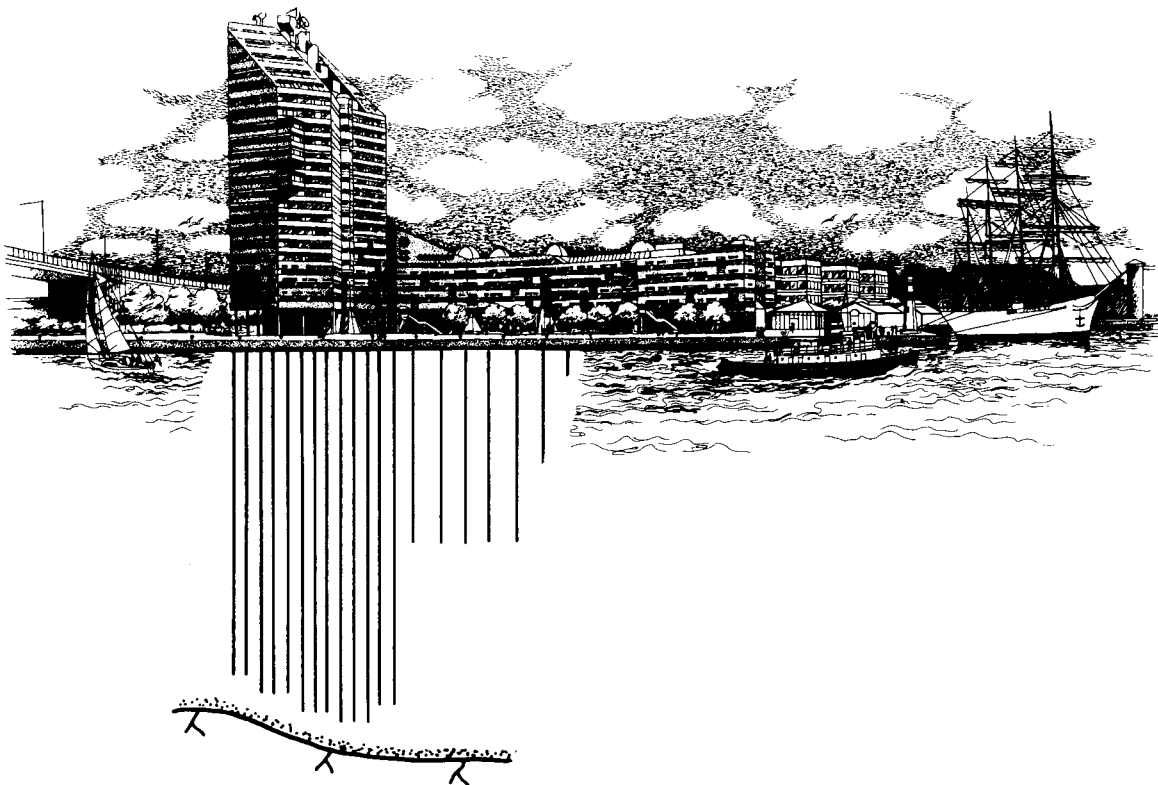


# Höghus Lilla Bommen, Göteborg

Uppföljning av kohesionsspålning i mäktiga lerlager.



**SBUF - Projekt 1034**

**Höghus Lilla Bommen, Göteborg**

**Uppföljning av kohesionsspålning i mäktiga lerlager.**

**Peter Claesson**

**Gunnar Holmberg**

**Jan Romell**

## FÖRORD

Mellan 1987 and 1989 uppförde Skanska höghuset Lilla Bommen i Göteborg. Denna 22-våningsbyggnad grundlades på kohesionspålar.

I samband med projekteringen av byggnaden initierade Stig Bernander, som vid den tiden var chef för Skanskas konstruktionsavdelning i Göteborg, ett forskningsprojekt. Syftet med projektet är att studera vilka krafter som påverkar grundkonstruktionen för en kohesionspålad byggnad, där en exceptionellt stor lastintensitet skall överföras till en undergrund med stor lermäktighet. Vidare studeras byggnadens samverkan med den närliggande omgivningen.

Författarna vill uttrycka sin tacksamhet till finansiärerna av detta projekt

- SBUF
- Pålkommisionen
- Skanska Fastigheter i Göteborg
- Skanska Grundläggning
- Skanska Teknik

Vi tackar också

-Stig Bernander, Con-Geo AB

-Hasse Gustås, Skanska Teknik

- Ingmar Svensk, tidigare Skanska Teknik

för värdefulla synpunkter under uppföljningen och under tiden för arbetet med rapporten.

Göteborg 2007-02-19

Peter Claesson, Gunnar Holmberg och Jan Romell

# Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning	5
<b>1. Inledning</b>	<b>6</b>
1.1 Bakgrund	6
1.2 Syfte	7
1.3 Genomförande	7
<b>2. Beskrivning</b>	<b>8</b>
2.1 Historik - områdesbeskrivning	8
2.2 Kontorsbyggnaden och dess grundläggning	10
2.3 Geologi	11
2.4 Geotekniska förhållanden	12
2.4.1 Inledning	12
2.4.2 Fyllning	12
2.4.3 Jordlagerföljd	12
2.4.4 Geohydrologiska förhållanden	13
2.4.5 Konsolideringsförhållanden	14
2.4.6 Lerlagrens krypegenskaper	15
<b>3. Instrumentering och mätpunkter</b>	<b>17</b>
3.1 Inledning	17
3.2 Avvägningsdubb på byggnaden och omgivande markytor	17
3.3 Instrumentering av betongpålar	18
3.3.1 Utförd instrumentering	18
3.3.2 Nya mätsystem	22
<b>4. Mätresultat</b>	<b>23</b>
4.1 Sättningar i kontorsbyggnaden	23
4.2 Sättningar på omgivande markytor	24
4.3 Påldeformationer och pålkrafter	25
<b>5. Utvärdering och analys</b>	<b>28</b>
5.1 Sättningar för byggnad och omgivande mark	28
5.2 Analys av sättningar i jordprofilen	30
5.3 Analys av neutrala punkten	30
5.4 Normalkrafter i pålarna	32
<b>6 Slutsatser</b>	<b>35</b>
<b>Referenser</b>	<b>36</b>
<b>Bilagor:</b>	
<b>Bilaga A</b> Redovisning av beräknade normalkrafter i provpålar	
<b>Bilaga B</b> Nya mätsystem	

## Sammanfattning

Kohesionspålar används ofta som grundförstärkningsmetod i Sverige då jordlagren består av mäktiga lager med lös lera. Längs västkusten kan mäktigheten av dessa lerlager överstiga 100 meter.

Byggnader som är grundlagda på kohesionspålar är sällan utförda med fler än sju våningar. Det är vanligt att byggnaderna också utförs med en källarvåning. Vid dimensionering av pålgrundläggningar användes ofta en totalsäkerhetsfaktor på 3 m a p jordens brottlast enligt då gällande normer.

Mellan åren 1987 and 1989 uppförde Skanska höghuset Lilla Bommen i Göteborg. Denna 22-vånings byggnad grundlades på kohesionspålar, som är upp till 85 m långa, och beräknad last uppgick till ca 200 kN/m<sup>2</sup>. Denna belastning är ca 5 gånger större än den belastning som normalt förs ner i pålarna från byggnader vid liknande geotekniska förhållanden. Då det pågick sättningar i lerprofilen inom det aktuella området var det nödvändigt att beakta negativ mantelfriktion på pålarna vid val av grundläggningsmetod. Dessa omständigheter var avgörande vid utformningen av pålgrundläggningen och vid valet mellan kohesionspålar eller spetsbärande pålar.

I samband med projekteringen av byggnaden initierade Stig Bernander, som vid den tiden var chef för Skanskas konstruktionsavdelning i Göteborg, ett forskningsprojekt. Syftet med projektet var att studera vilka krafter som påverkar grundkonstruktionen för en tung byggnad grundlagd på långa kohesionspålar i mäktiga lager av lös lera samt hur grundkonstruktionen samverkar med kringliggande jordlager och omgivning. Ett mätprogram upprättades och mätningar utfördes såväl under byggtiden som efter det att höghuset var färdigställt. Mätperioden omfattade åren 1988 till och med 2001.

I anslutning till höghuset uppfördes även en lägre byggnadsdel med upptill 6 våningar som är grundlagd på 44 m långa kohesionspålar. Även för denna byggnadsdel, i fortsättningen benämnd låghusdelen, har sättningsmätningar utförts under ovan angivna tidsperiod.

I denna rapport beskrivs de geotekniska förhållandena, byggnadens grundläggning och mätsystemen samt resultaten av utförda mätningar. Analyser har utförts av krafter i pålar samt utvärdering av utbildade sättningar för byggnaden och för anslutande markytor. Avsikten med studien är att få en större förståelse för funktionen hos denna unika grundkonstruktion och dess samverkan med undergrunden.

# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund

Grundläggning av byggnader och anläggningar på kohesionspålar är en konventionell och ofta använd grundläggningsmetod inom områden med mäktiga lager av lös lera. Erfarenheter från bland annat Göteborgsregionen avser vanligen byggnader med maximalt 6 á 7 våningar, många gånger med en källarvåning, där pállängder upp till ca 40 á 50 m används. Detta innebär att erfarenhet av grundläggning med kohesionspålar är relaterad till en viss storleksordning hos den effektiva belastningen som påförs undergrunden, d v s omkring 40-60 kN/m<sup>2</sup>. Grundläggning med kohesionspålar utfördes normalt enligt då gällande normer, d v s med 3-faldig säkerhet på jordens beräknade brottlast. Problematiken är dock mer nyanserad då hänsyn också skall tas till storleken på den effektiva belastningen, lerans hållfasthets- och deformationsegenskaper, pågående sättningar i lerlagren samt samverkan mellan grundkonstruktionen och omgivande jordlager.

Vid grundläggningen av höghuset Lilla Bommen, med 22 våningar, är den påförda lasten ca 200 kN/m<sup>2</sup> och därmed mångfaldigt större än de laster som är aktuella för de byggnader som normalt utförs med kohesionspålar. Grundläggningen av höghuset har utförts med en mycket styv bottenplatta och 65-85 meter långa kohesionspålar av betong. Höghuset är grundlagt i ett område som är en utfylld del av Göta Älv. Marksättningarna i detta område uppskattas till ca 5-10 mm per år. Den stora lasteffekten i kombination med mycket stor lermäktighet ca 90-100 meter samt de pågående marksättningarna i området, medförde att dimensioneringsförutsättningarna för grundkonstruktionen var komplicerade.

Till Lilla Bommen hör också en låghusdel med upp till 6 våningar och ett källarplan. Även denna huskropp är grundlagd på kohesionspålar. Pålarnas längd är 44 m.

För att mäta deformationerna i pålar instrumenterades åtta av pålarna i syfte att kunna studera deformationsutvecklingen med tiden i pålarna. Installerade mätpunkter avlästes från 1988, då uppförandet av höghuset påbörjades, och pågick under en period av nästan 14 år fram till och med år 2001. Dessutom har avvägningar av installerade avvägningsskruvar utförts under samma tidsperiod i både höghuset och i det angränsande låghuset.

Bakgrunden till detta uppföljningsprojekt var att någon liknade grundläggning inte tidigare hade utförts med motsvarande förhållanden. Att få möjlighet att följa upp deformationerna i pålarna och sättningarna för byggnaden var därför av stort intresse. Genom att utvärdera och analysera mätresultaten ger detta en ökad förståelse och kunskap om grundkonstruktionens funktion. Intressant är att utvärdera bl a storleken och fördelningen av krafter i pålarna och hur dessa varierar över tiden. Resultatet av detta arbete ger värdefull erfarenhet och kunskap som kan användas vid framtida projekteringar med liknande förutsättningar.

## 1.2 Syfte

Syftet med detta projekt var att studera den utförda grundkonstruktionens funktion och samverkan med undergrunden. Detta görs genom utvärdering och analys av sammanställda mätresultat m h t deformationer i pålarna och i undergrunden samt sättningar i byggnaden och omgivande markytor.

Intressanta frågeställningar är:

- Lasteffekt i pålarna och hur lasteffekten varierar med djupet och hur den förändras med tiden.
- Sättningsutvecklingen för höghuset med tiden.

## 1.3 Genomförande

I ett första steg sammanställs och värderas samtliga utförda mätningar. Mätningar har utförts enligt följande:

- deformationsmätningar i åtta pålar. Pålarna instrumenterades för mätningar på fyra nivåer på respektive påle. Några av mätpunkterna gick inte att mäta efter installationen.
- avvägning av höghusdelen i 11 punkter
- avvägning av låghusdelen i 15 punkter.

Okulärbesiktningar har utförts av kringliggande markytor för uppskattning av utbildade differenssättningar.

Detta material har kompletterats med uppgifter angående uppmätta sättningar från projekten Götatunneln (Vägverket, 2000) och Götaälvbron (Gatubolaget och VBB).

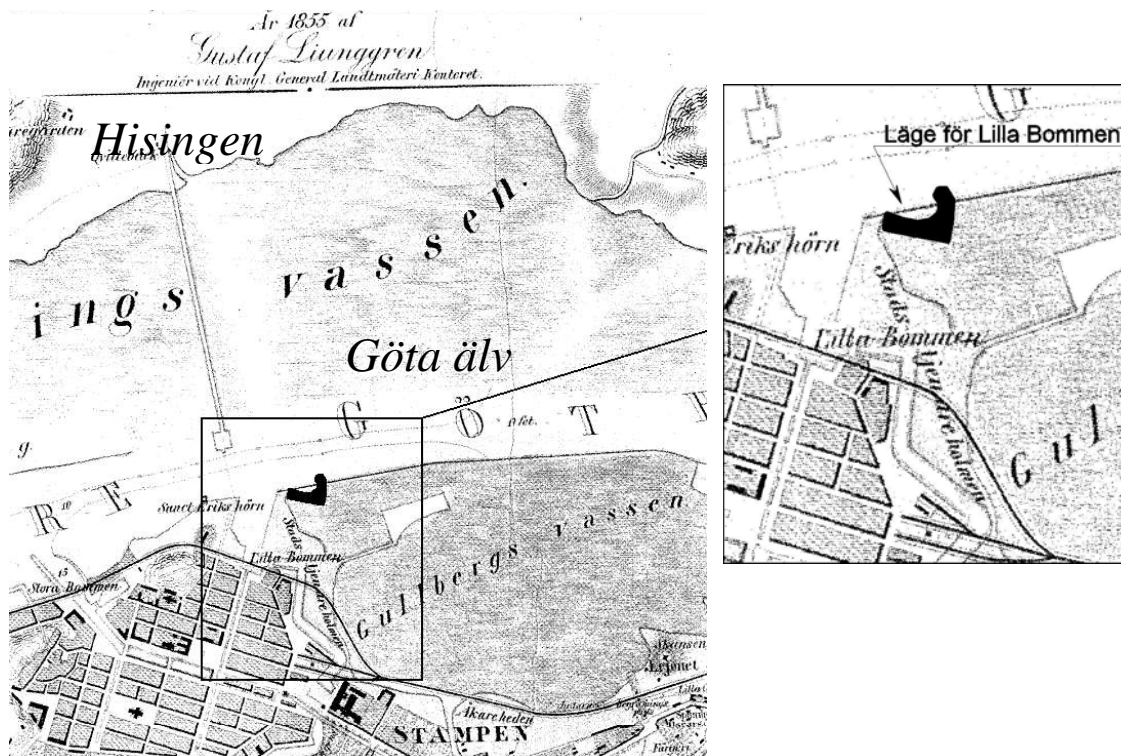
Litteraturstudierna har omfattat en genomgång av bl a projekteringsunderlag (Skanska AB 1987a och 1987b) och dimensioneringshandlingar för höghuset samt studie av rapporter med relevant innehåll.

Detta material har bearbetats och en utvärdering och analys av grundläggningens funktion och samverkan med undergrunden har utförts.

## 2. Beskrivning

### 2.1 Historik - områdesbeskrivning

Det aktuella området vid Lilla Bommen var ursprungligen en del av Göta älv med begränsat vattendjup och utgjordes av skadad mark och kallades Gullbergs vassen. I slutet av 1700-talet hade inga arbeten utförts inom denna del mellan älven och den vallgrav som ingick i Göteborgs dåvarande befästningsverk. I början av 1800-talet började man fylla ut detta område av älven i samband med att muddringsarbeten utfördes i Göta älv. I mitten på 1800-talet var Lilla Bommens hamn anlagd. Då var en begränsad del av området i anslutning till Lilla Bommens hamn utfylld. Den östra sidan av denna kajanläggning benämndes Stadstjänareholmen, se figur 2.1. Under 1850-talet utfördes en invallning av Gullbergs vassen och en stenmurskaj byggdes. Kajen grundlades på 10-15 m långa träpålar. Under denna tid pågick muddringsarbeten för att öka vattendjupet i Göta älv. Vid år 1865 var stora delar av området innanför kajen utfyllt med dessa muddermassor. Utfyllnaden utfördes till nivå ca +12,5. Under följande år började det utfyllda området bebyggas. Med tiden har sättningar utbildats till i stort nuvarande marknivåer, ca +11,4 - +11,6. Älvens medelvattenstånd anges idag till +10,10 vid Lilla Bommen.



Figur 2.1 Plan över centrala delar av Göteborg vid år 1855 med del av Hisingen, Göta älv och Gullbergs vassen. Från Göteborgs stadsarkiv, Stadsbyggnadskontoret.

