

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 82

BETA-METODENS ANVÄNDNING FÖR PRAKTISKA

BERÄKNINGAR VID PÅLGRUNDLÄGGNINGAR

En förstudie

<i>Claes Alén</i>	<i>NCC-Teknik</i>
<i>Mats Jansson</i>	<i>SGI/IVA:s Pålkommision</i>
<i>Hans Lindgren</i>	<i>HERCULES Grundläggning AB</i>
<i>Lars Olsson</i>	<i>KTH/Tyréns Företagsgrupp</i>
<i>Jan Romell</i>	<i>Pålgruppen Geomekan/Skanska Teknik</i>

Pris: 150:-

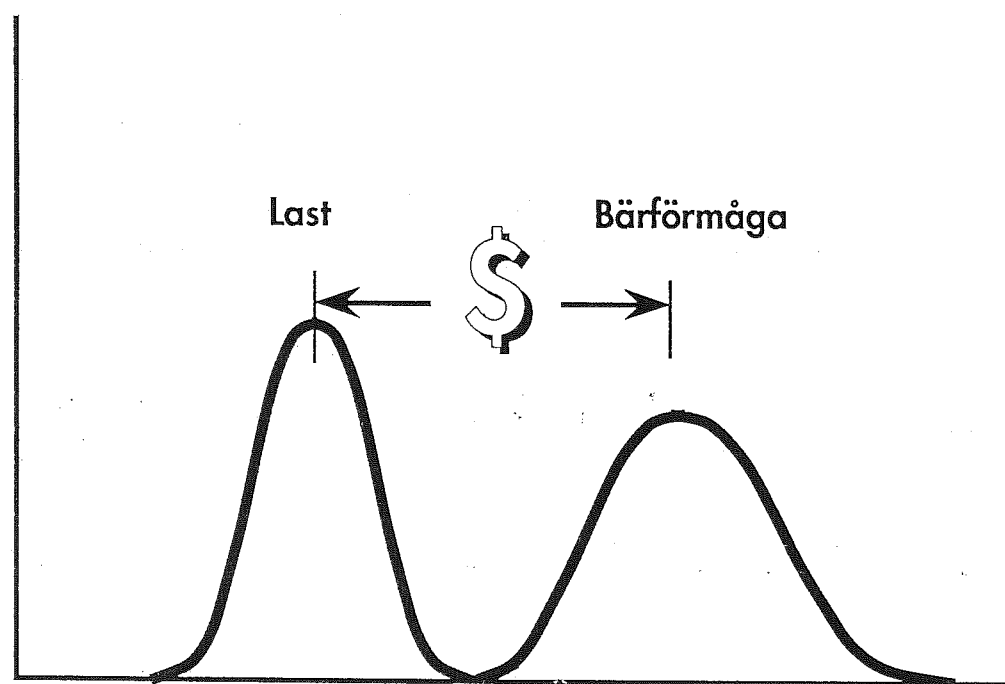
Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
88 08 30 - 2 från Byggforskningsrådet till
HERCULES Grundläggning AB, Göteborg

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

β -metoden vid pålberäkning en förstudie



Claes Alén
Mats Jansson
Hans Lindgren
Lars Olsson
Jan Romell



rapport 82

PÅLKOMMISSIONEN

I september 1959 bildades Pålkommittén för påslagning och påbärighet. Efter några år införlivades kommittén med Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA) och fick då sitt nuvarande namn IVA Pålkommissionen.

Pålkommissionen har till uppgift att bedriva forsknings- och informationsverksamhet inom pålningsområdet. Medlemmar är entreprenörer, tillverkare, konsulter, forskare, kommuner samt representanter från olika myndigheter. Till grund för kommissionens verksamhet ligger samhällets och branschens behov av forskning och information inom pålningsområdet. Verksamheten finansieras dels med årliga kostnadsandelar från medlemmarna, dels med forskningsanslag från Byggforskningsrådet (BFR).

Ytterligare upplysningar om Pålkommissionens verksamhet och medlemskap lämnas av kommissionens sekreterare Mats Jansson, Statens geotekniska institut, tel. 013-11 51 00.

FÖRORD

Rapporten, som är en förstudie med medel från BFR, beskriver en i pålningssammanhang mycket lämplig dimensioneringsmetod byggd på statistik. Metoden passar bra in i regelverket Nybyggnadsreglerna till PBL och kan användas för bestämning av partialkoefficienter. I rapporten redovisas ett antal typfall där pålarna delats in i olika klasser utgående från verkningssätt. Den innehåller även beräkningsexempel som illustrerar hur β -metoden praktiskt kan användas.

Rapporten vänder sig till de som är intresserade av hur β -metoden kan utnyttjas vid dimensionering av pålgrundläggningar, dvs myndigheter, projektörer och entreprenörer. Då metoden är generell kan den även utnyttjas i andra sammanhang i byggbranschen där samband kan beskrivas statistisk.

Göteborg och Stockholm i juni 1990

Författarna

ISSN 0347-1047

ISRN IVA/PAL/R--90/82--SE

90-03-09

BFR - PROJEKT 880830-2

SLUTRAPPORT FÖRSTUDIE

<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</u>	<u>SIDA</u>
0. SAMMANFATTNING	1
1. NÄSTA STEG	2
2. TERMINOLOGI	4
- Stickord	4
3. BAKGRUND TILL ARBETET	10
4. PBL - NR - (NORMEN)	12
- Plan- och bygglagen (PBL)	12
- Departementets syn "Öppning"	12
- Boverkets syn	12
- Eurocode	14
- Partialkoefficienter/Statistisk dimensionering	14
- Datoriserade mätmetoder	15
- Handbok/Upphandling/Juridik	16
- "Billigare konstruktioner"	16
5. AKTUELL SKADEBILD	17
- Om skador på pålar	17
- Integritet	19
6. RISKMINIMERING	20
- "Boven i dramat"	20
- Grova fel	21
7. DIMENSIONERING AV PÅLAR	23
- Brottgränstillståndet	23
- Geostatisk beräkning	23
- Verifiering genom provbelastning	24
- Bruksgränstillståndet	27
- Fåtalsprovning	28
- Utkast till beräkningsmodell	30
8. UTBILDNING/ INFORMATION	34
9. KLASSNING AV PÅLAR	35

10.	β -METODEN	37
-	Sammanfattning	37
-	Inledning	37
-	Stokastiska variabler	38
-	Säkerhetsmarginalen uttryckt som stokastisk variabel	39
-	Spridningens inverkan på β	40
-	Sensitivitetsfaktorer	41
-	Samband med partialkoefficienter	43
11.	UPPMÄTTA PÅLDATA	44
-	Statistisk sammanställning	44
-	Statistisk analys av påldata	52
12.	UTFÖRDA BERÄKNINGAR	54
-	Sammanfattning av resultat	56
-	Totalsäkerhetsfaktor	57
	LITTERATURHÄNVISNING	59
BILAGOR	Integritet	
	Case-metoden	
	Beräkningsbilaga	

0. SAMMANFATTNING

β -metoden är ett utmärkt projekteringshjälpmedel inom geotekniken.

Vi kan jämföra risker vid olika grundläggningsalternativ och åstadkomma en ekonomiskt optimal dimensionering.

Med hjälp av β -metoden har vi möjlighet att på åskådligt sätt beskriva vår samlade kunskap baserad på erfarenhet och mätningar.

Metoden är enkel att applicera på pålning och lätt att tillämpa.

Olika kontrollåtgärder kan "värderas" och "rätt nivå" av *kontroll* bestämmas.

Säkerhetsindex β är ett i Nybyggnadsreglerna accepterat sätt att verifiera en konstruktions tillräckliga *bärförmåga*, *stadga* etc.

Vid användande av *partialkoefficienter* kan vi kalibrera dessa med β -metoden. Alternativt kan vi använda metoden för att bedöma "riktigheten" av empiriskt valda partialkoefficienter.

Kursivt ord är upptaget i Stickordsförteckning.

1. NÄSTA STEG

Inom ramen för denna studie har β -metodens tillämpning inom pålningsområdet undersökts och visat sig vara mycket användningsbar både ur teoretisk beräkningssynpunkt och ur ekonomisk.

Samtidigt som detta konstaterats, har även olika problemområden identifierats, som kan komma att försena/försvåra implementeringen av metoden inom detta och angränsande användningsområden.

För att därför påskynda och undanröja hindren för β -metodens tillämpning i större skala, föreslår vi i förstudiegruppen att följande områden prioriteras med fortsatt stöd.

- * INFORMATIONSSINSATSER

- * REMISSORGAN FÖR STATISTIK I GEOTEKNIKEN

- * BESTÄMNING AV MODELLOSÄKERHETER

- * UTBILDNING/UNDERVISNING I STATISTIK

- * DEFINITION AV FÅTALSPROVNING

- * AKTUELL SKADEBILD

- * STOKASTISK JORDMODELL

- * INFORMATIONSSINSATSER

Lämpligen utförs ett väl förberett och planlagt "informationsseminarium", som riktar sig till lämpliga beslutsfattare inom departement, näringsliv och myndigheter. Detta skall då resultera i en ökad kunskap och ge möjligheter för vidare spridning och användning av β -metoden.

- * REMISSORGAN FÖR STATISTIK I GEOTEKNIKEN

För att åstadkomma en gemensam syn och tolkning på frågor av statistisk karaktär inom geotekniken, föreslås att "Säkerhetsgruppen" inom SGS pånyttföds och ges förutsättningar att fungera som remissorgan.

* **BESTÄMNING AV MODELLOSÄKERHETER**

Ett område som sparsamt har undersökts är olika modellers matematiska osäkerhet. Inledningsvis kan dessa definitioner undersökas på för pålningsområdet typiska modeller typ CAPWAP och CASE.

* **UTBILDNING/UNDERVISNING I STATISTIK**

Eftersom grundförutsättningarna för tillämpning och beräkning enligt β -metoden skall vara förmågan att hantera storheter, som skall behandlas, så krävs en större insikt i *statistik*. Detta kräver därför utbildnings-/informationsmaterial på olika nivåer inom tillämpad statistik. Undervisning i riskbaserad dimensionering bör införas vid högskolorna.

* **DEFINITION AV FÅTALSPROVNING**

Idag föreligger inga entydiga definitioner vad som menas med fåtalsprovning och de som föreligger ger ibland orimliga konsekvenser.

Därför framstår det som angeläget att närmare utforma och förtydliga innebörden av detta begrepp.

* **AKTUELL SKADEBILD**

Vid pålningsarbeten utförs ingen systematisk uppföljning av förekommande skador. För att få en bättre uppfattning om förekomsten bör en utförlig skadestudie göras i kommande utredning.

* **STOKASTISK JORDMODELL**

För att man skall kunna utnyttja β -metoden vid geotekniska pålberäkningar och för att fullt ut tolka provdata behöver man en bra metod för att modellera jorden i statistiska termer.

2. TERMINOLOGI

Stickord

β-metoden	Statistiskt baserad dimensioneringsmetod som ger ett riskmått (säkerhetsindex β) och en sensitivitetsanalys.
Statistik	Konsten att dra slutsatser ur en samling sifferuppgifter. Jämför: "Det finns tre sorters lögn: Lögn, förbannad lögn och statistik".
Medelvärde	Den statistiska fördelningens tyngdpunkt. Ett lägesmått.
Standardavvikelse	Den statistiska fördelningens tröghetsradie. Ett spridningsmått.
Variationskoefficient	Kvoten mellan standardavvikelse och medelvärde. Ett normaliserat spridningsmått.
Säkerhetsindex	β. Ett ställföreträdande riskmått. Kan under vissa förutsättningar översättas till sannolikhet.
Sannolikhet	Ej definierat vad det är! Kan tolkas frekventistiskt (gynnsamma utfall/totala antalet vid många försök) eller subjektivt (grad av tilltro till ett påstående). Följer vissa axiom.
Deterministisk	Helt bestämd.
Stokastisk	Slumpartat varierande enligt givna sannolikhetslagar. (Från grekiskan: Konsten att träffa rätt [med antagande]. Jämför ingenjörskonst!)

BBK 79

"Nya" betongnormen. Normen baseras på beräkningar med partialkoefficienter och "gränstillståndsdimensionering" (Eng Limit State Design). I samband med utgivandet av Nybyggnadsregler (NR) har tvingande föreskrifter i BBK lyfts över till NR medan övriga delar av BBK "endast" har status av handbok.

Totalsäkerhetsfaktor

Kvoten mellan bärförmågan hos en konstruktion och laster/lasteffekter på densamma. Traditionellt sätt att bedöma "säkerheten" hos en konstruktion. Totalosäkerhetsfaktor är egentligen en mer rättvisande beteckning.

Partialkoefficient

"Lokal" säkerhetsfaktor. Ett sätt att separera inverkan av osäkerheter med olika ursprung och verkan. Huvudmetod för att beskriva osäkerheter i NR.

Bärförmåga

Här används beteckningen bärförmåga för samspillet mellan konstruktionselement (t ex pålen) och jorden och beror då oftast på jordens egenskaper som ex vis friktionsvinkel och skjuvhållfasthet.

Stadga

En byggnadsdel och dess upplag skall enligt PBL ha sådan styvhet att deformationer eller förskjutningar (t ex sättningar) inte menligt inverkar på dess funktion. Detsamma gäller att besvärande svängningar ej skall uppkomma för dem som vistas i byggnaden.

Beständighet

Byggnadsdelar och material i bärande konstruktioner skall enligt PBL vara beständiga eller skyddas och underhållas, så att kraven i brottgräns- och bruksgränstillstånden uppfylls vid förväntade miljöpåverkningar under byggnadens användningstid.

Brottgränstillstånd	Tillståndet omedelbart före brott benämns brottgränstillståndet. Detta definieras av att bärförmågan är lika med lasten. Alternativt att deformationer är så stora att samverkande konstruktioner kollapsar av de påtvingade rörelserna.
Bruksgränstillstånd	Ett tillstånd där en konstruktion inte längre kan användas som avsett. Kriterier för detta tillstånd kan vara för stora deformationer, för stora sprickbredder etc.
PBL	Plan- och bygglag, Svensk författningssamling, SFS 1987:10.
NR	Boverkets författningssamling, BFS 1988:18 NR 1, Boverkets nybyggnadsregler (föreskrifter och allmänna råd) till PBL.
EG	Europeiska Gemenskapen
CEN	Comité Européen de Normalisation, Västeuropeiska Standardiseringsorganisationen gällande teknik.
EN	Euronorm, Europastandard
CEN/TC	Teknisk kommitté inom CEN som framtager Europastandard, EN.
EC	Eurocode, en form av EN med last och dimensioneringsregler för konstruktioner.
Geoteknisk Klass	En geokonstruktion skall utföras i någon av de geotekniska klasserna GK1, GK2 och GK3. GK1 motsvarar de lägsta kraven på verifiering och kontroll, medan GK3 motsvarar de högsta kraven.

Säkerhetsklass	Ett sätt att bedöma konsekvenserna av ett brott vid dimensionering i brottsgränstillståndet. I NR görs denna bedömning enbart utifrån risken för personskador. (Säkerhetsklass 1-3.) Egendomsskador är "normmässigt" den resandes egen ensak.
Funktionskrav	Anger en önskvärd egenskap i stället för en detaljerad teknisk lösning.
Stötvågsmätning	Mätning av stötvågens kraft- och accelerationsförlopp under ett hejarslag vid pålning för bestämning av en påles bärförmåga och integritet.
Integritet	Med en påles integritet avses förekomst och storlek av skador och skarvglapp längs pålens längd.
"Boven i dramat"	Vid dimensionering av ett sammansatt systems totala risknivå består detta av de ingående komponenternas delrisker. Med sensitivitetsfaktorn i β -metoden kan den farligaste komponenten lokaliseras.
Sensitivitetsfaktor	Faktor som fås som ett delresultat vid säkerhetsindexberäkning. Visar den relativa vikten hos varje variabel när det gäller totala risken.
Grova fel	Fel som ej kan förutses. Ofta av typ "human errors". "Grov" har ingen koppling till konsekvenser.
Signatur	Här: Sammanställning av olika egenskaper med vilkas hjälp en påle kan placeras i en klass av likartade.

Proving

Med provning undersöker jag vilka egenskaper ett speciellt föremål har. Antingen direkt eller indirekt. Ex pålning: Stötvågsmätning, Statisk provbelastning eller dylikt.

- Provning kan försiggå vid olika tidpunkter i ett projekt. Före, under hand eller efter.
- Provning kan vara direkt eller indirekt.
- Provning avser alltså själva sättet med vilket jag undersöker egenskaper.

Ex Dimensionering genom provning
contra
Dimensionering genom beräkning

Kontroll

Förutsättningen för att en kontroll skall kunna utföras är att det föreligger en förhandsutsaga, spelregler, om någonting.

Ex: "De här pålarnas brottlast är mer än 1000 kN. Pålarnas läge får inte avvika från förutsatt läge med mer än 100 mm."

Genom en kontroll undersöker jag om det kontrollerade föremålet uppfyller förhandsutsagans krav. Kontrollen kan utföras på olika sätt, t ex genom en kontrollberäkning eller genom provning.

Genom kontroller bekräftar jag om förhandsutsagan är riktig eller ej.

Verifiering

Också verifiering förutsätter en förhandsutsaga. Vid verifiering kontrollerar jag riktigheten av själva förhandsutsagan.

Exempel på förhandsutsaga som kan verifieras: En sjunkning av högst 7 mm/10 slag ger en brottlast $> 1\,800$ kN.

Sammanfattande exempel
- Provning, kontroll, verifiering

Pålgruppen påstår att pålar installerade en viss specifikation har en brottlast på mer än 2500 kN.

Stämmer detta eller ej?

Efter slagning av pålarna utför man en provning genom stötvågsmätning. När resultatet av stötvågsmätningen föreligger har man kontrollerat sitt påstående.

Är det då så att brottlasten är 2700 kN har man även verifierat påståendet.

Är däremot brottlasten 2300 kN har man däremot kontrollerat men inte verifierat utsagan.

3. BAKGRUND TILL ARBETET

Inom pålningsindustrin har utvecklingen gått mot att använda olika mätmetoder (*stötstågmätning*, slagräkning m m) som mera exakt beskriver det verkliga förloppet vid utförandet. Därigenom har skapats möjligheter att bättre kunna ta tillvara den ökande kunskapen och erfarenheten för att dimensionera pålgrundläggningar med optimal teknik och ekonomi.

Detta synsätt har dock försvårats genom tillämpningen av den tidigare byggnormen, SBN 80, som konserverat ett äldre arbetssätt med inbyggda osäkerheter som krävt kostsamma lösningar utan att detta nödvändigtvis har ökat säkerheten.

Med införandet av senaste plan och bygglagen, *PBL*, och de därigenom tillkomna Nybyggnadsreglerna (*NR*), skapas dock helt andra förutsättningar att använda ett statistiskt dimensioneringsspråk för att kunna påvisa att en konstruktion uppfyller lagens krav.

Detsamma gäller även de regler som nu skapas för det gemensamma synsättet för byggandet inom *EG. Eurocode 7* som avhandlar grundläggningen bygger också på samma principer. Genom den ökade grad av internationalisering som sker, är det viktigt att de svenska byggreglerna ansluts till internationell, standard.

β -metoden är en statistisk metod att beräkna risker, både som säkerhetsindex och *sannolikheter*.

Det innebär att man kan beskriva **risk**en för att något **matematiskt specificerat** skall hända om ingående **osäkerheter** beskrivs **statistiskt**.

Denna metod har hittills haft svårigheter att komma till nytta kommersiellt, men just inom påslagningsverksamheten visar sig detta beräkningssätt vara till mycket stor hjälp.

Detta projekt avser en förstudie med dokumentation av utförda analyser av β -metodens användning och möjliga anpassning till problemställningar som rör pålgrundläggningar. Härigenom skapas då underlag för att fastställa under vilka förutsättningar som β -metoden kan bli ett praktiskt verktyg i projektering, byggande och kvalitetssäkring.

Samtidigt framstår det som helt klart att β -metoden är av mycket generell karaktär, varför den äger tillämpning på många andra områden. Men genom att testa den inom ett begränsat område som pålningsområdet kan förståelse skapas för detta synsätt och exempel tas fram som sedan kan anpassas till liknande områden.

4. PBL - NR - (NORMEN)

Plan- och bygglagen (PBL)

Sedan 1 juli 1987 gäller Plan och Bygglagen (PBL) som reglerar villkoren för byggandet.

PBL Kapitel 3:

4 § "Byggnaders grundkonstruktion, stomme och andra bärande delar skall ha betryggande bärförmåga, stadga och *beständighet*. Övriga byggnadsdelar skall ha en med hänsyn till ändamålet tillfredsställande hållfasthet."

I förarbetet till denna lag har tydligt uttalats ambitionen att ansvaret för det tekniska utförandet av en byggnad ytterst skall tas av den som bygger. Byggherren och hans medhjälpare, t ex konsulter, projektörer, entreprenörer m fl skall svara för att kraven i *brott- och bruksgränstillståndet* kommer att uppfyllas.

Departementets syn "Öppning"

Samhället kräver att det som byggs skall uppfylla krav på säkerhet, hälsa m m.

Detta kommer bl a att innebära att det tidigare ansvarsförhållandet, där samhället genom kommunens byggnadsinspektion skulle granska och godkänna allt i samband med byggandet, delvis ersättes av andra kontrollfunktioner. Detta mer "öppna" synsätt måste då kompenseras av nya adekvata instrument för att säkerställa önskade krav.

Utöver Byggherrens egenkontroll och byggnadsinspektionens kontroll, vars omfattning beror på byggherrens kompetens, kommer olika typer av kvalitetssäkringsprogram att accepteras för att garantera slutkraven.

Boverkets syn

På uppdrag av Bostadsdepartementet har Boverket (skapat 87-07-01 vid en sammanslagning av Statens Planverk och Bostadsstyrelsen) fått i uppgift att formulera lagens krav på byggandet i mera tillämpliga regler.

Detta resulterade i utgivningen av den nya normen Nybyggnadsregler (NR). NR kom ut under våren 1989 med giltighet från och med 1 januari 1989. SBN

80 får idag användas parallellt med Nybyggnadsreglerna t o m 31 december 1990.

Utformningen av Nybyggnadsreglerna innebär mycket stora förändringar mot gamla SBN 80 speciellt vid byggande i mark som nu behandlas under kapitlet 6 Konstruktioner.

Grundläggningsfrågor behandlas i Kap 6:3 Geokonstruktioner.

I inledningen till kapitel 6 beskrivs att "en geokonstruktion skall utformas med hänsyn till den samverkan som råder mellan de delar som ingår i konstruktionen såsom grundkonstruktion och undergrund".

