktlig jordlagerbeskrivning

Indalsälvens mynning utgörs av ett flackt deltalandskap mellan omgivande moräntäckta bergspartier. Älvsedimenten i deltat vilar troligen på morän eller grov friktionsjord som, att döma av sonderingsresultaten, innehåller sten och block. Hejarsonden har i regel trängt ned 5-8 m i detta material.

Vid de aktuella provningsplatserna har älvsedimenten stor mäktighet, 35-55 m. Sedimenten är i sin undre del mycket finkorniga ("fjordsediment") och består bla av silt, siltig lera och lerig silt i växlande lagring. I den övre delen består sedimenten av "deltasand" såsom silt, sandig silt, siltig sand och sand med visst inslag av grus och sten. Gränsen mellan "deltasanden" och "fjordsedimenten" är ej distinkt och varierar i djupled längs väglinjen. Älvsedimenten är utifrån viktsondering mycket löst till löst lagrade ned till stort djup.

6.4.2 Provpålsplats Sörån, stöd 1 och 2

Vid sydvästra landfästet för bro över Sörån har provpålning utförts både 1984 under projekteringen (P1 och P2, stöd 1) och 1989 vid inledning av produktionspålningen (P15 och P28, stöd 2). Dessutom har fyra forskningspålar (F1-F4) slagits strax väster om stöd 1 vid provpålningen 1984. Samtliga dessa pålar har provbelastats vid mer än ett tillfälle för bedömning av bärförmågens förändring med tiden.

Jordlagerföljd

Vid sistnämnda provplats har de djupaste sedimenttjocklekarna konstaterats. Jorden består överst av 2 m grovsilt med växtdeklar. Därunder finns löst lagrad sand och siltig sand med en mäktighet av 16 m, som i sin tur underlagras av löst lagrad grovsilt ned till ca 30 m djup, varpå följer ytterligare fast lagrade sediment som når ned till minst 49 m djup. Vid detta stödläge har ingen lera påträffats i lagerföljden (intermittent provtagning).

Vid stöd 1 har utförts vikt- och hejarsondering, provtagning samt kombinerad spets- och portryckssondering (CPT). Vid portryckssonderingen alstrades porövertryck som indikerar finkornig jord på djupen 23-28 m under mark.

Påldata

Pålarna P1 och P2 i stöd 1 är provpålar för statisk och dynamisk provbelastning, medan pålarna P15 och P28 i stöd 2 samt pålarna F1-F4 är avsedda för enbart dynamisk provbelastning. Samtliga provpålar är av typ B600 (Betong 270 x 270 mm).

Tabell 6.2. Slagningsdatum och längd i jord för pålarna är:

Påle	Slagningsdatum	Längd
P1	1984-09-26	22,0
P2	”-	18,3
F1	1984-09-24	18,3
F2	1984-09-25	18,3
F3	1984-09-18	18,6
F4	”-	18,2
P15	1989-01-16	20,0
P28	”-	21,0

Vid slagningen av mothållspålarna för statiska provbelastningen av P1 och P2 erhöles en packning av jorden, vilket medförde ett ökat slagningsarbete för provpålarna som slogs efter mothållspålarna. Packningen av friktionsjorden gav också en sättning av markytan.

Portrycksmätning

I samband med slagningen av pålarna vid provpålningen 1984 utfördes portrycksmätningar i jorden med portrycksmätare installerade strax intill pålarna. Två portrycksmätare var placerade vid provpålarna P1 och P2 och två stycken var placerade vid påle F1. Horisontella avståndet mellan portrycksmätare och påle var omkring 1 m i båda fallen, med en portrycksspets på ca 15 m djup och en på ca 25 m djup. Vid slagning av pålarna erhöles relativt små portrycksförändringar och de avklingade inom någon timma efter det att slagningen hade avslutats.

Statisk provbelastning

Statisk provbelastning har utförts på pålarna P1 och P2 vid tre tillfällen. Vid alla tidpunkterna provbelastades den kortare pålen P2 först och dagen därefter den längre pålen P1. Tiden efter drivningen av pålarna var 14, 69 respektive 314 dagar för påle P2.

Dynamisk provbelastning

Dynamisk provbelastning har utförts på provpålarna P1 och P2 i stöd 1 i samband med efterslagningar av pålarna. Efterslagning utfördes dels ett dygn efter drivningen, dels i anslutning till de statiska provbelastningarna. Ordningsföljden vid statisk- och dynamiska provningar framgår av **tabell 6.3**. Därefter har P1 och P2 även provbelastats dynamiskt efter drygt 4 år. Innan denna provbelastning hade vägbanken lagts ut och nådde precis fram till provpålarna P1 och P2. Vägbanken bedöms dock ha en försumbar inverkan på bärförmågan.

Avsikten med forskningspålarna F1-F4 var att studera inverkan av själva provbelastningen på friktionspålars bärförmåga. Man ville undersöka om den störning som en provbelastning innebär minskar pålens bärförmåga och dess tillväxt med tiden, eller om en tidigare provbelastning ger ett styvare beteende hos pålen så att en högre bärförmåga utvärderas. Detta gjordes genom att provbelasta lika långa pålar vid olika lång tid efter drivning, och vid olika många tillfällen. Provpålarna F1, F3 och F4 har provbelastats dynamiskt efter 1 dygn. Dessutom har F1-F4 provbelastats dynamiskt i samband med de

statiska provbelastningarna i stöd 1. Påle F1 provbelastades vid första, andra och tredje statiska provningstillfället, F2 vid första och andra, F3 vid andra och tredje och F4 vid tredje statiska provningstillfället.

Pålarna P15 och P28 i stöd 2 har provbelastats dynamiskt 2 och 10 dygn efter drivning.

Sammanfattning av provbelastningsresultaten

I **tabell 6.3** redovisas en sammanställning av samtliga provbelastningar. Pålarnas bärförmåga vid olika tidpunkter efter drivning redovisas också i **Fig. 6.9**. (OBS: log-skala på tidsaxeln.) Därur framgår att pålarnas bärförmåga ökat markant under de första veckorna efter drivningen. Därefter, under perioden 16-71 dygn efter drivning, har pålarnas bärförmåga minskat dramatiskt. För pålarna P1 och P2 har hela tillväxten av totala bärförmågan gått bort - bärförmågan efter 71 dygn var t.o.m. lägre än vid första efterslagningen. Provbekastningarna vid ca 300 resp 1600 dygn efter drivning visar att bärförmågan återigen tillvuxit. Vi vet dock ingenting om eventuella variationer i bärförmågan mellan de senaste provbelastningarna. Sannolikt har det varit en långsam tillväxt under lång tid.

Påle F1 visar ett likartat mönster som P1 och P2, men minskningen efter ca 70 dygn är inte lika stor. Däremot har det varit en fortsatt men avtagande minskning till ca 300 dygn.

Påle F2 har provbelastats första gången 15 dygn efter slagning och den följer P1 och P2's tillväxtkurvor, dock med en avsevärt mycket mindre minskning mellan 15 och 71 dygn.

Påle F3 provbelastades efter 1, 77 och 325 dygn. Bärförmågan efter 77 dygn var den högsta av de då provade pålarna. Däremot hade bärförmågan sjunkit till provbelastningen efter 325 dygn.

Påle F4 provbelastades enbart efter 1 och 325 dygn. Tillväxten var ca 20 % och senast uppmätta bärförmågan låg i mitten av F-pålarnas resultat.

Bärförmågans förändring med tiden har för alla de ovanstående pålarna följt ett likartat mönster. Detta torde utesluta att den stora tillväxten respektive minskningen skulle bero på osäkerhet i bestämning av bärförmågan.

Provningresultaten för pålarna P15 och P28 i stöd 2 (provpålning 1989) visar på en relativt stor tillväxt som följer tillväxtkurvorna för de övriga provpålarna.

Kommentarer till provningsresultaten

Resultaten visar en tendens till att en upprepad provning minskar pålarnas bärförmåga. Förutom den första ökningen så har bärförmågan endast ökat då pålarna har fått stå orörda under lång tid. Påle P1 och P2 som provbelastades flest gånger erhöi efter upprepade provbelastningar kraftigare minskningar av bärförmågan än övriga pålar. En provbelastning innebär en störning av kontaktytan mellan påle och jord. Detta kan resultera i att mantelfriktionen är lägre direkt efter provbelastningen än innan. Vid förskjutningen av

pålen rubbas jordpartiklarna ur sina lägen och en omrörning av jorden närmast pålen uppkommer. Detta kan bl.a. orsaka en förändring av lagringstätheten i olika skikt längs pålen. Teorier angående orsakerna behandlas i kapitel 2 (Orsaker till bärförmågans tillväxt).

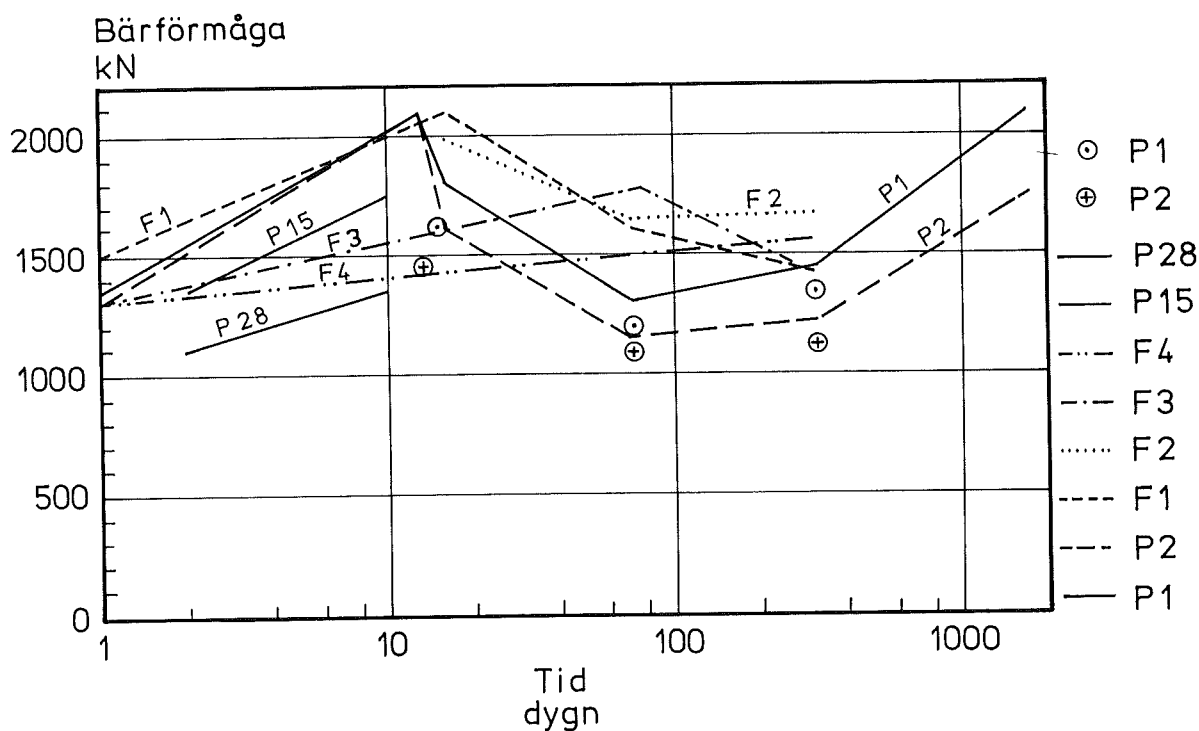
Mitchell (se kapitel 2.2) har redovisat resultat från packning av sand som pekade mot att sandens bärighet minskade efter upprepad packning efter att ha ökat efter första packningen. Med tiden ökade dock bärigheten igen men detta skedde långsamt. Återhämtningen efter en upprepad störning av påle-jord sker eventuellt på ett liknande sätt. Tillväxten av mantelfriktionen efter en upprepad provbelastning skulle då gå långsammare än tillväxten direkt efter installationen av pålen. Resultaten från provbelastning av ovanstående pålar skulle kunna styrka denna teori. Det är dock inte troligt att enbart upprepad provning är orsak till förändringarna i bärförmågan på denna provplats. Dock kan det antas att den har bidragit till bärförmågans minskning och till att återhämtningen gick mycket långsamt för pålarna P1 och P2.

En hypotes till att förklara bärförmågans ökning var att denna orsakades av en långsam avgång av porvattenövertryck som bildats vid neddrivningen av pålarna. Portrycksmätningarna under drivningen av pålarna visade dock inte på några tendenser till att större porövertryck byggdes upp vid slagning. De relativt små tryckskillnader som uppstod avklingade dessutom snabbt. Portrycksförändringen orsakade av pålinstallationen kan därmed uteslutas som förklaring till fenomenet. Att vatten i jorden ändå kan ha inverkan får dock inte uteslutas. Vattenströmning i mer permeabla skikt som överlagras av tätare jord, kan orsaka portrycksförändringar i jorden och därmed förändringar av effektivspänningarna. Kontakttrycket dels mellan kornen och dels mellan kornen och pålens mantelyta ökar eller minskar då beroende på om det är en portrycksminskning eller -ökning. Portrycksmätningar under längre tid som skulle kunnat visa portrycksförändringar i jorden har dock inte utförts, så vi är hänvisade till att studera om förutsättningen finns till att de skulle kunna uppstå.

Uppströms deltat finns en kraftverksdam och tankar har funnits på att vattennivåvariationer i denna skulle kunna påverka portrycket i jorden vid deltat genom läckage genom permeabla skikt. Emellertid hålls vattennivån i dammen tämligen konstant (± 5 cm) så denna kan inte orsaka större portrycksvariationer. Samma fenomen kan dock uppkomma om vatten från omgivande högre belägna markområden strömmar ner längs permeabla skikt till jordlagren kring pålarna. Provtagningen vid provplatsen visar inte tydligt på stora skillnader mellan jordlagren. Eventuellt finns dock ett skikt med sand kring 12 m djup som både över- och underlagras av något siltig och siltig sand. Vid CPT-undersökningen tolkades jordarten till silt mellan ca 2 och 7 m djup och därunder sand. Förutom att orsaka en minskning av effektivspänningen i jorden skulle porövertryck i mer permeabla skikt som överlagras av tätare jord även kunna ge upphov till uppåtgående vattenströmningar längs pålarna. Detta skulle kunna leda till att kornstrukturen störs och att korn flyttas bort med vattenströmningen. Vid senare efterforskningar har uppgift erhållits att lokala vattenuppströmningar har förekommit inom det aktuella området.

Tabell 6.3. Provningsresultat från Sörån, stöd 1 och 2.

	Tid efter drivning (dygn)	Bärförmåga, kN		Längd i jord (m)	Fallhöjd (m)	Sjunkning mm/antal slag
		Statisk provbelastning	Dynamisk provbelastning			
PÅLE P1						
	1		1350	22,0	0,6	7/10
	13		2100	”	1,5	2/1
	15	1600		”		
	16		1800	”	1,5	9/1
	70	1150		”		
	71		1300	”	0,9	1/1
	315	1300		”		
	317		1450	”	1,0	1/1
	1687		2100	”	2,0	5/1
PÅLE P2						
	1		1300	18,3	0,5	28/10
	13		2100	”	1,5	3/1
	14	1410		”		
	16		1600	”	1,5	5/1
	69		1150	”	0,8	12/4
	69	1070		”		
	71		1150	”	0,8	4/1
	314	1080		”		
	317		1220	”	0,8	4/1
	1687		1750	”	2,5	5/1
PÅLE F1						
	1		1500	18,3	0,6	2/1
	16		2100	”	1,5	2/1
	72		1600	”	0,8	1/1
	320		1420	”	0,8	1/1
PÅLE F2						
	15		2000	18,3	1,5	3/1
	71		1650	”	0,8	2/1
	319		1675	”	0,8	1/1
PÅLE F3						
	1		1300	18,6	0,6	4/1
	77		1780	”	0,8	2/1
	325		1400	”	0,8	-
PÅLE F4						
	1		1300	18,2	0,6	3/1
	325		1565	”	0,8	1/1
PÅLE P15						
	2		1350	20,0	2,0	5/1
	10		1750	”	2,5	5/1
PÅLE P28						
	2		1100	21,0	2,0	5/1
	10		1350	”	2,5	-



Figur 6.9. Bärkraftens tillväxt med tiden (Sörån stöd 1 & 2). Observera att tidsskalan är logaritmisk. "o" runt tecken innebär värde erhållet från statisk provbelastning.

6.4.3 Provpålsplats Sörån, stöd 9

Vid nordöstra landfästet (stöd 9) för bro över Sörån har provpålning utförts 1984 på två stycken pålar, P5 och P6, som båda provbelastats vid två tillfällen.

Jordlagerföljd

Jorden består huvudsakligen av löst lagrad sand och finsand ned till ca 10 m djup. I djupintervallet 5-7 m finns siltig finsand. Under ca 10 m djup har jorden hög finjordshalt, i huvudsak silt ned till ca 24 m djup och därunder siltig lera och lerig silt. Provtagning har utförts till ca 28 m djup.

På provplatsen har utförts vikt- och hejarsonering, provtagning samt por- och spetsstrycksondering. Vid portrycksonderingen alstrades poröverttryck, som indikerar förekomst av finkornig jord, dels i tunna lager i djupintervallet 5-7 m, dels under ca 10 m djup.

På en yta av 18 m x 28 m där provpålarna står hade packning av jorden med vibrovingemetoden utförts innan pålningen startade. Spetsstrycksondering utförd efter packningen visade att denna hade gett upphov till en ökad fasthet i sanden ned till ca 10 m djup. Därunder var jorden relativt opåverkad av packningsarbetet. Detta innebär att större delen av provpålarnas längd är installerad i naturligt lagrad jord. Den del av pålarna som befinner sig i den packade jorden tas inte med i utvärderingen.

Påldata

P5 och P6 är provpålar för dynamisk provbelastning. De är båda av typ B600 (Betong 270 x 270 mm). P5 drevs 1984-10-18 till en längd i jord av 35,1 m. Påle P6 drevs 1984-10-18 till 30,1 m i jord för att efter 53 dygn (1984-12-10) drivas vidare till 42 m.

Dynamisk provbelastning

Dynamisk provbelastning har utförts genom stötvågsmätningar på provpålarna P5 och P6 vid efterslagning av pålarna 50 och 294 dygn efter ursprunglig drivning.

Sammanfattning av provbelastningsresultaten

I tabellen nedan redovisas en sammanställning av provbelastningsresultaten. Genom förekomsten av finkornig jord (även lera vid pålarnas nedre del) har relativt låga bärförmågor erhållits vid provbelastningarna jämfört med resultaten från Sörån stöd 1.

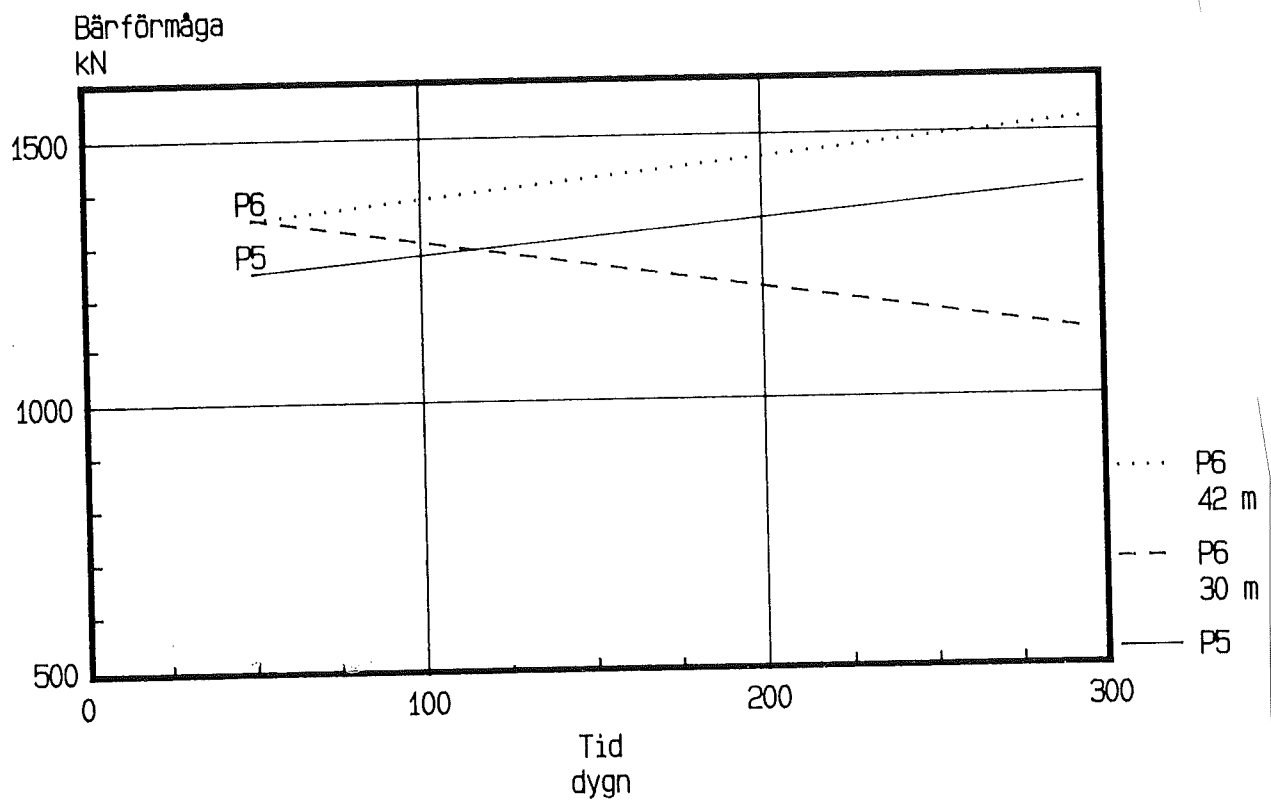
Fig. 6.10 och 6.11 visar att påle P5 har haft en relativt liten och långsam tillväxt, som erhållits i ungefär samma omfattning i siltjorden på nivå 10-24 m djup som i de underliggande jordlagren (provtagningen har inte nått ned så långt i dessa).

