

# **Parameterstudie avseende sättningsberäkningar i lera**

Yvonne Rogbeck

November 1990

**PARAMETERSTUDIE**

**AVSEENDE**

**SÄTTNINGSBERÄKNINGAR**

**I LERA**

November 1990

Yvonne Rogbeck

# PARAMETERSTUDIE AVSEENDE SÄTTNINGS- BERÄKNINGAR I LERA

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

### FÖRORD

1. SAMMANFATTNING
2. BERÄKNINGSMODELL CONMULT
  - 2.1 Datorprogram Conmult
  - 2.2 Praktikfall
3. PARAMETERVAL, REGRESSIONSANALYSER
4. ÖVERSLAGSMETOD
  - 4.1 Ekvation
  - 4.2 Beräkningsexempel
5. REFERENSER

## FÖRORD

En parameterstudie har genomförts på SGI avseende vilka deformationsparametrar som har störst inverkan på tidssättningsförloppet med och utan beaktande av krypning. Syftet har varit att hitta en överslagsmetod att utan ett avancerat datorprogram ta hänsyn till krypning. I rapporten redovisas en överslagsekvation för detta ändamål.

Parameterstudien har utförts av Lovisa Bergenståhl, Monica Nord och Yvonne Rogbeck. Värdefulla synpunkter i samband med projektet har lämnats av Peter Carlsten och Leif Eriksson. Samtliga anställda på SGI.

Linköping i november 1990

Yvonne Rogbeck

## 1. SAMMANFATTNING

I rapporten redovisas en ekvation för överslagsberäkningar, vilken tar hänsyn till att krypning pågår parallellt med konsolideringssättningen. Ekvationen har tagits fram genom jämförelser av sättningsberäkningar med och utan krypning utförda med datorprogrammet "CONMULT" (CONsolidation of MULTilayers). De parametrar som varierats är vattenkvot, kompressionsmodul, initiell permeabilitet, lerdjup och last.

En jämförelse mellan beräkningar och i fält uppmätta sättningar görs för ett par vägprojekt där sättningsuppföljningar pågått 8-10 år. Datorberäkningar utförda med krypning visar en betydligt bättre överensstämmelse med uppmätta sättningar, än beräkningar där krypning ej beaktats. Skillnaden i sättningsbelopp mellan beräkningsmodellerna är i dessa fall ca 100%. Med de generaliseringar som gäller för ekvationen, ger den ett fel på  $\pm 20\%$  jämfört med Conmultberäkningar utförda med krypning. Eftersom skillnaden mellan ovanstående beräkningsmodeller är så stor erhålls med överslagsekvationen en betydligt bättre uppfattning av verkligt sättningsförlopp, än vad konventionellt beräknings sätt ger.

Sättningen utan krypning beräknas konventionellt och multipliceras sedan med en faktor för att erhålla sättningen med krypning vid olika tidpunkter.

$$\frac{S_m}{S_u} = F = 0.49 \cdot w_n^{0.23} \cdot M_L^{0.20} + \frac{68.86}{q^{1.07}} \cdot k_i^{0.43} \cdot M_L^{1.09} \cdot w_n^{1.39} \cdot \frac{t}{1000}$$

$S_m$  = sättning med krypning, m

$S_u$  = sättning utan krypning, m

$F$  = krypfaktor

$w_n$  = naturlig vattenkvot

$M_L$  = kompressionsmodul, kPa

$q$  = last, kPa

$k_i$  = initiell permeabilitet, m/s

$t$  = tid, dagar

## 2. BERÄKNINGSMODELL CONMULT

### 2.1 Datorprogram CONMULT

På SGI används sedan 1981 ett datorprogram, CONMULT, som beräknar tidssättningsförlopp. CONMULT använder Terzaghis ekvation för endimensionell konsolidering och Darcy's lag för vattenströmning. Beräkningarna görs med finita differenser och små tidssteg. Jordprofilen kan delas upp i flera skikt. Varje skikt beskrivs med hjälp av olika parametrar som erhålls i CRS-försök, såsom förkonsolideringstryck, kompressionsmodul, initiell permeabilitet, förändring av permeabiliteten m fl. Kompressionsparametrarna och pålagd last ändras med deformationen. Programmet har vidareutvecklats så att hänsyn numera kan tas till att krypning pågår parallellt med konsolideringssättningen.

Krypfunktionen är en empirisk formel som är baserad på fält- och laboratorieförsök. Krypningen i CONMULT är beroende av rådande effektivspänning och krypningseffekten inträffar när

$$\sigma'_v > 0.8 \sigma'_c$$

och sättningshastigheten  $< \alpha_s \cdot 5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{s}$

$\sigma'_v$  = Effektiv vertikalspänning (kPa)

$\sigma'_c$  = Förkonsolideringstryck (kPa)