I detta sammanhang uttalas även tydligt kravet på samråd mellan en sakkunnig geotekniker och statiker.

I NR beskrivs hur lagens krav på byggnaders grundkonstruktion skall utformas för att få betryggande bärförmåga, stadga och beständighet.

Mera uttalat än tidigare normer som ingående beskrev i detalj hur arbetet skulle utföras, så har kraven tydligare utformats som *funktionskrav*.

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- SÄKERHET MOT BROTT- FUNKTION VID NORMAL ANVÄNDNING- BESTÄNDIGHET |
|--|

Detta kommer att innebära att tidigare lösningar kan användas men även andra som uppfyller funktionskraven kommer att accepteras.

Eurocode - Upprättande av gemensamt västeuropeiskt byggregel- och godkännandesystem

Under mitten av 90-talet torde de svenska byggreglerna komma att ersättas av gemensamma västeuropeiska regler. Dessa regler *EN* kommer att på EG- och EFTA-mandat framtagas av *CEN/TC*, d v s den tekniska kommittén inom den västeuropeiska standardiseringskommissionen *CEN*. Den särskilda typ av EN-standard som berör beräkningsregler för konstruktioner kallas för **Eurocode, EC**. Eurocode är uppdelad i flera delar och EC7 är den del som berör geoteknik och grundläggning. Liksom i svenska Nybyggnadsreglerna NR uttrycks det att grundkonstruktioner skall utformas så att de får betryggande bärförmåga, stabilitet, funktionsduglighet och beständighet. Eurocode är liksom NR uppbyggd på partialkoefficientmetoden.

Partialkoefficienter/ Statistisk dimensionering

Genom anslutning till internationell praxis vid dimensionering med s k partialkoefficienter övergår man från ett tidigare synsätt, där säkerheten låg inbakad i materialens tillåtna påkänningar, till att visa att det finns tillräcklig säkerhet mot brott.

Större säkerhetstal läggs t ex på svårbedömda laster, mindre på egentyngho s v.

När det gäller funktionskravet för brottsäkerhet så innebär det att:

$$R > S$$

där

R = Bärförmåga

S = Last

Verifiering av funktionskravet ovan kan göras med hjälp av normens förslag till partialkoefficienter alt med statistik, där β -metoden är en accepterad metod.

För att kunna hantera olika typer av geokonstruktioner finns i NR indelningen i olika *Geotekniska klasser*, **GK1, GK2 och GK3**, där GK1 står för den enkla och GK3 för den avancerade geokonstruktionen.

Säkerhetsaspekten med avseende på konsekvensen vid brott för personskada avgör vilken **Säkerhetsklass** som byggnaden skall hänföras till, där säkerhetsklass 1 innebär risk för ringa personskada medan säkerhetsklass 3 innebär stor risk.

Riskbegreppen är sedan kopplade till valet av partialkoefficienter.

Statistiska analyser t ex β -metoden ger en möjlighet att analysera olika faktors betydelse för säkerheten och beskrivs av representanter för Boverket som ett sätt att finna "*boven i dramat*". Åkerlund (1989).

Eftersom byggandets krav nu formuleras som funktionskrav men även krav på beständighet blir kopplingen till ekonomiska avgöranden tydligare. β -metoden innebär också bättre möjligheter att kunna hantera den sortens avväganden.

Datoriserade mätmetoder

Ett sätt att ersätta tidigare regler och kontrollmekanismer är att dimensionera och jämföra med tidigare erfarenheter.

Genom tillgången på moderna mätinstrument och kraftfulla datorer kan man idag samla in stora mängder data från produktionen. Genom bättre och säkrare beräkningar och analyser baserade på verkliga produktionsdata kan flera dimensioneringar utföras och olika alternativ studeras.

Med statistikens hjälp kan man därigenom finna säkrare och mera ekonomiska metoder. För detta krävs dock relevanta data som avspeglar de verkliga förhållandena och möjligheter att enkelt samla in och hantera dessa datamängder. Detta kräver en gemensam standard för beskrivning av de data som samlas in och lagras.

Inom pålningstekniken har under de senaste 10 åren utförts en stor mängd stötvågsmätningar som påvisat sambanden mellan teoretiska och verkliga värden för en påles bärförmåga och brottsäkerhet.

Denna förstudie exemplifierar möjligheten att utvärdera och beräkna sambandet mellan bärförmåga och last med hjälp av β -metoden.

Handbok/Upphandling/Juridik

Genom att NR, efter tydliga riktlinjer från departementet och önskemål från byggbranchen, innehåller färre detaljföreskrifter och fler funktionskrav finns ett behov av kompletterande råd och vägledning.

I ett projekt vid Statens Geotekniska Institut (SGI) finansierat av bl a Svensk Byggtjänst håller man på med en handbok i djupgrundläggning. Medverkande i denna är representanter från byggbranchen med olika erfarenheter av dimensionering, utförande och kontroll.

Eftersom denna handbok idag endast finns i koncept som ännu ej skickats ut på remiss torde det dröja innan den föreligger i tryck. Detta kommer sannolikt att fördröja tillämpningen av NR inom grundläggningsområdet.

Förseningen av handboken (som beror på NR:s omvälvande förändring och dess sena slutliga tillkomst) samt nya anvisningar för upphandling kommer att skapa viss förvirring mellan parterna i byggprocessen, vilket kan försvåra det nytänkande som behövs.

Samtidigt kommer ett mindre detaljerat regelverk för byggandet att innebära större variation på upphandlingskontrakt.

I samtliga ovan nämnda fall är det en förutsättning att man skaffar sig ett "neutralt" språk baserat på fakta. Ett statistiskt "språk" som β -metoden uppfyller dessa krav.

"Billigare konstruktioner"

Genom de tidigare många gånger osäkra dimensioneringsförutsättningarna som dessutom var svåra att kontrollera blev grundkonstruktionerna överdimensionerade med högre kostnader som följd.

Nybyggnadsreglernas krav skall, enligt departementets riktlinjer, ej höja den totala kostnaden för byggandet. Vissa krav kan dock leda till fördyringar. Bland de områden som genom förbättrade beräkningsrutiner kan bli mindre överdimensionerade och därigenom billigare utan att säkerhetskravet eftersättes är stommar och grundkonstruktioner. För att säkerheten då inte skall äventyras krävs bättre kontroll av utförandet och dimensioneringen. Detta kräver i sin tur ökad satsning och förståelse för kvalitetssäkringsinsatser.

5. **AKTUELL SKADEBILD**

Om skador på pålar

Detta är en kortfattad sammanställning av från praktiken kända orsaker till uppträdande skador på pålar som installeras genom slagning. Det är sådana skador som har betydelse vid val av säkerhetsmarginal från statistiska utgångspunkter.

Pålskador kan vara orsakade av:

1 Projekteringsfel t ex

olämpligt val av påltyp
otillräcklig information om geoförhållandena
olämpliga regler för slagningen
m m

2 Tillverkningsfel i påle och beslag t ex

betongens sammansättning
betongens hållfasthet
pålhuvudets utformning
armeringens kvalitet
armeringens utformning och placering i pålen
skarvbeslags och pålskos tillverkningstoleranser
skarvbeslags och pålskos infästning i pålen
m m

3 Installationsfel t ex

olämpligt slagdon
olämplig slagdyna
för hård slagning genom lösa jordlager
felaktig skarvning
för långvarig slagning
olämplig stoppslagningsregel
felaktig kontroll av innejsling i berg
felaktigt utförd funktionskontroll på skadad påle
pålkapning som försvagar påle
m m

- 4 **Åtgärder i installerade pålars närhet** som leder till skada på påle eller att den sätter sig, t ex
 - grundläggningsarbete i närheten
 - pålning till större djup än befintliga pålar är slagna
 - förändring av lasten på pålen genom ändring i överliggande konstruktion
 - förändring av omgivningsförhållandena som leder till påhängslast på påle
 - skada på påle vid schaktning intill e dyl
 - m m
- 5 **Korrosion och annan "åldring" av påle** och lastöverförande konstruktion (även förstörelse av trä)
 - korrosion orsakad av naturliga förhållanden
 - korrosion av ändring av naturliga förhållanden
 - korrosion av tillkommande förorening
- 6 **Övervärdering av bärförmåga** hos påle. Övervärderingen kan gälla nyslagen påle eller gammal påle som återanvänds.
- 7 **Åsidosättande av inverkan av olyckslast eller naturkatastrof.** Hänsyn till naturkatastrof, t ex jordbävning, tas normalt genom att införa särskild beräkningsförutsättning. Detta gäller länder där jordbävning utgör en reell statistisk risk. Risk för jordskred, av den typ som förekommer i Sverige, måste beaktas i projekteringen och kan endast i enstaka speciella fall kopplas direkt till säkerhetsvärderingen av pålarna ingående i en konstruktion.
 - m m

Ovanstående punkter 6-7 klassas lämpligen som projekteringsfel.

En fullständigare skadebeskrivning låter sig inte göras inom ramen för de medel som anslagits för denna förstudie. Det är emellertid angeläget att en utförlig skadestudie genomförs i en kommande utredning på grund av att de medverkande i byggprocessens olika faser i många fall inte överblickar alla inverkan faktorer. Det är därför risk att vissa sällan inverkan faktorer inte beaktas i fall där de har betydelse ur säkerhetssynpunkt.

Integritet

Med begreppet en påles *integritet* avses vanligtvis i vad mån pålelementen är behäftade med skador i betongtvärsnittet längs pålens längd samt eventuell förekomst av glapp i skarvar.

De tre vanligaste förekommande metoderna för att kontrollera en påles integritet är:

- Observation i inspektionshål med lodtolk.
- Dynamisk mätning av stötvåg initierad av ett lätt slagdon, ex handslägga (Low strain testing).
- Dynamisk mätning av stötvåg initierad av ett tungt slagdon, ex en pålkrans hejare (High strain testing).

De tre metoderna beskrives kort i bilaga.

RISKMINIMERING

Vid all dimensionering är det väsentligt att man optimerar arbetsinsatsen så att man koncentrerar sig på de mest avgörande faktorerna. Det gäller härvid att hantera två separata problem:

- Man måste vid dimensioneringen söka upp den faktor som har det största inflytandet på resultatet, "Boven i dramat".
- Man måste beakta att icke förutsedda eller ens förutsebara misstag kan begås vid dimensionering och/eller byggande, s k "grova fel".

"Boven i dramat"

När det gäller att finna den eller de parametrar som har det största inflytandet kan man göra någon form av sensitivitetsanalys vid beräkningarna. Detta kan vid konventionella beräkningar göras genom att man varierar de olika parametrarna för att se vilken liten ändring ger det största utslaget i slutresultatet, t ex säkerhetsfaktorn.

Om man övergår till β -metoden får man detta på köpet. Ett delresultat är nämligen de så kallade *sensitivitetsfaktorerna*, α_i , som för varje enskild parameter talar om dels om den verkar pådrivande eller mothållande, dels om hur stor betydelse just den har.

Detta innebär praktiskt, att man ur beräkningarna kan se var man skall sätta in åtgärder för att minska risken, antingen genom att öka dimensioner, men oftare kanske genom att minska osäkerheter. Dessa uttrycks ju statistiskt i spridningsmått, och spridningen hos de olika variablerna har en avgörande betydelse. Den spridning man har att räkna med är sammansatt av två delar, en naturlig spridning som inte är mycket att göra åt, och den del som beror på att ett litet provantal hindrar oss från att vara helt säkra på den naturliga spridningen.

Ur β -beräkningen kan man alltså se var en ökad provtagning kan ge bäst effekt och man kan även prova med några antagna variationer för att kunna göra en bedömning av hur mycket den ökade säkerheten kan vara värd i pengar.

Även om man, som ovan sades, kan göra en sensitivitetsanalys även med konventionella beräkningsmetoder kan man inte uttrycka vinsten av en ökad provtagning i pengar.

"Grova fel"

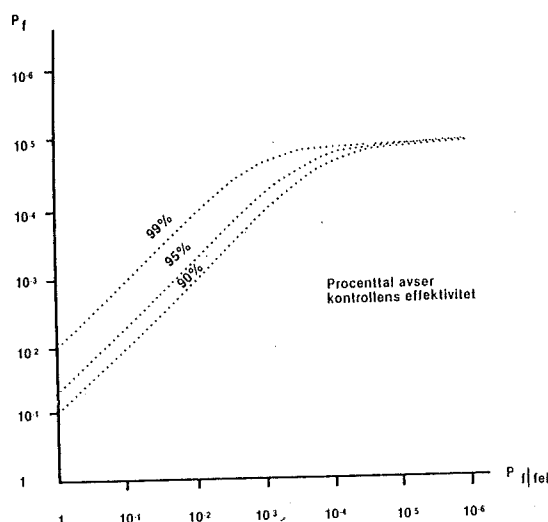
Uttrycket "grova fel" är missvisande. Vad som avses är inte fel av någon viss storlek, utan icke förutsebara fel, "human errors". Termen är alltså egentligen mest att ses som statistisk fackterm.

β -metoden som sådan beräknar en brottsannolikhet som uppkommer enbart ur den statistiska möjligheten att bärförmågan slumpmässigt är låg samtidigt som lasteffekten slumpmässigt är hög i en specificerad mekanisk brottmodell.

De grova felen är en mycket svårhanterlig del av dimensionerings- och utförandeprocessen. Eftersom de inte är förutsebara kan man inte direkt gardera sig mot dem utan man måste i stället gå till väga på andra sätt. Ett sätt är att man gör en allmänt tålig konstruktion, där en måttavvikelse eller något annat fel inte får katastrofala följder.

Ett annat är att man har en kontroll som ser till att sådana fel inte uppträder. I denna kontroll ligger även att man mellan konstruktören och arbetsplatsen har en kommunikation, så att konstruktionsprinciper etc är klarlagda och förstådda. En sådan kommunikation och information är mycket effektivare än bara ett program över kontrollpunkter.

Med dessa åtgärder kan man komma åt en stor del av de grova felen. Det är möjligt att de är tillräckliga, man kan nämligen beräkningsmässigt visa (Ditlevsen 1983) att om de grova felen inte leder till en mycket stor brottsannolikhet om de skulle förekomma i verkligheten, och om kontrollen samtidigt är rimligt effektiv, så får man en konstruktion vars brottsannolikhet totalt sett är acceptabel.



Figur 6.1. Kontroll och grova fel

I figuren visas inverkan dels av kontrollens effektivitet, dels av hur allvarligt ett oupptäckt fel är.

Att de grova felen och sättet att behandla dem är en väsentlig fråga framgår av den skadebild som redovisades i kapitel 5. Där framgick att det oftast var någon faktor, som ej tagits med i beräkningarna (eller kunnat tas med), som orsakat skadan.

Det är alltså viktigt att kunna balansera den krävda beräkningsmässiga säkerheten och kontrollåtgärderna.

Idag kräver vi i säkerhetsklass 2 ett nominellt β -värde av 4,3, vilket motsvarar en brottsannolikhet av 10^{-5} . I ett amerikanskt förslag till bronormer rekommenderar man att man väljer $\beta = 2,5 - 3,5$, alltså betydligt lägre värden än vad som krävs här. Dessa amerikanska riktvärden är baserade på kontrollräkning av befintliga konstruktioner. Det är kanske lämpligt att en sådan kontrollräkning görs i svensk geoteknik så att man får en samklang mellan befintliga konstruktioner och sådana beräknade enligt NR:s föreskrifter.

DIMENSIONERING AV PÅLAR

Pålar skall enligt NR dimensioneras i såväl brottgränstillståndet som bruksgränstillståndet precis som andra konstruktioner.

Beroende på pålarnas verkningssätt är det ofta svårt att entydigt definiera ett "brott" som är av intresse, "brott" får ofta betydelsen "alltför stora deformationer", där dessa är så stora att bärförmågan hos grunden eller någon annan del börjar äventyras.

Bruksgränstillståndet omfattar också deformationer, fast sådana som är mindre och som påverkar brukbarhet och bestånd.

(En fråga härvidlag gäller krav på beståndet hos en grundläggning som kan komma att återanvändas. Vilken tidsrymd skall gälla?)

Brottgränstillståndet

Verifiering av en påles bärförmåga i brottgränstillståndet kan ske antingen genom en geostatisk beräkning eller genom någon form av verifiering genom provbelastning, statisk eller dynamisk. Det kan även förekomma att man kombinerar de två metoderna, genom att man i projekteringsstadiet använder en geostatisk metod och sedan verifierar den i utförandefasen.

Man kan även tänka sig att man i projekteringsfasen förutsätter att man vid utförandet verifierar åtminstone en viss minsta bärförmåga, (som alltså kan vara mindre än brottlasten) och utnyttjar denna kommande kontroll för att beräkningsmässigt visa att säkerhetsindex kommer att vara tillräckligt.

Geostatisk beräkning

Denna används i Sverige främst på kohesionspålar men även i någon mån på friktionspålar.

Ensam, utan ytterligare verifiering genom någon provbelastning gäller detta främst kohesionspålar, vilkas brottlast kan beräknas som en funktion av lerans skjuvhållfasthet och pålens dimensioner.

Hittills har man främst utnyttjat en *totalsäkerhetsfaktor* för att beakta osäkerheterna, men β -metoden kan användas utan svårigheter och man kan därigenom även kalibrera partialkoefficienter. Ett exempel på detta visas i Olsson, Rehnman & Stille (1985). Beräkningsmodellen för kohesionspålar är erkänd och praktiskt beprövad, vilket ytterligare gör den lämpad för beräkning med β -metoden.

När det gäller friktionspålar är en rent geostatisk beräkning som enda verifiering av bärformågan inte lika vanlig i Sverige (grävpålar dock möjligen undantagna). Detta torde ha två orsaker, dels är de olika beräkningsmodellerna inte lika säkra som modellen för kohesionspålar, dels är vi vana vid att provbelasta våra pålar dynamiskt.

När det gäller metodernas osäkerhet och möjligheten att utnyttja prover för att kalibrera metoden för det enskilda fallet hänvisas till Baecher & Rackwitz (1982).

Verifiering genom provbelastning

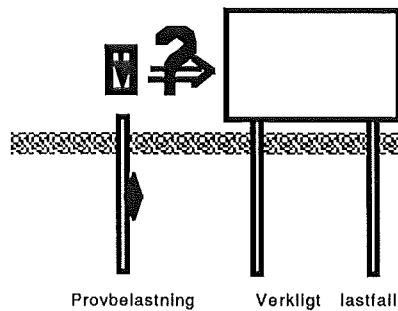
Vid verifiering genom provbelastning är problemställningen den följande:

Man vill ha ett praktiskt användbart kriterium för hur hårt man måste driva den enskilda pålen på arbetsplatsen.

Detta kriterium skall vara satt så att den slagna pålen med nöjaktig säkerhet kan bära den lasteffekt som den är avsedd kunna bära. Kriteriet är vanligen ett stoppslagskriterium, men man använder ibland (friktionspålar) även minsta effektiva pållängd som kriterium.

Verifiering genom provbelastning omfattar val av lämpligt antal pålar att prova, val av representativa pålar och placeringar, utförande och tolkning av själva provbelastningen och slutligen tolkning av dess resultat till ett användbart kriterium, som är satt så att man tar hänsyn till osäkerheterna i alla led.

Den i Sverige vanligaste metoden för provbelastning av pålar är den dynamiska, genom stötvågsmätning. Visserligen förekommer även statisk provbelastningar, men av tid- och kostnadsskäl blir det endast sällan. Överföringen från en provbelastning till den verkliga lastsituation, som konstruktionen kommer att utsättas för, innehåller ett antal osäkerheter, t ex definition av "brott" i respektive fall.



Figur 7.1. Överföring av provresultat till verkligt utfall.

Med den erfarenhetsbas som finns av jämförelser mellan statisk och dynamisk *provning* kan man med tillräcklig säkerhet tolka den dynamiska provningen lika bra som den statiska, men det återstår alltid en viss osäkerhet t ex tidsberoendet.

Osäkerheten när det gäller att tolka provresultatet är dock nog ofta betydligt mindre än den osäkerhet som ligger i överförandet av provresultatet till ett kriterium som skall användas på de pålar som inte provas.

Som framhölls ovan skall därvid hänsyn tas till de osäkerheter som kan uppkomma genom geotekniska variationer över byggplatsen, spridning orsakad av variationer i slagningen etc.

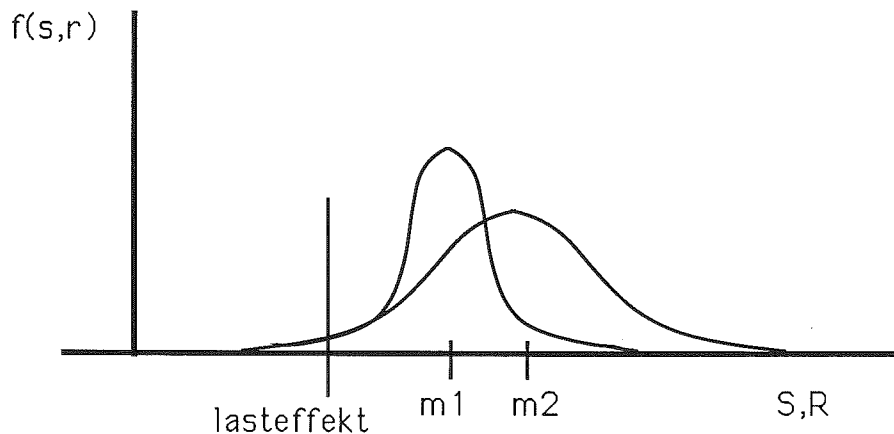
Idag beaktar man dessa osäkerheter genom en säkerhetsfaktor som beror bl a av provningens omfattning och spridning orsakad av slagningsutrustningen.

Det syns rimligt, att använda ett mer stringent, statistiskt baserat förfarande. Eftersom man inte har någon direkt matematisk brottmodell för pålen kan inte β -metoden direkt tillämpas vid projekteringen. Däremot kan man tillämpa den på den enkla modellen för brott.

$$\text{Bärförmåga} - \text{Lasteffekt} > 0$$

Man får utgå från erfarenhet och vid projekteringen åsätta uppskattade medelvärden och spridningar på pålarnas bärförmåga och sedan skriva ett kontrollprogram som vid utförandet verifierar antagandet. Detta kontrollprogram skall då vara statistiskt baserat. Det skall ange hur många pålar som skall testas och vilket *medelvärde* hos bärförmågan som minst måste uppnås med hänsyn till spridningen.

Eftersom stor spridning hos brottvärdet ökar sannolikheten för att man skall hitta pålar med en bärförmåga för långt under medelvärdet räcker alltså inte medelvärdet ensamt. Man måste dessutom beakta att man måste känna spridningen med en viss noggrannhet, eller med andra ord, man måste till den naturliga spridningen lägga den osäkerhet som kommer sig av för litet antal prov.