Tabell 6.4. Provbelastrinsresultat från påle P5 och P6, Sörån stöd 9.

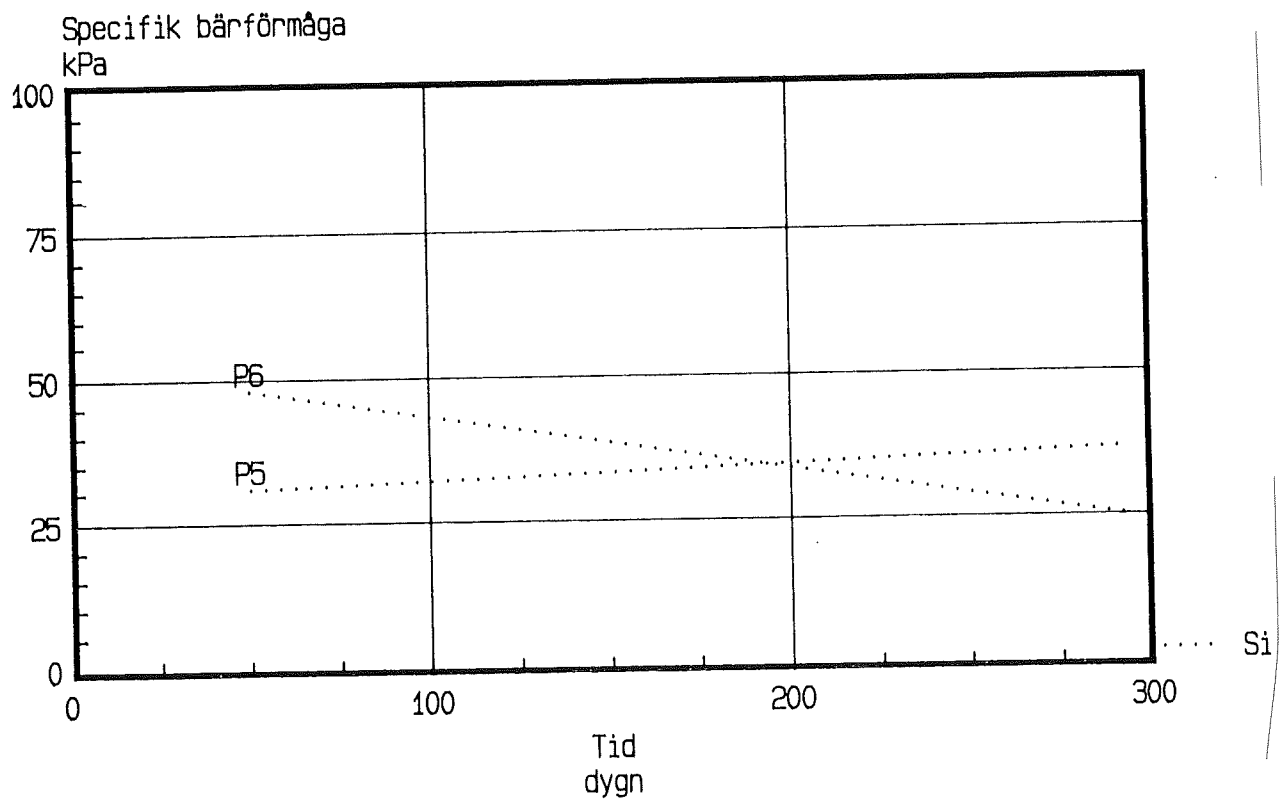
	Tid efter drivning (dygn)	Bärförmåga, kN Dynamisk provbelastning	Längd i jord (m)	Fallhöjd (m)	Sjunkning (mm/slag)
PÅLE 5	50	1250	35,1	1,5	1/1
	294	1400	35,1	1,5	2/1
PÅLE 6	50	1350	30,1	1,5	8/1
	294	1525	42,0	1,5	4/1

Påle P6 har totalt sett haft en tillväxt i bärförmåga i samma storleksordning som P5. Emellertid har P6 förlängts från 30 till 42 m i jord strax efter första provbelastningen och tillskottet till bärförmågan från de nedre nytillkomna jordlagren är större än totala ökningen av bärförmågan. Studerar man enbart pålen ned till 30 m djup så har "totala" bärförmågan istället minskat. Den fortsatta drivningen av påle P6 ned till 42 m djup innebär en störning av de förhållande mellan påle och jord som fanns vid första efterslagningen. Detta kan vara en av orsakerna till att mantelfriktionen ned till 30 m djup minskat. Utvärderingen av bärförmågan vid andra efterslagningen har gjorts på det tredje slaget. Studie av slag 1-3 visar att man har "slagit bort" en del av den övre mantelfriktionen och istället mobiliserat en större del av bärförmågan vid pålens nedre del. Den totala mobiliserade bärförmågan var störst för slag 3. Ovanstående är en av orsakerna till den påvisade minskningen av mantelfriktionen i siltlagret.

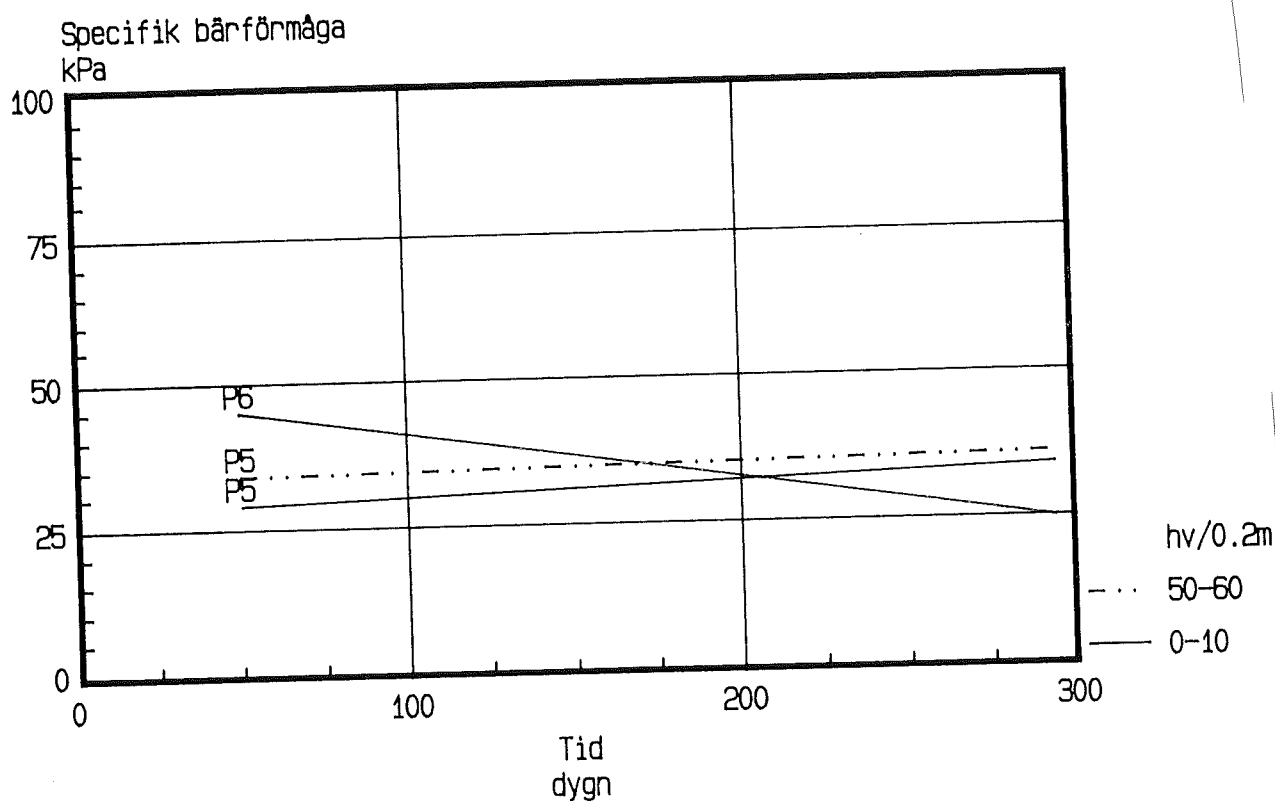
Tendenserna i samtliga **Fig. 6.10 - 6.14** är desamma eftersom siltlagret dominerar och sonderingen har gett likartade resultat i detta lager (HfA: 5-10sl/0,2m; Vim: 0-10hv/0,2m; TrS: 0-2,5 MPa). Samtliga diagram visar på en tillväxt på 10-15 % för påle P5, medan för påle P6 är det en minskning på ca 20 % i detta skikt.



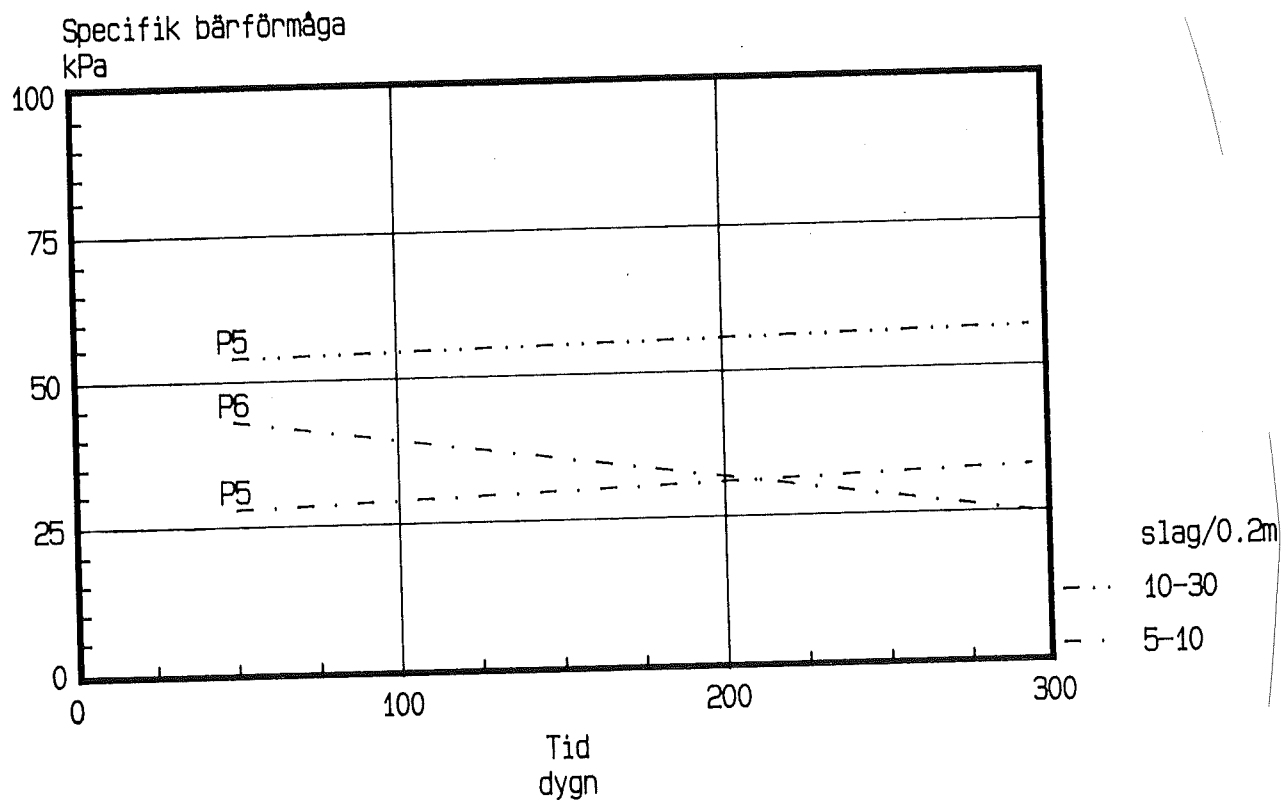
Figur 6.10. Bärförmågas tillväxt med tiden (Sörån stöd 9)



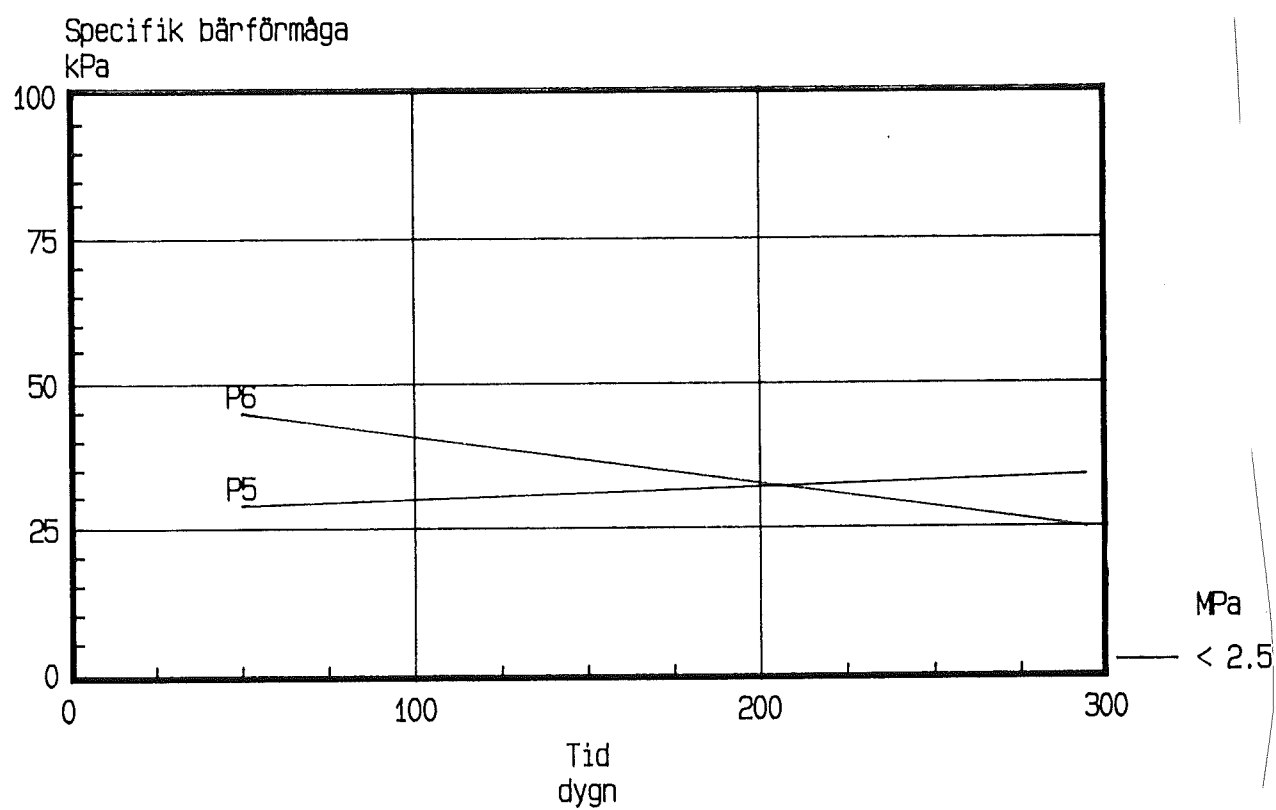
Figur 6.11. Specifika bärförmågas tillväxt med tiden i relation till jordart. (Sörån stöd 9)



Figur 6.12. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat. (Sörån stöd 9)



Figur 6.13. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Sörån stöd 9)



Figur 6.14. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till spetstrycksonderingsresultat, q_c . (Sörån stöd 9)

6.4.4 Provpålsplats Strandbergsrännan

Allmänt

Vid sydvästra landfästet för bro över Strandbergsrännan har provpålning utförts både 1984 (P3 och P4 belägna söder om stöd 1) och 1988 (P9 och P16, stöd 1). P3 och P4 slogs 1984-10-02, medan P9 och P16 slogs 1988-10-25. Alla provpålarna provbelastades vid två tillfällen i samband med respektive provpålning, dessutom provbelastades P3 och P4 ytterligare en gång i samband med provpålningen 1988.

Jordlagerföljd

Jorden består i huvudsak av mycket löst lagrad sand ned till ca 11 m djup. Under 11 m djup är jorden finkornigare och består av finsand och silt till ca 33 m djup. På 20-33 m djup har siltig lera och lera påträffats. Därunder består jorden av grövre och fastare friktionsjord.

På provplatsen har utförts vikt- och hejarsondering, provtagning samt por- och spets-trycksondering. Vid portrycksonderingen alstrades porövertryck, som indikerar finkornig jord, från ca 8 m djup.

Påldata

Pålarna P3 och P4 belägna söder om stöd 1 är provpålar för både statisk och dynamisk provbelastning, medan pålarna P9 och P16 i stöd 1 är provpålar för enbart dynamisk provbelastning. Samtliga provpålar är av typ B600 (Btg 270 x 270 mm). Längd i jord är för påle P3 och P4 28,8 respektive 33,8 m och 31,7 och 36,7 m för påle P9 respektive P16.

Statisk provbelastning

Statisk provbelastning utfördes först på den kortare pålen P3 och sedan på den längre pålen P4. Påle P3 provbelastades 65 dygn efter drivning och påle P4 66 dygn efter drivning.

Dynamisk provbelastning

Dynamisk provbelastning har utförts på provpålarna P3 och P4 i samband med efterslagning av pålarna dels ett dygn efter drivning, dels 70 och 1 525 dygn efter drivning. På provpålarna P9 och P16 utfördes dynamisk provbelastning efter 1 och 43 dygn.

I tabellen nedan redovisas en sammanställning av provbelastningsresultaten från Strandbergsrännan.

Tabell 6.5. Provb belastningsresultat från Strandbergsrännan.

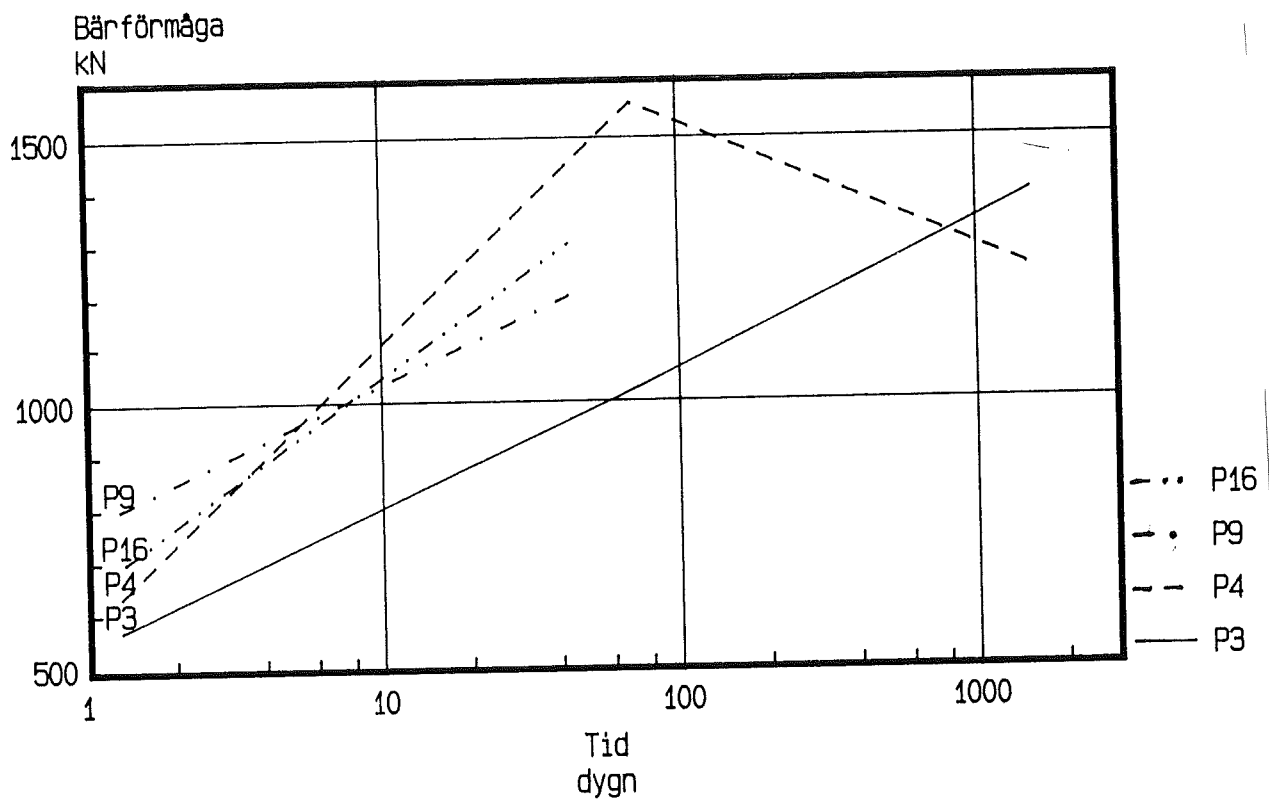
	Tid efter drivning (dygn)	Bärförmåga, kN		Längd i jord (m)	Fallhöjd (m)	Sjunkning mm/antal slag
		Statisk provbelastning	Dynamisk provbelastning			
PÅLE P3	1	1200	570	28,8	0,5	58/10
	65					
	70		1020	”	1,5	5/1
	1525		1395	”	-	-
PÅLE P4	1	1660	635	33,8	0,5	23/10
	66					
	70		1565	”	1,5	4/1
	1525		1250	”	-	-
PÅLE P9	1		800	31,7	0,8	14/4
	43		1200	”	2,5	5/1
PÅLE P16	1		700	36,7	16/4	
	43		1300	”	2,5	5/4

Ökningen av den totala bärförmågan visas i **Fig. 6.15**. Den totala bärförmågan har ökat avsevärt för alla pålarna och deras tillväxtkurvor följer varann relativt väl. Undantaget påle P4 som hade den största tillväxten fram till andra efterslagningen men vars bärförmåga därefter sjunkit ca 20 %. Totalt sett har den dock haft en tillväxt i samma storleksordning som övriga provpålar.

