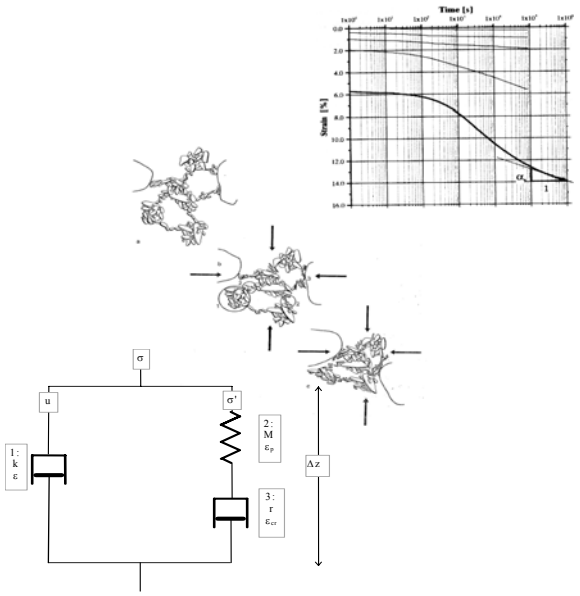
CHALMERS



Krypsättningar i lera

– en jämförelse mellan två beräkningsprogram

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

KINE MEIJER

ANDREAS ÅBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2007
Examensarbete 2007:107

EXAMENSARBETE 2007:107

Krypsättningar i lera

– en jämförelse mellan två beräkningsprogram

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

KINE MEIJER

ANDREAS ÅBERG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2007

Krypsättningar i lera
– en jämförelse mellan två datorprogram
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad
KINE MEIJER ANDREAS ÅBERG

© KINE MEIJER ANDREAS ÅBERG, 2007

Examensarbete 2007:107
Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Tryckeri: Chalmers Reproservice
Göteborg 2007

Creep settlement in soft clays
– A comparison between two computer programs for calculation of settlements
Master's Thesis in Civil and Environmental Engineering
KINE MEIJER
ANDREAS ÅBERG
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of GeoEngineering
Geotechnical Engineering Research Group
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

In this master´s thesis the test results of the two computer programs concerning settlements in soft clays, GeoSuite and krypChalmers, has been evaluated. KrypChalmers has been developed in a purpose of research on the basis of Chalmersmodellen, which is a calculation model, created at Chalmers. GeoSuite is developed for a commercial purpose and has its origin in custom Norwegian practise but after an order Chalmersmodellen was implemented. The aim of this master´s thesis was to verify that the creep model, Chalmersmodellen, is correctly implemented in GeoSuite Settlement. Several tests have been calculated with varying inputs. Most of the tests were done with simplified profiles in one layer and constant creep parameters but there are also tests where the creep parameters are varying and finally three realistic tests with real, evaluated parameters.

The results show that the programs commonly agree for the simplest tests. When the tests get more complicated the results are diverging. The cause of these results is likely depending on the complexity and the difficulty in implementing models in already existing programs.

Key words: clay, creep, settlement with creep, GeoSuite Settlement, geotechnical engineering

Krypsättningar i lera
– en jämförelse mellan två beräkningsprogram
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet

KINE MEIJER
ANDREAS ÅBERG
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Forskargruppen geoteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

I examensarbetet jämförs resultaten från två olika datorprogram för beräkning av krypsättningar i lera, GeoSuite Sättning och krypChalmers. Det senare är utvecklat i forskningssyfte utifrån Chalmersmodellen, vilken är en beräkningsmodell som är framtagen på Chalmers. GeoSuite är utvecklat för kommersiell användning och har sitt ursprung ur norsk praxis men har efter en beställning fått Chalmersmodellen implementerad. Syftet med detta examensarbete har varit att verifiera om Chalmersmodellen är korrekt implementerad i GeoSuite. Flera fall har beräknats med varierande indata, i de flesta fall förenklade profiler i ett lager med konstanta krypparametrar, men även för fall där krypparametrarna varieras och slutligen har tre realistiska fall beräknats utifrån verkliga indata.

Resultaten visar att resultaten för programmen i huvudsak är överensstämmande för enkla fall. Vid mer komplex lagerindelning och med varierande parametrar skiljer sig dock resultaten åt. Detta beror sannolikt på att olika metoder använts för att implementera modellen i en numerisk beräkningsalgoritm och den svårighet det innebär att kombinera två olika beräkningsmodeller.

Nyckelord: Lera, sättning, krypning, krypsättning, GeoSuite, geoteknik

Innehåll

ABSTRACT I

SAMMANFATTNING II

INNEHÅLL III

FÖRORD V

PARAMETRAR OCH BETECKNINGAR VII

1 INLEDNING 1

1.1 Bakgrund 1

1.2 Genomförande 1

1.3 Syfte och avgränsning 2

2 LITTERATURSTUDIER 3

2.1 Sättningsteori 3
2.1.1 Klassisk konsolidering 3
2.1.2 Lerans förkonsolideringstryck 4
2.1.3 Lerans uppbyggnad 5
2.1.4 Bestämning av lerans kompressionsegenskaper 6
2.1.5 Terzaghis konsolideringsekvation 6

2.2 Sättningar med krypdeformationer 9
2.2.1 Mekanisk förklaring av krypning 9
2.2.2 Åldring 10

2.3 Krypparametrar 10
2.3.1 Koefficienten för sekundär kompression, α_s 11
2.3.2 Tidsmotståndet, r_s 13
2.3.3 Sekundärt kompressionsindex, C_α 15

3 BERÄKNINGSMODELLER MED KRYPNING 16

3.1 Allmän beräkningsmetodik 16
3.1.1 Embankco 16
3.1.2 Krykon 17
3.1.3 Chalmersmodellen i GeoSuite 18
3.1.4 Jämförelse mellan programmens användning av parametrar 19

3.2 Utveckling av konsolideringsmodellen 19

3.3 Chalmersmodellens analytiska lösning 20
3.3.1 Begränsning av porövertrycksutjämning 21
3.3.2 Modell med finita differenser 22

4 FÖRSÖK 23

4.1 Enkla försök utan krypning 25

4.1.1 Resultat utan krypning 27
4.2 Försök med krypning 28
4.2.1 Enkla försök med krypning 28
4.2.2 Resultat från enkla krypförsök 32
4.2.3 Mer avancerade försök 32
4.2.4 Verkliga försök av större komplexitet 33

5 SLUTSATS 37

6 FÖRSLAG PÅ VIDARE STUDIER 39
6.1 Parameterstudie och känslighetsanalys 39
6.2 Begränsning i Darcys lag 39

7 REFERENSER 41

Förord

Föreliggande examensarbete behandlar krypsättningar i lera och jämför två olika beräkningsprogram, varav det ena är utvecklat i forskningssyfte och det andra är utvecklat för kommersiell användning.

Arbetet utfördes under hösten och vintern 2006-2007 på geo-avdelningen på institutionen för bygg- och miljöteknik vid Chalmers tekniska högskola under handledning av examinator; biträdande professor Claes Alén.

Vi vill rikta ett särskilt tack till Claes Alén, som alltid tagit sig tid för våra frågor och fört ett kreativt resonemang kring arbetet.

Tack även till professor Göran Sällfors för intressanta diskussioner och svar på våra frågor, Peter Claesson, Skanska Teknik, som delgivit oss sitt beräkningsmaterial, Hans-Petter Jostad, NGI, för frågor kring den norska modellen samt Anders Linder, ViaNova GeoSuite AB, för frågor kring GeoSuite.

Vi vill slutligen tacka all personal och examensarbetare på geo-avdelningen för en lärorik och rolig tid med ett trevligt bemötande och god stämning.

Göteborg April 2007

Kine Meijer

Andreas Åberg

Parametrar och beteckningar

Romerska bokstäver

b_0 Faktor för den normaliserade effektivspänningen vid kryptal r_0

b_1 Faktor för den normaliserade effektivspänningen vid kryptal r_1

C_v Konsolideringskoefficient [m^2/s]

e Portal [-]

k Pemeabilitet [m/s]

k_0 Initiell permeabilitet [m/s]

M Kompressionsmodul [kPa]

M_0 Kompressionsmodul för $\sigma' < \sigma'_c$ [kPa]

M_L Kompressionsmodul för $\sigma' > \sigma'_c$ [kPa]

n Porositet [-]

q Last [kPa]

R Tidsmotstånd [s]

r_s Tidsmotståndstal [-]

r_0 Tidsmotståndstal vid krypstart för $\sigma' \leq b_0 \cdot \sigma'_c$

r_1 Tidsmotståndstal för $\sigma' \geq b_1 \cdot \sigma'_c$

t Tid [s]

u Portryck [kPa]

z Djup [m]

Grekiska bokstäver

α_s Koefficient för sekundär kompression

ε Deformation [-]

ε_{cr} Krypdeformation [-]

σ Spänning [kPa]

σ' Effektivspänning [kPa]

σ'_0 Effektivspänning in situ [kPa]

σ'_c Förkonsolideringstryck [kPa]

Förkortningar

CRS Constant rate of strain

OCR Over Consolidation Ratio

NC Normally consolidated

SGI Statens geotekniska institut

NGI Norges geotekniske institutt

1 INLEDNING

Krypsättningar utgör stora problem vid väg- och järnvägsbyggnad i områden där det förekommer mäktiga lager av lösa leror. Långtidsobservationer i fält av deformationer som utvecklats vid belastning runt förkonsolideringstrycket visar att sättningarna, vid vissa förutsättningar, blir betydligt större och utvecklas hastigare jämfört med beräkningar med klassisk sättningsteori. I brist på tillförlitliga beräkningsmodeller görs idag oftast grova uppskattningar av sättningarna. Detta leder till en stor osäkerhet i beslutsunderlaget vilket medför en risk för val av mindre kostnadseffektiva lösningar vid exempelvis vägbyggnad. Därför finns stora vinster med att utreda vad krypningen innebär och finna lämpliga modeller som på ett rimligt sätt kan beskriva detta fenomen.

1.1 Bakgrund

En beräkningsmodell för krypsättningar har utvecklats i forskningssyfte vid geo-avdelningen på Chalmers och efter en beställning har den implementerats i ett programpaket för geoteknisk dimensionering, Novapoint GeoSuite Toolbox, där sättning utgör en del av programmet. Programpaketet är ett samarbete mellan svenska AutoGRAF-föreningen och det norska GeoSuite-projektet. Detta samarbete ger med gemensamma resurser möjlighet till snabbare utveckling eftersom geoteknikområdet utgör en förhållandevis liten marknad. Målgruppen för programmet är konsulter inom geoteknikbranschen och programmet har utvecklats i ett kommersiellt syfte, för att erbjuda en gemensam geoteknisk programvara för den norska, svenska och internationella marknaden. För att programmet skall godkännas av t.ex. statliga verk måste det först verifieras att modellen är korrekt implementerad, och därmed ger rimliga beräkningsresultat, vilket ligger till grund för detta examensarbete.

1.2 Genomförande

För kalibrering av programmet GeoSuite används som jämförelse programmet krypChalmers, som utvecklades i samband med doktorsavhandlingen ”Long term settlements in soft clays” av Claesson (2003), rörande krypdeformationer i lera. Den är del i en pågående utveckling och bygger på Chalmersmodellen, en krypmodell som presenterades av Alén (1998). Examensarbetet inleddes med grundläggande litteraturstudier gällande de teorier och modeller som ligger till grund för krypdeformationsberäkningarna i Chalmersmodellen. Jämförelsen är en komplettering av Claessons (2003) tidigare försök av större komplexitet. Då försöken inte gav entydiga resultat har vi studerat enkla fall för att kunna analysera resultaten noggrannare. Ett par fall för verkliga mätdata har också genomförts för att få en uppfattning om hur stor avvikelsen blir vid ett realistiskt fall jämfört med de enklare försöken. Eftersom källkoderna för programmen inte finns tillgängliga har en prototyp av krypChalmers i Mathcad (Alén, 1998) använts för de enklaste fallen, för att lättare

kunna följa beräkningsgången. Under arbetets gång uppgraderades räknekärnan i Geosuite Settlement, från version 06-06-04 till version 06-11-11.

1.3 Syfte och avgränsning

Syftet med examensarbetet är att kalibrera och verifiera GeoSuites beräkningsmodell för krypsättningar gentemot Chalmersmodellen samt att ge en överskådlig beskrivning av fenomenet krypning i lera och tillhörande beräkningsmodell. Det primära syftet har varit att jämföra resultaten mellan de olika beräkningsprogrammen då de innehåller olika versioner av samma krypmodell och utreda orsaken till eventuella skillnader. Mindre vikt har därför fästs vid försökens verklighetsförankring. Då arbetet är en del av ett pågående forskningsprojekt rörande krypsättningar är inte målet att nå en entydig slutsats angående GeoSuites användbarhet för kommersiell användning. Då tidigare studier granskat jämförelser med Embankco, vilket är det mest använda beräkningsprogrammet i Sverige, valdes i detta arbete att endast överskådligt beskriva skillnaderna mellan programmen utan att genomföra beräkningsfall och tillhörande resultatutvärdering.

2 Litteraturstudier

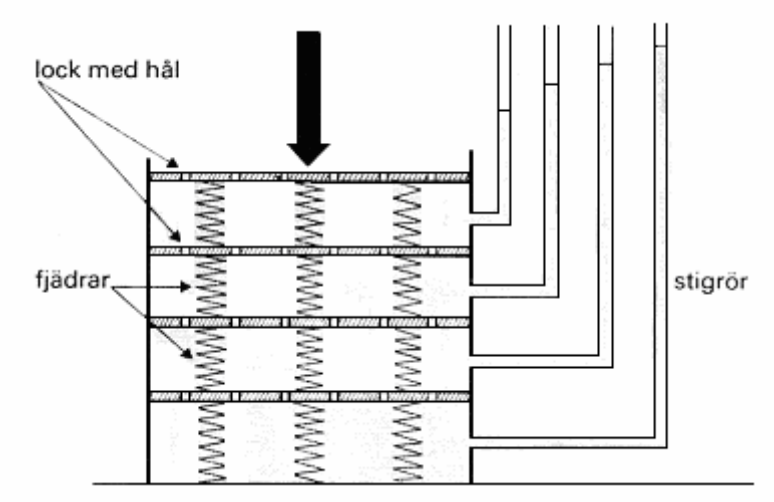
Arbetet inleddes med informationssökning angående dagens kunskapsläge i ämnet krypdeformationer. För att kunna sätta sig in i denna problematik, krävdes dessutom djupare förståelse för de grundläggande geoteknikkunskaperna såsom konsolidering och ingående parametrar.

2.1 Sättningsteori

Terzaghis (1923) modell för endimensionell konsolidering ligger fortfarande till grund för de nutida konsolideringsmodellerna. En utveckling sker kontinuerligt, vilket behandlas närmare i detta kapitel.

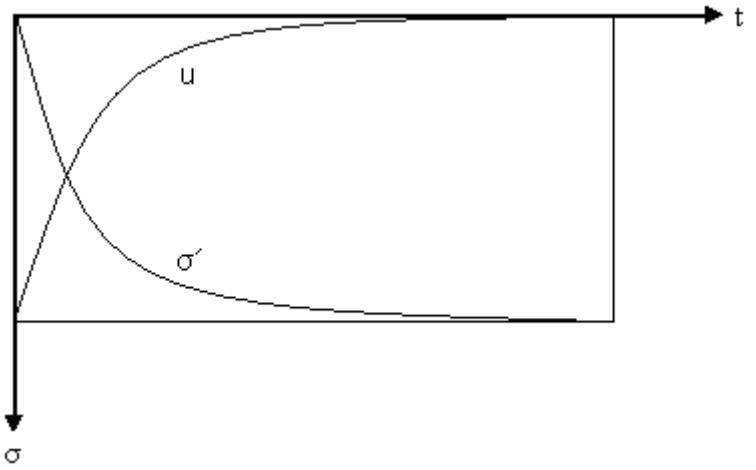
2.1.1 Klassisk konsolidering

Konsolidering innebär volymminskning genom vattenavgång, det vill säga en tidsberoende volymminskning som uppstår till följd av en hydrodynamisk fördröjd vattenutpressning ur jordens porer. Lerans låga permeabilitet fördröjer utpressning eller dränering av porvattnet. När leran belastas kommer därför den ökade spänningen att leda till ett porvattenövertryck. Figur 2.1 visar en enkel reologisk modell, med enkelsidig dränering, för den klassiska konsolideringsteorin. Vattennivån i stigrören motsvarar portrycket på respektive nivå. Fjädrarna motsvarar lerans kornskelett.



Figur 2.1 Reologisk modell för den klassiska konsolideringsteorin (Hansbo, 1975).

Initialt bärs hela lasten av porvattnet och i takt med att vattnet pressas ut, minskar porövertrycket och en lastväxling sker successivt från porövertryck till ökad effektivspänning. En allt större del av lasten förs då över på lerans kornskelett som då komprimeras. Totalspänningen är dock konstant under hela förloppet, se Figur 2.2.



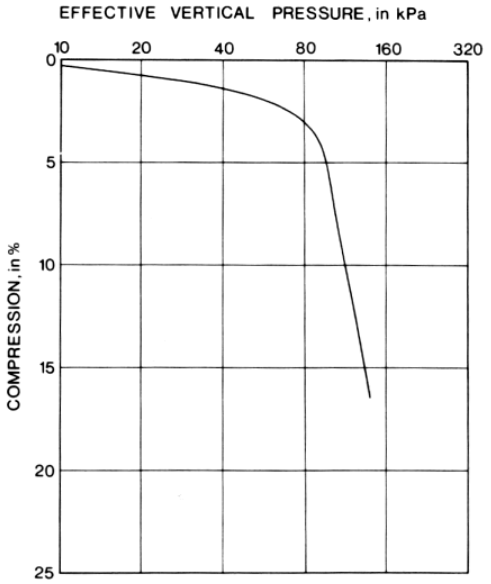
Figur 2.2 Lastväxling från porövertryck till effektivspänning.

I den klassiska sättningsteorin antas ett unikt samband mellan pålagd last och kompression efter konsolideringen. Permeabilitet och kompressionsmodul antas vara konstanta under hela förloppet, oberoende av att spänningsnivån ökar och portalet därmed minskar. I den klassiska beräkningsmodellen för konsolideringssättningar tas ingen hänsyn till krypning, vilket innebär att den klassiska konsolideringsteorin endast gör sig gällande till dess att allt porövertryck har utjämnats.

2.1.2 Lerans förkonsolideringstryck

En lera som aldrig tidigare utsatts för en spänning högre än den aktuella in-situ-spänningen sägs vara normalkonsoliderad. Om leran däremot tidigare har utsatts för en högre spänningsnivå sägs den vara överkonsoliderad. Storleken på den tidigare högsta spänningen benämns förkonsolideringstryck och är alltså den spänning för vilken leran redan har konsoliderat. Storleken på deformationen som uppstår beror av effektivspänningen jämfört med förkonsolideringstrycket. Konsolideringsfenomenet är påtagligt i de finkorniga jordarterna lera, dy och gyttja. I grovkorniga jordarter sker vattenutpressningen oftast mycket snabbt varpå deformationen i princip sker momentant. CRS-metoden utvecklades av Sällfors (1975) och är praxis för utvärdering av förkonsolideringstryck och kompressionsmoduler i Sverige, se även avsnitt 2.1.4.

Ur ett CRS-försök, se Figur 2.3, ses mycket tydligt när förkonsolideringstrycket överskrids där ett trendbrott sker på deformationskurvan.



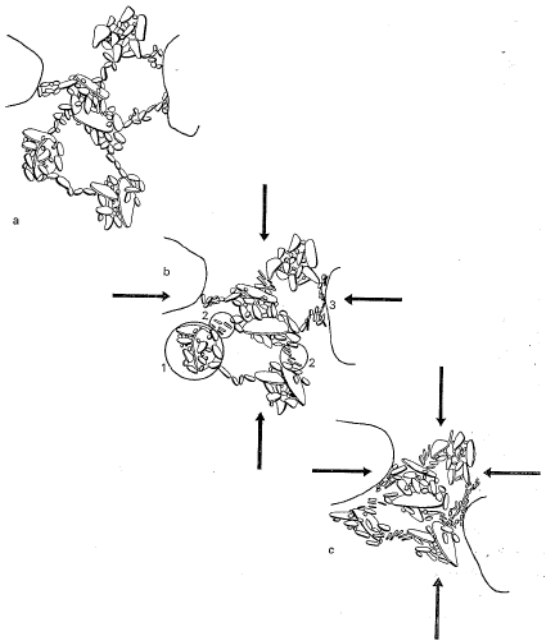
Figur 2.3 CRS-försök på lera (Sällfors, 1975).

Överkonsolidering kan ha en mängd orsaker såsom erodering av en tidigare högre markyta, en tidigare lägre grundvattennivå eller en yttre last som tidigare legat på platsen etc. Överkonsolidering kan också bero på s.k. åldring, se avsnitt 2.2.2.

Leran behöver nödvändigtvis inte vara normalkonsoliderad då rådande effektivspänning och förkonsolideringstryck är lika stora, d.v.s. $\sigma'_0=\sigma'_c$. Om konsolidering fortfarande pågår, råder ett porövertryck i leran, vilket reducerar effektivspänningen. När porövertrycket utjämnas med tiden, kommer effektivspänningen att öka. Att konsolideringen pågår indikeras av att portrycket är högre än vad som motsvarar ett hydrogeologiskt jämviktstillstånd, t.ex. hydrostatiskt tryck.

2.1.3 Lerans uppbyggnad

Lera anses vara uppbyggd av oregelbundet arrangerade partiklar som är samlade i aggregat och är sammankopplade med länkar, vilka består av de minsta partiklarna, Hansbo (1975), se figur 2.4. Vid spänningsökning i en överkonsoliderad lera komprimeras aggregaten relativt varandra. När förkonsolideringstrycket överskrids uppstår brott i de sammanbindande länkarna och en kraftig deformationsökning uppstår. Det är då lerskelettets svagaste delar, länkarna, som deformeras medan aggregaten förblir tämligen opåverkade. Vid ytterligare belastning kommer dessa aggregat att packas allt mer vilket leder till ökad styvhet i leran.



Figur 2.4 Domänbildning i aggregerad lera (Hansbo, 1975).

2.1.4 Bestämning av lerans kompressionsegenskaper

För att bestämma lerans kompressionsegenskaper används ödometerförsök vilket kan utföras på ett prov med stegvis belastning eller med CRS, Constant Rate of Strain, vilket innebär att ett prov deformeras med konstant hastighet. Provet är ensidigt dränerat och har en portrycksmätare installerad vid den odränerade sidan. Under försöket registreras påförd kraft, deformation och portryck. Utifrån detta erhålls effektiv vertikalspänning och kompression. Denna metod ger säkrare information om lerans deformationsegenskaper än ett försök med stegvis belastning, Sällfors (2001).

2.1.5 Terzaghis konsolideringsekvation

Terzaghis ekvation för porövertrycksutjämning beskrivs i ekvation 2.1 och bygger på två antaganden; utjämningen av porövertrycket sker endimensionellt, vanligen uppåt och nedåt, samt att såväl permeabiliteten som kompressionsmodulen är konstanta med djupet och spänningsnivån.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = M \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \qquad (2.1)$$

där k = permeabilitet [m/s]

M = kompressionsmodul [kPa]

γ_w = porvattnets egentyngd [kN/m^3]

När modul och permeabilitet är konstanta med djupet kan den så kallade konsolideringskoefficienten, C_v, införas, ekvation 2.2.

$$C_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \text{ [m}^2\text{/s]} \qquad (2.2)$$

C_v är en materialparameter som bestäms ur laboratorieförsök och anger hur snabbt sättningen utvecklas. Då fås det förenklade uttrycket:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (2.3)$$

Ekvation 2.3 gäller under följande villkor:

- Jorden är vattenmättad och homogen
- Porvattenflödet och töjningen sker endimensionellt
- Darcys lag gäller
- Ändring av porvattentrycket resulterar i motsvarande ändring av effektivspänningen, totalspänningen är alltid konstant.
- Porvattnet och jordpartiklarna är inkompressibla
- Töjningen är endast beroende av effektivspänningen.

För att beskriva tidsberoende sättningar, används tidsfaktorn T_v (ekvation 2.4) och kan sammanfattas i uttrycket (Terzaghi 1936):

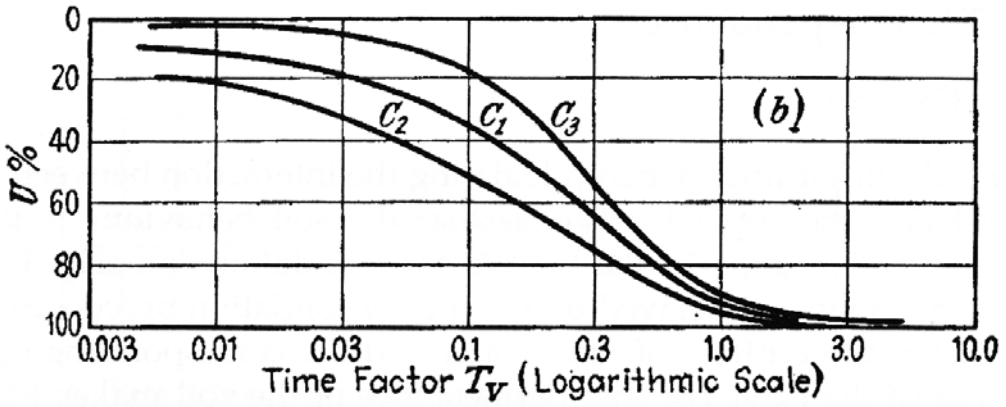
$$T_v = C_v \cdot \frac{t}{d^2} \qquad (2.4)$$

där

t = tiden

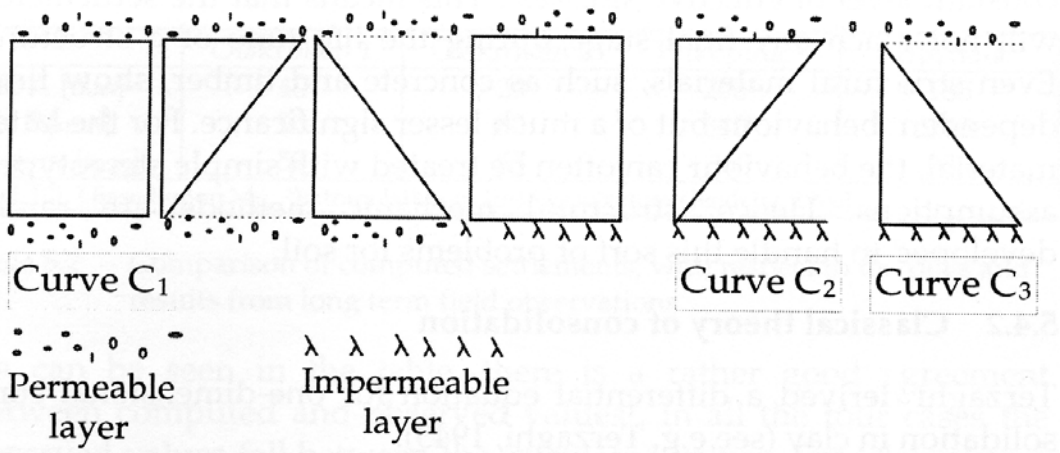
d = dräneringsvägen

Tidsfaktorn ger medelkonsolideringsgraden, U [%], vilken utgör den andel av totalsättningen som utbildats efter given tidpunkt. Rent fysikaliskt betyder detta den andel av porövertrycket som har hunnit att utjämnats efter denna tid. För enkla fall finns en grafisk lösning av ovan nämnda ekvation, vilken åskådliggörs i Figur 2.5.



Figur 2.5. Konsolideringsgraden för olika konsolideringskoefficienter och randvillkor (Terzaghi och Frölich, 1936).

Konsolideringsgraden är åskådliggjord i kurvor för olika randvillkor. Randvillkoren finns redovisade i Figur 2.6 och beror av vilka porövertryck som uppstår vid pålastning. Dessa porövertryck kommer successivt att överföras till effektivspänning under konsolideringsprocessen.



Figur 2.6 Randvillkor för konsolideringsgraden (Terzaghi och Frölich, 1936).

Kurvorna kan vidare beskrivas analytiskt, enligt ekvation 2.5-7, Alén (1998), utifrån Terzaghi (1943):

$$Uc1 = \begin{cases} 1{,}15 \cdot \sqrt{T_v} & \text{då } T_v < 0{,}2 \\ 1 - 0{,}8 \cdot e^{-2{,}5 \cdot T_v} & \text{då } T_v > 0{,}2 \end{cases} \tag{2.5}$$

$$Uc2 = \begin{cases} 1{,}2 \cdot T_v^{\,3/8} & \text{då } T_v < 0{,}16 \\ 1 - 0{,}6 \cdot e^{-2{,}6 \cdot T_v} & \text{då } T_v > 0{,}16 \end{cases} \tag{2.6}$$

$$Uc3 = \begin{cases} 2 \cdot T_v & då\ T_v < 0{,}1 \\ 1 - 1{,}05 \cdot e^{-2{,}6 \cdot T_v} & då\ T_v > 0{,}1 \end{cases} \qquad (2.7)$$

Uc_i= Medelkonsolideringsgrad

2.2 Sättningar med krypdeformationer

Krypfenomenet i lera har varit känt sedan Taylor och Merchant formulerade den första teorin med krypeffekter på 1940-talet. Flertalet observationer som utförts i fält, visar att sättningar fortsätter att utvecklas trots att full portrycksutjämning har skett, Larsson et al, (1994). Sambandet mellan effektivspänning och deformation som är beroende av tiden har getts flera namn som krypning, sekundär kompression, plastiskt kompressionsmotstånd, tidsmotstånd och hastighetseffekter, vilka alla används för att beskriva samma fenomen. Det har emellertid saknats enkla beräkningsmodeller för sättningsberäkningar där krypning är inkluderad.

Krypning är välkänt inom byggnadsmekaniken och innebär en ökande deformation under konstant last. Detta gäller för de flesta byggnadsmaterial och kryphastigheten är normalt störst direkt efter pålastning och avtar sedan med tiden. Fenomenet är dock mer komplicerat i lera då dess deformation består av både elastiskplastiska, konsoliderings- samt kryptöjning. Dessa tre fenomen är dessutom tätt sammankopplade med varandra.

Sättningar har traditionellt delats upp i primär och sekundär konsolidering. Den primära konsolideringen har antagits ske som utjämning av porövertrycket till följd av en spänningsökning och den sekundära konsolideringen har vidare antagits ske under konstant spänningstillstånd och innebar en tidsberoende deformation av lerans kornskelett, även kallad krypning. Den sekundära konsolideringen antogs starta först när allt porövertryck var utjämnat. Det har emellertid visat sig att denna modell är otillräcklig och att dessa två fenomen i verkligheten är sammanflätade och inte utesluter varandra. Šuklje (1957) presenterade en modell där krypsättningen antogs uppkomma även under den primära konsolideringen vilket har varit konceptet för samtliga modeller som presenterats de sista 20-30 åren.

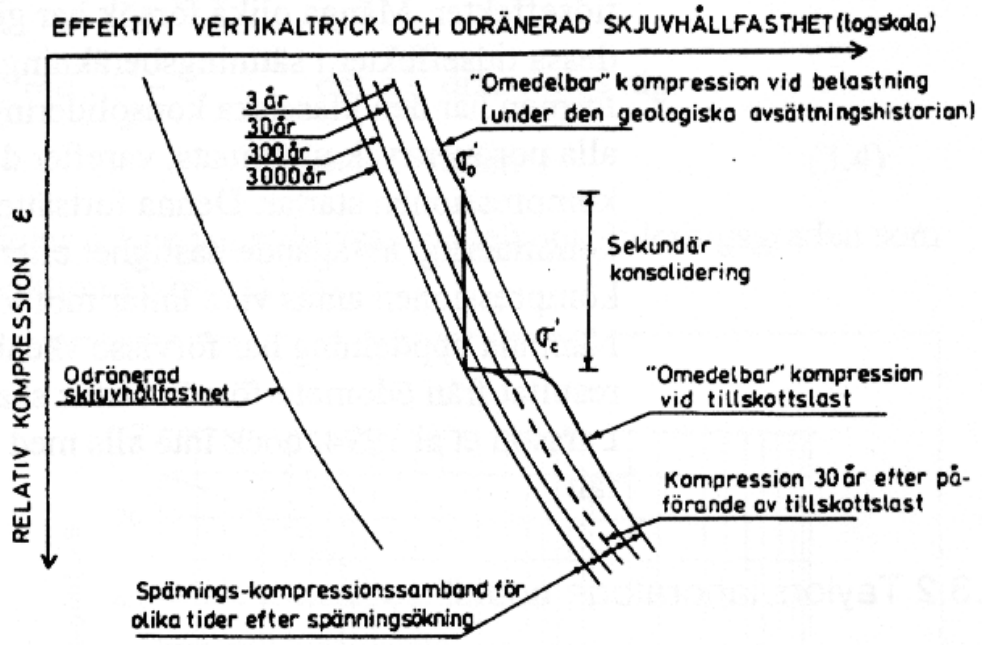
2.2.1 Mekanisk förklaring av krypning

Krypfenomenet, eller sekundär konsolidering, anses kort sagt bero på att lerans kornskelett deformeras under konstant spänning och trots att allt porövertryck är utjämnat. Enligt Hansbo (1975) beror krypning sannolikt på viskösa deformationer i de mikrostrukturella brottzoner som uppstår i lerans länkar under den primära konsolideringen. Vidare antas att partiklarna i aggregaten reorienteras med tiden, på grund av den spänningsomlagring och spänningsökning som uppstår. Styrkan i de nybildade aggregaten ger ett ökat deformationsmotstånd eller kompressionsmodul vilket medför att kryphastigheten avtar med tiden.

2.2.2 Åldring

Leror som aldrig varit utsatta för en större effektivspänning än den rådande in-situ-spänningen uppvisar ofta en svag överkonsolidering. Det förkonsolideringstryck, vilket är större än in-situ-spänningen och som inte kan relateras till en tidigare högre effektivspänning, benämns ofta kvasi-förkonsolideringstryck. Fenomenet kallas åldring och innebär att leran komprimeras allt mer under i stort sett samma effektivspänning, se Figur 2.7. Idag finns teorier om att åldring är samma sak som krypning.

Naturlig överkonsolidering eller kvasi-förkonsolideringstryck, även då den är liten, måste alltid beaktas vid beräkningar med krypeffekter. Utan hänsyn till överkonsolidering erhålls betydande krypsättningar omedelbart vid beräkningstart även vid mycket små tillskottspänningar, vilket ger en överskattad sättning.



Figur 2.7 Schematisk bild över Bjerrums modell (Svensson, 2000 efter Bjerrum, 1967).

I Figur 2.7 motsvarar kurvan som benämns ”omedelbar kompression vid belastning”, den högsta spänning som leran utsatts för. Den vertikala sträckan i figuren visar krypningen under 3 000 år som sker under konstant effektivspänning. Då en tillskottslast påförs, påvisar leran överkonsoliderade egenskaper innan förkonsolideringstrycket uppnås och betydande kompression startar åter.

2.3 Krypparametrar

Det har utvecklats ett antal olika teorier som förklarar krypning. Gemensamt för samtliga är att de uppvisar ett linjärt samband mellan tid och krypdeformation då

tidsskalan logaritmeras. Teorierna bygger på samma fysikaliska fenomen och motsvaras av samma materialkonstant men beskrivs av skilda parametrar enligt ekvation 2.8-10 nedan vilka förklaras i nästa avsnitt:

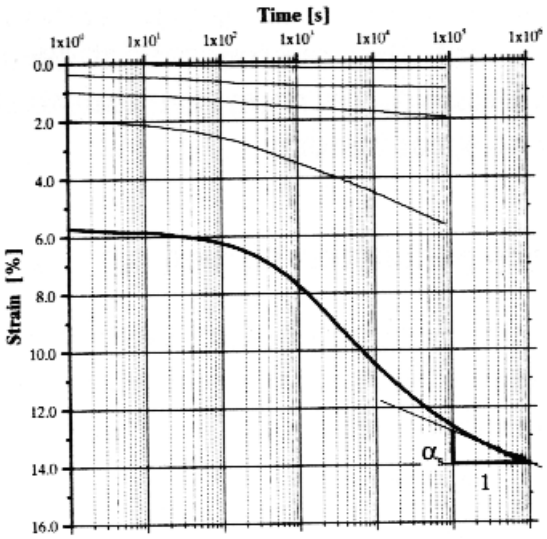
$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial \log(t)} = \text{konstant} = \alpha_s \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial \ln(t)} = \text{konstant} = \frac{1}{r_s} \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial e}{\partial \log(t)} = \text{konstant} = C_\alpha \tag{2.10}$$

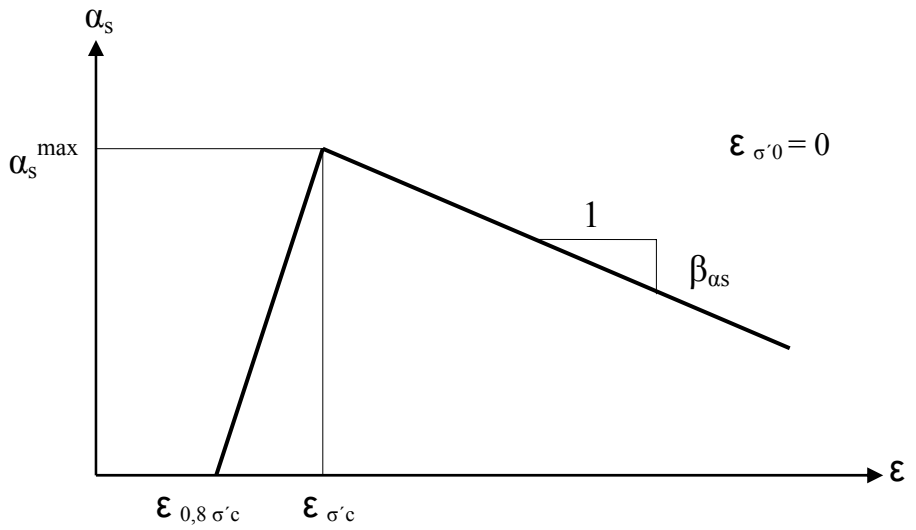
2.3.1 Koefficienten för sekundär kompression, α_s

Den i Sverige vanligaste parametern för att beskriva en leras krypegenskaper är koefficienten för sekundär kompression, α_s, vilken utvärderas genom stegvisa ödometerförsök, figur 2.8, och definieras enligt ekvation 2.8. Parametern α_s beskriver krypdeformationens utveckling med tiden i ett ödometerförsök efter det att alla porövertryck har utjämnats. I verkliga fall sker de båda fenomenen primär konsolidering och krypning parallellt men är svåra att särskilja.



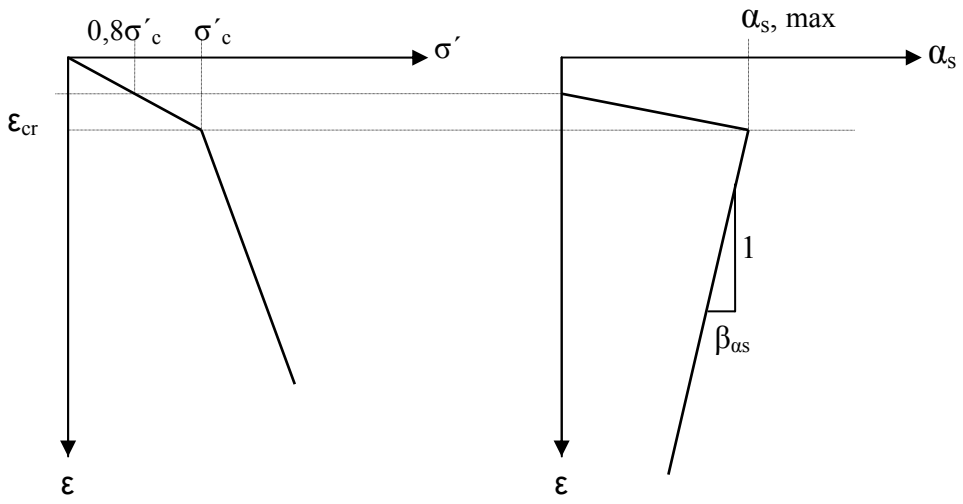
Figur 2.8 α_s utvärderad från ett stegvis ödometer-försök (Claesson 2003).

Laboratorieundersökningar visar att krypdeformationer är starkt beroende av effektivspänningen. Koefficienten för den sekundära kompressionen ökar principiellt i Figur 2.9 mellan $0{,}8 \cdot \sigma'_c$ och $1{,}0 \cdot \sigma'_c$, till det maximala värdet för att sedan avta något.



Figur 2.9 α_s variation med töjningen (Larsson et al, 1994).

I Figur 2.10 åskådliggörs tydligare sambandet mellan effektivspänningen och värdet på koefficienten för sekundär kompression vid ökande töjning.



Figur 2.10 α_s variation med töjningen.

Koefficienten för sekundär kompression, α_s, antas vara obetydlig tills en viss deformation uppnås, $0{,}8 \cdot \varepsilon_{cr}$, varefter den ökar mycket snabbt till ett maximalt värde, $\varepsilon_{cr,}$ för att sedan sakta avta med ökande deformation, se Figur 2.10. Den deformation där α_s börjar öka kraftigt, motsvarar i lera en effektiv vertikalspänning på cirka $0{,}8 \cdot \sigma'_{c,}$ vilket krävs för att krypningen ska starta. Det betyder att störst risk för krypning fås vid normalkonsoliderad eller svagt överkonsoliderad lera. Vid sättningsberäkningar med hänsyn till krypning är det därför särskilt viktigt att beakta jordens spännings-

och deformationshistoria in situ, främst överkonsolideringsgraden, för att dimensionering av förstärkningsåtgärder ska kunna optimeras.