Figur 7.2. Erforderlig bärförmåga beror av dess spridning.

De geotekniska variationerna kan man beakta på två sätt:

- a) Man antar att pålarna inom hela området utgör en statistisk population och bestämmer dess spridning. Denna spridning blir då troligen ganska stor, vilket ställer högre krav på medelvärdeets storlek.
- b) Man separerar området i geotekniskt homogena delområden (t ex genom "*signatur*" vid provpålningen) och bestämmer variationerna inom vart och ett av dessa. Detta förfarande leder till lägre krav på medelvärdet (olika i varje delområde) under förutsättning att man kontinuerligt kan klassa in pålarna i rätt område och att man kan uppskatta träffsäkerheten hos klassningen.

Det bör betonas att man idag inte gör denna bedömning av medelvärde och spridning med statistiska metoder. Man gör inte heller någon formell indelning av områden i delområden. Däremot torde man erfarenhetsmässigt ta hänsyn till om man har stora eller små variationer inom ett område.

Bruksgränstillståndet

I bruksgränstillståndsberäkningarna skall man verifiera att det inte uppkommer besvärande deformationer, som kan orsaka sprickbildningar o s v. Man skall också ta hänsyn till beständighet och underhåll.

Tillåten sannolikhet för att man skall överskrida bruksgränsen är ej direkt given i NR, men man kan med ledning av föreslagna partialkoefficienter se att den är betydligt större än vad som tillåts i brottgränsberäkningarna.

Det påpekas också att konstruktören bör ta hänsyn till byggherrens önskemål, d v s det är tillåtet att göra en ekonomisk optimering av byggkostnader kontra underhållskostnader.

Vad gäller deformationer kan bruksgränstillståndet gälla totalsättningar eller differenssättningar.

Totalsättningar torde var av intresse främst vad gäller kohesionspålar eftersom sättningarna för spetsburna pålar ofta är så små att de är ointressanta.

Möjligheten att beräkna deformationerna hos en pålgrundläggning med β -metoden är avhängig av möjligheten att hitta en tillförlitlig matematisk modell för sättningarnas storlek men också av möjligheten att definiera vilken differential- eller totalsättning som skall anses vara gränsen. Om man skall göra en ekonomisk optimering måste gränserna sättas med eftertanke så att underhållskostnader o s v kan bedömas korrekt.

Om dessa två delar av beräkningen finns och dessutom uppgifter om ingående jordparametrars storlek finns, kan i princip en β -beräkning utföras. Det finns dock vissa svårigheter:

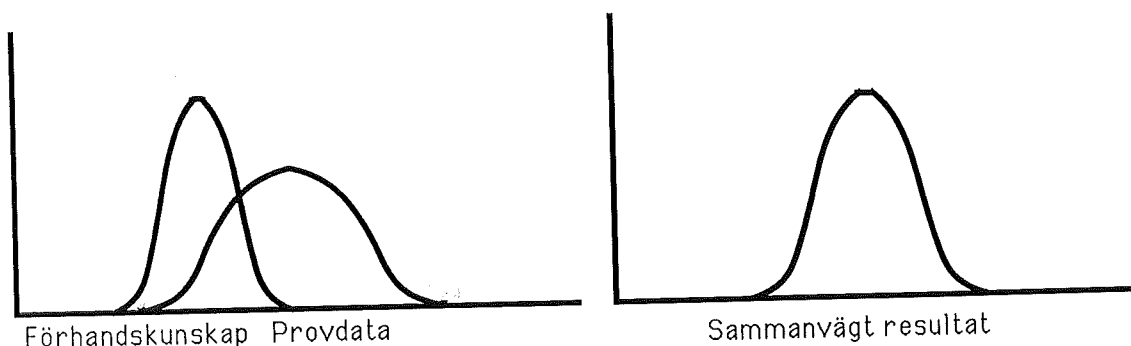
Om beräkningsmodellen är osäker, som den gärna är när det gäller deformationsberäkningar inom geotekniken, måste man ta hänsyn till modellosäkerheten, t ex genom att beskriva medelvärde och spridning hos kvoten (mätt deformation)/(beräknad deformation) och införa denna kvot som en variabel storhet i beräkningarna.

Sådana uppgifter kräver en mängd erfarenhetsdata för att bli relevanta, så en databas behövs för att beräkningsmodellen skall bli tillförlitlig.

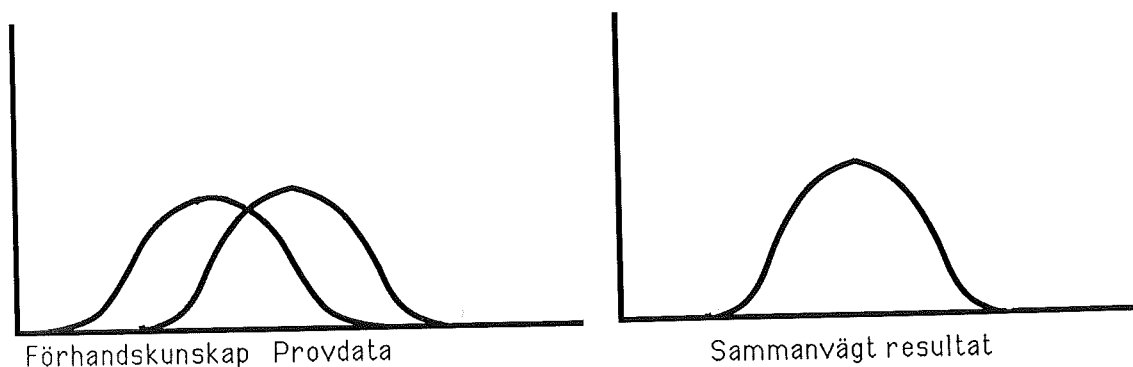
Fåtalsprovning

Eftersom man kommer att behöva göra provbelastningar, för att bestämma medelvärde och spridningen hos bärkraften hos pålarna inom ett område, för att utnyttja β -metoden, är det av ekonomiskt intresse att man kan hålla nere antalet prov. Ett tillfälle när man kan göra detta är när man har relevant förhandskunskap om området, t ex från ett näraliggande arbete.

Ett statistiskt korrekt tillvägagångssätt för detta finns i tillämpningen av Bayes' teorem för uppdatering av statistisk information när man får ytterligare data. I vårt fall kan man tillämpa teoremet så att man tar den förhandskunskap som man har och "bygger på" den med några prov. Resultatet blir en sammanvägning av förhandskunskap och prov så att man utnyttjar bägge. Om man har en mycket god förhandskunskap får man då en lika noggrann bestämning med få prov, som man får med många prov men ingen förhandskunskap. Å andra sidan tillför en liten förhandskunskap inte särskilt mycket, provdata styr helt.



Figur 7.3. Fåtalprovning. Stor förhandskunskap, få prov.



Figur 7.4. Fåtalprovning. Liten förhandskunskap, få prov.

Som visas principiellt i figur 7.3 kommer en stor förhandskunskap att ge en mindre spridning i slutresultatet och följaktligen ett högre värde på β .

Användningen av Bayes' teorem gör det alltså möjligt att direkt få en återkoppling av förhandskunskap. Teoremet gör det också möjligt att se värdet av ett ökat antal prov, eller värdet av att ta ytterligare prov i en senare fas av arbetet.

När det gäller fåtalsprovning kan man också utnyttja en klassning av ett område, eftersom den så kallade korrelationen spelar in. Den säger hur mycket av det man vet om en påle kan överföras till att gälla om en annan påle. Om korrelationen är fullständig, räcker det att prova en påle, sedan vet man lika mycket om de andra, eftersom det finns ett entydigt matematiskt samband. En stark korrelation minskar alltså kravet på antalet prov, och det är alltså av intresse att hitta någon effektiv metod för klassning av ett område, t ex genom "signaturanalys" under slagningen.

Enligt NR kan man idag utnyttja provning på ett av två sätt:

Dimensionering genom provning kan utföras enligt SBN godkännanderegler 1975:4 "Hållfasthetsdimensionering genom provning" om man har ett antal provningar som inte behöver gälla den aktuella byggnadsplatsen. Man bestämmer härvid 5%-fraktilen (på 75% konfidensnivå) och använder den som karakteristiskt värde, något som är ett avsteg från principerna när det gäller geokonstruktioner. Det måste härvid observeras att skriften om provning nu är under omarbetande.

Man har också i NR möjligheten att utföra en "dimensionering av en geokonstruktion med hjälp av provbelastning (fåtalsprovning)". Härvid skall resultatet användas för att stödja ett empiriskt samband, men i NR ges inga riktlinjer för hur detta samband skall tas med i beräkningarna. I stället tar man fram ett karakteristiskt värde som är ett reducerat medelvärde av ett litet (1 - 3) antal prov.

Eftersom modern pålningsteknik bygger på, att man genom stötvågsmätning verifierar antaganden om pålars bärförmåga, genom att man provar ett litet antal, är det mycket väsentligt att man närmare studerar fåtalsprovningen. Särskilt viktigt är det att man får fram ett provningsförfarande, där erfarenhet från liknande områden tas med i beräkningen, t ex genom så kallad bayesiansk statistik. Härigenom skulle man ju kunna utnyttja fåtalsprovningen till att styrka en empirisk förhandskunskap. Man kan härigenom också uppnå att man trots det lilla antalet prov får en säkrare bestämning av pålarnas verkliga bärförmåga. När den del av totala osäkerheten, som beror på rent statistiska (valt antal prov) orsaker, minskar kan man ju tillåta större last.

Utkast till beräkningsmodell

Hur kan β -metoden appliceras i praktiskt dimensioneringsarbete? Vilka krav bör man ställa på en beräkning med β -metoden?

En självklar ambition är att **förbättra dagens praxis** i geotekniska sammanhang. Däremot behöver beräkningen inte nödvändigtvis vara vetenskapligt exakt. Det utmärkande för en typisk beräkning i geoteknisk sammanhang är att vi skall hantera oprecis kunskap om unika objekt. Vad vi önskar är att ta fram en del av ett beslutsunderlag för vår dimensionering. Vårt önskemål med β -metoden blir då att den skall ge oss en mera nyanserad bild av den verklighet vi har att fatta beslut om än dagens praxis.

Ett annat starkt önskemål är att **metoden skall vara enkel**. Detta innebär att principerna för beräkningarna utan större svårighet bör kunna förstås av en tekniskt kompetent person. Detta innebär inte att de matematiska beräkningarna i sig behöver vara triviala. Dagens (gårdagens) beräkningsmetoder härrör från en tid, då man var tvungen att förlita sig på räknesticka, papper och penna. Idag, med en allmän tillgång på datorer, är situationen en annan. Själva programmeringen av matematiskt komplexa algoritmer behöver därför inte göras av var och en.

Igenkännande. Ett sannolikhetsbaserat tänkande är för de flesta av oss ett helt nytt sätt att betrakta en dimensioneringssituation. Den till konstruktören vanliga frågan - Håller det om vi gör så här? - kan inte längre besvaras strikt med ett ja eller nej. Vi värjer oss alla mot att behöva ändra våra vanor. För att inte onödigtvis krångla till ett införande av β -metoden, kan det därför vara lämpligt att snegla på dagens praxis vid val av modeller.

Realistisk beskrivning av verkligheten. Som tidigare antytts kan vi inte förvänta oss att vi skall kunna beskriva verkligheten i exakta termer. Våra beräkningar bör dock visa upp ett rimligt mått av realism inom sitt användningsområde. Under de senaste åren har vi sett en utveckling mot komplexa *deterministiska* beräkningsmetoder. Resultaten av dessa förfinade metoder är dock helt beroende av relevansen hos de data för vilka man utför beräkningarna. Det bör finnas en balans mellan noggrannheten för ingångsdata och den matematiska modellen. En enklare matematisk modell baserad på ett sannolikhetesteoretiskt tänkande torde ofta var överlägsen en deterministisk beräkning av likvärdig komplexitet. Den enklare modellen vid β -metoden kan man då ta hänsyn till, genom att införa en *stokastisk* variabel för modellfelet hos den matematiska modellen.

Möjlighet att utveckla metoden efter hand. Enkelheten/komplexiteten hos en beräkningsmetod bör inte betraktas som ett statiskt tillstånd. Vårt problem är dock att anpassa det senaste årtiondets forsknings- och utvecklingsarbete till praktiskt användbart resultat i dagligt arbete. (Dagens forskningsarbete kanske vi får överlämna till morgondagens ingenjörer.)

Anpassning till normer. En beräkningsmetod kan aldrig vara så förträfflig. Om den inte uppfyller de normkrav som ställs från samhället, torde den få svårt att få genomslagskraft. D v s tidigast när normen har anpassats till beräkningsmetoden.

Som tidigare nämnts kan dimensionering av pålar ske på två principiellt olika sätt - geostatisk beräkning och verifiering av antagen bärförmåga. (Provbela-
stning eller normenlig bärförmåga.) Vid båda betraktelsesätten kan β -metoden appliceras. Eftersom de mätningar, som vi har studerat i denna förstudie härrör från pålar, vilka traditionellt dimensioneras med den senare metoden, har vi försökt skissa på vad en användning av β -metoden skulle innebära för denna typ av pålar.

Vid användande av partialkoefficienter enligt Nybyggnadsregler, utgår man från huvudformeln:

$$\begin{aligned} \text{Bärförmågan} &> \text{Lasten} \\ R &> S \end{aligned}$$

För lasten skall man därvid justera för osäkerheter med en partialkoefficient γ_r . För bärförmågan skall på samma sätt införas partialkoefficienter γ_m . Konsekvensen för ett misslyckande tas hänsyn till genom ett uppdelande i säkerhetsklasser. Man inför därför partialkoefficienten γ_n . Slutligen kan man ta hänsyn till alla andra osäkerheter genom en lite diffus partialkoefficient γ_{Rd} . Indexet γ_{Rd} lär stå för Resistance-design (Wennerstrand 1988), d v s osäkerheter i själva dimensioneringen för bärförmågan. Översatt till vårt tidigare språkbruk motsvarar detta vårt modellfel.

Om vi alltså vill genomföra en beräkning som är jämförbar med partialkoefficientmetoden i NR får vi arbeta med en brottmodell av följande utseende:

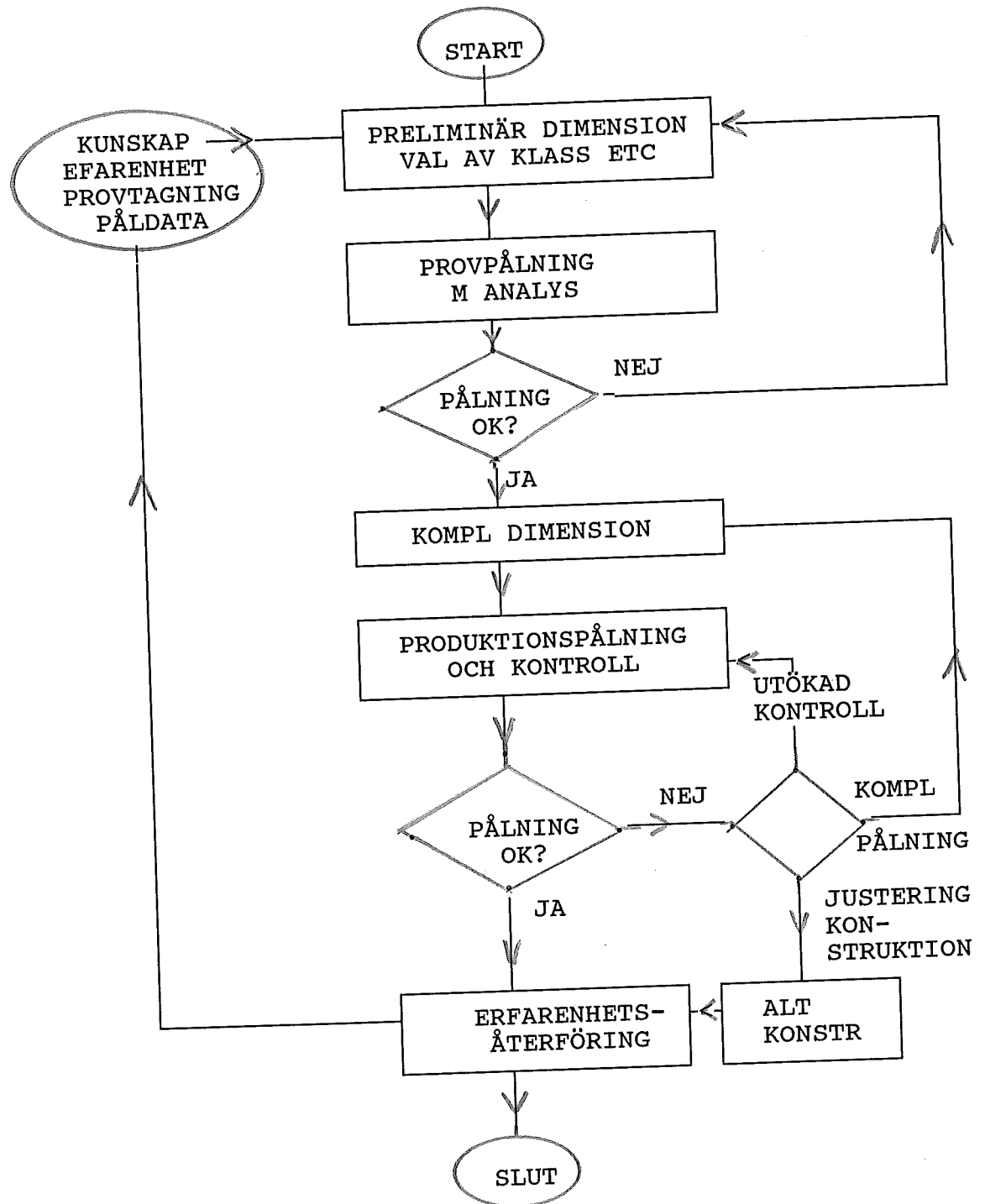
$$\gamma_{Rd} \cdot R - S > 0$$

γ_{Rd} är en faktor som tar hänsyn till vårt modellfel, medan R och S är bärförmågan resp lasten. γ_{Rd} , R och S är här inte bestämda värden utan stokastiska variabler, d v s de kan anta värden med olika sannolikhet. Partialkoefficienten för säkerhetsklassen får ingen motsvarighet i denna formel utan motsvaras av olika värden på säkerhetsindexet β . Vid en utvärdering av

"rätta" partialkoefficienter med sensitivitetsfaktorerna α_i kan man beräkna produkten $\gamma_m \cdot \gamma_n$. Eftersom γ_n är given i NR kan sedan "rätt värde" på γ_m beräknas.

Vid en beräkning måste vi alltså kunna beskriva våra ingående storheter som stokastiska variabler. Detta innebär att vi dels skall ange fördelningstyp, dels värden på aktuella fördelningars parametrar. Om möjligt bör vi naturligtvis ange "rätta" fördelningstyper. Ofta har vi emellertid inte tillräcklig kunskap för att ange en vetenskapligt "riktig" fördelning. Även en ingenjörsmässig approximativ fördelning som t ex rektangulär eller triangulär fördelning innebär emellertid en betydande nyansering jämfört med att bara anta ett deterministiskt värde på traditionellt sätt. I de beräkningar som vi genomfört har vi (i enlighet med ISO 2394) modellerat bärförmågan som lognormalfördelad. Lasten har vi i enlighet med samma standard antagit normalfördelad. Modellfelet slutligen har vi också antagit normalfördelat.

Vid applicering av β -metoden enligt ovan förefaller det rimligt att detta görs enligt ett schema för "active design". Nedan följer ett enkelt flödesschema för hur detta skulle kunna se ut.



Figur 7.5. Flödesschema vid arbetsgång enligt β -metoden för pålning.

8. UTBILDNING/INFORMATION

En fråga som får avgörande betydelse för möjligheten att introducera en ny beräknings- och dimensioneringsmetod är hur snabbt den vinner erkännande.

Som exempel kan nämnas introduktionen av ny beräkningsnorm för betong, *BBK 79*. Då tog introduktionen ca 5 år och fick full genomslagskraft först då den nya generationens ingenjörer som utbildats vid högskolorna i det nya tankesättet började att aktivt påverka utvecklingen.

Eftersom de nya normerna genom PBL och NR mera entydigt pekar i riktning mot partialkoefficienter och statistiskt tänkande ser förutsättningarna nu annorlunda ut.

För att introduktionen av β -metoden inte skall bli lika tidsödande som introduktionen av *BBK* krävs att information och utbildning ägnas speciella ansträngningar. Det krävs således att både blivande och redan verksamma ingenjörer får adekvat information som är anpassad till de olika målgruppernas förutsättningar.

Eftersom grundprincipen vid beräkningar både med partialkoefficienter och enligt β -metoden bygger på ett statistiskt tänkande, borde detta leda till ökad information och utbildning i tillämpad statistik. Denna måste då vara inriktad mot praktiskt utnyttjande av statistik inom geotekniken med dess speciella förutsättningar för spridning i materialet.

Samtidigt baseras beräkningarna på ökad användning av egen och andras data, varför utbildning i hantering av datorer och andra beräkningshjälpmedel är av stor betydelse.

De kurser inom grundläggning och geoteknik, som idag ges, borde därför ses över och kompletteras med lämpliga avsnitt om praktisk statistik i geotekniken och tillämpad datorteknik.

För att denna satsning skall få erforderlig genomslagskraft är det viktigt att lämpliga beslutsfattare inom undervisning och näringsliv görs uppmärksamma på denna problematik och dess möjligheter. Därigenom kan tillräckliga medel ställas till förfogande för att förbättra utbildningen och informationen inom detta område.

9. KLASSNING AV PÅLAR

Pålar kan indelas i olika typer utifrån en mängd olika egenskaper såsom förfarande vid tillverkning, installation etc.

I Sverige är slagna pålar helt dominerande varför vi fortsättningsvis koncentrerar oss på dessa.

En mycket viktig uppdelning är efter det statiska verkningssättet. Den traditionella uppdelningen härvid är:

- Kohesionspålar
- Friktionspålar
- Stödpålar

Uppdelningen har dock visat sig otillräcklig, varvid diffusa undergrupper har uppstått:

I huvudsak spetsburna, stödpålar på berg...

Vid applicering av ett sannolikheteoretiskt synsätt, är det som nämnts förut, fördelaktigt om man kan dela upp i delområden inom vilka pålar fungerar på ett likartat sätt.