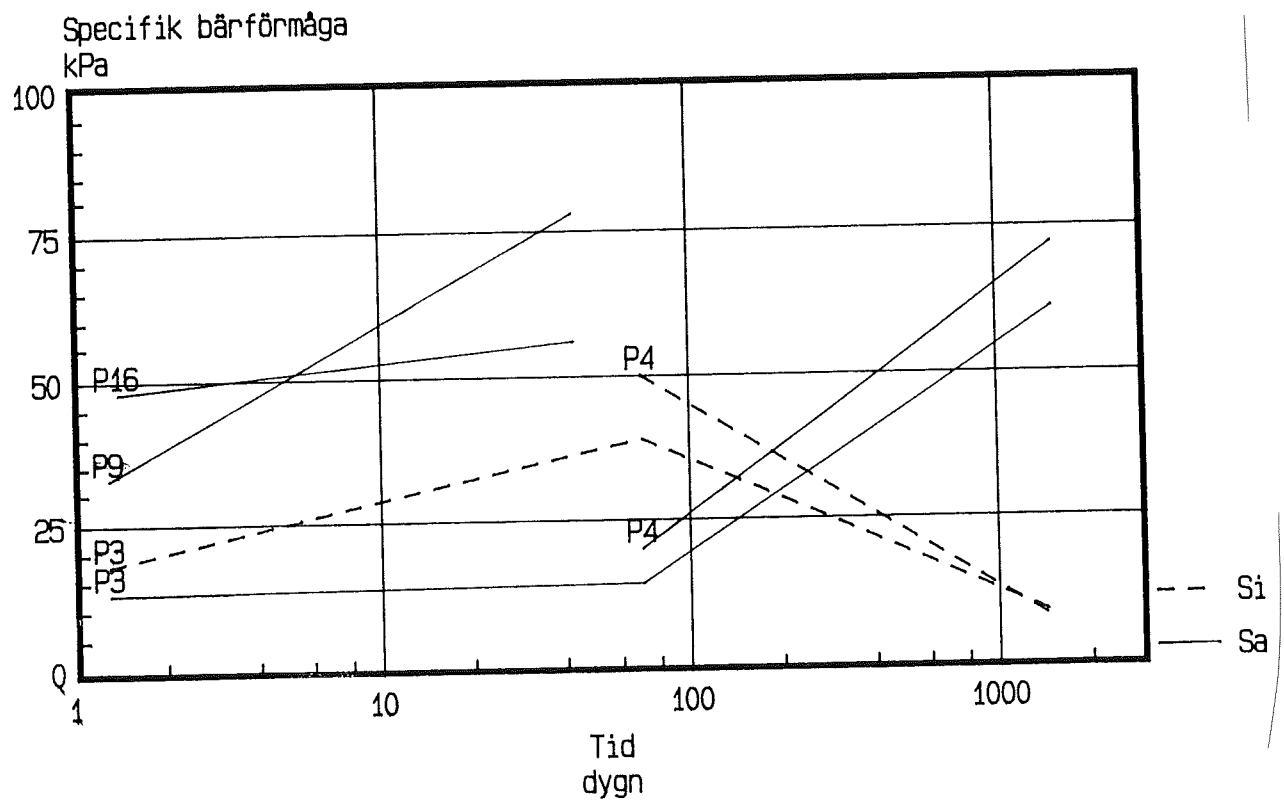
För provpålarna P3 och P4 har fördelningen av mantelfriktionen förskjutits kraftigt uppåt mellan andra och tredje provbelastningen. Pålarna P9 och P16 har vid båda efterslagningarna en övervägande del av bärförmågan på övre delen av pålen.

Fig. 6.16 visar ökningen av specifika bärförmågan för del av pålen i olika jordlager. I det översta sandlagret har en tillväxt erhållits för alla pålarna. I siltlagret därunder har en kraftig minskning av bärförmågan erhållits mellan 70 och 1 525 dygn. Under samma tid har en lika kraftig ökning erhållits i det överlagrade sandlagret. Gränsen mellan sand och silt är inte skarp så man kan anta att en utjämning mellan tillväxten för sanden och minskningen för silten i diagrammet ger en mera sann bild av de verkliga förhållandena i jorden.

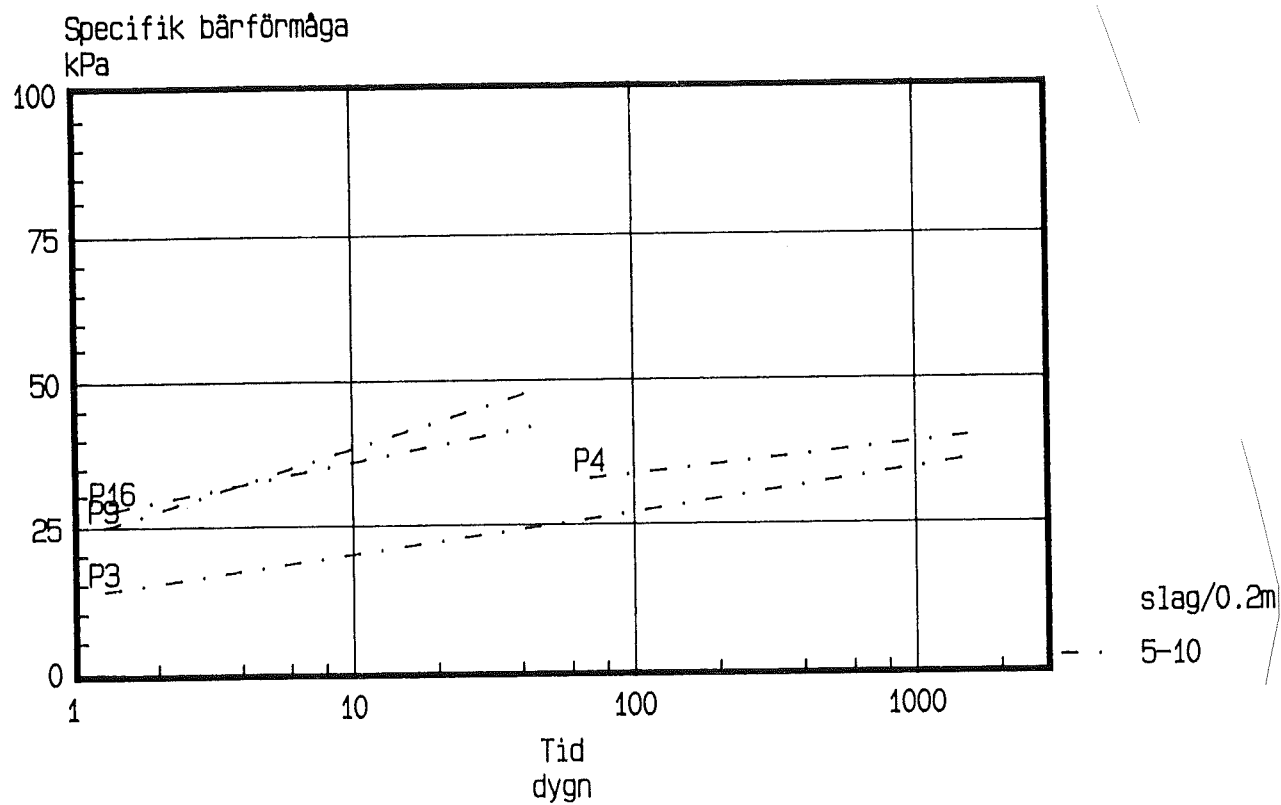
Fig. 6.17 och **6.18** för hejarsondering respektive viktsondering är i stort sett lika och oberoende av gränsen mellan sand och silt. Sonderingarna har gett likartade resultat (HfA: 5-10sl/0,2m, Vim: 0-10hv/ 0,2m) och sonderingsintervallen täcker in större delen av pålarna. Jämförelsen med spetstryckmotståndet, **Fig. 6.19**, ger dock en mer splittrad bild.



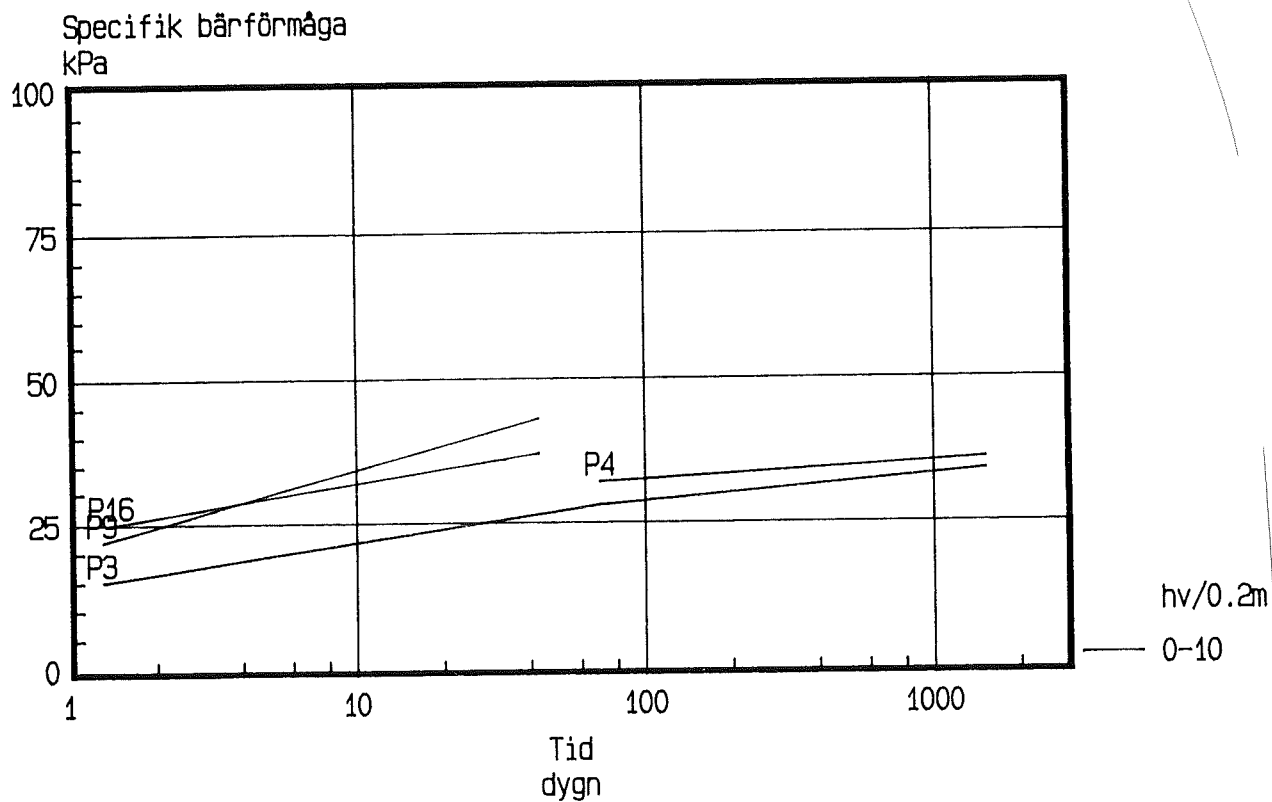
Figur 6.15. Bärkraftens tillväxt med tiden (Strandbergsrännan).



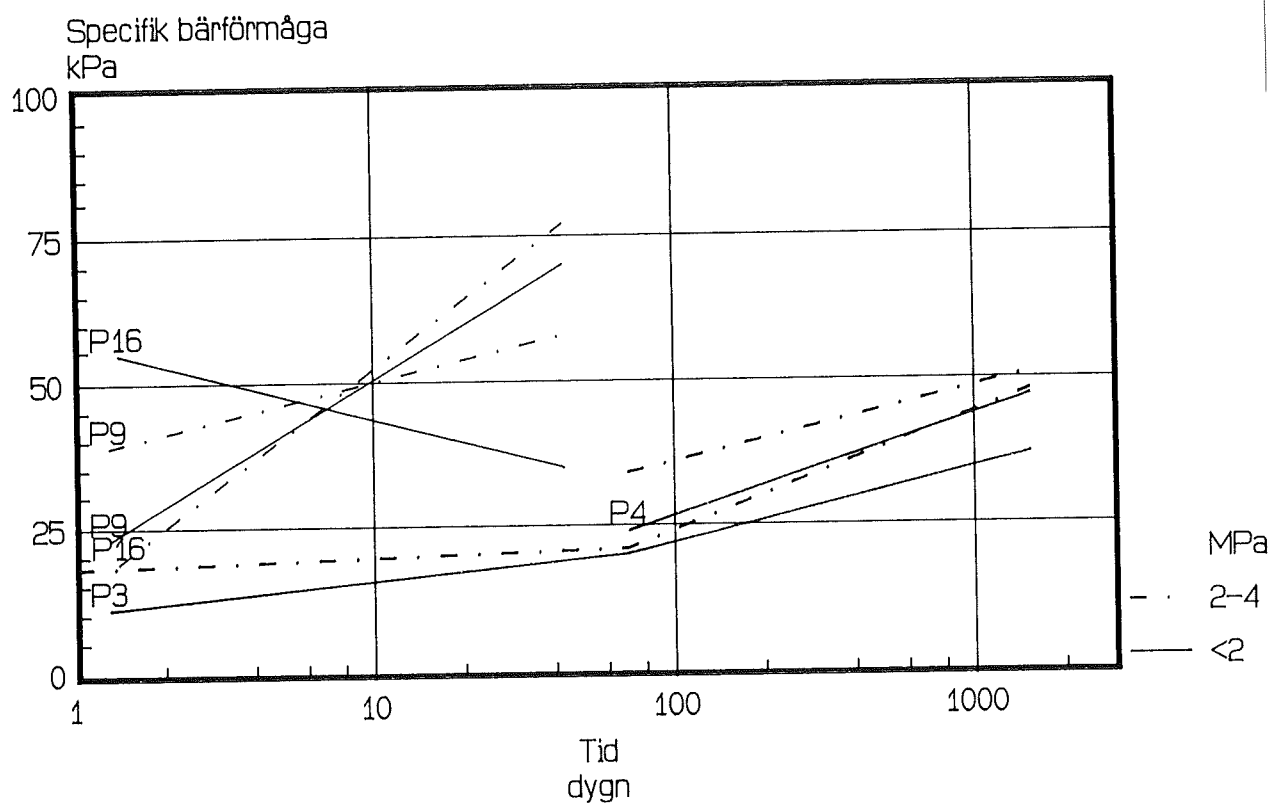
Figur 6.16. Specifika bärkraftens tillväxt med tiden i relation till jordart (Strandbergsrännan).



Figur 6.17. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat (Strandbergstrännan).



Figur 6.18. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat (Strandbergstrännan).



Figur 6.19. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till spetstrycksonderingsresultat (Strandbergsrännan).

6.5 Fittja, Bro över Masmovägen för väg 588

Provpålning

Provpålningssprogrammet omfattade totalt åtta pålar (P1-P8), fördelat på tre olika platser. P1 och P2 provbelastades dock endast en gång, medan P6 och P8 visserligen belastades vid mer än ett tillfälle, men endast en gång dynamiskt. Påle P5 stannade med sin spets i ett hårdare lager och fick betraktas som spetsburen. Vad det gäller P7 går de inom rimligt avstånd belägna sonderingarna endast högst marginellt ner i en friktionsjord vilken överlagras av en lera. Kvar för en mer fullständig analys är således endast P3 och P4. Pålarna P6-P8 har dock tagits med vad det gäller den totala bärförmågens tillväxt.

Pålarna är av typen B600, betong 270 x 270 mm. Pålarna P3-P4 slogs 1982-11-25--26 och P6-P8 1983-01-25. Pålarnas längder framgår av **tabell 6.6**.

Jordlagerföljd

Markytan vid pålarna P3 och P4 ligger på +2,0 meter och grundvattenytan cirka 1,5 m under markytan. Jorden utgörs av åsmaterial (silt och siltig sand) med endast ringa lerinslag ned till åtminstone 24 meters djup.

Där pålarna P6-P8 är belägna utgörs jordlagren av 10 meter lera ovanpå friktionsjord, främst grus, sand och silt. Markytan ligger på +1,0 meter.

Provbelastning

Provpålarna P3-P4 och P6-P8 provbelastades såväl dynamiskt som statiskt vid ett antal tillfällen, vilka framgår av **tabell 6.6**.

Utvärdering

Enligt de dynamiska provbelastningarna (CAPWAP-analyser) ökade spetsbärförmågan för P3 från 30 kN till 50 kN vid de båda senare mättillfällena och för P4 ökade den från 30 till 100 kN.

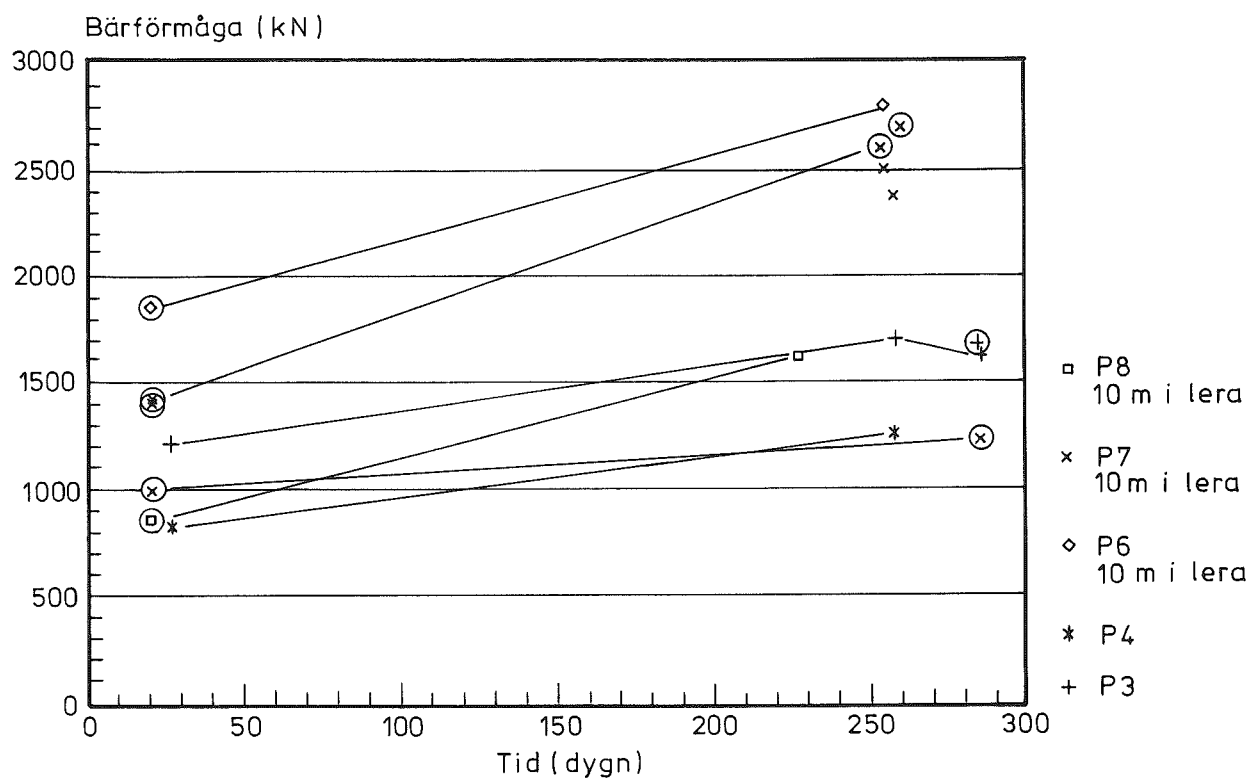
Av de två pålar som analyserades fullständigt ökade P3:s bärförmåga från 1210 till 1700 kN under en period mellan 27 och 259 dygn efter slagning. För påle P4 ökade bärförmågan under perioden 27-291 dygn från 820 kN till 1260 kN. Bärförmågan för P6 och P7 ökade från 1850 till 2800 kN respektive 1410 till 2500 kN under tiden 21 till 226 dygn efter slagning. Dessa pålar är klart längre. Pålen P8 ökade mest procentuellt sett, från 840 kN till 1620 kN under ett intervall av 22-198 dygn efter slagning. I **Fig. 4.20** redovisas samtliga provbelastningsresultat som funktion av tiden efter drivning.

Det kan vara värt att notera hur väl resultaten från de olika statiska och dynamiska provbelastningarna ligger samlade för var och en av pålarna.