$\alpha_s$  =  $\Delta \epsilon / \Delta \log t$  = Krypparametern

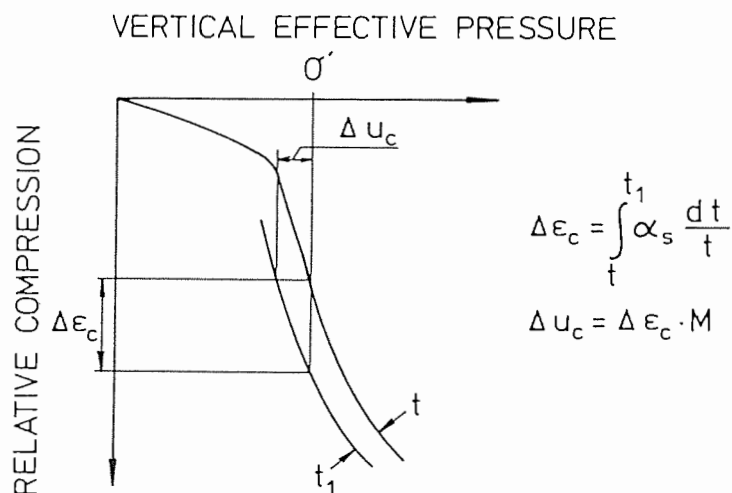


Fig. 1. Krypeffekt under konsolidering (Larsson, 1986).

Krypparametern är inte konstant. Från stegvisa ödometerförsök har det visat sig att krypparametern varierar med kompressionen, se fig 2. Krypningen är mycket liten innan spänningen nått upp till en viss nivå. Därefter ökar krypningen snabbt upp till ett maximalt värde, för att sedan långsamt sjunka med fortsatt deformation. Mesri (1973) visade att krypningen till största delen berodde på lerans vatteninnehåll. Enligt Larsson (1981) gäller även detta svenska leror. Sambandet mellan krypparametern och vattenkvoten varierar dock mellan olika typer av jordar, se fig 3. I de flesta konsultprojekt kan denna bestämning av krypparametern anses vara tillräcklig.

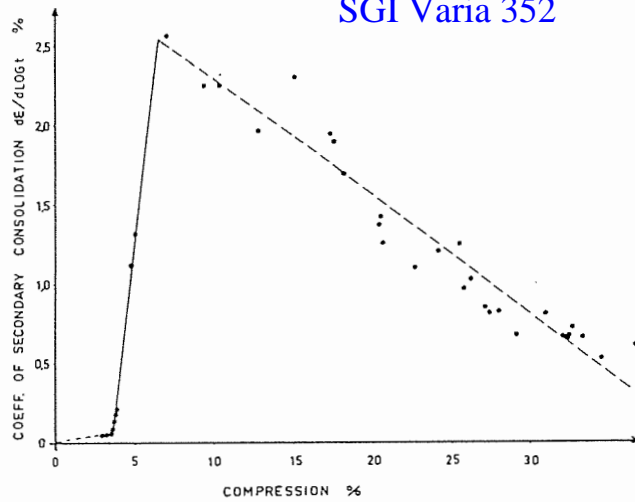


Fig 2. Kryppparametern  $\alpha_s$  som funktion av relativa kompressionen (Larsson, 1986).

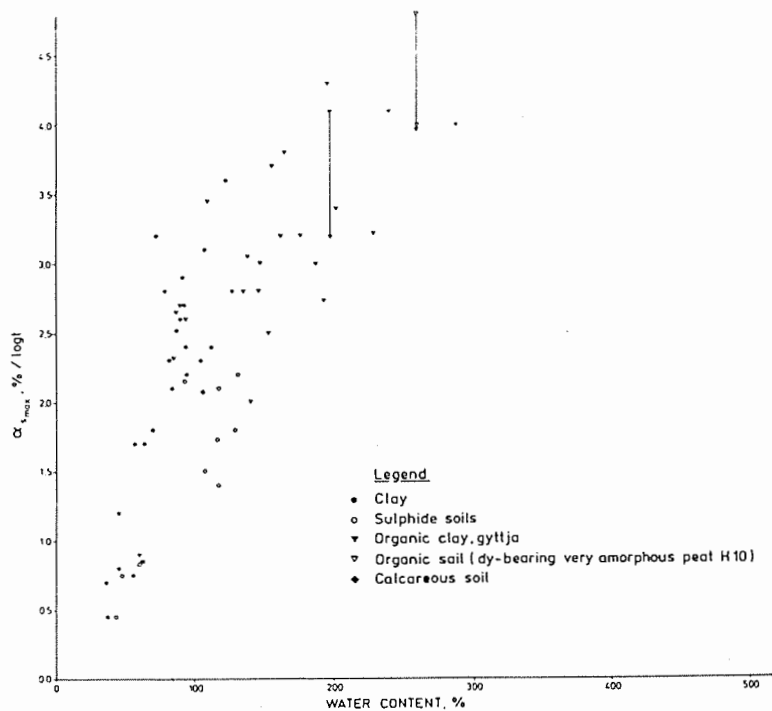


Fig 3. Förhållandet mellan maximala kryppparametern  $\alpha_{smax}$  och naturlig vattenkvot (Larsson, 1986).

## 2.2 Praktikfall

En jämförelse görs mellan CONMULT beräkningar och i fält uppmätta sättningar för ett par vägprojekt. CONMULT beräkningarna har utförts med och utan beaktande av krypning. Sättningsuppföljningarna för nedanstående exempel har pågått 8-10 år. Exempen visar att datorberäkningar utförda med krypning ger en betydligt bättre överensstämmelse med uppmätta sättningar, än beräkningar där krypning ej beaktats. Även andra sättningsuppföljningar gjorda av SGI visar samma förhållanden.