En ny kaj i betong byggdes vid Lilla Bommen ut mot Göta älv år 1958. Den nya betongkajen, Gullbergskajen, är belägen utanför den äldre stenmurskajen. Betongkajen är ca 24 m bred och

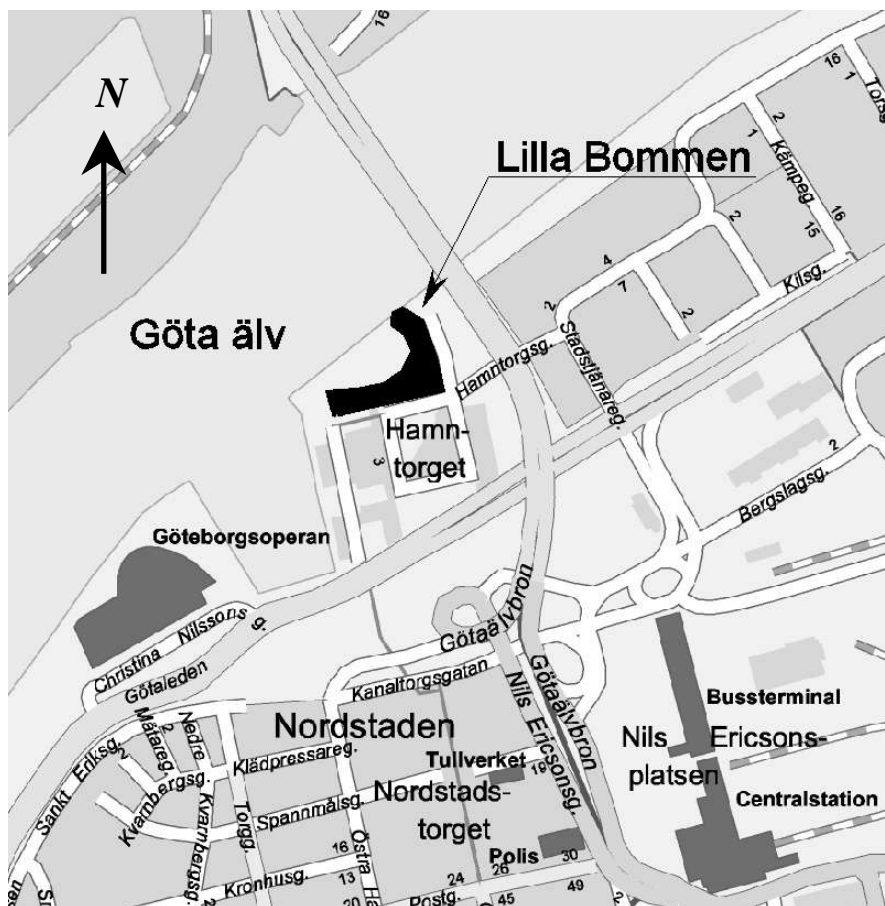


är grundlagd på kombinerade trä- och betongpålar till 50 m djup. I samband med att höghuset uppfördes monterades delar av kajen ner för att sedan återställas när husets grundkonstruktion var färdigställd.

En ny broförbindelse till Hisingen, Göta älvbron, färdigställdes 1939. Brons södra del ligger ca 35 m öster om aktuell byggnad, se figur 2.2. Bron är grundlagd på kohesionspålar. Mätningar visar att sättningar i storleksordningen 10 cm har utbildats för bron söder om älven från färdigställandet fram till år 2000 (VBB 1988, Claesson P. 2001). För brostödet närmast älven är dock registrerade sättningar ca 20 cm under samma tidsperiod.

Gullbergskajen begränsar det nu aktuella området mot Göta älv. Markytan innanför Gullbergskajen är relativt plan och ligger på nivå ca +11,4 - +11,6. Kajens överyta är på nivå ca +12,2, d v s ca 2 m över älvens medelvattennivå. Muddring i älven skall vara utförd till nivå ca +4,4 (Skanska AB, 1987a), vilket ger ett vattendjup på nästan 6 m vid medelvattenstånd (MW +10,1).

Sydväst om Lilla Bommens kontorshus uppförde även IBM Svenska AB en kontorsbyggnad med 5 våningar och källarplan vid slutet av 1980-talet. Byggnadens norra gavel ansluter till Lilla Bommens låghusdel. Byggnaden är grundlagd på kohesionspålar.



Figur 2.2 Tätortskarta över centrala delar av Göteborg med Lilla Bommen. Ur karta © Lantmäteriet Gävle 2007. Medgivande I 2007/0403.

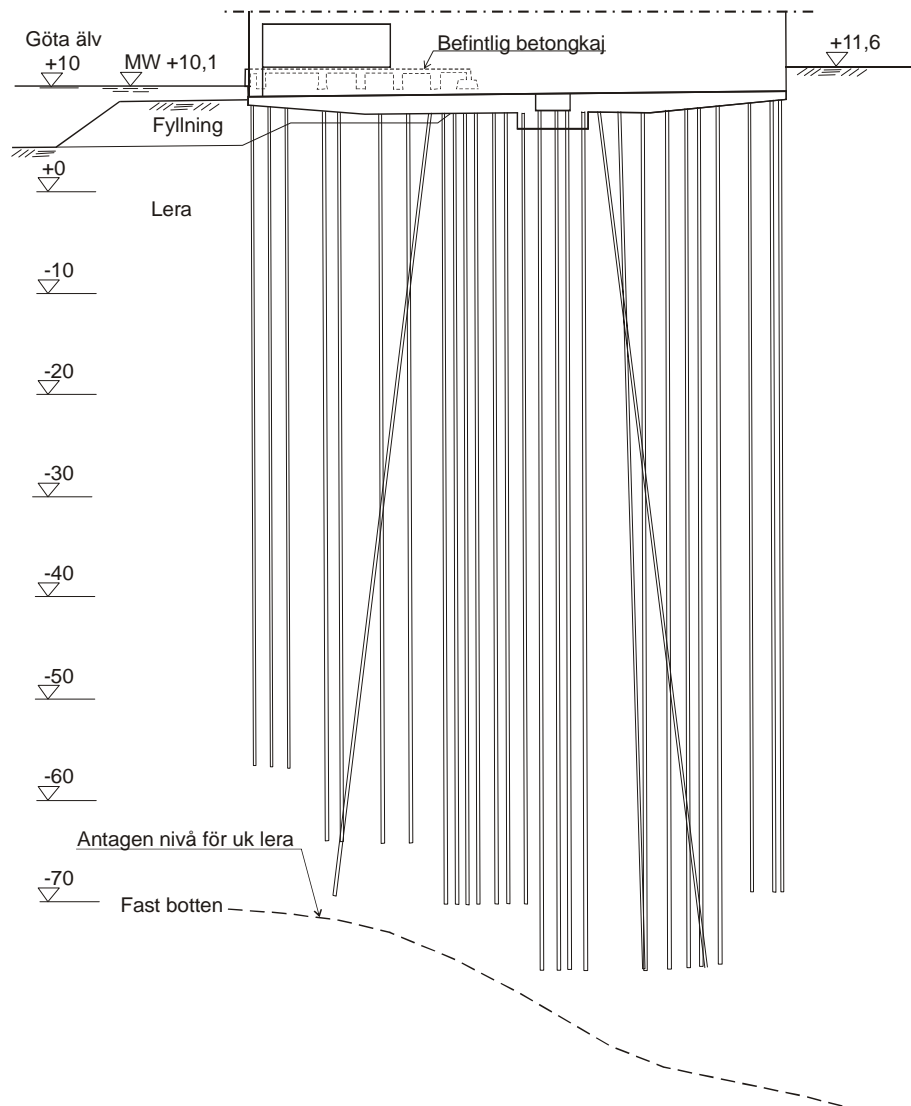
Ytterligare tre kontorsbyggnader har uppförts som är belägna söder om höghuset Lilla Bommen. Byggnaderna uppfördes under 1990-talet och är 6-9 våningar höga. Grundläggningen utfördes med kohesionspålar även för dessa byggnader. I figur 2.2 redovisas idag gällande karta över området.

## 2.2 Kontorsbyggnaden och dess grundläggning

Den aktuella kontorsbyggnaden är, som beskrivits ovan, belägen på den södra älvbanken vid Göta älv i den centrala delen av Göteborg. Kontorsbyggnaden uppfördes under 1987-89 och består av två delar, en höghusdel med 22 våningar och en låghusdel med 5-6 våningar, där partiet närmast höghuset består av 6 våningar. Höghusdelen är totalt 82 m hög. Byggnaderna upptar en sammanlagd yta av 4 100 m<sup>2</sup> varav höghusdelen utgör 1 050 m<sup>2</sup>. Både höghusdelen och låghusdelen har ett källarplan med färdigt golv på nivåerna +8,00 respektive +9,60.

Grundläggningen av Lilla Bommen är utförd som en delvis kompenserad grundläggning på kohesionspålar. Låghusdelen är grundlagd på 337 st pålar som är 44 m långa. Under den centrala delen av höghuset finns ett stort antal betongpålar med 80-85 m längd. Ut mot byggnadens ränder är pålarna något kortare, ca 65-78 m långa, se figur 2.3. Höghusdelen är grundlagd på totalt 234 betongpålar. Pålningen är utförd med kvadratiska betongpålar med måtten 275x275 mm<sup>2</sup>.

Grundläggningen är dimensionerad dels för ett fall där byggnaden sätter sig mer än omgivande mark och dels för ett fall där omgivande mark sätter sig mer än byggnaden. För det första fallet ökar styvheten på randpålarna som därmed får en större andel av lasten från överbyggnaden än vad en innerpåle med samma längd erhåller. För det andra fallet blir effekten den motsatta d v s randpålarnas styvhet minskar och last från överbyggnaden och påhängslaster på pålarna omfördelas delvis över på innerpålarna.



Figur 2.3 Sektion med höghusdelens pålgrundläggning och en förenklad redovisning av jordlagerföljden.

## 2.3 Geologi

Den senaste istiden, och tiden därefter, har i stor utsträckning påverkat geologin i regionen kring Göta Älvdalen. När inlandsisen drog sig tillbaka mot norr blev Göteborg isfritt för ca 13 000 år sedan. Regionen dominerades av kuperad terräng som i huvudsak utgjordes av berg med djupa dalgångar, ofta i öst-västlig riktning. Stora delar av området låg vid denna tidsperiod under havsytan. Endast höglänta partier var över havsytan. Under den följande perioden då inlandsisen efter hand smälte ner utgjorde den norra delen av Västergötland utloppet från Baltiska Issjön ut i västerhavet (Fridén, 1994). Smältvattnet från Baltiska Issjön förde med sig stora mängder med finpartiklar som sedimenterade i dalgångarna då vattenhastigheten blev allt lägre i anslutning till det öppna västerhavet. Sedimentationen inträffade således i en saltvattenmiljö.

Vid den aktuella platsen är lermäktigheten upp till ca 100 m. Den större delen av lerprofilen, ca 80 m, är avsatt under en tid av ca 3 000 år, med början för ca 13 000 år sedan då inlandsisen drog sig tillbaka och minskade i storlek. Avsättningshastigheten uppskattas till i genomsnitt ca 25 à 30 mm per år. Den övre delen av lerprofilen ner till ca 20-25 m djup är avsatt från ca 10 000 år sedan och 4 000 år framåt. Denna postglaciala lera avsattes med en hastighet av ca 5-6 mm per år (Hellgren, 2004).

Lerprofilen är relativt homogen med djupet. Det finns två markerade förändringar i lerprofilen, dels vid övergången till postglacial lera på 20-25 m djup och dels vid 10-15 m djup där sedimentationsmiljön förändrades och bedöms vara likartade de förhållande som är idag ute i havet.

## **2.4 Geotekniska förhållanden**

### **2.4.1 Inledning**

Underlaget till följande redovisade geotekniska förutsättningar har i huvudsak hämtats från den geotekniska utredningen som utfördes i samband med projekteringen av Skanska AB (1987a) för aktuell byggnad. Vidare har senare utförda undersökningar i närliggande områden utgjort kompletterande underlag (VBB, 1988, Alte et al., 1989 samt Jacobson & Widmark et al., 2001).

### **2.4.2 Fyllning**

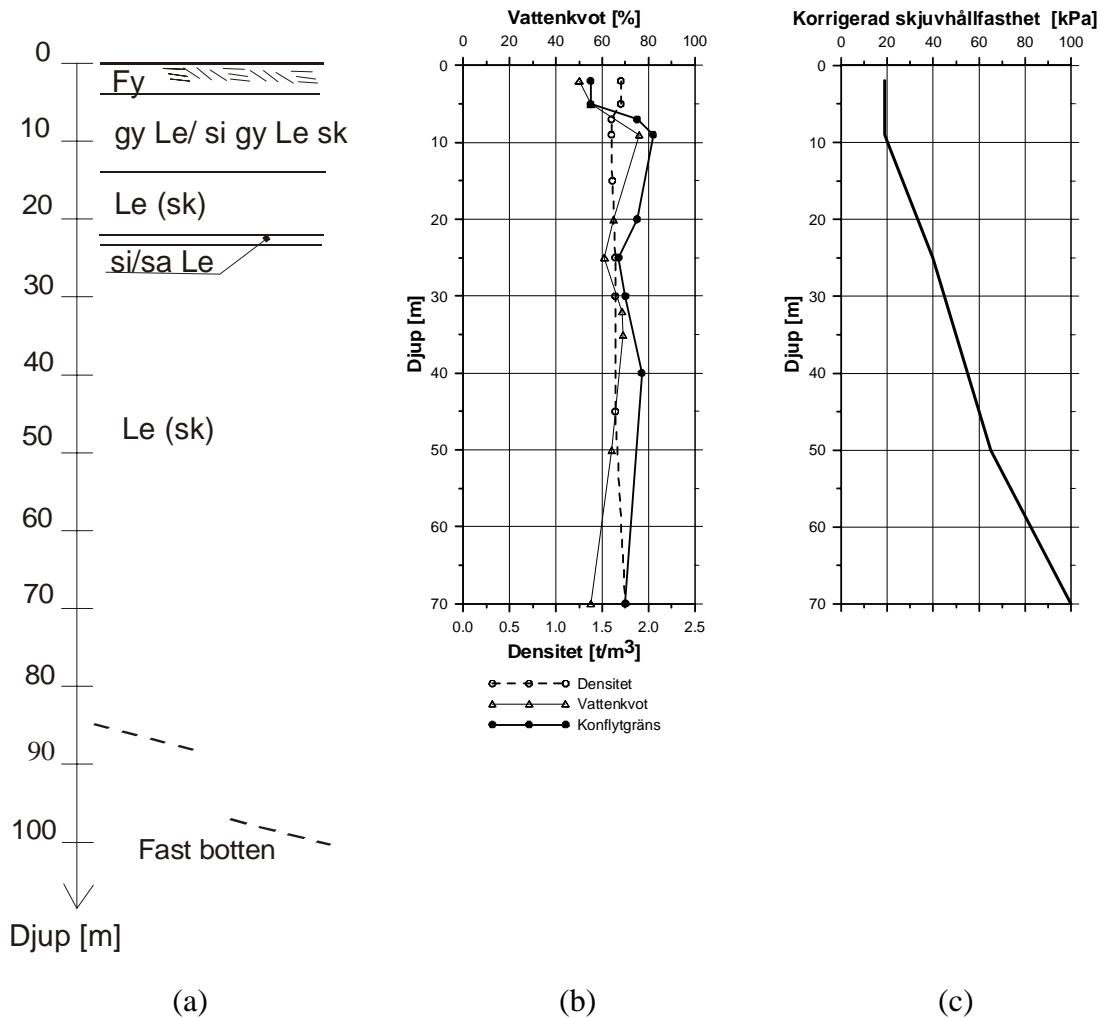
Fyllningen utgörs, som tidigare beskrivits, i huvudsak av muddermassor från älven med en mäktighet av ca 3,5-5m och består av lera, silt och sand som ofta har inslag av gyttja. Fyllningen innehåller också byggavfall såsom tegel och träbitar.

### **2.4.3 Jordlagerföljd**

Den naturligt lagrade jorden består till största av homogen lera med en mäktighet av 80-100 m. Den översta delen av lerprofilen, ner till ca 12 à 15 m, är leran något gyttjig. På ca 20 till 25 m djup finns ett tunnare skikt med siltig och sandig lera, se figur 2.4.

Lerans densitet är i allmänhet ca 1,6 t/m<sup>3</sup> för den övre delen av lerprofilen och ökar något med djupet till ca 1,65 t/m<sup>3</sup> på ca 50 m djup under markytan. Lerans vattenkvot är ca 60-80 % ner till 50 m djup och konflytgränsen är i allmänhet 5-10 % lägre. På ca 20-25 m djup finns ett skikt med siltig lera med skal innehåll.

Lerans korrigerade skjuvhållfasthet är ca 20 kPa ner till nivå +3,0 och därunder har den en tillväxt på djupet med ca 1,3 kPa per meter. Leran är mellansensitiv. Utvärderade parametrar redovisas i figur 2.4 a-c.



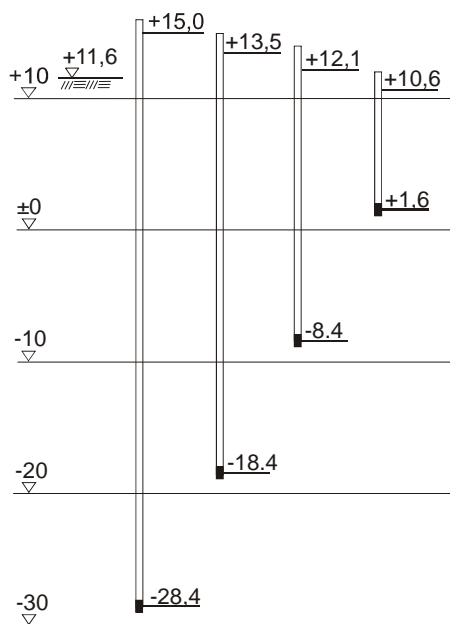
Figur 2.4 Principsektion av jordprofil samt bestämda parametrar för lerlagren.

#### 2.4.4 Geohydrologiska förhållanden

Älvens karakteristiska nivåer vid Lilla Bommen är (Vägverket, 2000):

HHW	+11,60
MHW	+11,10
MW	+10,10
MLW	+ 9,40
LLW	+ 8,90

Då aktuellt område ligger i anslutning till älven påverkas den övre akvifären av älvens vattenståndsnivå. Grundvattenytan bedöms därför ligga på +10,1 eller något högre i den del av aktuellt området som ligger längst från älven. Porvattentrycket registrerades (Skanska AB, 1987a) på 4 nivåer ner till 40 m djup och redovisas i figur 2.5.



Figur 2.5 Uppmätta portryck vid Lilla Bommen, 1986-03-05.