2.3.2 Tidsmotståndet, r_s

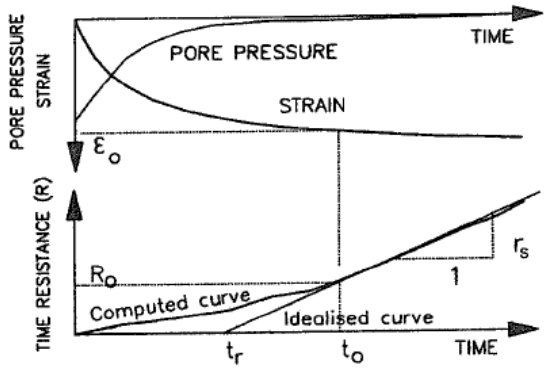
Janbu (1969) beskriver lerans krypegenskaper med ett tidsmotstånd, R (ekvation 2.11).

$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} \tag{2.11}$$

Tidsmotståndet har i laboratorie-försök visat sig öka ungefär linjärt med tiden, varför det kan uttryckas som (ekvation 2.12):

$$\frac{dR}{dt} = r_s \tag{2.12}$$

där r_s är parametern tidsmotståndstalet.



Figur 2.11 Tidsmotståndstalet som funktion av tiden för ett laststeg (Svanø et al., 1991).

I Figur 2.11 ses att efter en viss referenstid t_r, börjar tidsmotståndet R, att öka. Vid denna tidpunkt har porövertrycket utjämnats, dvs. det som traditionellt har benämnts primär konsolidering har avslutats.

Tidsmotståndet R (ekvation 2.13) ges därför av:

$$R = r_s \cdot (t - t_r) \tag{2.13}$$

Töjningshastigheten som innebär töjningsändringen per tidsenhet (ekvation 2.14), kan uttryckas som

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{1}{R} = \frac{1}{r_s \cdot (t - t_r)} \tag{2.14}$$

Om uttrycket integreras från t_0 till t erhålls töjningen under önskad tidsperiod (ekvation 2.15):

$$\Delta\varepsilon_{cr} = \frac{1}{r_s}\int_{t_0}^{t}\frac{dt}{(t-t_r)} = \frac{1}{r_s}\cdot\ln\frac{t-t_r}{t_0-t_r} \tag{2.15}$$

där t_0 är den punkt där R-t-kurvan i figur ovan antar en rät linje. Därav kan tidsmotståndstalet uttryckas som (ekvation 2.16):

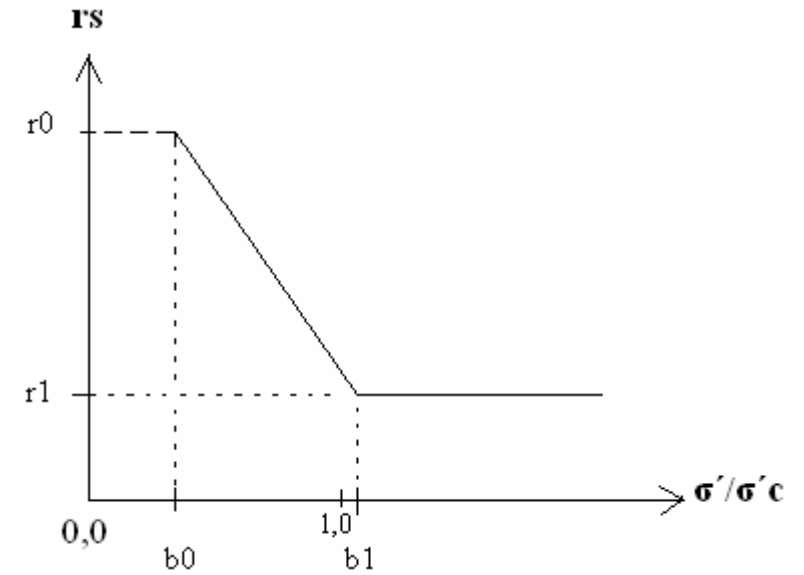
$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial\varepsilon_{cr}}{\partial\ln t} \tag{2.16}$$

Koefficienten för sekundär kompression och tidsmotståndstalet kan vidare relateras till varandra (ekvation 2.17):

$$\alpha_s = \frac{\partial\varepsilon_{cr}}{\partial\log(t)} = \frac{\partial\varepsilon_{cr}}{\partial\ln(t)}\cdot\frac{\partial\ln(t)}{\partial\log(t)} = \frac{\partial\varepsilon_{cr}}{\partial\ln(t)}\cdot\ln 10 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \alpha_s = \frac{\ln 10}{r_s} \approx \frac{2{,}3}{r_s} \tag{2.17}$$

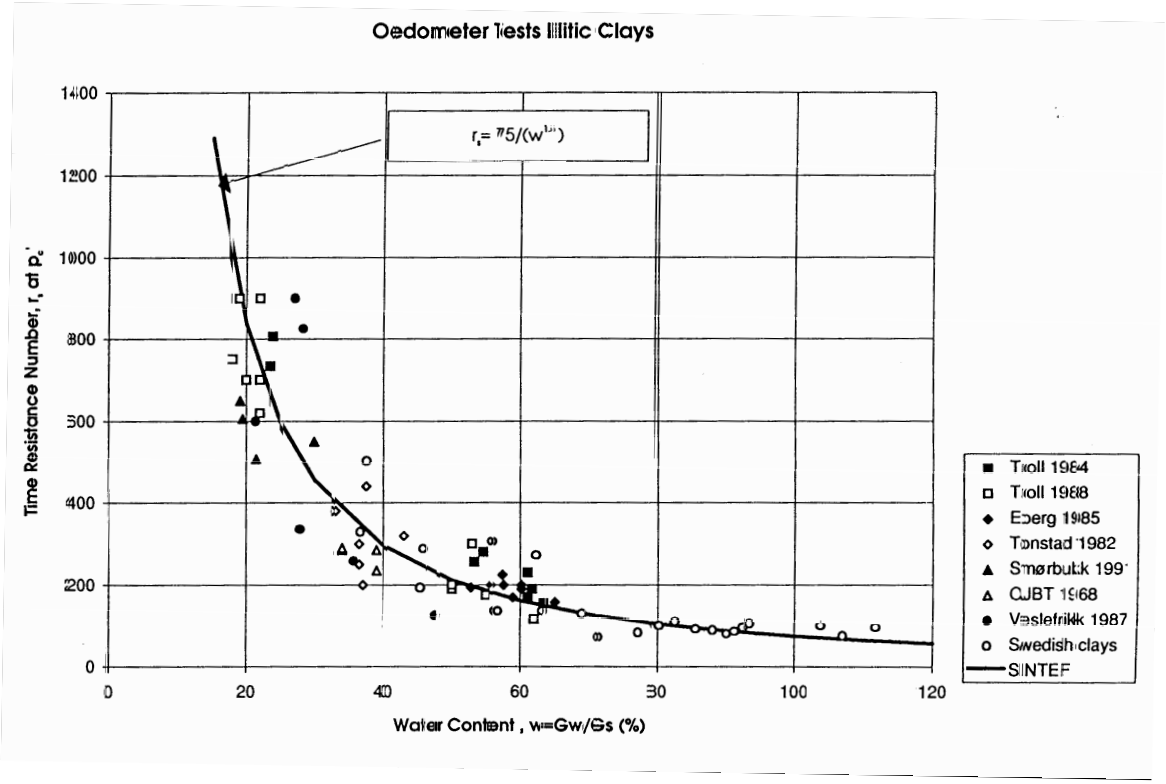
Claesson (2003) har visat att tidsmotståndstalet är mycket högt för en effektivspänning under 0,7· σ'_c, vilket innebär att under denna spänningsnivå erhålls marginella krypeffekter. Tidsmotståndstalet minskar sedan linjärt i ett intervall kring förkonsolideringstrycket och definieras av r_0 och r_1, respektive b_0 och b_1 (se Figur 2.12). Typiska värden på intervallet är 0,7-1,1·σ'_c.



Figur 2.12 Tidmotståndstalets variation med den normaliserade effektivspänningen.

Störst krypeffekter fås alltså vid en effektivspänning strax över förkonsolideringstrycket.

I Christensen (1995) presenteras empiriska observationer av krypparametrar. Här redovisas bl.a. tidsmotståndstalet, r_s, som funktion av naturlig vattenkvot för såväl norsk som svensk lera vid förkonsolideringsstrycket, se Figur 2.13, där $r_s = 75 / w^{1,5}$.



Figur 2.13 r_s som funktion av naturlig vattenkvot (Christensen, 1995).

2.3.3 Sekundärt kompressionsindex, C_α

Internationellt används oftast portalet, e, för att beskriva lerans krypegenskaper. Dessutom används den för att beskriva permeabilitetens minskning med ökande töjning med hjälp av en faktor, C_{eps}. I Sverige däremot relateras oftast både spänning och permeabilitet till töjningen, ε. En ofta använd parameter internationellt är det sekundära kompressionsindexet C_α (ekvation 2.19) vilken definieras som:

$$C_\alpha = \frac{\partial e}{\partial \log(t)} \tag{2.19}$$

Skillnaden mellan α_s och C_α är alltså att de relateras till töjning respektive portal. De kan uttryckas av varandra som (ekvation 2.20):

$$\alpha_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \tag{2.20}$$

där e är portal och e_0 initiellt portal.

3 Beräkningsmodeller med krypning

3.1 Allmän beräkningsmetodik

Vid beräkning av sättningar förenklas ofta jorden mellan två dränerande skikt eller från ett impermeabelt skikt till ett dränerande skikt till ett enda homogent lager. Detta har gjorts för att underlätta handberäkningar men medför avsevärda fel i resultatet. Alternativt har jorden delats in i skikt och problemet lösts grafiskt, exempelvis med Helenelunds metod. På det viset kan även hänsyn till varierande modul och permeabilitet tas. Detta görs genom att beräkna konsolideringsförloppet under en begränsad tid med konstanta parametrar. Därefter väljs nya parametrar med hänsyn till den deformation som skett och porövertrycket justeras med hänsyn till de tidsbundna förändringar av kompressionsegenskaperna som skett under den aktuella tiden. Därefter beräknas det fortsatta konsolideringsförloppet för ett nytt begränsat tidsintervall och proceduren upprepas. Antalet lager och tidssteg i denna metod blir av praktiska skäl begränsade vid handberäkning. Med dagens tillgång till datorer med mycket stor beräkningskapacitet finns ingen anledning att göra förenklade antaganden. Jordprofilen kan delas in ett stort antal lager och tidsstegen i beräkningarna kan göras mycket korta relativt grafiska handberäkningsmetoder.

En första förutsättning för en noggrann sättningsprognos är att den underliggande jorden är väl undersökt med avseende på jordlagerföljder och egenskaper hos de olika skikten. Vidare måste spänningssituationen in-situ i form av överlagringstryck och rådande portryck samt årstidsvariationer vara kartlagda.

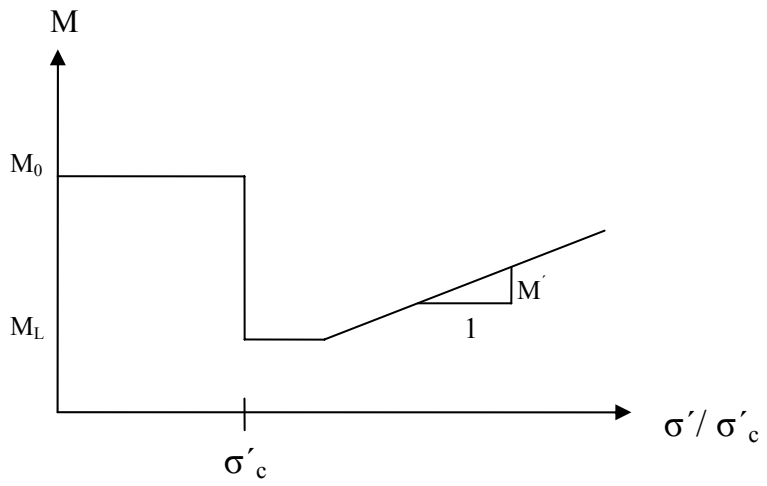
För att kunna prognostisera utvecklingen av sättningar under lång tid med god noggrannhet fordras en beräkningsmetod som tar hänsyn till krypning. De kända sättningsprogram som tar hänsyn till krypeffekter och som existerar på den nordiska marknaden idag sammanfattas kortfattat nedan.

3.1.1 Embankco

Embankco är idag det vanligaste förekommande sättningsprogrammet på den svenska marknaden. Programmet togs fram 1994 av Vägverket och Statens geotekniska institut, SGI. Avsikten var att utveckla en användarvänlig datormodell för att kunna förutse sättningar med krypeffekter i lösa leror under anläggning av vägbankar. Programmet bygger på den klassiska differentialekvationen för endimensionell konsolidering och har kompletterats med ett uttryck för krypeffekter (ekvation 3.1) vilket ger:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{M}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial}{\partial z}\left(k \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial u_{cr}}{\partial t} \qquad (3.1)$$

I Embankco beskrivs lerans kompressionsegenskaper enligt svensk praxis vilket visas i Figur 3.1.



Figur 3.1 Principiell modell för kompressionsmoduler enligt traditionell svensk praxis.

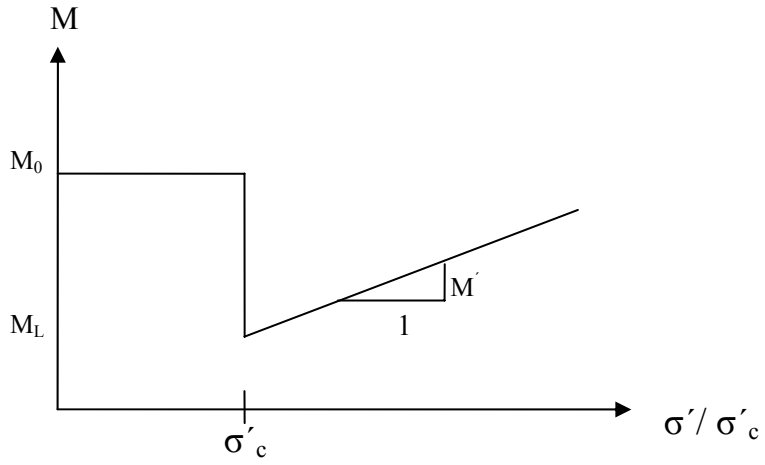
Lerans krypegenskaper beskrivs med koefficienten för sekundär kompression, α_s, se figur 2.9 - 2.10.

3.1.2 Krykon

Krykon (Svanø et al, 1991) är ett finita element-program för beräkning av konsoliderings- och kryptöjningar och bygger på antagandet att alla töjningar är kryptöjningar, med en töjningshastighet enligt ekvation 3.2:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial \ln t} \tag{3.2}$$

För varje tidssteg används en iterativ process som beräknar förändringen i effektivspänning samt en ny lägre kompressionsmodul på grund av krypning. De olika töjningsfenomenen särskiljs alltså inte i denna modell. Lerans egenskaper beskrivs i Krykon enligt norsk praxis vilken baseras på Janbus tangentmodulformel, se Figur 3.2, där förkonsolideringstrycket är utvärderat enligt norsk praxis och är normalt större än motsvarande svensk praxis.



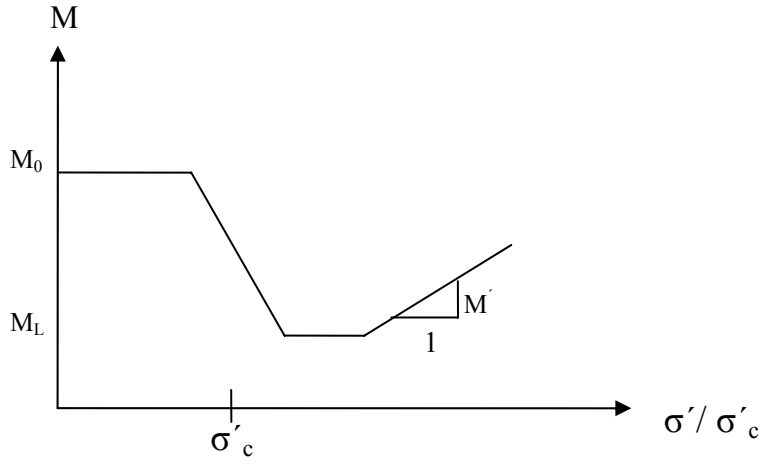
Figur 3.2 Principiell modell för kompressionsmoduler enligt norsk praxis (för enkelhetens skull är benämningarna översatta till svenska motsvarigheter).

3.1.3 Chalmersmodellen i GeoSuite

Utifrån den reologiska modell som beskrivs i avsnitt 3.5 kan en differentialekvation beskriva hela sättningsförloppet inklusive krypning, vilket innefattar Terzaghis lösning med ett tillskott för krypning (ekvation 3.3 med härledning i bilaga 1). Detta ger om *k* och γ_w är konstanta med djupet:

$$\frac{1}{\mathrm{M}}\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r \cdot (t + t_r)} \qquad (3.3)$$

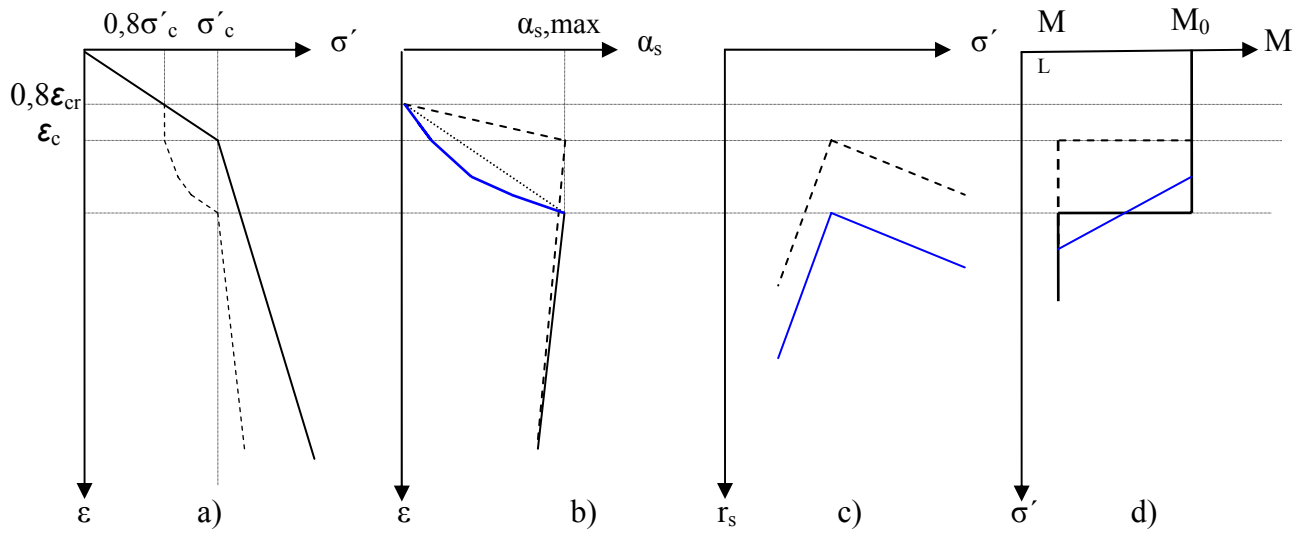
Lerans egenskaper beskrivs i den utvecklade modellen som redovisas i Figur 3.3 och i stycke 3.4.1.



Figur 3.3 Utvecklad modell för moduler enligt svensk praxis.

3.1.4 Jämförelse mellan programmens användning av parametrar

I Figur 3.4 visas hur utvärderade krypparametrar används i GeoSuite, krypChalmers och Embankco jämfört med varandra.



Figur 3.4 Användning av parametrar med hänsyn till krypning.

a) σ´-ε – principiell kurva från ödometerförsök. Den streckade linjen motsvarar användningen i de tre beräkningsprogrammen.

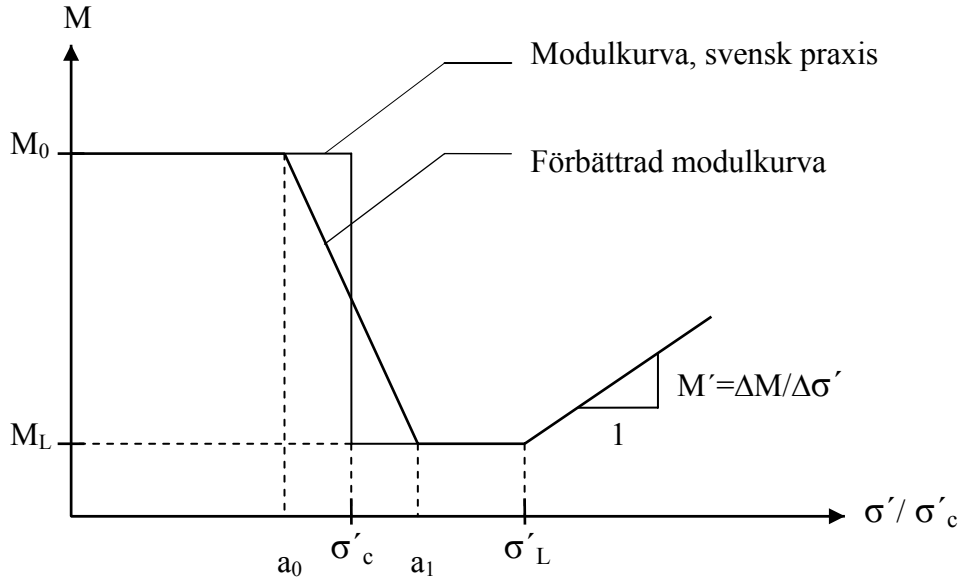
b) α_s som spänningsberoende upp till förkonsolideringstrycket. Den streckade linjen visar Embankcos användning medan den i GeoSuite hade motsvarats av den färgade kurvan.

c)Användningen av r_s i krypChalmers ges av den färgade linjen och den streckade linjen visar hur användningen hade motsvarats i Embankco.

d) Moduler enligt ödometerförsök. Blåfärgad linje visar den utvecklade användningen av modellen.

3.2 Utveckling av konsolideringsmodellen

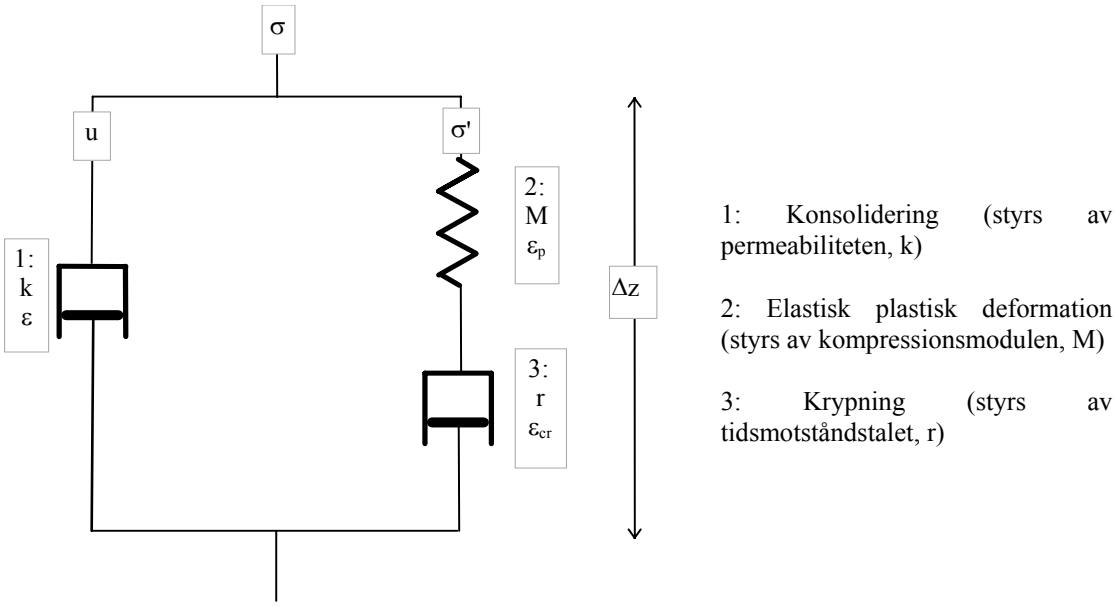
Claesson (2003) använder en utveckling för att beskriva jordens parametrar jämfört med klassiska modellen för konsolidering för att öka noggrannheten i sättningsberäkningar. Enligt traditionell modell och svensk beräkningspraxis, fås en mycket kraftig modulminskning när förkonsolideringstrycket överskrids. I realiteten sker modulminskningen betydligt mjukare, vilket innebär ett mer verklighetstroget utseende på kurvan ges enligt Figur 3.5. Detta leder till att resultatet av sättningsberäkningen blir mindre känsligt för små förändringar av lasten när den slutliga effektivspänningen ligger nära förkonsolideringstrycket. Denna utvecklade modell är implementerad i GeoSuite.



Figur 3.5 Svensk praxis kontra ny modell (Claesson 2003).

3.3 Chalmersmodellens analytiska lösning

Alén (1998) presenterade en beräkningsmodell för att beräkna krypsättningar i lera. Syftet med modellen var att ta fram en differentierbar analytisk beräkningsmodell för praktiskt ingenjörsarbete, med möjlighet att applicera stokastisk dimensionering av geokonstruktioner. Alén beskriver sättningar med tillhörande krypning som tre separata men intimt kopplade fenomen i en enkel reologisk modell, figur 3.6:



Figur 3.6 Reologisk modell (Alén, 1998).

1: Konsolidering innebär ett utflöde av porvatten och därmed utjämnas porövertrycket. Darcys lag (se avsnitt 7.1) kan användas för att beskriva denna process.

2: Elastisk plastisk deformation orsakas av att effektivspänningen ökar. Den elastiska deformationen anses ske momentant med spänningsökningen och antas försvinna vid avlastning. I geotekniken påförs dock de flesta laster endast en gång för att sedan inte ändras nämnvärt, varför det normalt vid sättningsberäkningar inte finns något behov av en distinktion mellan elastisk och plastisk deformation. Av samma anledning behövs normalt inte heller tas hänsyn till en eventuell avlastning i modellen. Elastisk plastisk deformation beskrivs av kompressionsmodulen, M, vilken är given som funktion av effektivspänningen och utvärderas ur CRS-försök.

3: Krypdeformation är en tidsberoende deformation som utvecklas under konstant effektivspänning, oberoende av ”1” och ”2”.

Företeelserna 1 och 2 påverkar varandra genom konsolideringen, vilken överför porövertrycket till effektivspänning i kornskelettet. Krypdeformationen, 3, antas dock vara oberoende av de övriga. Både konsolidering och krypdeformation förutsätter dock alltid att utströmning av porvatten sker, vilket ytterst styrs av permeabiliteten.

Utifrån den reologiska modellen kan en differentialekvation (ekvation 3.4) som beskriver hela förloppet inklusive krypning härledas, se bilaga 1. Om k och γ_w är konstanta med djupet erhålls:

$$\frac{1}{\mathrm{M}}\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r \cdot (t + t_r)} \qquad (3.4)$$

vilken överensstämmer med Terzaghis lösning, men med tillägg för kryp-effekten.

3.3.1 Begränsning av porövertrycksutjämning

För att krypsättningar ska kunna utvecklas i modellen måste motsvarande porövertryck utjämnas. Ett lågt tidsmotståndstal, r, i ekvation 3.4 kommer att generera ökande porövertryck över tiden under konstant last. Detta inträffar om hastigheten på den beräknade krypdeformationen är större än hastigheten på den totala deformationen enligt ekvation 3.5:

$$\partial \varepsilon_{cr} / \partial t > \partial \varepsilon / \partial t \qquad (3.5)$$

Detta skulle innebära att effektivspänningen skulle minska under konstant last vilket är orimligt eftersom krypsättningar utvecklas på grund av effektivspänningen. Därför krävs ett villkor i modellen vilket begränsar porövertrycksutjämningen till det som medges av permeabiliteten enligt ekvation 3.6. Sättningshastigheten på grund av krypning får alltså aldrig överstiga vad som motsvaras av vattenavgången genom konsolidering.

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \min\begin{cases} \dfrac{1}{r \cdot (t + t_r)} \\ -\dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{k}{\gamma_w}\dfrac{\partial u}{\partial z}\right) \end{cases} \tag{3.6}$$

Detta får till följd att referenstiden, t_r, kommer att ändras genom förloppet beroende på om permeabiliteten eller tidsmotståndet styr krypningen enligt villkoret ovan. Genom att använda Janbus tidsmotstånd, R, istället för tidsmotståndstalet r_s kan detta undvikas (ekvation 3.7). Det ger:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{1}{r \cdot (t + t_r)} = \frac{1}{R} \tag{3.7}$$

Integration ger återigen töjningen över given tid, se bilaga 2. Om k och γ_w är konstanta kan villkoret för portrycksutjämning (ekvation 3.8) skrivas:

$$\frac{1}{M}\frac{\partial u}{\partial t} = \max\begin{cases} 0 \\ \dfrac{k}{\gamma_w} \cdot \dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \dfrac{1}{R} \end{cases} \tag{3.8}$$

3.3.2 Modell med finita differenser

För att kunna hantera modellen i ett datorprogram krävs en modell på differensform (ekvation 3.9):

$$u_{i+1} - u_i = \max\begin{cases} 0 \\ \dfrac{k \cdot M}{\gamma_w}\dfrac{\Delta t}{\Delta z^2}(u_{j+1} - 2u_j + u_{j-1)} + \dfrac{M \cdot \Delta t}{R} \end{cases} \tag{3.9}$$

Index i och j svarar mot tiden respektive djupet. Begynnelsevillkoren är kända eftersom porövertrycket vid tiden 0 är känt och motsvarar tillskottspänningen. Randvillkoren ges av att porövertrycket vid en fri rand är noll respektive att ingen strömning sker genom en tät rand, dvs. $\partial u / \partial z = 0$. Töjningen kan slutligen beräknas som (ekvation 3.10):

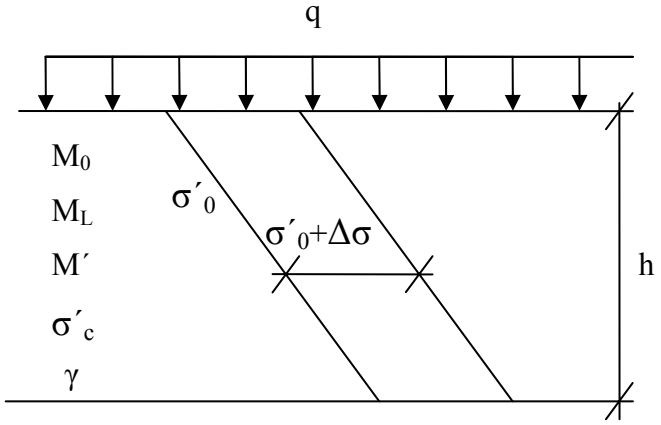
$$\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i = \frac{-k}{\gamma_w}\frac{\Delta t}{\Delta z^2}(u_{j+1} - 2u_j + u_{j-1}) \tag{3.10}$$

På det viset kan porövertrycket och tillhörande deformation beräknas för godtycklig tidpunkt och djup. Profilen kan dessutom delas in i valfritt antal skikt med tillhörande egenskaper.

4 Försök

Sättningsprogrammen GeoSuite och krypChalmers har gemensamt den basteori och de grundläggande, fysikaliska antaganden som ligger till grund för teorin gällande krypning enligt kapitel 2. Utifrån denna teori har det utvecklats olika modeller och sätt att hantera detta numeriskt, vilka borde ge liknande resultat. Det har emellertid visat sig att de i vissa avseenden skiljer sig åt. Eftersom GeoSuite tillämpar norsk praxis och bygger på beräkningsmodellen Krykon (se avsnitt 3.2.2), innebär det svårigheter med att implementera Chalmersmodellen i den redan befintliga modellen. Resultaten omgärdas av stor osäkerhet då kontrollen av de olika parametrarnas inverkan går förlorad vid den utökade komplexiteten av försöken. För att söka olikheterna programmen emellan och jämföra beräkningsresultaten i GeoSuite respektive krypChalmers, har ett antal beräkningsförsök genomförts. Analysen omfattar skillnader mellan programmen vad gäller sättningsutveckling, porövertrycksutjämning samt medelkonsolideringsgrad i ett antal beräkningsfall. För några fall har dessutom töjningen i jordprofilen jämförts. För att se hur resultaten blir för mer realistiska indata har tre verkliga fall beräknats med indata utifrån geotekniska undersökningar.

För att lättare se hur förändringar av indata påverkar resultaten har medvetet enkla profiler med konstanta parametrar med djupet valts (se Figur 4.1).



Figur 4.1 Principiell geometri och indata för beräkningar.

Försöken har räknats normalkonsoliderade samt för några fall med en överkonsolideringsgrad, OCR, eller med en konstant överkonsolidering. Kompressionsmodulerna, M_0, M_L och M', är identiska i samtliga fall, se Figur 4.1. M´ används inte i beräkningarna eftersom σ'_L inte uppnås i dessa försök, men anges ändå då den måste ges som indata till programmen. För enkelhetens skull har ingen hänsyn till grundvattennivå tagits i de enkla fallen, dvs. den har antagits till stort djup så att portrycket inte har någon inverkan på beräkningarna. Leran antas dock vara vattenmättad i samtliga fall. Indata för samtliga försök återges i bilaga 4 och för de försök som redovisas i arbetet beskrivs indata i tabellerna 4.2–4.5.

Tabell 4.1 Materialparametrar som är gemensamma för samtliga försök.

Materialparametrar:			
γ=17 kN/m^3	M_0=5 000 kPa	M_L=500 kPa	M´=100

Programmet krypChalmers begränsas av antalet element som väljs, t ex för 50 m djup kan endast 49 element användas, vilket i GeoSuite är för klent tilltaget och ger för detta program otydligare resultat. Detta har lösts genom att olika antal element använts i de olika programmen.

Försöken har räknats med djupet 5, 10 eller 50 meter för att se hur längden av dräneringsvägarna påverkar resultatet. Jordprofilen antas vara dubbeldränerad i samtliga fall. Permeabiliteten, k, har i de flesta försök valts till ett rimligt värde som kan förväntas för västsvenska leror, men för att kunna utvärdera känsligheten för variationer av denna viktiga parameter har också ett ovanligt lågt värde på k valts i kombination med olika djup. Lasten antas i samtliga fall vara konstant med djupet, dvs. inget beaktande av lastspridning.

Tabell 4.2 Urval av genomförda försök utan krypning .

Enkla försök utan krypning	***höjd* [m]**	***k* [m/s]**	***q* [kPa]**	**konsolidering**
Försök 1 (Ukryp1)	10	1,5e-9	20	NC
Försök 4 (Ukryp4)	50	1,5e-11	20	NC

Tabell 4.3 Urval av genomförda enkla försök med krypning.

Enkla försök med krypning	***höjd* [m]**	***k* [m/s]**	***q* [kPa]**	**konsolidering**	**b_0**	**b_1**	**r_0**	**r_1**
Försök 11 (krypR1)	50	1,5e-9	20	NC	0,7	1,1	800	250
Försök 5 (kryp1)	10	1,5e-9	20	NC	1	1,01	150	150
Försök 8 (kryp 4)	50	1,5e-11	20	NC	1	1,01	150	150
Försök 20 (kryp1_1kPa)	10	1,5e-9	1	NC	1	1,01	150	150
Försök 9 (kryp1_OC20)	50	1,5e-9	40	OC 20 kPa	1	1,01	150	150
Försök 10 (kryp1_OC10)	50	1,5e-9	40	OC 10 kPa	1	1,01	150	150

Tabell 4.4 Indata för ett urval av genomförda avancerade försök med krypning.

Avancerade försök med kryp	***höjd* [m]**	***k* [m/s]**	***q* [kPa]**	**konsolidering**
Försök R1	10	1,5e-9	20	NC

Indata till de verkliga försöken är omfattande och redovisas i bilaga 4, underlag har varit geotekniska undersökningar vilka finns redovisade i bilaga 3.

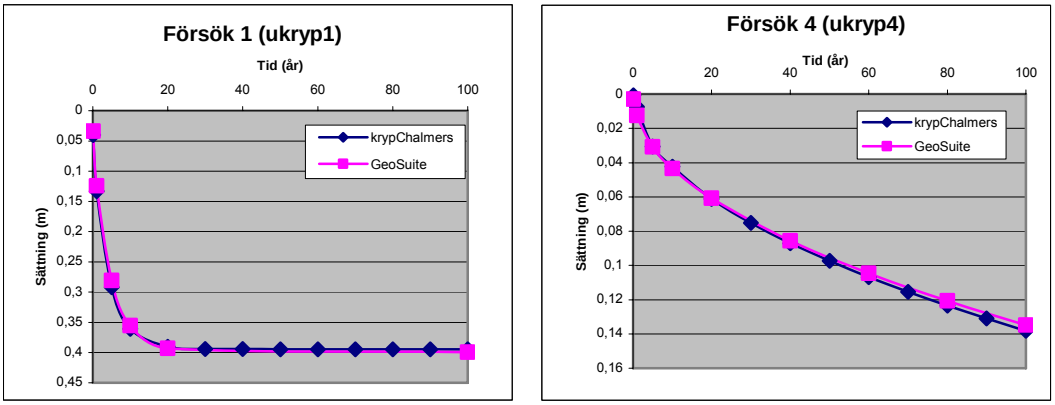
4.1 Enkla försök utan krypning

Fyra enkla fall utan krypeffekt med normalkonsoliderad lera beräknades för att verifiera att programmen överensstämmer för de enklaste fallen för klassisk konsolidering. Ytterligare ett försök utan krypeffekt genomfördes med överkonsolideringsgraden OCR=1,25. Nedan visas i tabell 4.6 indata som varieras för dessa fall och resultatet av dessa körningar. För detaljerad indata hänvisas till bilaga 4.

Tabell 4.5 Försök utan krypeffekter.

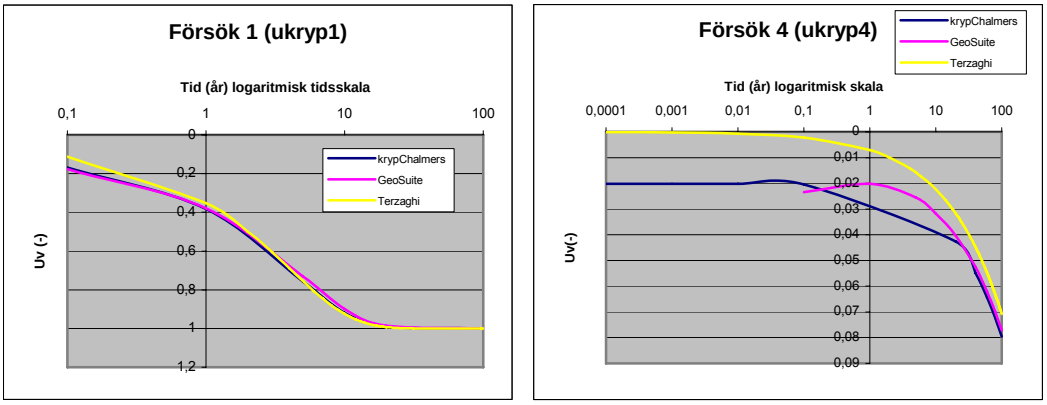
Försök	***höjd* [m]**	***k* [m/s]**	**Konsolidering**
Försök 1 (Ukryp1)	10	1,5e-9	NC
Försök 2 (Ukryp2)	10	1,5e-11	NC
Försök 3 (Ukryp3)	50	1,5e-9	NC
Försök 4 (Ukryp4)	50	1,5e-11	NC
Försök 20 R6-ukryp	10	1,0e-10	OCR=1,25

I Figur 4.2 redovisas i urval typiska resultat för samtliga försök utan krypning. Medelkonsolideringsgraden jämförs dessutom med Terzaghis analytiska lösning (se ekvation (2.5) – (2.7)) i figur 4.3. Porövertryck för försök 1 redovisas i Figur 4.4.



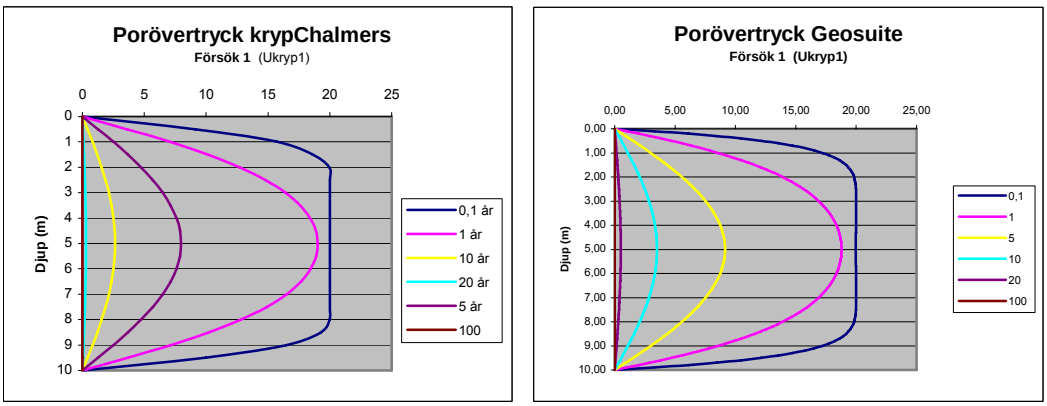
Figur 4.2 Sättningsutveckling i Försök 1 och Försök 4.

Skillnaden mellan Försök 1 och Försök 4 är profilhöjden, h=10 respektive h=50 m samt permeabiliteten, k=1,5e-9 respektive 1,5e-11 m/s.



Figur 4.3 Medelkonsolideringsgrad försök 1 och försök 4 (logaritmisk tidsskala).

Porövertrycken åskådliggörs i Figur 4.4 för Försök 1. Motsvarande för Försök 4 ger liknande resultat.



Figur 4.4 Jämförelse av porövertryck i Försök 1.