E4 Råneå - StrömsundAllmänt

Utbyggnaden av E4:an på delen Råneå - Strömsund påbörjades 1982. Vägbanken, vilken är 9,5 m bred på den aktuella sträckan utfylldes huvudsakligen med hyttsten till 1,1 m höjd. Cirka ett år senare gjordes en justering med 0,45 m fyllning. Detta då sättningarna blivit större än förväntat. Här presenteras beräkningar för sträckan 4/720-5/180.

Geotekniska undersökningar

De geotekniska undersökningar som utförts i fält omfattar viktsondering, vingborrning och kolvprovtagning. Rutinundersökningar och kompressionsförsök (CRS, stegvisa ödometerförsök) har utförts.

Sättningsuppföljningen har skett genom mätning i horisontella mät-slangar under vägbanken.

Geotekniska förhållanden

Jordlagerföljden är ca 9 m något gyttjig, sulfidfärgad lera överlagrande friktionsjord. Den odränerade skjuvhållfastheten (korrigerad) varierar mellan 6 och 14 kPa. Leran är normalkonsoliderad under 3,5 m djup. Portrycket antas hydrostatiskt från 0,75 m under markytan.

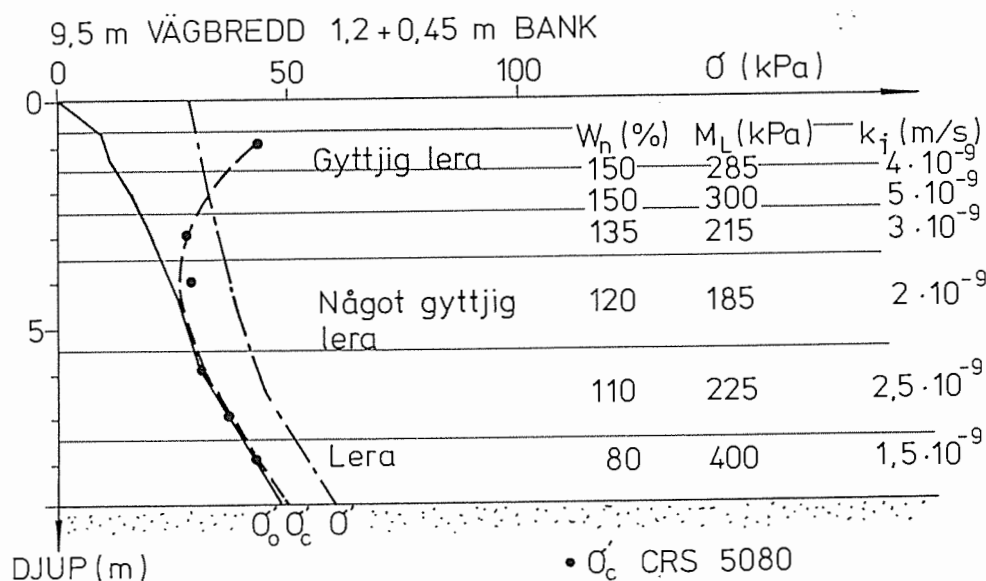


Fig 4. Geotekniska förhållanden i sektion 5/080 på E4:an delen Råneå-Strömsund.

Beräknade och uppmätta sättningar

Beräkningsförutsättningar framgår av figur 4. I figur 5 visas de beräknade sättningarna med och utan krypning, samt uppmätta sättningar. Beräkningarna är utförda i vägmitt. Som framgår av figuren är den uppmätta sättningen efter tre år dubbelt så stor som beräknad om hänsyn ej tas till krypeffekten. Räknas krypningen med blir överensstämmelsen bättre. Formen på kurvan för tidsförloppet stämmer också bättre med det uppmätta. Detta exempel visar att sättningen både går snabbare och att slutsättningen blir större i verkligheten än om beräkningen utförs utan hänsyn till krypning.