Mätningarna visade på ett hydrodynamiskt porvattentryck. Jämfört med ett hydrostatiskt porvattentryck, motsvarande en grundvattennivå på +10,1, ökar registrerat porövertryck med djupet och var ca 35 kPa på 30,0 m djup (nivå -18,4). Detta kan bero på kvarstående effekter av den uppfyllnad på 4 - 5 m som utfördes för ca 150 år sedan. De utvärderade förkonsolideringstrycken med OCR ~1,2 talar dock för att det finns ett visst naturligt porövertryck i lerprofilen. Det finns även exempel från andra lokaler där porövertryck registrerats i mäktiga lerlager. Mätningar på 40 m djup (nivå -28,4) gav ett oväntat högt porvattentryck och har givits en lägre vikt vid utvärdering av portrycksprofilen. En utvärdering av portrycksnivån, där även mätningar på motsvarande djup inom kv Silvret (VBB, 1988) och kv Guldet (Alte et al., 1989) ingår, så bedöms portrycksnivån på 40 m djup motsvara en grundvattenyta på nivå omkring +14,5.

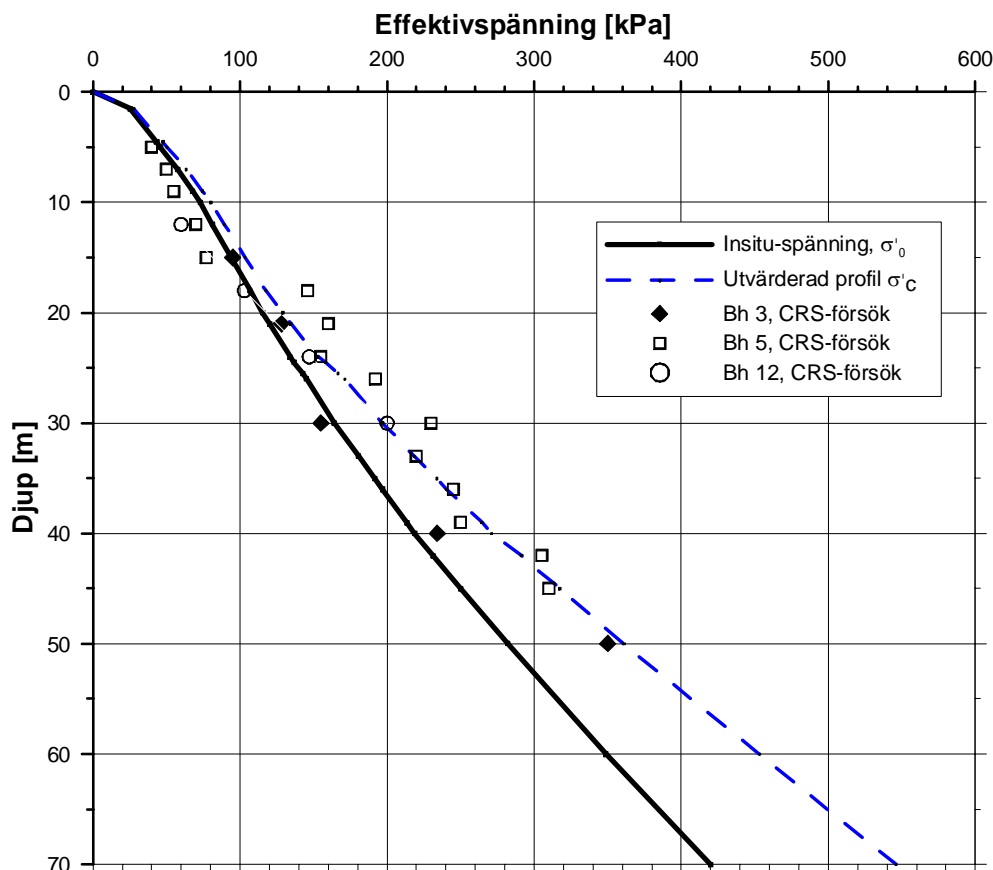
#### 2.4.5 Konsolideringsförhållanden

Enligt de undersökningar och den utredning som Skanska AB (1987a) utförde i samband med projekteringen av byggnaden angavs att leran bedömdes som normalkonsoliderad eller möjligen svagt överkonsoliderad ner till ca 40 m djup.

I denna studie har även jämförelser och analyser av konsolideringsförhållandena gjorts med erhållna resultat från omfattande undersökningar som har utförts vid senare tidpunkter inom närliggande områden (VBB, 1988, Alte et al., 1989, Claesson, 2003).

I den översta delen av lerprofilen mellan ca 5 och 15 m djup, där leran har inslag av gyttja, erhöles låga värden på utvärderade förkonsolideringstryck från utförda CRS-försök vid jämförelse med beräknade effektivspänningar in situ. Vid jämförelse av resultat från CRS-försök utförda på prover från närliggande provtagningspunkter på motsvarande nivåer samt

empiriska utvärderingar av förkonsolideringstrycket utifrån erhållna skjuvhållfastheter bedöms lerans överkonsolideringsgrad till ca 1,1 eller något lägre för detta skikt. Överkonsolideringsgraden bedöms öka med djupet och är ca 1,3 på 45-50 m djup, se figur 2.6. Ovan angivna studier från närliggande områden visar på ett OCR som är 1,25-1,3 från ca 20-25 m djup. En skillnad mellan de olika provtagninglokalerna är att vid Lilla Bommen är uppfyllnaden ca 3,5-5 m jämfört med ca 1,5-2,0 m för de andra lokalerna



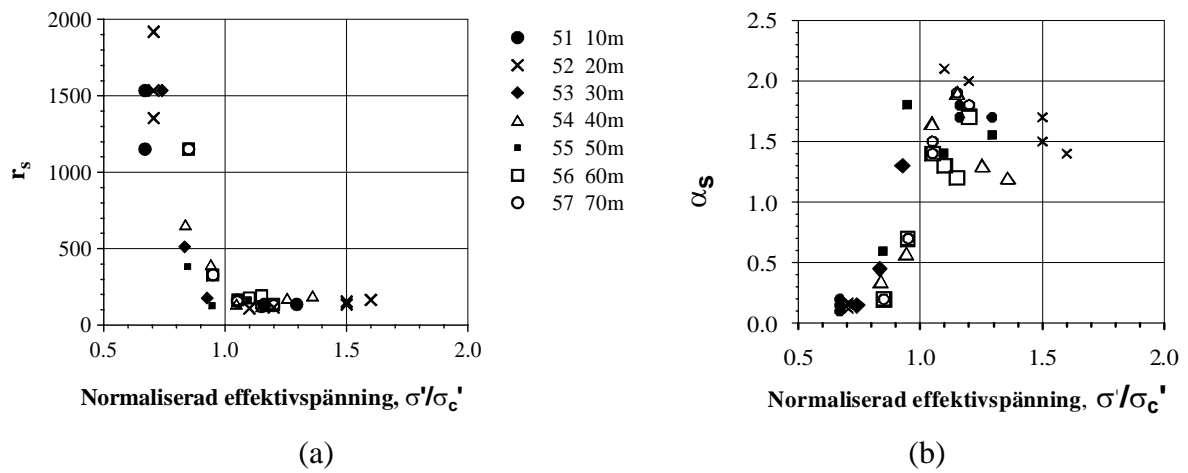
Figur 2.6 Beräknade in situ-spänningar och utvärderade förkonsolideringstryck från utförda CRS-försök (Skanska AB, 1987a) samt vald profil för förkonsolideringstrycket.

#### 2.4.6 Lerans krypegenskaper

Lerans krypegenskaper undersöktes ej i samband med projekteringen av kontorsbyggnadens grundläggning. Dock har omfattande undersökningar senare utförts vid Lundby Strand, ca 1,5 km väster om Lilla Bommen, för att studera lerans krypegenskaper ner till 70 m djup under markytan (Claesson, 2003).

Då lerans egenskaper i övrigt bedöms vara relativt likvärdiga för de båda lokalerna bör de utvärderade kryppparametrarna för Lundby Strand ha god överensstämmelse med förväntade krypegenskaper hos leran vid Lilla Bommen. Det bedöms dock att lerskiktet, med innehåll av organiskt material ner till ca 15 m djup, har en större krypbenägenhet än övriga delar av

lerprofilen. Resultatet från bedömningen av lerans kryppparametrar för Lundbystand redovisas i figur 2.7.



Figur 2.7 Utvärderade kryppparametrar från Lundbystrand. (a) tidsmotståndstalet mot normaliserad effektivspänning alternativt (b) koefficienten för sekundär kompression, från Claesson 2003.



### 3. Instrumentering och mätpunkter

#### 3.1 Inledning

Byggnaden är unik på så vis att ingen känd byggnad med motsvarande höjd tidigare har uppförts med en undergrund bestående av lös till medelfast lera med ca 100 m mäktighet. Det var därför ett unikt tillfälle att studera hur jordlagrens sättningar influerar på en grundkonstruktion med mycket långa betongpålar. I samband med att höghusdelen uppfördes instrumenterades ett antal pålar och ett antal avvägningpunkter etablerades i byggnaden och i mark i anslutning till byggnaden. Mätpunkterna nollavvägdes efter installationen.

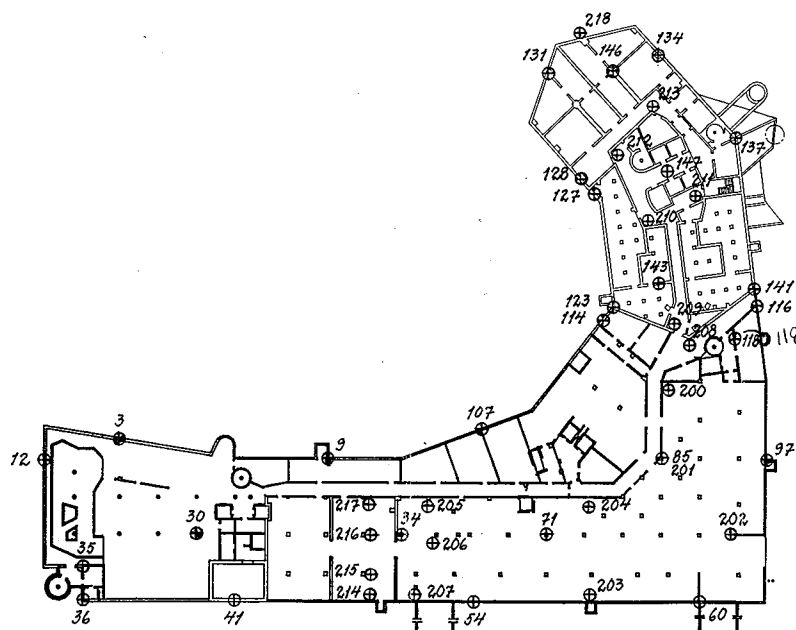
Uppföljningen av pålarnas deformationer samt byggnadens och markens vertikala rörelser påbörjades redan under byggskedet.

Vidare har även utförda sättningsuppföljningar studerats för närliggande anläggningar som t ex Göta älvbron (VBB, 1988), IBM-huset (Jacobson & Widmark AB och Geosensor Bo Alte, 2001) och en bälgslang vid Lilla Bommens hamn (Vägverket, 2000).

#### 3.2 Avvägningsdubb på byggnaden och omgivande markytor

Arbetet med att installera avvägningdubb påbörjades i januari 1988, d v s knappt ett år innan höghuset var färdigställt. Avvägningar av installerade dubb har utförts under en tidsperiod av ca 14 år. Mätintervall var i snitt ca 1 gång per månad under de två första åren. Därefter har tiden mellan mätningarna ökat. Den senaste avvägningen utfördes i oktober år 2001.

Avvägningdubbarna är i princip jämt fördelade över byggnadens yta och dubbarnas placering redovisas i figur 3.1.



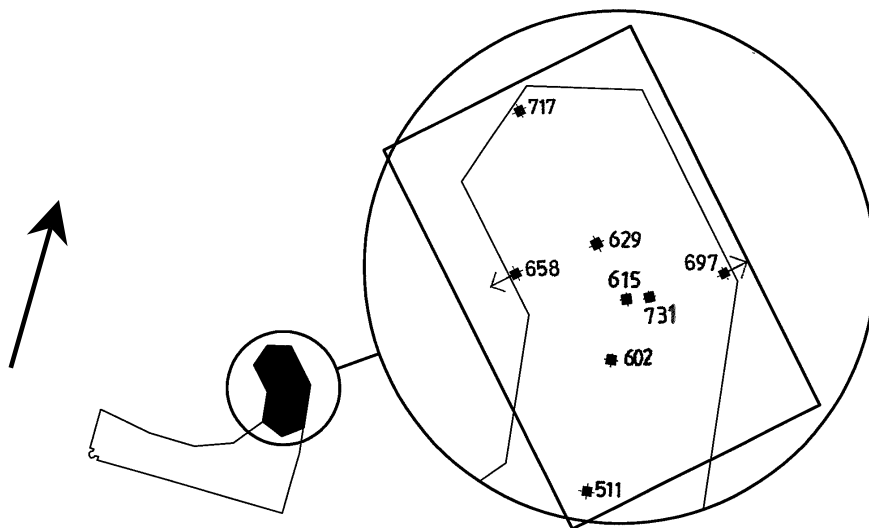
Figur 3.1 Plan med installerade avvägningdubb för både höghus- och låghusdelen (Skanska Teknik, 1988).

Det installerades ett antal avvägningsskruvar på omgivande mark i samband med uppförandet av byggnaden. Dock utfördes endast avvägningar i en begränsad omfattning efter färdigställandet av byggnaden. En okulär besiktning har utförts under 2004 för att bedöma utbildade differenssättningar mellan byggnad och anslutande markytor.

### 3.3 Instrumentering av betongpålar

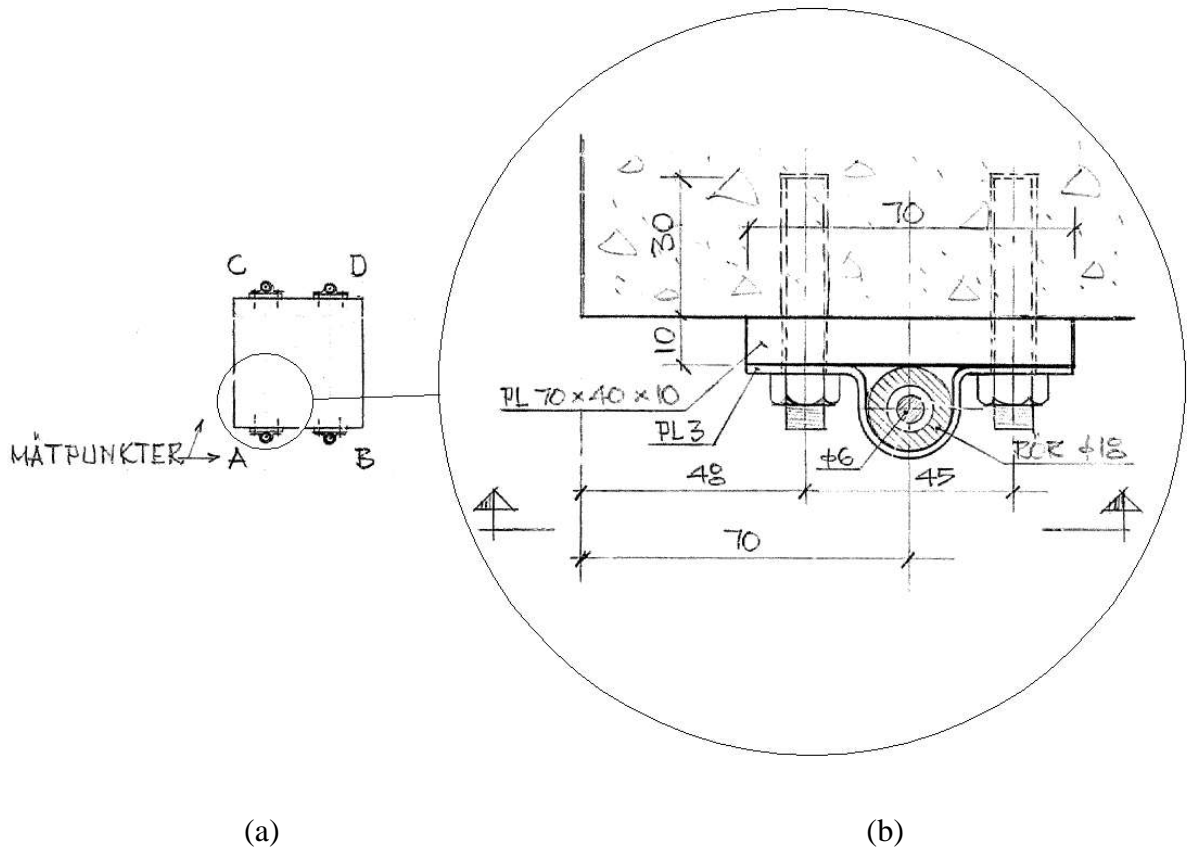
#### 3.3.1 Instrumentering

När höghuset uppfördes instrumenterades åtta pålar i syfte att kunna studera lastutvecklingen i pålarna. Pålarnas läge i plan redovisas i figur 3.2. Med hänsyn till kravet på tillförlitlighet under lång tid med svåra förhållanden valdes ett mekaniskt mätsystem.



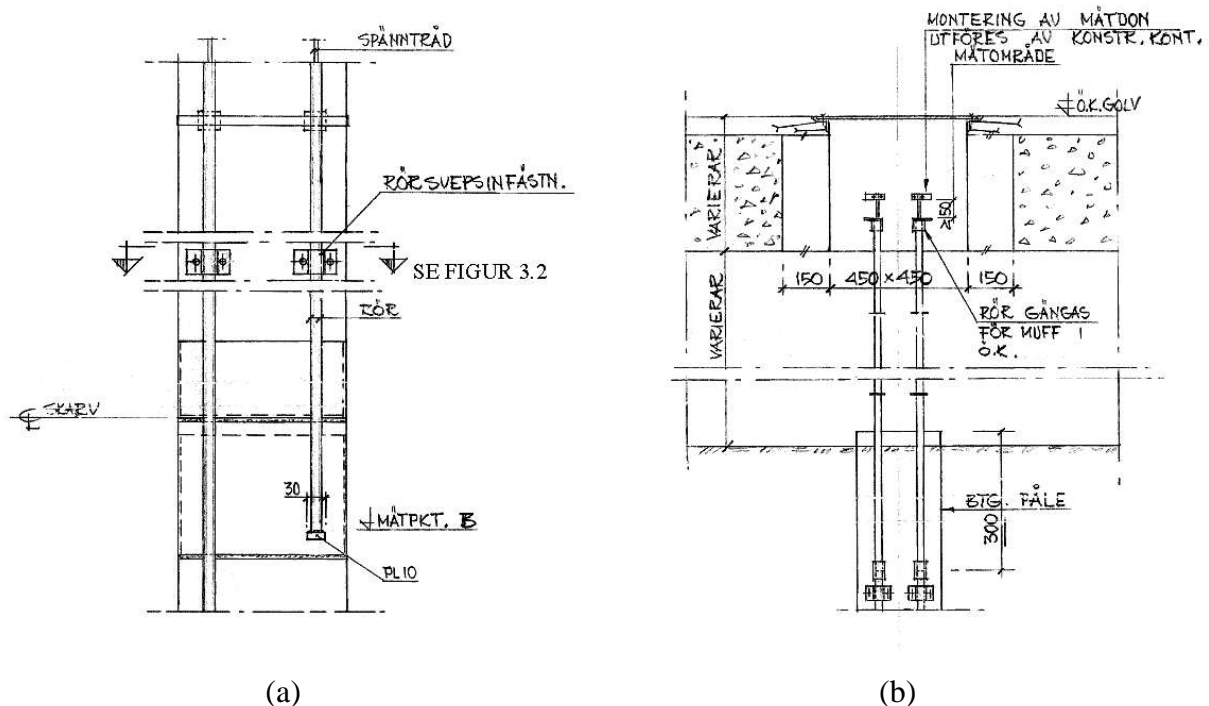
Figur 3.2 Lägen och pålnummer för instrumenterade pålar.