Vid ett dimensioneringsförfarande enl β -metoden bör man därvid göra en uppdelning i pålar med likartat statiskt verkningssätt. Man kan förvänta sig att pålar i en sådan grupp skall uppföra sig likartat och att spridningen vid en verifiering inte skall divergera alltför mycket. Uppdelningen måste vara sådan att pålens klasstillhörighet kan bestämmas genom en normal grundundersökning och sedan verifieras genom iakttagelser på arbetsplatsen under prov- och produktionspålning.

Här nedan följer ett förslag till en sådan uppdelning:

KLASS	KÄNNETECKEN	EXEMPEL	KRITERIER
I	Drivs utan motstånd	Kohesionsjord	Teoretisk dim, Drivs till längd
II	Mantelmotstånd	Friktionsjord	Efterslagning, ----- " -----
III	Mantel- och spetsmotstånd	Friktionsjord på morän	Sjunkmått ----- " -----
IV	Spetsmotstånd och sjunkning	Morän	Sjunkmått
V	Spetsmotstånd och 0-sjunkning	Berg	Integritetskontroll Fäste i berg

Anmärkning: Alla klasser kan förekomma inom en arbetsplats. Varje klass kan indelas i underklasser. Varje underklass bör kännetecknas av lika mått på bärförmågens spridning.

Tabell 9.1. Klassindelning av pålar med hänsyn tagen till statistiskt verkningsätt.

10.

 β -METODEN**Sammanfattning**

β -metoden, vad är det?

Säkerhetsindex β är ett i Nybyggnadsreglerna accepterat sätt att verifiera en konstruktions tillräckliga bärförmåga, stadga etc.

Metoden utgår från följande **grundförutsättningar**:

- Vi kan matematiskt och entydigt beskriva gränsen mellan acceptabelt och oacceptabelt beteende hos konstruktionen.
- Vi kan beskriva den osäkerhet som finns i de variabler som ingår i det matematiska uttrycket i statistiska termer.
- Detta gäller även den osäkerhet som gäller själva det matematiska uttrycket.

Metodens **resultat**:

Resultatet av en beräkning med β -metoden är ett tal, säkerhetsindex β som är ett mått på hur troligt det är att gränsen till oönskat beteende skall överskridas genom att oturlig, av "normal" slump styrd, kombination av stor last och liten bärförmåga inträffar. Metoden kan inte ta hänsyn till oförutsebara händelser, "act of God".

Inledning

β -metoden är en beräkningsmetod som kan beräkna sannolikheten för en händelse om

- alla osäkra storheter uttrycks som stokastiska variabler
- man har en mekanisk modell uttryckt i dessa variabler
- man matematiskt kan beskriva händelsen som en gräns som inte får överskridas.

Det måste noggrant poängteras, att β -metoden endast är ett sätt att beräkna en sannolikhet under förutsättningarna ovan.

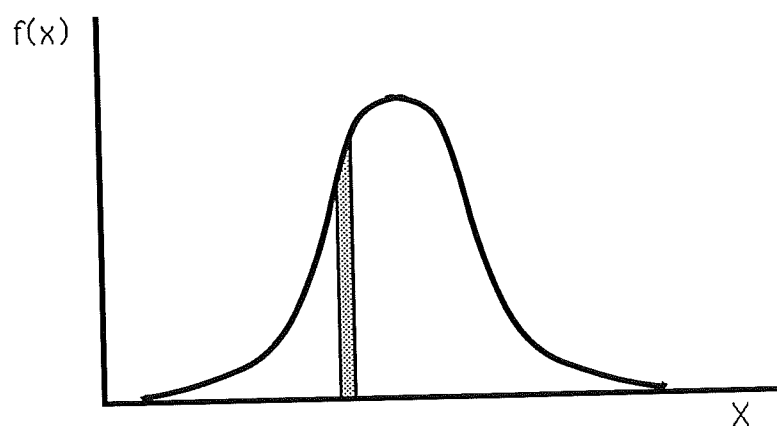
Den tillför inget som helst kunnande om pålar eller någon annan yrkeskunskap!

Den är och förblir en matematisk metod, som t ex integralkalkyl.

Den är dock ett effektivt sätt att beskriva kunskap man har.

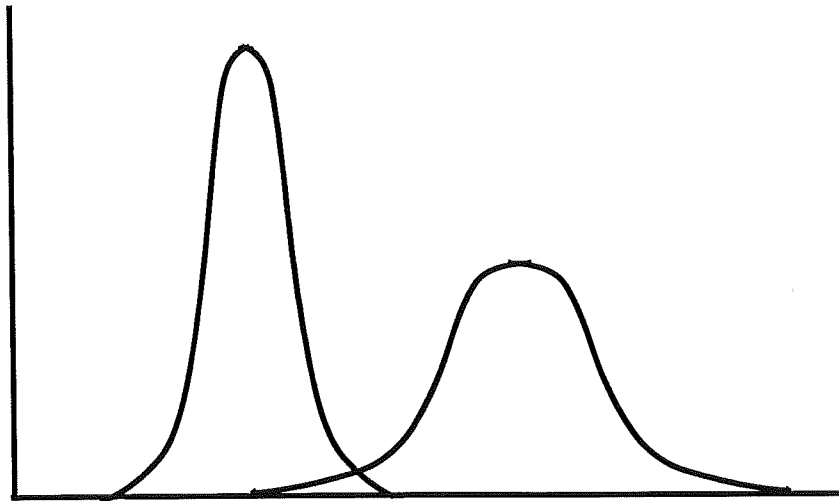
Stokastiska variabler

En osäker händelse kan beskrivas som en stokastisk variabel. Man kan åskådliggöra den t ex med dess (sannolikhets)täthetsfunktion (som även kallas frekvensfunktion).



Figur 10.1. Täthetsfunktionen $f(x)$ för X

I figuren visas ett skuggat område. Dess yta beskriver sannolikheten för att värdet av X skall falla inom det skuggade intervallet. (Eftersom X måste anta något värde inom hela kurvans gränser är ytan under kurvan lika med 1.) Om värdet av X säkert bara kan ligga inom ett snävt intervall blir motsvarande stokastiska variablers täthetsfunktion smal och hög (arean under kurvan skall ju vara 1). Om vi å andra sidan inte är säkra på intervallet, har X en större spridning och täthetsfunktionen blir bred och låg.



Figur 10.2. Olika spridning hos stokastiska variabler.

Något som är väsentligt att komma ihåg när det gäller spridningen hos variablerna är att den har två delar:

Den ena delen kommer sig av den naturliga spridningen som vi inte kan göra något åt.

Den andra delen däremot orsakas av, att vi inte kan bestämma den naturliga spridningen med någon stor säkerhet, om vi har få prov. Vi måste alltså göra ett tillägg "för säkerhets skull". Hur stort detta tillägg i spridningen skall vara beror på provantalet och kan alltså minskas efter behag och ekonomi.

Man brukar tala om den första delen som naturlig osäkerhet och den andra som statistisk osäkerhet.

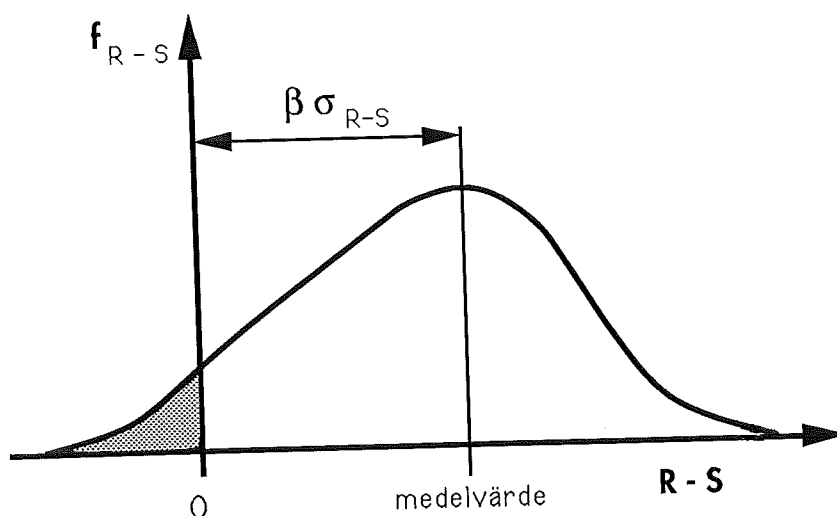
Säkerhetsmarginalen uttryckt som stokastisk variabel

Säkerhetsmarginalen SM är skillnaden mellan mothållande och pådrivande kraft.

$$SM = R - S$$

$SM \leq 0$ betyder då (teoretiskt) brott

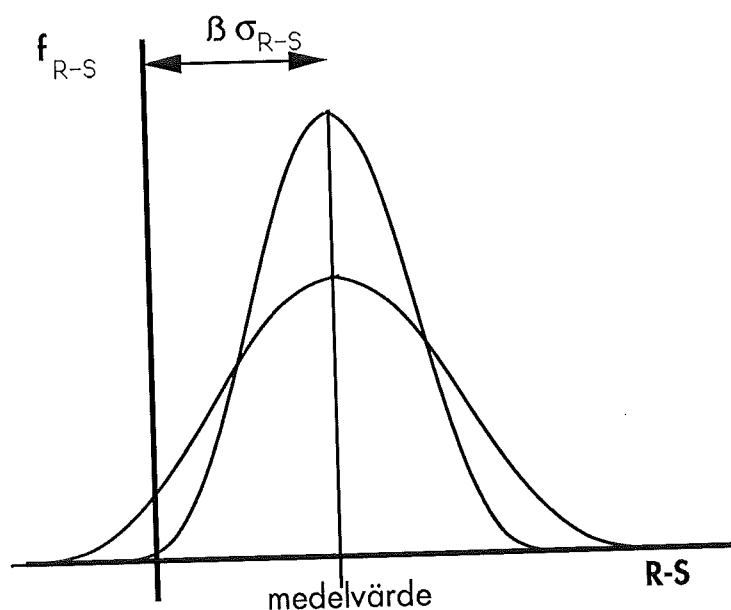
Om R och S är stokastiska variabler blir också deras skillnad en stokastisk variabel. Då kan man beräkna sannolikheten för att säkerhetsmarginalen skall bli mindre än noll, eller med andra ord brottsannolikheten.



Figur 10.3. Bro ttsannolikhet och β

Bro ttsannolikheten är lika med ytan under kurvan i det intervall som betyder bro tt, d v s där $R-S$ är mindre än noll. Ytan har skrafferats i figur 10.3. Efter- som denna sannolikhet är svår att beräkna har man ersatt den med ett ställ- företrädande riskmått, säkerhetsindex β . Det talar om hur långt det är mellan gränsen till bro tt och kurvans medelvärde, där man ju förväntar sig att finna att de flesta verkliga värdena (utfallen) hamnar. Som mått för detta avstånd har man valt *standardavvikelsen*, d v s spridningen hos kurvan. Om man gör detta kommer man nämligen att finna att β -värdet motsvarar bro ttsannolik- heten.

Spridningens inverkan på β



Figur 10.4. Spridningens inverkan

I figur 10.4 visas två olika kurvor med samma medelvärde men olika spridning. Eftersom medelvärdet är samma är också avståndet till brottgränsen samma.

Det innebär att kurvan med liten spridning (den "smala" kurvan) får ett högre β -värde eftersom produkten $\beta \sigma$ skall vara densamma. Men den kurvan har också en mindre del på fel sida brottgränsen och har därför en mindre brottsannolikhet.

Liten brottsannolikhet betyder alltså stort β .

Stor spridning betyder litet β och stor brottsannolikhet.

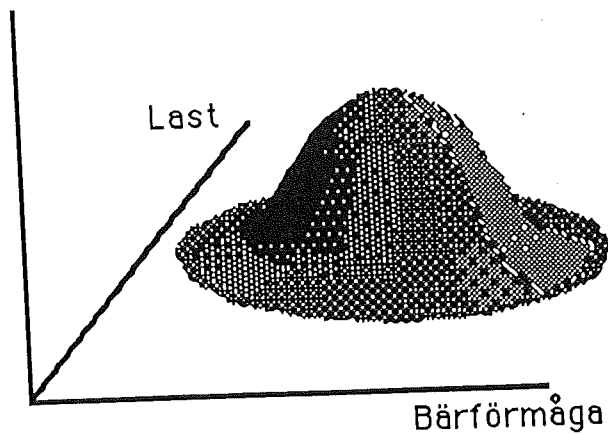
Detta är mycket viktigt!

Spridningen hos de ingående variablerna har en avgörande betydelse för storleken på β . I spridningen skall inräknas inte bara den naturliga spridningen utan också den osäkerhet som kommer sig av ett litet provantal. Ett större antal prov kommer alltså att ge betalning i form av en minskad spridning och ett ökat β . På motsvarande sätt kan en större förhandskunskap minska spridningen om man använder bayesiansk statistik. Den tillåter att olika typer av statistiska data sammanvägs, t ex tidigare erfarenhet och nya mätresultat.

Sensitivitetsfaktorer

Man kan åskådliggöra säkerhetsindex β på ett annat sätt. Om man inte beräknar säkerhetsmarginalen utan i stället ritar upp last- och bärförmågevariablerna var för sig, men som stokastiska variabler får man den så kallade simultanfördelningen. Den ser ut som en sandhög, där höjden i en punkt betecknar sannolikhetstätheten för att last och bärförmåga samtidigt antar värdet i punkten, se figur 10.5.

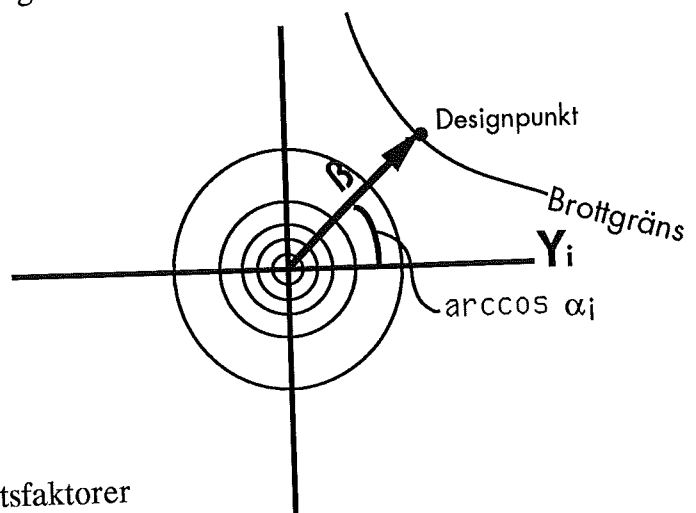
Man kan även se den uppifrån som nivåkurvor för sannolikhetstätheterna. Om man även avbildar brottgränsen kan man definiera β som det närmaste avståndet mellan medelvärdet och brottlinjen, analogt med tidigare. (För att få ett samband med brottsannolikheten måste man dock göra vissa omformningar så att alla variabler får medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1. Det betyder att nivåkurvorna blir koncentrisk cirkel och medelpunkten placeras i origo.)



Figur 10.5. Simultanfördelning

Man får då förutom β fram den farligaste punkten, d v s den punkt där ett eventuellt brott troligen inträffar, samt riktningen från origo (medelvärde) till punkten. Cosinus för riktningen till punkten för de olika variablerna brukar kallas sensitivitetsfaktorer, eftersom de talar om hur känsligt β är för en ändring i någon av koordinaterna.

Man kan alltså få fram både β -värdet, den farligaste punkten (som brukar kallas designpunkten) och via sensitivitetsfaktorerna en uppgift om väsentligaste parametrar. Se figur 10.6.



Figur 10.6. Sensitivitetsfaktorer

Samband med partialkoefficienter

Eftersom en rationell filosofi när det gäller design är att se till att designpunkten (den farligaste) har tillräcklig säkerhet, kan man beräkna dess läge både uttryckt i partialkoefficienter och i β . På det sättet kan man få fram ett samband mellan partialkoefficienter och β så att man något så när kan kalibrera partialkoefficienterna.

Det samband man får har formen (för en normalfördelad variabel)

$$\gamma_{m,i} = \frac{x_{k,i}}{\mu_i + \alpha_i \beta \sigma_i}$$

där $\gamma_{m,i}$ är den exakta partialkoefficienten för den i :te motståndsvariabeln.
 $x_{k,i}$ är dess karakteristiska värde.
 μ_i är medelvärdet.
 α_i är sensitivitetsfaktorn, som talar om hur känslig säkerheten är för en ändring av variabeln. (Faktorn är negativ för motståndsvariabler.)
 β är det säkerhetsindex som skall uppnås.
 σ_i är standardavvikelsen (spridningsmått) hos den i :te variabeln.

Som syns av formeln beror partialkoefficienten både av valt karakteristiskt värde, medelvärde och spridningen hos variabeln samt även av dess vikt i brottgränsuttrycket (via sensitivitetsfaktorn).

Även om man för praktiskt bruk gör förenklingar i partialkoefficienterna är det viktigt att förenklingarna görs på ett sådant sätt att dessa väsentliga faktorer beaktas på ett stringent sätt.

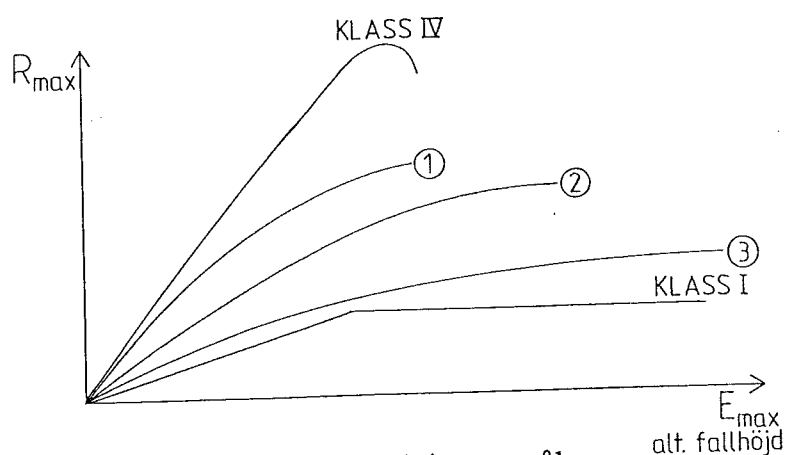
Om man väljer att ha medelvärdet som karakteristiskt värde styrs partialkoefficienten av *variationskoefficient* och sensitivitetsfaktor. Det har av Bengtsson m fl (1990) framlagts ett förslag som visar hur man på ett förenklat sätt kan beräkna partialkoefficienten men ändå kan beakta dessa viktiga faktorer.

11.

UPPMÄTTA PÅLDATA**Statistisk sammanställning**

Genom att utnyttja resultat från stötvågmätning (Case-metoden) på pålar, har ett omfattande material av olika parametrar kunnat studeras statistiskt. En närmare beskrivning av Case-metoden och använd mätutrustning kan studeras i bilaga.

En strävan vid studien har varit att försöka välja ut objekt med skilda geotekniska förhållanden. I nedanstående figur beskrivs de tre utvalda objekten schematiskt som en förväntad funktion av mobiliserad bärförmåga enligt Case-metoden ($R_{\max}$) och maximal tillförd energi ($E_{\max}$) alt fallhöjd.



Figur 11.1. Schematisk indelning av pålar

- ① Postterminal, etapp 2, Göteborg.
Stödpålar på berg alternativt bottenmorän.
Klass IV och V.
- ② Ahlsells centrallager, Hallsberg.
Stödpålar i morän.
Klass IV.
- ③ Kv Sextanten, Göteborg.
Friktionspålar i ensartad friktionsjord.
Klass II.

Indelning i klasser enligt ovan har gjorts enligt kapitel 9.

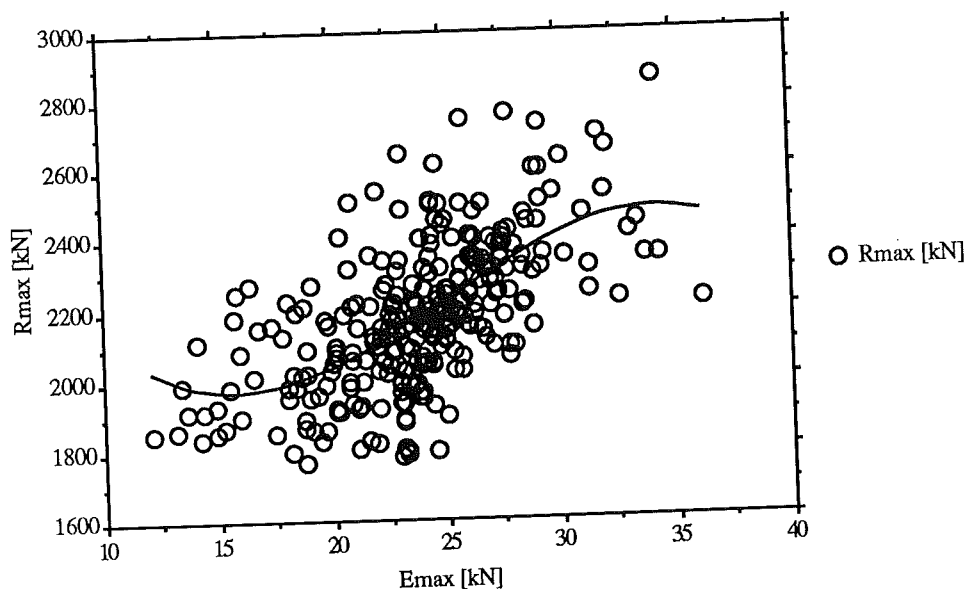
De tre objekten presenteras kortfattat nedan.

Efter presentationen redovisas de statistiska studierna i tre diagram per objekt.