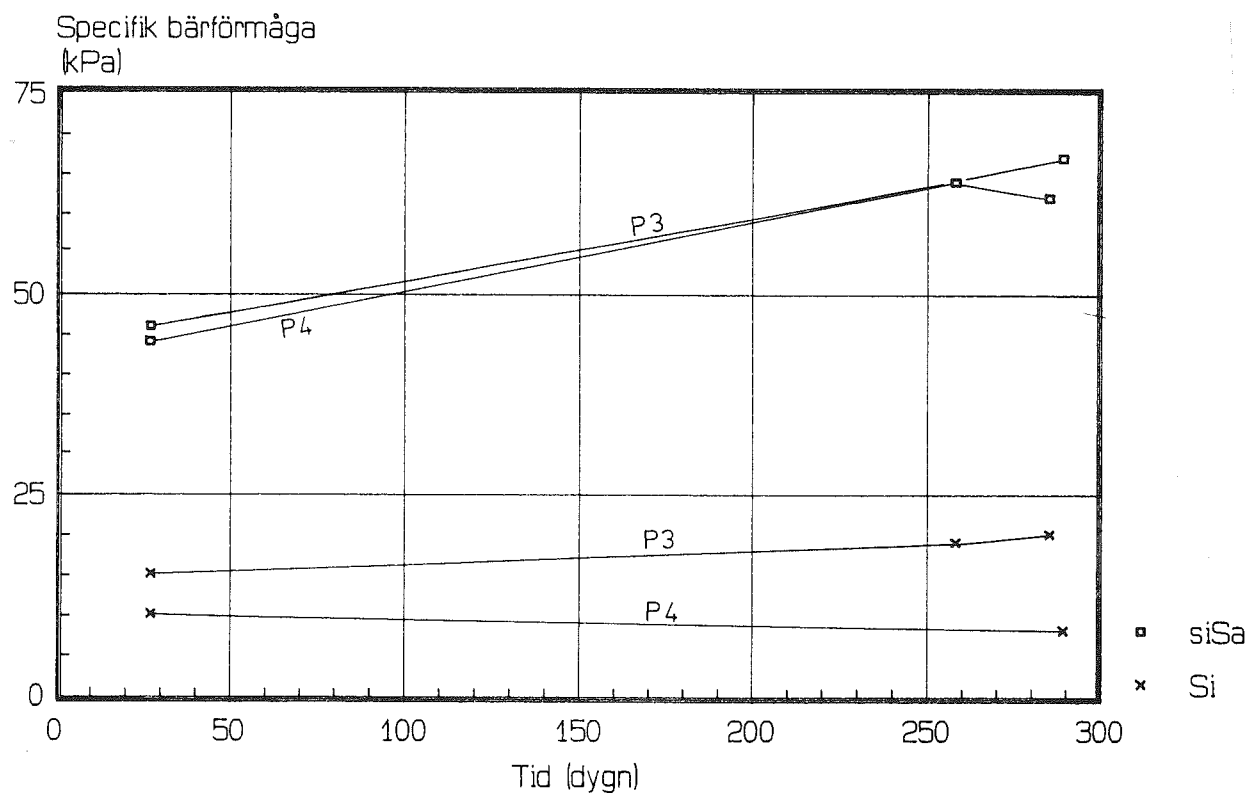
Vad gäller den specifika bärförmågan har den framförallt ökat i det nedre siltigt sandiga och också i det fastare lagret. Av **Fig. 6.23** framgår att störst ökning har erhållits i lager med hejarmotstånd >30 sl/0,2m.

Tabell 6.6. Provb belastningsresultat från Fittja.

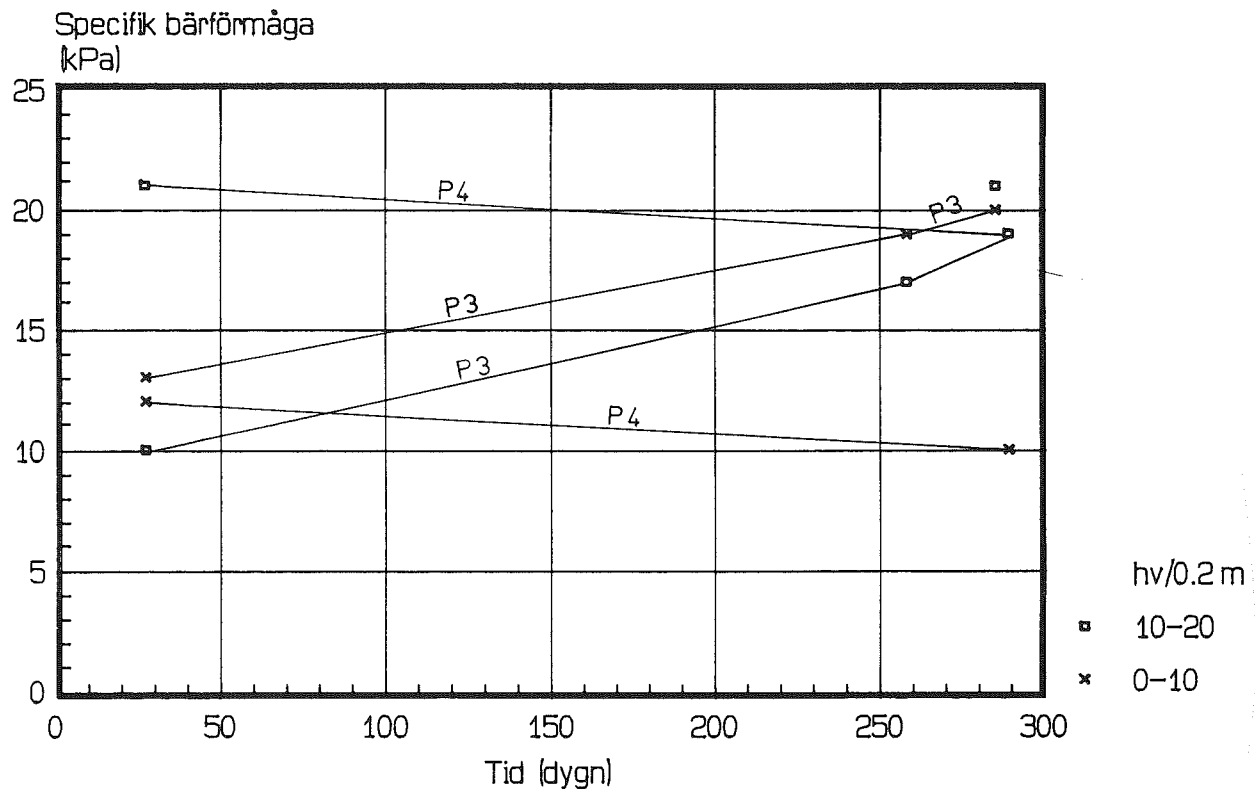
	Tid efter drivning (dygn)	Bärförmåga, kN		Längd i jord (m)	Fall-höjd (m)	Sjunkning mm/antal slag
		Statisk provbelastning	Dynamisk provbelastning			
PÅLE P3	20	1390		27,0		
	27		1210	”	1,0	3/1
	259		1700	”		
	286	1680		”		
	287		1620	”		
PÅLE P4	20	990		21,5		
	27		820	”	0,7	5/1
	287	1230		”		
	291		1260	”		
PÅLE P6	22	1850		48,0 (varav 10 m i lera)		
	226		2800	”		
PÅLE P7	22	1410		37,0 (varav 10 m i lera)		
	225	2600		”		
	226		2500	”		
	230		2375	”		
	232	2700		”		
PÅLE P8	22	840		30,5 (varav 10 m i lera)		
	198		1620	”		



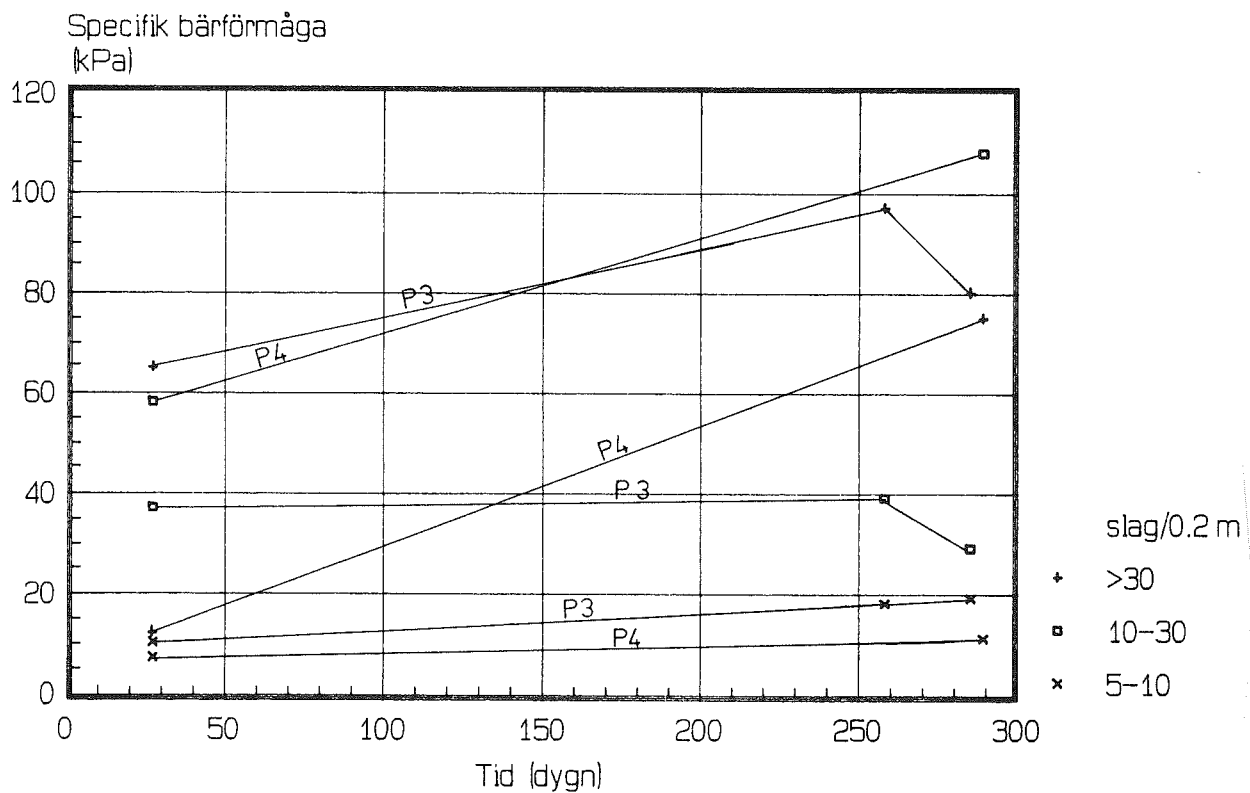
Figur 6.20. Bärformågens tillväxt med tiden. "o" runt tecken innebär värde erhållet från statisk provbelastning. (Fittja)



Figur 6.21. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till jordart. (Fittja)



Figur 6.22. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Fittja)



Figur 6.23. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat. (Fittja)

6.6 Kvissleby, Bro över Ljungan för väg 567

Provpålning

De två studerade pålarna P1 och P2 är belägna i stöd 1. Pålarna är av typen B600 (betong 270 x 270 mm). Längden i jord är för P1 21 meter och för P2 17 meter. Pålningarbetet utfördes 1985-02-18.

Jordlagerföljd

På platsen för pålarna utgörs jorden överst av finsand som vid åtta meters djup övergår i siltig sand. Med djupet blir jorden allt finkornigare och strax under pålstoppnivån tar sandig silt vid för att längre ner övergå i lerig silt. Stopp vid hejarsondering erhöles i närheten på 25-37 meters djup.

Provbelastning

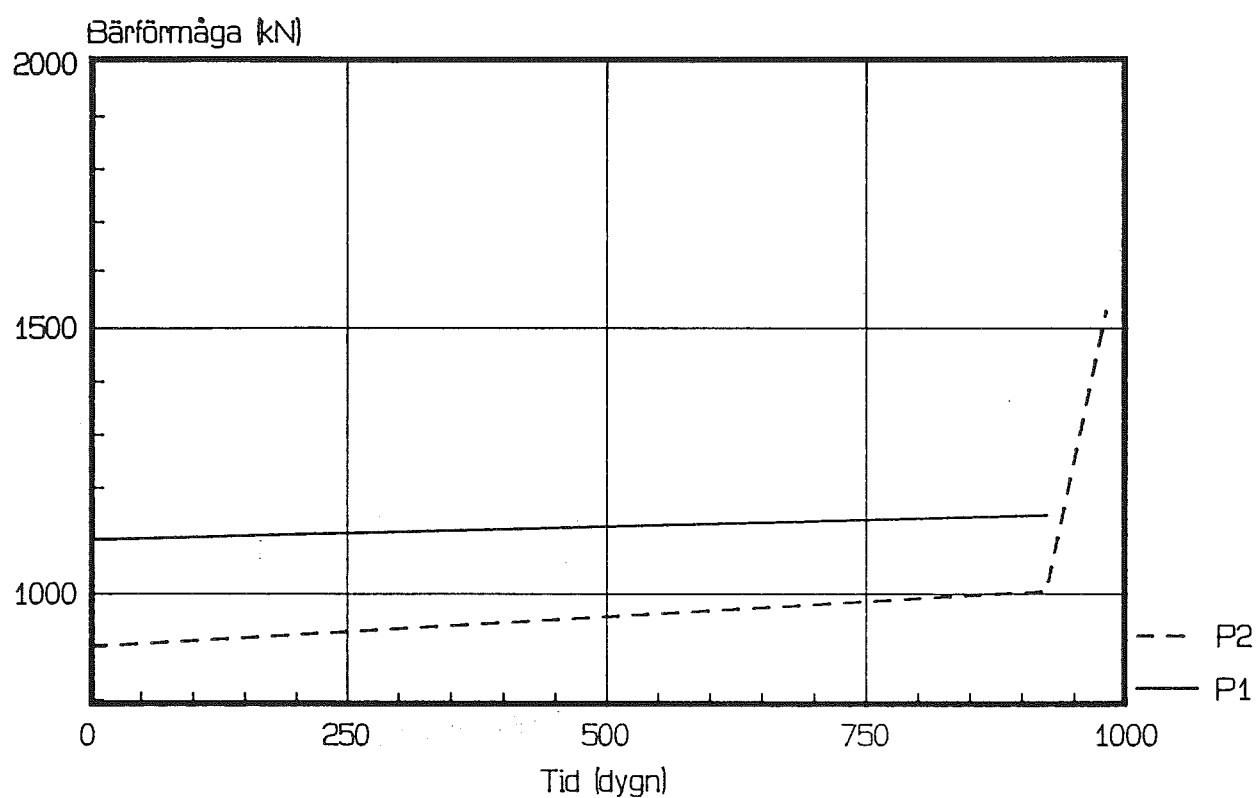
Pålarna provbelastades dynamiskt, dels ett dygn efter slagning dels efter den långa tiden av 923 dygn (1987-09-01). P2 belastades dynamiskt ytterligare en gång 56 dygn senare, totalt 979 dygn efter drivning.

Utvärdering

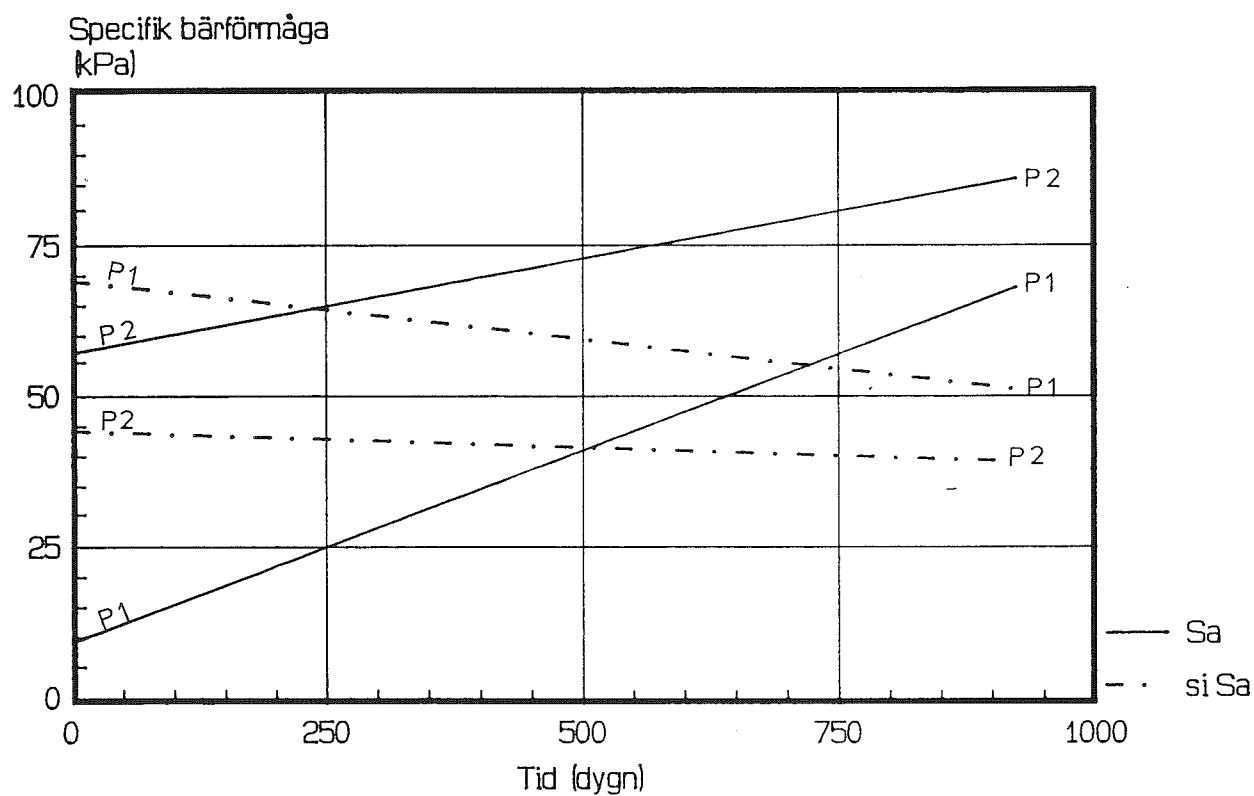
Pålarna, som huvudsakligen var mantelburna, hade en spetsbärförmåga på för P1 120 respektive 35 kN och för P2 140, 71 och 132 kN.

Fig. 6.24 visar att de uppmätta skillnaderna i total bärförmåga är små mellan första och andra efterslagningen trots att en lång tid (923 dygn) har förflutit mellan måttillfällena. För P1 från 1100 till 1148 kN och för P2 900 till 1005 kN. Troligen beror detta på att pålarna inte har rört sig tillräckligt mycket vid de dynamiska provbelastningarna för att maximal bärförmåga skall mobiliseras. P2 hade 1 mm sättning vid mätslaget vid andra efterslagningen. I övrigt saknas uppgifter om sättningen vid dessa måttillfällen. Efter ytterligare 57 dygn (totalt 979 dygn) uppmättes P2s bärförmåga till 1531 kN (sättning 2 mm). Högre fallhöjd användes vid detta måttillfälle för att bättre kunna mobilisera pålen.

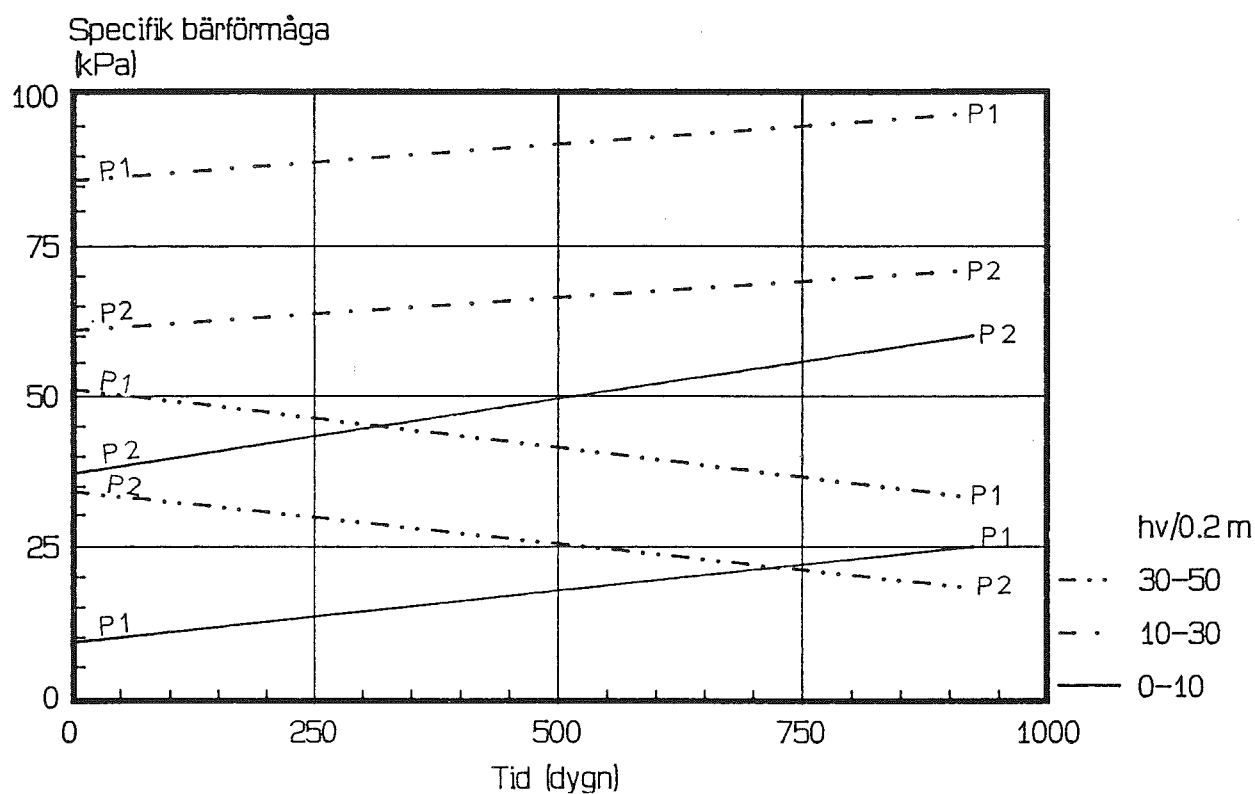
Fig. 6.25 och **6.26** visar att det är i det övre lösare sandlagret som det mesta av tillväxten har skett. En mer ingående studie av bärförmågens fördelning utefter pålen visar att tillväxten har varit speciellt stor i den nedre delen av det sandiga lagret, precis i övergången mellan de två viktsonderingsintervallen 0-10 respektive 10-30 hv/0,2 m. Den minskade specifika bärförmågan vid sonderingsmotstånd 30-50 hv/0,2 m torde bero på ofullständig mobilisering av specifika bärförmågan vid den senare provningen.