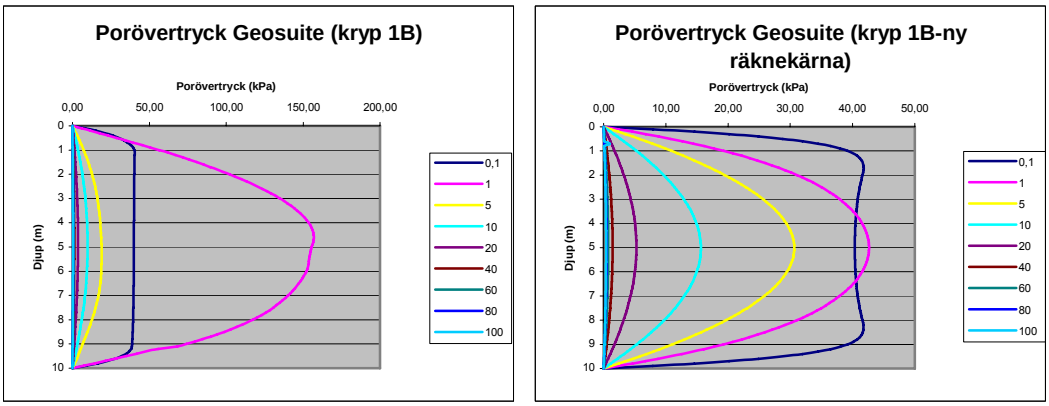
4.1.1 Resultat utan krypning

Samtliga försök visar mycket god överensstämmelse, vilket bekräftar att den klassiska konsolideringsmodellen är korrekt implementerad i båda programmen.

Medelkonsolideringsgraden skiljer sig från den analytiska i fall *utan kryp 4*. Detta har troligtvis en beräkningsteknisk orsak. Stora tidssteg i krypprogrammen ger en större konsolidering än den analytiska lösningen i inledningen av förloppet, vilket troligtvis är anledningen till de högre medelkonsolideringsgraderna.

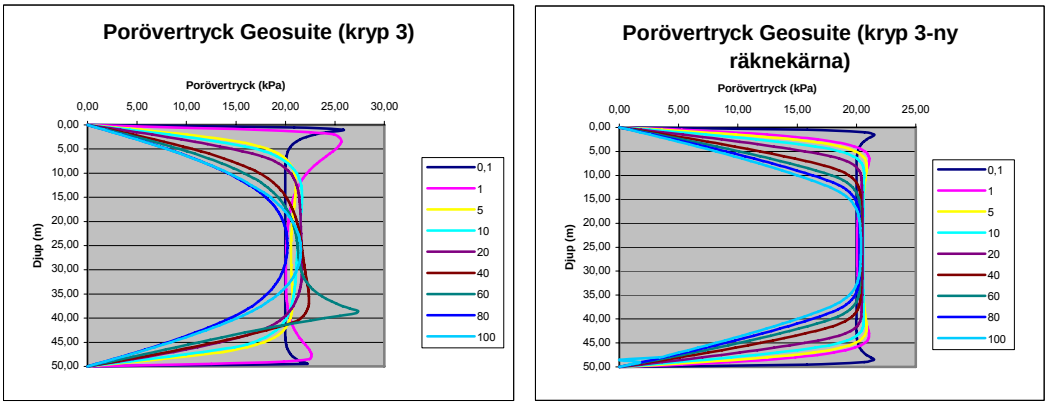
4.2 Försök med krypning

I en tidig version av GeoSuite genererades stora porövertryck för att möjliggöra den förväntade krypeffekten. Figur 4.5 visar att i GeoSuite genererades ett porövertryck som var 120 kPa större än den pålagda lasten, vilket är fysikaliskt orimligt.



Figur 4.5 Porövertryck i föregående respektive ny räknekärna för "kryp1B". Observera att tryckskalorna är skilda i de båda figurerna.

Under arbetets gång uppgraderades räknekärnan i GeoSuite där det tidigare problemet med skenande porövertryck begränsades (se Figur 4.6).



Figur 4.6 Porövertryck i föregående respektive ny räknekärna för Försök 7 (kryp3).

Flera försök har räknats med hänsyn till krypeffekter. För att se hur programmen hanterar skiftande parametrar har last, överkonsolideringsgrad, permeabilitet, djup och tidsmotståndstal varierats i de olika fallen. Tidsmotståndstalet, r_s, har dels hållits konstant, dels varierats med spänningsnivån.

4.2.1 Enkla försök med krypning

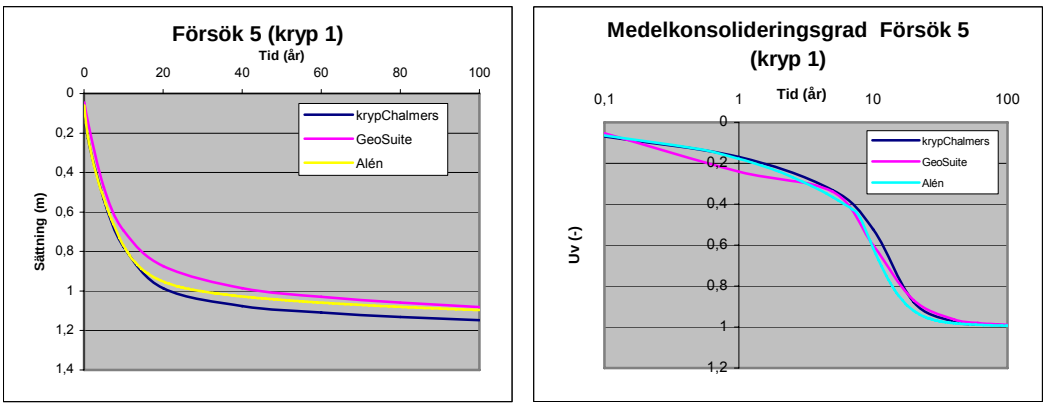
Nedan redovisas i urval ett representativt fall av försök 4–8 (*kryp1–4)*, där tidsmotståndstalet hållits konstant. Försök *kryp 1 - 4* har samma parametrar som försöken *utan kryp 1 – 4*, men med krypeffekt i form av ett konstant tidsmotståndstal.

Utförlig beskrivning av indata och resultat för samtliga försök redovisas i bilaga 4 respektive 5.

Typexempel enkla försök med konstant krypparameter (Försök 5, kryp 1):			
q=10 [kPa]	r_0=150	b_0=1	
k=1,5e-9 [m/s]	r_1=150	b_1=1,01	NC

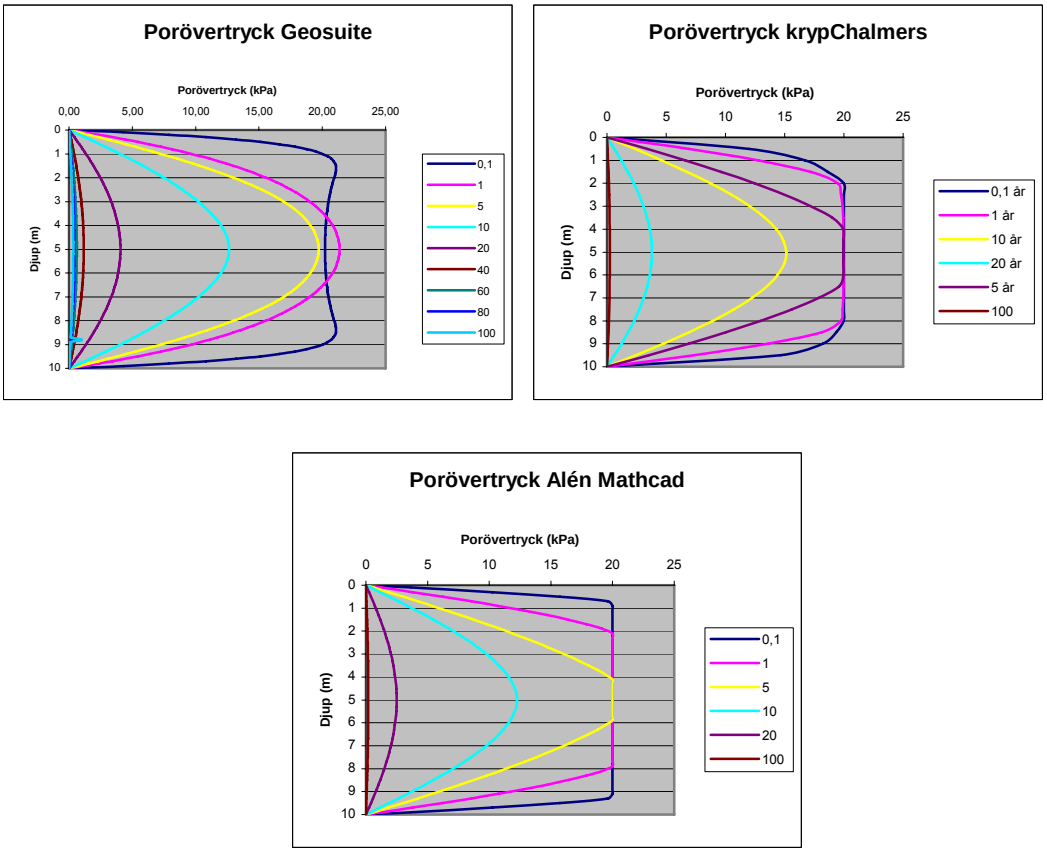
4.2.1.1 Jämförelse med Aléns modell

Försök 5–8 *(kryp 1-4)*, har jämförts med Aléns modell i Mathcad (CTH-prototyp), med avseende på sättning och medelkonsolideringsgrad, se Figur 4.7. Jämförelsen visar att resultaten i Aléns modell varierar mellan resultaten i GeoSuite respektive krypChalmers vad gäller sättning och medelkonsolideringsgrad. Detta visar att båda programmen avviker från Aléns modell. Det finns därför anledning att misstänka att båda programmen innehåller skillnader i hanteringen av modellen, vilka bör utredas noggrannare.



Figur 4.7 Sättningsutveckling och medelkonsolideringsgrad för Försök 5 (kryp 1).

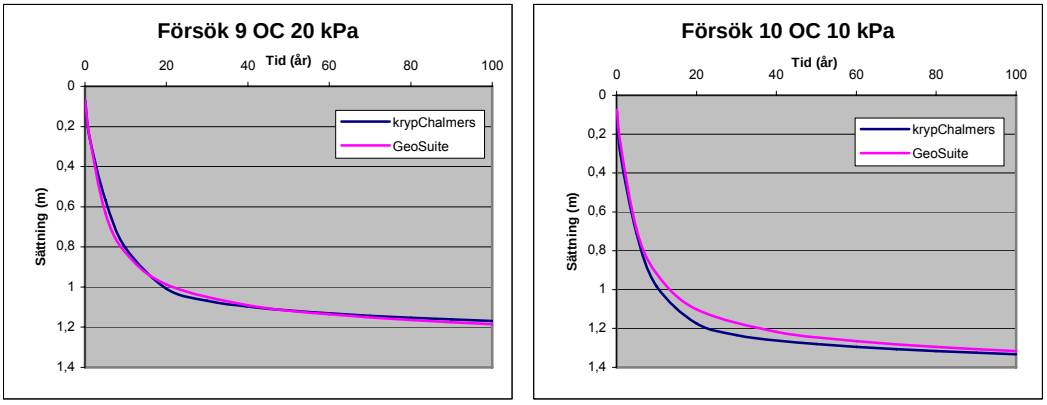
Även porövertrycken för GeoSuite, krypChalmers och Aléns modell i Mathcad har jämförts och redovisas i Figur 4.8.



Figur 4.8 Porövertryck GeoSuite, krypChalmers och Aléns modell i försök 5 (kryp1).

4.2.1.2 Överkonsolidering

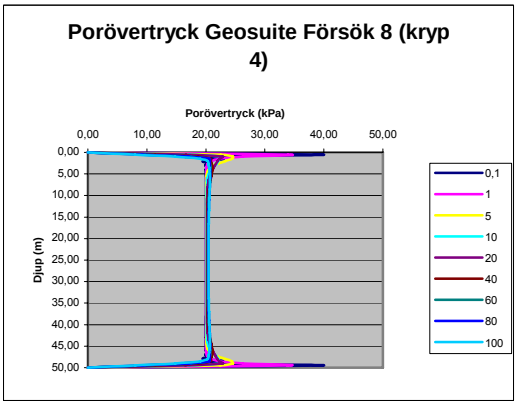
Försök 5 *(kryp1)* kördes också som överkonsoliderad med 10 respektive 20 kPa (försök 9 respektive 10), se Figur 4.9. En högre överkonsolideringsgrad betyder att en mindre sättning utvecklas eftersom en större del av tillskottsspänningen fördelas på den momentana och elastiska deformationen och en mindre andel av den totala sättningen utgörs av den plastiska deformationen och tillhörande krypsättning. Resultaten uppvisar här mindre skillnad mellan programmen vilket är rimligt då krypandelen minskar med ökande överkonsolidering.



Figur 4.9 Sättning för olika överkonsolideringsgrad, försök 9 och 10.

4.2.1.3 Försök med låg permeabilitet

Vid mycket låg permeabilitet och långa dräneringsvägar, enligt exempelvis Försök 8 (kryp 4), fås i GeoSuite en mycket kraftig portryckshöjning i ränderna, dvs. i överkant och underkant av beräkningsprofilen (se Figur 4.10). Detta beror troligen på en begränsning i programmets räknekärna, vilket leder till orimliga resultat. Medelkonsolideringsgraden skiljer sig kraftigt mellan programmen i detta fall men sättningsutvecklingen skiljer sig däremot betydligt mindre. Av portrycksprofilerna, se bilaga 5, ses att praktiskt taget ingen utjämning av porövertrycket sker i GeoSuite och därmed utvecklas ingen nämnvärd konsolideringssättning. Krypandelen av sättningen i GeoSuite bör därför vara orimligt hög i detta fall.



Figur 4.10 Kraftig portryckshöjning i ränderna.

Skillnaderna i sättningsutveckling och portrycksutjämning visar tydligt att hanteringen av krypeffekter skiljer sig mellan programmen. Det visar på komplexiteten i beräkningsmodellen och att det finns olika metoder att skapa en numerisk beräkningsmodell av den.

4.2.1.4 Krypning med mycket liten last

Med en mycket liten last, 1 kPa, uppnås en sättning på 0,48 meter efter hundra år i båda programmen, något som inte är rimligt. Det behövs alltså en begränsning mot krypning vid låga tillskottspänningar, vilket kan kompenseras genom att ändra referenstiden. Vid vilken spänningsnivå denna gräns bör sättas är dock oklart och användaren bör göras uppmärksam på begränsningen vid användning av små laster.

4.2.2 Resultat från enkla krypförsök

Resultatet för Försök 5 *(kryp1)* representerar resultatet för samtliga av de enkla krypförsöken där sättningsutvecklingen sker snabbare i krypChalmers än i GeoSuite. Porövertrycken utjämnas fortare i krypChalmers vilket kan vara den tänkbara anledningen till den snabbare sättningsutvecklingen i det här fallet.

I fall Kryp1 OC=20, överensstämmer sättningen över tiden och medelkonsolideringsgraden efter 10 år och framåt. Portrycksutjämningen avviker däremot kraftigt mellan programmen. Detta visar också att det finns en markant skillnad i hur de båda programmen hanterar kryptillskottet och tillhörande portrycksökning, trots att slutsättningen i detta fall är identisk.

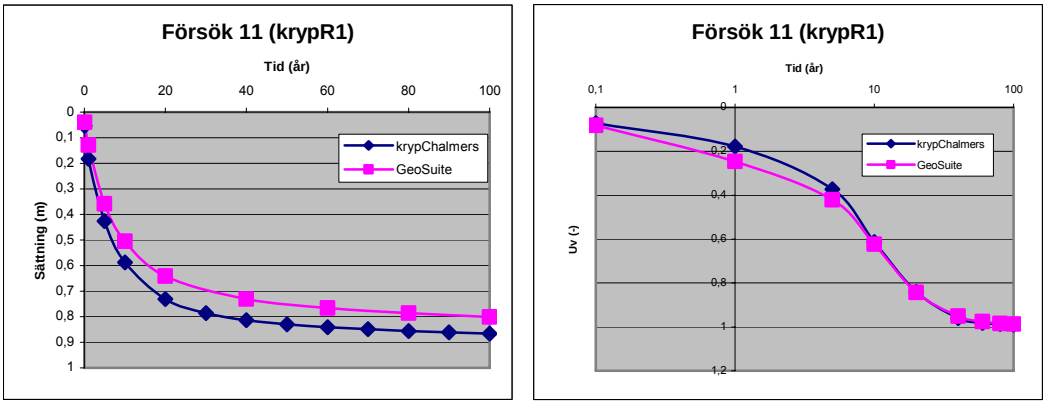
I fall kryp 1 OC=10 skiljer sig sättningsutvecklingen något, men slutsättningen är den samma. Medelkonsolideringen är lika efter 10 år och framåt.

4.2.3 Mer avancerade försök

I några försök har tidsmotståndstalet varierats med spänningsnivån till skillnad från att i enkla försök varit konstant.

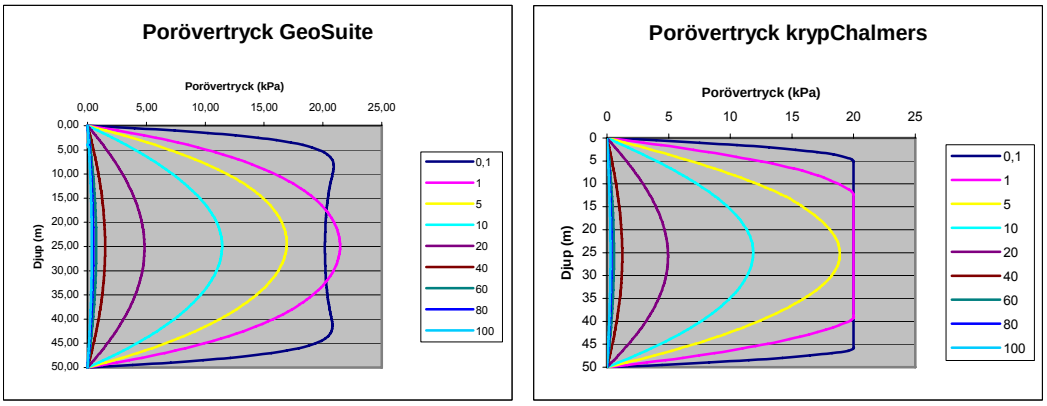
Typexempel mer avancerade försök med varierande krypparametrar (Försök 11, krypR1):			
q=20 [kPa]	r_0=800	b_0=0,7	
k=1,5e-9 [m/s]	r_1=250	b_1=1,1	NC

Beräkning av dessa indata i GeoSuite och krypChalmers gav sättning och medelkonsolideringsgrad enligt Figur 4.11.



Figur 4.11 Sättningsutveckling och medelkonsolideringsgrad för försök 11 (krypR1)

Även porövertrycken har jämförts och redovisas nedan i Figur 4.12 .



Figur 4.12 Porövertryck GeoSuite och krypChalmers i försök 11 (kryp R1).

4.2.3.1 Resultat av mer avancerade försök

Som Figur 4.11 visar skiljer sig sättningsutvecklingen mellan GeoSuite och krypChalmers. Slutsättningen är större i krypChalmers vilket är typiskt för näst intill samtliga försök. Medelkonsolideringsgraden är däremot i det närmaste identisk över tiden. Detta trots att beräkningen visar att portrycksutjämningen skiljer sig mellan programmen de första fem åren (se Figur 4.12). Det genomsnittliga porövertrycket över hela profilen bör dock vara lika eftersom medelkonsolideringsgraden är lika. Även detta indikerar att det finns en skillnad i hur programmen hanterar kryptillskottet och tillhörande portryckshöjning i beräkningsstegen.

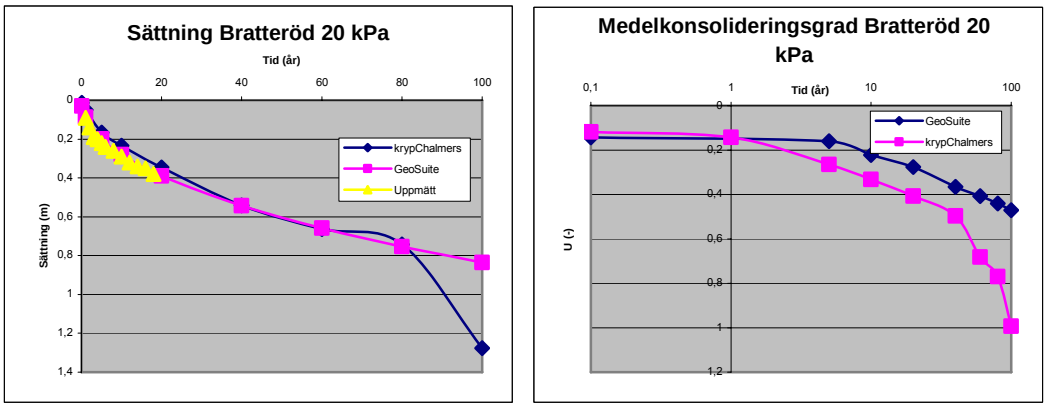
4.2.4 Verkliga försök av större komplexitet

Tre försök har genomförts med indata från verkliga fall; Bratteröd, Lilla Mellösa och Änggården, efter Claesson (2003). Indata är parametrar från geotekniska undersökningar vid respektive plats, se bilaga 3.

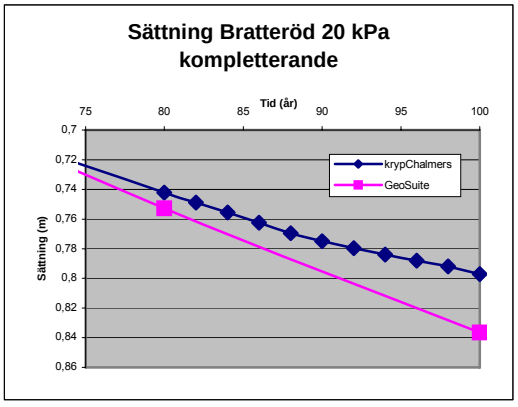
4.2.4.1 Resultat av verkliga försök,

Bratteröd

Resultaten varierar i de olika fallen. För fallet Bratteröd är sättningsutvecklingen mycket väl överrensstämmande i GeoSuite och krypChalmers för de första 80 åren (se Figur 4.13). Inom denna tid följs programmen åt vad gäller medelkonsolideringsgraden. Dock med en förskjutning, vilket innebär att en större andel av sättningarna i krypChalmers beror av krypdeformation, än för GeoSuite (se Figur 4.13). Mellan 80 och 100 år sker en orimligt stor sättning i krypChalmers. För att undersöka detta närmare gjordes en kompletterande beräkning med tätare redovisningstider mellan 80 och 100 år, se Figur 4.14. Reultatet uppvisar då en betydligt mindre sättningsskillnad, endast 4 cm. Detta tyder på en bugg i krypChalmers. Verklig sättning är uppmätt i fält under 20 år och för denna tid är överensstämmelsen mycket god med både GeoSuite och krypChalmers.



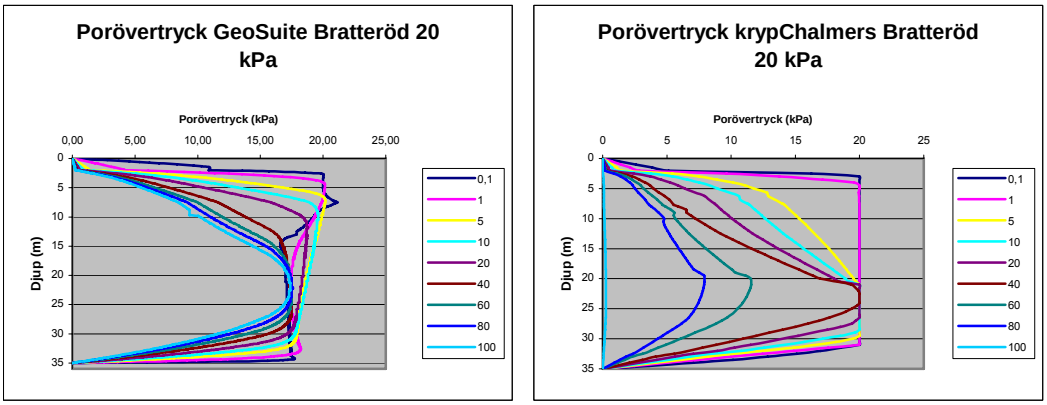
Figur 4.13 Jämförelse sättning och medelkonsolideringsgrad i krypChalmers och GeoSuite för försöksområde Bratteröd.



Figur 4.14 Bratteröd med tätare redovisningstider. Observera skalorna.

Porövertrycksutjämningen skiljer sig åt i modellerna både tidsmässigt och med djupet för de olika fallen (se Figur 4.15). I KrypChalmers är nära allt porövertryck utjämnat efter 100 år vilket inte motsvaras av resultaten i GeoSuite som ses i figurerna nedan. I djupled tenderar utjämningen för krypChalmers att ske från botten och upp och i

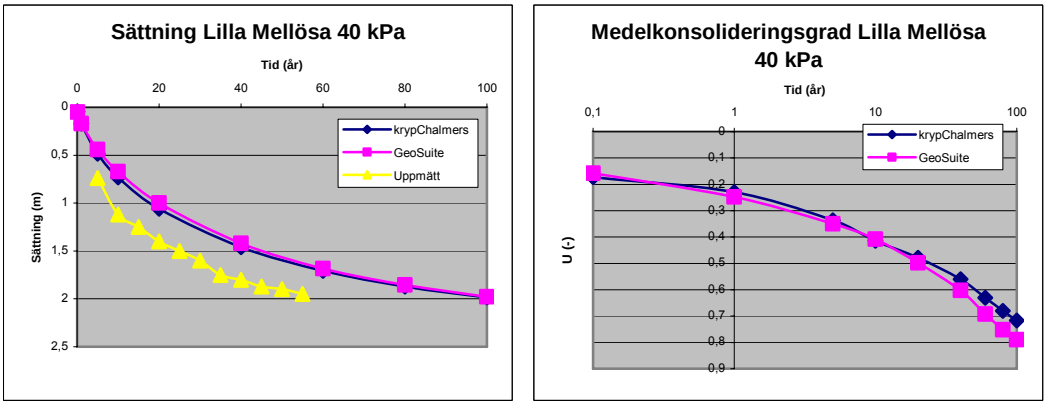
GeoSuite sker raka motsatsen. Detta är anmärkningsvärt och någon rimlig förklaring är svår att se.



Figur 4.15 Porövertryck i GeoSuite och krypChalmers.

Lilla Mellösa

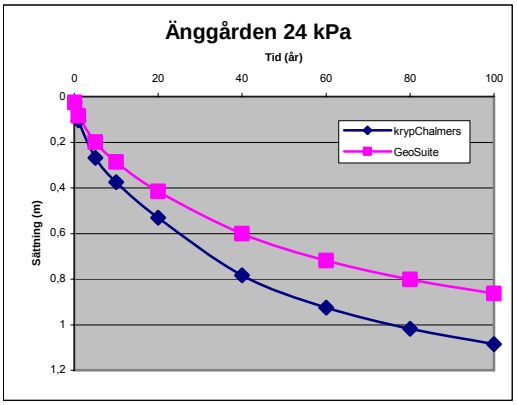
I fallet Lilla Mellösa (se Figur 4.16) är sättningsutvecklingen i princip identisk i de båda programmen. Även medelkonsolideringsgraden är mycket väl överensstämmande. Verklig sättning uppmätt i fält har utvecklats snabbare än beräkningen vilket troligen beror utvärderingen av indata.



Figur 4.16 Sättning och medelkonsolideringsgrad i krypChalmers och GeoSuite för försöksområde Lilla Mellösa.

Änggården

För försöksområde Änggården (se Figur 4.17) visar resultatet på en tydlig trend där sättningskurvorna följs åt men där sättningen i KrypChalmers utvecklas snabbare. Efter 100 år ger detta en sättningsskillnad mellan programmen på 0,3 m.



Figur 4.17 Jämförelse sättning i KrypChalmers och GeoSuite för försöksområde Änggården.

5 Slutsats

Det ursprungliga syftet var att genomföra ett större antal försök även för mer komplexa indata. Att räknekärnan uppgraderades efter halva tiden resulterade i att samtliga försök fick räknas om. Problemet med skillnaderna programmen emellan visade sig vara större än väntat, vilket visade sig i spretiga och inte helt entydiga resultat. Av dessa anledningar värderades examensarbetets omfattning om, för att kunna ge svar på den ursprungliga frågeställningen:

Är Chalmersmodellen korrekt implementerad i GeoSuite?

Utifrån de körningar av enkla fall som genomförts kan konstateras att skillnaderna programmen emellan är inom rimliga gränser och att sättningsutvecklingen i de flesta fall följer samma trend mellan programmen. GeoSuite verkar klart användbart i dessa fall. För mer extrema fall blir skillnaderna i resultat för stora och vidare utredning krävs för att belysa skillnaderna och orsakerna till dessa i hanteringen av olika parametrar. Det finns ett flertal sannolika orsaker till skillnaderna i resultaten enligt följande:

- Komplex krypningsmodell

Eftersom programmen och då framförallt GeoSuite är svåråtkomligt då inga källkoder fanns att tillgå och programmen sinsemellan visar tydliga skillnader i den numeriska hanteringen, finns det svårigheter i att se hur väl implementerad Chalmersmodellen är. För de verkliga fallen finns en överrensstämmelse med de sättningsresultat som Claesson erhållit i sin avhandling från 2003, vilket talar för att skillnaderna inte är orimligt stora. Ser man till porövertryck och andra resultat av beräkningarna ger de en lite annorlunda bild. De behandlas inte lika i programmen vilket kan ha betydelse i komplexare fall. För enkla fall kan man se att skillnaderna i porövertryck inte är så stora att de har någon större betydelse och sättningarna är inom samma härad. Medelkonsolideringsgraden visar att de olika programmen hanterar krypandelen på olika sätt då andelen krypsättningar är större i de fall där porövertrycket inte är utjämnat lika mycket som för motsvarande körning i det andra programmet.

- Hanteringen av porövertryck

Vad gäller portryckshanteringen verkar uppgraderingen av räknekärnan ta tagit bort udden av problemet, men vid låg permeabilitet kvarstår ändå problemen med orimligt stora porövertryck i GeoSuite. I krypChalmers uppnås inte dessa höga värden men det beror framförallt på att en begränsning lagts in där porövertrycket inte kan överstiga lasten. Det syns tydligt i figurerna att kurvorna får ett närmast avklippt utseende och inga jämna övergångar som kan förväntas i verkligheten.

- Tidssteg

Hanteringen av tidsstegen i de olika programmen skiljer sig åt. Vid för stora tidssteg minskar noggrannheten i resultaten och sättningsförloppet ger inledningsvis ett stort hopp vilket inte stämmer med den analytiska lösningen och det verkliga förloppet. Det finns även begränsningar med för små tidssteg, då körningarna tar lång tid och i krypChalmers fungerar det inte alls för tillräckligt låga värden.

- Referenstiden

Referenstiden utgör endast en problematik då väldigt små laster simuleras i programmen. Dessa små laster används troligen inte vid normala förfaranden och detta skapar därför inte heller några problem vid vanlig användning. Men om detta trots allt sker, bör programmen utvecklas mot en minskad känslighet för ändring av denna parameter eller ge hänvisning om vilka värden som kan vara lämpliga inom vissa lastvariationer.

- Osäkerhet i hanteringen av parametrar

Det finns en osäkerhet i hur GeoSuite hanterar exempelvis permeabiliteten då programmet använder en annan materialmodell än svensk praxis. Vidare är det oklart hur porositeten används i beräkningarna i GeoSuite. Detta är ytterligare faktorer som kan påverka de skillnader som observerats i resultaten.

Begränsningen i hur elementen kan väljas har utgjort en skillnad i indata mellan programmen, men har inte påverkat resultaten för försöken utan krypning och borde därför inte heller påverka försöken med krypning.

Det kan konstateras att Chalmers-modellen är komplex och att det finns olika sätt att hantera den för att skapa en numerisk beräkningsmodell, vilket visas i skillnaderna i resultaten. Vidare bygger GeoSuites sättningsprogram på den norska modellen Krykon, vilken troligtvis utgjort en grund till programmet som sedan anpassats till Chalmers-modellen. Resultaten visar att det finns tydliga svårigheter med att implementera modeller i redan befintliga program.

Sättningsutvecklingen styrs dock alltid ytterst av permeabiliteten eftersom motsvarande vattenmängd måste strömma ut ur jorden för att sättningen skall kunna uppstå. En noggrant utvärderad permeabilitet är därför en förutsättning för att erhålla rimliga beräkningsresultat. Vad som slutligen är intressant att utreda är inte vilket program som ger resultat närmast Chalmersmodellen, utan vilket program som ger resultat närmast verkligheten, vilket dock ligger utanför ramen av detta arbete.

6 FÖRSLAG PÅ VIDARE STUDIER

För att kunna utreda skillnaderna mellan programmen noggrannare krävs en fördjupad analys av ingående parametrars inverkan. Dessutom bör en djupare analys av den hydrauliska gradienten genomföras då den för det berörda användningsområdet, lösa leror, har ett ännu okänt beteende.

6.1 Parameterstudie och känslighetsanalys

För en praktisk användning av beräkningar med hänsyn till krypsättningar krävs en vidare förståelse för hur krypparametrarna påverkar resultatet och vilka värden som är rimliga för typiska svenska leror samt hur krypparametrarna på ett enkelt sätt kan utvärderas vid rutinmässiga laboratorieundersökningar. Vidare krävs en studie av hur variationer i parametrarna påverkar beräkningsresultatet.

6.2 Begränsning i Darcys lag

Darcys lag beskriver strömningshastigheten som beror av permeabiliteten och den hydrauliska gradienten i mediet. Förutom att strömningen i mediet måste vara laminär, finns ytterligare en begränsning vid mycket låga gradienter, vilket förekommer i lera (Hansbo 1960). I beräkningar används traditionellt uttrycket:

$$v = -k \cdot i$$

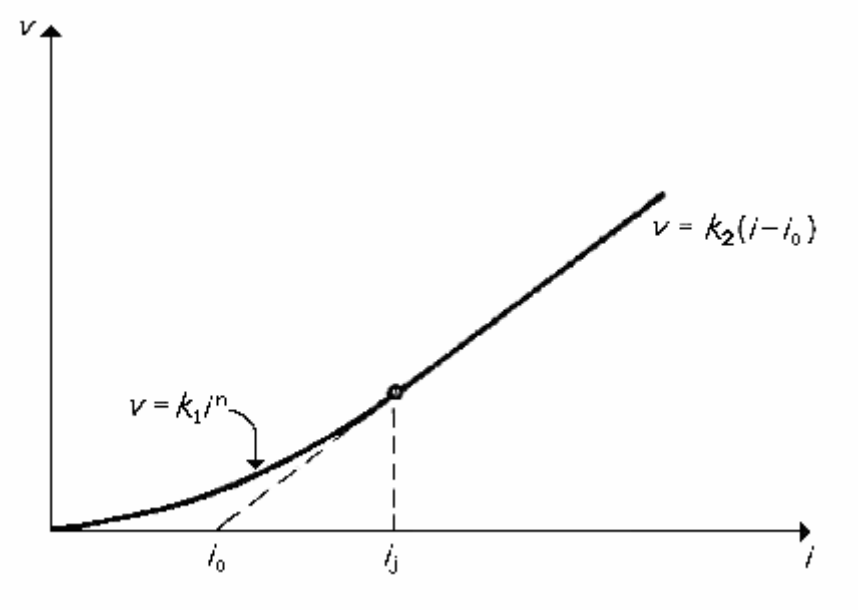
Där v = q/A =hastigheten av det strömmande mediet [m/s]

k = hydraulisk konduktivitet [m/s]

i = hydraulisk gradient [-]

Minustecknet är en konvention för att den hydrauliska gradienten är negativ i den positiva flödesriktningen.

Detta är troligtvis inte ett korrekt antagande vid de låga värden på gradienten som förekommer i lera (se Figur 6.1), varför det finns anledning att vidare utreda detta för att kunna optimera sättningsförloppet noggrannare.



Figur 6.1 Observerad avvikelse från Darcys lag vid strömning i lera (Hansbo, 1960).

7 Referenser

Alén, C. (1998): *On Probability in Geotechnics*. Volume 1, 2, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg

Bjerrum, L. (1967): Engineering Geology of Norweigan Normally-consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings, The 7th Rankine Lecture, *Geotechnique* Vol 17, No 2, pp 81-118

Christensen, S. (1995): *Long-term Processes in Geomaterials, Creep parameters from oedometer test on illitic clays,* Report STF69 A95025, SINTEF, Trondheim

Claesson, P. (2003): *Long Term Settlements in Soft Clays*. Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg

Hansbo, S. (1960): *Consolidation of Clay with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains.* Swedish Geotechnical Institute Proceeding No. 18, Stockholm

Hansbo, S. (1975): Jordmateriallära, AWE Gebers Stockholm, AB Jacobson & Widmark, Lidingö

Janbu, N. (1969): The resistence concept applied to deformations of soils. *The 7th Int. conference on soil mechanics and foundation engineering,* Mexico, pp. 191-196.

Larsson, R., Bengtsson, P-E., Eriksson, L. (1994): *Sättningsprognoser för bankar på lös finkornig jord*. Information 13, Statens Geotekniska Institut, Linköping

Terzaghi, K. (1923): Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamishen Spannungserscheinungen. Akademie der Wisenschaften in Wien. *Matematisch-Naturwissenschaftliche Klasse.* Seitungberichte. Abteilung IIa Vol. 132, No ¾, pp. 125-138.

Terzaghi, K., & Fröhlich, O.K. (1936): Theorie der Setzung von Tonschichten, Report Vienna: Deuticke.

Terzaghi, K. (1943): Theoretical Soil Mechanics, 7th printing 1954, John Wiley & Sons, Inc, New York, Cambridge, Massachusetts.

Šuklje, L. (1957): The Analysis of the Consolidation Process by the Isotaches Method. *Proc. Of the fourth Int. Con. On Soil Mechanics and Foundation Engineering,* London, pp. 200-206

Svanø, G., Christensen, S., Nordahl, S. (1991): A soil model for consolidation and creep. *Proceeding of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Florens, pp. 269-272

Svensson, Fredrik. (2000): *Långtidsdeformationer i lera-utvärdering och analys av kryprelaterade parametrar för lera utifrån laboratorieförsök.* Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

Sällfors, G. (1975): *Proconsolidation Pressure of Soft, High-plastic Clays,* Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg

Sällfors, G. (2001): Geoteknik, Jordmateriallära – Jordmekanik, 3:e upplagan, Göteborg

Appendix

Härledning av kryptöjningens differentialekvation	**Bilaga 1**
Härledning av villkor för begränsning av portrycksutjämning	**Bilaga 2**
Underlag från geotekniska undersökningar för verkliga fall	**Bilaga 3**
Indata för samtliga beräkningar	**Bilaga 4**
Samtliga beräkningsresultat	**Bilaga 5**

A: Töjningshastigheten är proportionell mot höjdändringen av ett jordelement under ett tidssteg och styrs av Darcys lag:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{v}{\Delta z} = -\frac{ki}{\Delta z} = -\frac{k \cdot \frac{\Delta u}{\gamma_w \Delta z}}{\Delta z} = -\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

B: Totalspänningen är hela tiden konstant och ökningen av effektivspänning motsvaras av minskningen i porövertryck i takt med att porvattnet strömmar ut:

$$\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} = \frac{\Delta \sigma'}{\mathrm{M}} = -\frac{\Delta u}{\mathrm{M}}$$

och för ett tidssteg:

$$\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} = -\frac{1}{\mathrm{M}} \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

C: Kryptöjningen beror av den tid som förflutit sedan pålastning enligt:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial \ln(t)} \cdot \frac{\partial \ln(t)}{\partial t} = \frac{1}{r \cdot t}$$

Eftersom origo aldrig nås i en logaritmisk skala behöver en referenspunkt införas där töjningen är känd (se figur 2.11):

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial \ln(t)} = 1/r \rightarrow \varepsilon_{cr} = \ln(t)/r + C = \ln(t + t_r)/r$$

t kan ses som den tid som förflutit sedan lastökningen och $t+t_r$ motsvarar den totala tiden. Det ger kryptöjningen som:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{1}{r \cdot (t + t_r)}$$

Den totala töjningen ges slutligen av summan av den elastisk plastiska töjningen och kryptöjningen:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_{cr}$$

och för ett tidssteg:

$$-\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} = -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t}$$

varför

$$\frac{1}{\mathrm{M}}\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{1}{r \cdot (t + t_r)}$$

Om k och γ_w är konstanta med djupet kan ekvation x skrivas:

$$\frac{1}{\mathrm{M}}\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r \cdot (t + t_r)}$$

vilken överensstämmer med Terzaghis lösning där kryptillskottet är exkluderat.