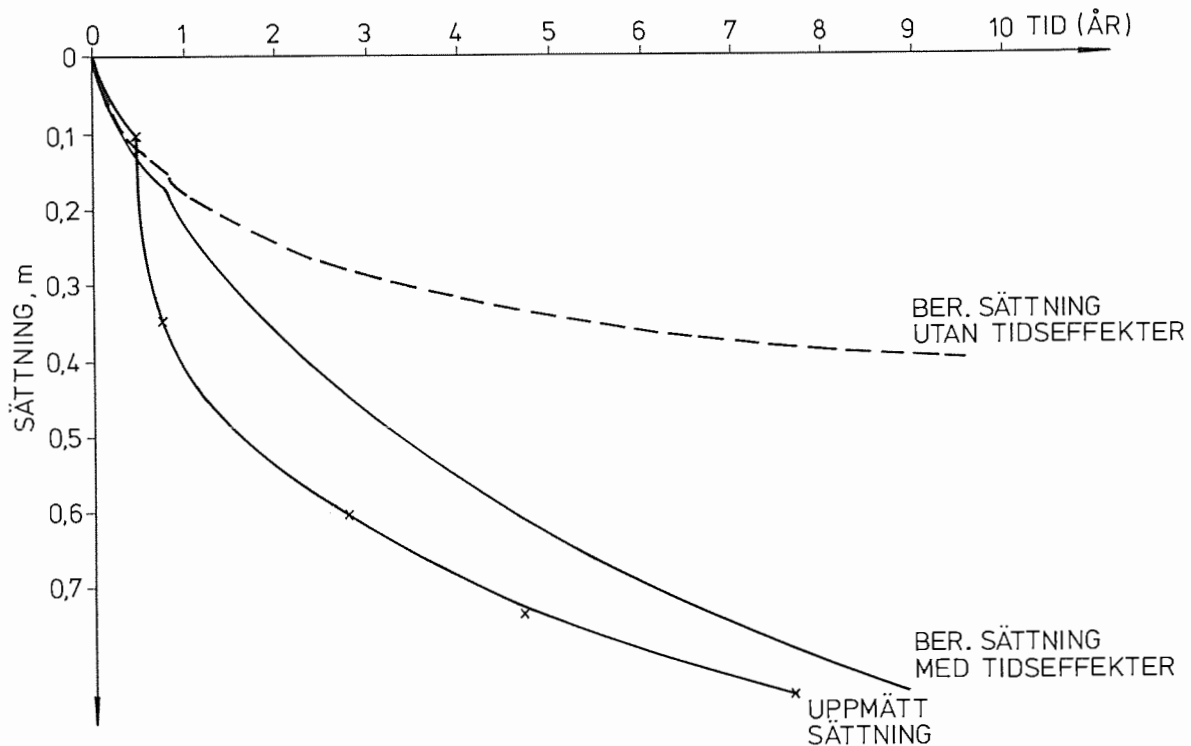


Fig 5. Tids- sättningsförloppet i sektion 5/080 på E4:an delen Råneå-Strömsund.

### E3, V Åby - Adolfsberg

#### Allmänt

Den studerade motorvägssträckan är en del av E3 Mariestad-Örebro. Uppfyllnaden av vägbanken på sträckan omkring sektion 20/800 gjordes i juli 1979. Sträckan ligger i anslutning till en vertikaldränering, men är utförd utan geotekniska förstärkningsåtgärder. E3 har dubbla körbanor med vardera 12 m krönbredd. Mittskiljeremman är ca 16 m bred. Bankhöjden är 1,4 m.

#### Geotekniska undersökningar

De fältundersökningar som utförts är viktsondering, vingborrning, provtagning med skruv- och kolvprovtagare samt portrycksmätning. Rutinundersökningar och kompressionsförsök (CRS) har vidare utförts.

Sättningarna har följts upp genom mätning i horisontella mätslangar.

#### Geotekniska förhållanden

På sträckan består jorden av 5,5-7 m lera överlagrande friktionsjord. En ca 1 meter tjock torrskorpa finns bildad. Lerans odränerade skjuvhållfasthet (korrigerad) är 10-18 kPa. Leran är överkonsoliderad för ca 10 kPa. Portrycket är hydrostatiskt från nivån 1 m under markytan.

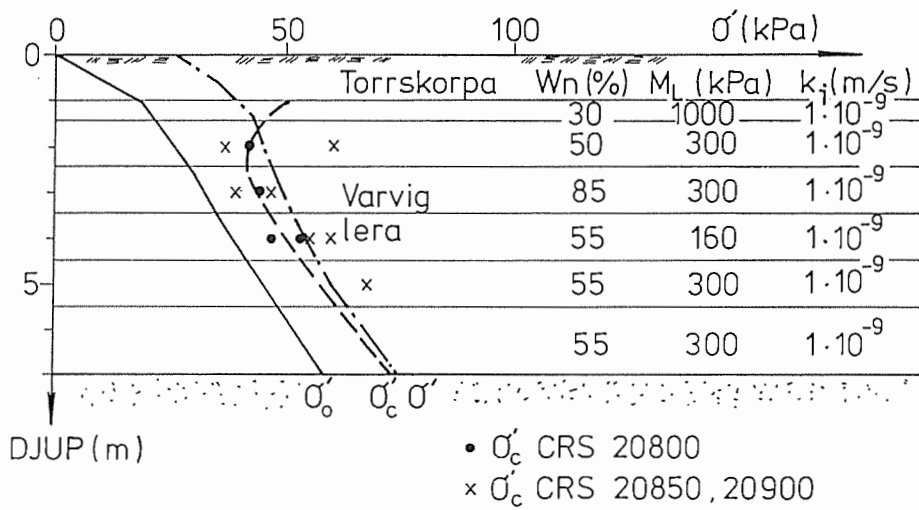


Fig 6. Geotekniska förhållanden i sektion 20/800 på E3:an delen V Åby- Adolfsberg.

Beräknade och uppmätta sättningar

Beräkningsförutsättningar visas i figur 6 och beräkningsresultatet kan ses i figur 7. Sättningarna är beräknade i vägmitt. Beräkningen där hänsyn tas till krypning ger en bättre överensstämmelse med uppmätta sättningar än beräkningen utan. Detta gäller såväl tidsförloppet som den totala sättningen. Knycken på kurvan över uppmätt sättning kan indikera att hela banken ej fyllts upp vid samma tillfälle, utan att t ex överbyggnaden kan vara utförd senare. Vägen togs i bruk två år efter den första uppfyllnaden.