Figur 6.24. Bärformågas tillväxt med tiden. (Kvissleby)



Figur 6.25. Specifika bärformågas tillväxt med tiden i relation till jordart. Se kommentar under rubriken "Utvärdering". (Kvissleby)



Figur 6.26. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till viktsonderings resultat. Se kommentar under rubriken "Utvärdering". (Kvissleby)

6.7 Malung, Väg 234 Bro över Västerdalälven, Kopparbergs Län

Provpålning

Fyra provpålar slogs (P1-P4). P1 och P2 i stöd 4, östra landfästet och de båda andra i stöd 1, västra landfästet. Pålarna var av typen B600, betong 270 x 270 mm. Längderna i jord var, P1 23,8 m, P2 28,1 m, P3 19,3 m och P4 24,0 m. Pålningen utfördes 1984-03-19 -- 1984-03-21.

Jordlagerföljd

I det östra landfästet (P1 och P2) utgörs jorden ned till fem meters djup av löst lagrad finsandig mellansand. Under detta följer tio meter löst lagrad grovsilt och därefter fast lagrad skiktad grovsilt-finsand-mellansand (i utvärderingen benämnd sandig silt) ner till 22 m under markytan. Därefter är provtagningarna alltför glesa för att kunna utnyttjas.

I det västra landfästet inleds lagerföljden av sju meter dyg siltig finsand (ej medtagen i redovisningen) varunder följer ett lika tjockt lager med fast lagrad finsandig mellansand. Ner till 19 m under markytan utgörs jorden av silt. Därunder följer växellagrad siltig sand och sandig silt, vilka dock inte har medtagits i sammanställningen, då de berör för liten del av pållängden.

Provbelastning

Dynamisk provbelastning utfördes på påle P1 och P2 ett och 198 dygn efter slagning och på P3 och P4 ett samt 257 dygn efter slagning.

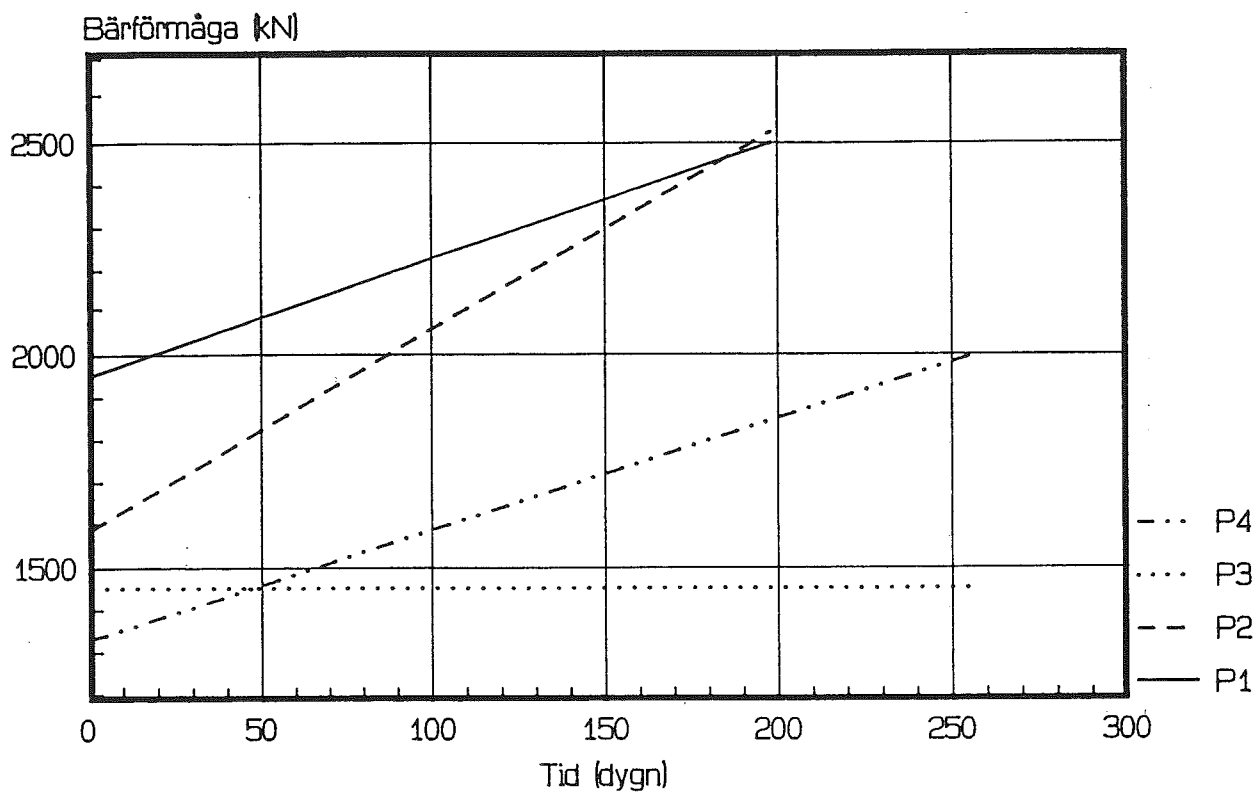
Utvärdering

Pålarna befanns vara i stort sett mantelburna. Spetsbärförmågan låg för P1 och P3 vid bägge måttillfällena på 150 kN, för P2 på 250 respektive 350 kN och för P4 på 250 kN vid båda tillfällena.

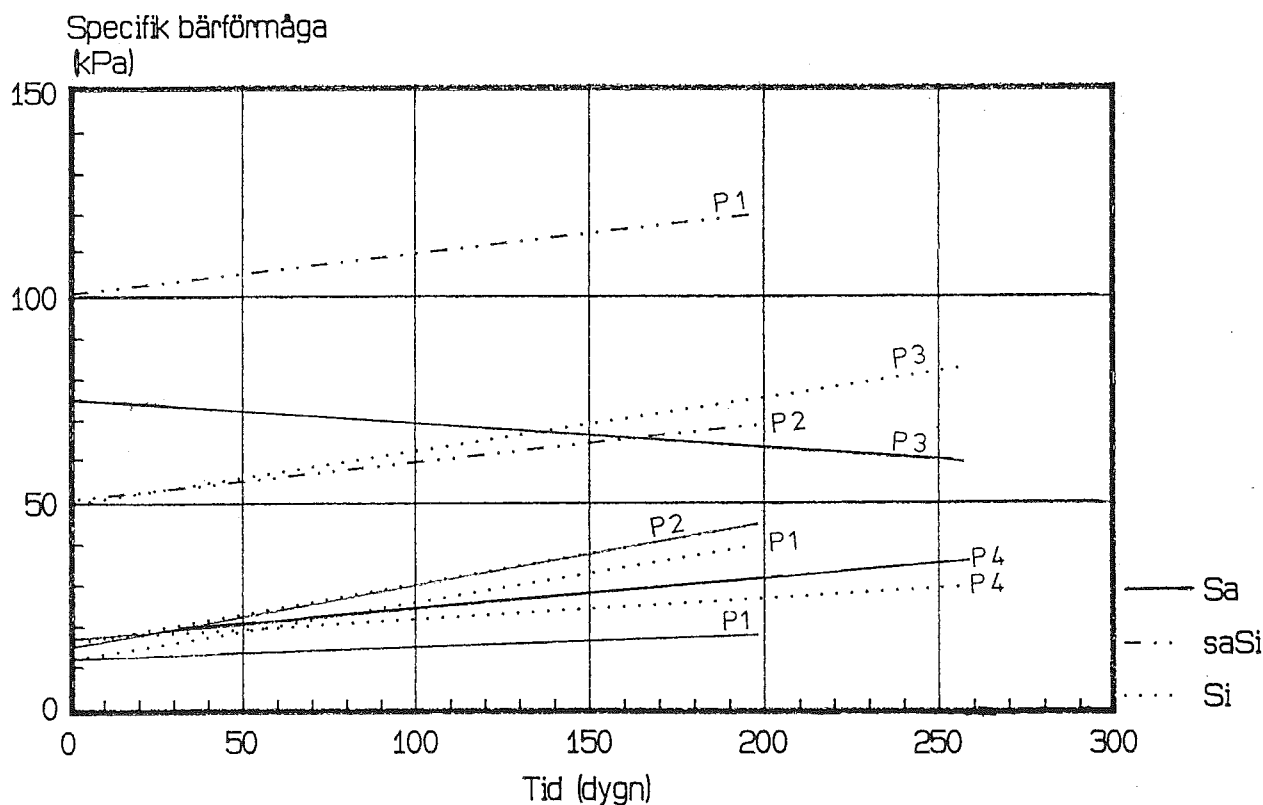
Av **Fig. 6.27** framgår att den totala bärförmågan för påle P1 och P2 i stöd 4 under en period av 1 - 198 dygn efter slagning ökar från 1950 till 2500 kN respektive 1590 till 2525 kN. I stöd 1 ökar P4:s bärförmåga från 1330 kN till 2000 kN under tiden 1 till 257 dygn efter slagning, medan däremot P3 uppvisar oförändrad bärförmåga. P3:s nolltillväxt i bärförmåga beror delvis på en nedgång i den specifika bärförmågan i sanden men också i det dygiga lagret som inte redovisas här.

Av **Fig. 6.28** framgår att det är i de siltiga lagren som bärförmågan ökar mest. Däremot har bärförmågan i sandlagren inte ökat fullt så mycket eller rent av sjunkit.

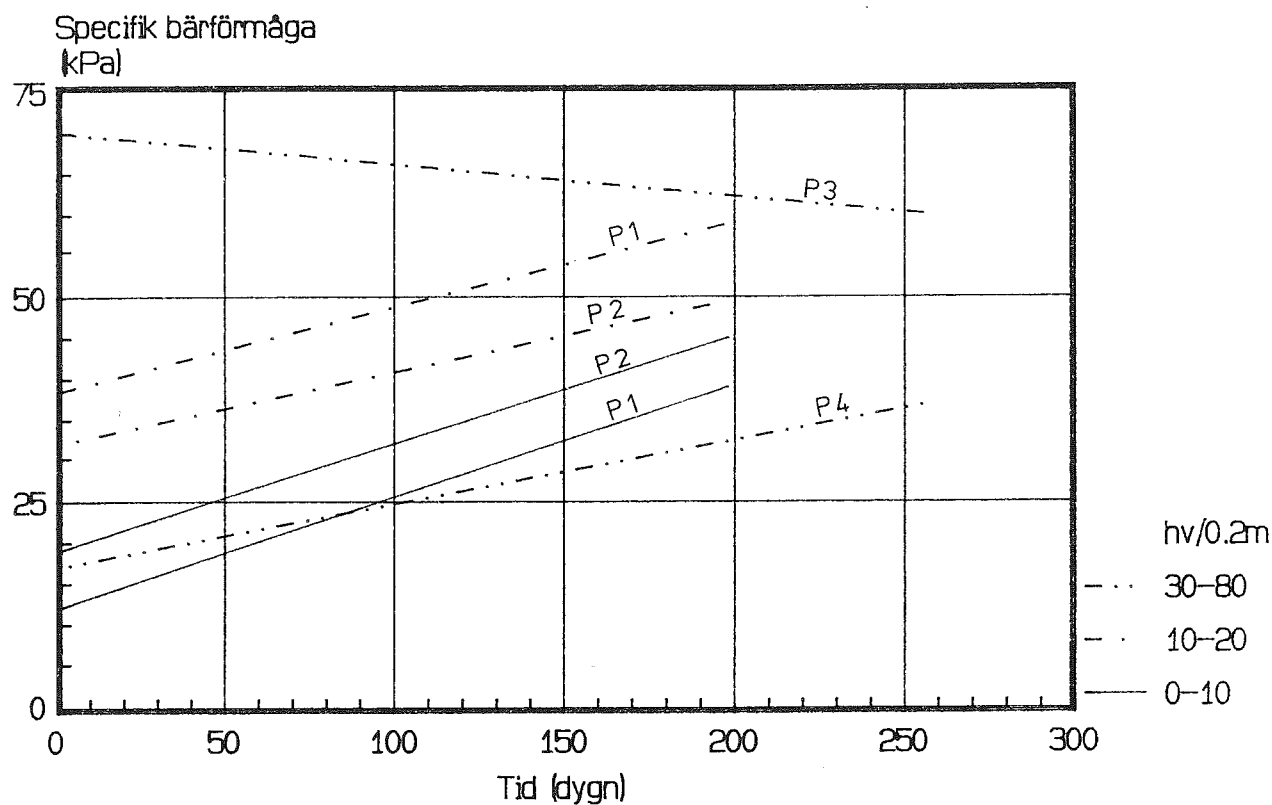
Fig. 6.29 och **6.30** visar att bärförmågan har tillvuxit kraftigt i samtliga sonderingsintervall.



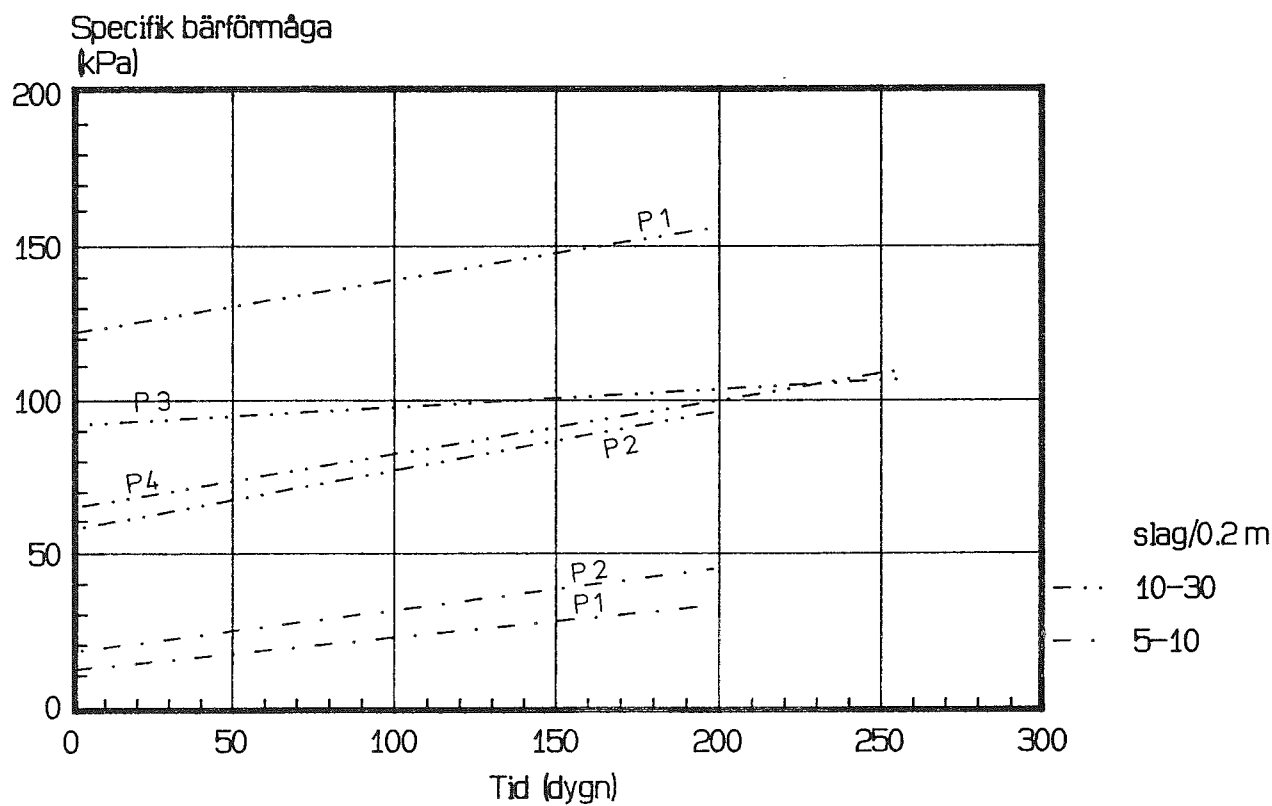
Figur 6.27. Bärformågens tillväxt med tiden. (Malung)



Figur 6.28. Specifika bärformågens tillväxt med tiden i relation till jordart. Observera att silt- och sandkurvan för P2 lappar över varandra. (Malung)



Figur 6.29. Specifika bärformågens tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Malung)



Figur 6.30. Specifika bärformågens tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat. (Malung)

6.8 Mellsta, Bro över Dalälven å väg 70, Kopparbergs län

Inledning

Som det framgår av följande stycke skedde en avsevärd tillväxt av pålarnas bärförmåga i fallet Mellsta. Detta samt att pålarna är slagna i en nästan ren friktionsjord gjorde att mer ingående undersökningar kom att utföras på platsen. För dessa hänvisas till kapitel 2.3.3 för kornanalysen och kapitel 4.3 för mätningar på hejarsondstänger.

Provpålning

Fyra provpålar slogs (P1-P4) under tiden 1983-11-28 -- 30. P1 och P2 i stöd 6, norra landfästet och de båda övriga i andra landfästet, stöd 1. Pålarna var av typen B600, (betong 270 x 270 mm). Längderna i jord är: P1 26 m, P2 19 m, P3 28 m och P4 20 m.

Dessutom gjordes ytterligare två mätningar på en påle P16, slagen 1984-04-25 i stöd 4. Längden i jord var 13,5 m.

Jordlagerföljd

I stöd 1 utgörs jordlagerföljden överst av 3 meter lös lerig silt, varunder följer sand ned till 35 meters djup. Lagren under 15 meters djup är medelfast lagrade.

I stöd 6 överlagrar 7 meter siltig sand ett sandlager på minst 13 meters tjocklek. Fastheten ökar svagt med djupet från löst till medelfast.

På platsen för stöd fyra består jorden av sand med silt som är lös medelfast lagrad, med mot djupet tilltagande fasthet.

Provbelastning

Samtliga pålar provbelastades dynamiskt ett dygn efter slagning, därefter provbelastades P16 efter 6 dygn, P1 och P2 efter 128 dygn och P3 och P4 efter 138 dygn. För påle P16 saknas CAPWAP-analys.

I stöd 1 har markytan mellan första och andra provbelastningen höjts med tre meter.

Utvärdering

Pålarna är att betrakta som helt eller i stort sett helt mantelburna. Ökningen av mantelbärförmågan har i de flesta fall varit avsevärd. Värdena på den totala bärförmågan framgår av **Fig. 6.31** och av **tabell 6.7**.

Tabell 6.7. Provbelastningsresultat från Mellsta.

Påle nummer	Tid efter slagning (dygn)	Bärförmåga, kN Total	Mantel	Spets	Längd i jord, m	Sjunkning mm/slag
P1	1	1275	1225	50	26	5/1
P1	128	2370	2370	0	26	-
P2	1	750	700	50	19	3/1
P2	128	1605	1605	0	19	-
P3	1	1800	1700	100	28	3/1
P3	138	2550	2490	60	28	-
P4	1	1000	850	150	20	0/1
P4	138	2180	2180	0	20	-
P16	1	1060	960	100	13,5	-
P16	6	1275	1145	130	13,5	-

Hejarsonderingen genomfördes som typ HfB (ingen vridning av stängen) och har därför inte medtagits i jämförelsen.

Såsom det framgår av **Fig. 6.32** och **6.33**, har ökningarna av den specifika bärförmågan i flera fall varit avsevärd, i vissa fall flera hundra procent.

En studie av bärförmågans fördelning utefter pålen visar att det mesta av lasterna vid första provningstillfället bars av pålens nedre fjärde- till tredjedel. Vid den andra provbelastningen har den lastbärande delen av pålen förskjutits uppåt för att nu utgöra hela nedre hälften av pålen och då framförallt den övre biten av denna del. Speciellt framträdande är detta hos P3 och P4 där bärförmågan i de undre delarna t.o.m. har avtagit. Minskningen av bärförmågan längs undre delen av manteln kan bero på ofullständig mobilisering. Sättningsvärden som kunnat ge en uppfattning om mobiliseringsgraden saknas dock från andra mättillfället.

Uppfyllnaden i stöd 1 har troligen endast i mindre utsträckning påverkat ökningen av bärförmågan hos påle P3 och P4. Eftersom bärförmågan i den översta delen av pålarna vid första provtillfället var mycket låg eller obefintlig så har dock en relativt sett stor bärförmågetillväxt skett här.