Det mekaniska systemet utgjordes av fyra längsgående rör på varje påle. Rören monterades på två av pålens sidor, se figur 3.3 och 3.4. Alternativet med att gjuta in rören i pålarna hade övervägts men utrymmesbrist i pålen medförde att rören placerades utefter pålarnas sidoytor.



Figur 3.3 (a) Sektion genom påle med fyra mätrör. (b) Infästningsdetalj för mätrör.

Rörlängderna valdes så att rören avslutades ungefär i respektive 1/4-punkt av pålens längd. Rören benämndes A, B, C och D. Rör A monterades ner till pålspets och rör D monterades ner till den översta 1/4-punkten, se figur 3.5.



Figur 3.4 (a) Detalj av röravslut. (b) Sektion vid påltopp i bottenplattan med monterade mätrör.

Pålarna göts in 100 mm i betongplattan. De fyra mätrören förlängdes upp och avslutades i en ursparning i bottenbjälklaget för att möjliggöra erforderliga mätningar. Utförandet visas i figur 3.4b.

I vart och ett av de fyra rören installerades en 6 mm slät spänntråd. I tråden respektive mätröret fästes mätplattor mellan vilka avståndet mättes med ett elektroniskt skjutmått. Mätpunkter har avlästs under 13 år.

En sammanställning av hur pålarna var instrumenterade framgår av tabell 1 samt av figur 3.5 nedan.

Påle	717	697	511	615	629	658	731	602
Placering	Fasad	Fasad	Mot låghus	Centralt	Centralt	Fasad	Centralt	Centralt
Längd	65 m	71,5 m	78 m	78 m	78 m	78 m	78 m	84,5 m
Antal fungerande mätpunkter	4 A, B, C, D	2 C, D	3 B, C, D	2 C, D	4 A, B, C, D	3 B, C, D	4 A, B, C, D	1 D
Maximalt mätdjup[m]	65,3	39,4	59,8	39,4	78,4	59,8	78,4	26,3

Tabell 1 Data för instrumenterade pålar.

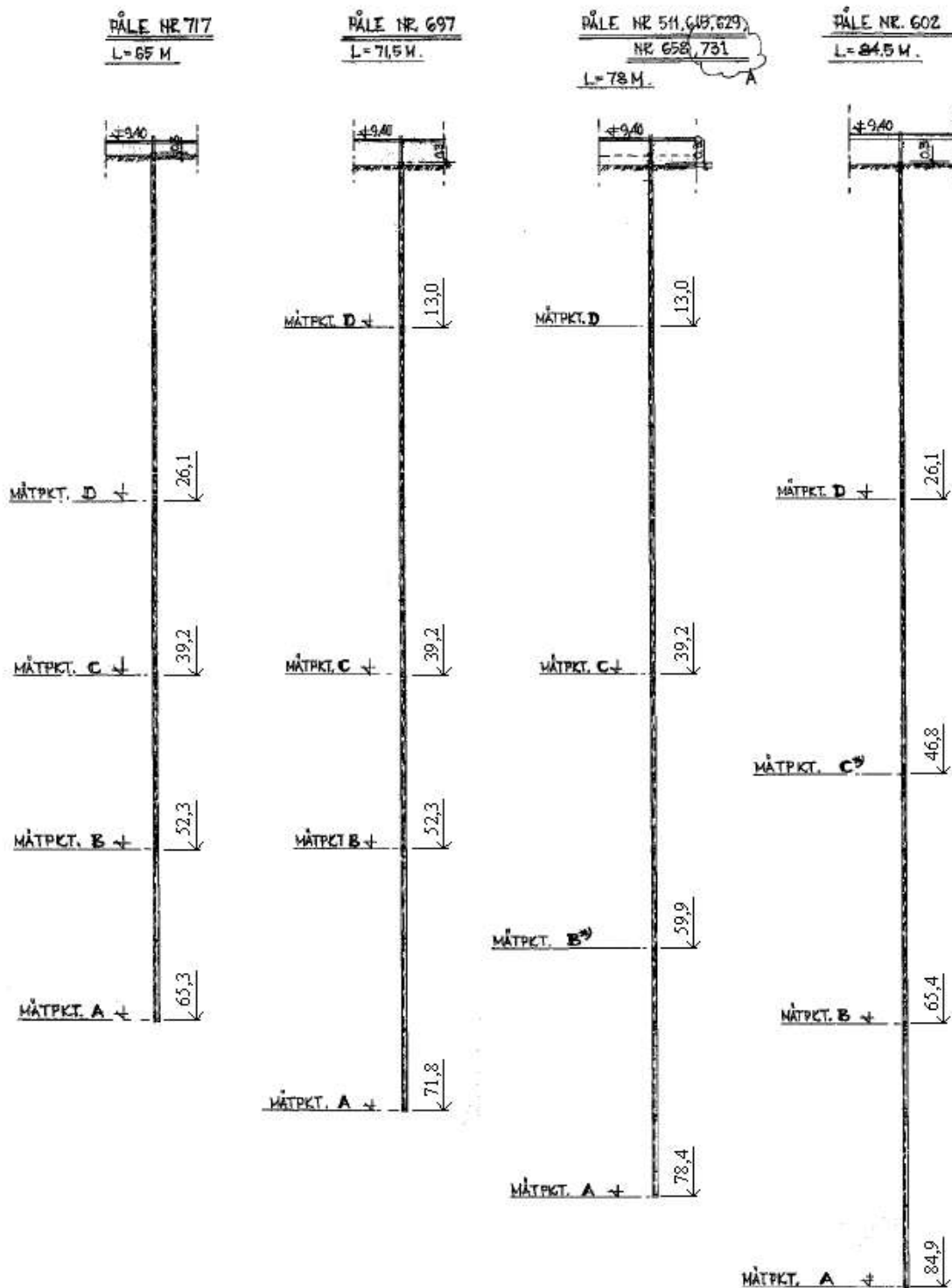


Fig 3.5 Mätpunkter på instrumenterade pålar för höghusdelen

Förekomsten av hinder i fyllningen och den stora lermäktigheten medförde att vissa mätrör skadades vid installationen av pålarna. På tre av de åtta pålar var mätrören intakta till fullt djup efter installationen.

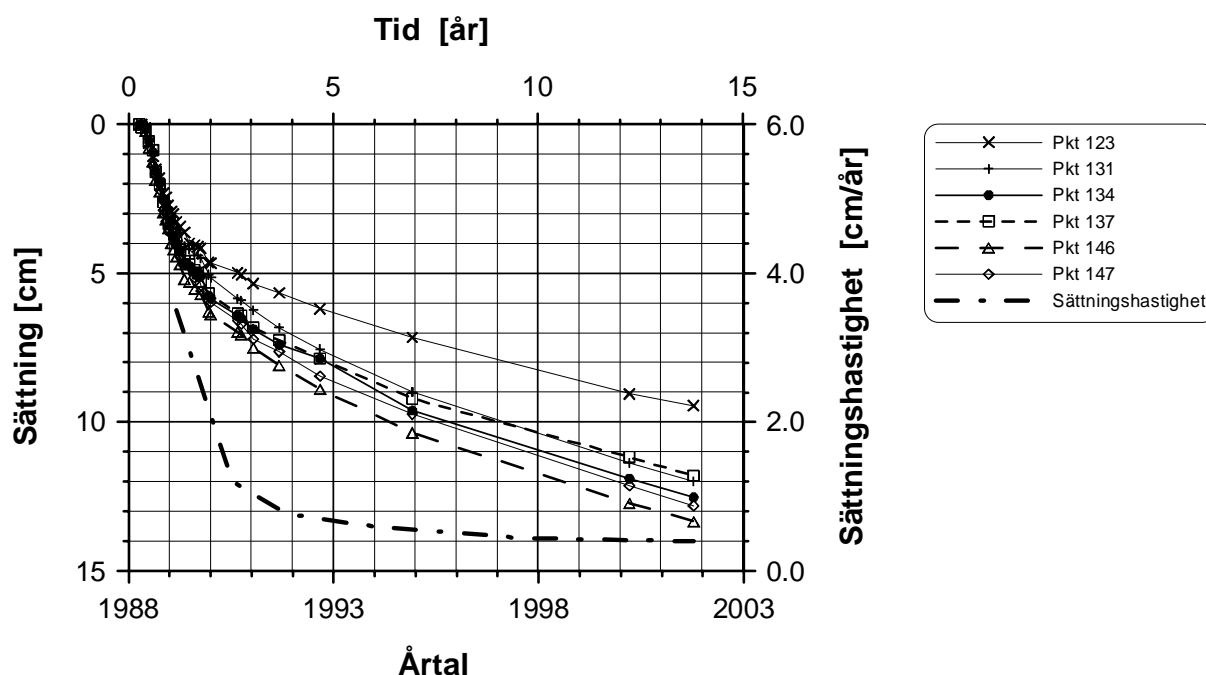
### 3.3.2 Nya mätsystem

Det valda systemet visade sig vara driftsäkert och mätningar kunde utföras i över tio år. Under åren som gått sedan mätningarna inleddes har dock nya mätsystem utvecklats. Exempel på sådana mätsystem presenteras kortfattat i bilaga B.

## 4 Mätresultat

### 4.1 Sättningar i kontorsbyggnaden

Från den tidpunkt då avvägningarna påbörjades, i början på 1988, var uppmätta sättningar för höghusdelen ca 5-6 cm fram till år 1990. Under de följande 5 åren hade sättningarna ökat till totalt ca 9-10 cm, se figur 4.1. Sättningshastigheten hade vid denna tidpunkt reducerats till ca 0,5 cm/år. Fram till senaste avvägningen i slutet på 2001 hade ytterligare sättningar i storleksordningen 2,5-3 cm utbildats, d v s en total sättning på ca 12-13 cm för höghusdelen. Detta ger en avtagande sättningshastighet som 2001 var ca 0,4 cm/år. Resultaten från avvägningarna visar också att utbildade sättningar inom höghuset i anslutning till låghusdelen är mindre, ca 10 cm, vilket illustreras av punkt 123 i figur 4.1. I övrigt är registrerade sättningsdifferenserna ca 1,5 cm eller mindre inom höghusdelen.

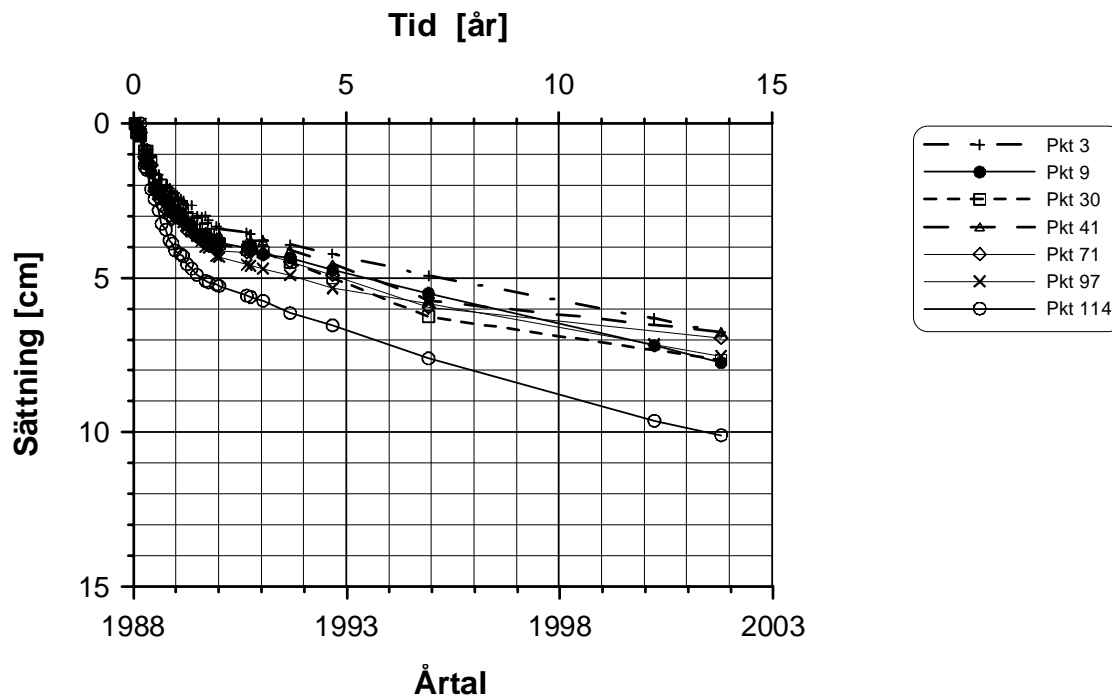


Figur 4.1 Uppmätta sättningar för respektive avvägningpunkt i höghusdelen samt beräknad medelhastighet för de redovisade avvägningpunkterna exklusive pkt 123. Skalan på sättningshastigheten redovisas på den högra vertikalexeln. Avvägningsdubbens placering redovisas i figur 3.1.

Motsvarande uppföljning av utbildade sättningar för låghusdelen visar på mindre sättningar. Figur 4.2 visar registrerade sättningsförlopp för ett antal representativa avvägningpunkterna. Total sättning mellan 1988 fram till 2001 är ca 7-8 cm. För punkt 114 kan konstateras att större sättningar är uppmätta. Denna punkt är belägen i nära anslutning till höghusdelen i övergångszonen mellan byggnadsdelarna med utbildade sättningar. Likvärdig sättningsutveckling registrerades för den närliggande punkten 123 i höghusdelen, vilket redovisas ovan.

Även för låghusdelen utbildades ca hälften av sättningarna under de två första årens avvägningar.

Den registrerade sättningshastigheten under åren 2000 och 2001 var ca 0,4 och 0,25 cm/år för hög- respektive låghusdelen



Figur 4.2 Uppmätta sättningar för avvägningpunkter i låghusdelen. Avvägningpunkternas placering redovisas i figur 3.1.

#### 4.2 Sättningar på omgivande markytor

För de markytor som är i anslutning byggnaden till utfördes en begränsad uppföljning av markrörelsen. Avvägningar utfördes i huvudsak i samband med uppförandet av byggnaden. Vidare har nivåjusteringar gjorts av markytorna inom vissa delar längs byggnaden. Detta medför att det är svårt att utvärdera utbildade marksättningar under aktuell tidsperiod. En okulär besiktning år 2004 av markytor i direkt anslutning till byggnaden visar på större sättningarna för markytor som bedöms vara i storleksordningen 5 till 10 cm jämfört med kontorsbyggnaden.





Figur 4.3 Exempel på differenssättningar vid södra fasaden på låghusdelen.

#### 4.3 Påldeformationer och pålkrafter

Det använda mätsystemet innebär att det är de axiella deformationerna i pålarna som registreras. Vid mätning på mätstång D, se figur 3.3, 3.4 och figur 3.5, registreras deformationen av pålen mellan pålavskärningsnivån och punkt D. Vid mätning på mätstång C registreras deformationen av pålen mellan pålavskärningsnivån och punkt C. Motsvarande princip gäller även för de övriga mätstänger A och B.