Härledning av villkor för begränsning av portrycksutjämning:

$$\varepsilon_{cr} = \int_{t_r}^{t+t_r} \frac{1}{r \cdot x} dx = \frac{1}{r} \cdot \ln(\frac{t+t_r}{t_r})$$

Kombineras ekvationerna (3.13) och (3.14) erhålls:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{1}{r} \cdot \ln(\frac{t+t_r}{t_r}) = \frac{1}{r} \cdot \ln(\frac{r \cdot (t+t_r}{r \cdot t_r}) = \frac{1}{r} \cdot \ln(\frac{R}{R_r})$$

Villkoret för töjning kan nu skrivas:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \min \begin{cases} \frac{1}{R} \\ -\frac{\partial}{\partial z}(\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z}) \end{cases}$$

respektive

$$\frac{1}{M}\frac{\partial u}{\partial t} = \max \begin{cases} 0 \\ \frac{\partial}{\partial z}(\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{1}{R} \end{cases}$$

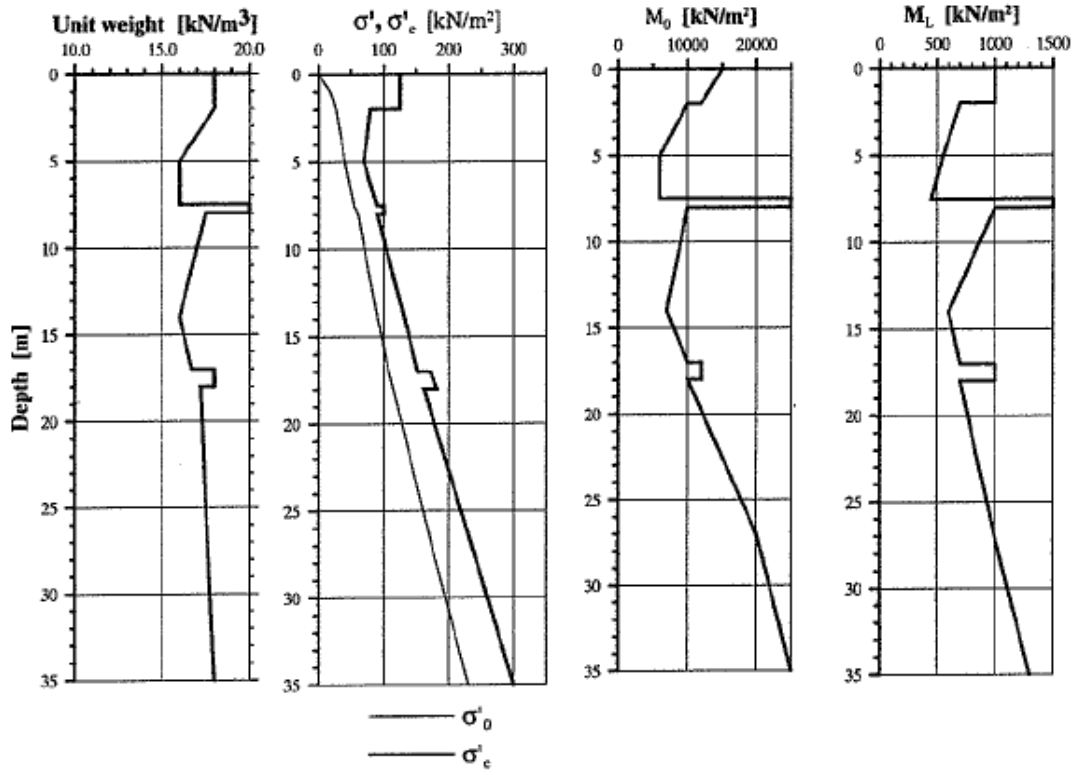
Om k och γ_w är konstanta kan villkoret skrivas:

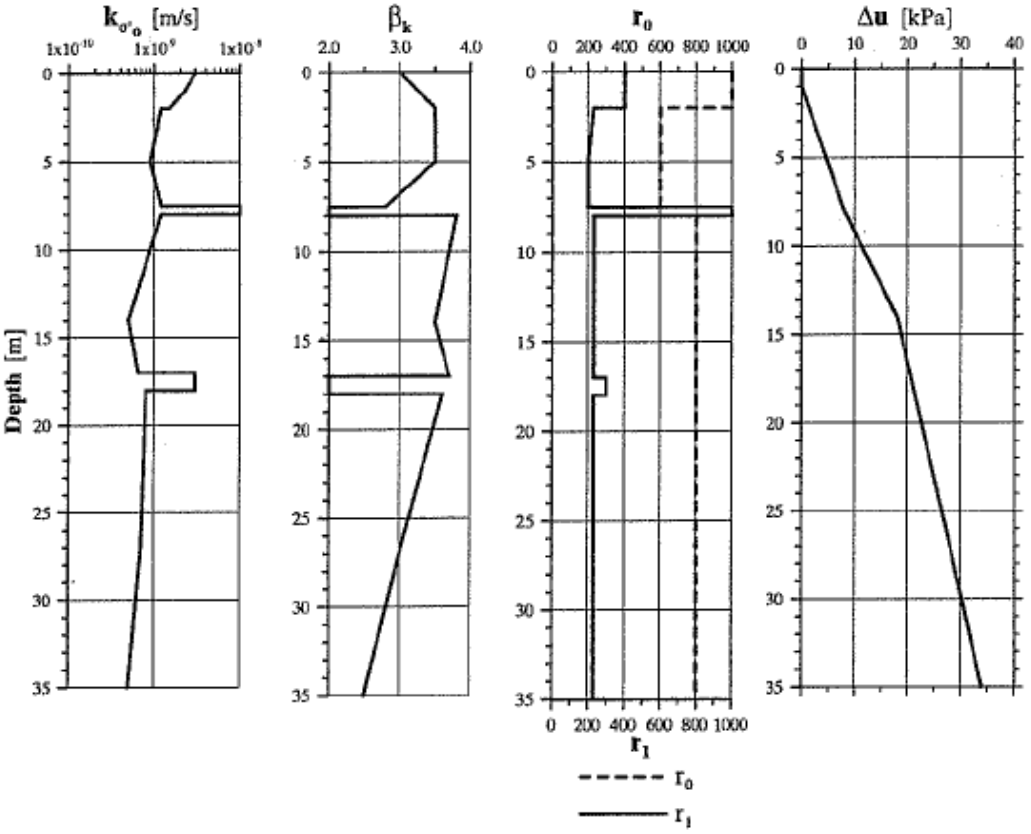
$$\frac{1}{M}\frac{\partial u}{\partial t} = \max \begin{cases} 0 \\ \frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{R} \end{cases}$$

R kan vidare uttryckas som:

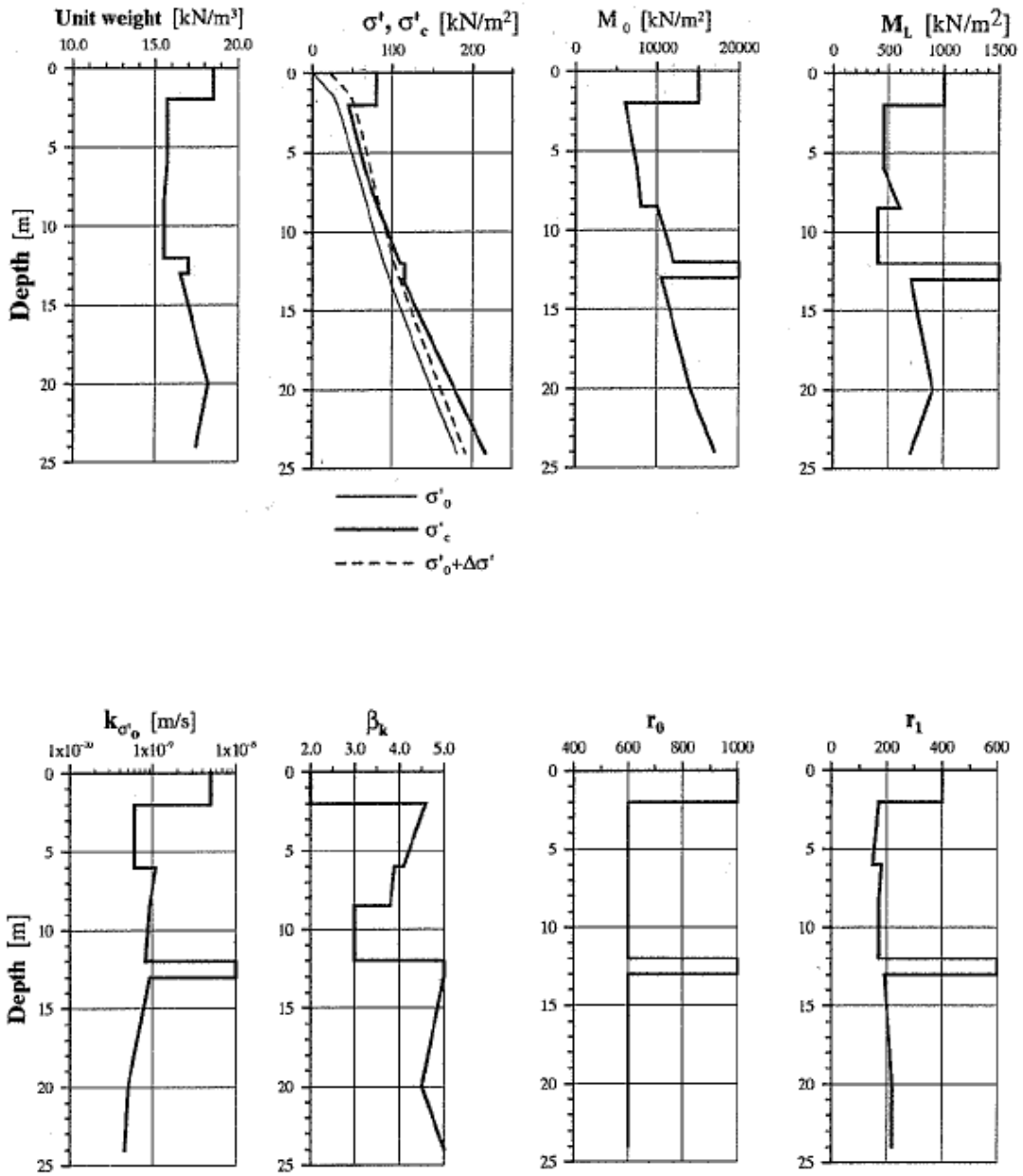
$$R = R_r \cdot e^{r \cdot \varepsilon_{cr}} = r \cdot t_r \cdot e^{r \cdot \varepsilon_{cr}}$$

Bratteröd:

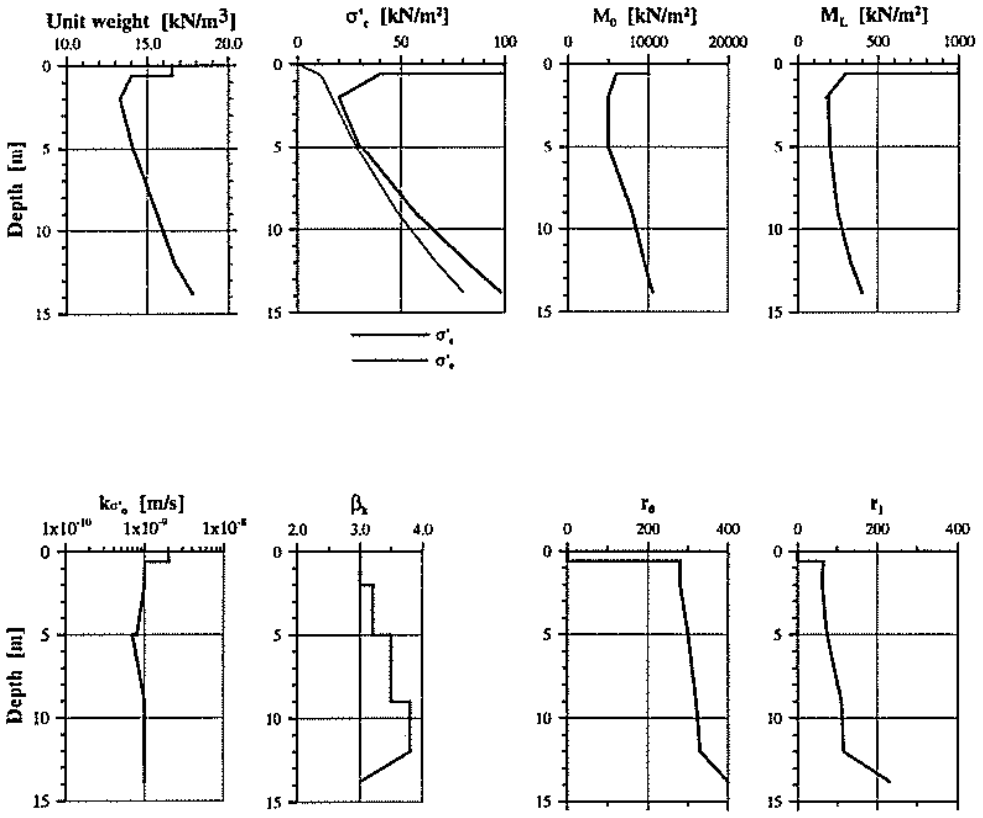

Unit weight [kN/m3]
10.0
15.0
20.0
σ', σ'c [kN/m²]
0
100
200
300
M0 [kN/m²]
0
10000
20000
ML [kN/m²]
0
500
1000
1500
Depth [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
σ'0
σ'c


kσ'0 [m/s]
1x10-10
1x10-9
1x10-8
βk
2.0
3.0
4.0
r0
0
200
400
600
800
1000
Δu [kPa]
0
10
20
30
40
Depth [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
rI
r0
rI

Änggården:


Unit weight [kN/m³]
10.0 15.0 20.0
σ', σ'c [kN/m²]
0 100 200
M0 [kN/m²]
0 10000 20000
ML [kN/m²]
0 500 1000 1500
Depth [m]
0 5 10 15 20 25
σ'0
σ'c
σ'0+Δσ'
kσ'0 [m/s]
1x10⁻¹⁰ 1x10⁻⁹ 1x10⁻⁸
βk
2.0 3.0 4.0 5.0
r0
400 600 800 1000
r1
0 200 400 600

Lilla Mellösa:



Indata som godtyckligt valts för att representera rimliga värden i enkla till mer avancerade fall i beräkningsprogrammen KrypCTH och GeoSuite, vilka sedan varieras för de olika försöken.

Indata				
KrypCTH			GeoSuite	
Tjocklek		10	Soil model	Without creep
Antal element		10	permeabily model	log-based tension
Utbredd last			load streswses	20
Last		20	pore pressure	0
Tunghet		17	sublayers	100
SigmaC	ök	0,1	djup	10
	uk	170	tunghet	17
SigmaL	ök	200	n	0,75
	uk	200	M0	5000
M0		5000	ML	500
ML		500	M´	100
M´		100	a0	0,8
a0		0,8	a1	1
a1		1	SigmaC	ök 0,1
k0		1,50E-09		uk 170
Betak		0	SigmL	ök 200
r0		0		uk 200
r1		0	t_ref	-0,0027
b0		0	r0	0
b1		0	r1	0
referenstid		-1	b0	0
dubbeldränering			b1	0
djup GVY		10	k_ref	0,047304
hydrostatiskt			e_ref	0
sluttid dagar		36500	C_eps	1
antal redovsningstider		10		

Varierande Indata till samtliga enkla och mer avancerade försök.

Parametrar	h	q	σ´c	a0	a1	b0	b1	r0	r1	k0	β	Mo
Försök	[m]	[kNm/m3]	[kPa] uk/ök	[-] uk/ök	[-] uk/ök	[-] uk/ök	[-] uk/ök	[-] uk/ök	[-] uk/ök	[m/s] uk/ök	[-]	[kPa]
1 *) (utankryp1)	10	20	0,1 170	0,8	1	0	0	0	0	1,50E-09	0	
2 (utankryp2)										1,50E-11		
3 (utankryp3)	50									1,50E-09		
4 (utankryp4)	50									1,50E-11		
5 *) (kryp1)	10					1	1,01	150	150	1,50E-09		
6 (kryp2)										1,50E-11		
7 (kryp3)	50									1,50E-09		
8 (kryp4)										1,50E-11		
9 *) (kryp1_oc20)		40	20 190	0,895	1					1,50E-09		400
10 (kryp1_oc10)			10 180	0,944								
11 (krypR1)		20				0,7	1,1	800	250		4	
12 (krypR2)										1,00E-10		
13 (krypR3)		40										
14 (krypR4)			20 190	0,895								
15 (krypR5)			0,01 212,5	0,8	1,1	0,8	1,1					
16 (krypR6)								250	250			
17 *) (krypR7)						0,5	1,5	800	250			
18 (kryp1B)			0,1 170			1	1,01	150	150			
19 (kryp6b)			0,01 212,5			0,8	1,1	250	250			
20 (R6-ukryp	10	40	0,01 212,5	0,8	1,1	0	0	0	0			

*) **Försök 1** I GeoSuite användes soil model: *without creep* för samtliga tester utan kryp (**1-4**).

*) **Försök 5** I GeoSuite användes soil model: *with creep* för denna och efterföljande tester.

*) **Försök 9** σ'_L sätts till 400 kPa.

*) **Försök 11** C_{eps} (GeoSuite) = β (KrypCTH), sätts för detta och efterföljande test till 4.

*) **Försök 17** Tungheten är satt till 0,0001 kN/m^3.

Följande sidor redovisar indata till de verkliga fallen; Änggården, Bratteröd och Lilla Mellösa.

Ånggården

Soil model:	Chalmers with creep
Permeability model:	Log based (tension)
Pore pressure:	Gvy 1,4 m (226 kPa i botten)
Load stresses:	24 kPa konstant med djup
Time:	Tidssteg i år: (0) (0,1) (1) (5) (10) (20) (40) (60) (80) (100)

Lager	Depth	Sublayers	Soil weight	Porosity	M0	ML	M´	a0	a1	σ'_c	σ'_L	t_ref	r0	r1	b0	b1	k_init	C_eps
1	0	20	18,5	0,75	15000	1000	100	0,8	1	80	2000	-0,0027	1000	400	0,7	1,1	0,15768	0,001
	2																	
2	2	40	15,5	0,75	5000	450	100	0,8	1	40	2000	-0,0027	600	175	0,7	1,1	0,01892	4,6
	6				7500					65								4,1
3	6	60	15,3	0,75	7500	450	100	0,8	1	65	2000	-0,0027	600	190	0,7	1,1	0,01576	3,9
	12				12000					110								3
4	12	10	15,3	0,75	20000	400	100	0,8	1	110	2000	-0,0027	1000	600	0,7	1,1	0,02522	3
	13		17		20000	1500				110								5
5	13	70	17	0,75	10200	750	100	0,8	1	110	2000	-0,0027	600	210	0,7	1,1	0,02838	5
	20		18		13500	900				180							0,01734	4,5
6	20	40	18	0,75	14000	900	100	0,8	1	175	2000	-0,0027	600	210	0,7	1,1	0,01734	4,5
	24		17,5		17000	700				220							0,01419	5

Bratteröd

Soil model:	Chalmers with creep
Permeability model:	Log based (tension)
Pore pressure:	Gvy 1,4 m (350 kPa i botten)
Load stresses:	20 kPa konstant med djup
Time:	Tidssteg i år: (0) (0,1) (1) (5) (10) (20) (40) (60) (80) (100)

Lager	Depth	Sublayers	Soil weight	Porosity	M0	ML	M´	a0	a1	σ´c	σ´i	t_ref	r0
1	0	20	18,5	0,75	15000	1000	100	0,8	1	80	2000	-0,0027	1000
	2												
2	2	30	15,5	0,75	5000	450	100	0,8	1	40	2000	-0,0027	600
	5				7500					65			
3	5	25	15,3	0,75	7500	450	100	0,8	1	65	2000	-0,0027	600
	7,5				12000					110			
4	7,5	5	15,3	0,75	12000	400	100	0,8	1	110	2000	-0,0027	1000
	8		17		1500	1500				110			
5	8	60	17	0,75	10200	750	100	0,8	1	110	2000	-0,0027	600
	14		18		13500	900				180			
6	14	30	18	0,75	14000	900	100	0,8	1	175	2000	-0,0027	600
	17		17,5		15500	800				197,5			
7	17	10	17,75	0,75	15500	800	100	0,8	1	197,5	2000	-0,0027	600
	18		17,625		16250	750				208,75			
8	18	90	17,625	0,75	16250	750	100	0,8	1	208,75	2000	-0,0027	600
	27		17,5625		16625	725				214,38			
9	27	170	17,5625	0,75	16625	725	100	0,8	1	214,38	2000	-0,0027	600
	35		17,5		17000	700				220			

Lilla Mellösa

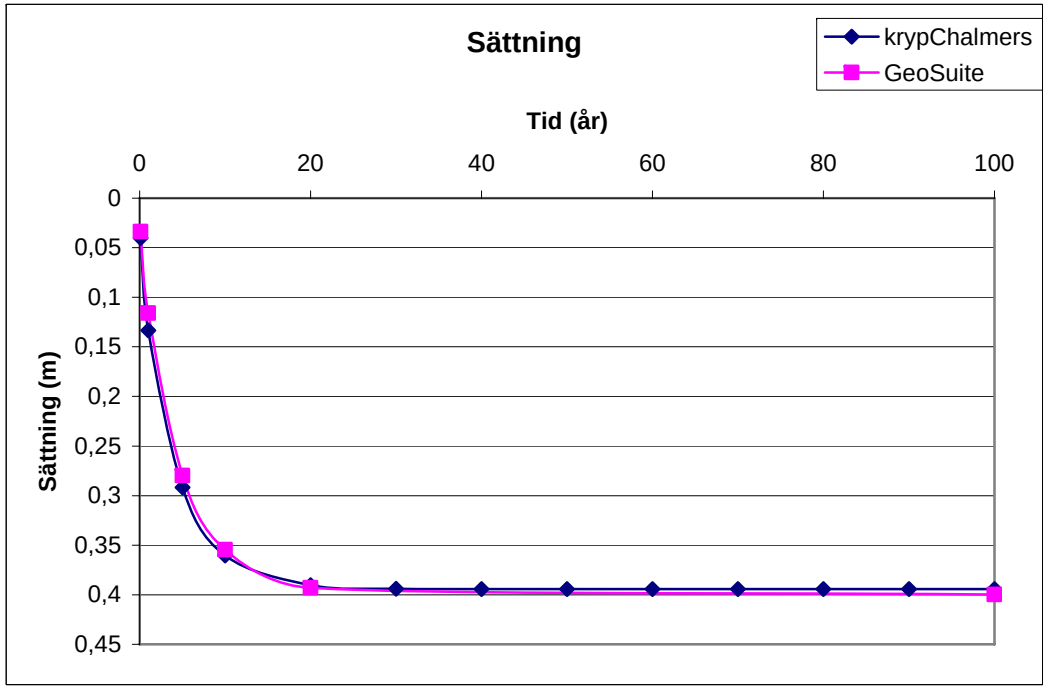
Soil model:	Chalmers with creep
Permeability model:	Log based (tension)
Pore pressure:	Gvy 0,8 m (132 kPa i botten)
Load stresses:	40 kPa konstant med djup
Time:	Tidssteg i år: (0) (0,1) (1) (5) (10) (20) (40) (60) (80) (100)

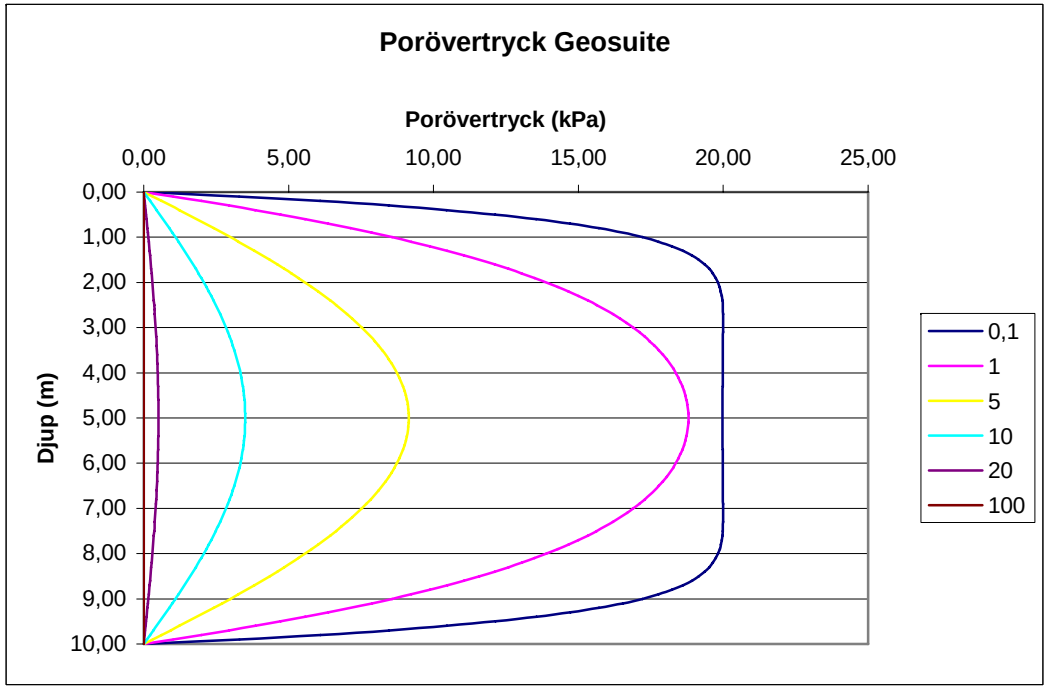
Lager	Depth	Sublayers	Soil weight	Porosity	M0	ML	M´	a0	a1	σ'_c	σ'_t	t_ref	r0	r1	b0	b1	k_init	C_eps
1	0	10	16,5	0,67	10000	1000	50	0,8	1	100	500	-0,0027	10000	10000	0,7	1,1	0,063	3
	1		14															
2	1	10	14	0,67	5500	300	50	0,8	1	100	500	-0,0027	290	80	0,7	1,1	0,0315	3
	2		13		5000	200				40				70				
3	2	30	13	0,67	5000	200	50	0,8	1	40	500	-0,0027	290	70	0,7	1,1	0,0315	3
	5		14			220				30			300	90			0,0252	3,25
4	5	20	14	0,67	5000	220	50	0,8	1	30	500	-0,0027	300	90	0,7	1,1	0,0252	3,25
	7		15		6500	240				40			320	100			0,0283	3,5
5	7	20	15	0,67	6500	240	50	0,8	1	40	500	-0,0027	320	100	0,7	1,1	0,02823	3,5
	9		16		8800	280				60			340	120			0,03153	3,5
6	9	30	16	0,67	8800	280	50	0,8	1	60	500	-0,0027	340	120	0,7	1,1	0,03153	3,8
	12		16,5		9900	350				80			350					3,8
7	12	20	16,5	0,67	9900	350	50	0,8	1	80	500	-0,0027	350	120	0,7	1,1	0,03153	3,5
	14		18		10100	410				100			400	240				3

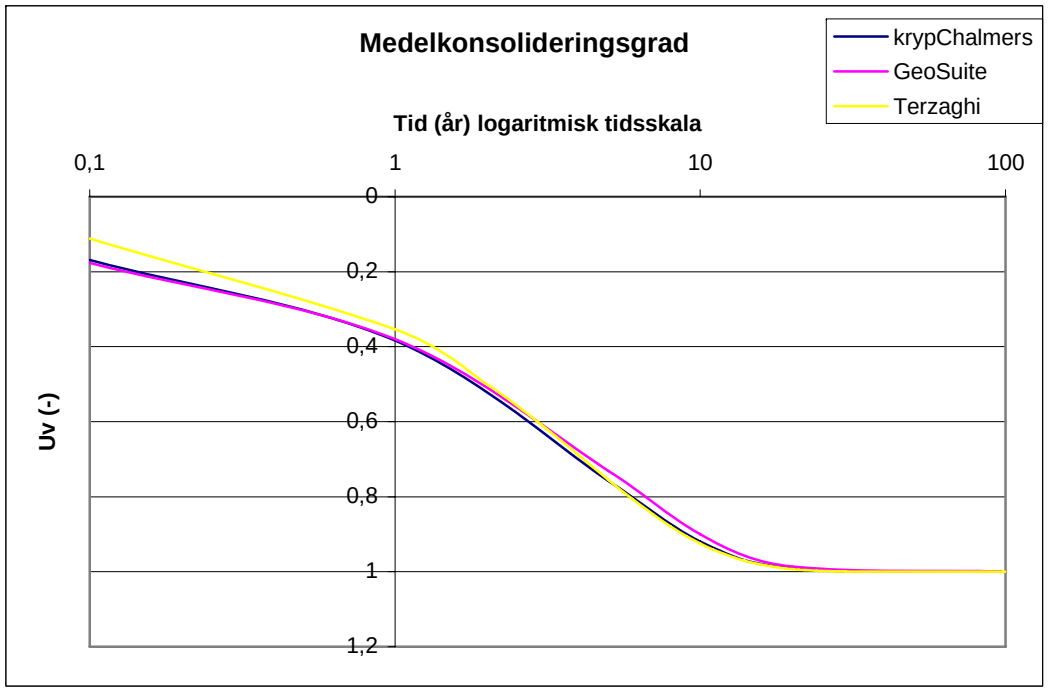
Bilaga 5-samtliga beräkningsresultat

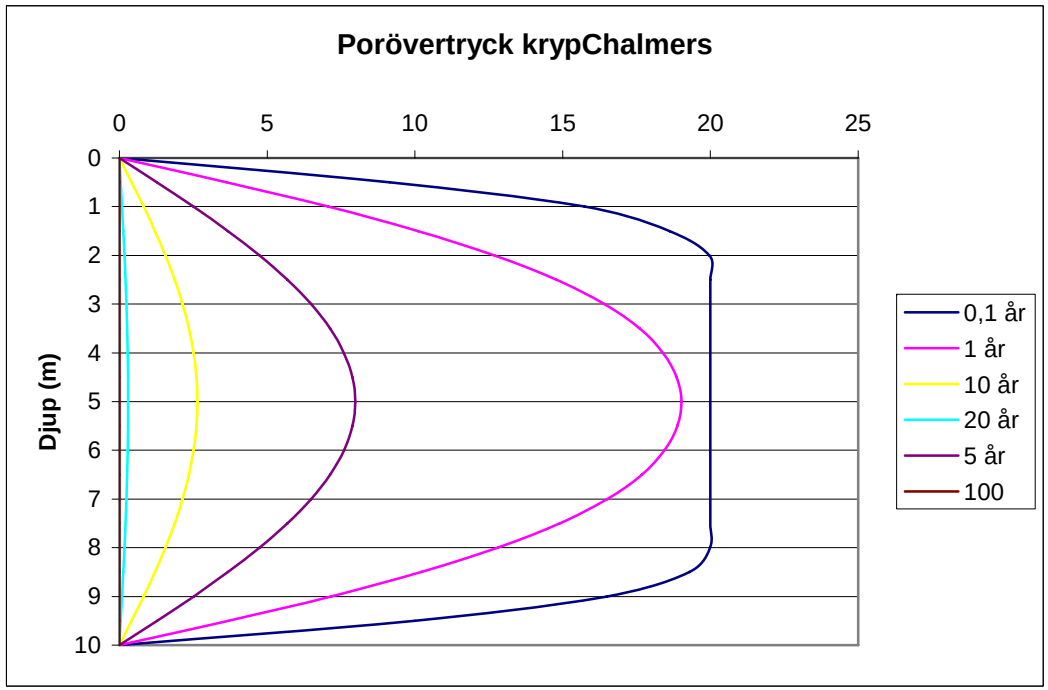
Följande sidor redovisar beräkningsresultaten i diagram för samtliga fall.

1. utan kryp 1

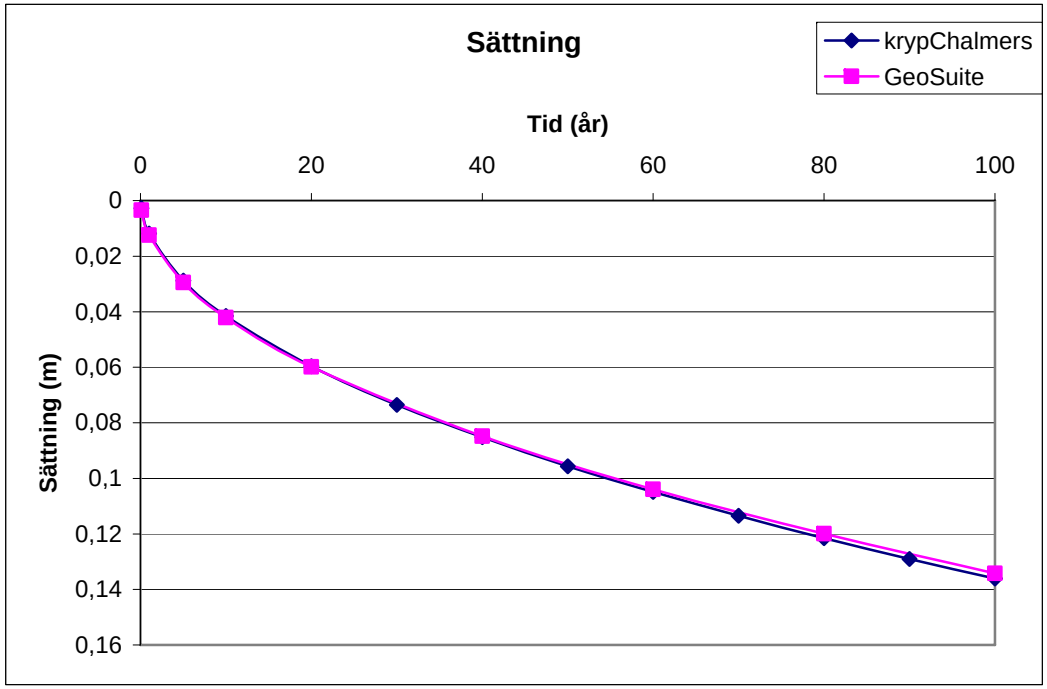

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45

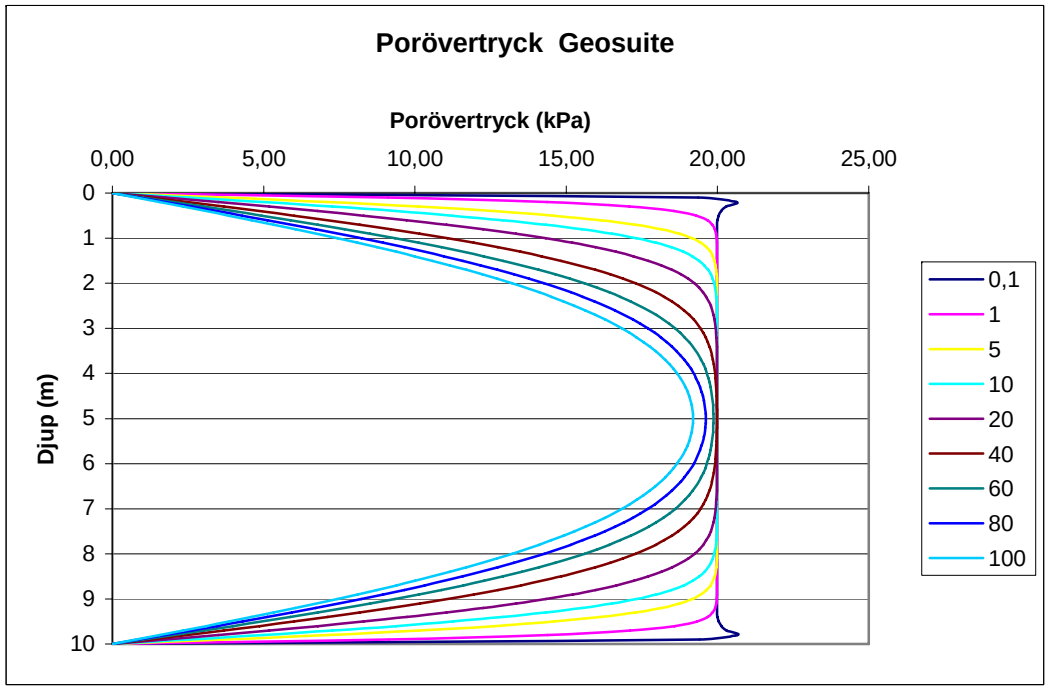

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Djup (m)
0,00
1,00
2,00
3,00
4,00
5,00
6,00
7,00
8,00
9,00
10,00
0,1
1
5
10
20
100

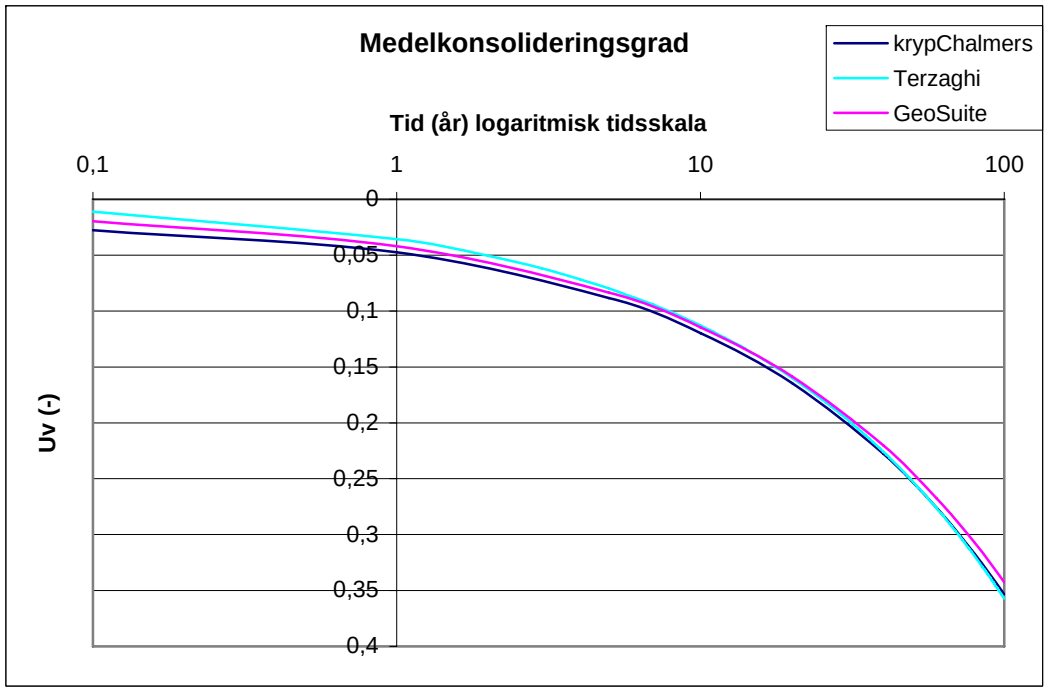

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Terzaghi
Tid (år) logaritmisk tidsskala
0,1
1
10
100
Uv (-)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2

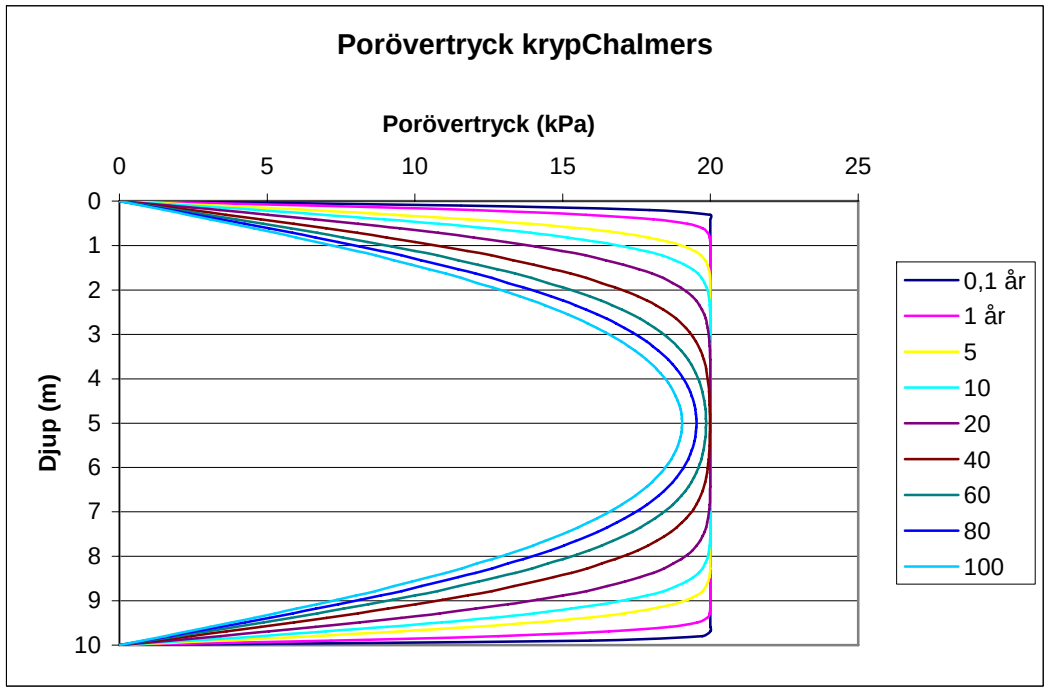

Porövertryck krypChalmers
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1 år
1 år
10 år
20 år
5 år
100