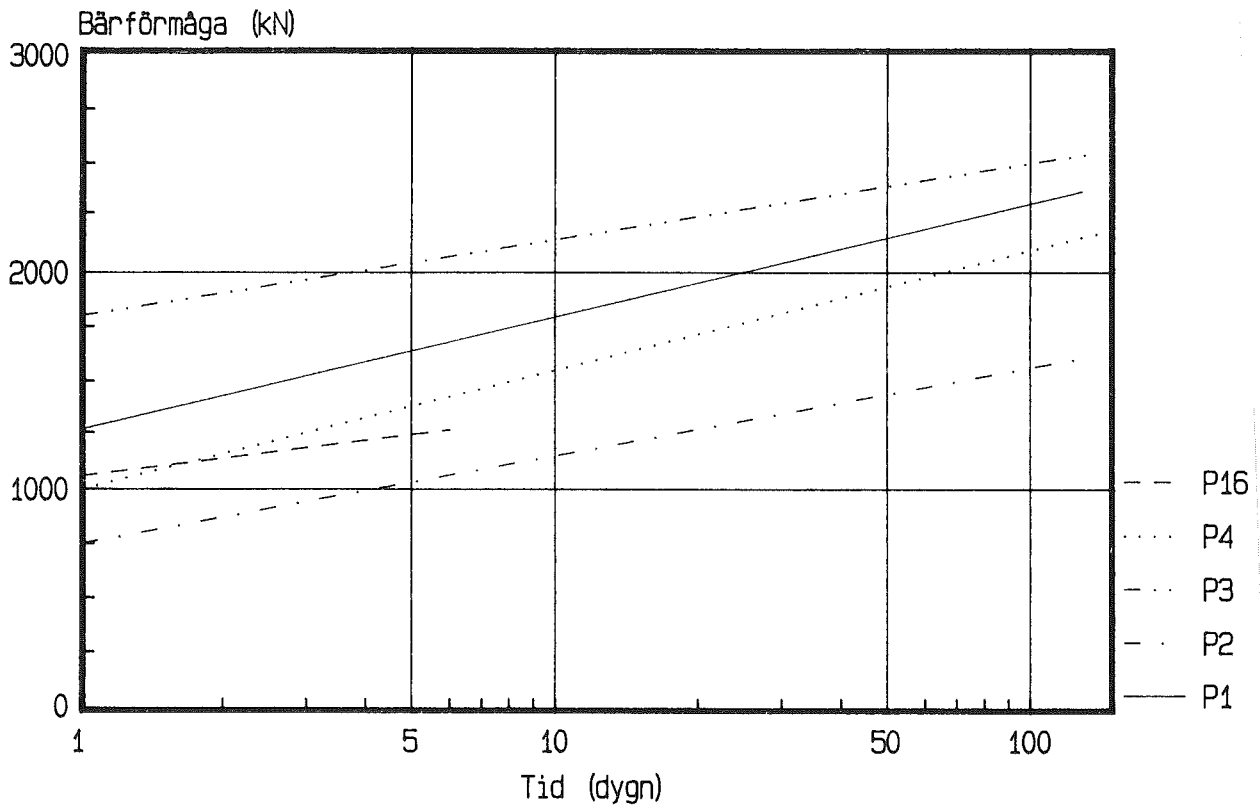


Fig. 6.31. Bärförmågans tillväxt med tiden för provpålar. (Mellsta)

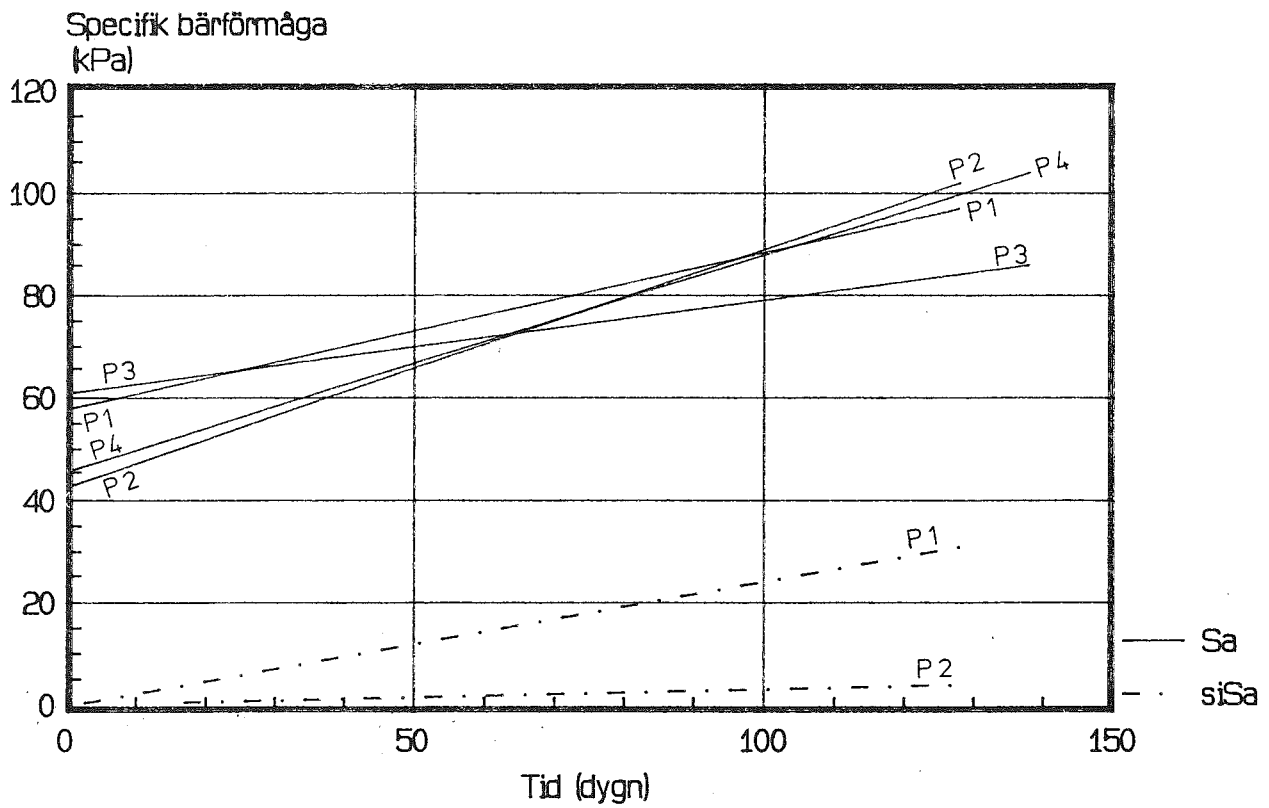


Fig. 6.32. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till jordart. (Mellsta)

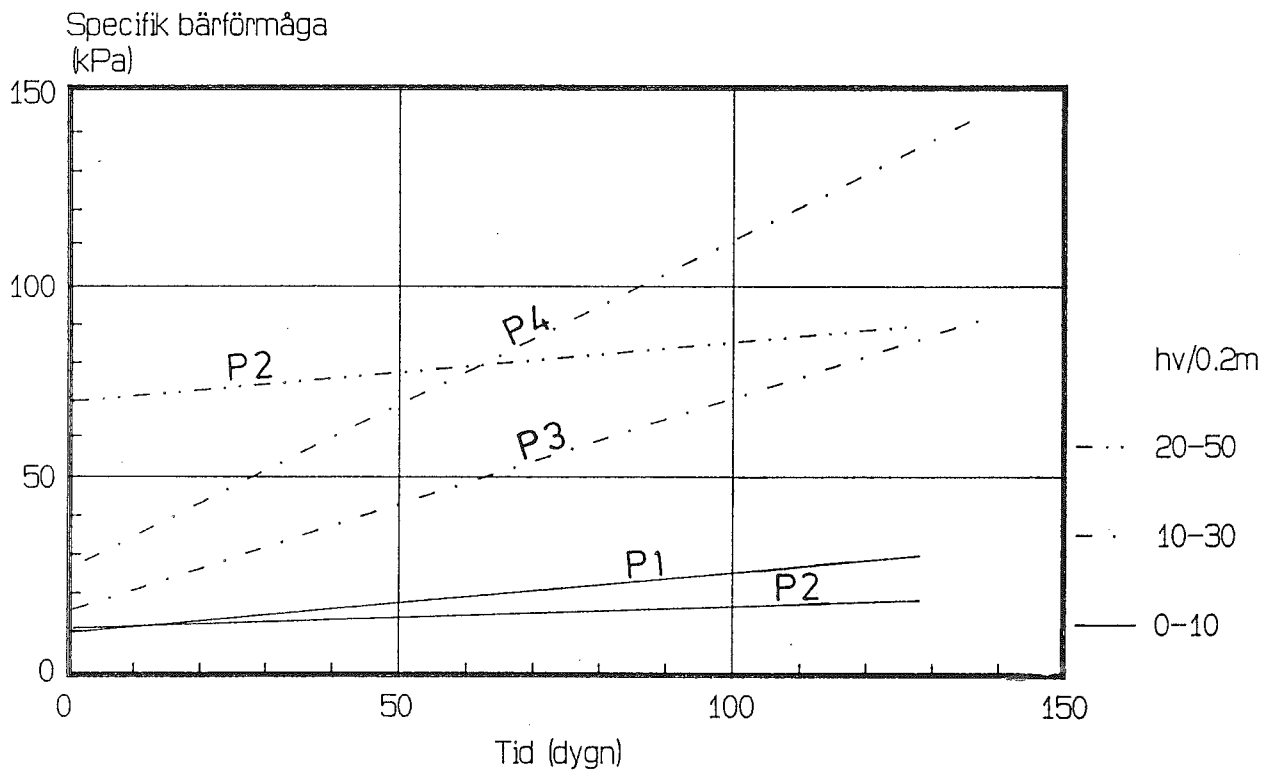


Fig. 6.33. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Mellsta)

6.9 Orsa, Bro över Ore älv för väg 100, Sandhed - Orsa

Inledning

Såsom framgår nedan visade analysen av provpålningen att tillväxten av den specifika bärförmågan var koncentrerad till ett väl avgränsat djupintervall för bägge pålarna kom platsen att bli föremål för kompletterande undersökningar. För dessa hänvisas till kapitel 2.3.3 för kornanalys, kapitel 4.3 för mätning på hejarsondstänger och kapitel 3.5 för dilatometerförsök. Nedan redovisas endast provpålningen inför produktionspålningen.

Provpålning

De studerade provpålarna är P1 och P8. Pålarna är belägna i skyddspålningen för stöd 4, södra landfästet. De är av typen B600 (betong 270 x 270 mm). Enligt uppgift slogs pålarna i lutningen 10:1 och längden i jord är 24,6 meter för P1 och 28 meter för P8. Pålningarbetet utfördes under tiden 1984-06-26--1984-06-27.

Jordlagerföljd

Pålarna är slagna ute på en fyllning i älven. De översta två metrarna utgörs därför av fyllning som överlagrar välsorterad fin- och/eller mellansand ned till 20 meters djup. Härunder blir jorden siltigare (sandig silt) och längre ner under pålstoppsnivån följer lager med finsilt.

Provbelastning

Dynamisk provbelastning av pålarna skedde första gången ett respektive två dygn efter slagning och sedan 64 dygn efter slagning.

Utvärdering

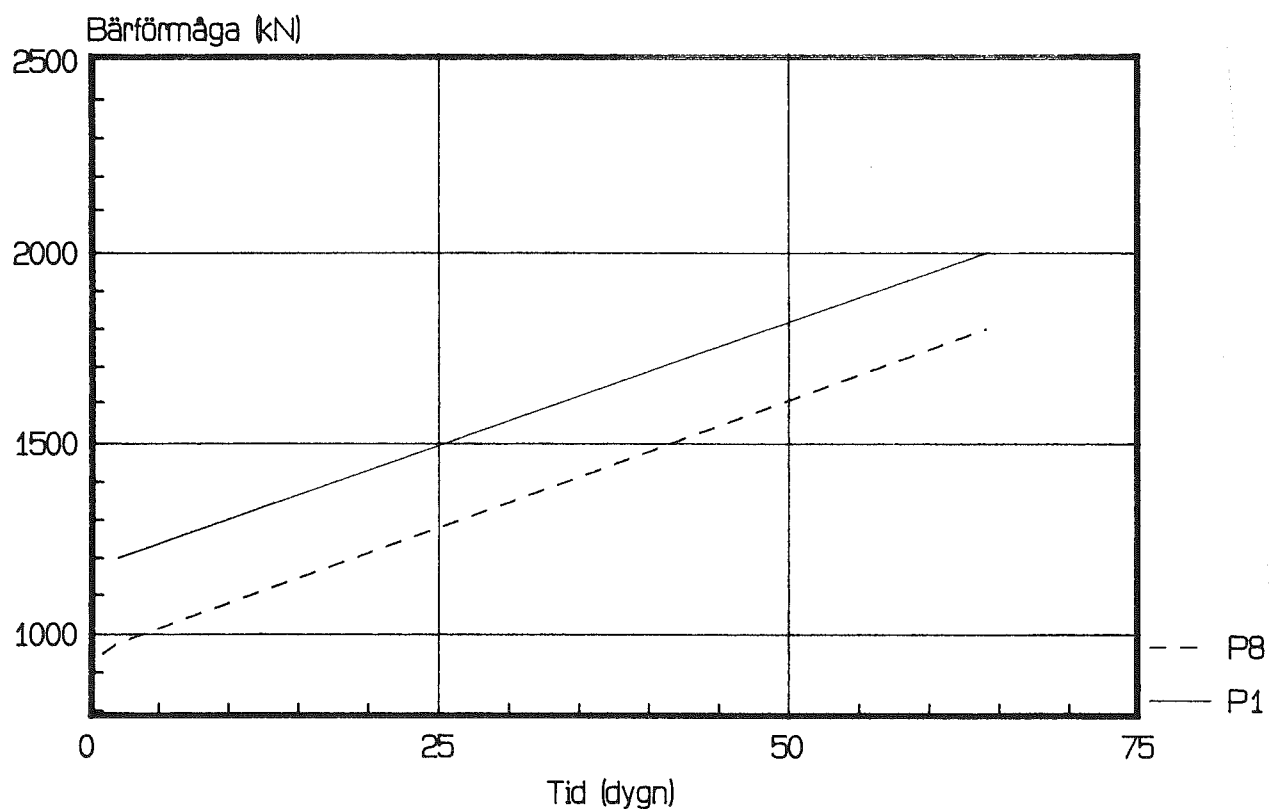
Pålarna är att betrakta som i stort sett helt mantelburna. Spetsbärigheten var vid först mättillfället endast 10 kN för vardera pålen och vid det andra tillfället 100 kN för P1 och 150 kN för P8.

Ökningen av den totala bärförmågan visas i **Fig. 6.34**. För påle P1 har den ökat från 1200 till 2000 kN under perioden 1 - 64 dygn efter slagning, medan motsvarande ökning för P8 varit från 950 till 1800 kN. Sättningsarna vid mätslagen var för P1 7 respektive 2 mm, och för P8 11 respektive 2 mm.

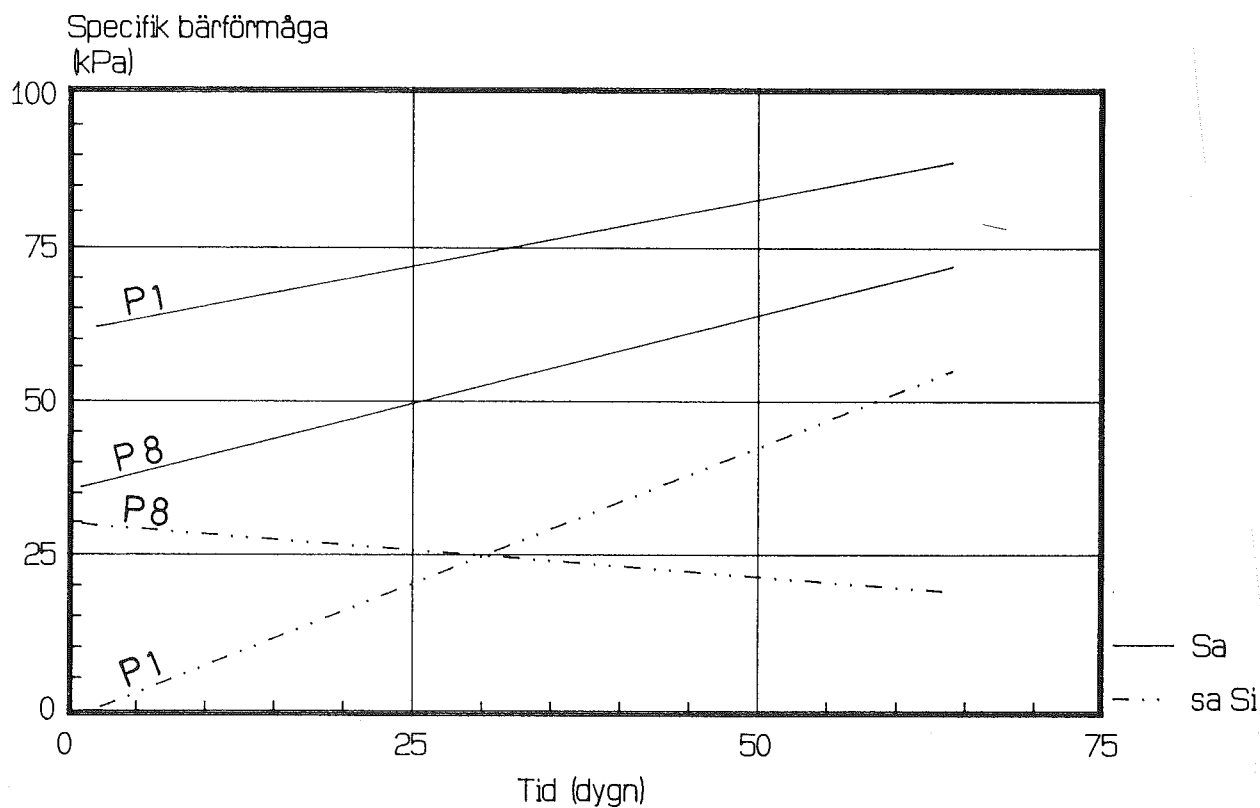
Inför utvärderingen bör det noteras att jordlagergränserna i stort överensstämmer med de gränser vilka satts vid jordens indelning i varierande fasthet. Sandlagret är mycket löst till löst lagrat och det underliggande sandiga siltlagret medelfast till fast lagrat.

Vidare bör det observeras att den sandiga silten i påle P1:s fall endast representeras av ett enda 1,5 meters-element från CAPWAP analysen. I stort sett samma sak gäller för viktsonderingsintervall ">30". Den kraftiga ökningen av bärförmågan i dessa två fall är därför osäker.

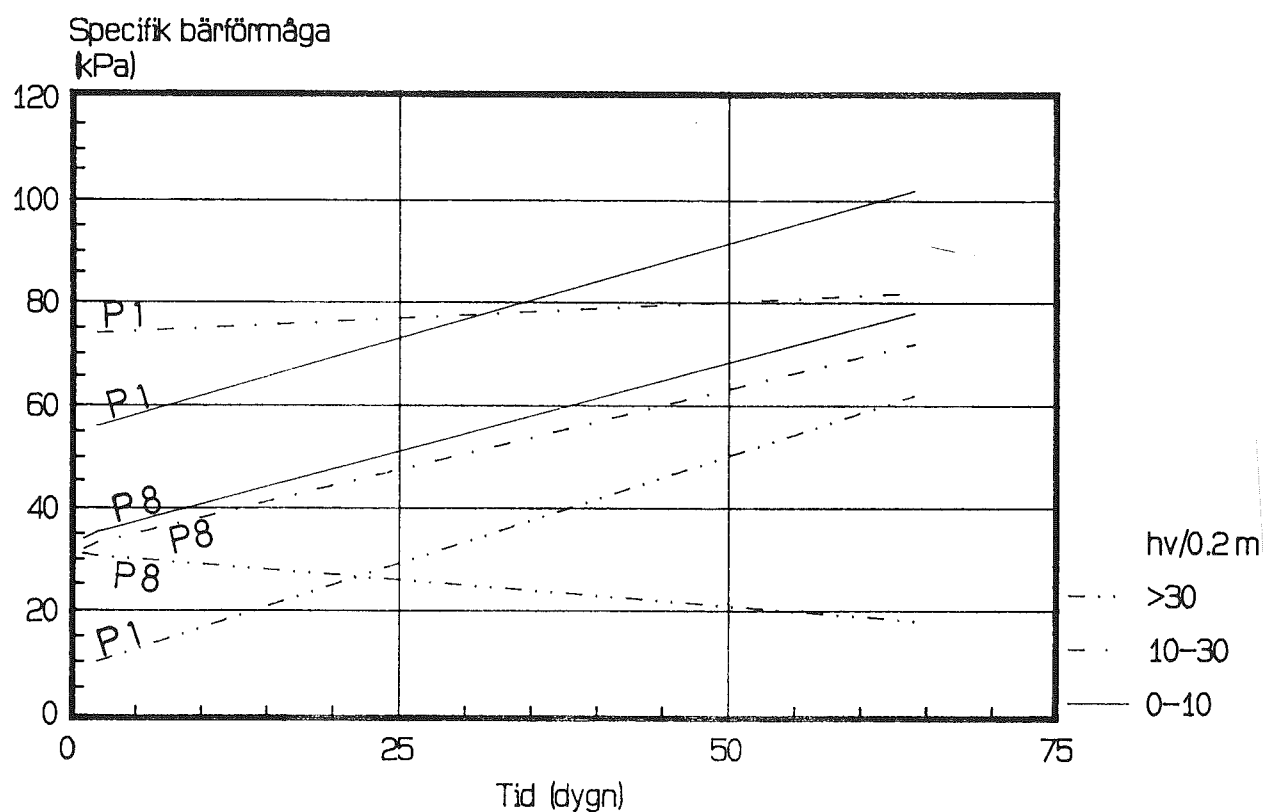
Efter att ha tagit hänsyn till de nu redovisade omständigheterna framgår av **Fig. 6.35 - 6.37** att den specifika bärförmågens ökning nästan helt har skett i sandlagret. En studie av bärförmågens fördelning utefter pålen visar att den största tillväxten har skett på djupet 8-16 m under markytan.