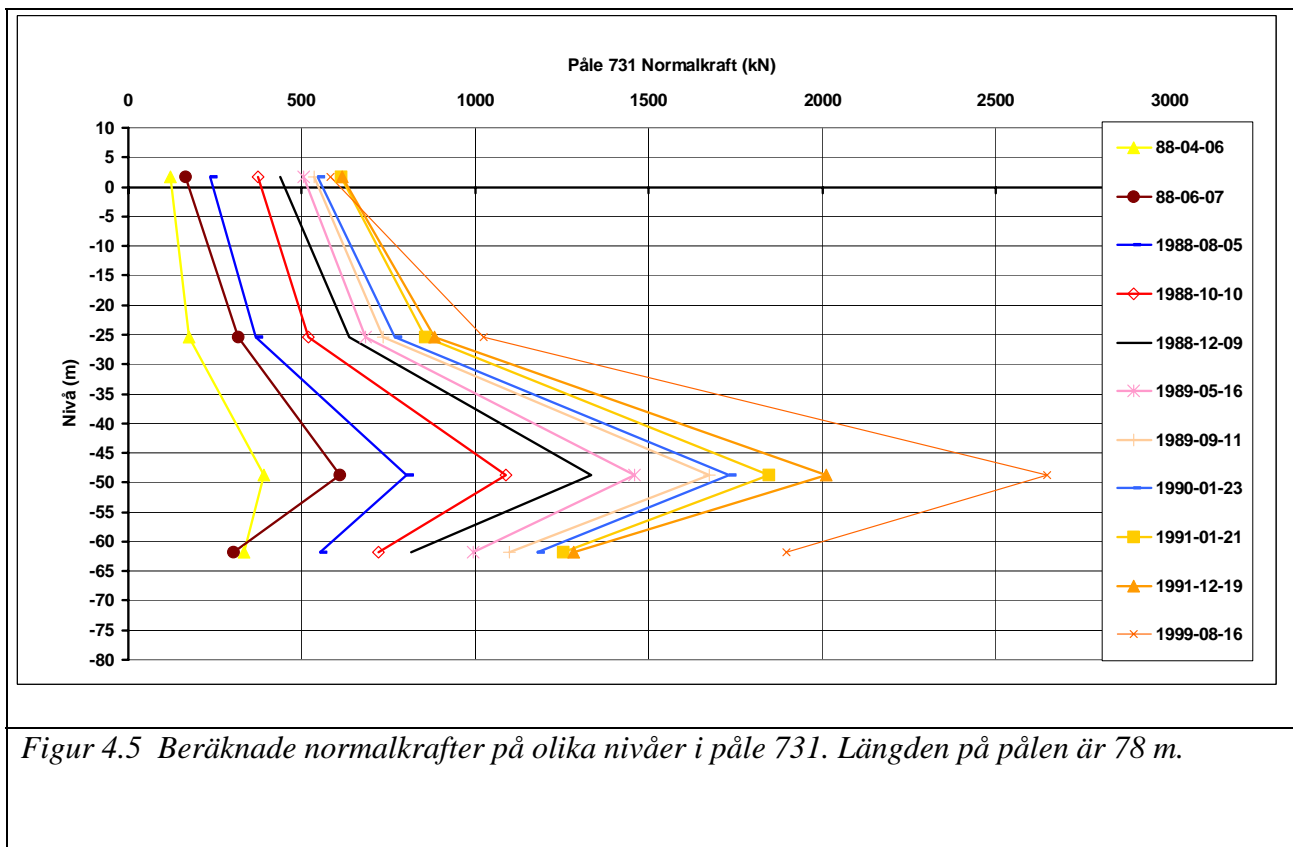
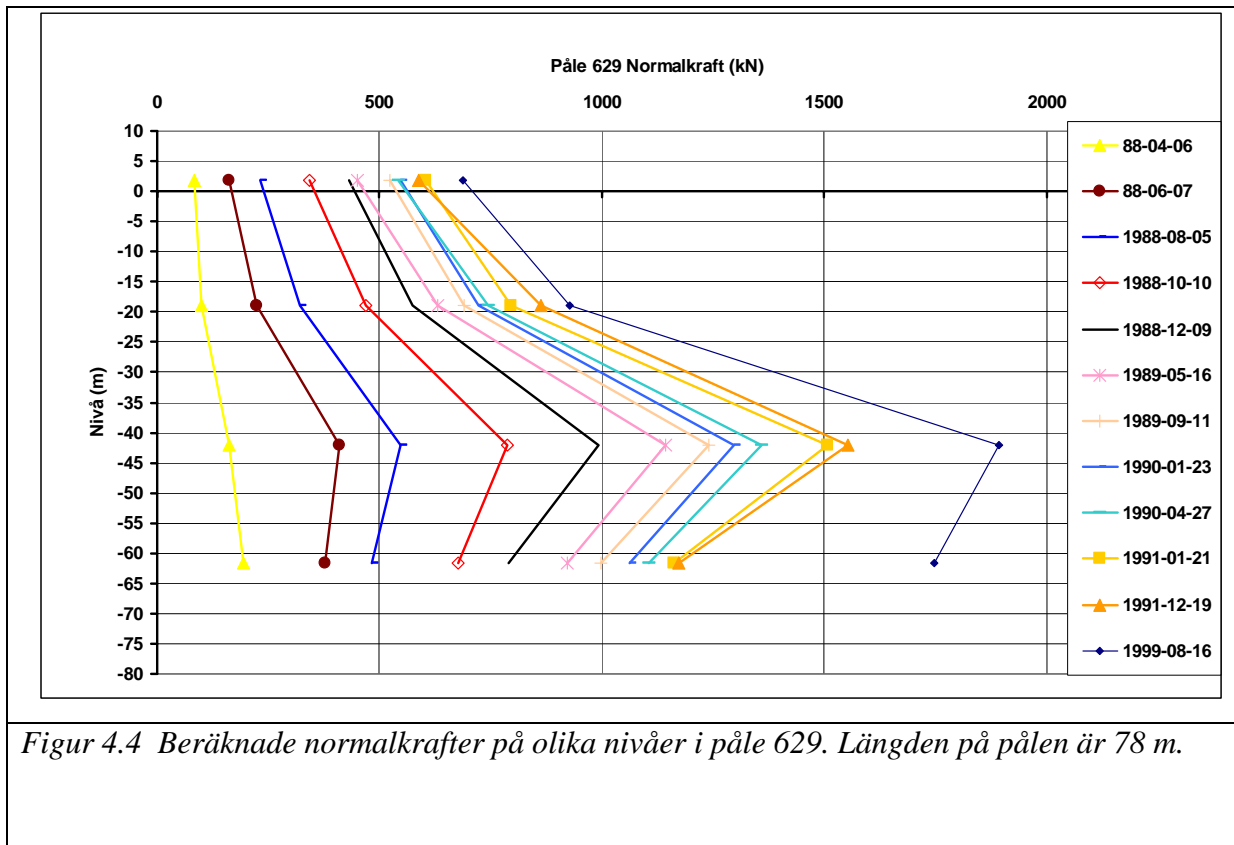
Under antagande att pålen deformeras centriskt, dvs att töjningarna är lika stora över hela tvärsnittet, så beräknas deformationen för de olika påldelarna:

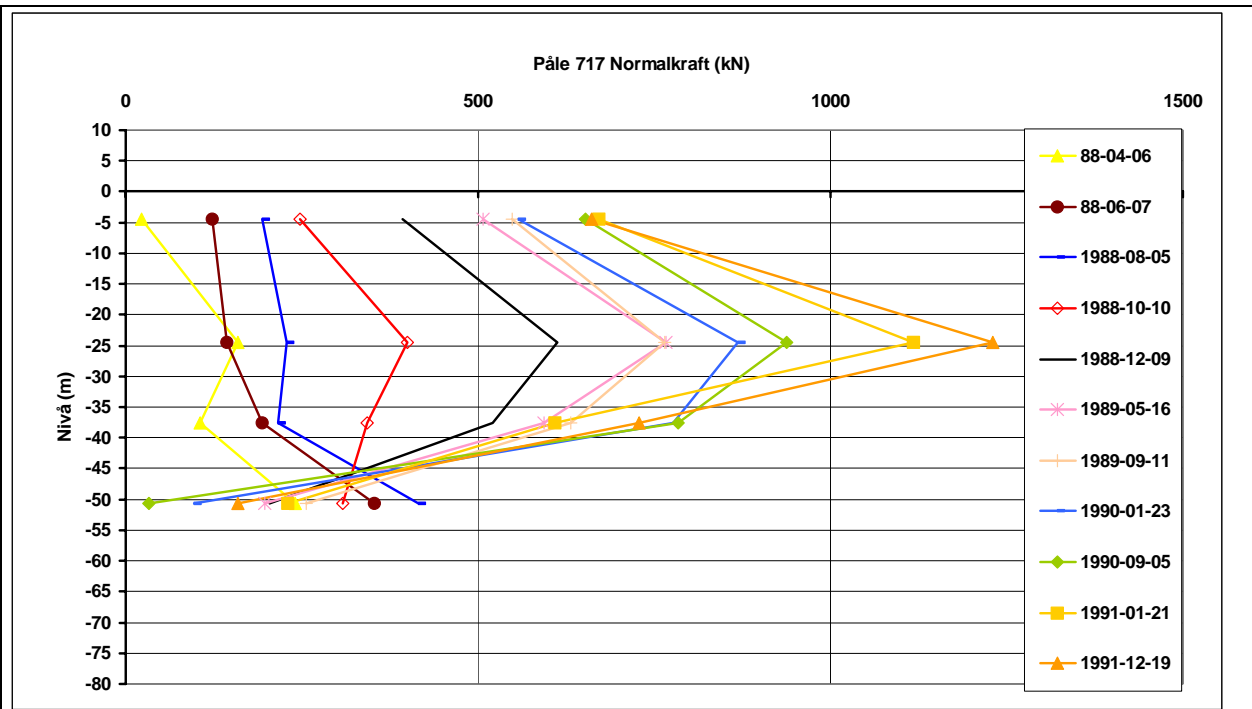
PA – D      (PA - pålavskärningsnivån)  
 D-C  
 C-B  
 B-A

Ur detta beräknas medeltöjningen för var och en av de 4 delarna av pålen. Genom att multiplicera medeltöjningen med pålens axialstyvhet erhålls medelvärdet på normalkraften i respektive påldel. Axialstyvheten beräknas som  $E \cdot A$  där E-modulen för långtidslast har uppskattats till 21 GPa. Pålarnas axialstyvhet har beräknats till 1590 MN. I diagrammen nedan redovisas medelnormalkraften mitt på aktuell påldel.

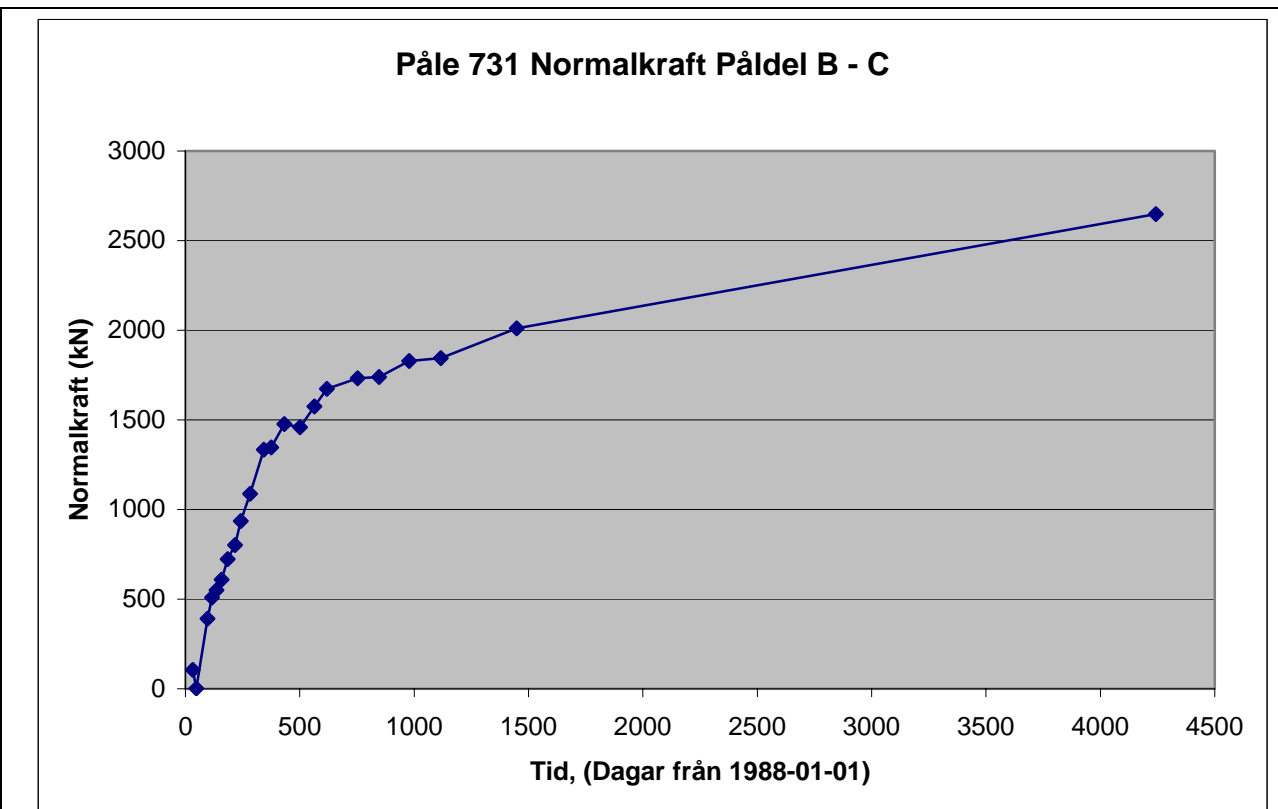
I figur 4.4 -4.6 redovisas pålkrafterna för pålar med alla fyra mätpunkter intakta, dvs påle 629, 717 och 731. Mätserierna innehåller fler mättillfällen än de som redovisas i figuren för att diagrammen ska bli mer lättlästa. I bilaga A redovisas alla mättillfällen för alla provpålarna.

I figur 4.7 redovisas hur maximal normalkraft i påle 731 har utvecklats i tiden. För påle 731 har vid största normalkraften vid samtliga mättillfällen uppmätts i påldel B-C, se figur 3.5 och 4.5.





Figur 4.6 Beräknade normalkrafter på olika nivåer i påle 717. Längden på pålen är 65 m.



Figur 4.7 Normalkraftsutvecklingen i tiden för påle 731.

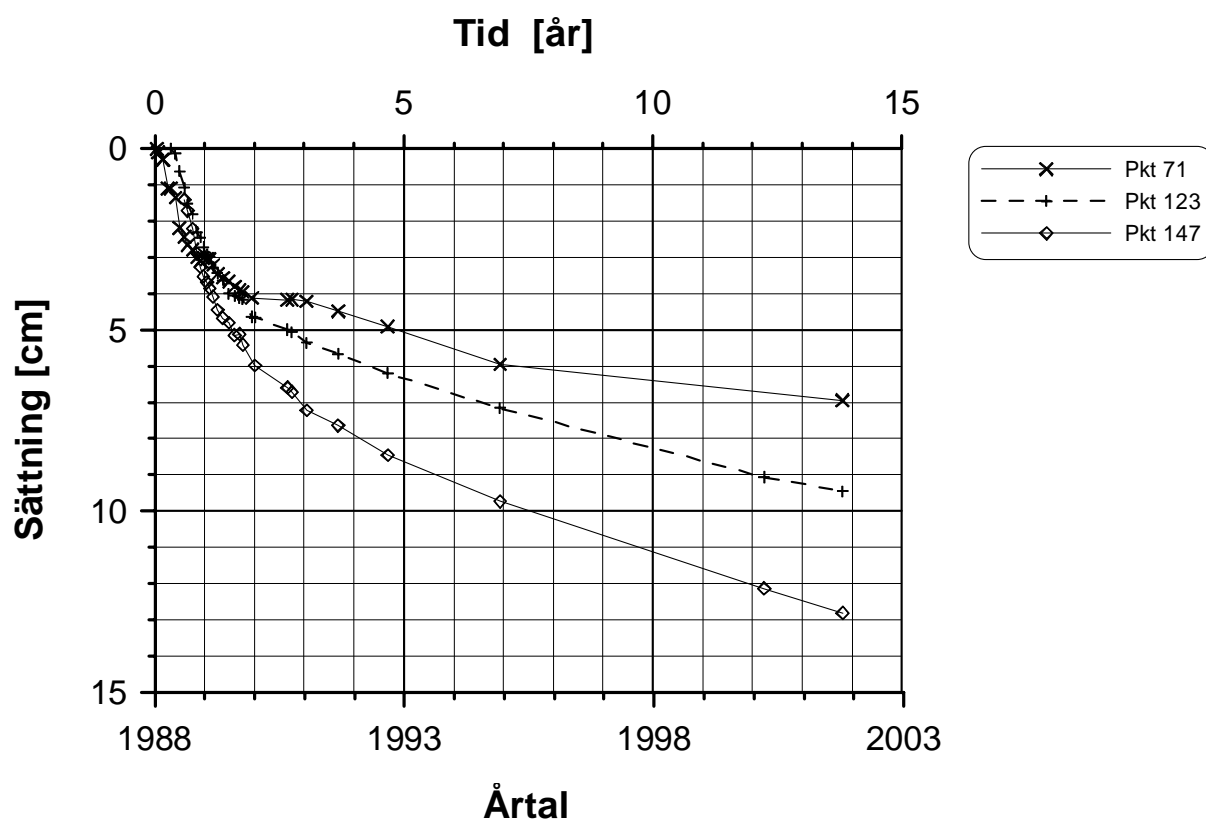
## 5. Analys

### 5.1 Sättningar för byggnad och omgivande mark

För höghusdelen har enligt utförda avvägningar sättningar på 12-13 cm utbildats fram till år 2002. I anslutning till låghusdelen är dock sättningarna ca 2-3 cm mindre. Sättningarna är för övrigt relativt jämna under byggnaden med differenssättningar som är ca 1,5 cm eller mindre. En detaljerad analys av registrerade sättningar ger att sättningarna är något större dels i den centrala delen och dels i den norra delen av byggnaden. Detta bedöms bero på att grundkonstruktionen för låghuset påverkar sättningshastigheten för höghusets södra del.

Avvägningarna visar att sättningarna i låghusdelen är ca 7-8 cm, d v s nästan hälften av vad som har registrerats för höghusdelen, se figur 5.1. Skillnaden i uppmätta sättningar mellan de olika delarna har flera orsaker. De orsaker som bedöms ge det största bidraget är dels de elastiska deformationerna i pålarna, då skillnaden i pållängder för de två delarna är stora, och dels på grund av att lasteffekten på pålarna under höghuset är betydligt större än för pålarna under låghuset. Vidare kan den större sättningshastigheten i lerprofilen i anslutning till älven bidra till sättningsdifferensen mellan byggnadsdelarna.