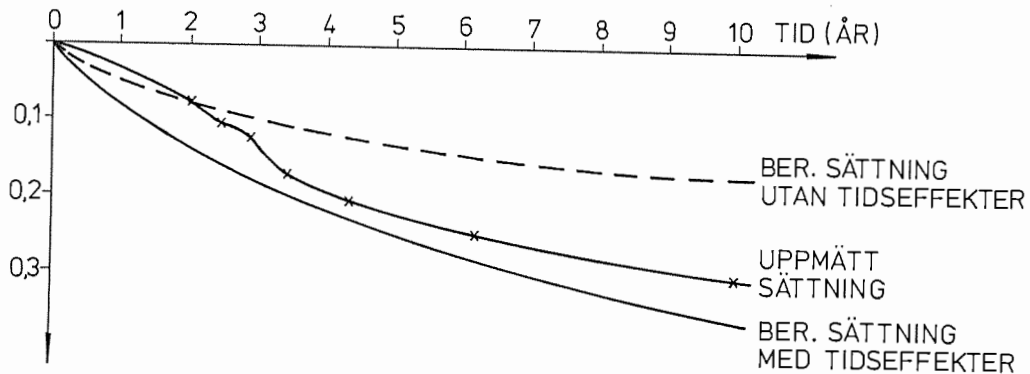


Fig 7. Tids- sättningsförloppet i sektion 20/800 på E3:an delen V Åby-Adolfsberg.

### 3. PARAMETERVAL, REGRESSIONSANALYSER

Parameterstudien har utförts för att se vilka deformationsparametrar som har störst inverkan på tidssättningsförloppet med och utan beaktande av krypning.

De generaliseringar som gjorts av jordprofilen är:

- normalkonsoliderad lera
- 1 m torrskorpa,  $\rho = 1.8 \text{ ton/m}^3$
- lera,  $\rho = 1.6 \text{ ton/m}^3$
- grundvattenytan 1 m under markytan, därunder hydrostatiskt portryck
- dubbelsidigt dränerande
- lastspridning enligt Boussinesq, bankbredd 13 m, slänt 1:3,  $\rho = 1.9 \text{ ton/m}^3$
- hänsyn tas till lastreduktion orsakad av sättningen,  $1 \text{ ton/m}^3 \cdot \text{m}$
- koefficient för ändring av permeabilitet,  $\beta = -\Delta \log k / \Delta \varepsilon = 3$
- moduländring,  $M' = 15$  (när  $\sigma' > \sigma'_L$ )

De parametrar som varierats är:

- naturlig vattenkvot  $w_n = 0.50, 0.60, 0.75$
- kompressionsmodul  $M_L = 200, 400, 600 \text{ kPa}$
- initiell permeabilitet  $K_i = 0.5, 1.0, 5.0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
- lerdjup  $d = 3, 5, 9, 15, 20 \text{ m}$
- last  $q = 25, 35, 50 \text{ kPa}$

Totalt har 214 kombinationer av parametrar som beräknats vilket redovisas i tabell 1.

Några olika funktioner för förhållanden mellan sättningen med och utan krypning har testats. Vald funktion för vidarebearbetning blev ett linjärt förhållande mellan sättningarna som funktion av tiden för tidsperioden 500 dagar till tiden för full konsolidering. Ett exempel visas i fig 8.

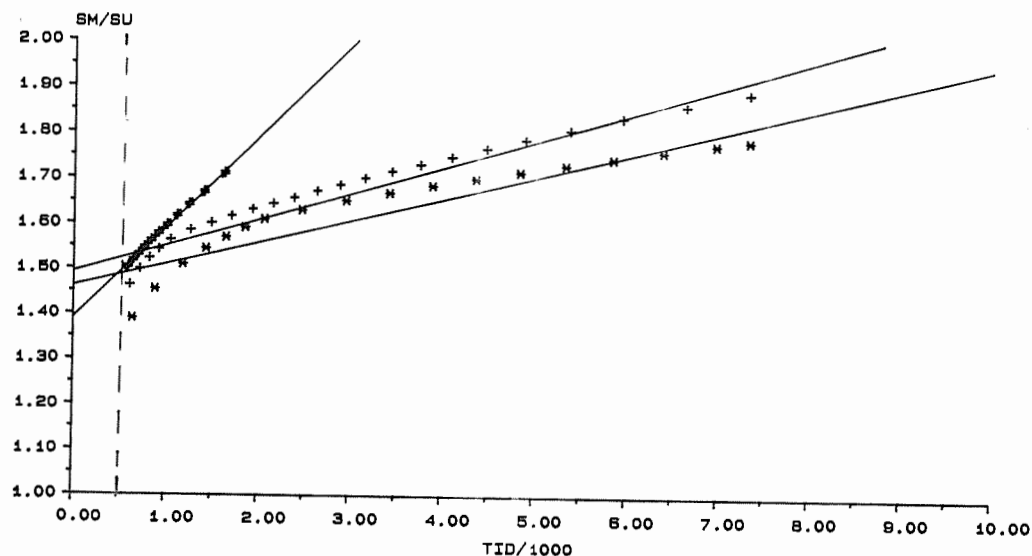


Fig 8. Förhållande mellan sättning, med och utan krypning som en funktion av tiden. Exemplet gäller  $q=35 \text{ kPa}$ ,  $d=9 \text{ m}$ ,  $w_n=0.60$ ,  $M_L=400 \text{ kPa}$  och  $k_i=5.0, 1.0$  resp.  $0.5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ .