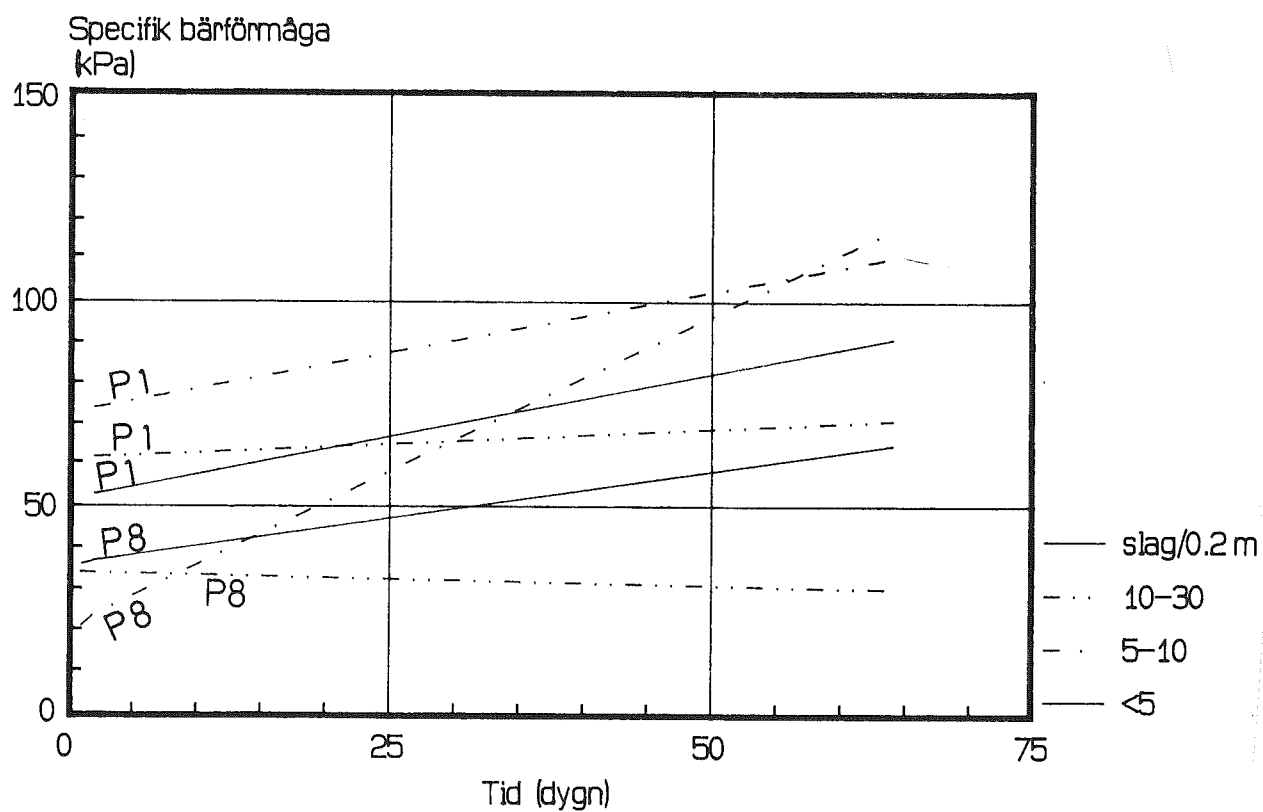
Figur 6.34. Bärformågan tillväxt med tiden för provpålar. (Orsa)



Figur 6.35. Specifika bärformågan tillväxt med tiden i relation till jordart. (Orsa)



Figur 6.36. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Orsa)



Figur 6.37. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat. (Orsa)

6.10 Värnamo, Bro över Lagan å väg 27

Provpålning

Provpålningen utfördes i oktober 1984 vid stöd 1 och omfattade fyra stycken provpålar och sex stycken mothållspålar. Den använda påltypen var A900, betong 275 x 275 mm. Pålarnas längd i jord framgår av **tabell 6.8**.

Jordlagerföljd

Jorden består till stort djup av sediment. De översta 25 metrarna utgörs av silt med tunna torvskikt och enstaka växtdelar. Därunder finns gyttjig silt och varvig lera ned till åtminstone 45 meters djup under markytan. Hejarsondstopp erhöles först vid 60 meters djup under markytan.

Provbelastning

Dynamisk provbelastning av prov- och mothållspålar skedde dels ett dygn efter slagning, dels drygt tre månader senare. CAPWAP-analys företogs endast på provpålarna. Mot-hållspålarna analyserades med CASE- metoden (kalibrerat J-värde från provpålarna användes). Omedelbart innan den sista stötvågsmätningen hade provpålarna P3 och P4 utsatts för en statisk provbelastning, vilken kan påverka resultatet av den dynamiska mätningen. Inverkan på den dynamiska provbelastningen av den statiska bedöms som liten bl.a. på grund av att den ej statiskt belastade pålen P2 visade samma tillväxt, enligt dynamisk provbelastning, som påle P1.

Utvärdering

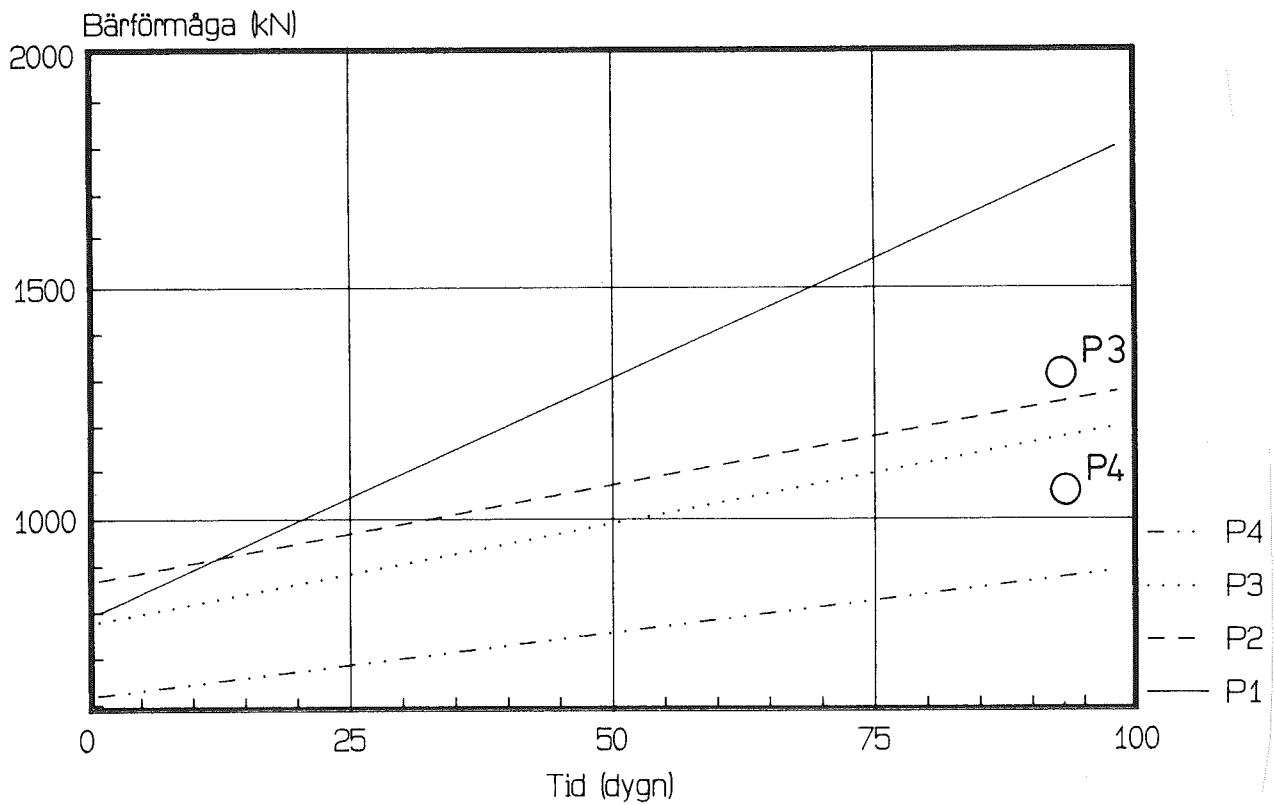
Samtliga pålar visar på en ökande bärförmåga med tiden enligt **tabell 6.8** och **Fig. 6.38** samt **6.39**. Den statiska provbelastningen av påle P3 och P4 gav högre bärförmåga än efterföljande dynamiska provbelastning. Eventuellt kan pålarna vara ofullständigt mobiliserade vid den dynamiska provbelastningen. Detta gäller främst påle P3 som endast hade 1 mm sjunkning vid mätslaget vid sista provbelastningen.

Pålarna M1-M6 hade vid den nyss nämnda statiska provbelastningen använts som mothållspålar och därför dragits upp 5-15 mm. Detta innebär att de borde ha uppvisat en ännu högre bärförmåga än vad de nu gjorde vid den dynamiska mätningen. Geostatiska beräkningar visar dock att denna skillnad bör ligga mellan 50-150 kN och detta antagande verifieras av jämförelser med värdet från påle P3. Värt att notera är den goda samstämmighet i uppmätt bärförmåga som de sex mothållspålarna visar.

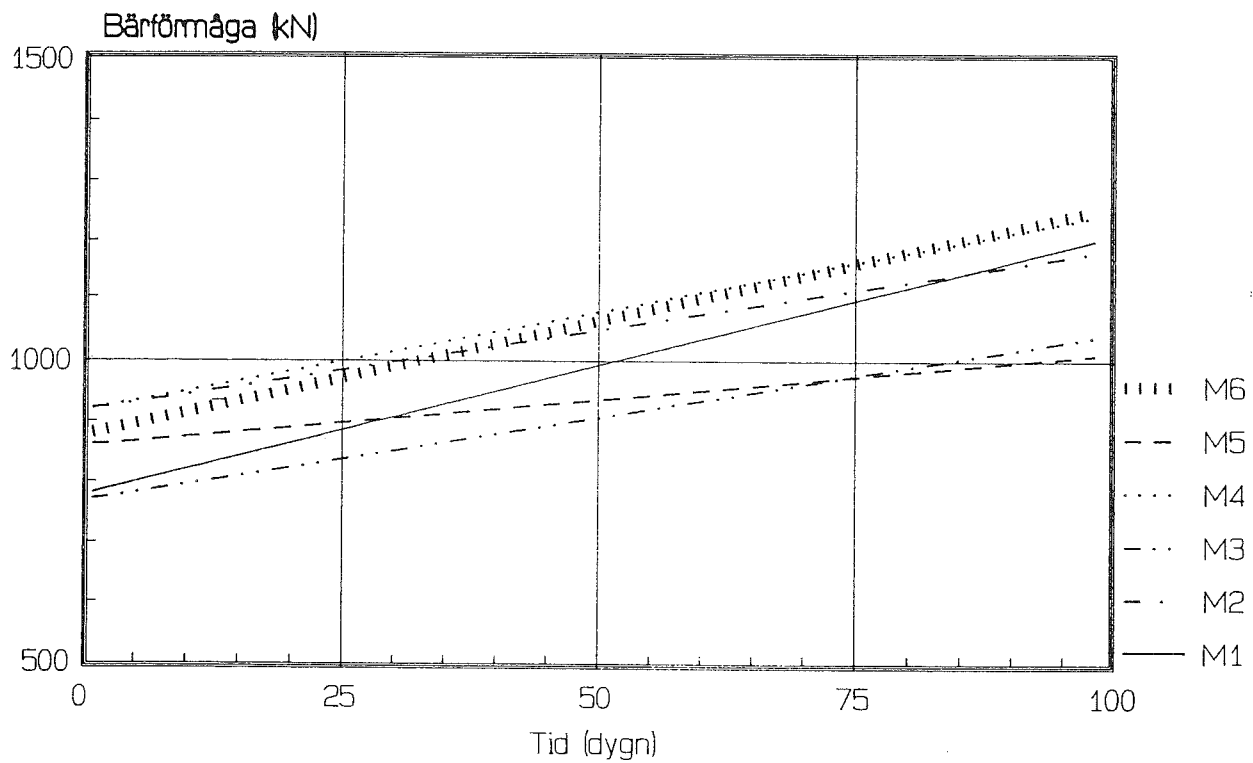
Vid en studie av bärförmågans fördelning längs med pålarna antyds det emellertid att den specifika bärförmågan, för samtliga pålar har ökat i en något högre grad i den nedre respektive övre delen av hejarsondsintervallen 5-10 och 10-30 slag/0,2 m. Detta motsvarar viktsonderingsintervallet 10-30 hv/0,2 m, se **Fig. 6.40 - 6.42**.

Tabell 6.8. provbelastningsresultat från Värnamo.

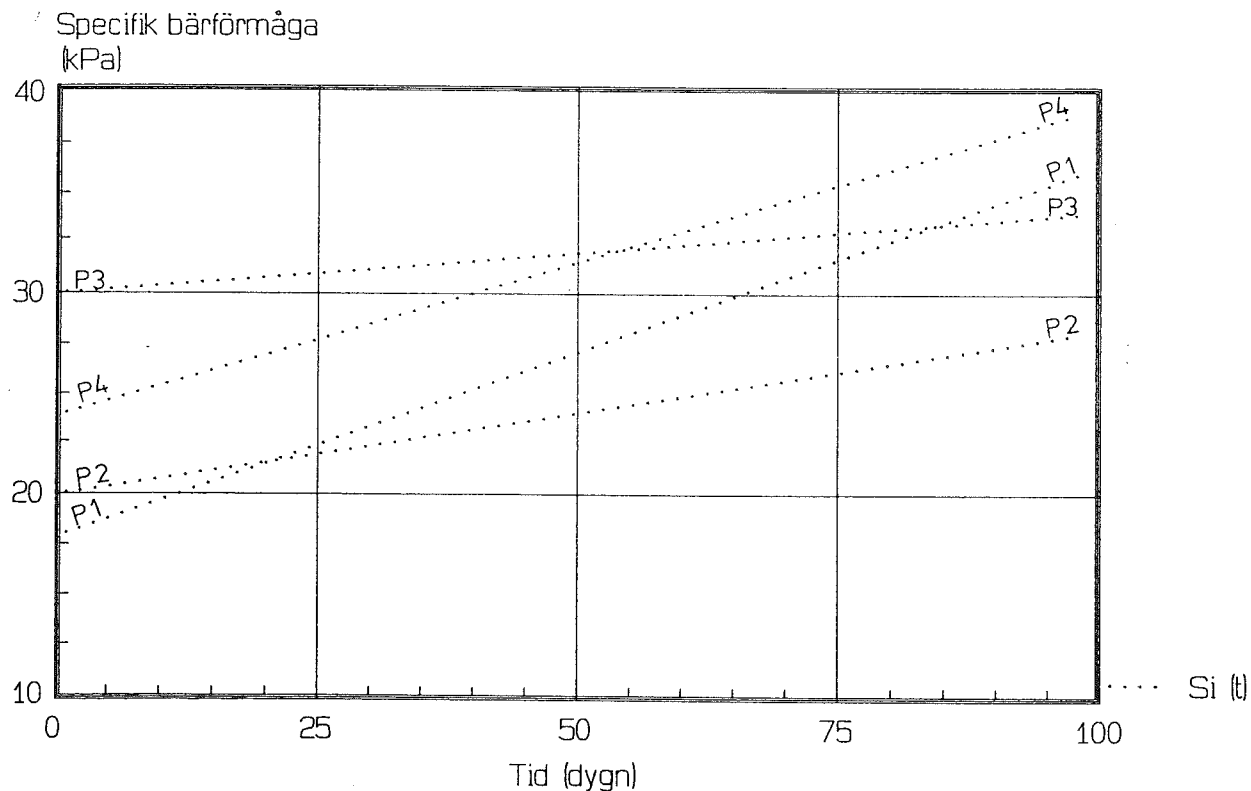
	Tid efter drivning (dygn)	Bärförmåga, kN Statisk provbelastning	Dynamisk provbelastning	Längd i jord (m)	Fallhöjd (m)	Sjunkning mm/antal slag
PÅLE P1	1 100		800 1800	35,4 ,,	0,8 1,5	3/1 5/1
PÅLE P2	1 100		870 1275	29,4 ,,	0,8 1,5	3/1 5/1
PÅLE P3	1 98 99	1500	780 1200	30,1 "	0,8 1,5	3/1 1/1
PÅLE P4	1 97 99	1050	620 890	23,9 "	0,8 1,5	4/1 5/1
PÅLE M1	1 100		780 1200	29,4 ,,	0,6 1,5	3/1 10/1
PÅLE M2	1 100		920 1180	29,4 ,,	0,6 1,5	1/1 10/1
PÅLE M3	1 100		770 1040	29,4 ,,	0,8 1,5	4/1 15/1
PÅLE M4	1 100		920 1240	29,4 ,,	0,8 1,5	4/1 10/1
PÅLE M5	1 99		860 1010	29,4 ,,	0,8 1,5	3/1 5/1
PÅLE M6	1 99		880 1250	29,4 ,,	0,8 1,5	2/1 6/1



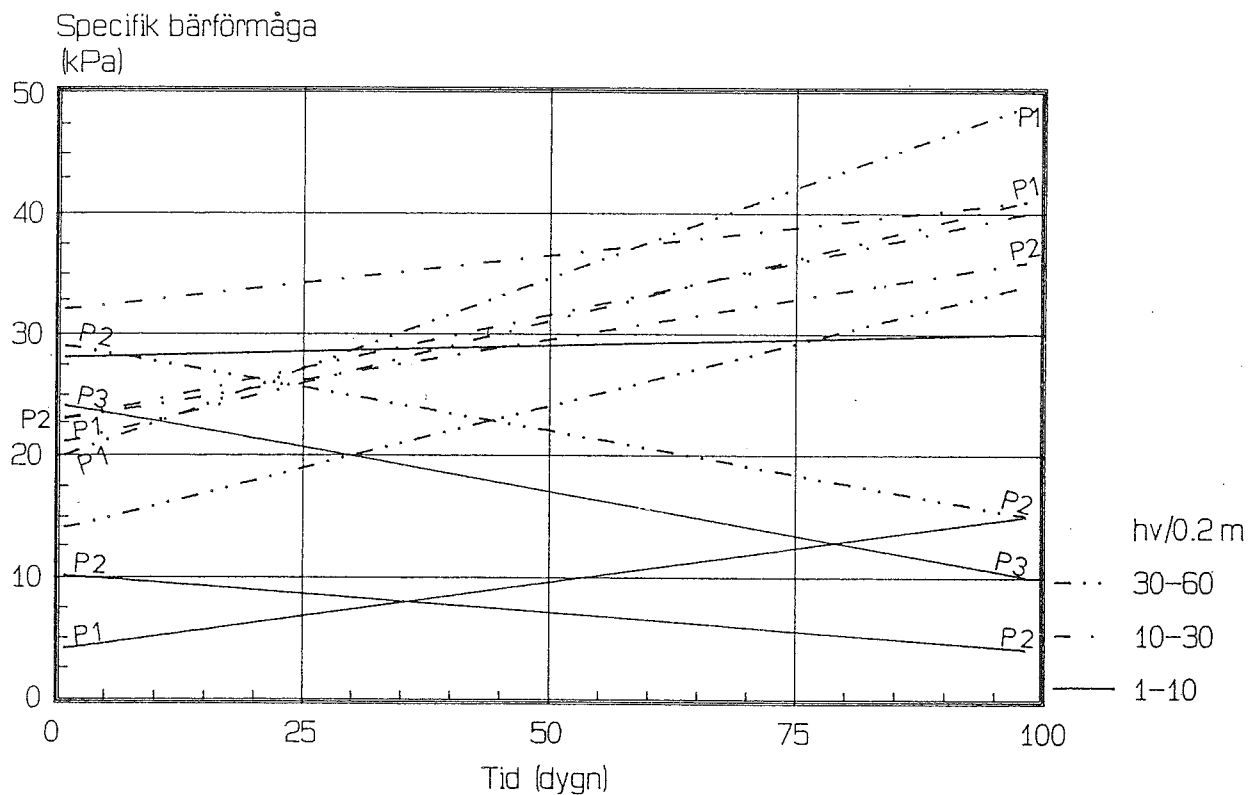
Figur 6.38. Bärformågens tillväxt med tiden för provpålar. "o" markerar statisk provbelastning. (Värnamo)



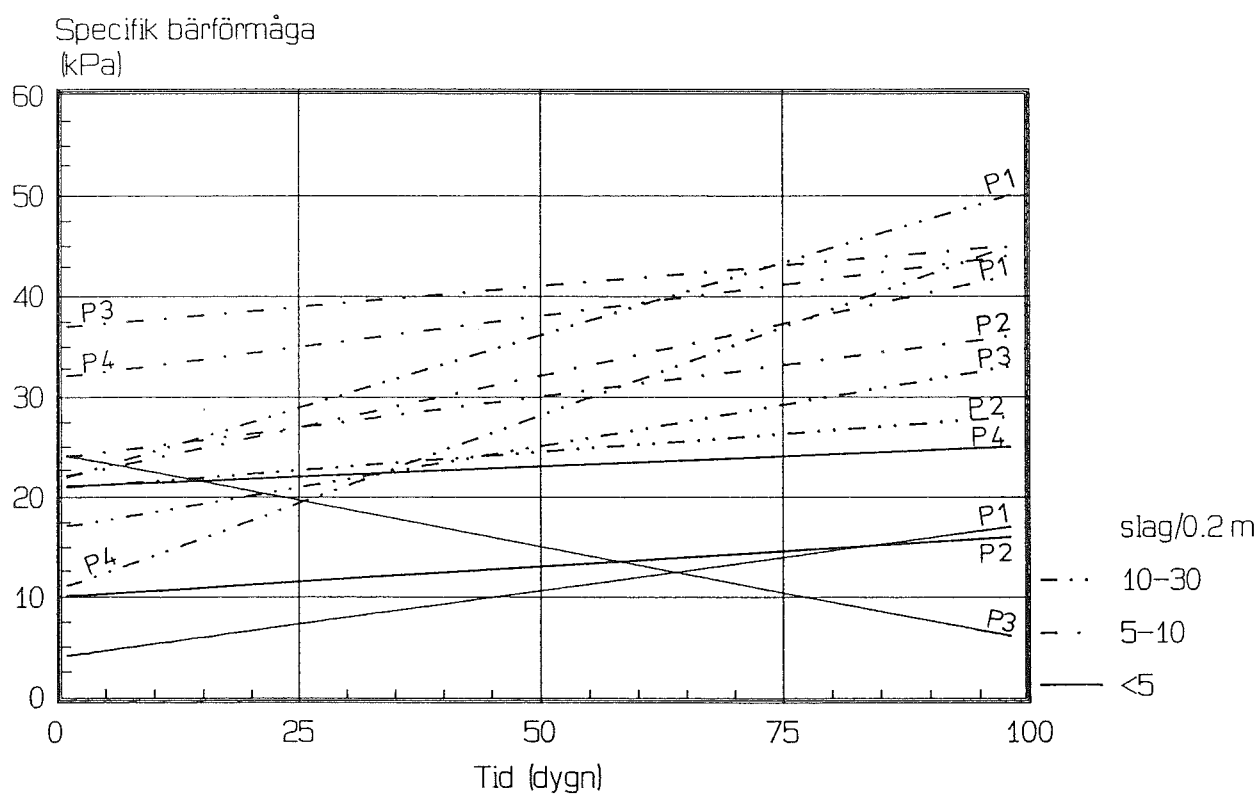
Figur 6.39. Bärformågens tillväxt med tiden för mothållspålar. (Värnamo)



Figur 6.40. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till jordart. (Värnamo)



Figur 6.41. Specifika bärförmågens tillväxt med tiden i relation till viktsonderingsresultat. (Värnamo)



Figur 6.42. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till hejarsonderingsresultat.
(Värnamo)

6.11 Västermalmskolan, Sundsvalls kommun

Provpålning

I samband med utbyggnaden av Västermalmskolan etapp 5, Sundsvalls kommun slogs sommaren 1985 två provpålar (P1 och P2) med vidhängande sex stycken mothållspålar (P3 - P8). Pålarna P3, P7 och P8 provbelastades dock bara en gång, varför de inte kommer att beröras i denna sammanställning. Inom ramen för detta projekt slogs för rent forskningsändamål ytterligare en provpåle (P11) med kompletterande två mothållspålar (P9 och P10). Denna provpåle lämnades orörd till en tid av cirka fyra månader efter slagning då såväl den som övriga pålar provbelastades statiskt och/eller dynamiskt. Pålarna var av typ B450 (betong 235 x 235 mm). Längden i jord framgår av **tabell 6.9**.