2. utan kryp 2

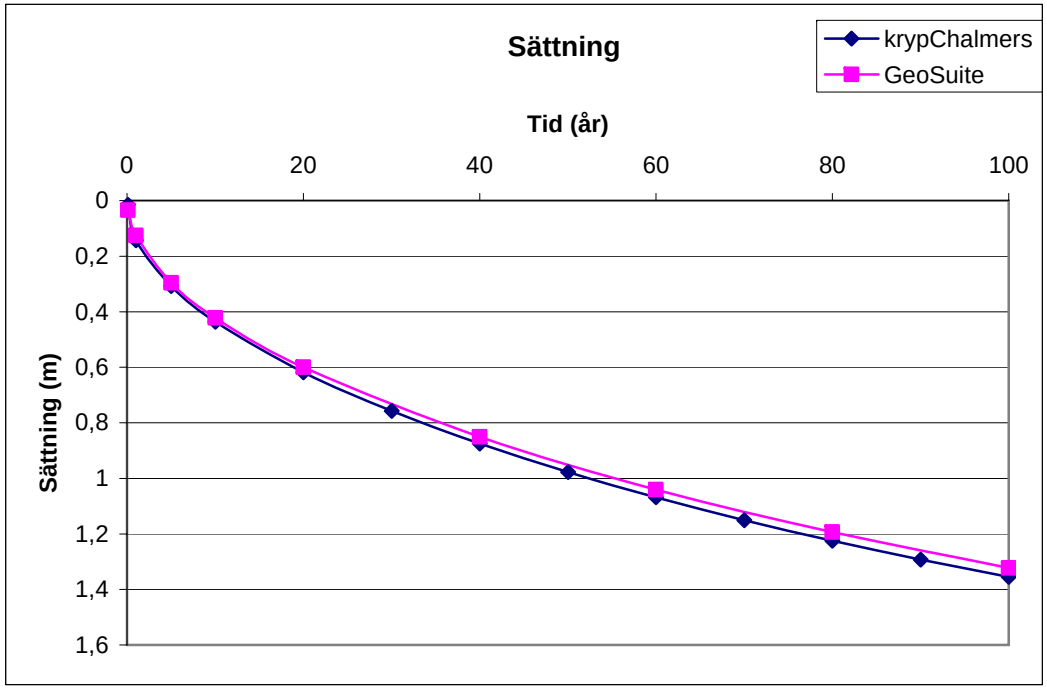

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
0,12
0,14
0,16

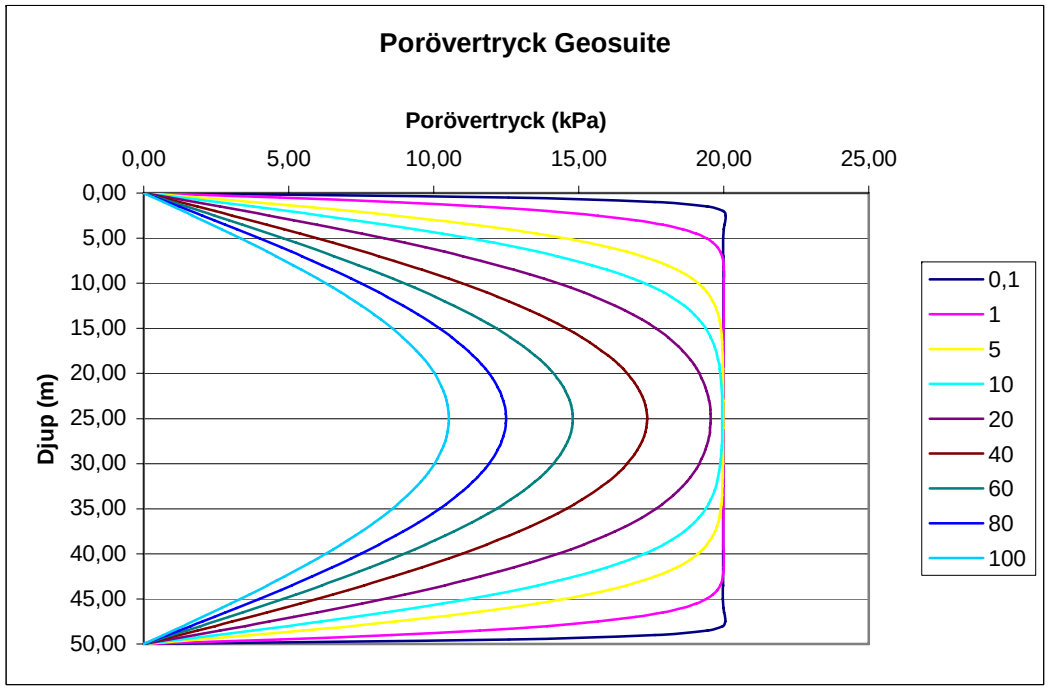

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

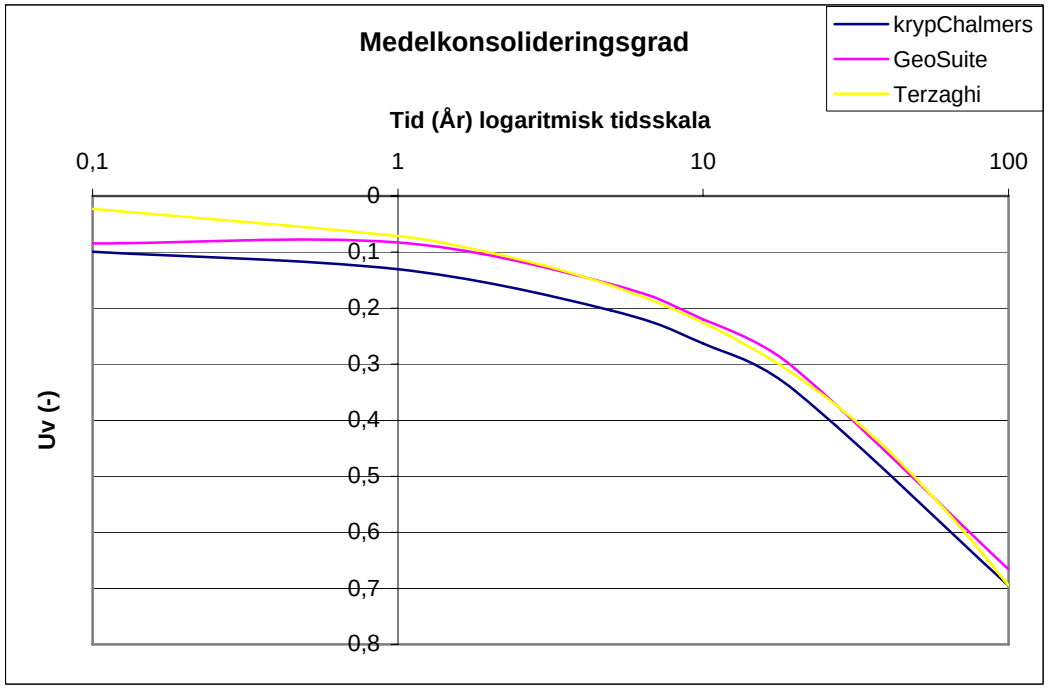

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
Terzaghi
GeoSuite
Tid (år) logaritmisk tidsskala
0,1
1
10
100
Uv (-)
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4

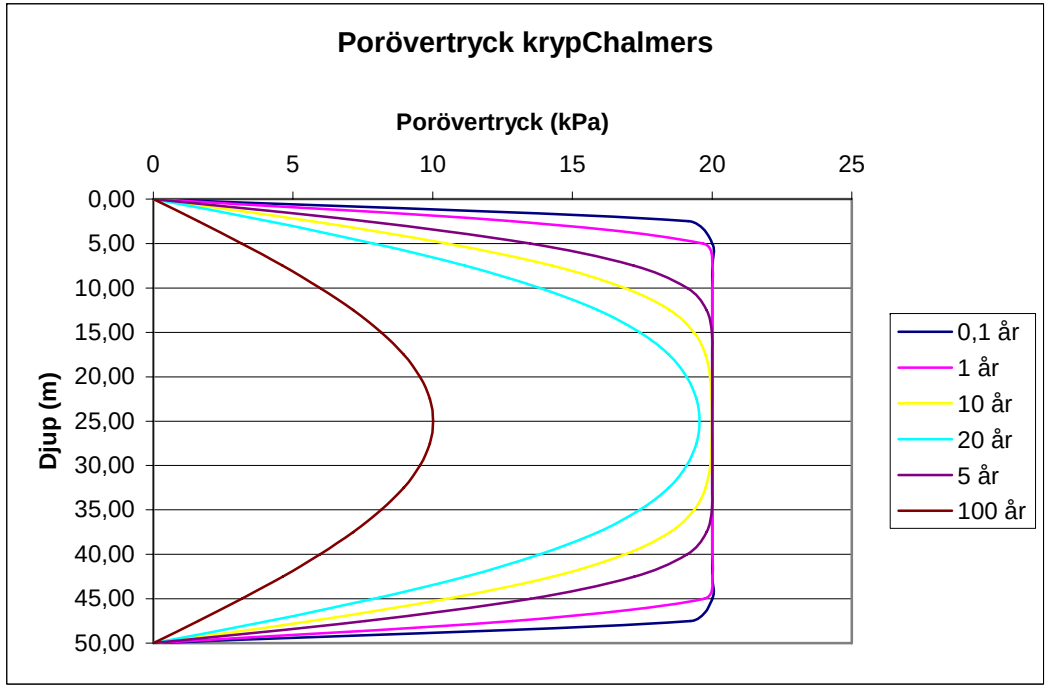

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1 år
1 år
5
10
20
40
60
80
100

3. utan kryp 3

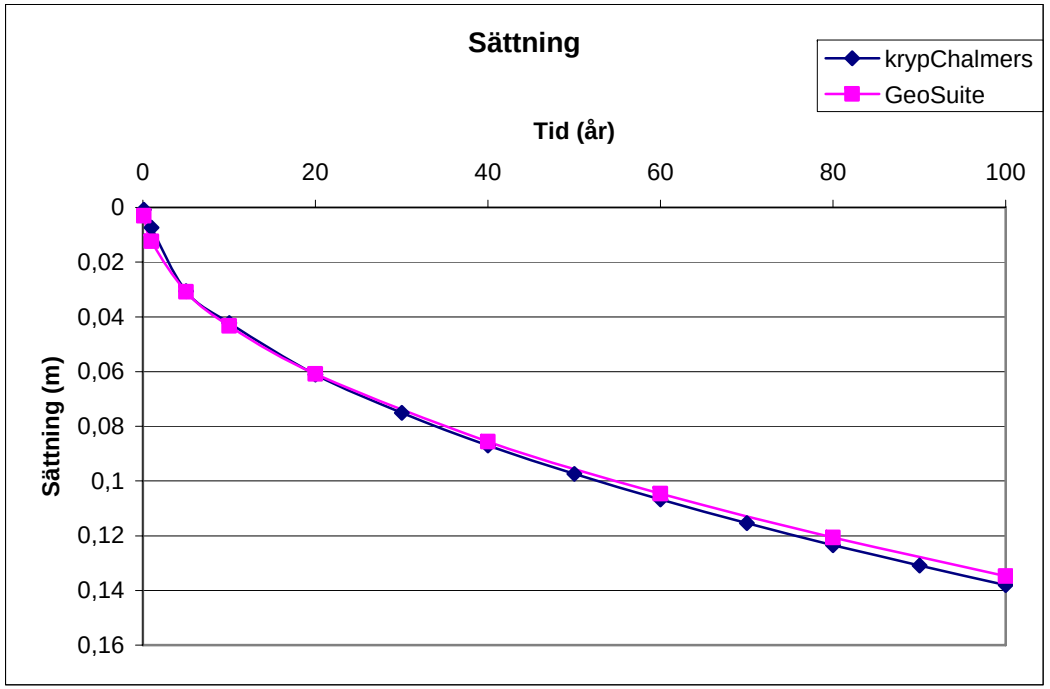

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6

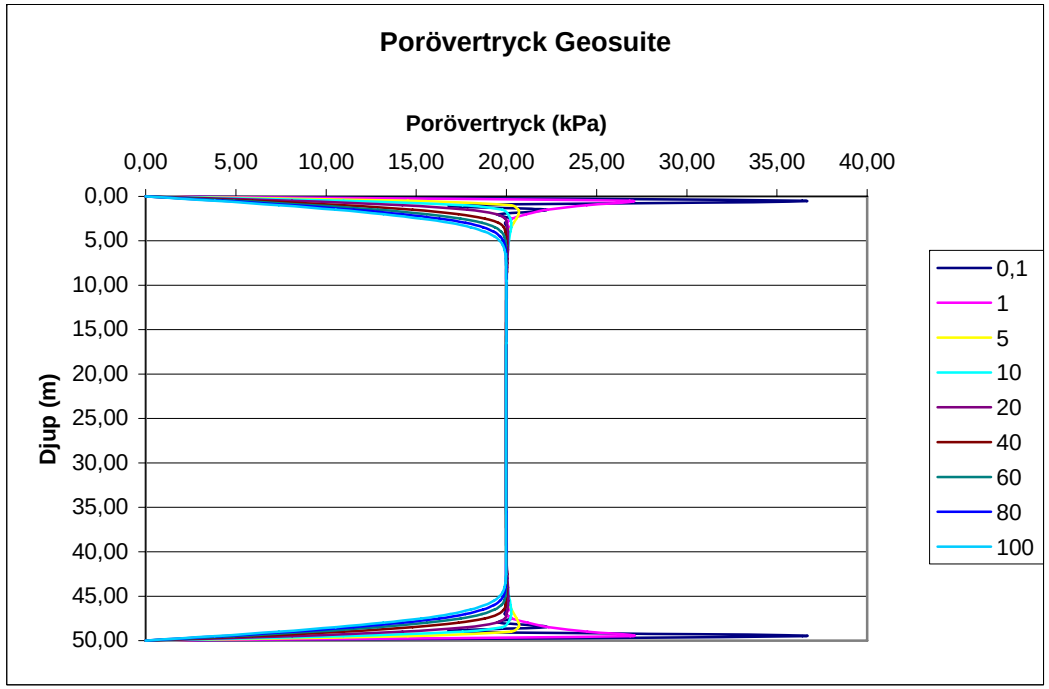

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

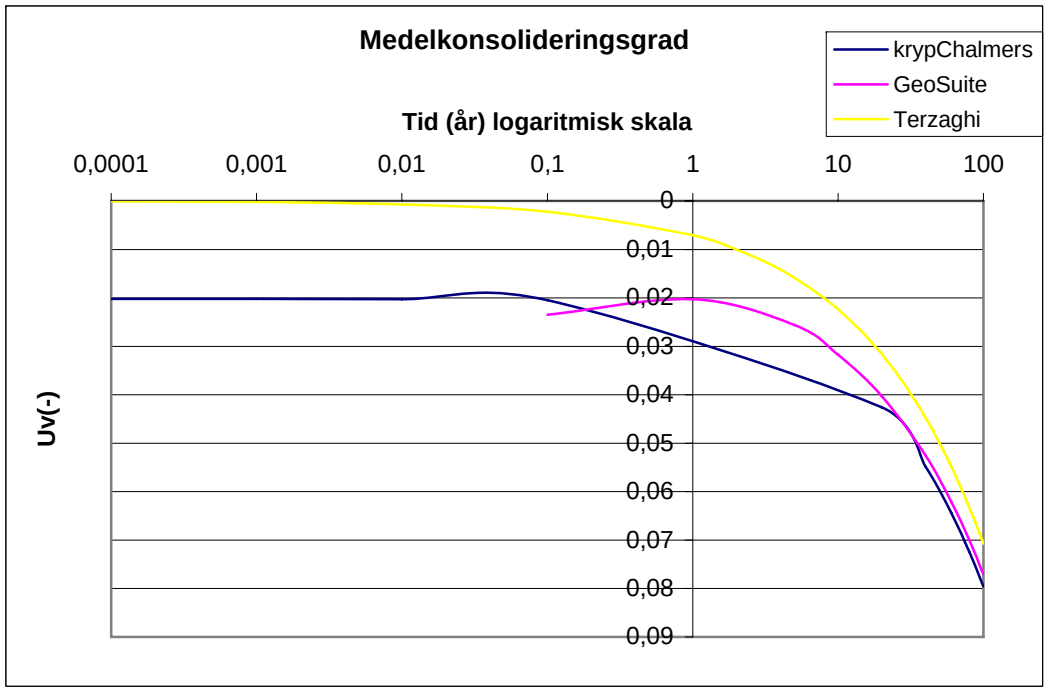

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Terzaghi
Tid (År) logaritmisk tidsskala
0,1
1
10
100
Uv (-)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8

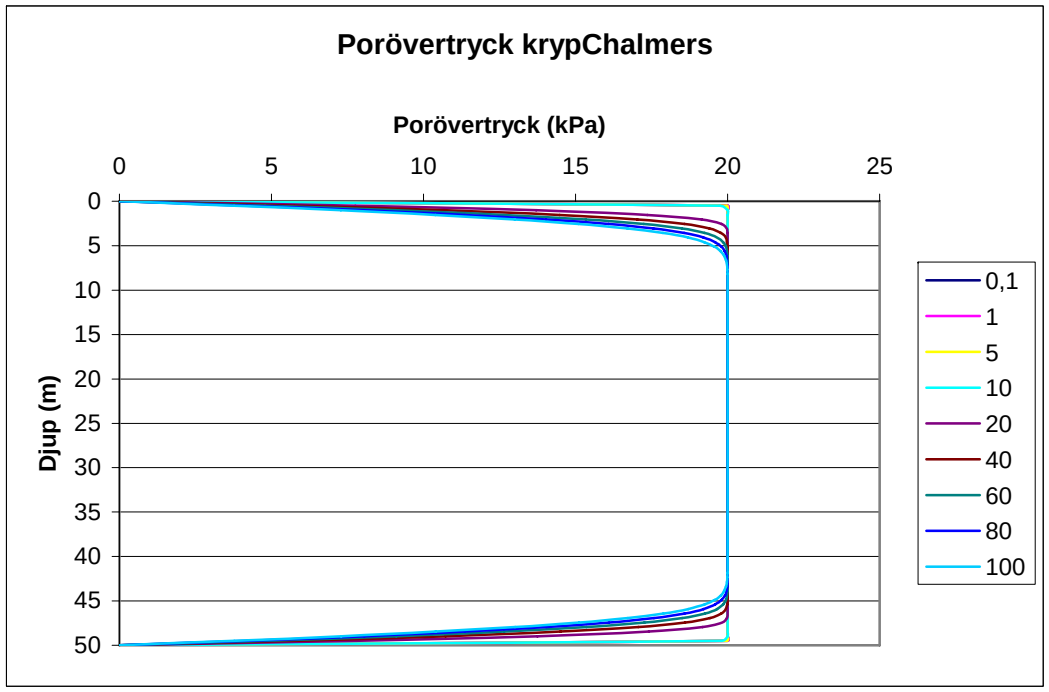

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1 år
1 år
10 år
20 år
5 år
100 år

4. utan kryp 4

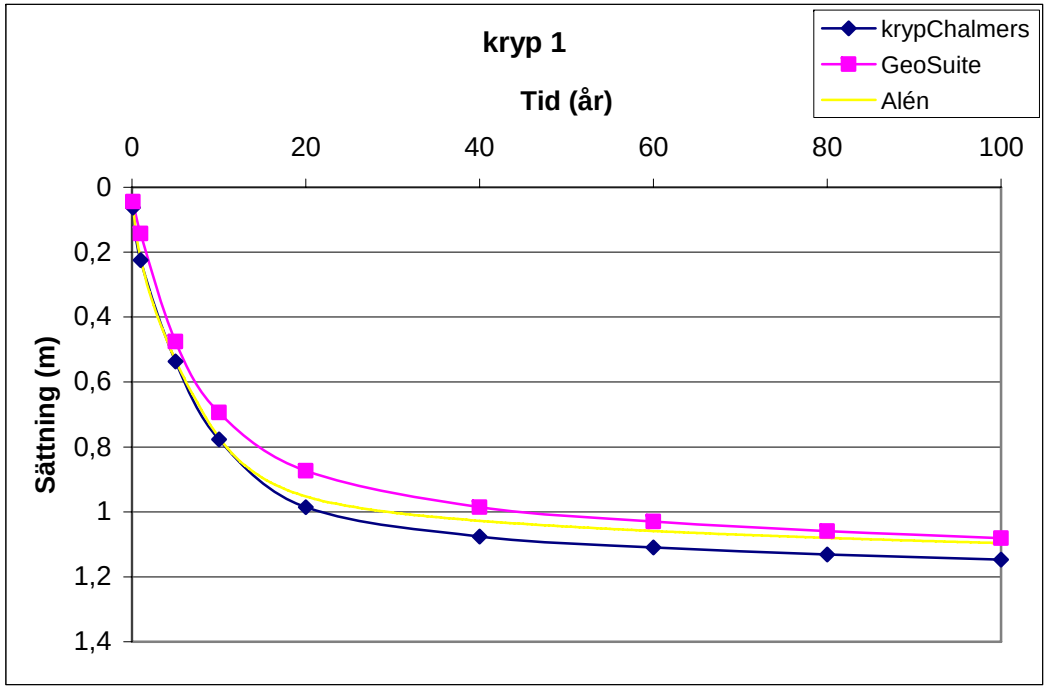

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
0,12
0,14
0,16

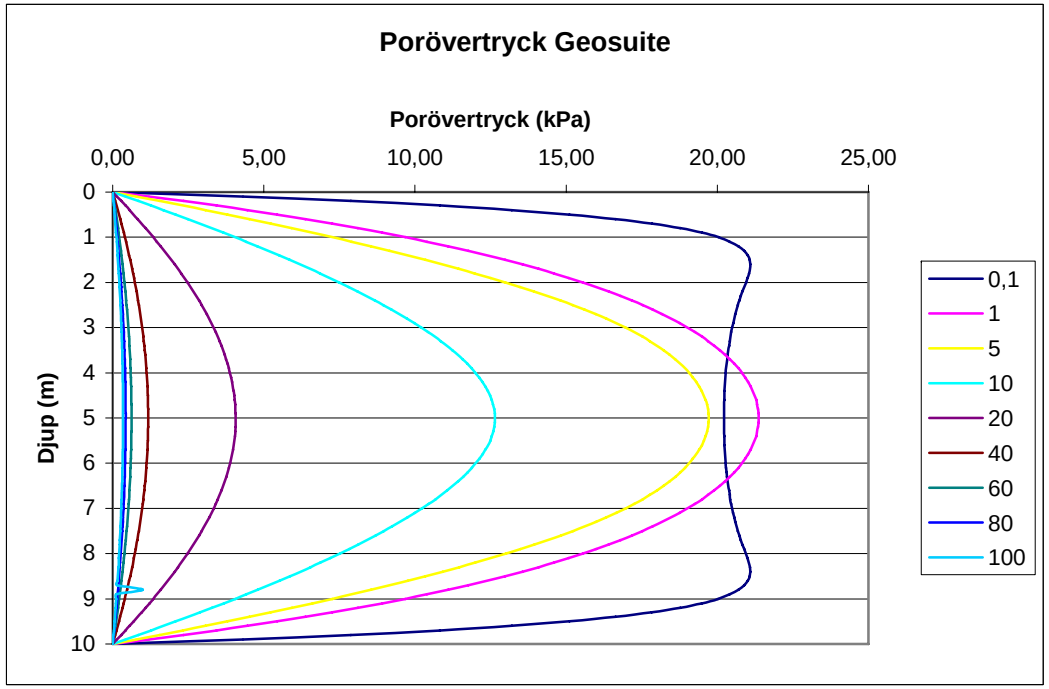

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

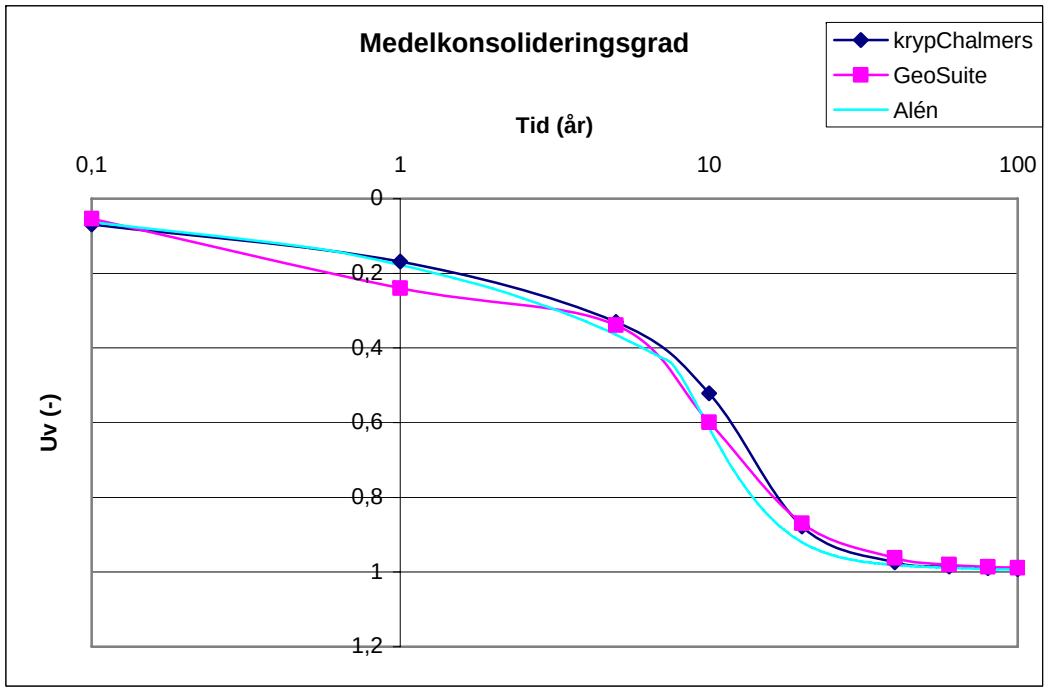

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Terzaghi
Tid (år) logaritmisk skala
0,0001
0,001
0,01
0,1
1
10
100
Uv(-)
0
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
0,09

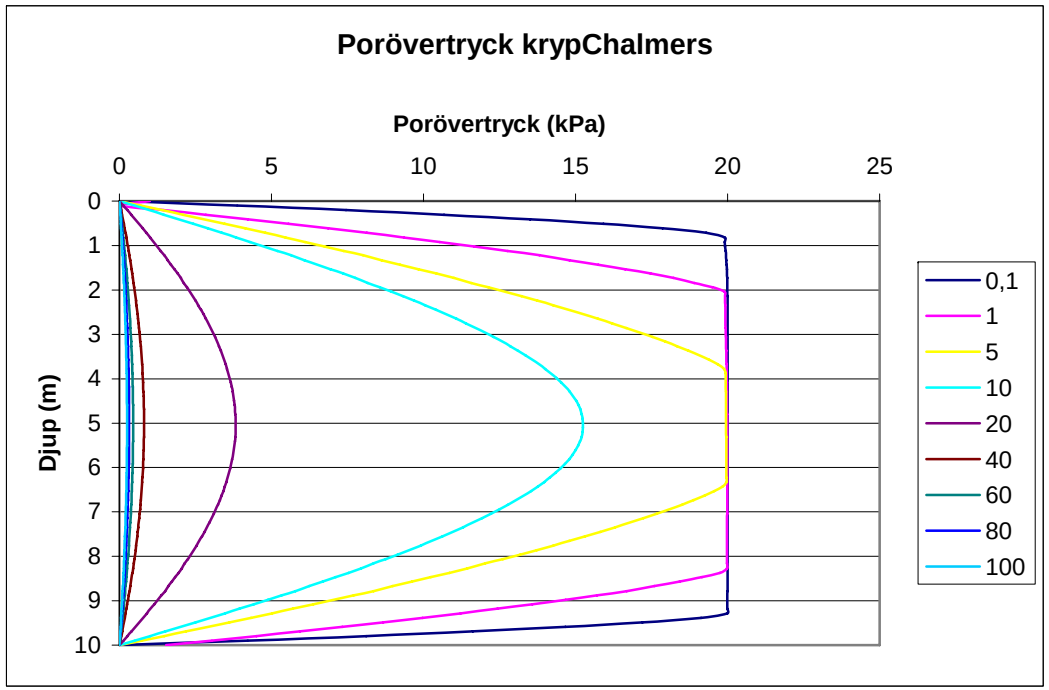

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

5. kryp1

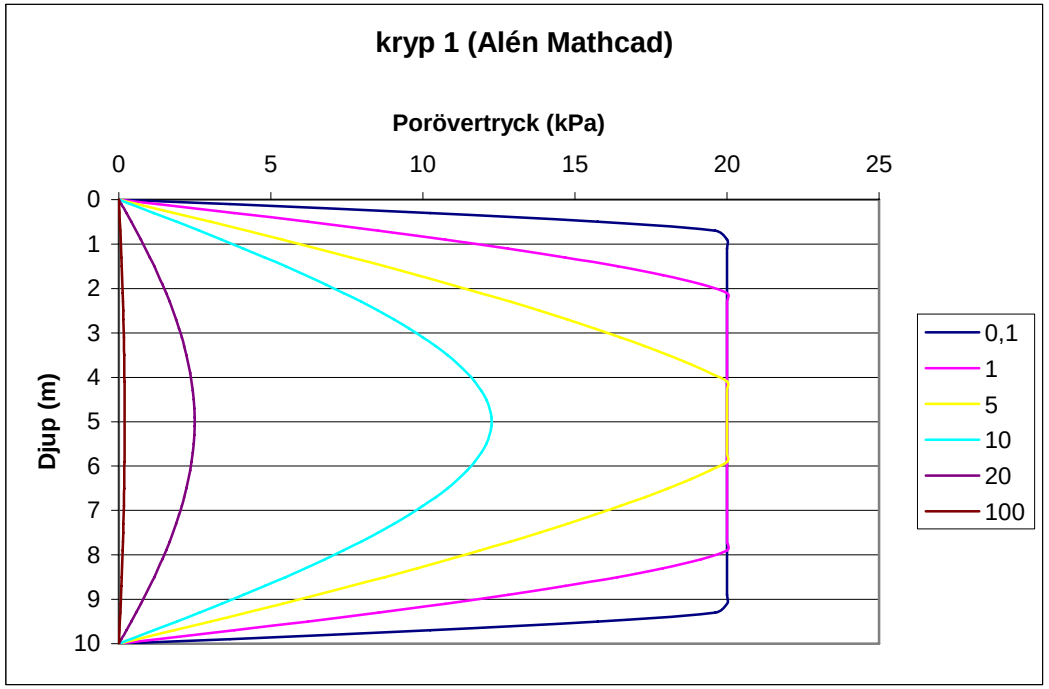

kryp 1
Tid (år)
Sättning (m)
krypChalmers
GeoSuite
Alén
0
20
40
60
80
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4


Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

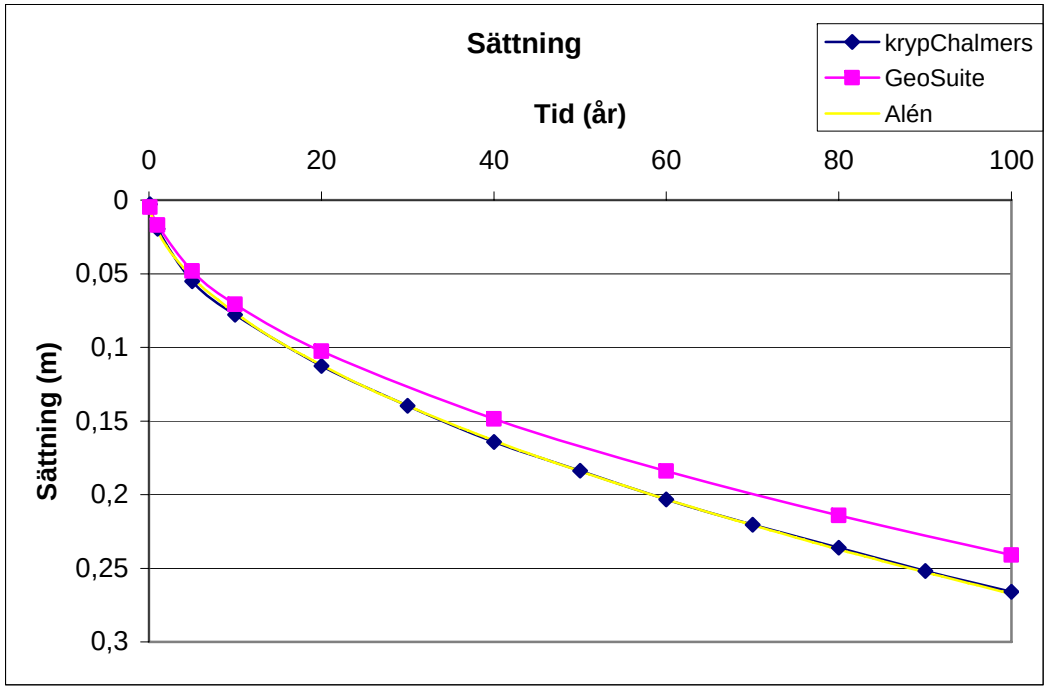

Medelkonsolideringsgrad
Tid (år)
Uv (-)
krypChalmers
GeoSuite
Alén
0,1
1
10
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2

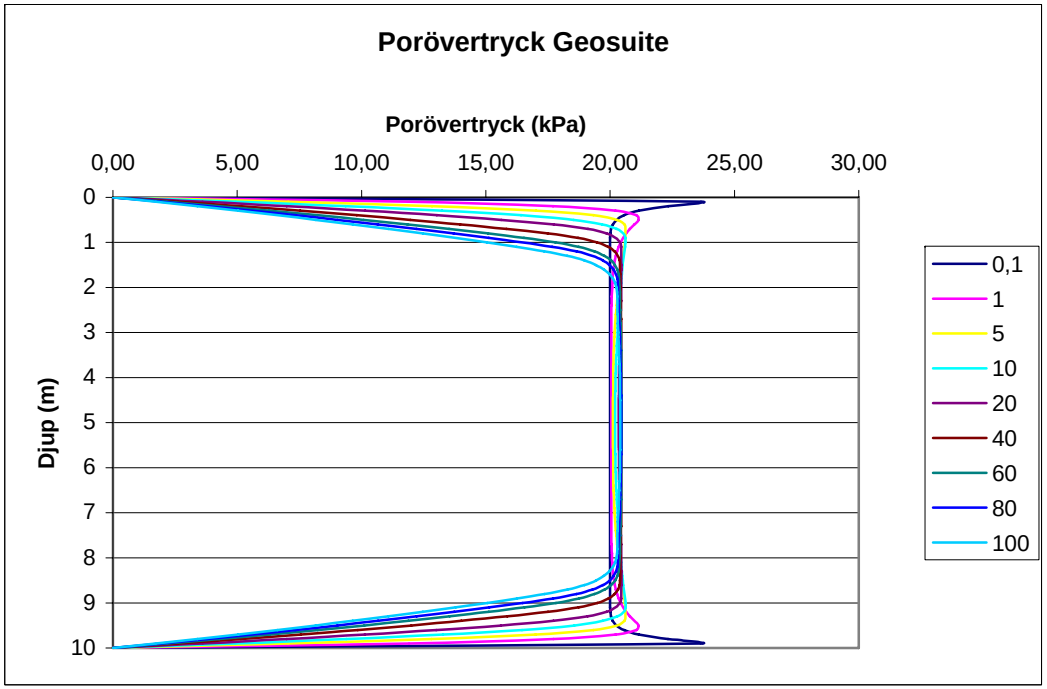

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

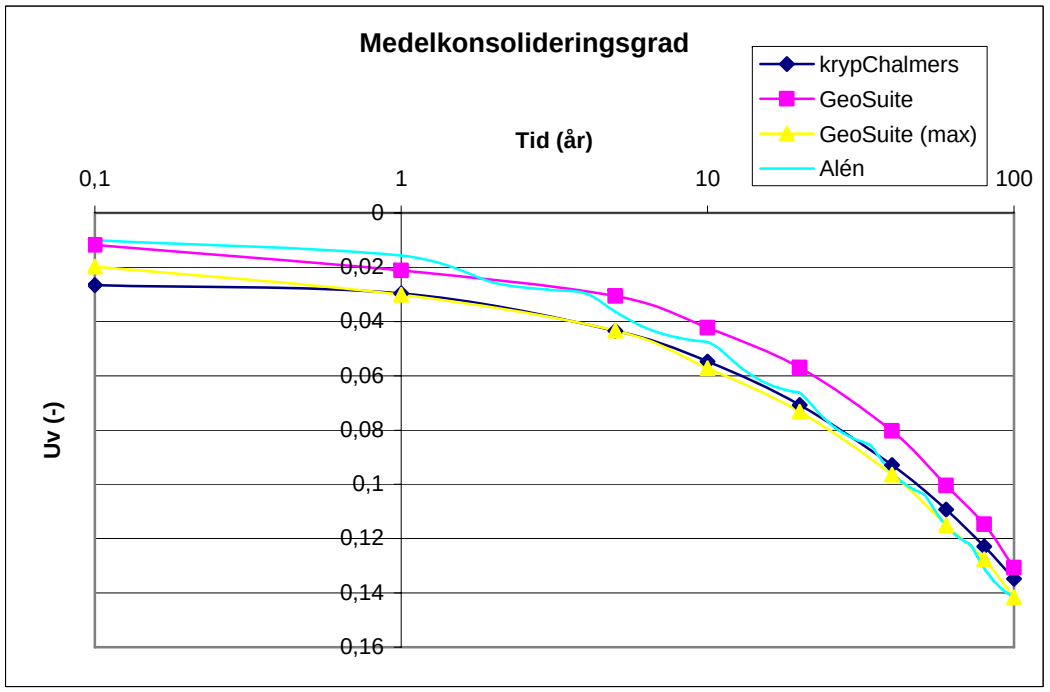
5. kryp1

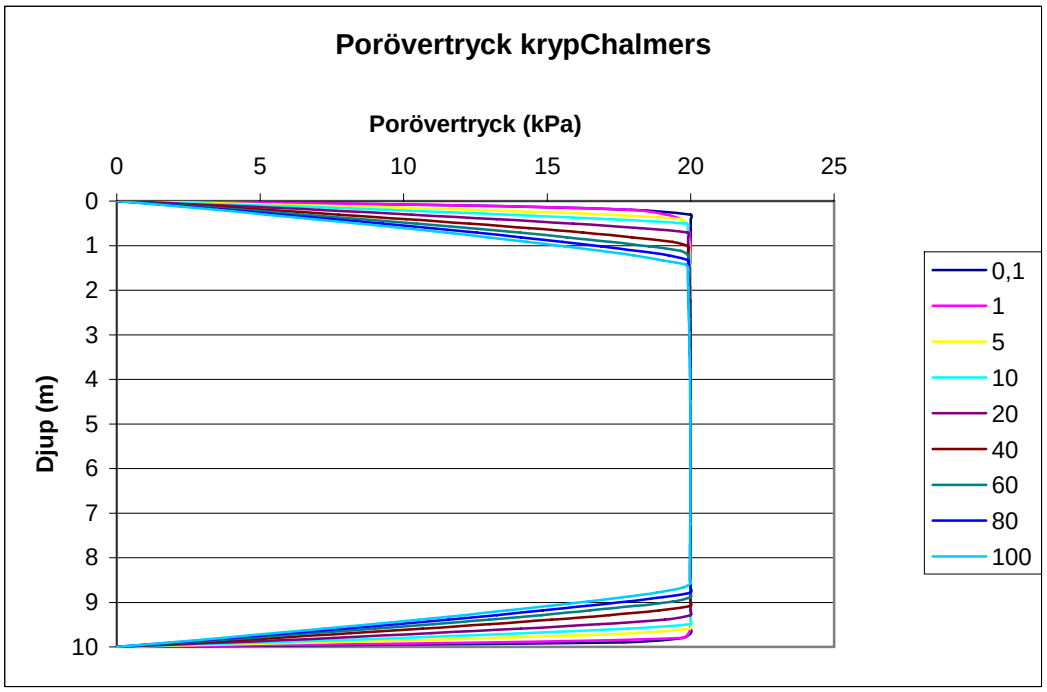

kryp 1 (Alén Mathcad)
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
100

6. kryp2

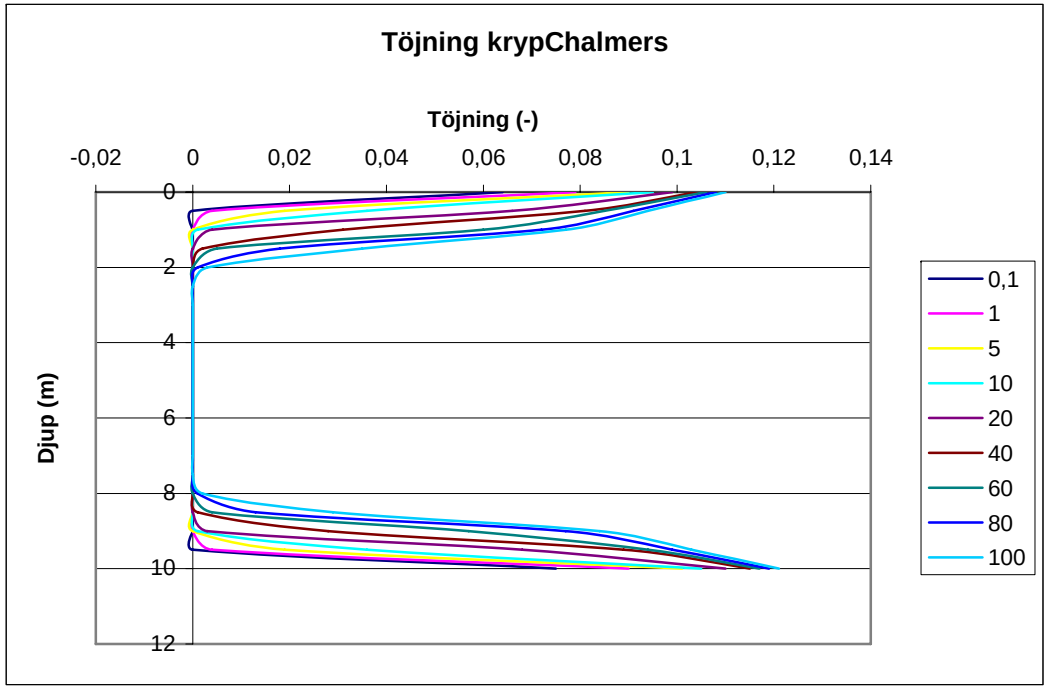

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Alén
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3