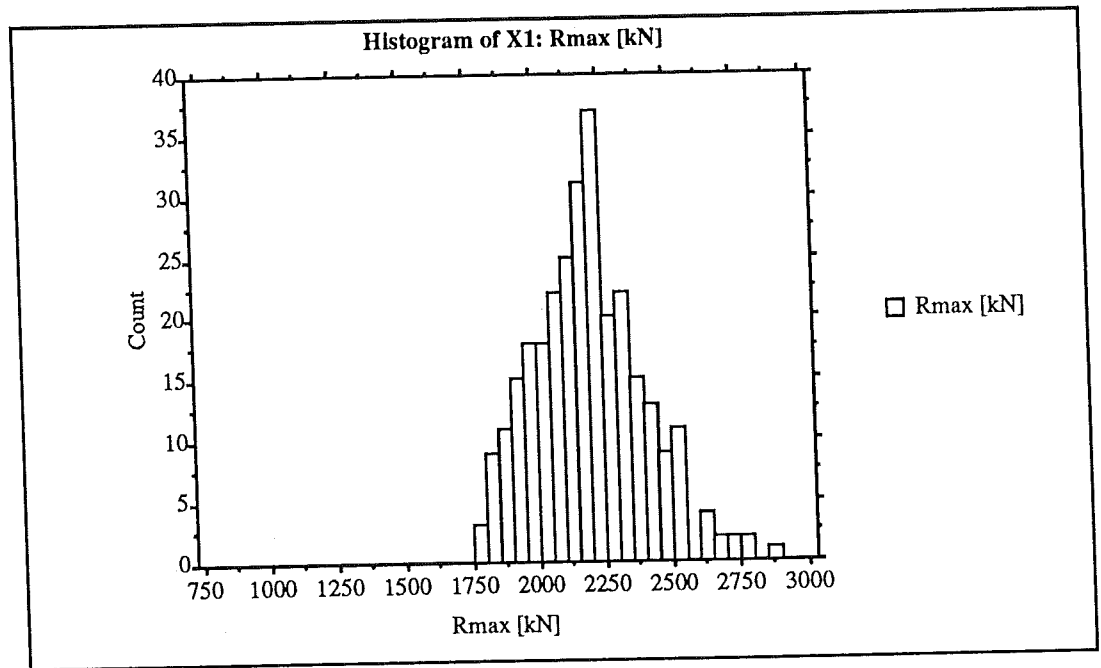
- Förhållandet mellan $R_{\max}$ och $E_{\max}$. I detta diagram har även ett försök till kurvanpassning i tredjegradsform gjorts.
- Histogram över fördelningen av $R_{\max}$ i 50 kN intervall.
- Histogram över fördelningen av $R_{\max}/E_{\max}$ i intervall.

Postterminal etapp 2, Göteborg

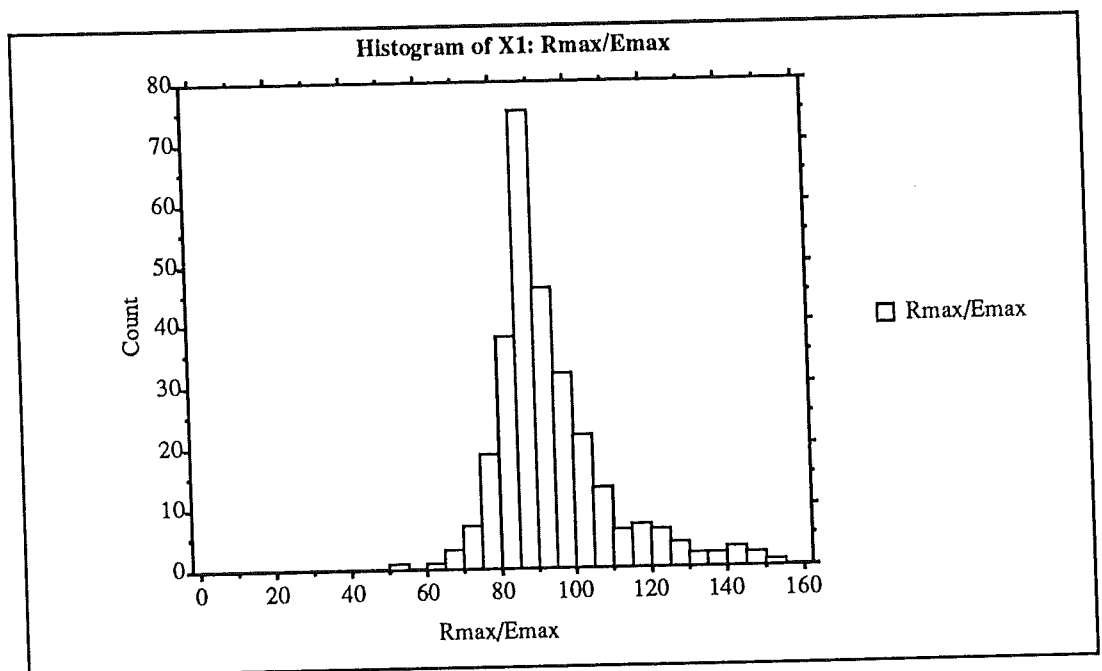
Detta objekt omfattade ca 500 stödpålar av betong $275 \times 275 \text{ mm}^2$ i klass A 900. Pålarna drevs ned genom ett 40-50 meter mäktigt lerlager och stoppslogs i huvudsak mot berg men även i bottenmorän. Den statistiska sammanställningen framgår enligt nedan.



Figur 11.2 a. Postterminal etapp 2, Göteborg



Figur 11.2 b. Postterminal etapp 2 Göteborg

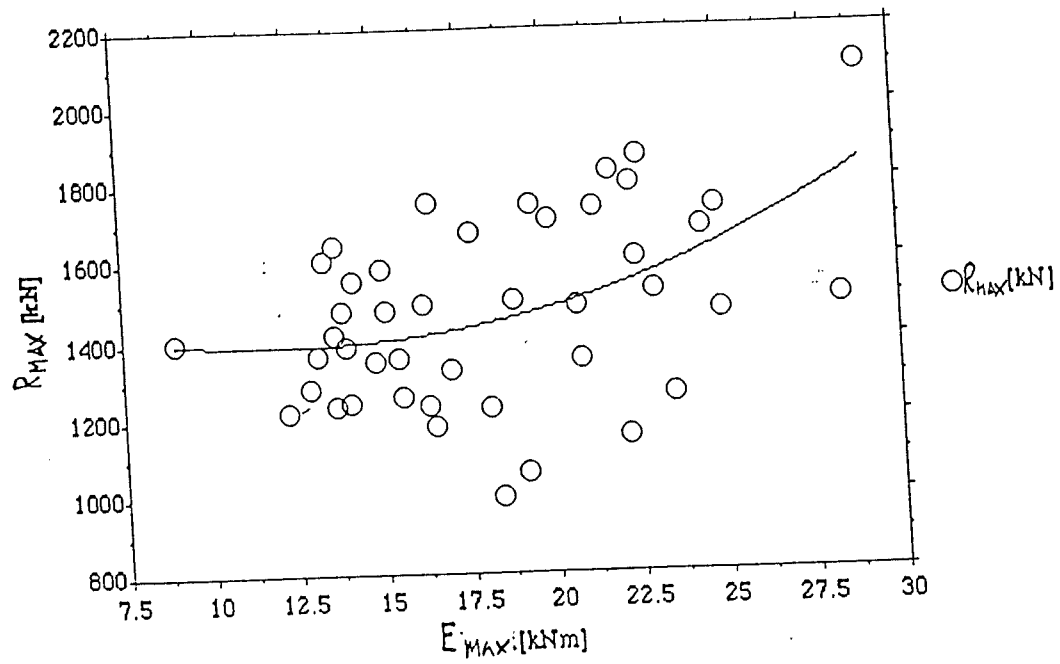


Figur 11.2 c. Postterminal etapp 2 Göteborg

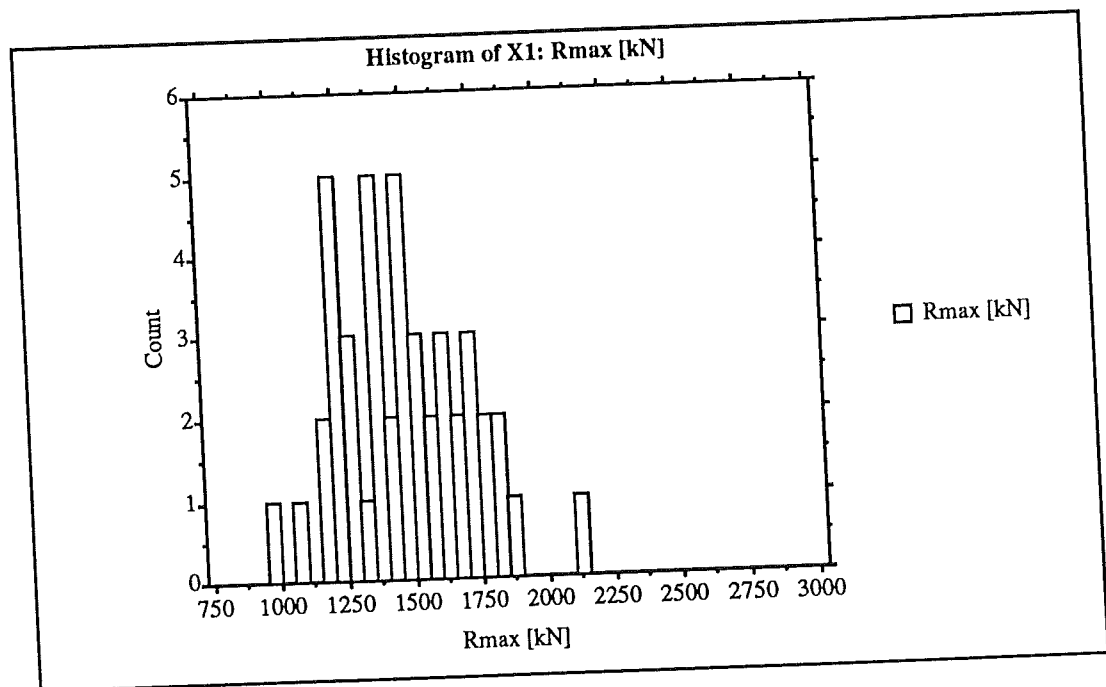
Ahlsells centrallager, Hallsberg

På en yta av ca 29.000 m² slogs ca 2.500 stödpålar av betong i klasserna B 450, A 600 och A 900. Pålarna var 10-20 meter långa och stoppslogs i morän.

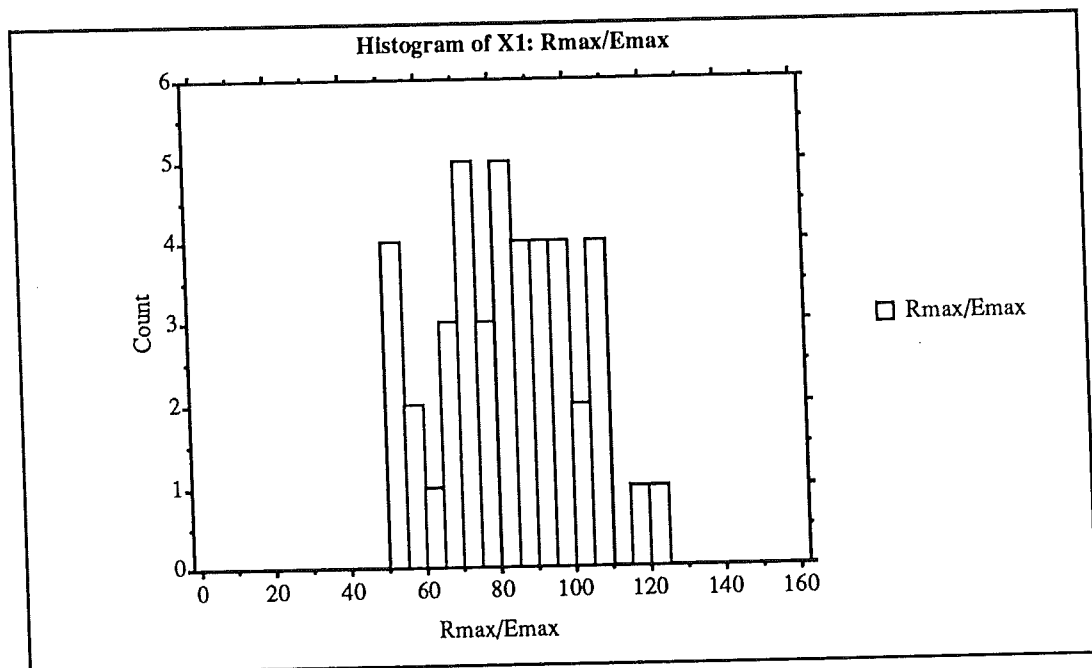
Studien omfattade A 600 pålar 235 x 235 mm² och A 900 pålar 270 x 270 mm².



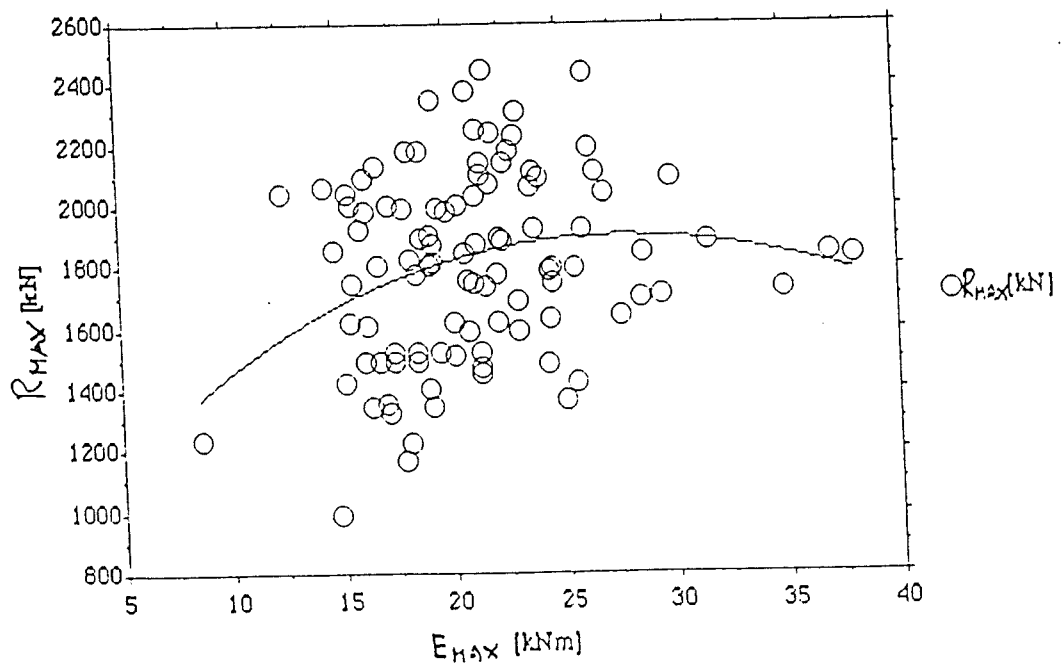
Figur 11.3 a. Ahlsell Centrallager Hallsberg A 600.



Figur 11.3 b. Ahlsell Centrallager Hallsberg A 600.



Figur 11.3 c. Ahlsell Centrallager Hallsberg A 600



Figur 11.4 a. Ahlsell Centrallager Hallsberg A 900

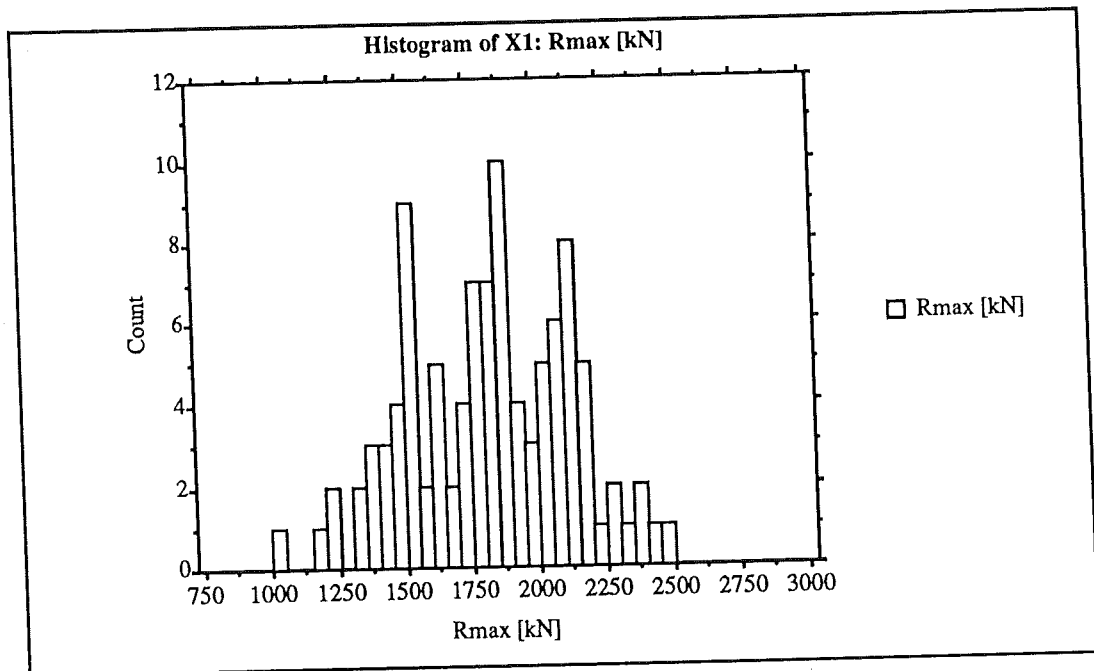


Figure 11.4 b. Ahlsell Centrallager Hallsberg A 900

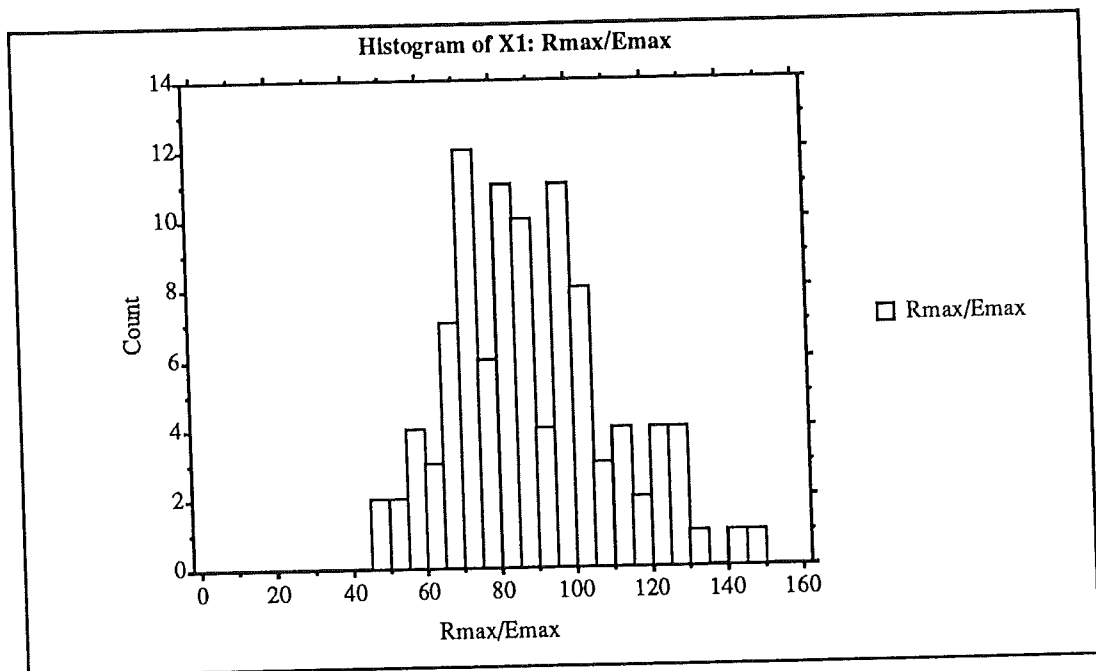
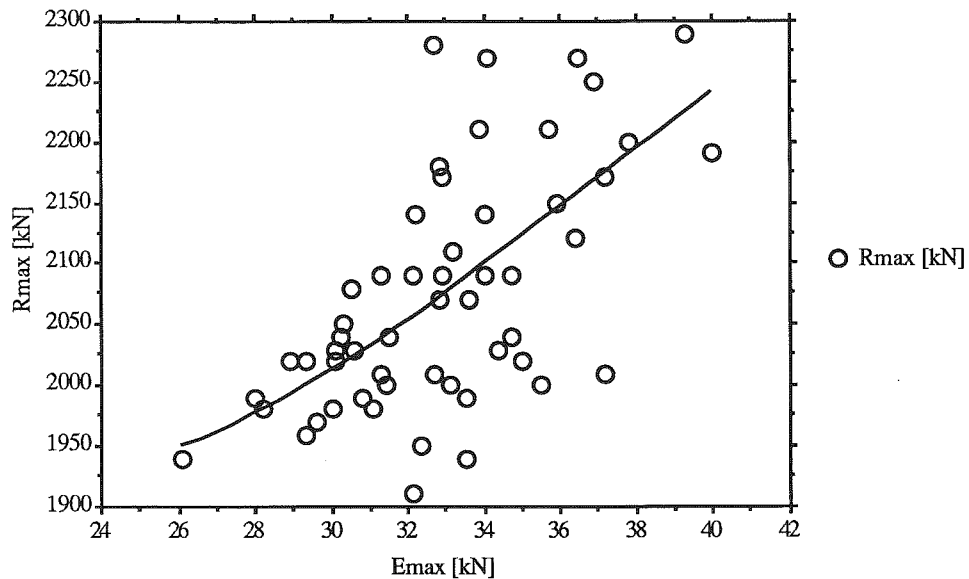


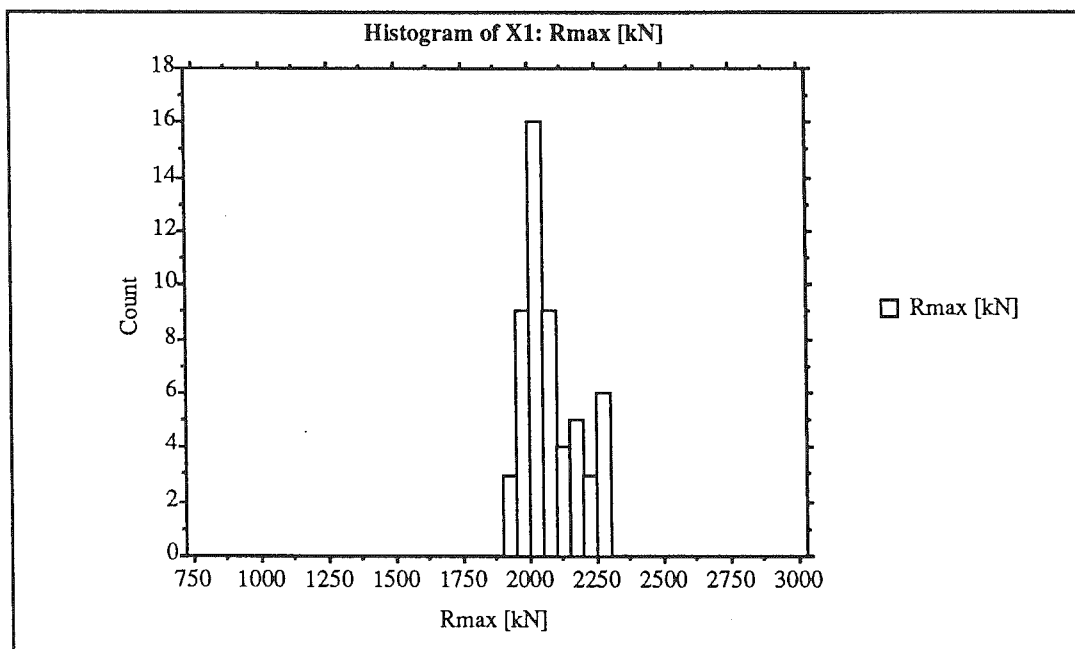
Figure 11.4 c. Ahlsell Centrallager Hallsberg A 900

Kv. Sextanten, Göteborg

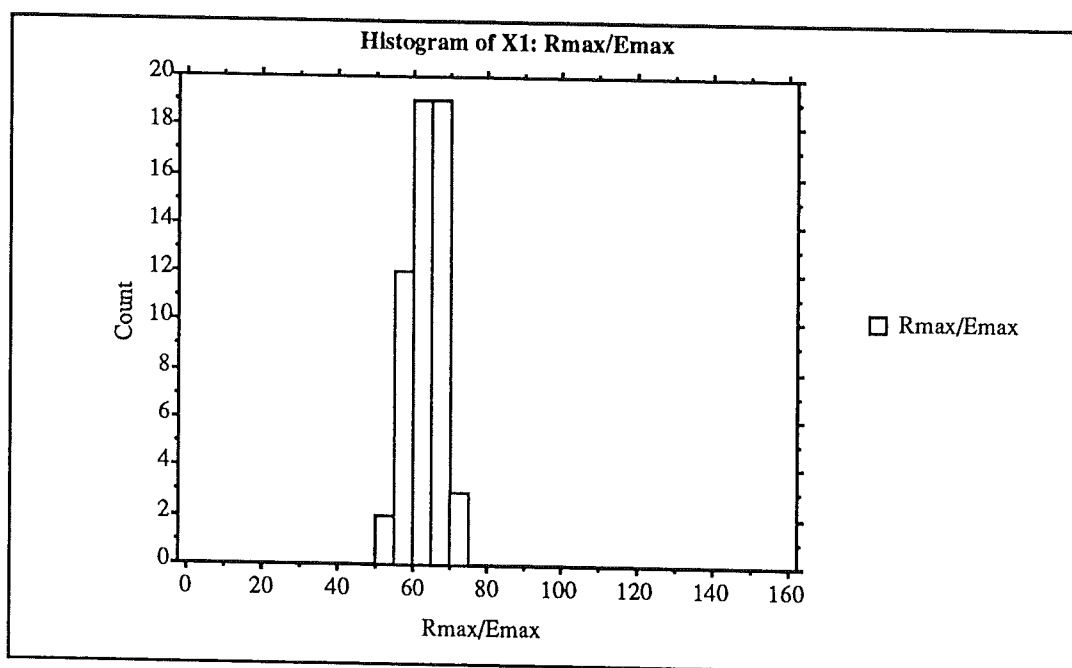
Pålningen utgjordes av 200 st friktionspålar av betong 275 x 275 mm² i klass A 800. Pålarna drevs genom ett 40 meter mäktigt lerlager och 8 meter ned i ett underliggande ensartat friktionslager. Pålängden var ca 48 meter och variationerna var försumbara inom området.