Följande regressionsanalyser har utförts. Sättningsförhållandet antas linjärt enligt:

$$\frac{S_m}{S_u} = A + \frac{B \cdot t}{1000}$$

$S_m$  = sättning med krypning  
 $S_u$  = sättning utan krypning  
 $t$  = tiden i dagar

För varje lerdjup/last kombination har en regression utförts med antagandet

$$A = C_1 \cdot W_n^{D_1}$$

$$C_1 = E_1 \cdot M_L^{F_1}$$

$$E_1 = G_1 \cdot K_i^{H_1}$$

$$B = C_2 \cdot W_n^{D_2}$$

$$C_2 = E_2 \cdot M_L^{F_2}$$

$$E_2 = G_2 \cdot K_i^{H_2}$$

Konstanterna har sedan valts så att störst vikt lagts för djupen 9 och 15 m. Vid mindre lerdjup blir sättningsdifferensen större i procent räknat men beloppen är ej så stora.

Därefter gjordes regression som funktion av djup respektive last vilket gav att djupet ej var lämpligt att ha med i ekvationen. Lasten hade betydelse i den andra termen, dvs B.

## 4. ÖVERSLAGSMETOD

Syftet med parameterstudien har varit att hitta en överslagsmetod att utan ett avancerat datorprogram kunna ta hänsyn till krypning. Nedan presenteras en ekvation för detta ändamål. Ekvationen kan användas på flera olika sätt vilket visas i efterföljande beräkningsexempel.

### 4.1 Ekvation

Ekvationen bygger på ett antagande av ett linjärt förhållande mellan kvoten  $S_m/S_u$  som funktion av tiden. Ekvationen gäller för tidsperioden från 500 dagar och så länge konsolidering pågår ( $U < 100\%$ ). Funktionen är inte linjär under de första ca 500 dagarna. Tidpunkten när det linjära förhållandet börjar varieras en hel del, men 500 dagar har valts för att få ett fel på maximalt  $\pm 20\%$ .

Sättningen utan krypning beräknas konventionellt och multipliceras sedan med en faktor för att erhålla sättningen med krypning.

För nämnda antaganden är funktionen:

$$\frac{S_m}{S_u} = F = 0.49 \cdot w_n^{0.23} \cdot M_L^{0.20} + \frac{68.86}{q^{1.07}} \cdot k_i^{0.43} \cdot M_L^{1.09} \cdot w_n^{1.39} \cdot \frac{t}{1000} \quad (1)$$

$S_m$  = sättning med krypning

$S_u$  = sättning utan krypning

$F$  = krypfaktor

$w_n$  = naturlig vattenkvot

$M_L$  = kompressionsmodul, kPa

$q$  = last, kPa

$k_i$  = initiell permeabilitet, m/s

$t$  = tid i dagar (>500 dagar)

Skillnaden i överensstämmelse mellan sättningkvoten  $S_m/S_u$  beräknat med Conmult respektive enligt ekvation (1) redovisas i tabell 1. Jämförelsen är gjord vid tiden 3000 dagar. Skillnaden visas med följande symboler. Totalt har 214 kombinationer undersökts. Där symboler saknas har ingen beräkning utförts.

<u>Symbol</u>	<u><math>\frac{S_m/S_u \text{ ekv (1)}}{S_m/S_u \text{ conmult}}</math></u>
●	± 5%
*	± 6-10%
□	± 11-15%
0	± 16-20%
-	formeln gäller ej för detta exempel vid denna tidpunkt

Tabell 1. Skillnad i överensstämmelse mellan sättningskvoten ( $S_m/S_u$ ) beräknad med conmult respektive enligt ekvationen.

$w_n$	$M_L$	$k_i \cdot 10^{-9}$	q										
			d	35	25	35	50	25	35	50	25	35	50
			3	5	5	5	9	9	9	15	15	15	20
50	200	0.5	*	*	●	●	*	*	●	●	●	●	
"	"	1	*	●	●	*	*	●	●	*	●	●	
"	"	5		*	●	□	●	*	*	●	●	*	
50	400	0.5	*	□	●	●	*	●	●	●	●	●	*
"	"	1	□	□	●	*	*	●	*	●	●	●	*
"	"	5		*	-	-	●	□	*	●	●	*	
50	600	0.5					*	●	●	●	●	●	*
"	"	1					*	●	●	●	●	●	□
"	"	5					*	●	*	●	●	●	
60	200	0.5					*	*	●	●	●	●	
"	"						*	●	●	*	●	●	
"	"	5					●	*	*	*	●	*	
60	400	0.5					*	●	●	●	●	●	
"	"	1					*	●	●	*	●	●	
"	"	5					*	●	*	*	●	*	
60	600	0.5					●	●	●	●	●	●	
"	"	1					*	●	●	●	●	●	
"	"	5					*	●	●	*	●	●	
75	200	0.5	●	□	●	●	*	*	●	●	*	●	
"	"	1	●	*	●	●	*	*	●	●	●	●	
"	"	5		●	*	-	●	●	*	●	●	●	
75	400	0.5	*	-	□	●	*	*	●	●	●	●	0
"	"	1	●	-	-	●	□	*	●	*	*	●	0
"	"	5		-	-	-	□	*	*	●	□	●	
75	600	0.5					●	●	●	*	●	●	0
"	"	1					*	*	●	*	●	●	0
"	"	5					□	*	●	●	●	●	