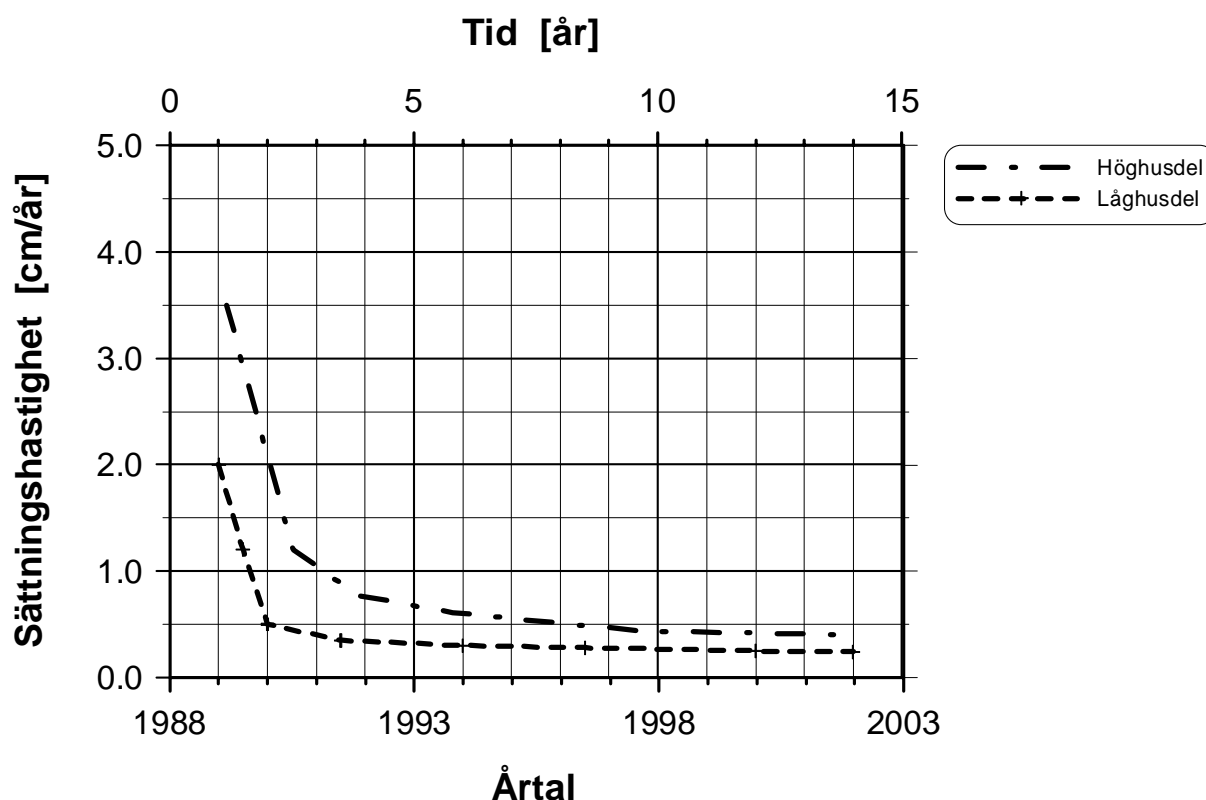
Även för låghusdelen är de avvägda sättningar i princip jämna under hela byggnadsdelen, se figur 4.2. Sättningsdifferensen mellan byggnadsdelarna påverkar respektive byggnadsdel bl a på så sätt att en utjämnning av sättningarna registrerats i gränzonen mellan byggnadsdelarna.



Figur 5.1 Jämförelse mellan registrerade sättningar för en avvägningsskruv i höghusdelen, en i låghusdelen och en i övergången mellan höghus- och låghusdelen, som representeras av skruv nummer 147, 71 respektive 123.

Vidare kan konstateras att redan i slutet på 1990, ca 1 år efter det att byggnaden färdigställts, hade hälften av de sättningar utbildats som registrerats under mätperioden. En viktig faktor för detta snabba sättningförlopp i början av mätperioden är elastiska deformationer i betongpålarna. Detta beskrivs även i avsnitt 5.4.

För höghusdelen och låghusdelen var medelhastigheten för sättningarna under de två första åren, 1988 och 1989, ca 3,5 cm/år respektive 2,0 cm/år. Under efterföljande tidsperiod reducerades sättningshastigheten påtagligt och hade under 2001 minskat till ca 0,3-0,4 cm/år.



Figur 5.2 Sättningshastigheter för höghusdelen respektive låghusdelen.

I samband med projekteringen av Götatunneln registrerades marksättningar på ca 4-7 mm/år mellan Götaälvbron och Lilla Bommens hamn (Vägverket 2000). Avvägningar utförda på Götaälvbron visar att sättningshastigheten ökar med minskat avstånd till Göta älv, vilket kan vara en indikation på att sättningshastigheten för markytan kan vara något större i anslutning till älven. En anledning till detta kan vara att fyllningens mäktighet är störst närmast älven och uppgår till ca 5 m.

Marksättningarna i anslutning till byggnaden är ca 5-10 cm större än byggnadens vertikala rörelse.

## 5.2 Analys av sättningar i jordprofilen

Sättningsmätningar i lerprofilen har utförts med bälgslang installerad vid Lilla Bommens hamn [Vägverket 2000]. Mätresultaten visar på att pågående marksättningar i huvudsak utbildats i lerlager ner till ca 15 m djup. Det pågår krypsättningar även på större djup i lerprofilen. Enligt utvärderade förkonsolideringstryck bedöms krypsättningar utvecklas ner till ca 40-50 m djup

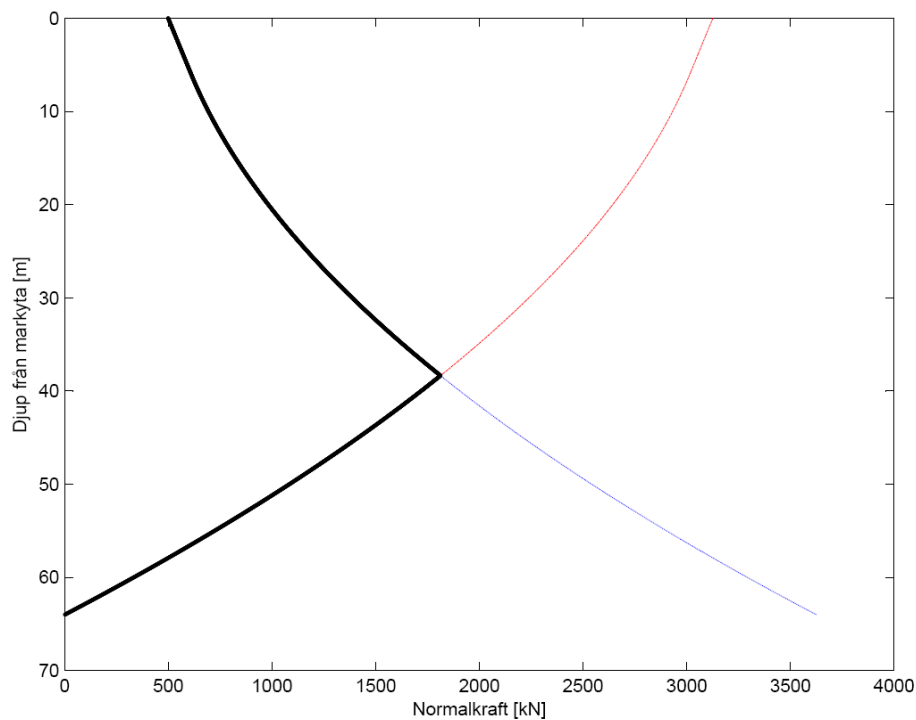
## 5.3 Analys av neutrala punkten

Belastning av en påle till följd av påhängslaster orsakad av sättningar i jorden finns beskrivet i litteraturen, bl. a. i Pågrundläggning (Olsson, C. & Holm, G., 1993) och Pålkommisionens rapport 60, Negativ mantelfriktion längs pålar (Broms, B, 1979) och rapport 100, Kohesionspålar (Eriksson P. et. al., 2004). I stora drag innebär sättningar i jorden att en påle utsätts för påhängslaster av omgivande jord inom den del där jorden rör sig nedåt relativt pålen. Den delen av pålen kan därmed inte bidra till pålens geotekniska bärförmåga. För en kohesionspåle finns det en punkt utmed pålens längd där pålen och jorden inte rör sig i förhållande till varandra, punkten benämns neutrala punkten. Under denna punkt rör sig pålen nedåt i förhållande till jorden varför kohesionen under neutrala punkten bidrar till pålens geotekniska bärförmåga.

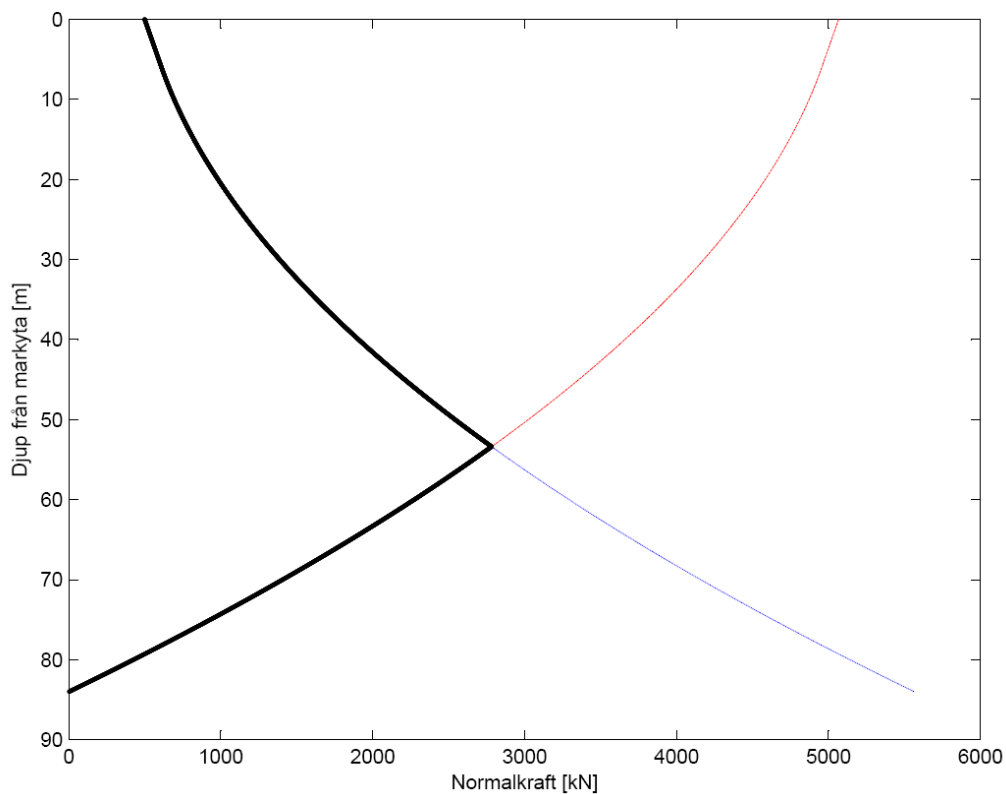
I figur 5.3 visas hur neutrala punkten kan analyseras för en 64 m lång påle med följande förutsättningar.

Pålen är en betongpåle med mantelarean  $1,1 \text{ m}^2/\text{m}$ , okorrigerad karakteristisk skjuvhållfasthet är 20 kPa på de övre 6 metrarna och därunder en tillväxt på 1,3 kPa/m. Vidhäftningsfaktorn är 0,7. Dimensionerande lasteffekt i påltopp är 500 kN. Resultatet är att största axiallasten är 1810 kN och läget är 38 m ner på pålen.

I figur 5.4 visas lasteffekten utmed pålen med samma förutsättningar beträffande jordens egenskaper och lasten i påltopp. Det som skiljer är att pålen är 84 m lång. Resultatet är att största axiallasten ökar till 2780 kN, dvs med 970 kN eller drygt 50% då pålens längd ökas från 64 till 84 m. Läget för största axiallasten i pålen är 53 m ner i pålen.



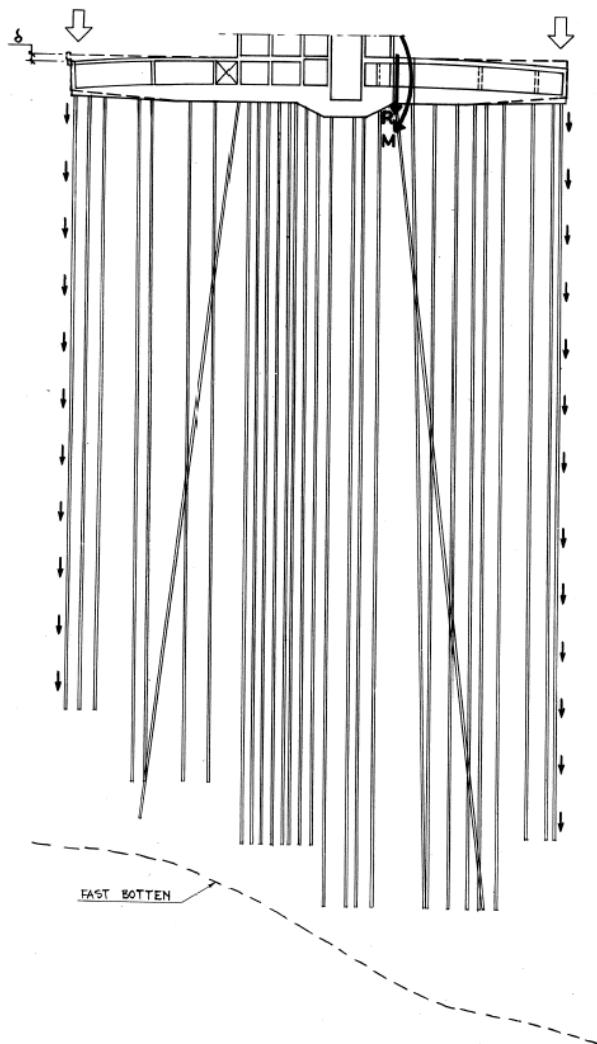
Figur 5.3 Teoretiskt beräkningsresultatet för en påle som är 64 m lång. Största axiallasten i pålen är 1810 kN och läget för max lasteffekt i pålen är ca 38 m ner i pålen.



Figur 5.4 Teoretiskt beräkningsresultatet för en påle som är 84 m lång. Övriga förutsättningar är identiska med de i exemplet ovan. Resultatet är att största axiallasten är 2780 och att läget för max lasteffekt i pålen är ca 53 m ner i pålen.

## 5.4 Normalkrafter i pålarna

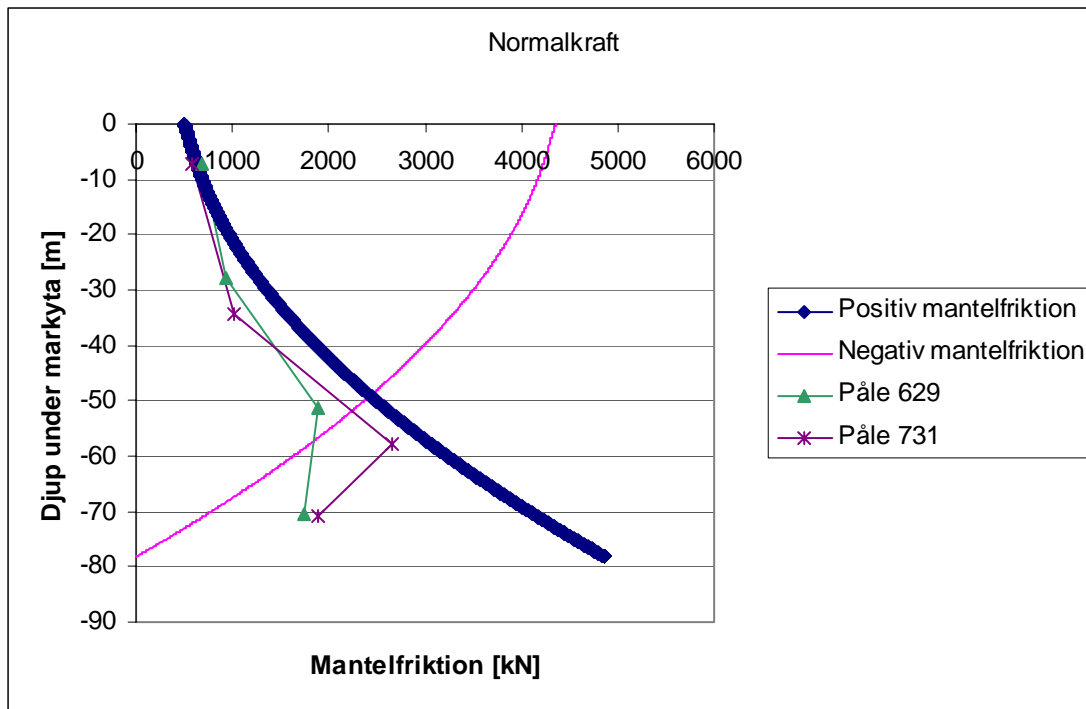
Man kan från redovisningen i avsnitt 4.3 se att normalkrafterna i pålarna ökar med tiden och att de längsta pålarna under de centrala delarna av höghuset verkar bli utsatta för de största påhängslasterna. De pågående sättningarna i omgivande jord är större än sättningarna i byggnaden vilket innebär att jorden som helhet rör sig nedåt i förhållande till pålarna. Sättningarna i omgivande jordlager bedöms vara ca 15-20 cm medan sättningarna i byggnaden är 12-13 cm, se avsnitt 5.1. Största pålkraften är ca 2700 kN, påle 731. Med en medelkraft på 2000 kN i en 78 m lång påle deformeras pålen ca 10 cm. Eftersom den elastiska deformationen i pålarna bedöms vara mindre än sättningarna i byggnaden bedöms även pålspetsarna ha rört sig nedåt under sättningsförloppet. Man kan genom att studera deformationerna i pålarna sluta sig till att de yttre pålarna blir utsatta för påhängslaster från omgivande jord. De relativt sett korta pålarna förmår inte bära lika stora påhängslaster som de längre pålarna, se figur 5.3, 5.4 och 5.5. Den geotekniska bärförmågan under neutrala punkten är ej tillräckligt hög. Lasten förs därför över till de längre innerpålarna.



Figur 5.5 Påhängslaster på randpålarna förs över på de längre pålarna i byggnadens mer centrala delar.



I figur 5.6 jämförs de från mätningarna beräknade normalkrafterna för påle 629 och påle 731 med resultatet från analysen av neutrala punkten för en 78 m lång påle. Båda pålarna är 78 m långa och mätningarna pågick fram till augusti 1999 för båda pålarna. Ur figuren kan utläsas att tillväxten i normalkraft för de båda pålarna följer kurvan för negativ mantelfriktion relativt väl. Under neutrala punkten (skärningspunkten mellan positiv och negativ mantelfriktion) är normalkrafterna från pålarna högre än vad som ges av en analys med neutrala punkten. Resultatet pekar ändå på att de båda pålarna har erhållit påhängslaster inom en betydande del av lerprofilen och att lasterna förs över till leran inom de nedre delarna av pålarna.



Figur 5.6 Jämförelse mellan från mätningarna beräknade normalkrafter i pålarna 629 och 731 och beräknade normalkrafter enligt metoden med neutrala punkten för en 78 m lång påle. Normalkraften baserad på mätningarna är framtagen för senaste mätningen som utfördes i augusti 1999.