Figur 11.5 a. Kv Sextanten, Göteborg



Figur 11.5 b. Kv Sextanten, Göteborg



Figur 11.5 c. Kv Sextanten, Göteborg

En sammanställningstabell över framräknade variationskoefficienter hos de tre objekten presenteras nedan:

Objekt	Pålnings- klass	Variationskoefficienter	
		$R_{\max}$	$R_{\max}/E_{\max}$
Postterminal Etapp 2, Göteborg	A900	9,37%	15,87%
Ahlsells central- lager, Hallsberg	A600	16,06%	24,77%
- " -	A900	16,81%	25,13%
Kv Sextanten Göteborg	A800	4,86%	6,90%

Tabell 11.1. Sammanställning statistiska data.

Statistisk analys av påldata

Omfattning

Den statistiska analysen har gjorts direkt på rådata, utan analys av avvikande värden (outliers). Den har omfattat en bestämning av statistiska parametrar: medelvärde, standardavvikelse och variationskoefficient och dessutom har histogram uppritats. I vissa fall har även typen av statistisk fördelning bestämts.

Resultat

Diskussionen begränsas här till att gälla $R_{\max}$. Eftersom spridningsmåttet är intressant genom att det så starkt påverkar säkerhetsindex β , har intresset fokuserats på variationskoefficienten (standardavvikelse/medelvärde). För jordegenskaper brukar man ange värden på 15-25%, medan analysen av pålarna gav lägre värden, särskilt i fallet Kv Sextanten som visade värden $\approx 5\%$ (d v s som för ståls hållfasthet).

I de andra redovisade fallen var variationskoefficienten större. En grundläggande orsak till skillnaden ligger i vad man egentligen mätt. Som tidigare visats är det $R_{\max}$ man mäter, inte pålens "absoluta" brottlast, utan en funktion av den tillförda energin. I fallet Kv Sextanten (friktionspålar) var den tillförda energin så stor att jordbrott uppstod längs pålen, d v s det var bara variationer i jorden hållfasthet som styrde det uppmätta $R_{\max}$. Eftersom dessutom det uppmätta värdet styrdes av medelhållfastheten längs pålen fick man en utjämning av lokala småvariationer. Tillsammans gav detta den låga variationen.

I de båda andra fallen inverkar även tillförd slagningsenergi på variationen i $R_{\max}$. Man borde därför söka analysera påldata närmare, d v s försöka separera de värden där man verkligen nått jordbrott. Troligen kommer man då att få en betydligt mindre spridning.

De data som här analyserats kommer ju från mätningar där man skulle påvisa att man uppnått en minsta angiven bärförmåga och inte nödvändigtvis en bestämning av bärförmåga vid jordbrott.

Det syns alltså rimligt, att man vid projektering av pålning med β -metod kan använda en lägre variationskoefficient än den här uppmätta för pålar som är spetsbärande, och en variationskoefficient av storleksordningen 5 å 6% för friktionspålar.

I analysen har det visat sig att uppmätta data inte nödvändigtvis följer en normalfördelning. Detta bör beaktas inte bara vid en β -beräkning utan även vid tillämpning av tabellen för hållfasthetsdimensionering genom provning t ex Planverkets godkännanderegler 1975:4. (I dessa förutsätts nämligen normalfördelning och värdena är känsliga för fördelningstyp.)

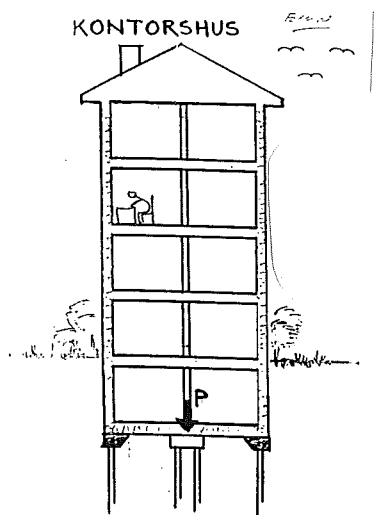
12. UTFÖRDA BERÄKNINGAR

I kapitel 7 har vi skissat på ett utkast till en beräkningsmodell för β -metoden på pålar. För att få en uppskattning vad denna ger för resultat har vi genomfört ett par beräkningsexempel.

Vi har därvid tänkt oss två olika byggnader.

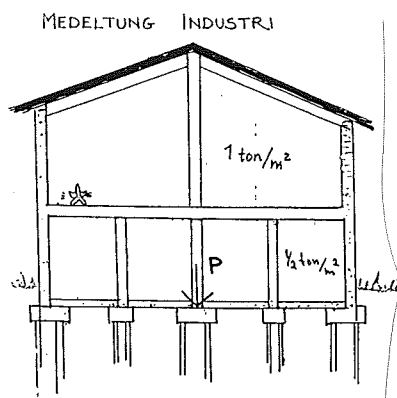
- Ett fyrvånings kontorshus
- En medelstor industri

För typiska spännvidder har vi därvid fått dimensionerande lastvärden enligt följande för en central pålgrupp.



$P_{\text{dim}} = 1700 \text{ kN}$
 $P_{\text{långtid}} = 1500 \text{ kN}$

Figur 12.1.



$P_{\text{dim}} = 1700 \text{ kN}$
 $P_{\text{långtid}} = 1300 \text{ kN}$

Figur 12.2.

Om vi antar att den dimensionerande lasten är 50-årslasten (normmässig ambition) och långtidslasten är medelvärdet av lasten får vi med antagande om normalfördelad last.

$$\begin{aligned}\text{Medelvärde} &= \mu \\ 50\text{-års last} &\approx 98\%\text{-fraktil} \approx \mu + 2\sigma \\ \text{Variationskoefficient} &= \sigma/\mu\end{aligned}$$

Som ett alternativ antar vi att vi endast känner den dimensionerande lasten. Vi antar då att 50-årslasten = medelvärdet. Variationskoefficienten = 0%.

För pålningen har vi antagit 3 st olika förhållanden. Vi har därvid antagit värden på variationskoefficienter för de olika förhållandena som indikeras av våra tidigare redovisade fältförsök. Värdena är försiktigt valda.

För modellfelet har vi valt värden mera skönsmässigt. Vid en noggrannare analys av dessa bör man ta hänsyn till ett flertal faktorer.

- Omfattning av kontroll
- Typ av mätningar och analyser
- Tillförlitlighet hos slagningsutrustning.

LASTER:

Stokastiska

Kontor: Normalfördelad
Påle, medel = 750 kN
V = 7%

Industri: Normalfördelad
Påle, medel = 650 kN
V = 15%

Deterministiska

Kontor/industri: Påle, medel = 850 kN
V = 0%

PÅLNINGSFÖRHÅLLANDEN

A. Friktionspåle

20 m lera över homogent friktionmaterial
Påle slås till viss längd i friktionsmaterial.
"Mantelbärande" Klass II

$$V_{\text{jord}} = \underline{\underline{7\%}}$$

$$V_{\text{modell}} = \underline{\underline{8\%}}$$

B. Friktionspåle

Lera/silt. Underlagrat friktionsmaterial.
Påle slås till "stopp".
"Spets och mantelbärande" Klass III

$$V_{\text{jord}} = \underline{\underline{13\%}} \quad V_{\text{modell}} = \underline{\underline{10\%}}$$

C. Friktionspåle i morän

Skiftande förhållanden.
"Huvudsakligen spetsbärande" Klass IV

$$V_{\text{jord}} = \underline{\underline{17\%}} \quad V_{\text{modell}} = \underline{\underline{12\%}}$$

Sammanfattning av resultat

Fullständiga resultat, se bilaga.

Partialkoefficienter är ett hjälpmedel för att separera olika osäkerheter. Efter en färdig analys är det lättare att jämföra resultat på en totalsäkerhetsnivå.

Med last som P_{dim} och bärförmåga som uppmätt medelvärde (ej lägsta värde) erhöll vi följande resultat för säkerhetsklass 3.

Totalsäkerhetsfaktor R/P_{dim}

Kontorshus/Pålförhållande	A	S = 1,7
- " - - " -	B	S = 2,2-2,4
- " - - " -	C	S = 2,8-3,0

Industrihus/ - " -	A	S = 1,7
- " - - " -	B	S = 2,2-2,4
- " - - " -	C	S = 2,7-3,0

- Beräkningarna visar att vi kan få ganska olika krav på säkerhetsfaktorer under olika förhållanden
- Att den kontroll- och mätinsats vi sätter in har en avgörande inverkan på vårt slutresultat
- Att det finns marginaler jämfört med dagens pålpraxis, men att vi inte okritiskt kan tillgodogöra oss den under alla förhållanden.

$$\beta = 4,75$$

PÅLTYP	A				B				C			
	S	S	D		S	S	D		S	S	D	
LASTTYP												
OBJEKT	K	I	K/I		K	I	K/I		K	I	K/I	
PÅLLAST	750	650	850		750	650	850		750	650	850	
BÄRFÖRMÅGA ERFORDERLIG	1420	1450	1500		1860	1830	2000		2350	2260	2570	
"UPPMÄTT?"	<--	"2000"	-->		<--	"2100"	-->		<--	"1750"	-->	
M E D E L V Ä R D E	$\gamma_m \times \gamma_n$	1,17	1,16	1,19	1,47	1,44	1,49	1,65	1,63	1,65	1,65	
	γ_m	0,98	0,97	0,99	1,23	1,20	1,24	1,38	1,36	1,38	1,38	
	γ_{Rd}	1,42	1,33	1,49	1,53	1,44	1,58	1,77	1,66	1,77	1,82	
	γ_f	1,14	1,45	1,0	1,10	1,35	1,0	1,08	1,29	1,08	1,0	

Figur 12.1. Sammanställning av utförda beräkningar.

LITTERATURHÄNVISNING

- Baecher, G B & Rackwitz, R, 1982. *Factors of Safety and Pile Load Tests*. Int J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics Vol 6, pp 409-424.
- Bengtsson, P-E, Berggren, B, Olsson, L & Stille, H, 1990. *Geoteknik & Statistik*. BFR-rapport.
- Thoft-Christensen, P, Baker, M J, 1982. *Structural Reliability Theory and it's Applications*. Springer Verlag.
- Ditlevsen, O, 1983. *Basic Reliability Concepts. Reliability Theory and its Application in Structural and Soil Mechanics*. Thoft Christensen, P (ed) NATO ASI Series.
- Ditlevsen, O, 1984. *Probabilistic Thinking: An Imperative in Engineering Modelling*. Afdelingen for Bærende Konstruktioner, Danmarks Tekniske Højskole rapport Serie R No 192. Lyngby 1984.
- Harr, M E, 1987. *Reliability-Based Design in Civil Engineering*. McGraw-Hill Book Company.
- International Standard ISO 2394. *General Principles on Reliability for Structures*. Ref No ISO 2394-1986(E).
- Olsson, L, Rehnman, S-E & Stille, H, (1985). *Partialkoefficientmetoden - Illustrerande beräkningar*. Rapport R45:1985. BFR, Stockholm.
- Alén, C, 1989. *β -metoden och geoteknik*. Väg- och Vattenbyggaren Nr 4, pp 28-31.
- Åkerlund, S, 1989. *Personlig kommunikation*.

BILAGA:

Integritet

INTEGRITET

Med begreppet en påles integritet avses vanligtvis i vad mån pålelementen är behäftade med skador i betongtvärsnittet längs pålens längd samt eventuell förekomst av glapp i skarvar.

De tre vanligaste förekommande metoderna för att kontrollera en påles integritet är:

- Observation i inspektionshål med lodtolk
- Dynamisk mätning av stötvåg initierad av ett lätt slagdon, ex handslägga (low strain-testing).
- Dynamisk mätning av stötvåg initierad av ett tungt slagdon, ex en pålkrans hejare (high strain testing).

Nedan beskrives kort de tre metoderna.

OBSERVATION I INSPEKTIONSHÅL

Innan de dynamiska metoderna hade utvecklats var den vanligaste metoden att kontrollera en påles integritet att lodtolka i ett i pålen ingjutet inspektionsrör. Metoden är beskriven i SBN 75:8 kap 4.6.4. Där fastställs följande kriterium - En påle kan anses vara intakt och ej starkt krökt om exempelvis ett 1,8 m långt rör med yttre diameter 36 mm och godstjocklek 8 mm av egen tyngd kan nedföras till pålspetsen såsom lodtolk i inspektionshål med 42 mm invändig diameter. -

Metoden har numera i de flesta fall ersatts med dynamisk mätning av stötvågsförlopp initierade av tunga slagdon.

LOW-STRAIN TESTING

Vid studium av korta oskarvade pålar och grävpålar finns en dynamisk mätmetod utvecklad kallad low-strain testing. Metoden mäter accelerationen i ett stötvågsförlopp. Givaren placeras på pålens överände och stötvågen initieras t ex med hjälp av en handslägga. Det uppmätta accelerationsförloppet integreras till partikelhastighet. Metoden används bl a i Nederländerna där TNO har utarbetat ett system som kan studeras nedan i fig 1.

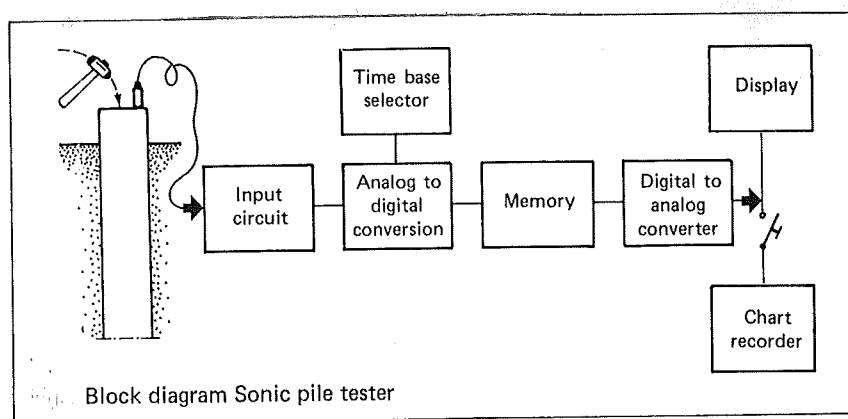


Fig 1 Low-strain testing, system TNO

När slaget appliceras på pålskallen sänds en tryckvåg ner i pålen. Defekter samt pålens ände reflekterar denna våg. Se fig 2.

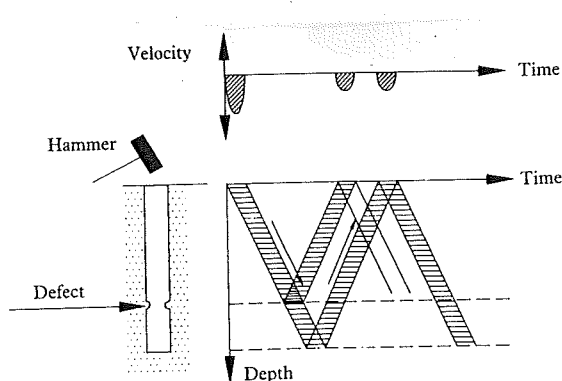
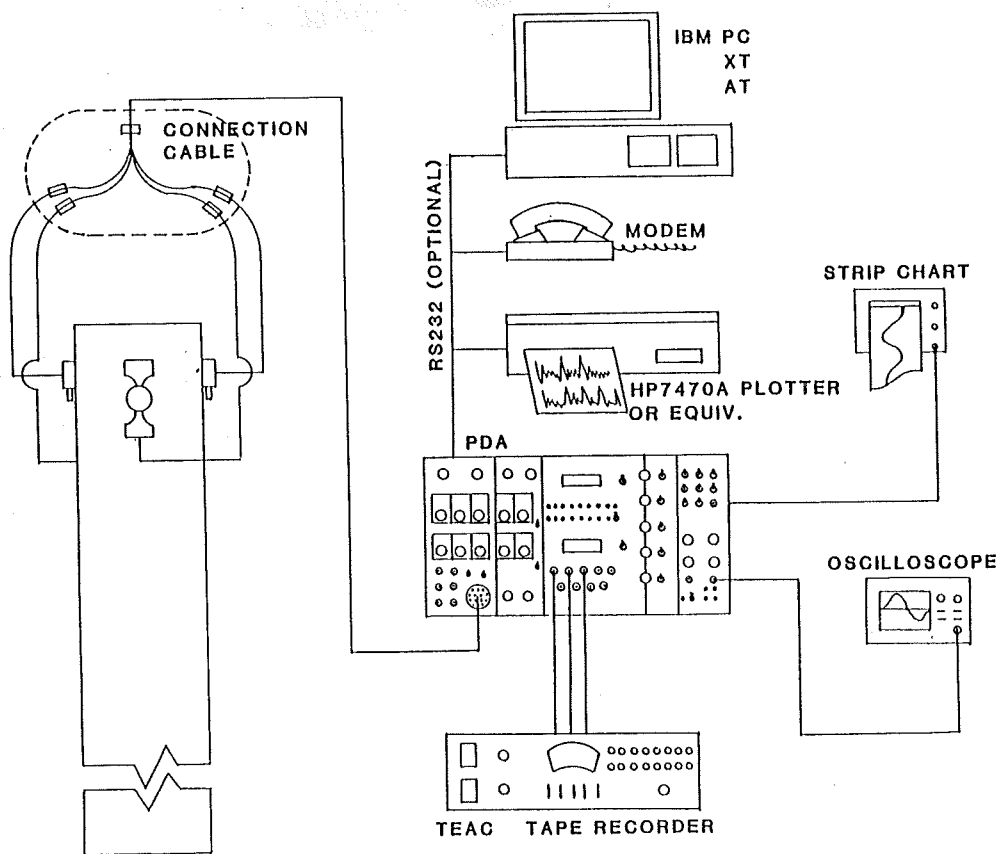


Fig 2 Stötvågsförlopp enligt low-strain testing

Skadans storlek får sedan bedömas erfarenhetsmässigt eller via simulering i ett datorprogram.

HIGH - STRAIN TESTING

Vid mätning på skarvade betongpålar klarar den tidigare beskrivna metoden low-strain testing ej att tränga igenom en skarv. För att kunna utföra kontroll på dylika pålar måste stötvågen appliceras med hjälp av tunga slagdon vanligtvis en pålkrans hejare. Stötvågsmätning utförd enligt ovan kallas high-strain testing. Vid dessa mätningar mätes både kraft- och partikelhastighetsförloppet (integrerad accelerationssignal). Det vanligast förekommande systemet kommer från USA och är utvecklat av PDI i Cleveland, Ohio. Systemet framgår av nedanstående figur 3.



Schematic of Equipment Set-up for Normal Operation Mode (Transducer Input)

Fig 3 High-strain testing, system PDI

Liksom vid low-strain testing transmitteras en stötvåg ned i pålen. Reflektioner sker vid impedansförändringar som skador, skarvglapp eller pålens ände samt vid friktion eller kohesion längs manteln. Ett system att uppskatta en skadas storlek har utvecklats. Se figur 4.

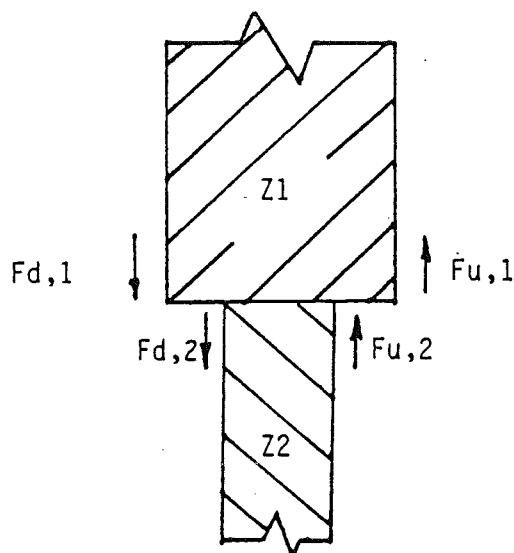


Fig 4 Teoretisk modell av stötvåsförlopp vid en impedansförändring

Skadans storlek bedöms genom kvoten mellan impedanserna $\frac{Z_2}{Z_1}$.