Jordlagerföljd

Jorden inom området består överst av ett 0,1 - 0,2 m humushaltigt ytskikt på ett 1,0 - 2,0 meter tjockt lager av fyllning, silt och siltig lera av torrskorpekaraktär. Under dessa lager består jorden av lös lera ner till 5 meters djup under markytan. Leran underlagras i sin tur av sandig silt som redan efter ca två meter övergår i siltig sand växellagrad med sand. Tjockleken på det understa lagret är åtminstone 29 meter.

Den lösa leran har en lägsta odränerad skjuvhållfasthet av 20-25 kPa. Enligt utförda ödometerförsök är leran normalkonsoliderad. Silten under leran är fast och mot djupet mycket fast lagrad.

Markytan ligger på en höjd av + 5 meter över havet.

Provbelastning

Pålarna provbelastades enligt nedanvarande sammanställning. CAPWAP- analys föreligger emellertid endast vid mer än ett tillfälle (tre tillfällen) för pålarna P1 och P2. En fullständig analys av bärförmågens tillväxt har därför endast kunnats göras för dessa två pålar.

- ❑ Slagning av pålarna: 1985-07-09 -- 1985-07-10
- ❑ Dynamisk provbelastning (P1-P4,P6,P9-P11): 1985-07-11
- ❑ Statisk provbelastning (P1 och P2): 1985-07-31 -- 1985-08-01
- ❑ Dynamisk provbelastning (P1,P2,P4,P5): 1985-08-08
- ❑ Statisk provbelastning (P1,P2,P11): 1985-11-06 -- 1985-11-11
- ❑ Dynamisk provbelastning (alla utom P3): 1985-11-13

Till den sista dynamiska provbelastningen 1985-11-13 måste följande kommentar göras; Liksom tidigare var det tänkt att genomföra mätningen med en 4-tons hydraulhejare. Men då denna med undantag för P1 och P11 gav ingen eller ytterst ringa sjunkning per slag tvingades man att byta till en linhejare. Värdena på bärförmågorna för P2, P4-P6 samt P9-P10 härför sig således från försöken med linhejare. Påle P5 sönderslogs vid mätningen, efter två slag och ingen registrerad sjunkning.

Tabell 6.9. Provb belastningsresultat från Västermalmsskolan.

	Tid efter drivning (dygn)	Bärförmåga, kN Statisk provbelastning	Dynamisk provbelastning	Längd i jord (m)	Fallhöjd (m)	Sjunkning mm/antal slag
PÅLE P1	2		900	15,1	0,6	-
	22	670		”		
	29		1035	”	0,6	3/1
	122	910		”		
	126		1200	”	0,6	3/1
PÅLE P2	1		1700	19,1	0,6	-
	22	1070		”		
	28		1740	”	0,8	1/1
	122	1350		”		
	125		1750	”	2,0	2/1
PÅLE P11	1		966 *	19,0	-	-
	122	1150		”	-	-
	125		1300	”	0,8	2/1

* CASE-analys

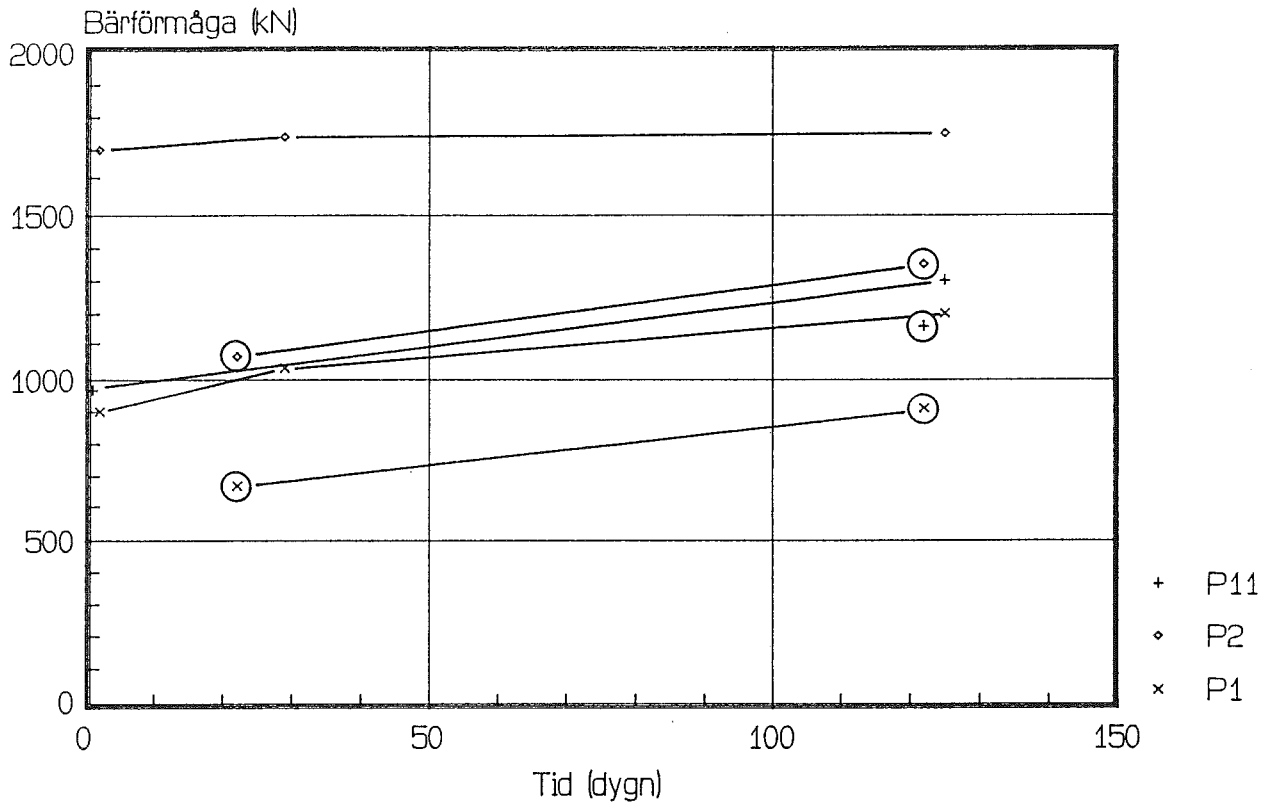
Utvärdering

Den dynamiska provbelastningen visade för P1 på en ökning från 900 till 1200 kN, för P2 från 1700 till 1750 kN, och för P11 från 966 till 1300 kN under en tidsperiod av 2 till 125 dygn efter slagning. De statiska provbelastningarna gav däremot i samtliga fall lägre värden, 670 till 910 kN för P1 respektive 1070 till 1350 kN för P2, under ett intervall mellan 22 och 122 dygn efter slagning och för P11 erhöles 122 dygn efter slagning en bärförmåga på 1150 kN. Skillnaderna i bärförmåga enligt statisk respektive dynamisk provbelastning är i detta fall större än vad som normalt är fallet. Detta beror sannolikt på att de mycket kraftiga hejarslagen vid den dynamiska provbelastningen medfört att man kommit utanför erfarenhetsområdet för dynamisk provbelastning. i **Fig. 6.43** visas bärförmågan som funktion av tiden efter slagning.

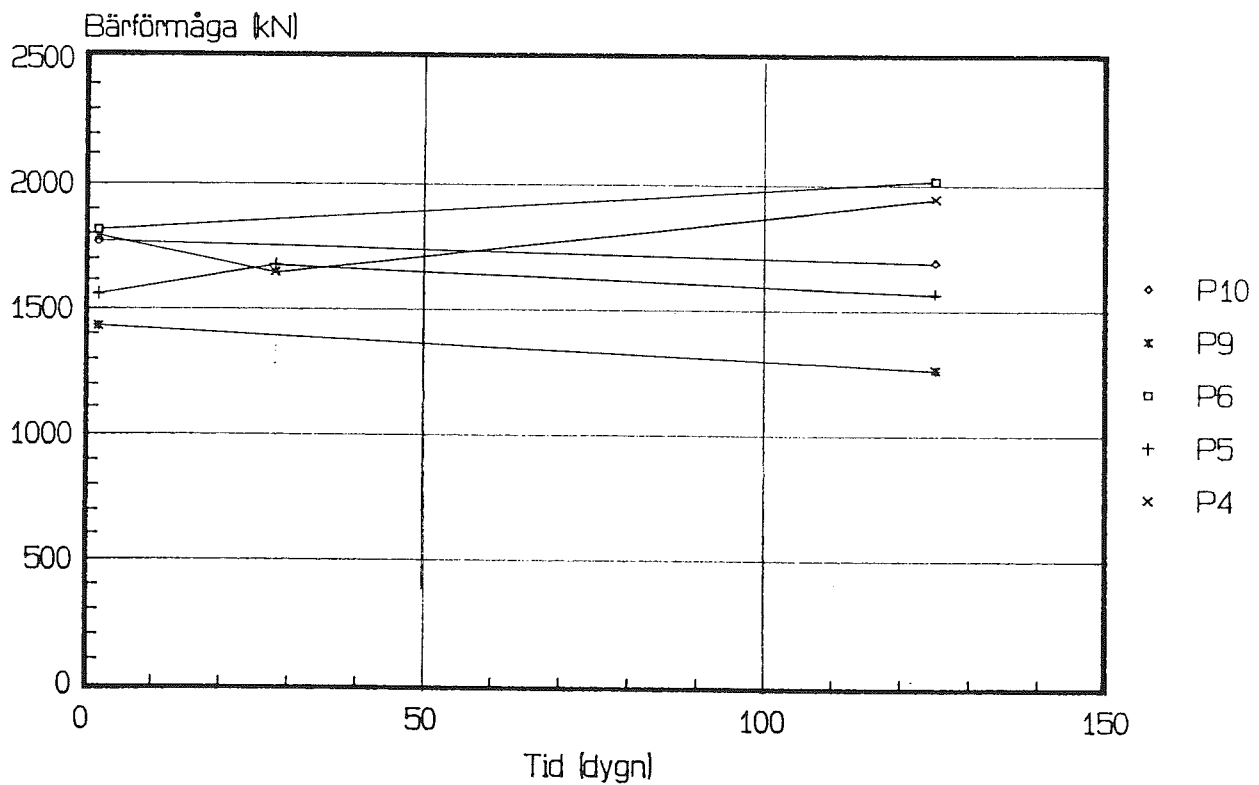
Förändringarna i mothållspålarnas bärförmågor framgår av **Fig. 6.44**. Att bärförmågan har sjunkit för en del av mothållspålarna bör åtminstone till en del kunna förklaras med att de har utsatts för dragkrafter i samband med statisk provbelastning. För påle P5 gäller speciellt att eftersom den slogs sönder innan sjunkning hade registrerats hade den förmodligen inte hunnit mobilisera sin fulla bärförmåga.

Den utförda viktsonderingen gick endast genom leran och avslutades redan 1-2 meter nere i silten. Av denna anledning har endast en jämförelse tillväxt contra jordart kunnats göras, se **Fig. 6.45**.

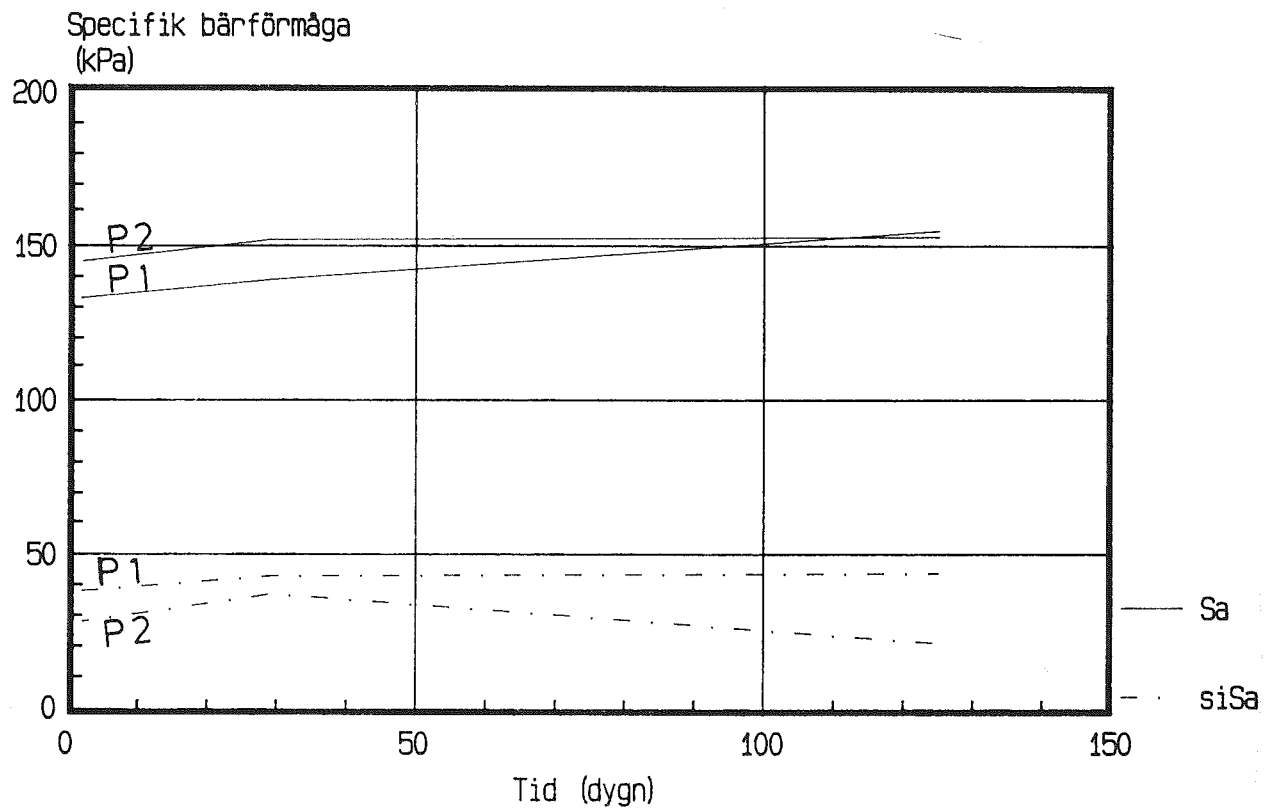
Av resultaten framgår att P2 uppvisar högre bärförmåga än P11 trots att de är lika långa och att P2 har utsatts för vardera ett statiskt och ett dynamiskt försök mer än P11 mellan första och sista mättillfällena.



Figur 6.43. Bärförmågans tillväxt med tiden för provpålar. "o" runt tecken innebär värde erhållet från statisk provbelastning. (Västermalmskolan)



Figur 6.44. Bärförmågans förändring med tiden för mothållspålar. (Västermalmskolan)



Figur 6.45. Specifika bärförmågans tillväxt med tiden i relation till jordart. (Västermalmskolan)

7. Referenser

Anvisningar för provpålning med efterföljande provbelastning (1980).

IVA Pålkommissionen, Rapport 59.

Authier, J & Samson, L (1985). Change in pile bearing capacity with time: case history. 38th Canadian Geotechnical Conference. Edmonton, pp 21-27.

Authier, J & Samson, L (1986). Change in pile bearing capacity with time: case history. Canadian Geotechnical Journal vol. 23, no. 2.

Bely, LD, Doudler, IV, Mosiakov, EF, Potapov, AD & Julin, AN (1975). Research methods and evaluation of various genesis sand grain morphology role in formation of their geological-engineering properties. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, nr 11, pp. 27-31.

Bengtsson, P-E, Jansson, B, Hellman, L & Holm, G (1988). Provbeltastning av grova stålrovspålar, Södertälje, Sverige. Nordiska geoteknikermötet, Oslo, sid 315-319.

Daramola, O (1980). Effect of consolidation age on stiffness of sand. Géotechnique, vol. 30, nr 2, pp. 213-216.

Denisov, NY, Durante, VA & Khazanov, MI (1963). Studies of changes of strenght and compressibility of hydraulically filled sands in time. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Problems of Settlements and Compressibility of Soils, Wiesbaden. Proceedings, vol. 1, pp. 221-225. Essen.

Denisov, NY & Reltov, BF (1961). Influence of certain processes on the strength of soils. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris. Proceedings, vol. 1, pp. 75-78. Paris.

Dusseault, MB & Morgenstern, NR (1979). Locked sands. Quarterly Journal of Engineering Geology, vol. 12, nr 2, pp. 117-131.

Eriksson, H (1992). Behaviour of driven piles evaluated from stress wave measurements performed during dynamic probing. Doctoral Thesis, KTH. Stockholm

Fellenius, BH, Riker, RE, O'Brien, AJ & Tracy, GR (1989). Dynamic and static testing in soil exhibiting set-up. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, nr 7, pp. 984-1001.

Holm, G, Bjerin, L & Jansson, M (1984). Tillväxt av bärformåga hos friktionspålar. Nordiska Geoteknikermötet, Linköping, sid 755-762.

- Hussein, J. Al-Sayegh (1989).** Importance and consideration of dynamic restrike tests on driven piles in calcareous silty sand. Foundations & Tunnels -89. Proc. Sec.Int. Conf. on Foundations and Tunnels, vol 1, London.
- Jendeby, L (1990).** Djuppackning av sand, momentana och tidsberoende förändringar av geotekniska parametrar. Chalmers Tekniska Högskola, rapp. B 90:2.
- Lee, KL (1977).** Adhesion bonds in sands at high pressures. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 103, nr GT8, pp. 908-913.
- Meseck, OH & Holzmann, P (1989).** Production and testing of 600 reinforced-concrete piles for the Central Bank of Iraq. Proceedings of the international conference on piling and deep foundations, London 1989.
- Mitchell, JK (1986).** Practical problems from surprising soil behavior. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 112, nr 3, pp. 259- 289.
- Mitchell, JK & Solymar, ZV (1984).** Time-dependent strenght gain in freshly deposited or densified sand. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 110, nr 11, pp. 1559-1576.
- Miura, N & Yamanouchi, T (1978).** Adhesion bonds in sands at high pressures. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 104, nr GT12, pp. 1523-1525. (Discussion on: Lee,KL (1977). Adhesion bonds on sands at high pressures. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 103, nr GT8, pp. 908-913)
- Moe, D, Arvesen, H, & Holm, OS (1981).** Friction bearing pipepiles at Calabar Port, X ICSMFE, Stockholm, pp 781 - 786.
- Möller, B (1991).** Falskt pålstopp, En jämförelse mellan statisk och dynamisk bärförmåga hos pålar i siltig jord. SGI, Varia 342.
- Odemark, N (1949).** Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin. Statens Väginstitut, Meddelande 77. Stockholm, 104 p.
- Pettijohn, PS (1973).** Sand and sandstone. Springer-Verlag, Berlin
- Preim, MJ, March, R & Hussein, M (1989).** Bearing capacity of piles in soils with time dependent characteristics. Proceedings of the International Conference on Piling and Deep Foundation. London.
- Robinsky, EI & Morrison, CF (1964).** Sand displacement and compaction around model friction piles. Canadian Geotechnical Journal, vol. 1, nr 2, pp. 81-93.

- Schmertmann, JH (1989).** Mechanical aging of soils. 25th Terzaghi Lecture, New Orleans, 10th Oct. 1989. Preprint. To be published in ASCE, Journal of Geotechnical Engineering.
- Skov, R & Denver, H (1988).** *Time-dependence of bearing capacity of piles.* 3:th Int. Conf. Application of stress wave theory to piles. Ottawa, pp 879 - 888.
- Slunga, E (1982).** Bearing capacity of piles from dynamic measurement and static load test at Malmi, Helsinki. Väg- och Vattenbyggaren 7-8, sid 12-14.
- Tavenas, F (1970).** Discussion to "tests on instrumented piles, Ogeechee River site" by A.S. Vesic, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 1970, 96 (SM6)
- Viberg, L (1991).** Personlig kommunikation.