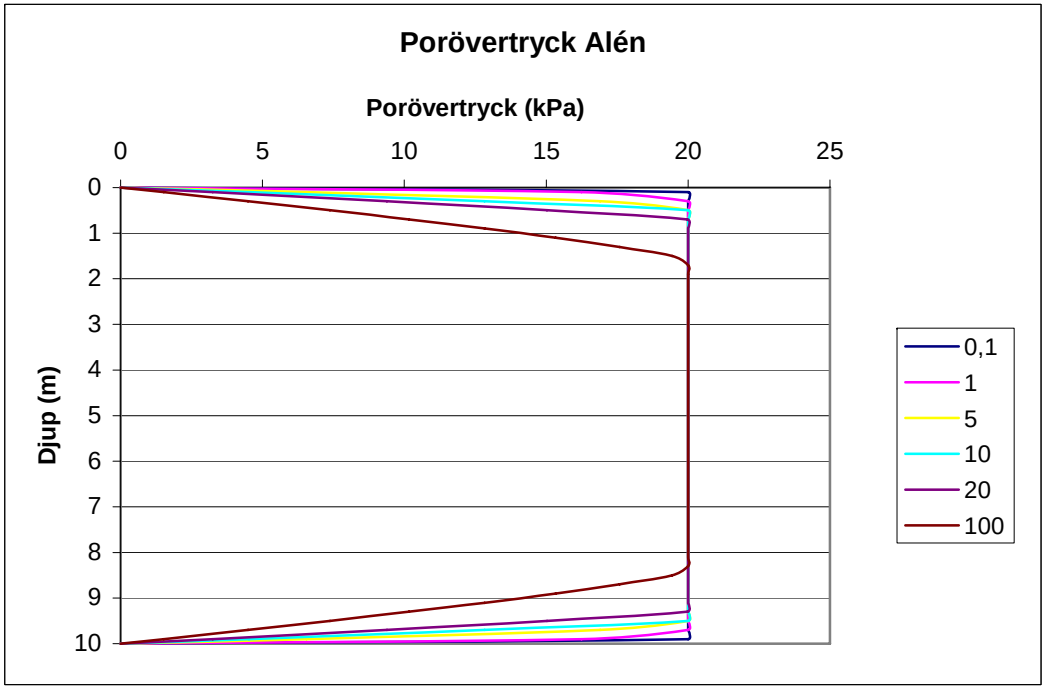

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100


Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
GeoSuite (max)
Alén
Tid (år)
0,1
1
10
100
Uv (-)
0
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
0,12
0,14
0,16

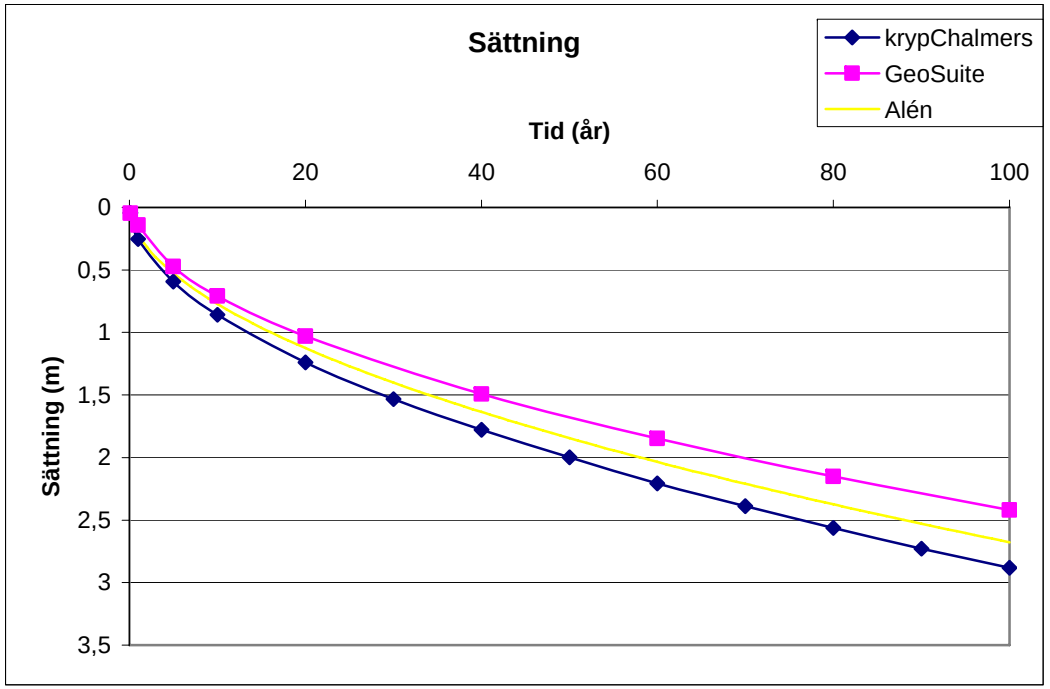

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

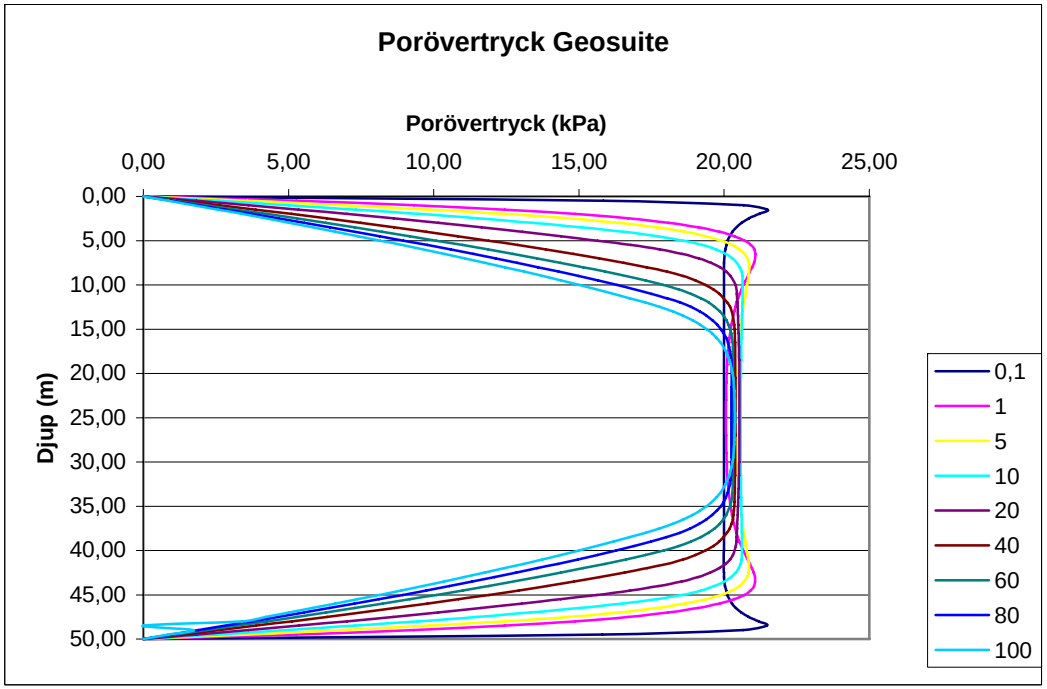
6. kryp2

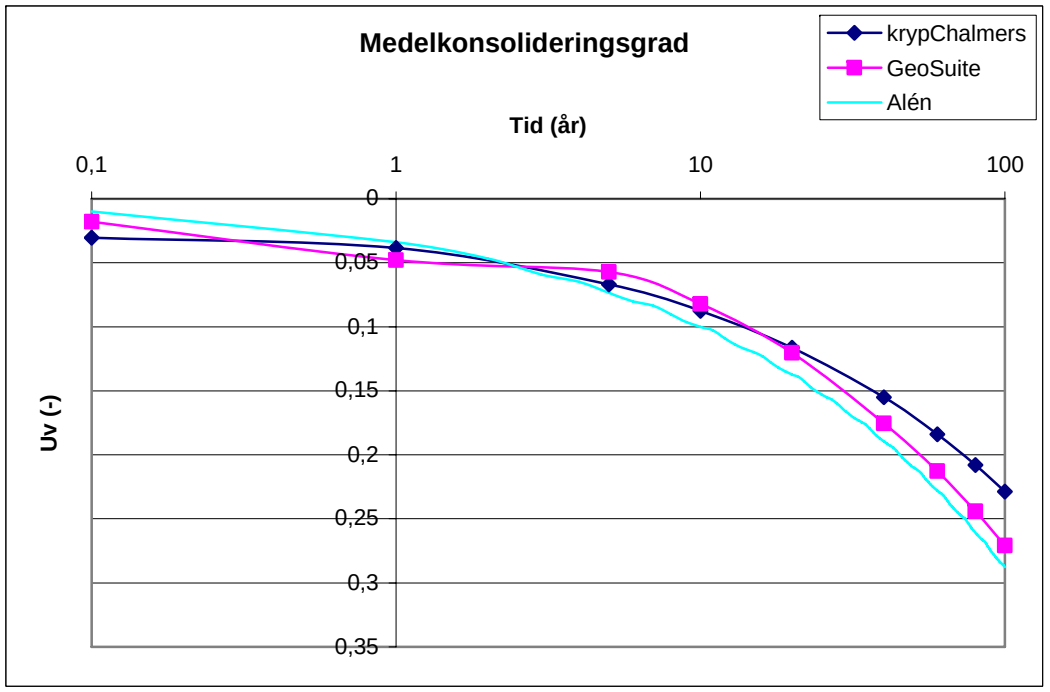

Töjning krypChalmers
Töjning (-)
-0,02
0
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
0,12
0,14
Djup (m)
0
2
4
6
8
10
12
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

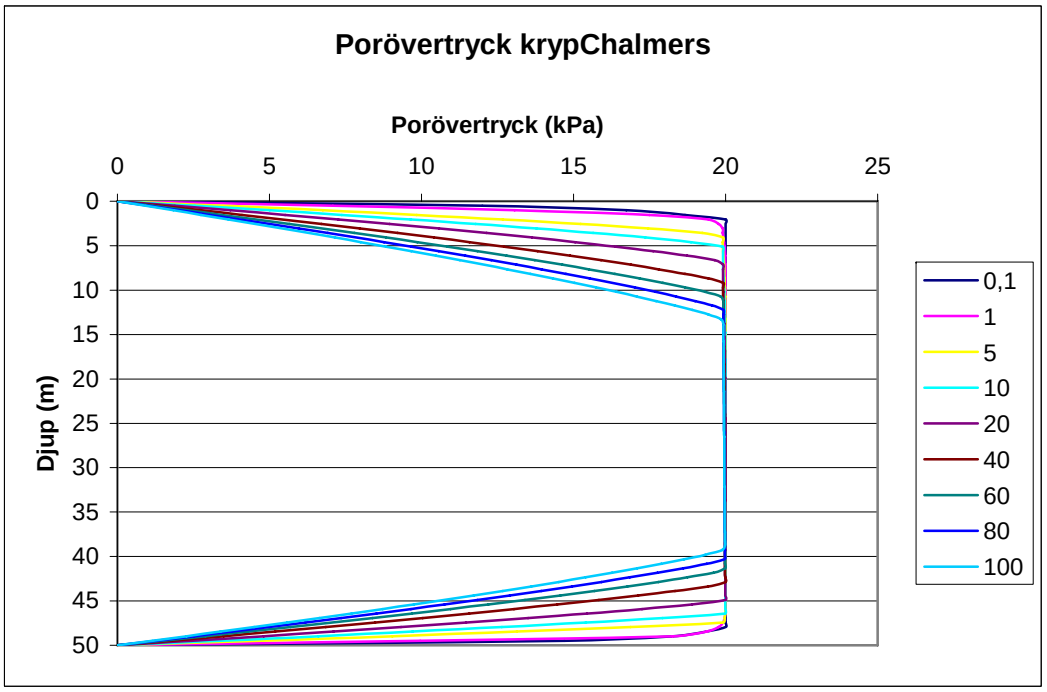

Porövertryck Alén
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
100

7. kryp3

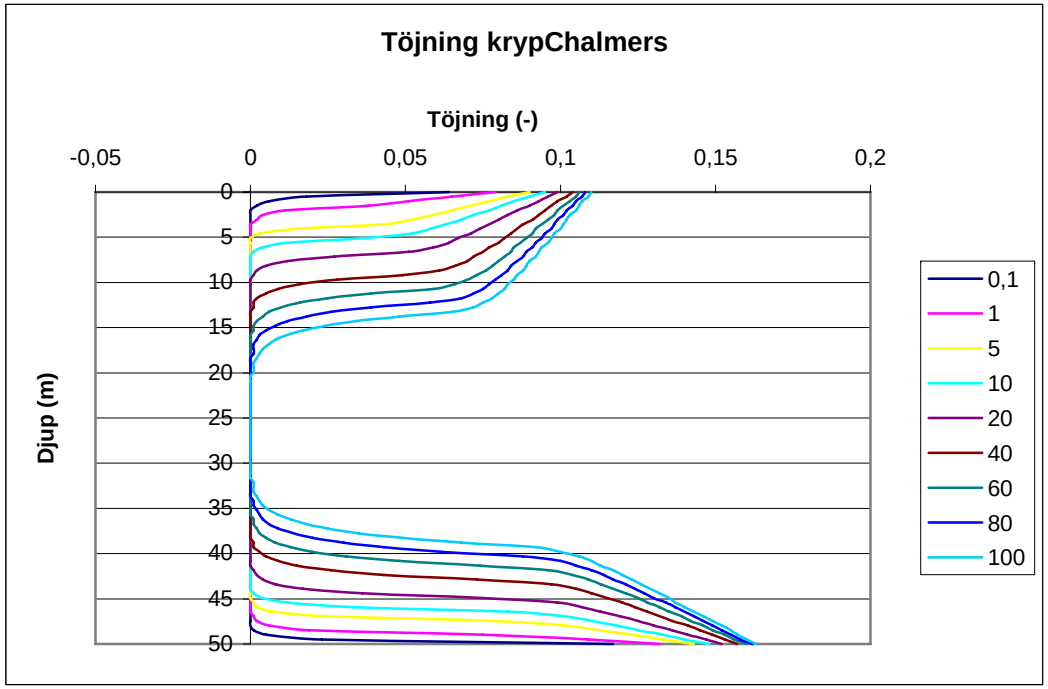

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Alén
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5

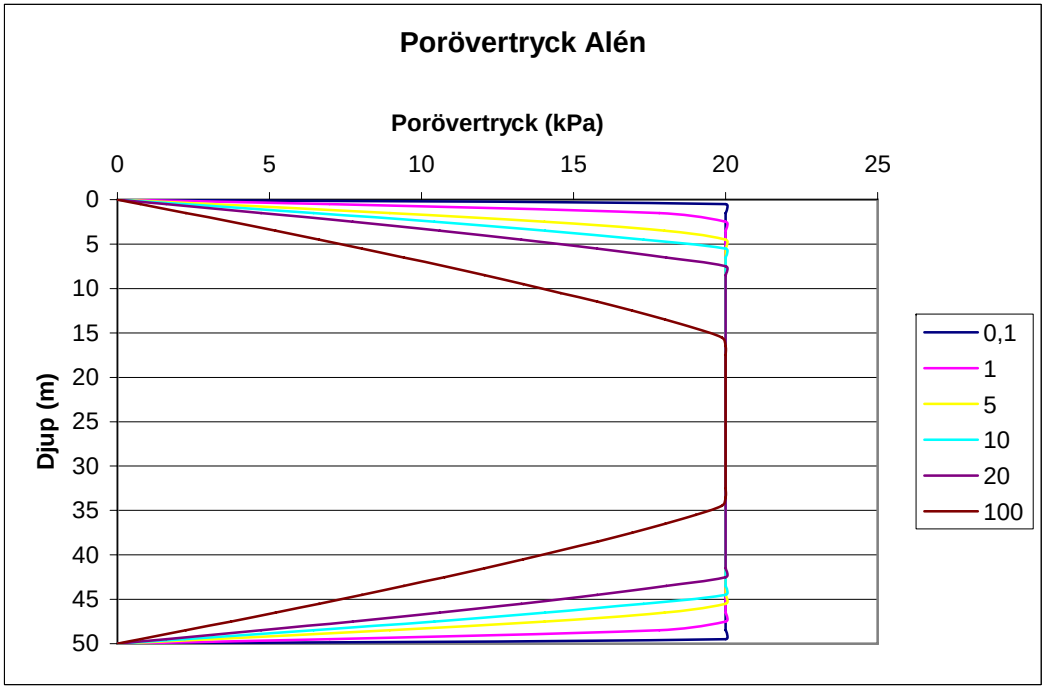

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

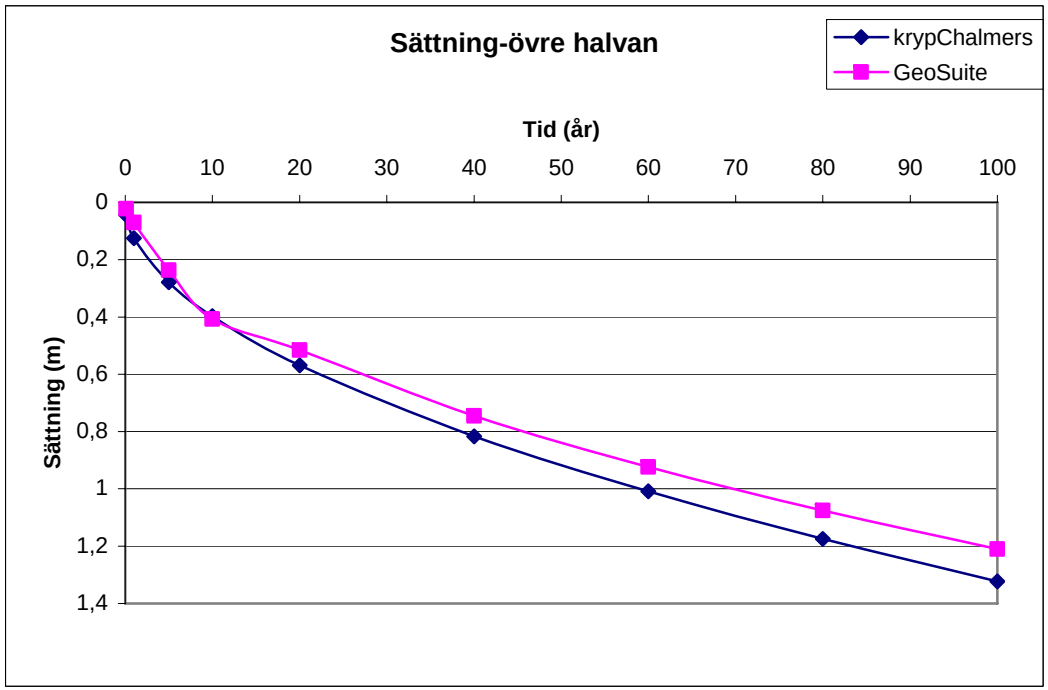

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Alén
Tid (år)
0,1
1
10
100
Uv (-)
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35

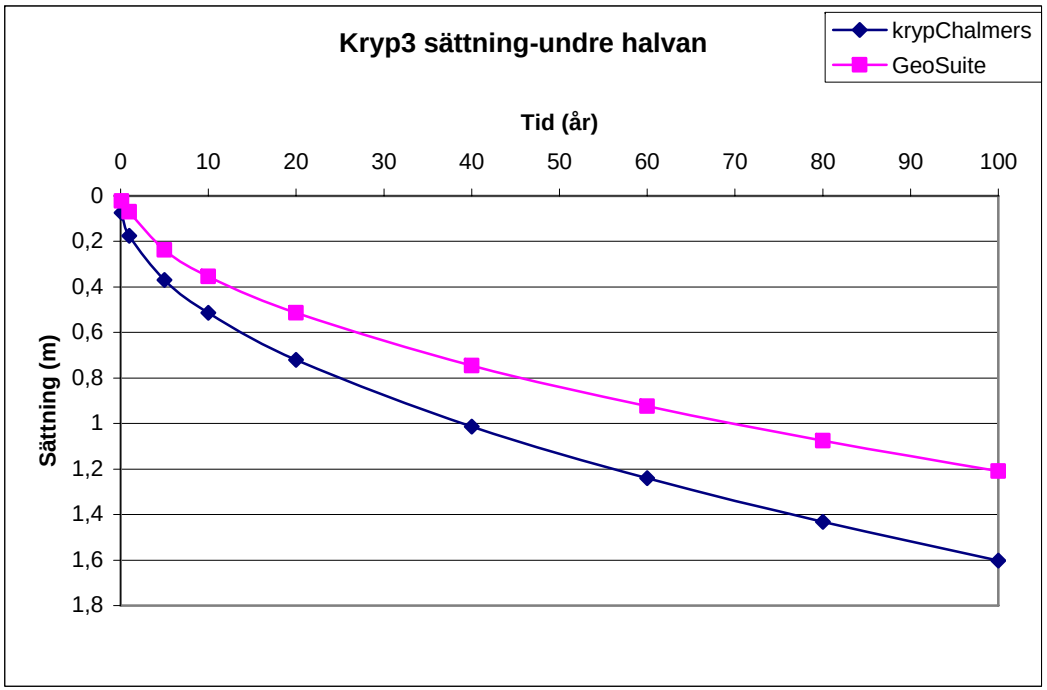

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

7. kryp3

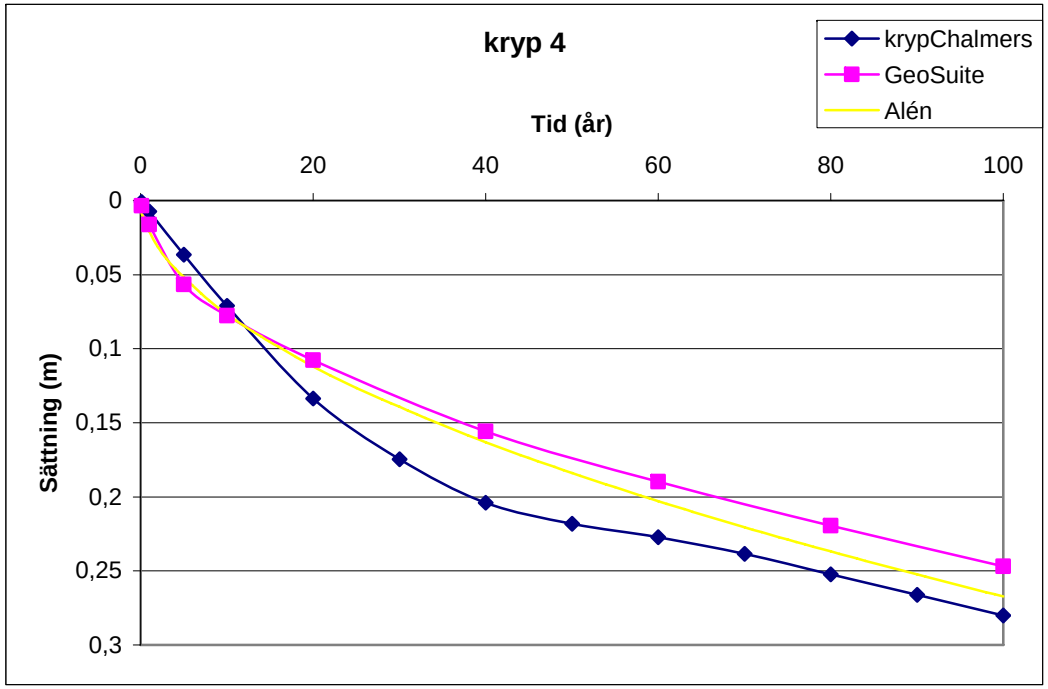

Töjning krypChalmers
Töjning (-)
-0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

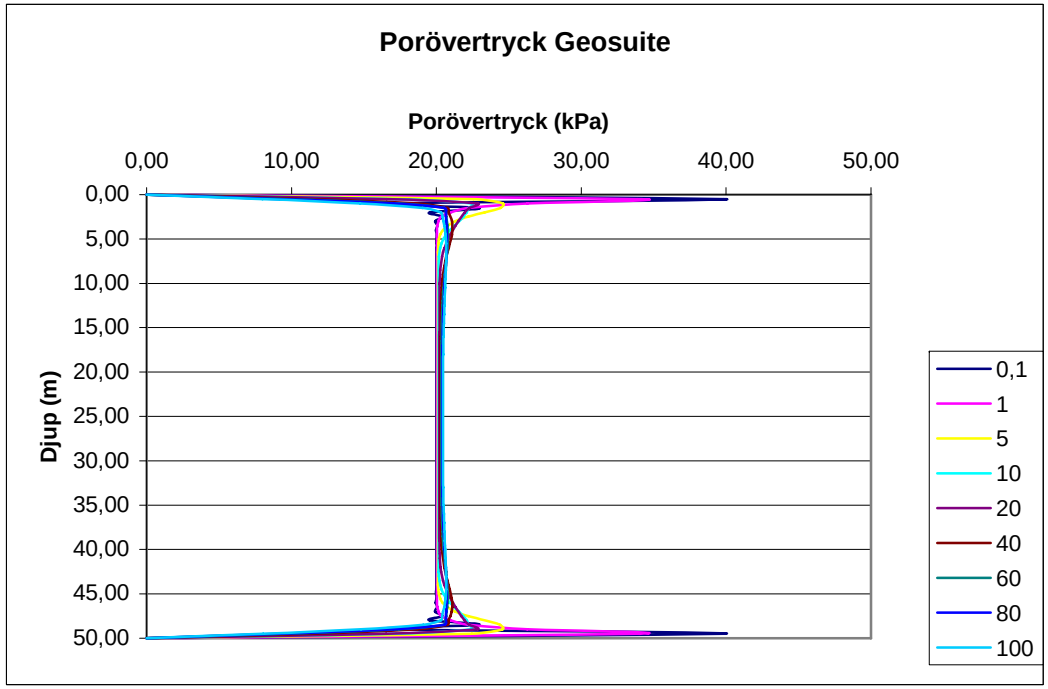

Porövertryck Alén
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
100

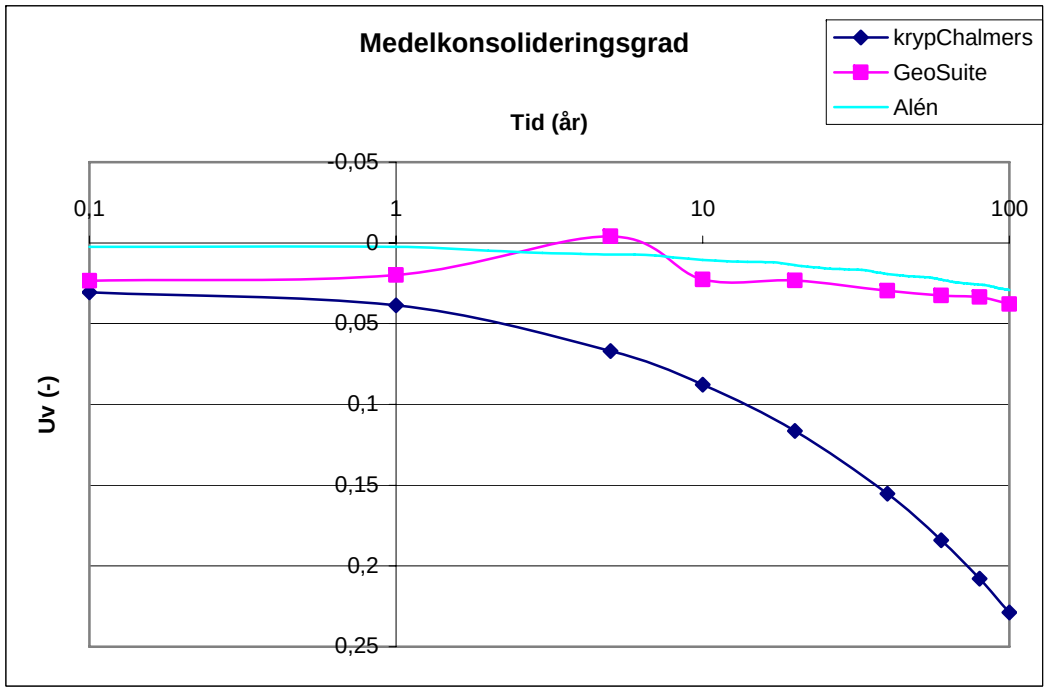

Sättning-övre halvan
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Sättning (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4

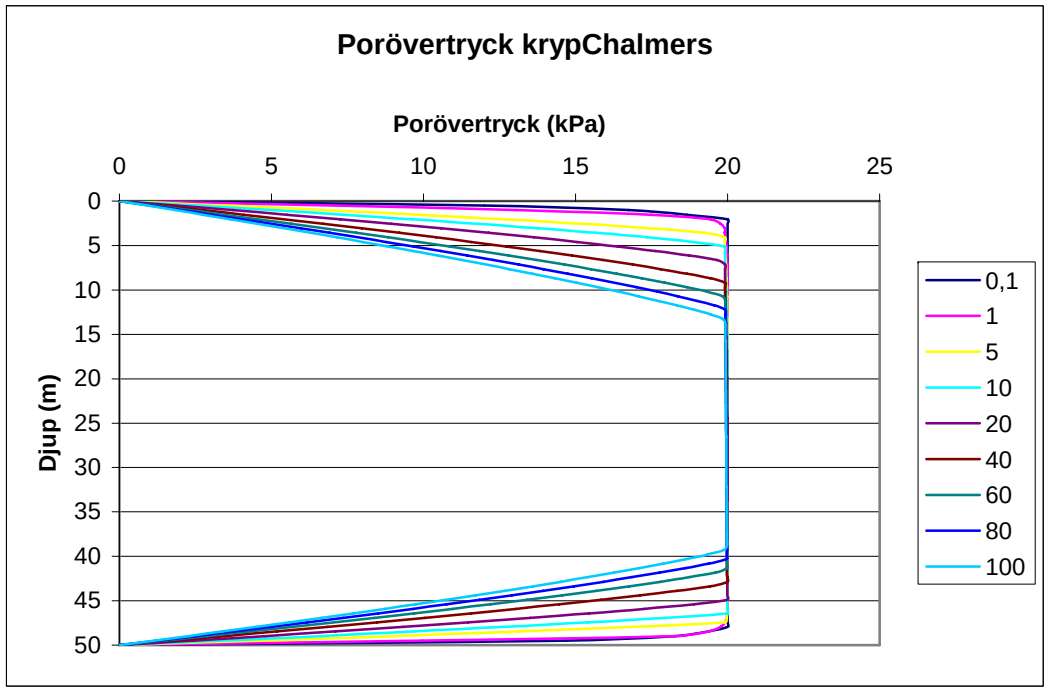

Kryp3 sättning-undre halvan
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Sättning (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8

8. kryp4

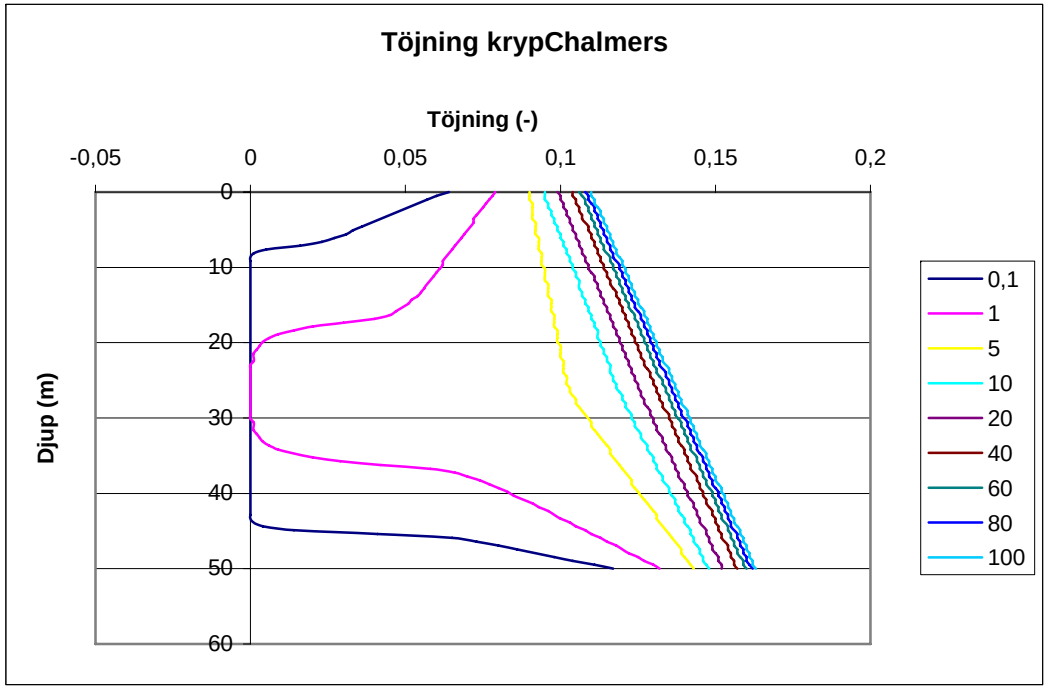

kryp 4
krypChalmers
GeoSuite
Alén
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3

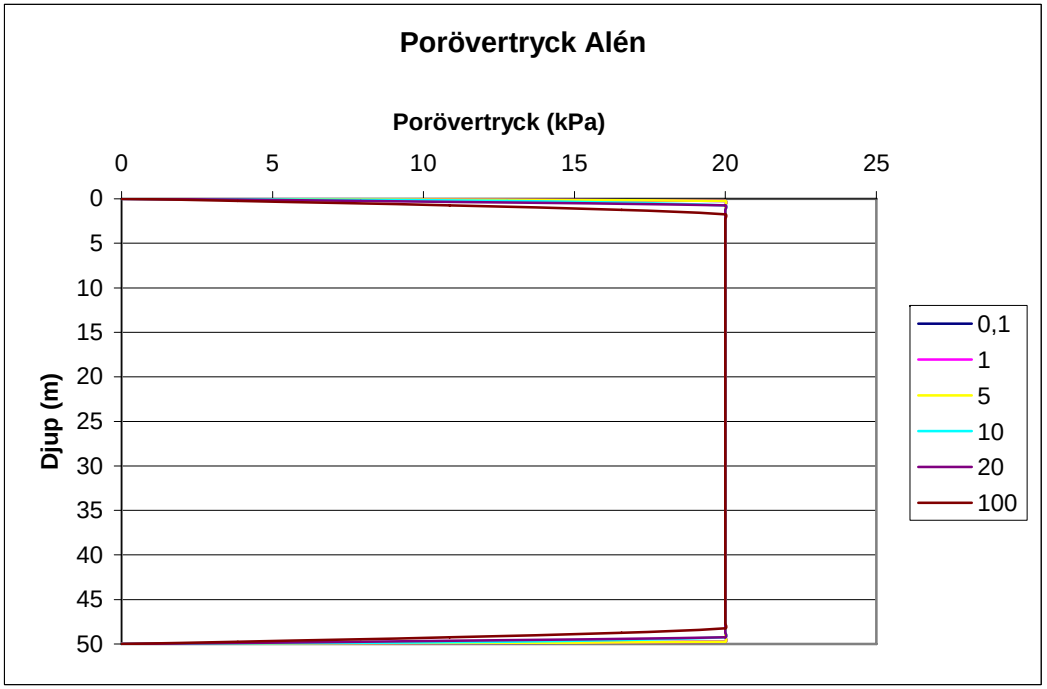

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100


Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Alén
Tid (år)
0,1
1
10
100
Uv (-)
0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25

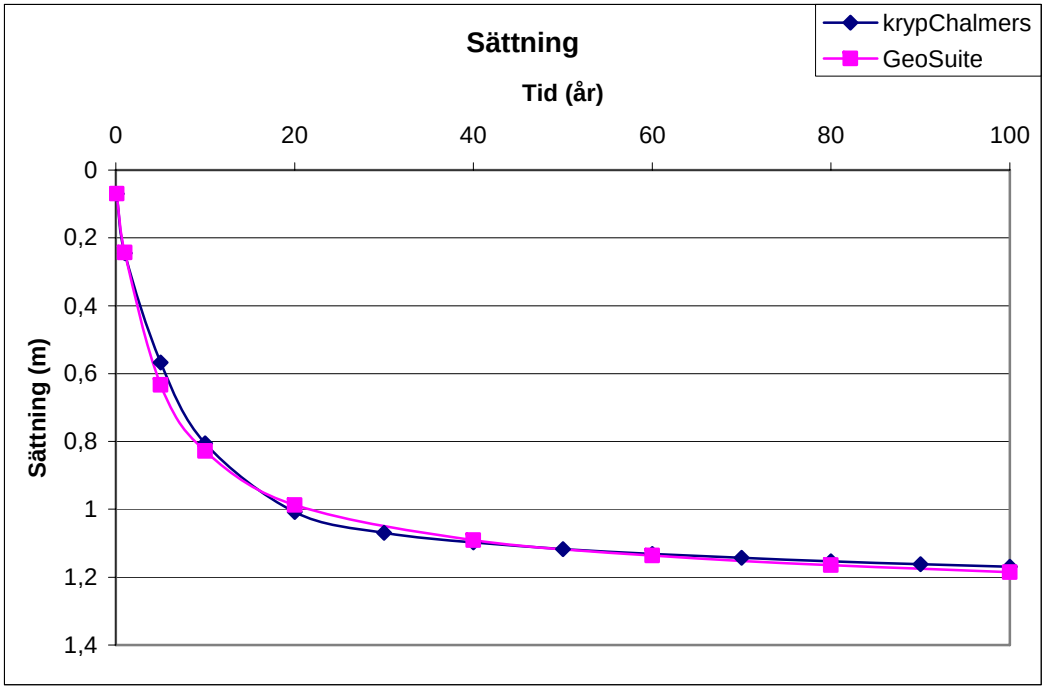

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

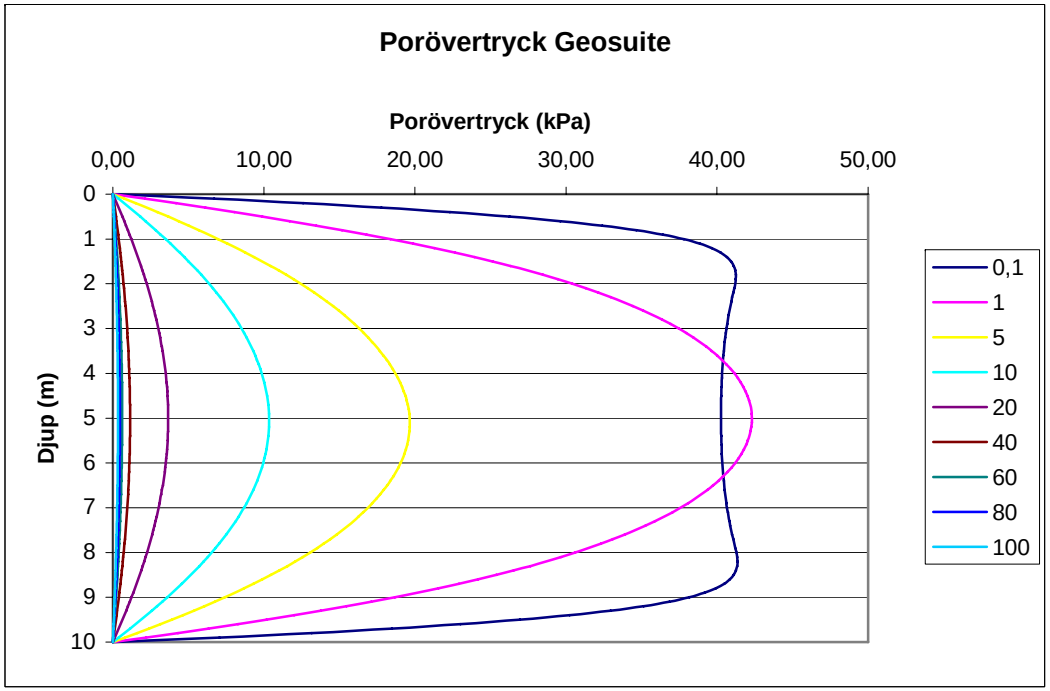
8. kryp4

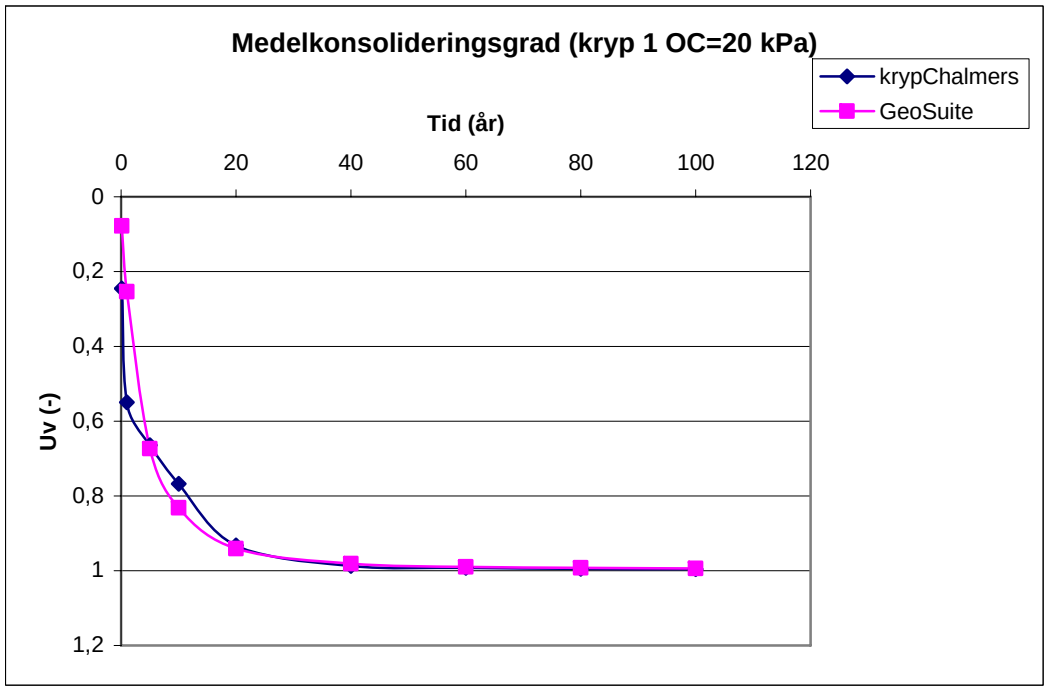

Töjning krypChalmers
Töjning (-)
-0,05
0
0,05
0,1
0,15
0,2
Djup (m)
0
10
20
30
40
50
60
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