Denna kvot erhålles genom att studera nedåtgående och reflekterande krafter enligt figur 4 ovan.

En klassning av skadan göres sedan enligt nedanstående tabell:

$\frac{Z_2}{Z_1}$	Pålens kondition
1,0	Oskadad
0,8-1,0	Lätt skadad
0,6-0,8	Svårt skadad
-0,6	Bortslagen

En nackdel med metoden är att skadan behöver vara av relativt stor utsträckning för att kunna detekteras.

Exempel på ett stötvågsförlopp i en skadad påle kan studeras i figur 5 nedan:

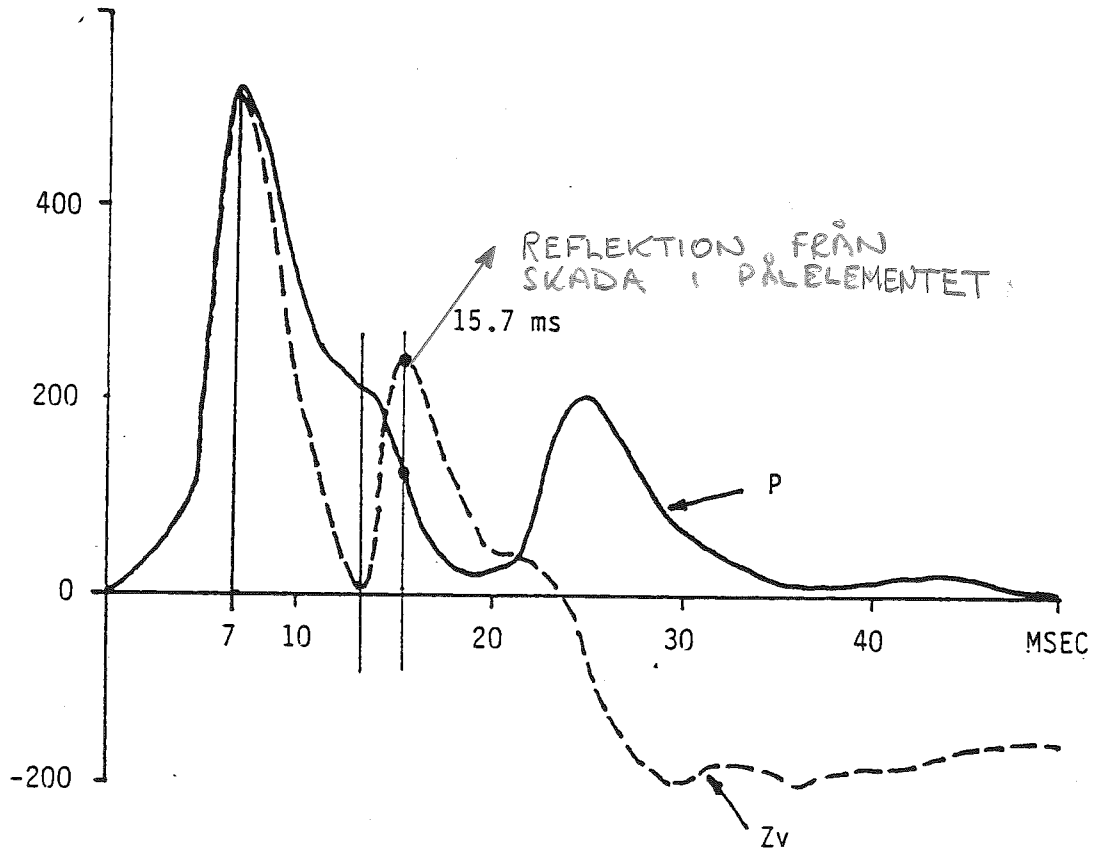


Fig 5 High-strain testing. Kraft-partikelhastighetsförlopp i påle behäftad med en skada

BILAGA:

Case-metoden

PILE DRIVING ANALYZER ----- "CASE METODEN"Allmänt

Den ovan rubricerade metoden avser en dynamisk mätmetod som utvecklats vid Case Western Reserve University, USA, där den första prototypen av påanalysatorn framtogs i början av 1970-talet. Utvecklingsarbetet har pågått under en 10-årsperiod med medel bl a från Ohio Highway Administration. Resultatet av detta forskningsarbete är "The Pile Driving Analyzer" eller påanalysatorn. Den modell som användes i Sverige är benämnd GB.

Fördelar med användande av elektronisk stötvågsmätning enligt CASE-metoden

a/ Analysatorn kan för varje slag bestämma bl a följande storheter:

Maximal tryckkraft i pålen
Maximal dragkraft i pålen
Maximal partikelhastighet i pålmaterialet
Maximal acceleration
Maximala rörelsen vid mätstället
Pålens drivningsmotstånd eller bärighet
Till pålen tillförd energi

b/ Pålens integritet kan övervakas slag för slag. Man kan exempelvis göra kontroller m a p nedanstående:

Glapp i skarvar liksom större sprickor lokaliseras och glappet eller vidden bestäms.

Skador detekteras; skadans läge och sektionsminskningens ungefärliga omfattning kan beräknas.

Pålens längd i marken bestäms, vilket innebär att stötvågsmätningen kan visa om och var en påle är avslagen.

Tryckspänningar och dragspänningar i mätpunkten erhålles direkt. Indirekt kan spänningar i andra delar av pålen uppskattas. Slagningen kan styras så att tillåtna dragkrafter icke överskrides.

85-01-21-77

71

- c/ Den statiska andelen av pålens beräknade drivmotstånd kan registreras automatiskt. Beräkningen sker enligt CASE-metoden. Dylåka studier under olika skeden av drivningen ger information om:

Pålens bärighetstillväxt under slagningen

Markens dynamiska respons

Pålens funktionssätt: mantelbärande och/eller spetsbärande påle

Erforderliga stoppslagskriterier

Tillåten last på pålen. I de fall där jordlagrens bärformåga är större än väntat kan eventuellt den tillåtna lasten ökas.

- d/ Effektiviteten hos den använda slagutrustningen kan kontrolleras. Exempel:

Jämförelse mellan teoretiskt tillgänglig potentiell energi, (fallhöjd x hejarvikt) och till pålen överförd energi, vilken automatiskt beräknas och registreras av analysatorn.

Effekter av olika typer och tjocklekar av dynträ på den överförda kraften och energin.

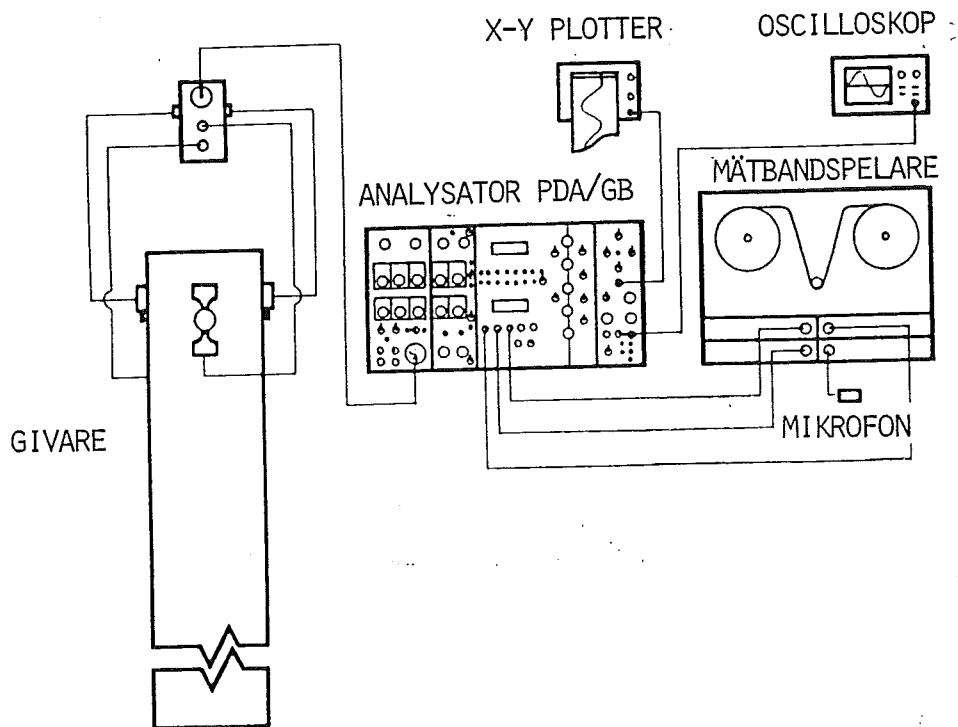
Konditionen och verkningsätt hos eventuellt använd fjädderdyna. Inverkan av olika förspänningsgrader hos fjädderdynan på stötvågsförloppet.

- e/ I många fall kan stötvågsmätning med CASE-analysatorn ersätta statisk provbelastning. Bärigheten bestämmes då vid slagning av provpålarna.

Mätutrustning

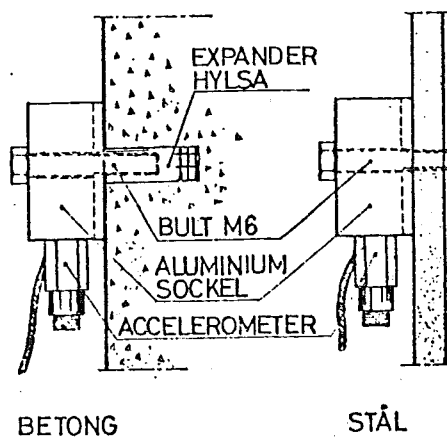
Mätutrustningen består av följande enheter, se figur A1:

- Pålanalysator (beräkningsenhet) PDA/GB
- Oscilloskop
- Bandspelare
- X-Y Plotter
- Givare (mätenheter på påle)



Figur A1 Stötvågsmätningssystem PDA (GB). Ingående mätenheter.

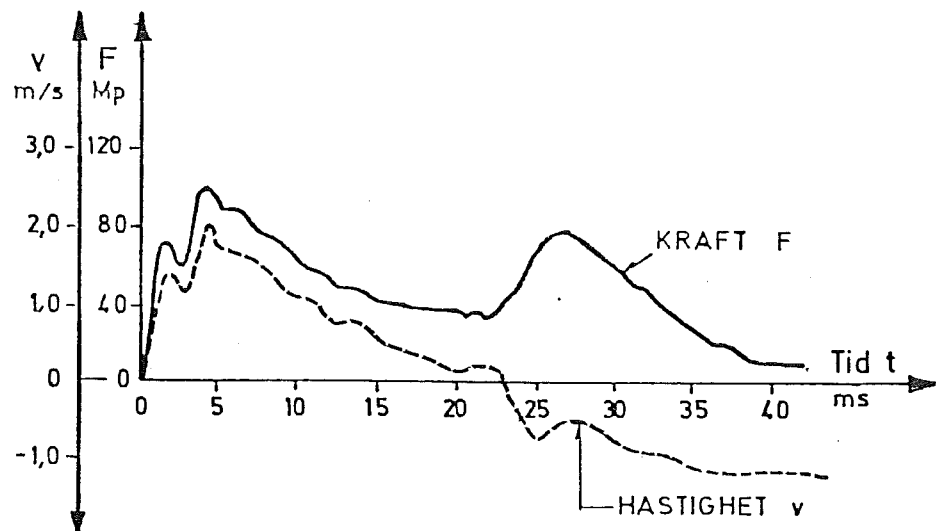
CASE-metoden innebär att man studerar samspelet mellan pålens partikelhastighet och överförd kraft under varje slag. Registreringen av två basparametrar göres: acceleration och töjning i pålen. Detta mätes med två accelerometrar respektive två trådtöjningsgivare som monteras på ett avstånd av 3 till 5 ggr pålens tvärmått från pålhuvudet med bultar M6 på pålen, Se figur A2.



Figur A2 Montering av accelerometrar till pålelement av betong eller stål

I analysatorns beräkningsenhet integreras accelerationen till hastighet och ur töjningarna beräknas kraften. På bandspelare lagras ovannämnda data för dokumentation och vidare analys i laboratorium. Vidare kan man, för varje slag, få de beräknade kraft- och hastighetsförloppen presenterade som funktion av tiden på ett oscilloskop. Figur A3 visar ett typiskt kraft- och hastighetsförlopp. Med en X-Y plotter kan sedan ovannämnda kurvor uppritas.

Montering av en givare tar normalt 10-15 minuter och kan oftast förberedas så att ingen nämnvärd störning av pålningsarbetet uppstår. Utrustningen placeras i en bil av kombityp eller liknande och kan därvid lätt transporteras på arbetsplatsen samtidigt som utrustningen är skyddad för väder och vind.



Figur A3

Typiska kraft- och hastighetskurvor med spetsen stående i hårt friktionsmaterial.
Påldata: 235 x 235mm². Längd: 37 m.
4-tons hejare, konventionell dyna

Teori

Den endimensionella vågteorin ligger till grund för de samband som användes vid analys av data erhållna vid dynamiska stötvågs mätningar. Stötvågens utbredningshastighet i pålen bestäms ur sambandet

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots\dots\dots B1$$

där ρ = pålens densitet och E är den dynamiska elasticitetsmodulen.

I osprucken betong varierar utbredningshastigheten c_0 normalt mellan 3,5 m/ms till 4,2 m/ms. Är betongen uppsprucken reduceras emellertid gånghastigheten väsentligt. Medelgånghastigheten c_1 i ett pålelement varierar oftast mellan 3,0 och 4,0 m/ms. Utbredningshastigheten i stål är 5,15 m/ms,

Medelgånghastigheten c_1 kan beräknas när stötvågens gångtid t_1 är känd. Stötvågen går från mätpunkten ned till pålspetsen och tillbaka på tiden t_1 ms. Gångtiden $t_1 = 2L/c_1$ är redovisad i figur B1. Allmänt sett användes detta samband för att beräkna gångtiden till en godtycklig punkt på pålen eller för att bestämma medelgånghastigheten i en viss del av pålen.

$$\frac{2\ell}{c_1} = t \quad \dots\dots\dots B2$$

där ℓ = avstånd från mätpunkt till studerad punkt på pålen

c_1 = stötvågens medelgånghastighet

t = gångtid i pålen på sträckan 2ℓ

Ekvation B2 utnyttjas vid integritetskontroll av pålen för att beräkna var på pålen en eventuell skada är belägen. Sambandet ingår även som en parameter i "CASE-metodens" bärighetsekvationer.

Kraften P och pålens partikelhastighet v förhåller sig till varandra som pålens vågimpedans $E A/c$.

$$P = \frac{E \cdot A}{c_0} \cdot v \quad \dots\dots\dots B3$$

där P = uppmätt kraft i pålen

v = pålens partikelhastighet

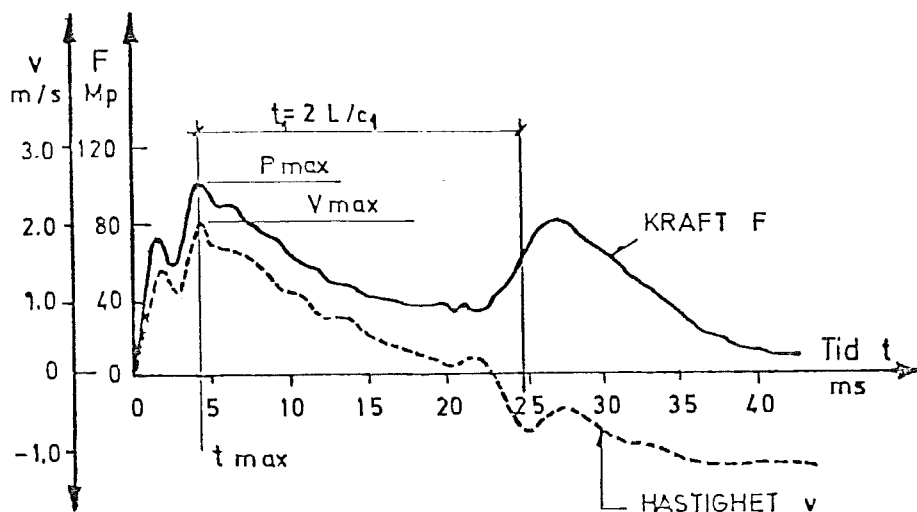
A = pålens sektionsarea

E = dynamisk elasticitetsmodul

c_0 = stötvågens gånghastighet i pålen

75

Ekvation B3 härledes ur Newtons andra lag och tillämpas vid sprängvisa tillståndsförändringar t e x när hejaren träffar pålen. Denna ekvation utnyttjas bl a vid härledning av bärighetsekvationerna och användes vid analysen av de uppmätta kraft- och hastighetskurvorna.



Figur B1. Kraft- och hastighetskurvor där gångtiden $t_1 = 2L/c_1$ är redovisad. L är avståndet mellan mätpunkten och pålspets, c_1 är medelgångshastigheten i pålen.

Integritetskontroll

En skada eller defekt visar sig på kraft- respektive hastighetskurvorna som en minskning av kraften samtidigt som partikelhastigheten ökar.

Detta sker före reflexionen från spetsen.

Genom att använda sambandet $2L/c$ kan man beräkna avståndet från mät-punkten till eventuell skada. Oftast är medelgånghastigheten känd i pålelementet varför skadans läge kan beräknas noggrant. Kontrolleras pålen vid efterslagning ger den beräknade medelgånghastigheten m a p reflexen från spetsen, tillsammans med stötvågens utseende, information om pålen är hel eller ej. Samtidigt kan eventuella defekter bestämmas enligt ovannämnda förfarande. Skadans storlek eller sprickvidd kan bestämmas med hjälp av ekvationer härledda av Frank Rausche i Criteria for Determination of Pile Damage from Pile Top Force and Velocity, 1977. Pålen klassificeras m h t skadans storlek och bedömning göres huruvida pålen kan tänkas fungera som avsetts, bl a med hänsyn till lastupptagning och beständighet.

Bärighetsbestämning

Utgående ifrån de dynamiska mätningarna kan pålens bärighet eller bär-förmåga förutsägas. Pålens totala dynamiska bärförmåga kan beräknas ur nedanstående ekvation:

$$R = \frac{F(t) + F(t+2L/c)}{2} + \frac{Mc}{2L} [v(t) - v(t+2L/c)] \quad \dots\dots C1$$

där R = det totala drivningsmotståndet (bärförmågan)

$F(t)$ = kraften vid mätpunkten vid tiden t .

$v(t)$ = pålens partikelhastighet vid mätpunkten vid tiden t .

M = pålens massa nedanför mätpunkten

L = pålens längd från mätpunkten till pålspetsen

c = stötvågens gånghastighet i pålen

Den totala dynamiska bärförmågan R består av en statisk andel R_s och en dynamisk andel R_d . Den statiska andelen R_s erhålles ur ekvation C2 nedan.

$$R_s = R - J(2F(t) - R) \quad \dots\dots\dots C2$$

där J är en dimensionslös jordkonstant som beskriver dämpningen i jorden vid pålspetsen. Jordkonstanten J varierar från 0 till värden något större än 1. Följande värden tillämpas:

0 - 0.15	sand och grövre friktionsjord
0.15 - 0.25	sandig silt
0.45 - 0.70	siltig lera
0.90 - 1.20	lera

BILAGA:

Beräkningsbilaga

Dimensionering av pälar med β -metoden

<u>Innehåll</u>	<u>Sid</u>
A. β -metoden illustrerad för 1st variabel	1
B. " " " " 2st variabler	3
Designpunkt	4
Sensitivitets faktorer	5
C. Beräkningsalgoritmen	7
D. Skisserad beräkningsmetod	8
E. Partialkoefficienter	10
Exempel ent avsnitt 13	11-19

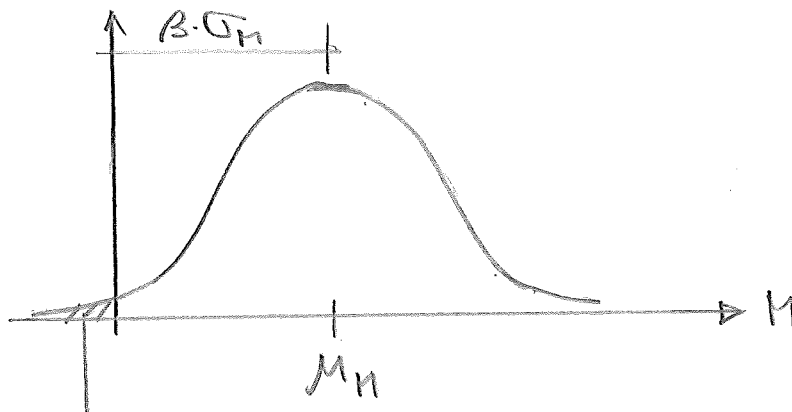
Sid 81-100

Illustrerande beräkningar

A. Inledande exempel 1st variabel

Vi tecknar säkerhetsmarginalen:

$$M = R - S$$



Brottsannolikhet

Risken för brott är att $S > R$ dvs $M < 0$

Om vi antar att M är normalfördelad och inför variabel substitutionen

$$Y_M = \frac{M - M_M}{\sigma_M}$$

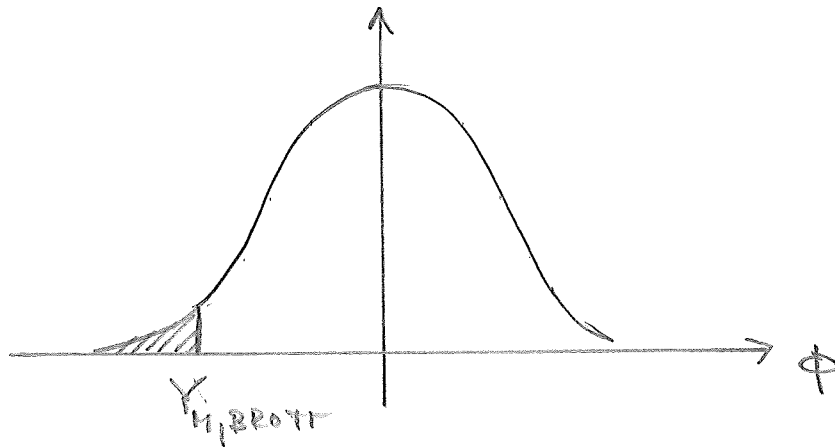
gäller för Y_M

medelvärde = 0

standardavvikelse = 1

Vi har fått en normaliserad normal fördelning

$$N(0, 1) = \phi$$



$$\text{Brott för vi för } \mu = 0 \Leftrightarrow Y_{H, \text{BROTT}} = \frac{0 - \beta \cdot \sigma_H}{\sigma_H} = -\beta$$