## 4.2 Beräkningsexempel

Ekvationen kan användas på olika sätt beroende på önskad noggrannhet. Ett enkelt överslag fås genom att använda medelvärden av sättningsparametrarna  $W_n$ ,  $M_L$  och  $K_i$  och multiplicera erhållen sättning med krypfaktorn  $F$ .

Om sättningsparametrarna varierar mycket kan en mer detaljerad beräkning göras t ex enligt nedan angivet förfaringssätt. Vid en speciell tidpunkt beräknas sättningen i ett lager som  $S_m$  lager =  $U$  lager  $\cdot F \cdot S_u$  lager (m) där konsolideringsgraden i skiktet erhålls genom att först proportionera ett  $C_v$  för hela lerpacken och därefter proportionera ett  $T_v$  som kan användas i diagram enligt Fig. 9.

$$C_v = \frac{K_i \cdot M_L}{\rho_w \cdot g} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$S_m$  lager = sättning med krypning i ett lager, m

$S_u$  lager = sättning utan krypning i ett lager, m

$U$  lager = konsolideringsgraden i lagret

$F$  = krypfaktorn enligt ekvation (1)

$\rho_w$  = vattnets densitet, ton/m<sup>3</sup>

$g$  = gravitation, 9.81 m/s<sup>2</sup>

$T_v$  = tidsfaktor

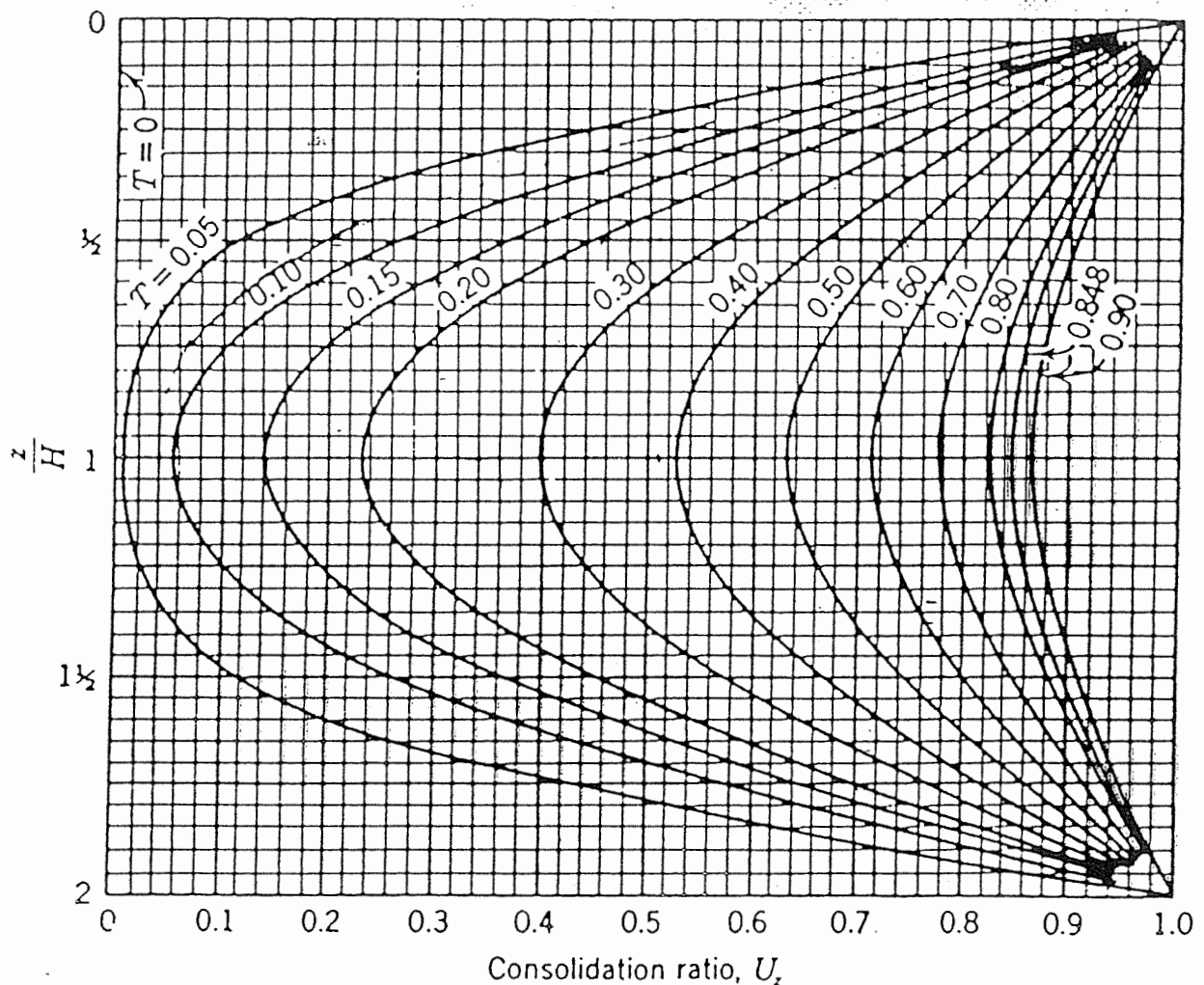


Fig. 9. Konsolideringsgrad som funktion av djup och tidsfaktor. (Taylor, 1942)

Exempel E3 V Åby - Adolfsberg

Jordlagerförhållanden för exemplet beskrivs i kapitel 2.2.

Här proportioneras  $C_v$  linjärt med antagandet 20% i lerpackens mitt och 100% vid dräneringsvägarna. Hänsyn tas även till lerlagrets tjocklek.

Tabell 2. Beräkning av proportionerat  $C_v$

Lager	$\Delta c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$\Delta\%$ of $c_v$	$\Delta H$ (m)	$\Delta p =$ $\frac{\Delta\% \Delta H}{\Sigma\% \Sigma H}$	$\frac{\Delta p}{\Sigma p}$ (m <sup>2</sup> /s)	$\Delta c_v$
1	$10 \cdot 10^{-8}$	93	0.5	0.020	$0.13 \cdot 10 \cdot 10^{-8}$	
2	$3 \cdot 10^{-8}$	73	1.0	0.031	$0.20 \cdot 3 \cdot 10^{-8}$	
3	$3 \cdot 10^{-8}$	47	1.0	0.020	$0.13 \cdot 3 \cdot 10^{-8}$	
4	$1.6 \cdot 10^{-8}$	28	0.5	0.006	$0.04 \cdot 1.6 \cdot 10^{-8}$	