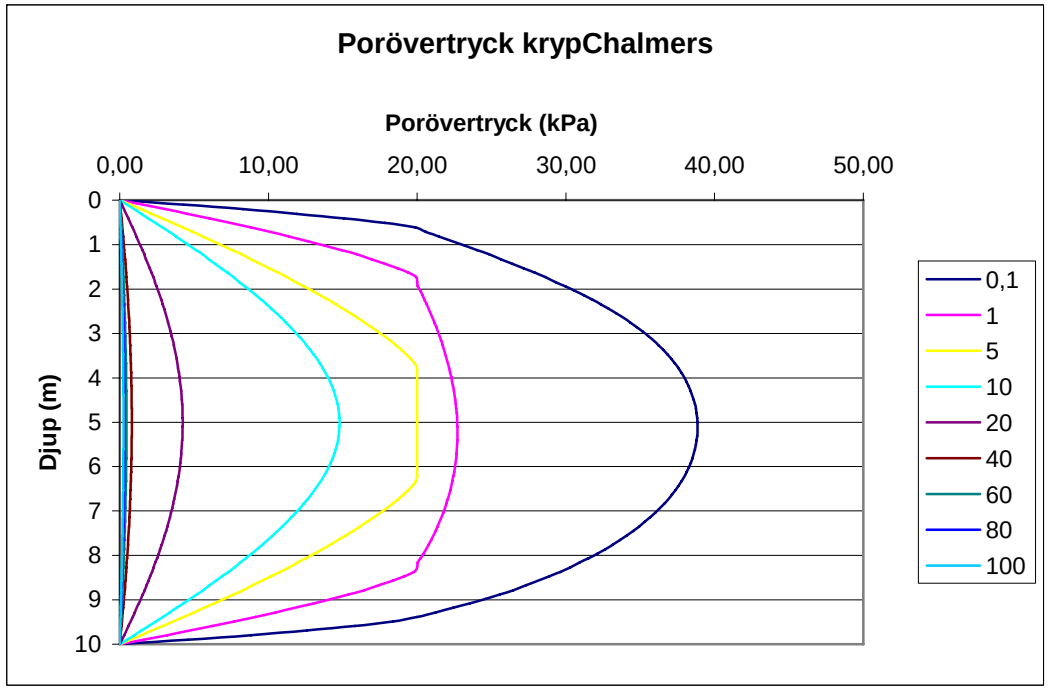

Porövertryck Alén
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
100

9. kryp1 OC20

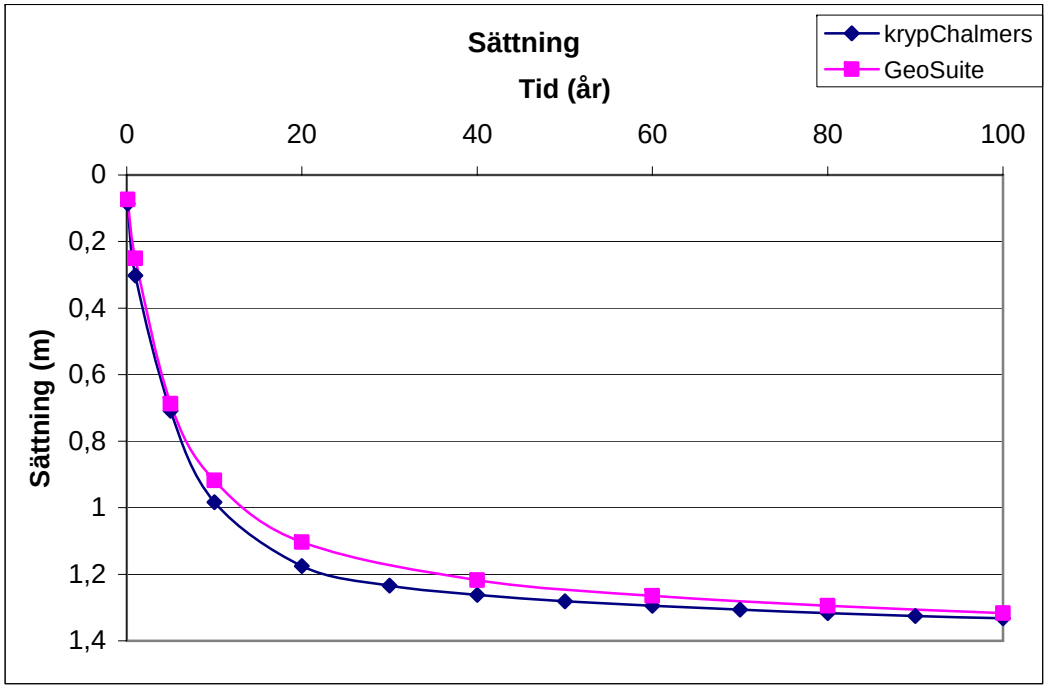

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4

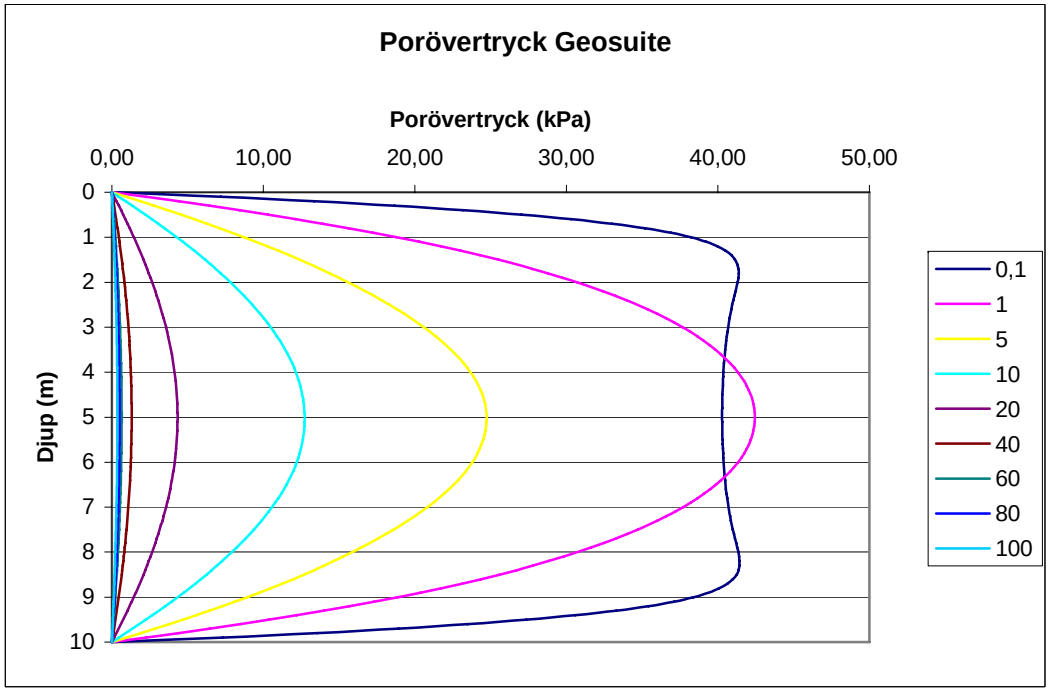

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

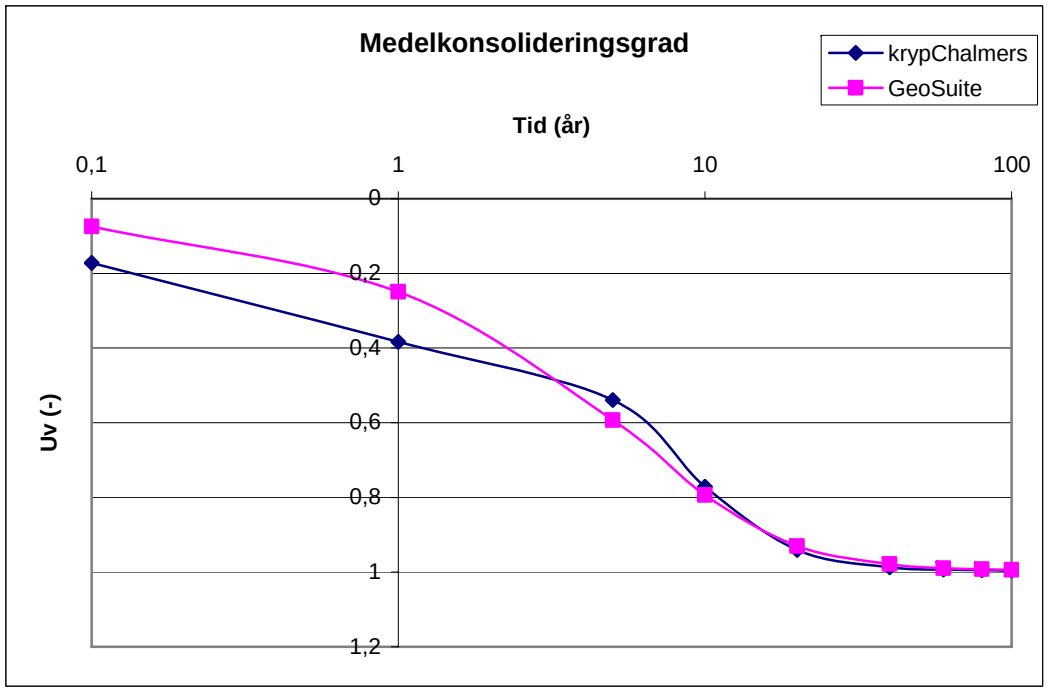

Medelkonsolideringsgrad (kryp 1 OC=20 kPa)
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
120
Uv (-)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2

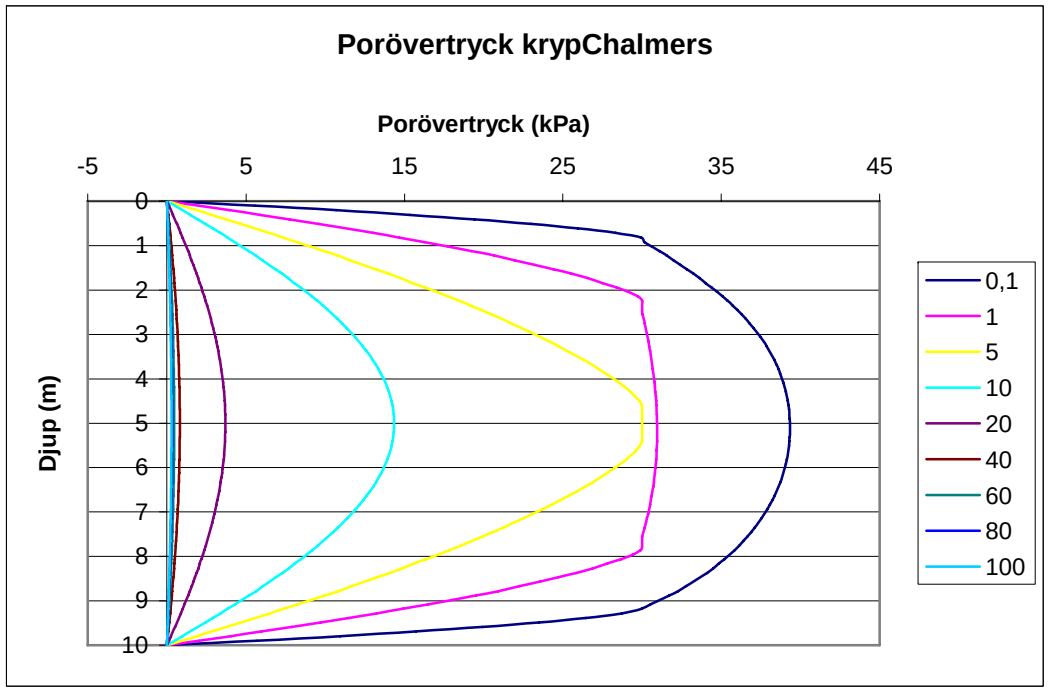

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

10. kryp1 OC10

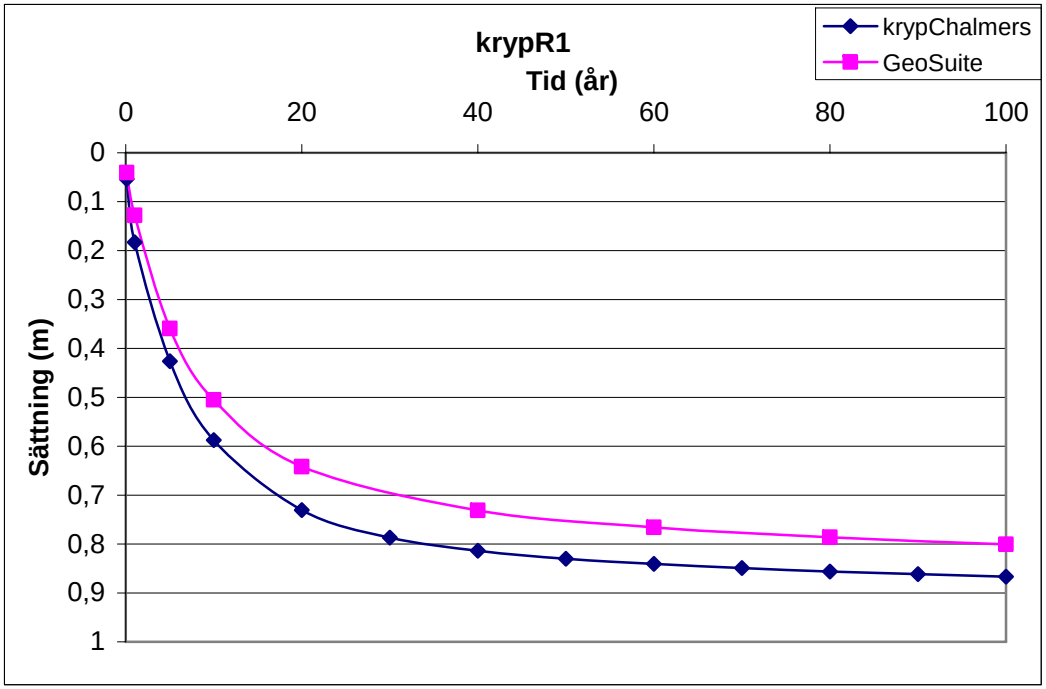


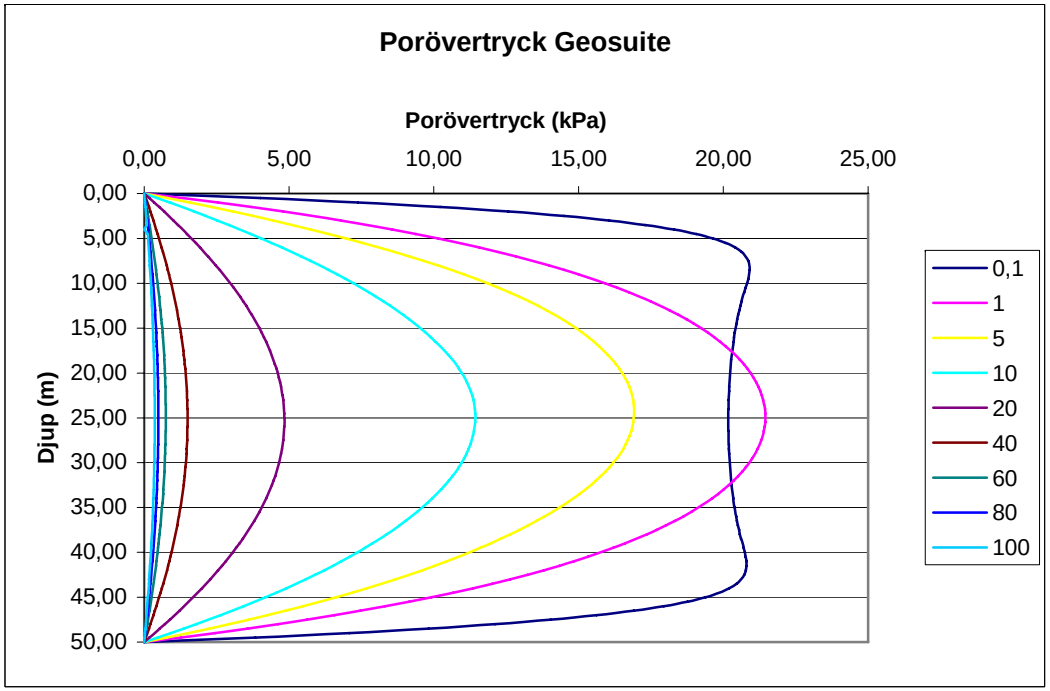


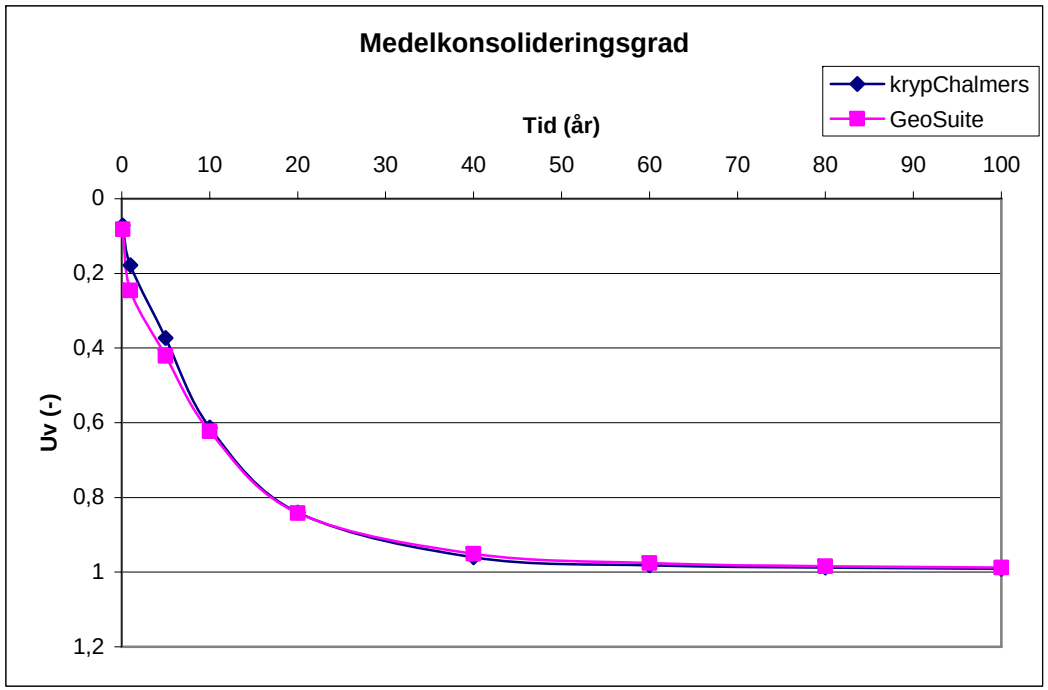


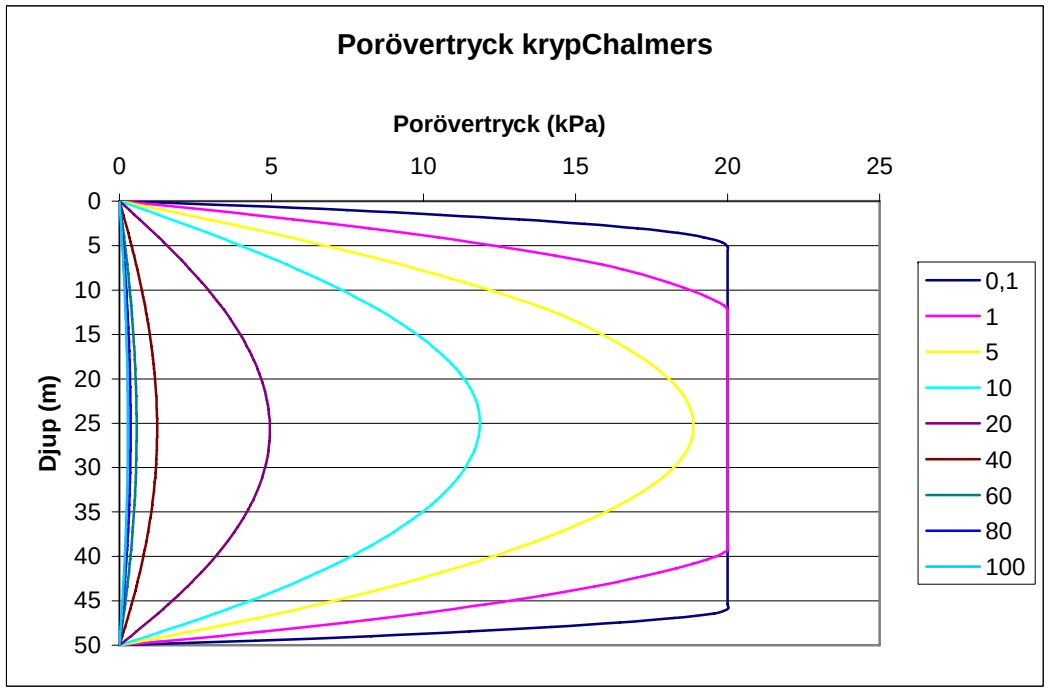


11. krypR1

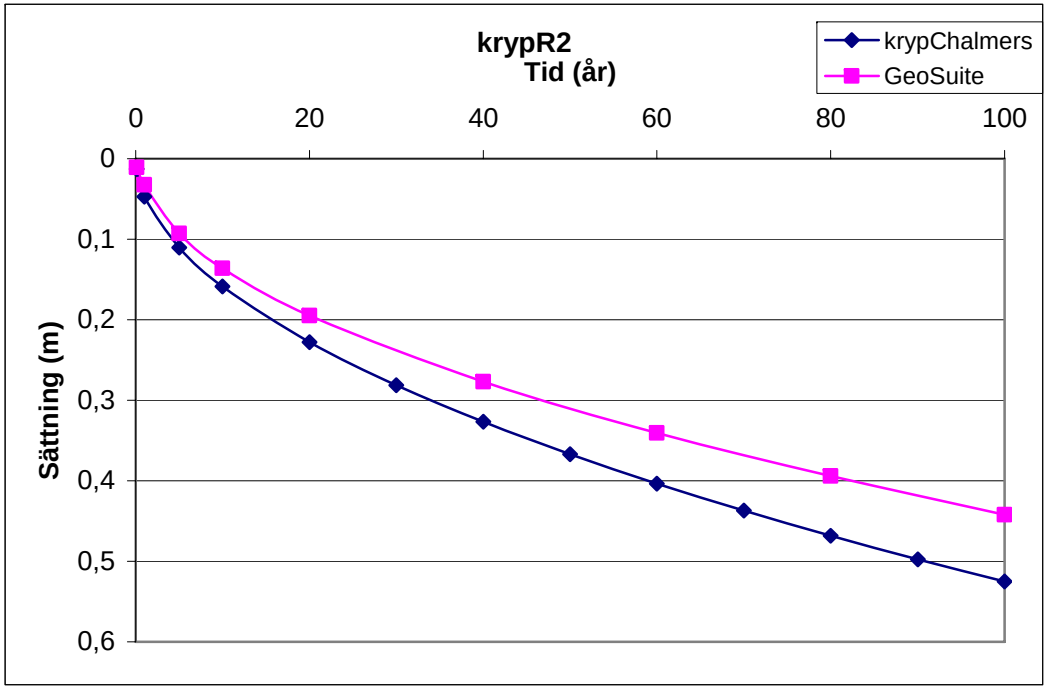

krypR1
Tid (år)
krypChalmers
GeoSuite
Sättning (m)
0
20
40
60
80
100
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1

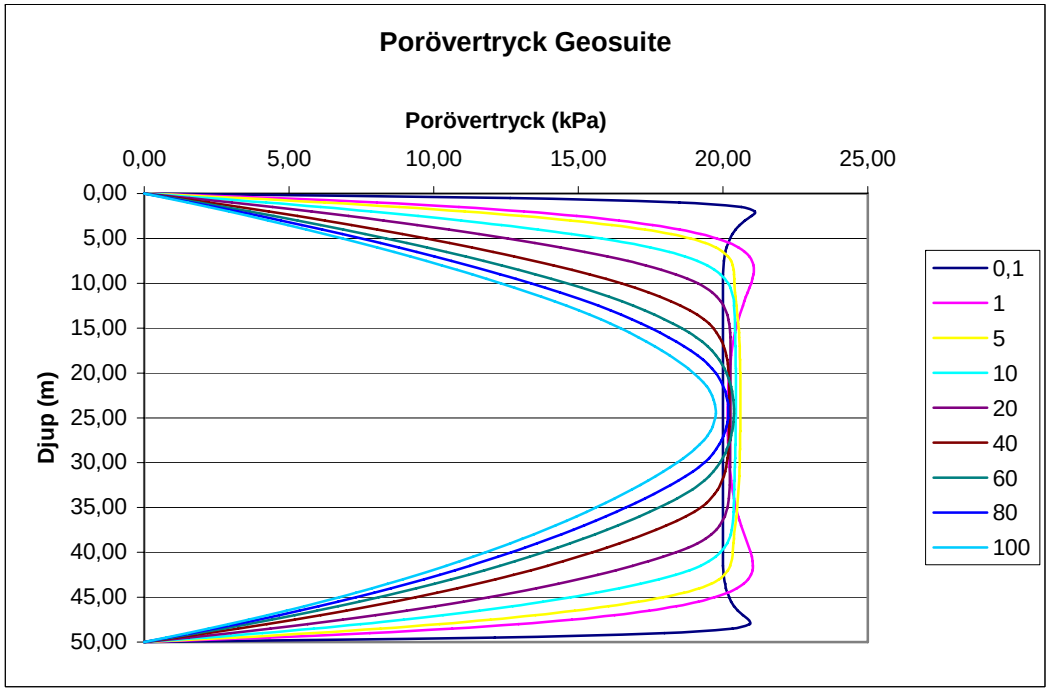

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

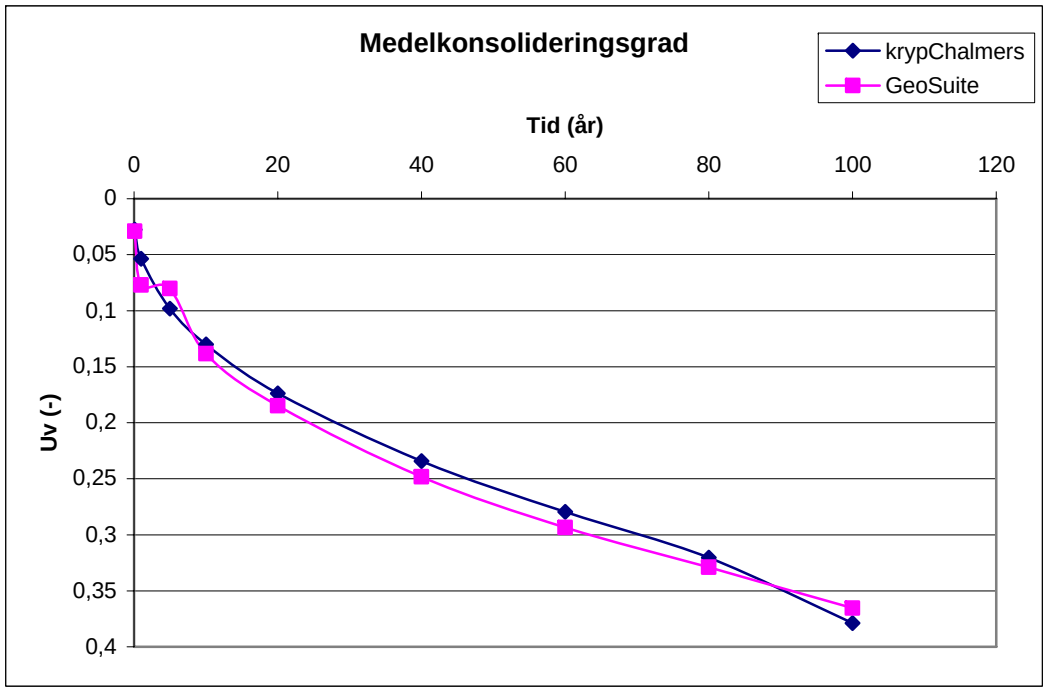

Medelkonsolideringsgrad
Tid (år)
krypChalmers
GeoSuite
Uv (-)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2

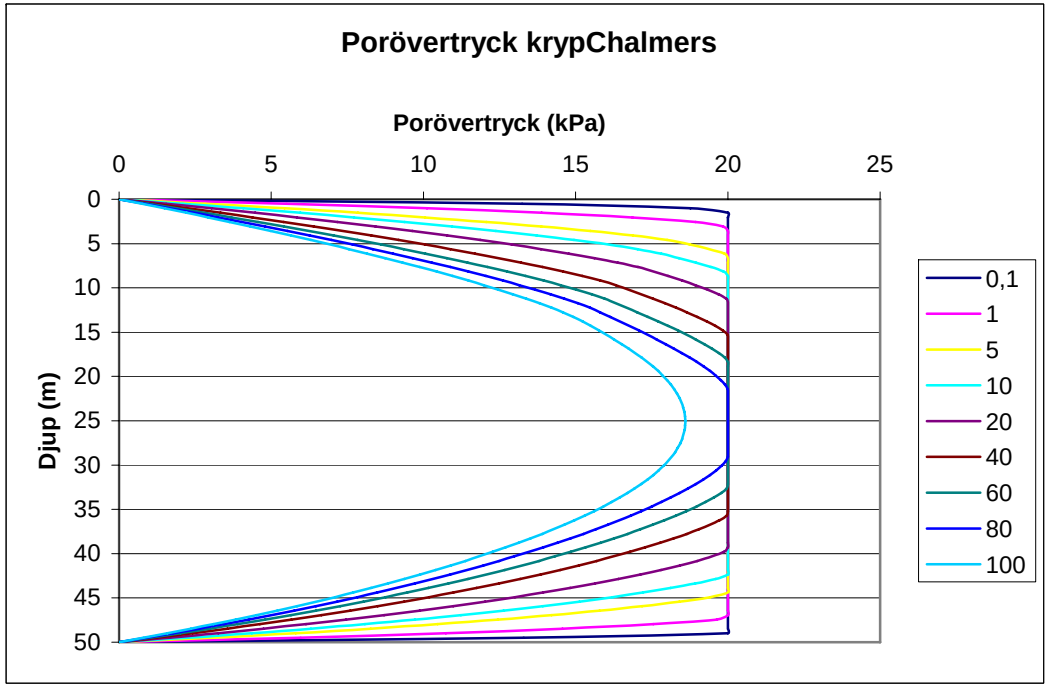

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

12. krypR2

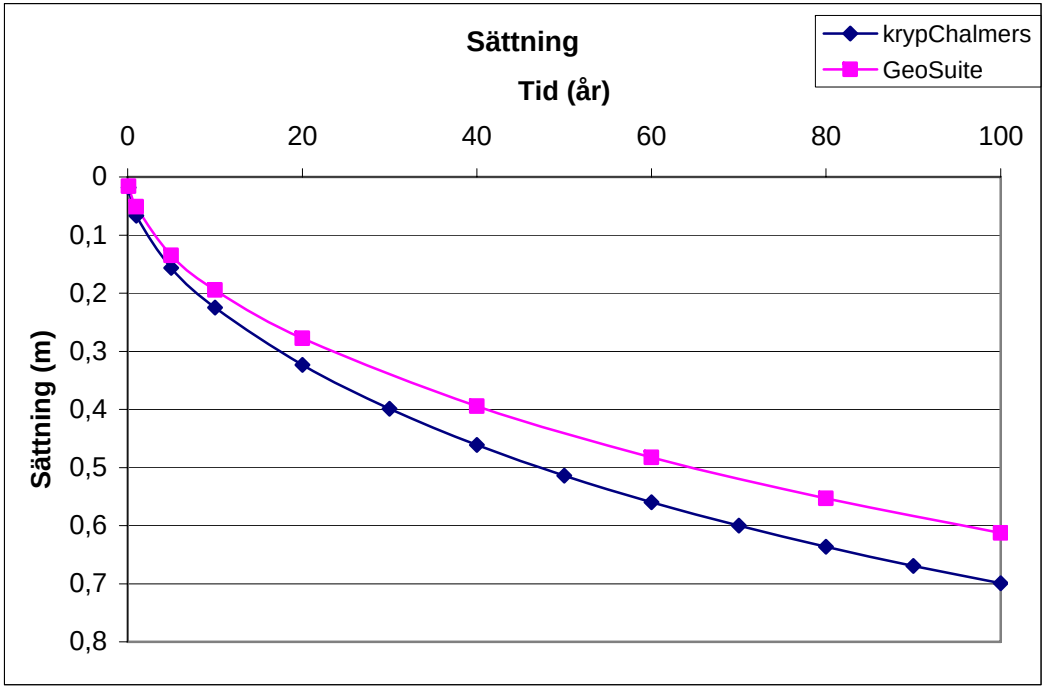

krypR2
Tid (år)
krypChalmers
GeoSuite
Sättning (m)
0
20
40
60
80
100
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6

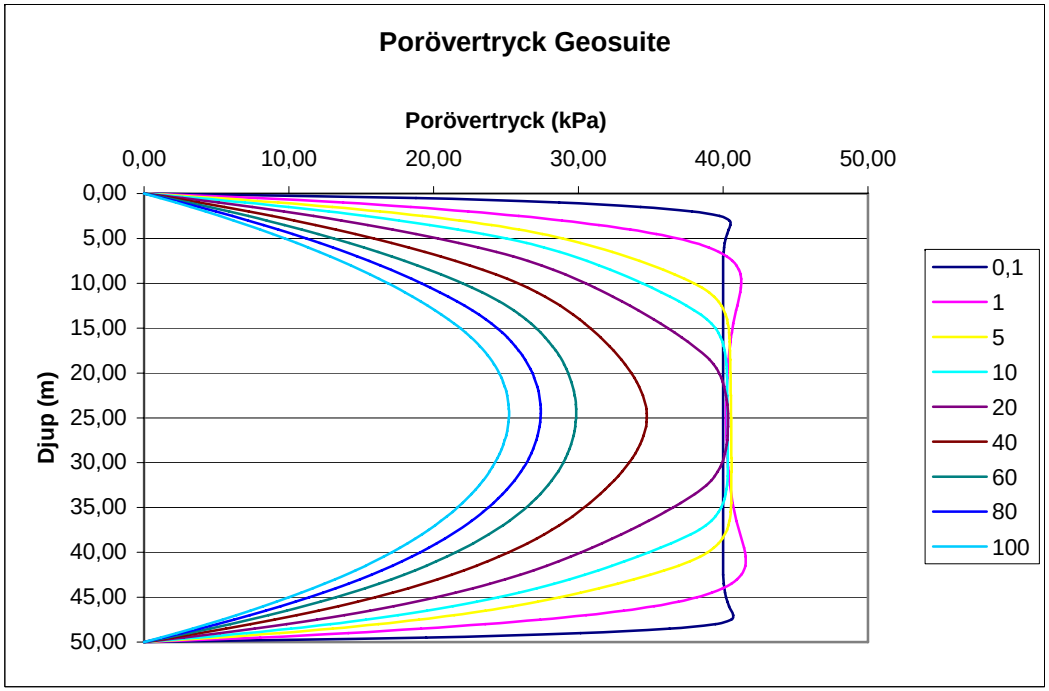

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

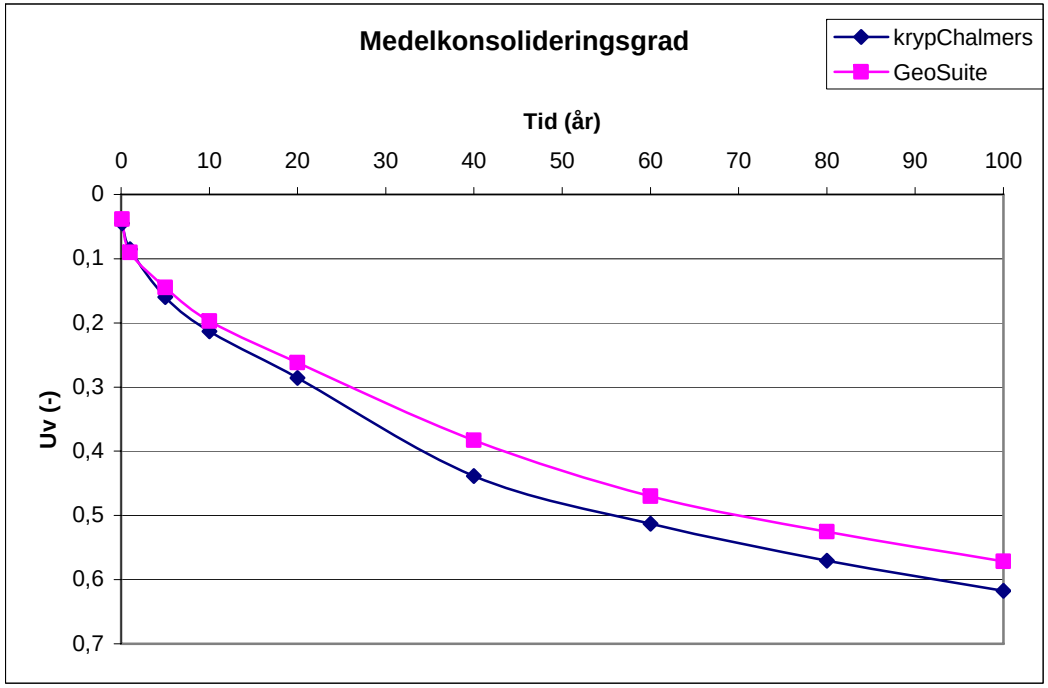

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
120
Uv (-)
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4

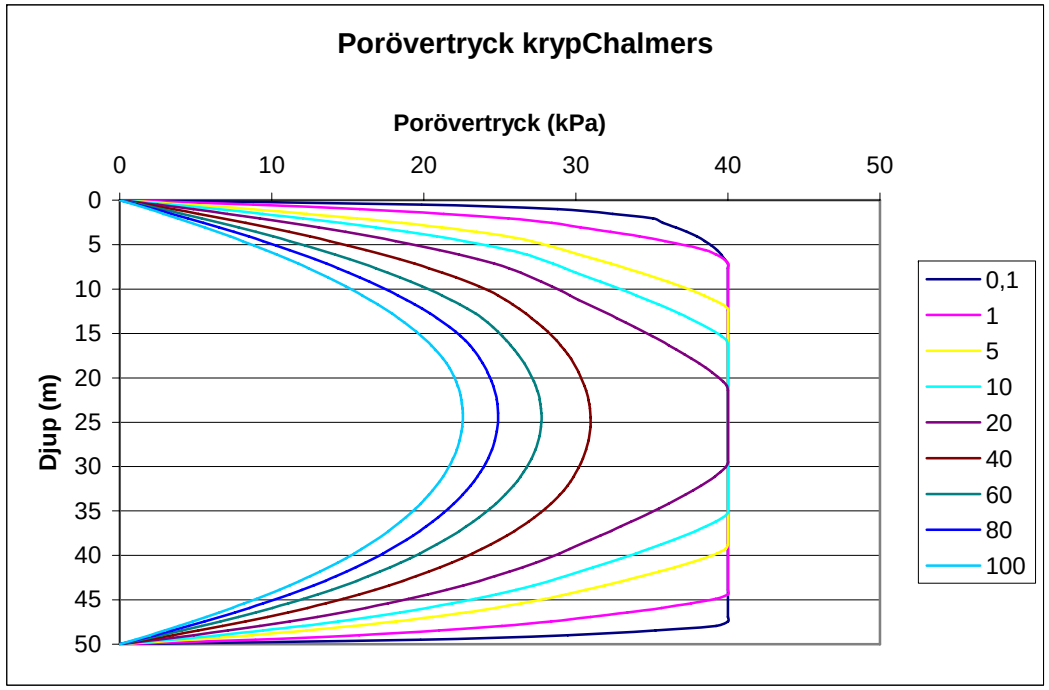

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

13. krypR3

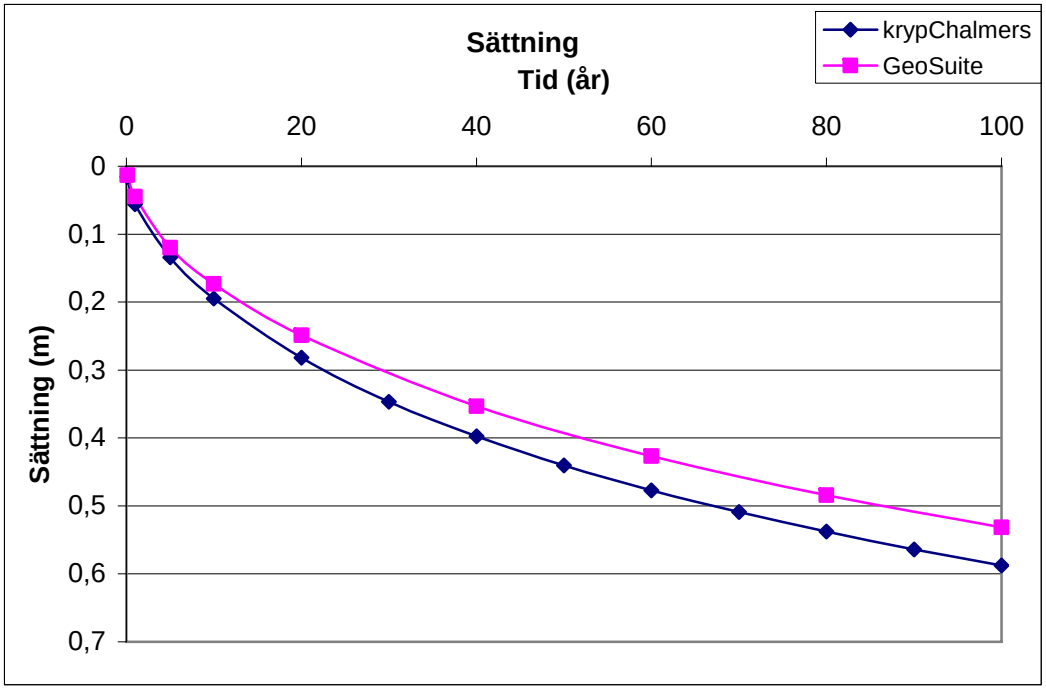

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8

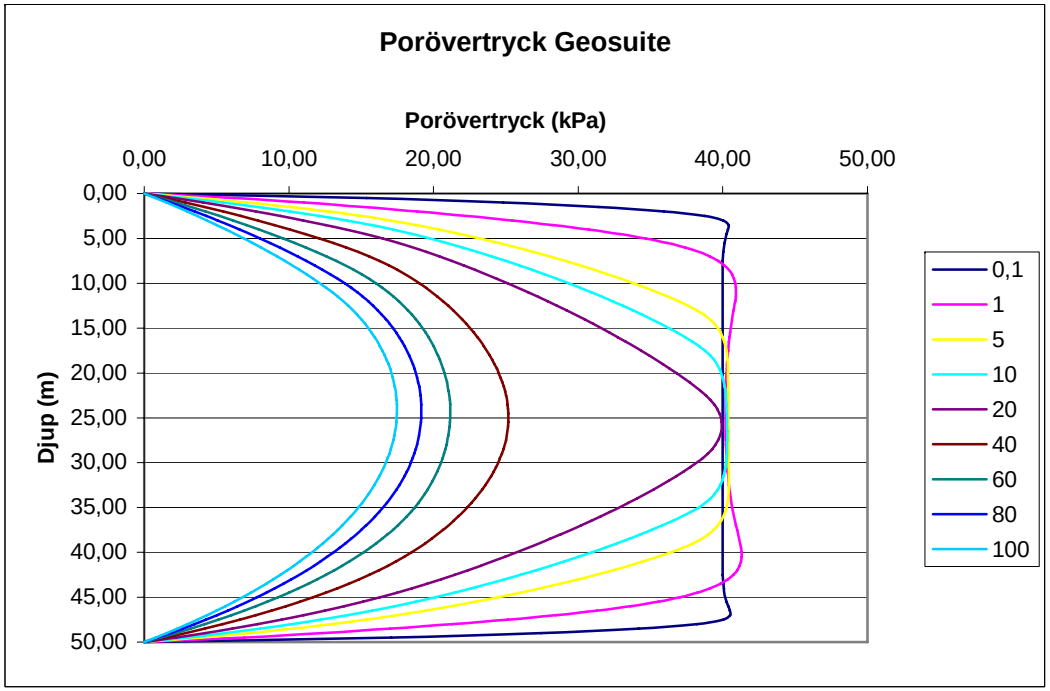

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

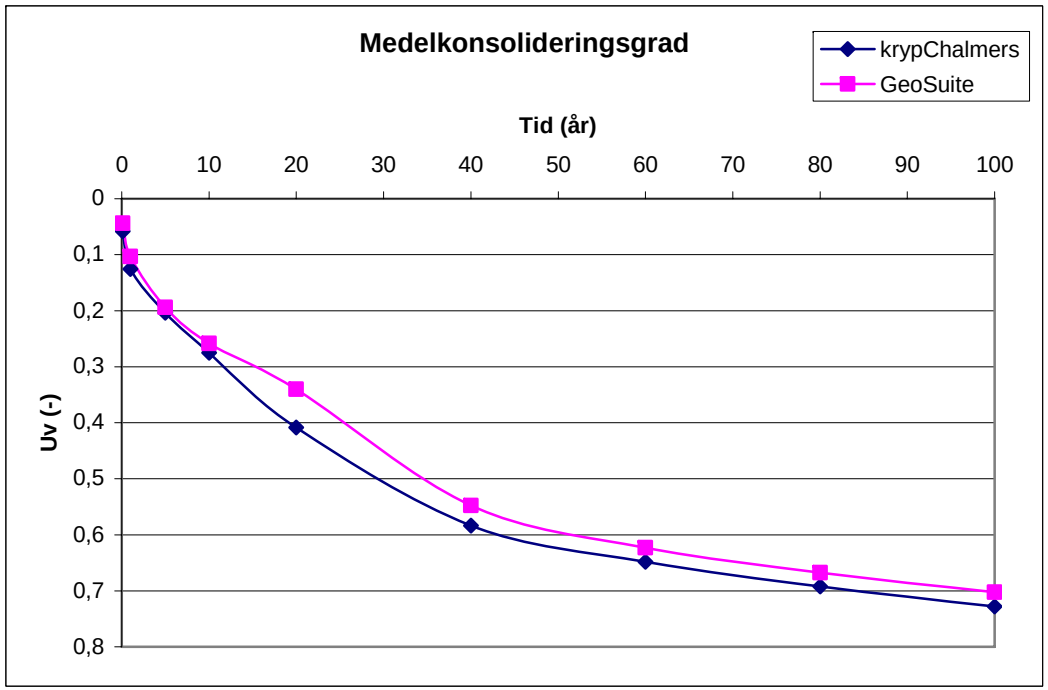

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Uv (-)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7