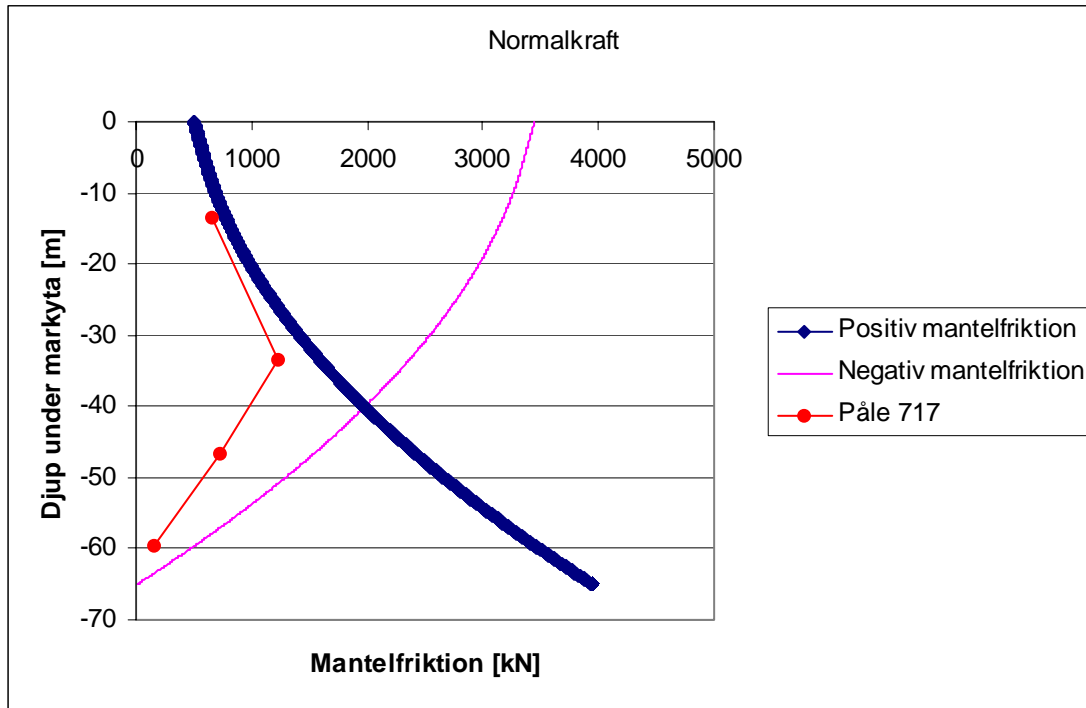
I figur 5.7 jämförs de från mätningarna beräknade normalkrafterna för påle 717 på samma sätt som ovan med resultatet från analysen av neutrala punkten för en 65 m lång påle. Mätningarna på påle 717 avslutades i december 1991. Av resultatet från de pålarna som mätningarna pågått till 1999 kan man se att betydande del av normalkrafterna utbildades mellan 1991 och 1999, se även avsnitt 4.3. Även för påle 717 kan man se att påhängslasterna i pålen följer kurvan för negativ mantelfriktion relativt väl inom den övre delen av pålen. Och att lasterna förs över till leran i den undre delen av pålen.

Det finns ett flertal förutsättningar kring mätningarna som gör att mätresultatet inte helt stämmer överens med resultatet från en analys enligt metoden med neutrala punkten. Det viktigaste förhållandena är:

- Metoden med neutrala punkten ger normalkraftfördelningen i ett skede där alla påhängslaster har utbildats, något som kan ta lång tid i mäktiga lerlager. Redovisade

mätningar har pågått under en relativt lång mätperiod men ändå med hänsyn till konsolideringsprocessen under en begränsad tid.

- Mätningarna ger information om normalkrafterna i pålarna i 4 punkter utmed pålarna medan analys enligt metoden med neutrala punkten ger en kontinuerlig fördelning av normalkraften i pålarna.



Figur 5.7 Jämförelse mellan från mätningarna beräknade normalkrafter i påle 717 och beräknade normalkrafter enligt metoden med neutrala punkten för en 65 m lång påle. Normalkraften baserad på mätningarna är framtagen för senaste mätningen som utfördes i december 1991.

## 6. Slutsatser

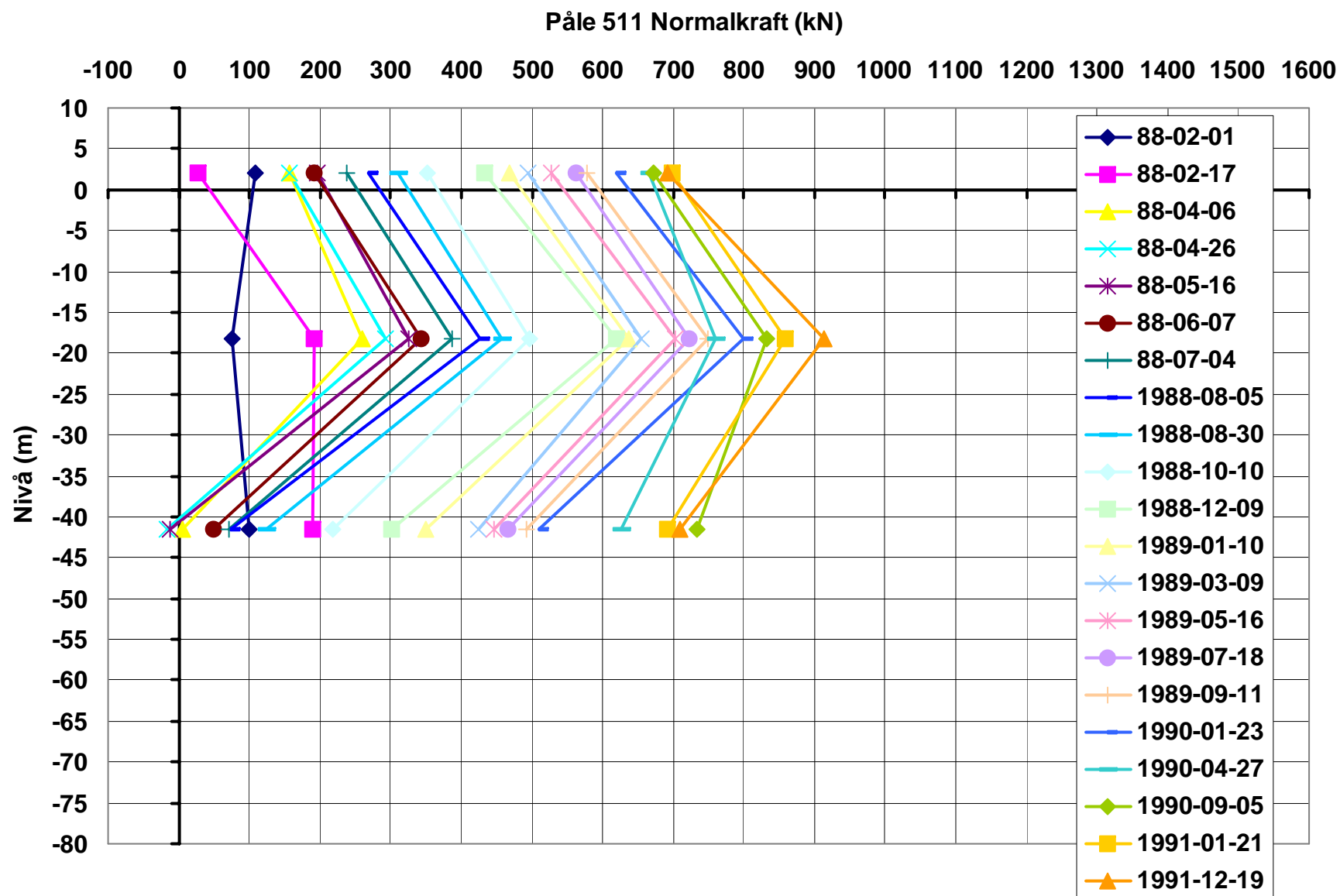
Resultaten från uppföljningarna visar att sättningarna i omgivande mark är större än byggnadens sättningar. Bålgslangsmätningar visar att de sättningarna i huvudsak pågår ner till ca 15 meters djup från markytan. Sättningarna ger upphov till betydande påhängslaster på pålarna. Påhängslasterna förändras med tiden, de är relativt små till att börja med för att sedan öka med tiden allteftersom sättningarna i utbildas i lerlagren.

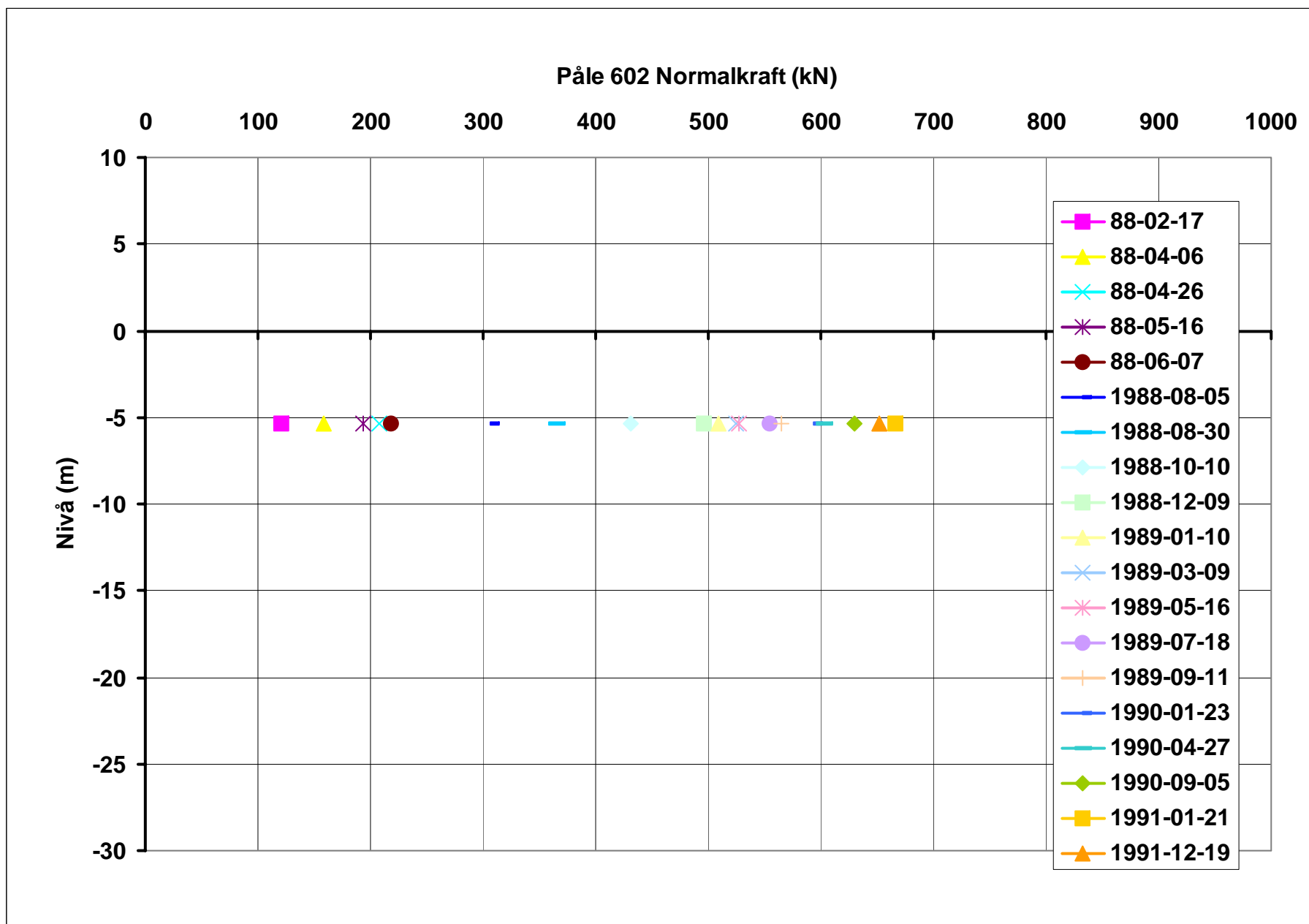
Resultatet från uppföljningen av deformationer och laster i pålarna visar att:

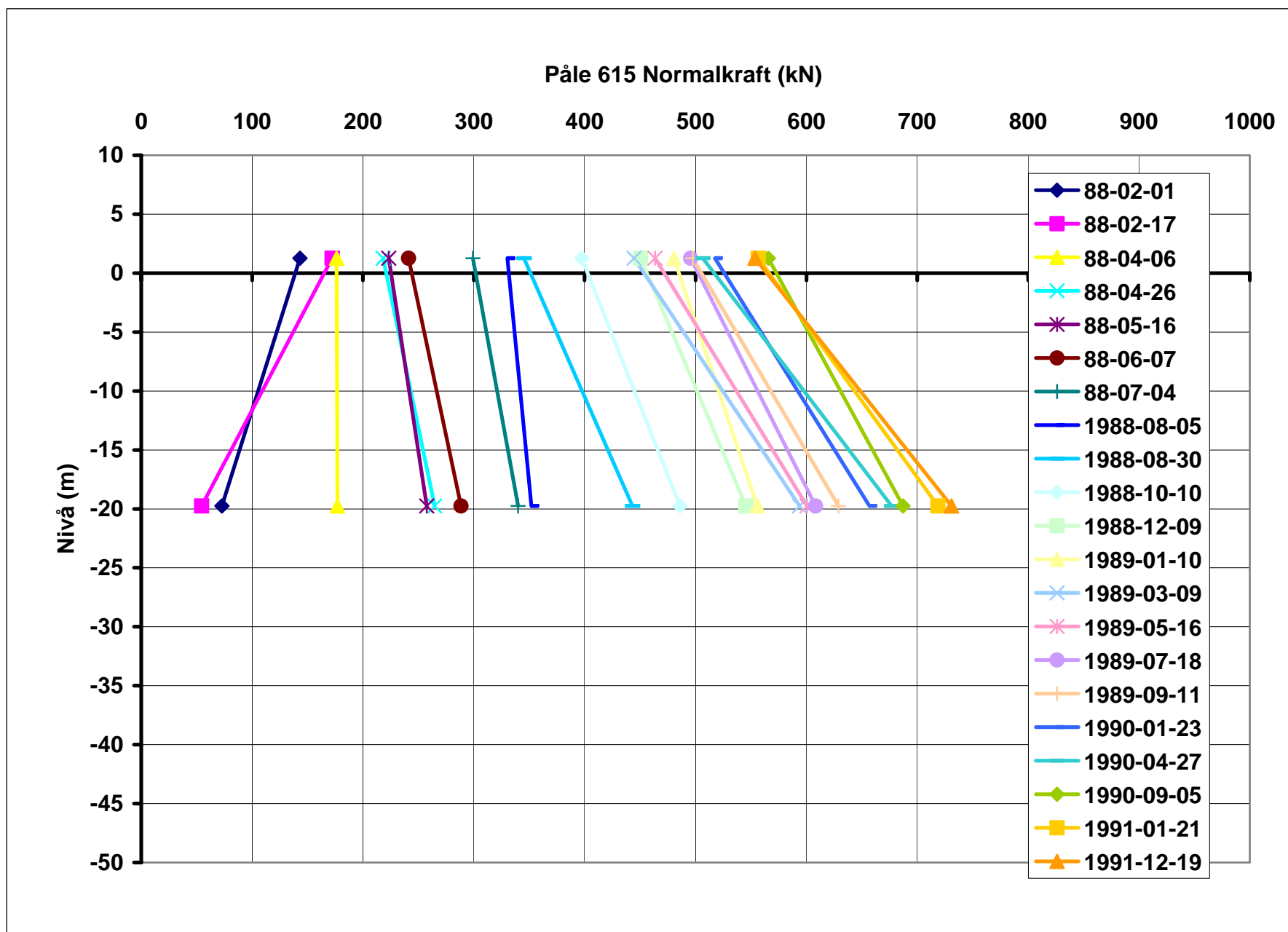
- Instrumenteringen av pålarna som utfördes 1987 har fungerat så att mätresultat har kunnat erhållas fram till 1999.
- Påhängslasterna ökar med ökad längd på pålarna.
- Den styva grundläggningen jämnar ut sättningarna under byggnaden. Påhängslasterna och pållasterna tycks vara mest beroende av pålarnas längd.
- Effekten av påhängslaster kan bli betydande då grundläggning utförs med långa pålar i mäktiga lösa lerlager.
- Mätresultatet ger påhängslaster som stämmer väl överens med teorin om neutrala punkten.
- Grundläggning på långa pålar i mäktiga lerlager kräver pålar med hög lastkapacitet, speciellt i zonen kring den neutrala punkten.
- Det är av avgörande betydelse för dimensioneringen av pålelement att pågående sättningar utreds både till storlek och läge i jordprofilen.

## Referenser

- Alte, B., Olsson, T., Sällfors, G., & Bergsten, H.** (1989). Djupdykning i Göteborgsleran, Bo Alte AB & Chalmers tekniska högskola, Rapport Göteborg.
- Bjerin, L.** (1977) Påhängskrafter på långa betongpålar. Report No 2, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Broms, B.** (1979). Negativ mantelfriktion längs pålar, Rapport 60, Pålkommisionen, Stockholm.
- Claesson P.** (2003). Long term settlements in soft clays, Doktorsavhandling, Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Claesson, P.** (2001). Avvägningsresultat från Göta Älv bron, personlig korrespondens med Johan Edin, Gatubolaget, Göteborg.
- Eriksson, P., Jendeby, L., Olsson, T. & Svensson, T.** (2004). Kohesionspålar, Rapport 100, Pålkommisionen, Linköping.
- Fredén, C.** (1994). Berg och jord, Bra Böcker, Höganäs.
- Jacobson & Widmark AB och Geoseniör Bo Alte** (2001). Lindholmen / Lundby Strand, Norra Älvstranden, PM nr 1 - Redogörelse för områdets historik, jordlager, geohydrologi samt jämförelse med och erfarenheter från Lilla Bommen, Göteborg.
- Olsson, C. & Holm, G.** (1993). Pågrundläggning, AB svensk Byggtjänst och Statens geotekniska institut, Linköping.
- Skanska AB** (1987a). Projekteringsutlåtande över grundundersökning för nybyggnad inom kvarteret Guldet, Göteborg.
- Skanska AB** (1987b). Dimensioneringsprinciper för grundläggning av höghuset, Lilla Bommen, Göteborg.
- Skanska Teknik AB** (1988). Precisionsavvägning plan, Lilla Bommen, Låg- och höghuset, ritning nr 3144-870.015/101, Göteborg.
- VBB** (1988). PM angående grundförhållanden och grundläggning för P-däck i kv Silvret, P6764, Göteborg.
- Vägverket** (2000) Förfrågningsunderlag Väg 45, GÖTATUNNELN, Entreprenad L2., TBt/geo301 L2, Göteborg.