5	$1.6 \cdot 10^{-8}$	28	0.5	0.006	$0.04 \cdot 1.6 \cdot 10^{-8}$	
6	$3 \cdot 10^{-8}$	47	1.0	0.020	$0.13 \cdot 3 \cdot 10^{-8}$	
7	$3 \cdot 10^{-8}$	80	1.5	0.050	$0.33 \cdot 3 \cdot 10^{-8}$	
		$\Sigma\% =$ 396	$\Sigma H =$ 6.0	$\Sigma p =$ 0.153	$c_{v, prop}$ $= 3.5 \cdot 10^{-8}$	

$$T_{v,prop.} = \frac{C_{v,prop} \cdot t}{d^2} = \frac{3.5 \cdot 10^{-8} \cdot t}{3^2}$$

där  $t$  = tid i sekunder

$d$  = tjocklek på lagret som skall dräneras, m

Figur 9 ger konsolideringsgraden i varje skikt för beräknat  $T_{v,prop}$  vid olika tidpunkter. Sättningarna beräknas med ett enkelt datorprogram "CRS" som bygger på följande ekvationer

$$\delta = \frac{\sigma'_c - \sigma'_L}{M_L} \cdot d \text{ när } \sigma'_c < \sigma'_L < \sigma'_L \quad (\text{Larsson, 1981})$$

$$\delta = \frac{\sigma'_c - \sigma'_L}{M_L} + \frac{1}{M'_L} \cdot \ln \frac{(\sigma'_c - a) M'_L}{M_L} \text{ när } \sigma'_c > \sigma'_L \quad (\text{Larsson, 1981})$$

Effektivspänningen i varje lager beräknas med lastspridning enligt Boussinesq.



Tabell 3. Sättningsberäkning

Tid (År)	Lager	U z	F Ekv. (1)	Su, lager (m)	Sm, lager (m)
3	2	0.74	1.26	0.03	0.028
	3	0.58	1.61	0.04	0.037
	4	0.51	1.22	0.04	0.025
	5	0.51	1.22	0.04	0.025
	6	0.57	1.41	0.03	0.025
	7	0.81	1.42	0.03	0.034
7	2	0.93	1.34	0.03	0.037
	3	0.87	1.77	0.04	0.062
	4	0.85	1.26	0.04	0.043
	5	0.85	1.26	0.04	0.043
	6	0.87	1.51	0.03	0.039
	7	0.94	1.52	0.03	0.043

## 5. REFERENSER

- Larsson, R. 1981. Drained behaviour of Swedish clays.  
Statens Geotekniska Institut, Rapport nr 12.  
Linköping, 157 s.
- Larsson, R. 1986. Consolidation of soft soils.  
Statens Geotekniska Institut, Rapport nr 29.  
Linköping, 174 s.
- Mesri, G. 1973. Coefficient of Secondary Compression,  
ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation  
Engineering Division. Vol. 99. No SMI. Jan.
- Taylor, D.W. 1948. Fundamentals of Soil Mechanics.  
John Wiley & Sons. New York, 700 p.