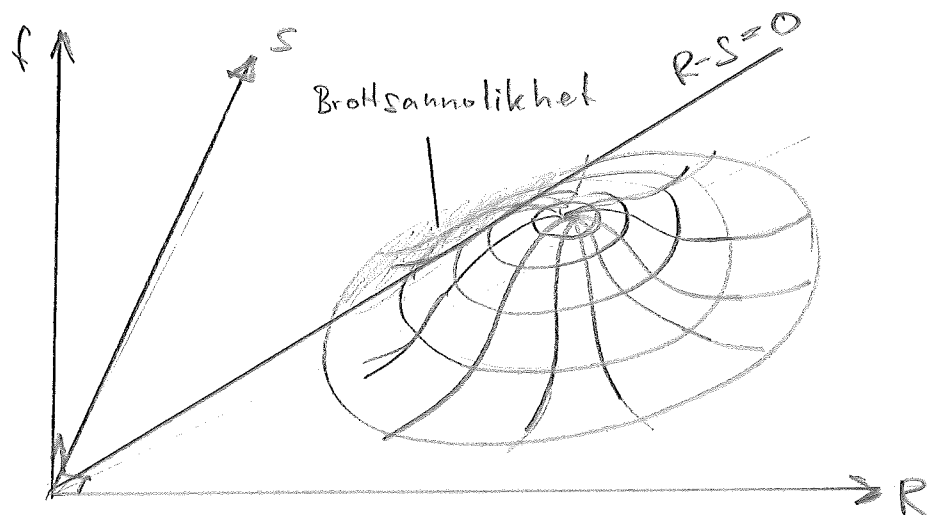
den sannolikheten för brott

$$(1) \quad p(\text{BROTT}) = \phi(-\beta) \quad (\phi \text{ gängse beteckning för normaliserad normalfördelning})$$

$$(2) \quad \text{där } \beta = \frac{\mu_H}{\sigma_H} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

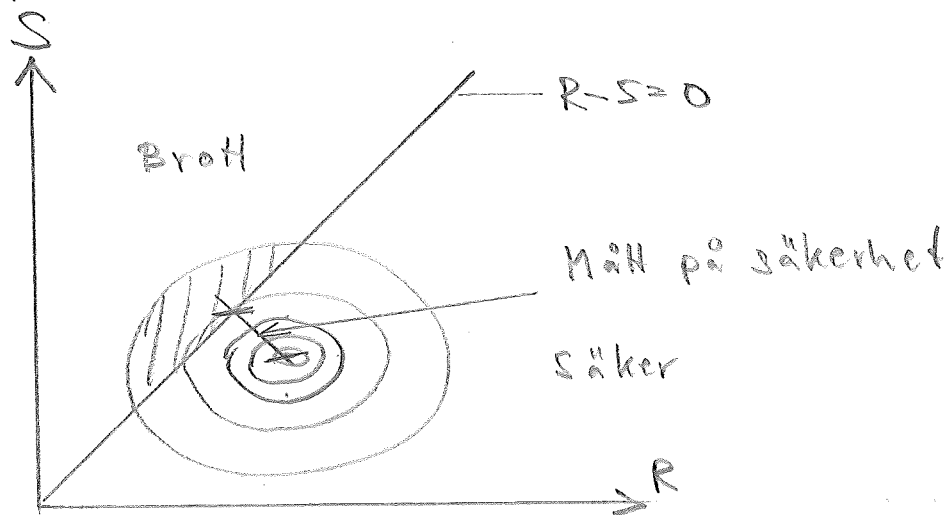
B. 2 st variabler

Istället för att teckna säkerhetsmarginalen M , kan vi illustrera direkt för 2 st variabler.



Brotts sannolikheten illustreras i detta fall av den del av "sandhögen" som skärs bort av brottkurvan $R-S=0$

En projektion uppifrån ger oss denna bild:



Exempel: R: $M_R = 1250$

$\sigma_R = 250$

S: $M_S = 800$

$\sigma_S = 200$

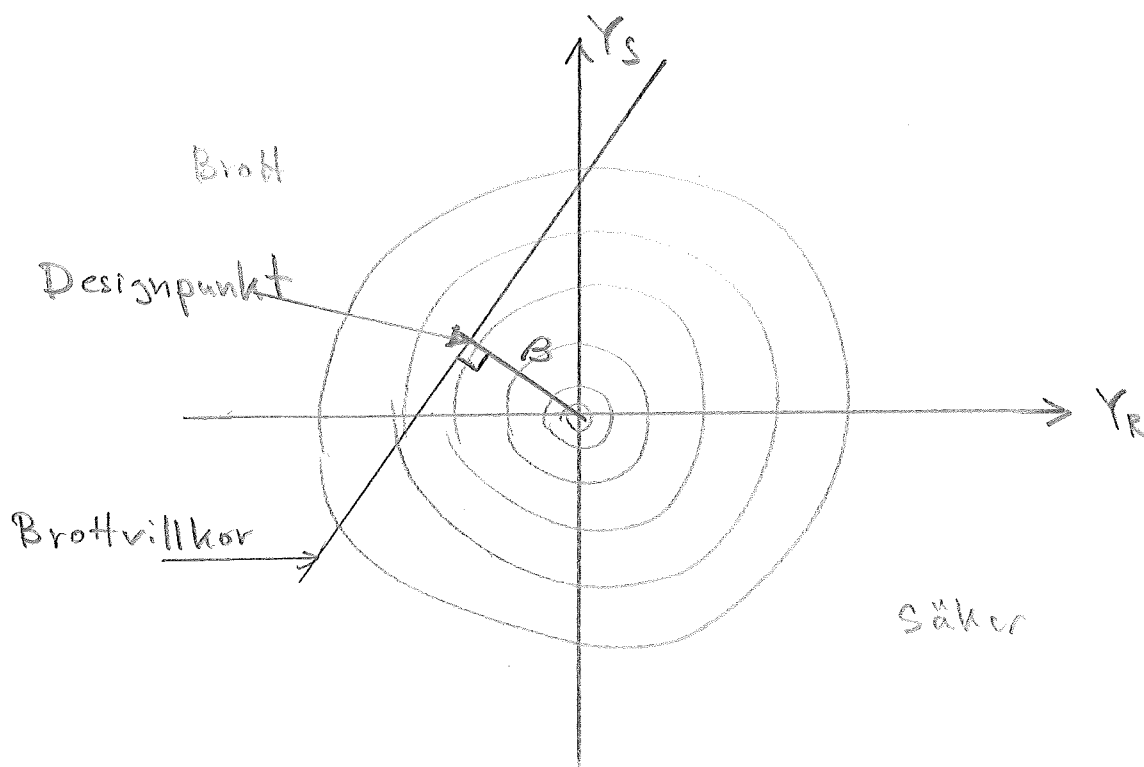
Om vi liksom för 1st variabel inför normaliserade variabler

$$Y_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad ; \quad Y_S = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S}$$

blir $\mu_{Y_R} = \mu_{Y_S} = 0 \quad ; \quad \sigma_{Y_R} = \sigma_{Y_S} = 1$

Y_R och Y_S illustreras av en "cirkulär sandhög" med medelpunkt i origo

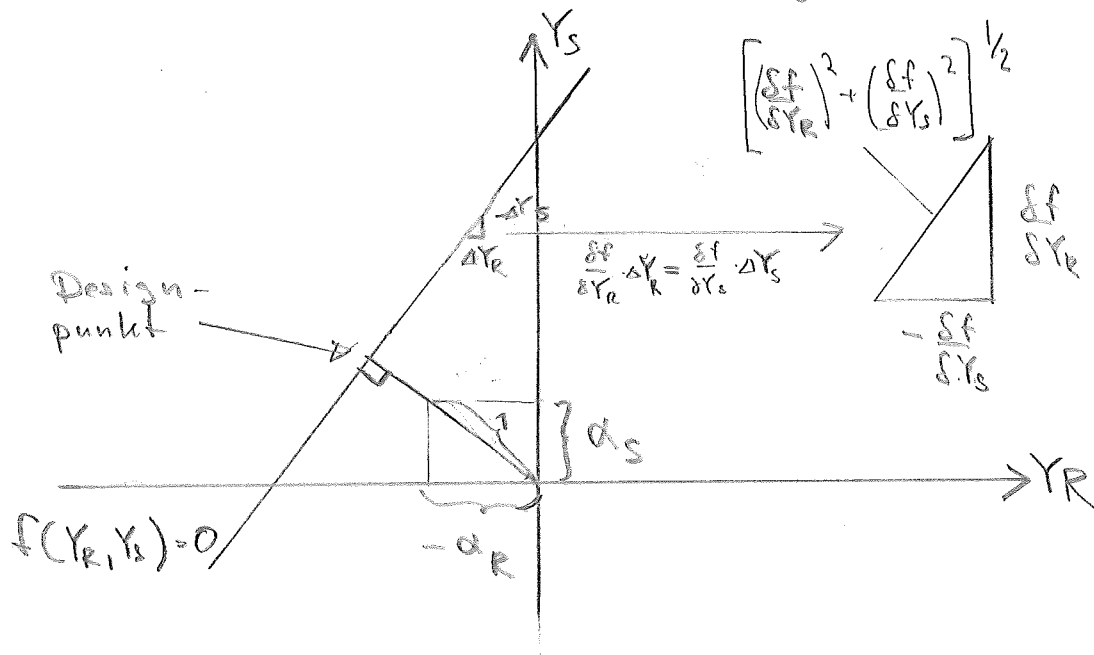
$$R - S = 0 \Rightarrow \sigma_R \cdot Y_R - \sigma_S \cdot Y_S + (\mu_R - \mu_S) = 0 \quad (2)$$



Ur (2) och (3)

Kan man visa att kortaste avståndet från origo till brottvillkoret är β

För normaliserade normalfördelningar och linjärt brotthillkor har vi fått en illustration av säkerhetsindexet β enligt Hasofer-Lind



för en enhetsvektor i normalens riktning införs beteckningen (α_R, α_S)

För att bestämma vårt säkerhetsindex β måste bestämma riktning och avstånd till vårt brotthillkor:

Likformighet ger:

$$-\alpha_R = \frac{\frac{\partial f}{\partial Y_R}}{k} \quad ; \quad \alpha_S = \frac{-\frac{\partial f}{\partial Y_S}}{k} \quad \text{där } k = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial Y_R} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y_S} \right)^2 \right]^{1/2}$$

För designpunkten gäller

$$Y_R = \beta \cdot \alpha_R \quad ; \quad Y_S = \beta \cdot \alpha_S$$

$$\text{Insättning i (3)} \Rightarrow \underline{\underline{\beta}}$$

Vi försöker nu lösa vårt exempel från sid 3

$$f(Y_R, Y_S) = 250 \cdot Y_R - 200 \cdot Y_S + (1250 - 800)$$

$$\frac{\partial f}{\partial Y_R} = 250 \quad ; \quad \frac{\partial f}{\partial Y_S} = -200$$

$$\therefore \alpha_R = -\frac{250}{k} \quad ; \quad \alpha_S = \frac{200}{k}$$

$$\alpha_R^2 + \alpha_S^2 = 1 \Rightarrow k = 320,1562$$

$$\alpha_R = -0,78 \quad \alpha_S = 0,625$$

$$\beta \cdot (-0,78) \cdot 250 - \beta \cdot 0,625 \cdot 200 + 1250 - 800 = 0$$

$$\underline{\underline{\beta = 1,41}}$$

Designpunkten:

$$Y_R = 1,41 \cdot (-0,78) = -1,10 \quad ; \quad R = -1,1 \cdot 250 + 1250 = 975$$

$$Y_S = 1,41 \cdot 0,625 = 0,88 \quad ; \quad S = 0,88 \cdot 200 + 800 = 976$$

Partial koefficienter

$$r_R = \frac{1250}{975} = 1,28$$

$$r_S = \frac{976}{800} = 1,22$$

I detta exempel hade det varit lättare att lösa β direkt ur (2)

$$M = R - S \quad \mu_n = 1250 - 800 = 450$$

$$\sigma_n = (\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2} = 320,16 \quad \beta = \frac{450}{320,16} = 1,41$$

C. Exemplet var med för att illustrera en allmänare algoritm:

$$1. \text{ Brötkvillkor } g(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \quad (4)$$

$$2. \text{ Variablerna } x_i \text{ normaliseras } z_i = \frac{x_i - \mu_{xi}}{\sigma_{xi}}$$

$$3. \text{ "Nytt" brötkvillkor: } f(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n) = 0 \quad (5)$$

4. För designpunkten gäller

$$f(\beta a_1, \beta a_2, \dots, \beta a_i, \dots, \beta a_n) = 0 \quad (6)$$

$$5. \quad \alpha_i = \frac{-\frac{\partial f}{\partial z_i}(\beta a_1, \beta a_2, \dots, \beta a_i, \dots, \beta a_n)}{k} \quad (7)$$

$$6. \quad k \text{ ges av } \sum \alpha_i^2 = 1 \quad (8)$$

7. Gissa α_i så att (8) gäller

- Minustecken på bärförmåga

plus " på last

8 Lös ut nya α_i ur (7)

9. " " β (eller annan sökt variabel) ur (6)

10 Upprepa från 7 tills att α_i och β inte ändras

Skisserad beräkningsmetod

Brok villkor $\eta \cdot R - S = 0$

där $\eta = N(1, \sqrt{\eta})$

normalfördelad

$R = LN(\mu_R, \sigma_R)$

lognormal

$S = N(\mu_S, \sigma_S)$

normal

För att få normalfördelning för R
inför vi $Y_R = \ln R \iff e^{Y_R} = R$

där $Y_R = N\left(\ln \mu_R - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma_R^2}{\mu_R^2}\right), \left[\ln\left(1 + \frac{\sigma_R^2}{\mu_R^2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right)$

Vi har nu 3 st normalfördelade variabler

η , Y_R och S

Dessa normaliseras så att

Z_η, Z_{Y_R} och $Z_R = N(0,1)$

Vårt tidigare brott villkor

$$\eta \cdot R - S = 0 \Rightarrow f(Z_N, Z_{R_K}, Z_S) = 0$$

$f(\bar{z})$ är ej längre linjärt.

Vid beräkning av brottsannolikhet enligt

(1) låter vi brotvillkoret approximeras
av tangentplanet i design punkten

Vårt β definierar vi fortfarande på samma
sätt (nederst sida 4) som det kortaste avståndet
till vår brottyta

Vi illustrerar konvergensen i algoritmen med
ett av våra genomräknade exempel.

Kontorskäms $P_{pöle} = 750 \text{ kN}$ Variationskoeff = 7%

Friskompöle Variationskoefficient jord = 7%

" " modell = 8%

Såkl: En försterlig medel värde bär förmåga

	1	2	3	4	5	6	7	8
R	1395	1409	1421	1421	1421			
α_N	-0.58	-0.69	-0.72	-0.77	-0.77			
α_R	-0.58	-0.47	-0.49	-0.48	-0.48			
α_S	0.58	0.55	0.42	0.42	0.42			

E Beräkning av partialkoefficienter

Efter avslutad iteration är β liksom alla stokastiska variabler kända till sin storlek och sina parametrar.

β_0 ger designpunkten. Variabelsubstitutionen "balkläng" ger designvärdena för de olika variablerna.

Förhållandet mellan designvärdena och någon bestämd fraktil (her 50% (medelvärde)) ger oss våra partialkoefficienter.

Vid beräkning för $\beta = 3.72$ för säkerhetsklass 1 måste justering ske för γ_n .

Modellfelets storlek bör inte bero av säkerhetsklassen, för det framräknade

γ_m motvarar $\gamma_m \cdot \gamma_n$. Eftersom γ_n

är given i NR kan γ_m beräknas. Alternativt görs beräkningen för $\beta = 3.72$ i alla säkerhetsklasser och γ_n införs därefter med sitt normvärde

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga=	1421 kN	Variationskoefficient=0.07
Modellosäkerhet		Variationskoefficient=0.08
Last=	750 kN	Variationskoefficient=0.07

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.48$ $\alpha_{Rd} = -0.77$ $\alpha_s = +0.42$

Partialkoefficienter

Medelvärden:

$\Gamma_m = 1.17$ $\Gamma_{Rd} = 1.42$ $\Gamma_s = 1.14$

Fraktiler:

$\Gamma_m(5\%) = 1.04$ $\Gamma_s(98\%) = 1.00$
(1263 kN) (858 kN)

Förutsättningar

Objekt: Kontorshus
Pålningsförhållanden: A
Påle typ 'Provex' Last: Stokastisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga= 1857 kN
Modellosäkerhet
Last= 750 kN

Variationskoefficient=0.13
Variationskoefficient=0.10
Variationskoefficient=0.07

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.62$

$\alpha_{Rd} = -0.73$

$\alpha_s = +0.30$

Partialkoefficienter

Medelvärden:
 $\Gamma_m = 1.47$

$\Gamma_{Rd} = 1.53$

$\Gamma_s = 1.10$

Fraktiler:
 $\Gamma_m(5\%) = 1.18$
(1489 kN)

$\Gamma_s(98\%) = 0.96$
(858 kN)

Förutsättningar

Objekt: Kontorshus

Pålningsförhållanden: B

Påle typ 'Provex' Last: Stokastisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga=	2352 kN	Variationskoefficient=0.17
Modellosäkerhet		Variationskoefficient=0.12
Last=	750 kN	Variationskoefficient=0.07

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.61$	$\alpha_{Rd} = -0.76$	$\alpha_s = +0.23$
--------------------	-----------------------	--------------------

Partialkoefficienter

Medelvärden:

$\Gamma_m = 1.65$	$\Gamma_{Rd} = 1.76$	$\Gamma_s = 1.08$
-------------------	----------------------	-------------------

Fraktiler:

$\Gamma_m(5\%) = 1.23$ (1757 kN)	$\Gamma_s(98\%) = 0.94$ (858 kN)
-------------------------------------	--------------------------------------

Förutsättningar

Objekt: Kontorshus
Pålningsförhållanden: C
Påle typ 'provex' Last: Stokastisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga= 1444 kN
Modellosäkerhet
Last= 650 kN

Variationskoefficient=0.07
Variationskoefficient=0.08
Variationskoefficient=0.15

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.43$

$\alpha_{Rd} = -0.65$

$\alpha_s = +0.63$

Partialkoefficienter

Medelvärden:
 $\Gamma_m = 1.16$

$\Gamma_{Rd} = 1.33$

$\Gamma_s = 1.45$

Fraktiler:
 $\Gamma_m(5\%) = 1.03$
(1284 kN)

$\Gamma_s(98\%) = 1.11$
(850 kN)

Förutsättningar

Objekt: Industrihus

Pålningsförhållanden: A

Påle typ 'provex' Last: Stokastisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga= 1829 kN
Modellosäkerhet
Last= 650 kN

Variationskoefficient=0.13
Variationskoefficient=0.10
Variationskoefficient=0.15

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.58$

$\alpha_{Rd} = -0.65$

$\alpha_s = +0.50$

Partialkoefficienter

Medelvärden:

$\Gamma_m = 1.44$

$\Gamma_{Rd} = 1.44$

$\Gamma_s = 1.35$

Fraktiler:

$\Gamma_m(5\%) = 1.15$
(1465 kN)

$\Gamma_s(98\%) = 1.03$
(850 kN)

Förutsättningar

Objekt: Industrihus

Pålningsförhållanden: B

Påle typ 'provex' Last: Stokastisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga= 2265 kN
Modellosäkerhet
Last= 650 kN

Variationskoefficient=0.17
Variationskoefficient=0.12
Variationskoefficient=0.15

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.59$

$\alpha_{Rd} = -0.70$

$\alpha_s = +0.41$

Partialkoefficienter

Medelvärden:

$\Gamma_m = 1.63$

$\Gamma_{Rd} = 1.66$

$\Gamma_s = 1.29$

Fraktiler:

$\Gamma_m(5\%) = 1.22$
(1692 kN)

$\Gamma_s(98\%) = 0.99$
(850 kN)

Förutsättningar

Objekt: Industrihus

Pålningsförhållanden: C

Påle typ 'provex' Last: Stokastisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga=	1499 kN	Variationskoefficient=0.07
Modellosäkerhet		Variationskoefficient=0.08
Last=	850 kN	Variationskoefficient=0.00

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.51$	$\alpha_{Rd} = -0.86$	$\alpha_s = +0.00$
--------------------	-----------------------	--------------------

Partialkoefficienter

Medelvärden:

$\Gamma_m = 1.19$	$\Gamma_{Rd} = 1.49$	$\Gamma_s = 1.00$
-------------------	----------------------	-------------------

Fraktiler:

$\Gamma_m(5\%) = 1.05$ (1333 kN)	$\Gamma_s(98\%) = 1.00$ (850 kN)
-------------------------------------	-------------------------------------

Förutsättningar

Objekt: Kontorshus/Industrihus

Pålningsförhållanden: A

Påle typ 'provex' Last: Deterministisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga=	2001 kN	Variationskoefficient=0.13
Modellosäkerhet		Variationskoefficient=0.10
Last=	850 kN	Variationskoefficient=0.00

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.63$ $\alpha_{Rd} = -0.77$ $\alpha_s = +0.00$

Partialkoefficienter

Medelvärden:

$\Gamma_m = 1.49$ $\Gamma_{Rd} = 1.58$ $\Gamma_s = 1.00$

Fraktiler:

$\Gamma_m(5\%) = 1.19$ $\Gamma_s(98\%) = 1.00$
(1603 kN) (850 kN)

Förutsättningar

Objekt: Kontorshus/Industrihus

Pålningsförhållanden: B

Påle typ 'provex' Last: Deterministisk

Resultat β -beräkning

Säkerhetsindex $\beta = 4.75$

Bärförmåga=	2564 kN	Variationskoefficient=0.17
Modellosäkerhet		Variationskoefficient=0.12
Last=	850 kN	Variationskoefficient=0.00

Sensitivitetsfaktorer

$\alpha_m = -0.61$	$\alpha_{Rd} = -0.79$	$\alpha_s = +0.00$
--------------------	-----------------------	--------------------

Partialkoefficienter

Medelvärden:

$\Gamma_m = 1.66$	$\Gamma_{Rd} = 1.82$	$\Gamma_s = 1.00$
-------------------	----------------------	-------------------

Fraktiler:

$\Gamma_m(5\%) = 1.24$ (1915 kN)	$\Gamma_s(98\%) = 1.00$ (850 kN)
-------------------------------------	--------------------------------------

Förutsättningar

Objekt: Kontorshus/Industrihus

Pålningsförhållanden: C

Påle typ 'provex' Last: Deterministisk