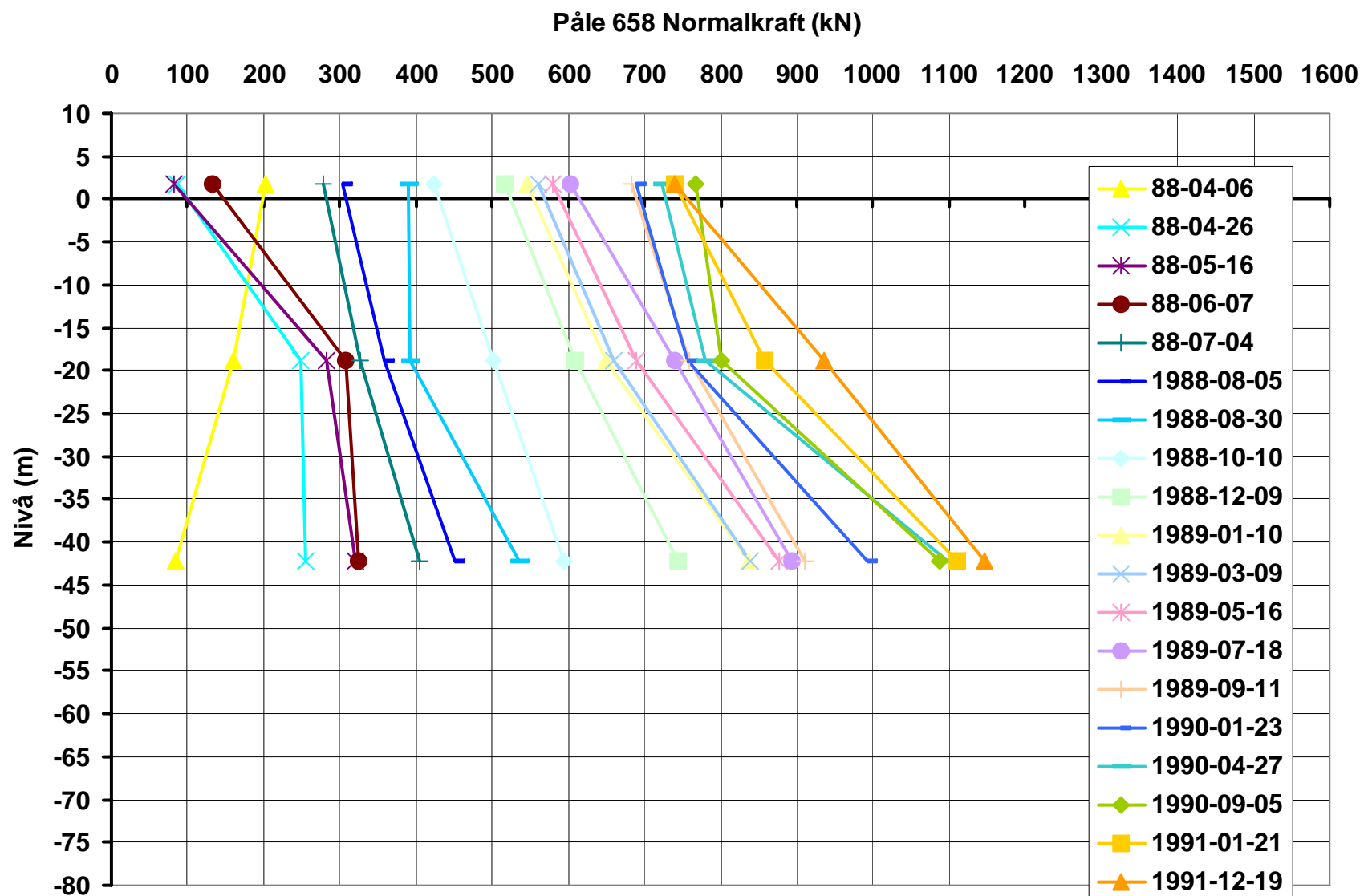


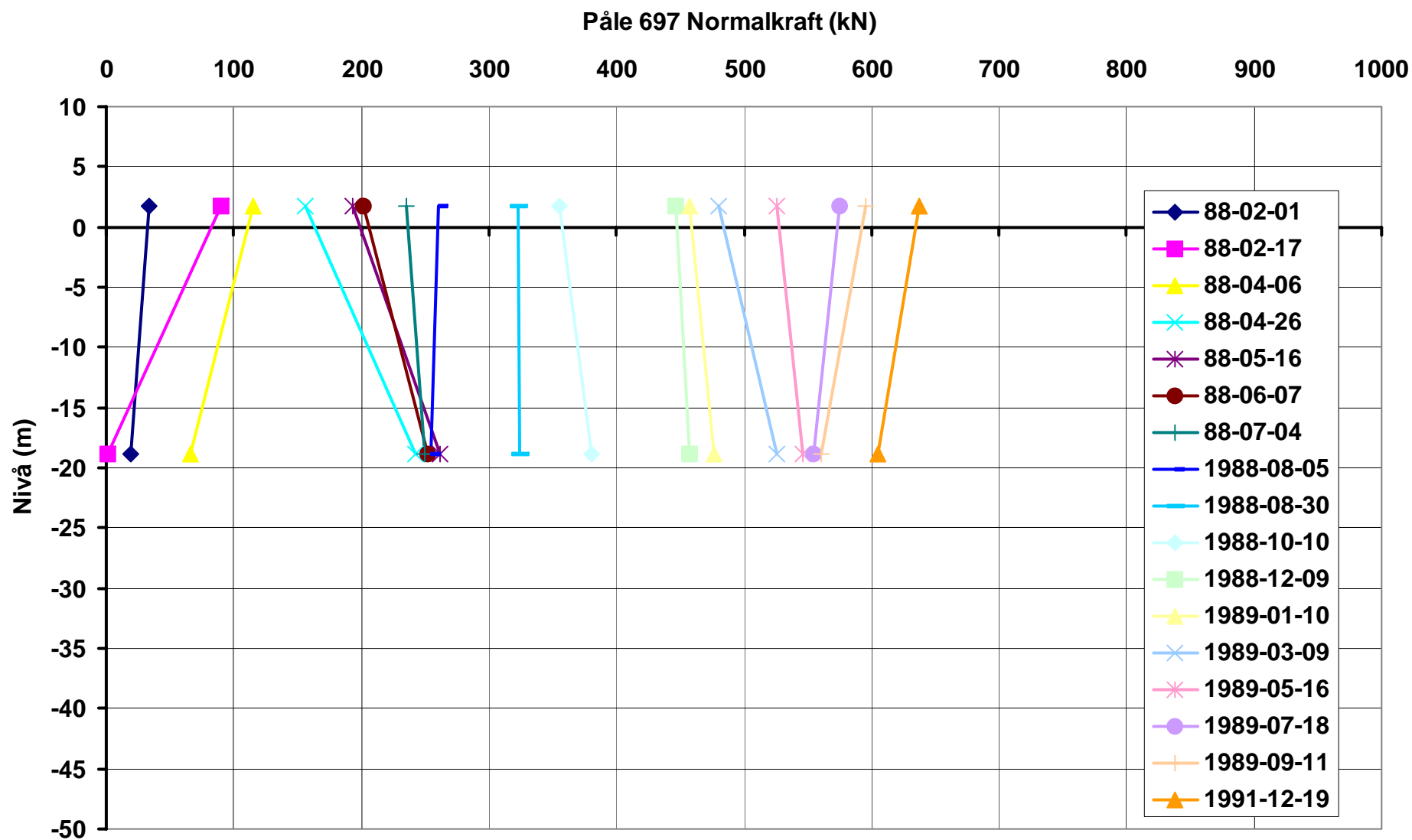




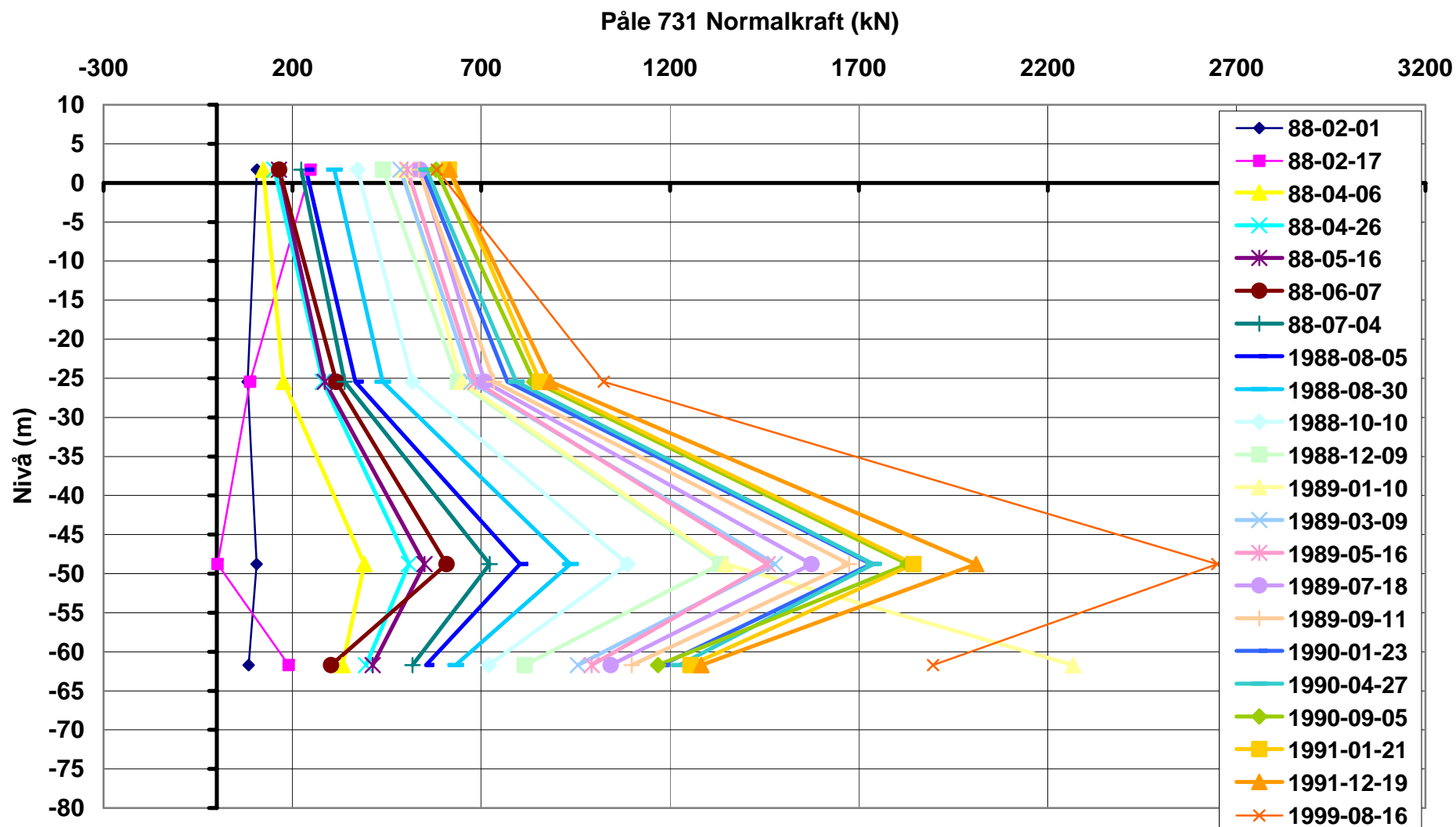










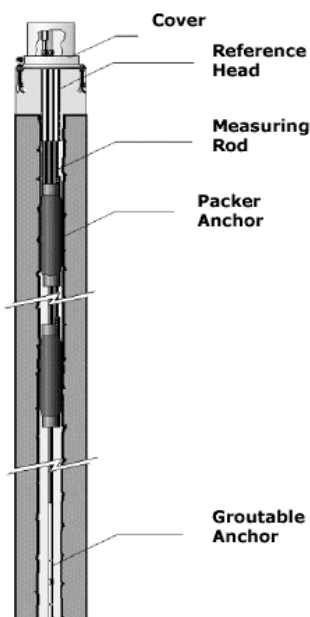


## **Bilaga B**

Boart Longyear - Interfels i Tyskland har ett mätsystem kallat MPBX extensometer. I pålent är mättrådar fastgjutna på olika nivåer. Dessa samlas i pålskallen där trådarnas relativa förskjutning registreras med hjälp av en datalogger. Metoden är närmare beskriven i databladet i figur abc nedan.



## MPBX Extensometer - Automated



### Applications

Borehole rod extensometers serve to measure lengths between two or more anchor points in a borehole and a reference head at the borehole collar. They ensure high precision, even at great installation depths.

Typical areas of application include the monitoring of:

- Movements of rock and soil, caused by fractures, landslides and weathering
- Underground settlements and deformations of foundations and abutments, as well as man-made caverns
- Relaxation and deformation of rock around tunnel walls, shafts, pillars, roofs and caverns

### Installation

For a 2-point rod extensometer one usually requires a 60-mm size borehole, for a 4-point rod extensometer a 76mm size borehole and for a 6-point extensometer system a 96mm size borehole.

**Head covers** that are weather-proof protect the vulnerable displacement transducers and reference heads. A complete multi-point borehole extensometer head comprises a number of single point reference heads and a base plate.

**Single point reference heads** provide the connection between measuring rod and displacement transducer.

**Stainless steel base plates** are used to position and mount the extensometer head over the borehole

**Extensometer measuring rods** are made of either fibreglass or stainless steel. Extensometers using fibreglass rods can be pre-assembled at the factory coiled and shipped to the site, ready for installation. In general fibreglass rods are easier to install in confined areas such as tunnels and are preferred over stainless steel in alkaline environments.

Extensometers using stainless steel rods (supplied in 3 mtr lengths) must be assembled on site. Stainless steel rods in general are stiffer than fibreglass rods and are therefore preferred when compression rather than extension is likely or when larger lengths of rods are required. Furthermore stainless steel rods are easily adapted in length when the exact installation depths are not known at time of order.

**Protective tubing** is installed with the rods to prevent bonding of the rods with the grout or surrounding soil.

**Groutable anchors** are used in compact rock and non-cohesive soil conditions.

**Packer anchors** are used in soft soil conditions, granular materials and are recommended for up-hole installations. The packer anchors are inflated with cement through an injection tube.

**Bayonet locks** are optional and provide a connection between packer anchor and measuring rod.

**Centering discs** are used to equally place the measurement rods in a borehole when using a multiple point installation. Recommended for up-hole installations.

### Advantages

- Robust and economical construction
- High precision
- Practical and easy installation in all directions as well as all types of rock and soil
- Suitable for short or long term monitoring
- Mechanical and Automated readout options

Fig ABC

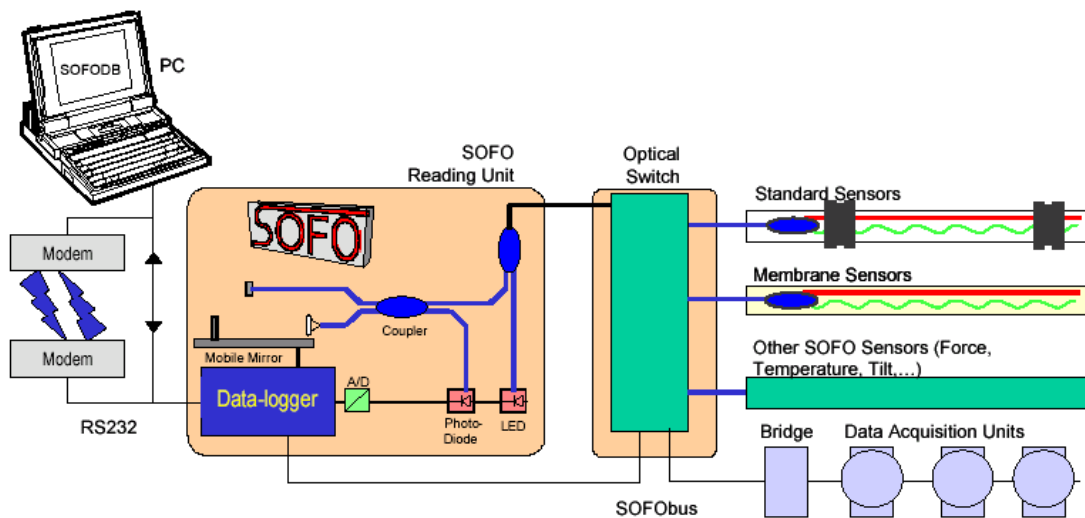
MPBX Extensometer, Boart Longyear - Interfels



Ett annat liknande system (SOFO) är utvecklat av Smartec i Schweiz. Systemet bygger på att fiberoptiska sensorer gjuts in på olika nivåer i pålarna. Även här utförs insamlingen med datalogger. En översiktsskiss av systemet finns i figur DEF nedan.



Data Sheet



**SOFO® measurement technique**

The SOFO measuring system is based on the principle of low-coherence interferometry (see figure). The infrared emission of a light emitting diode (LED) is launched into a standard single mode fiber and directed, through a coupler, towards two fibers mounted on or embedded in the structure to be monitored. The measurement fiber is in mechanical contact with the structure itself and will therefore follow its deformations in both elongation and shortening. The second fiber, called reference fiber, is installed free in the same pipe. Mirrors, placed at the end of both fibers, reflect the light back to the coupler which recombines the two beams and directs them towards the analyzer. This is also made of two fiber lines and can introduce a well known path difference between them by means of a mobile mirror.

On moving this mirror, a modulated signal is obtained on the photodiode only when the length difference between the fibers in the analyzer compensates the length difference between the fibers in the structure to better than the coherence length of the source (in our case some hundreds of mm).

Each measurement gives a new compensation position reflecting the deformation undergone by the structure relatively to the previous measurement points.

The Reading Unit can therefore be disconnected and used to monitor other fiber sensors and other structures. If multiple sensor need to be measured automatically, in optical switch is installed. The SOFO unit is capable of storing measurements and later transfer them to the data acquisition PC via a cable or a modem. Conventional (electrical) data acquisition devices can be connected to the SOFObus.

Figur DEF SOFO-system, Smartec