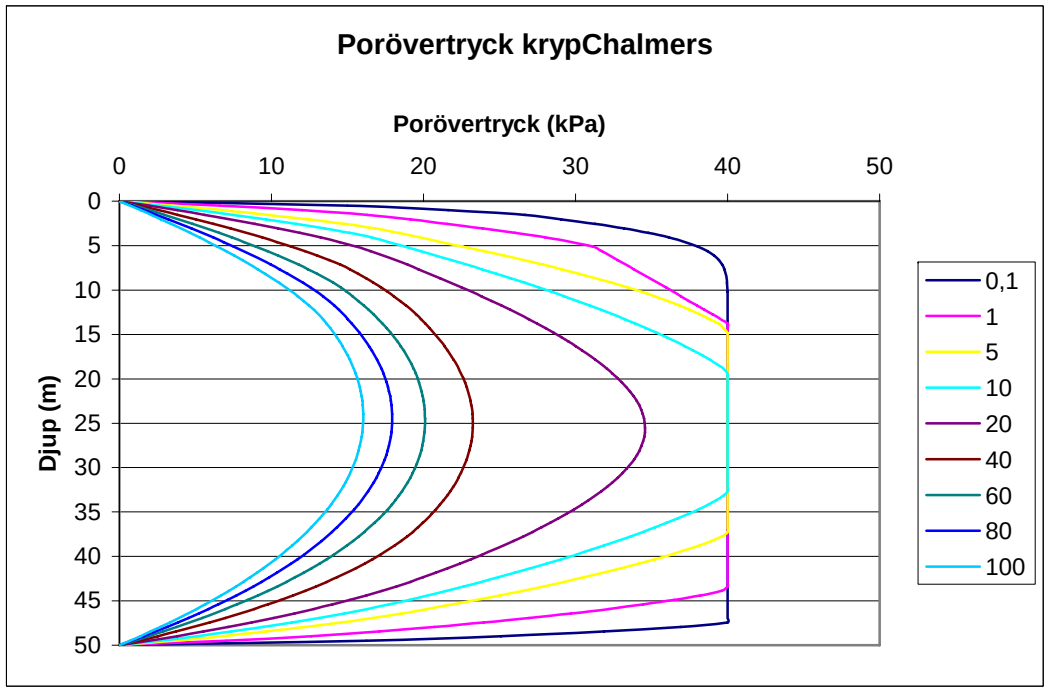

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
10
20
30
40
50
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

14. krypR4

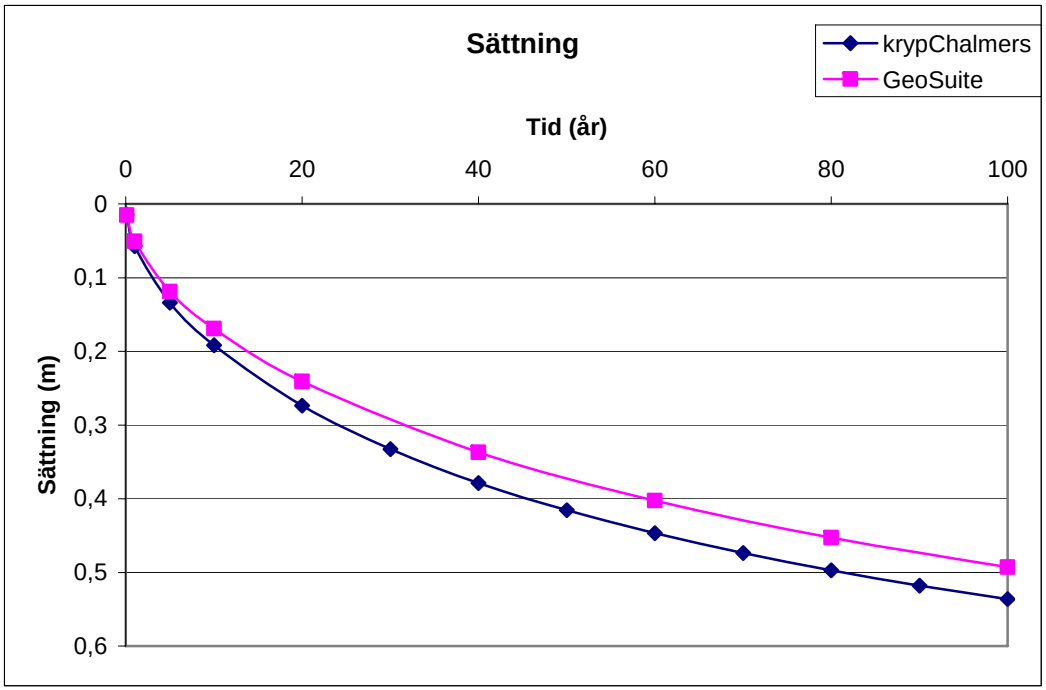

Sättning
Tid (år)
krypChalmers
GeoSuite
Sättning (m)
0
20
40
60
80
100
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7

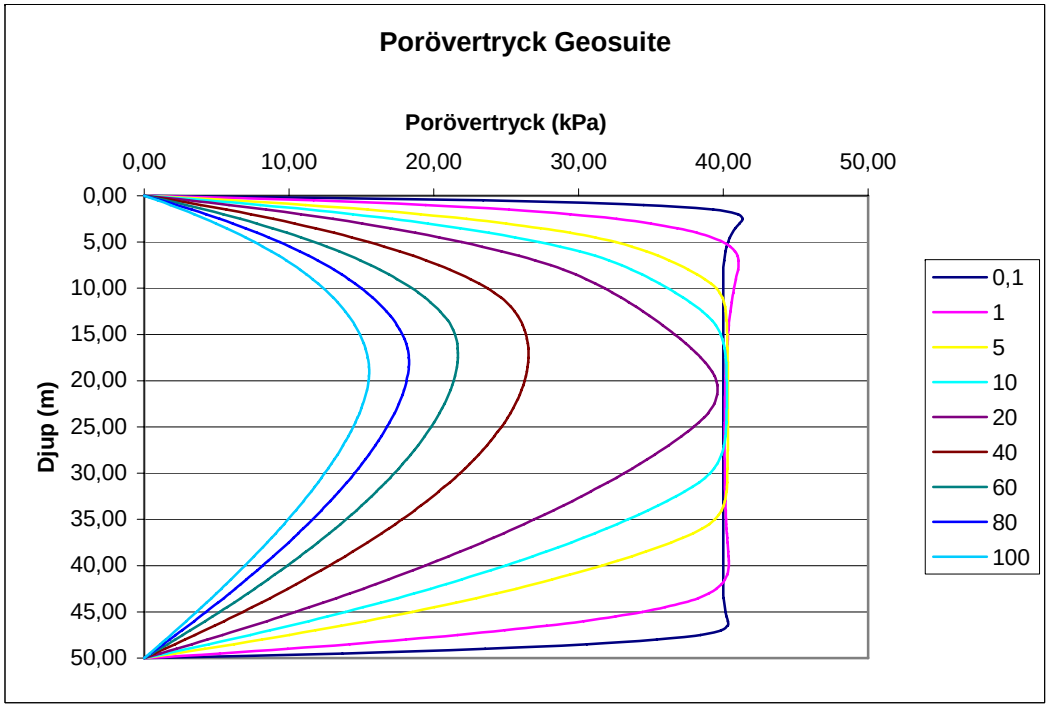

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

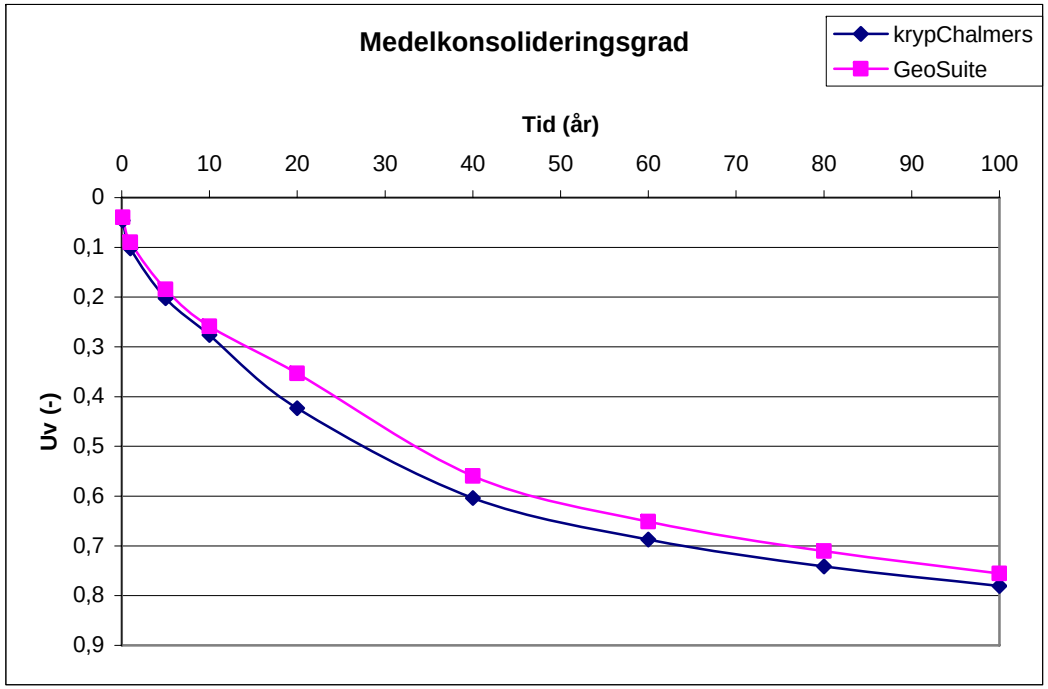

Medelkonsolideringsgrad
Tid (år)
krypChalmers
GeoSuite
Uv (-)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8

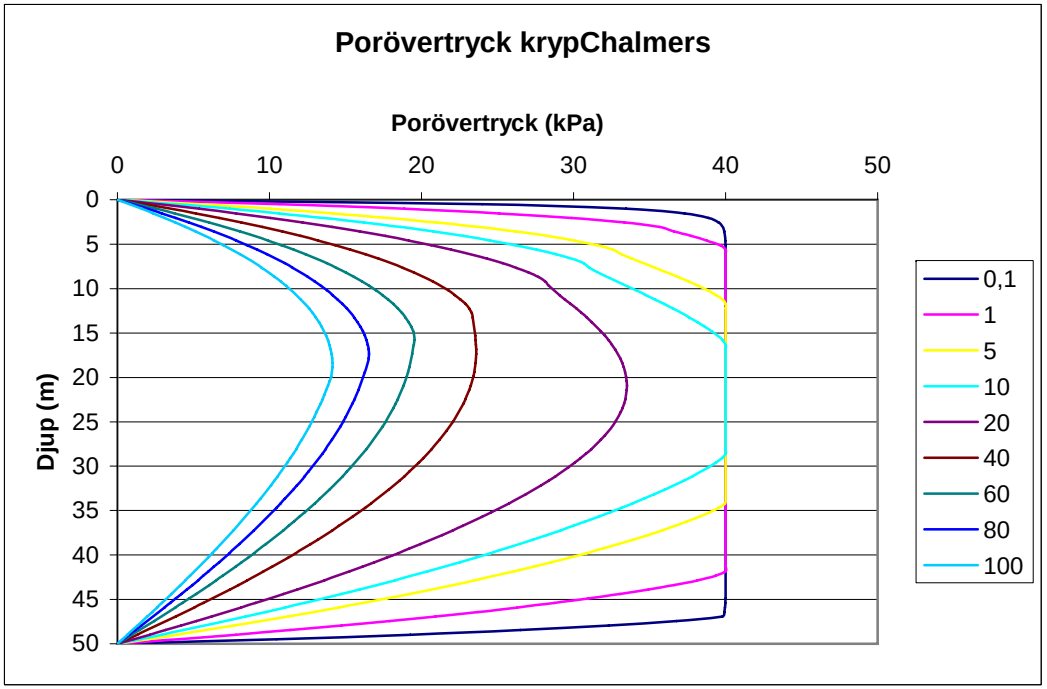

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
10
20
30
40
50
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

15. krypR5

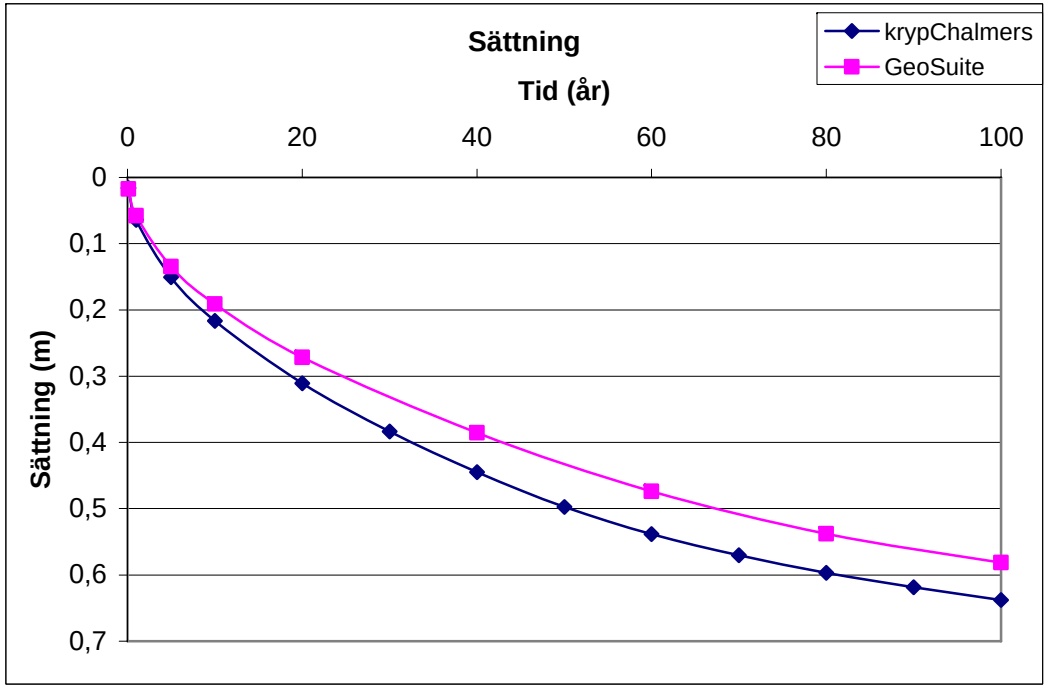

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6

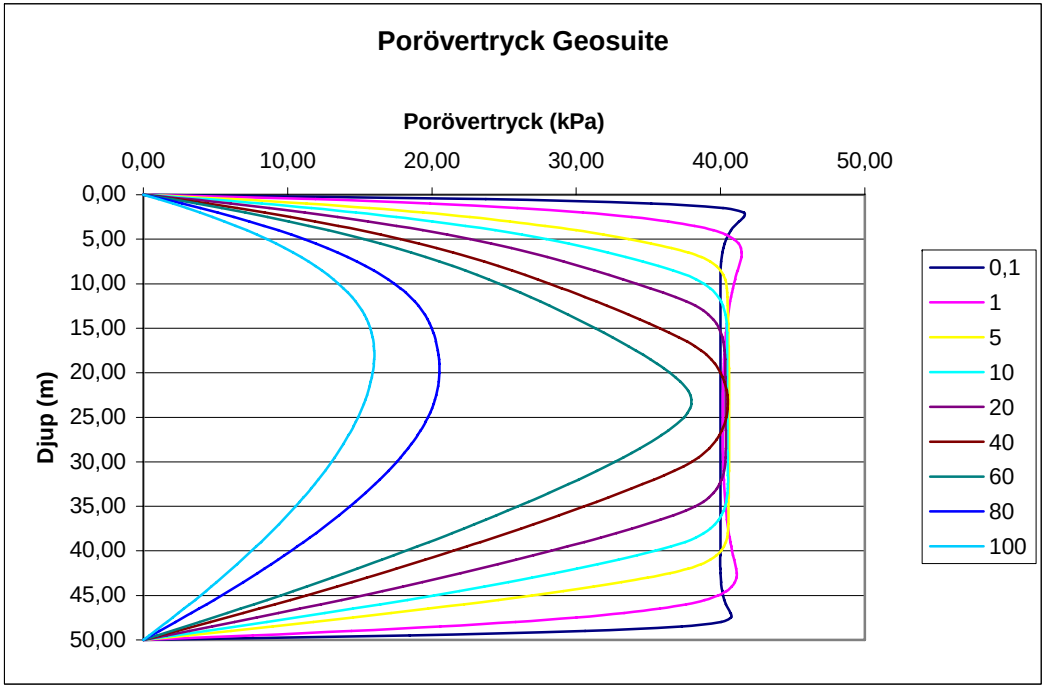

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

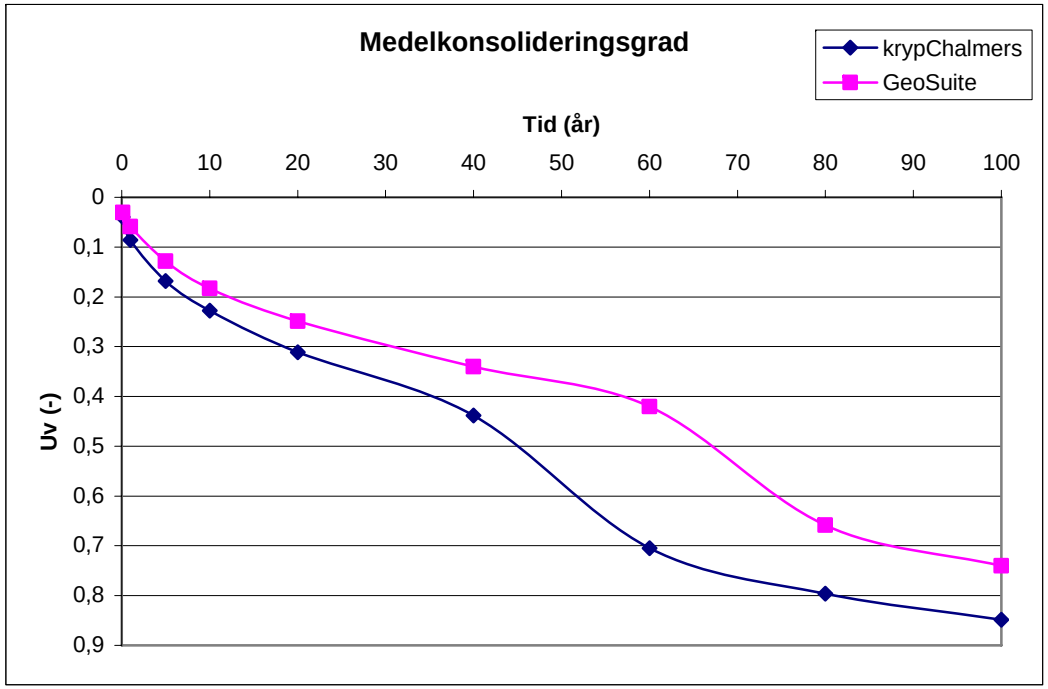

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Uv (-)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9

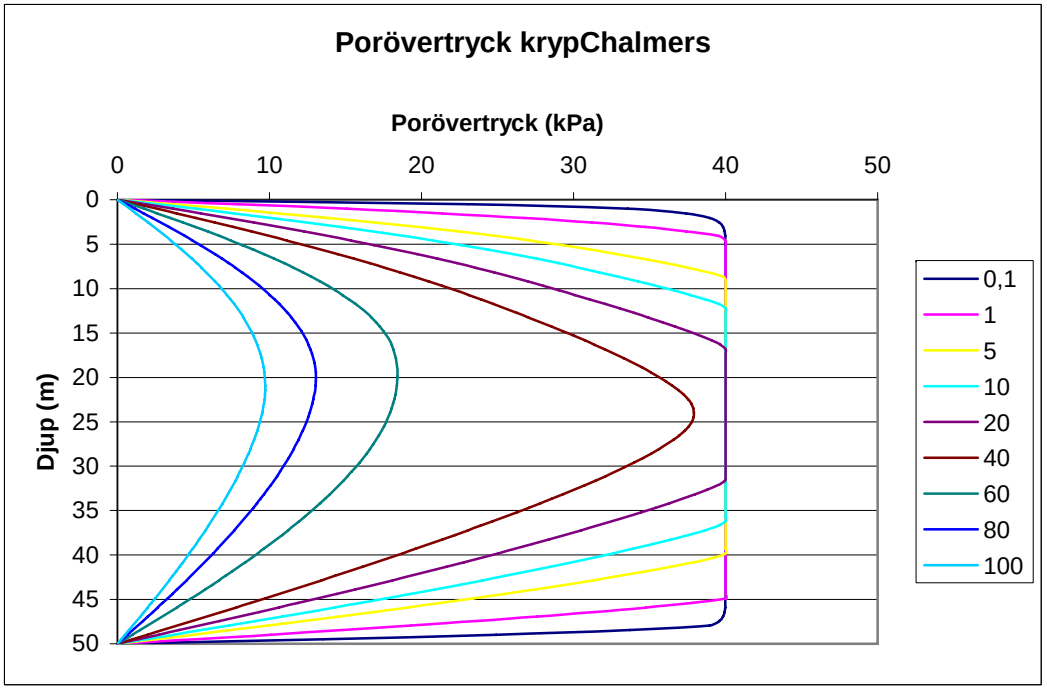

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
10
20
30
40
50
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

16. krypR6

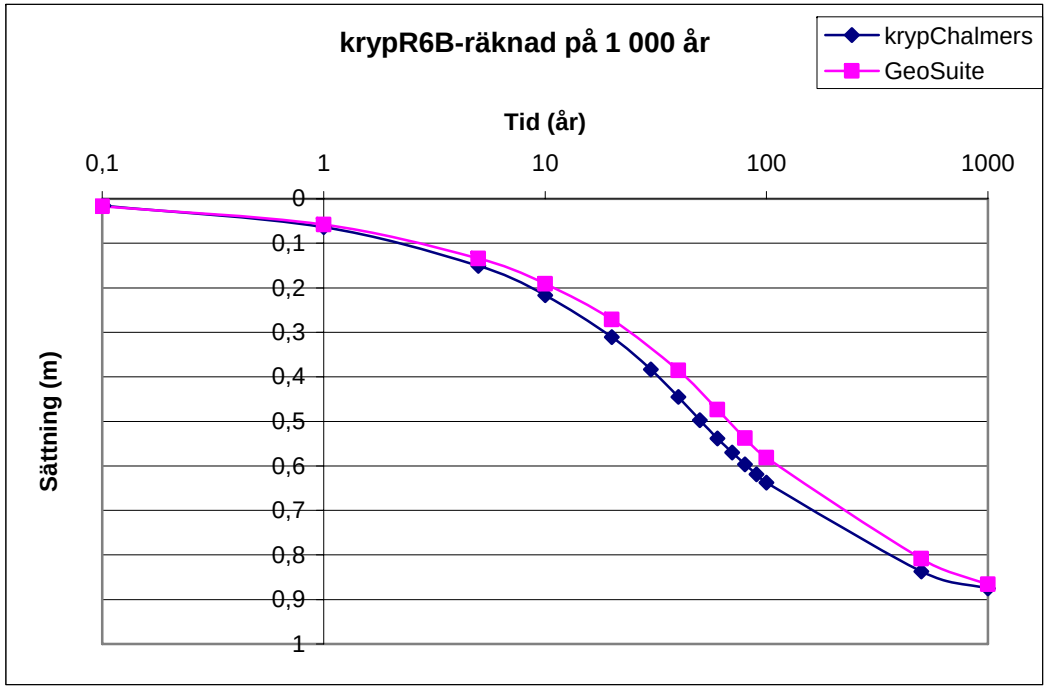

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7

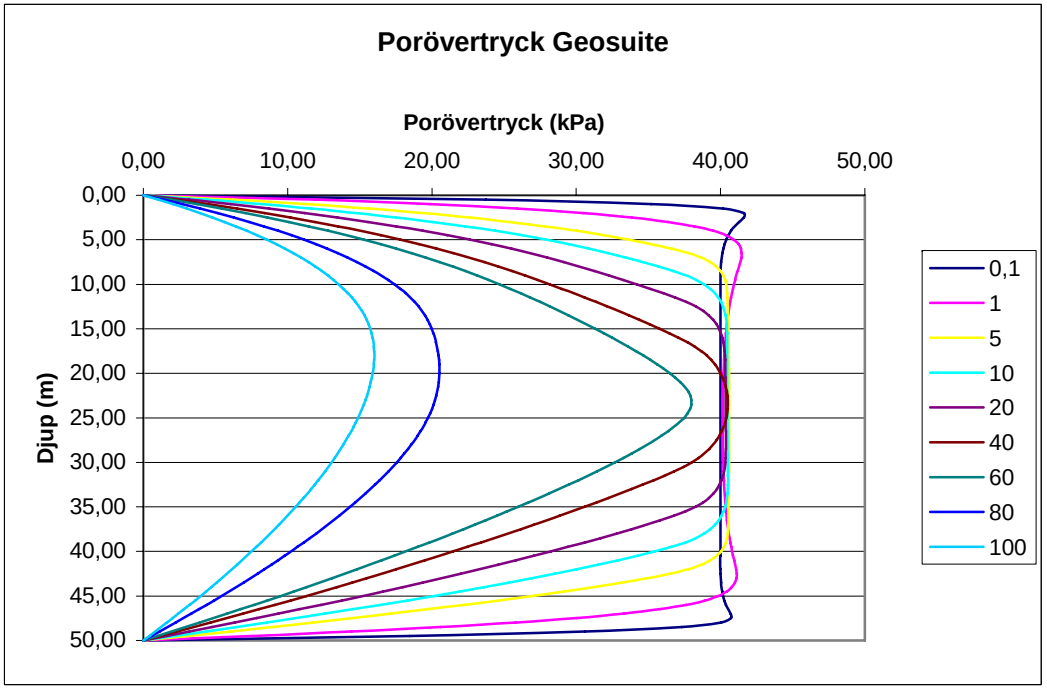

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

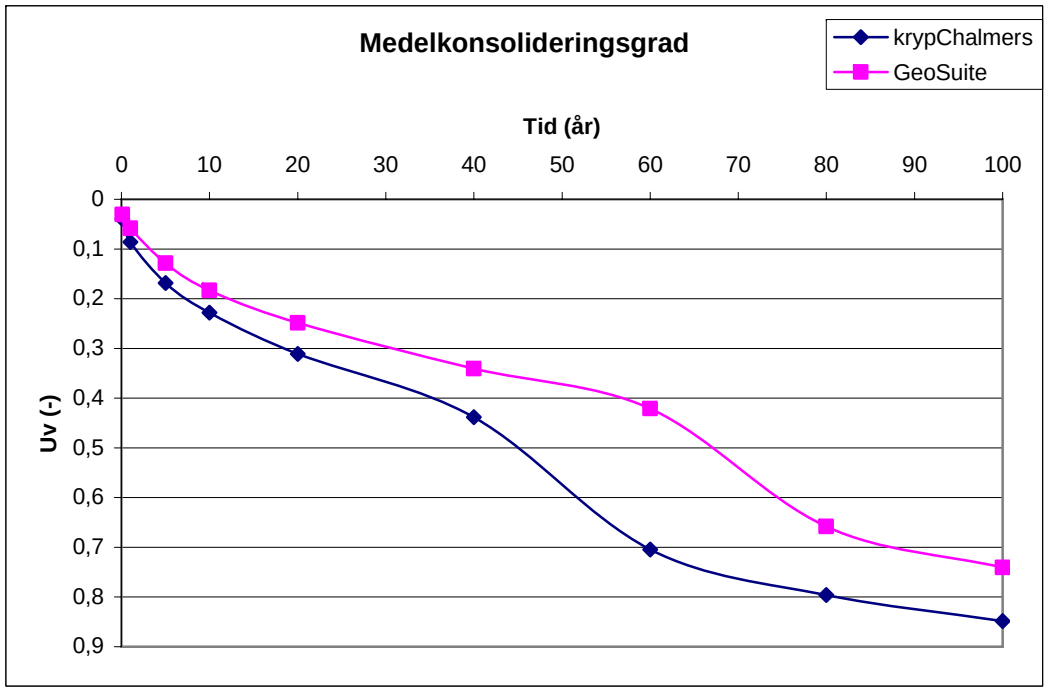

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Uv (-)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9

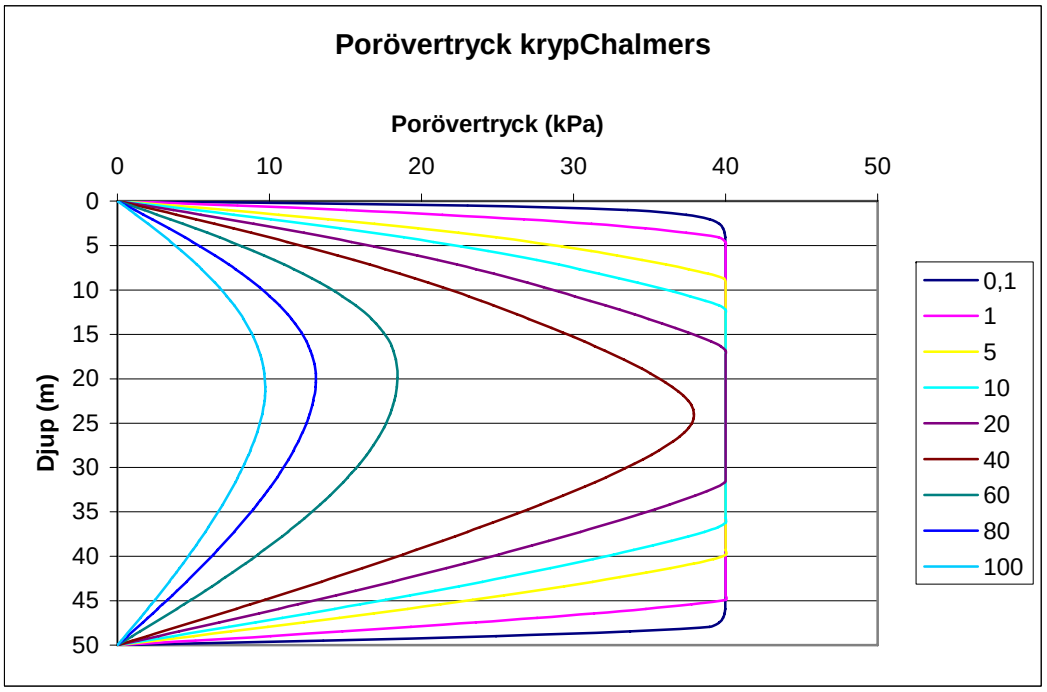

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
10
20
30
40
50
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

16. krypR6

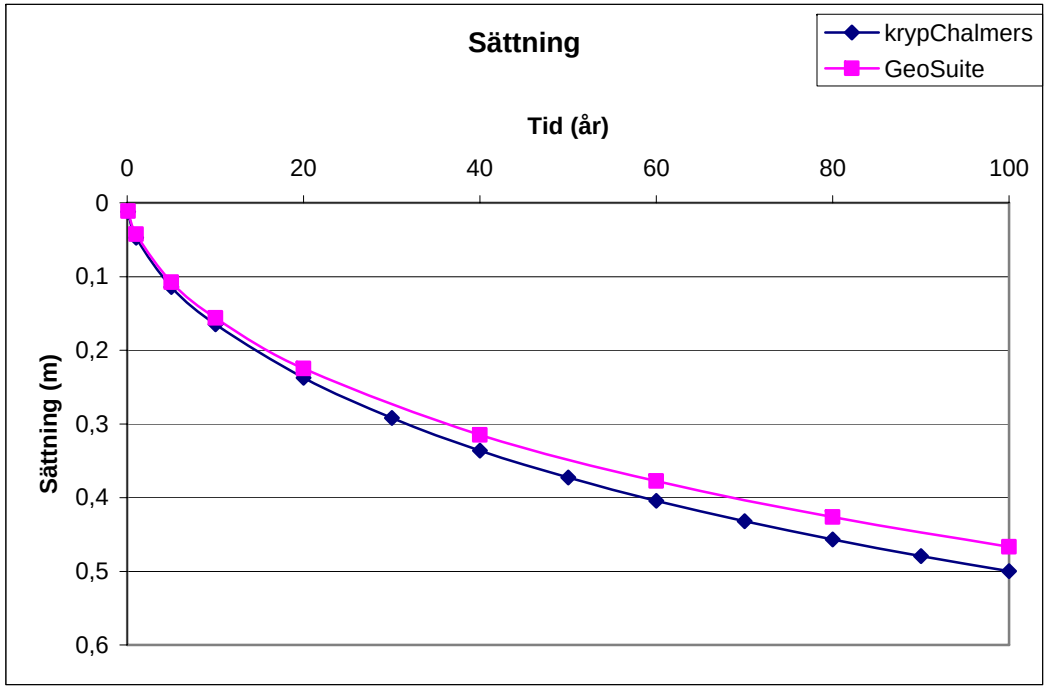

krypR6B-räknad på 1 000 år
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0,1
1
10
100
1000
Sättning (m)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1

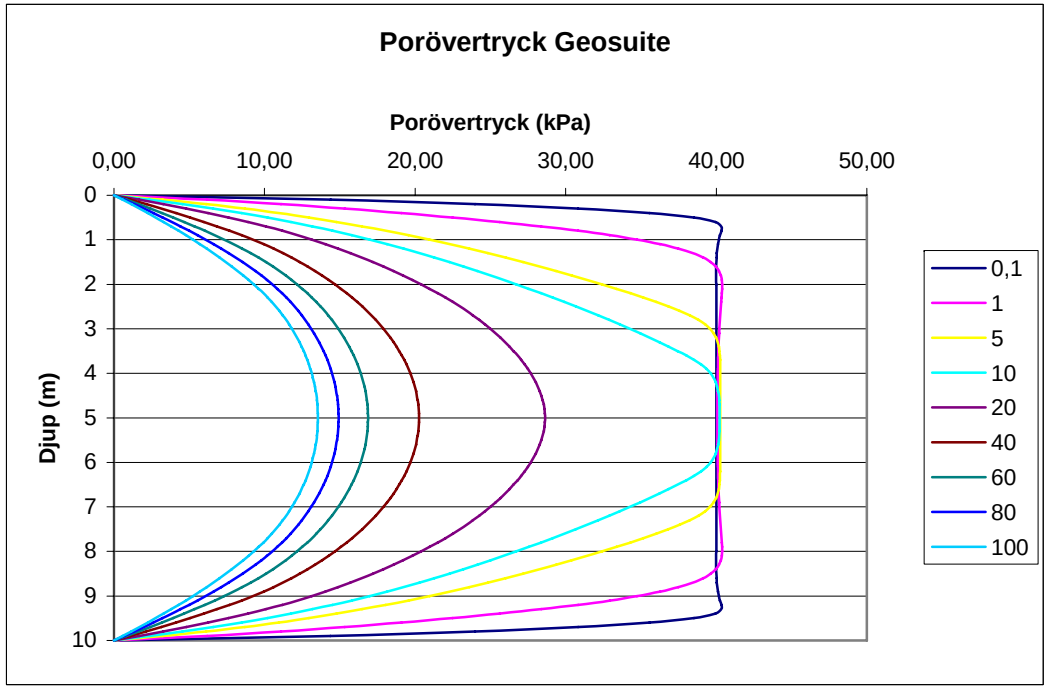

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
30,00
35,00
40,00
45,00
50,00
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

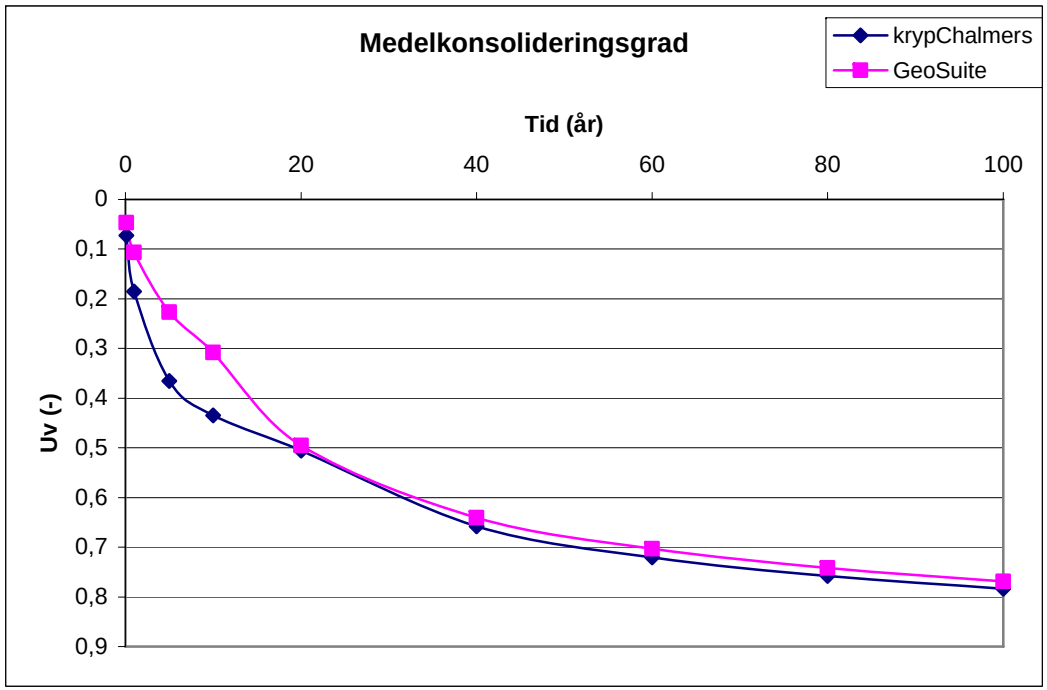

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Uv (-)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9

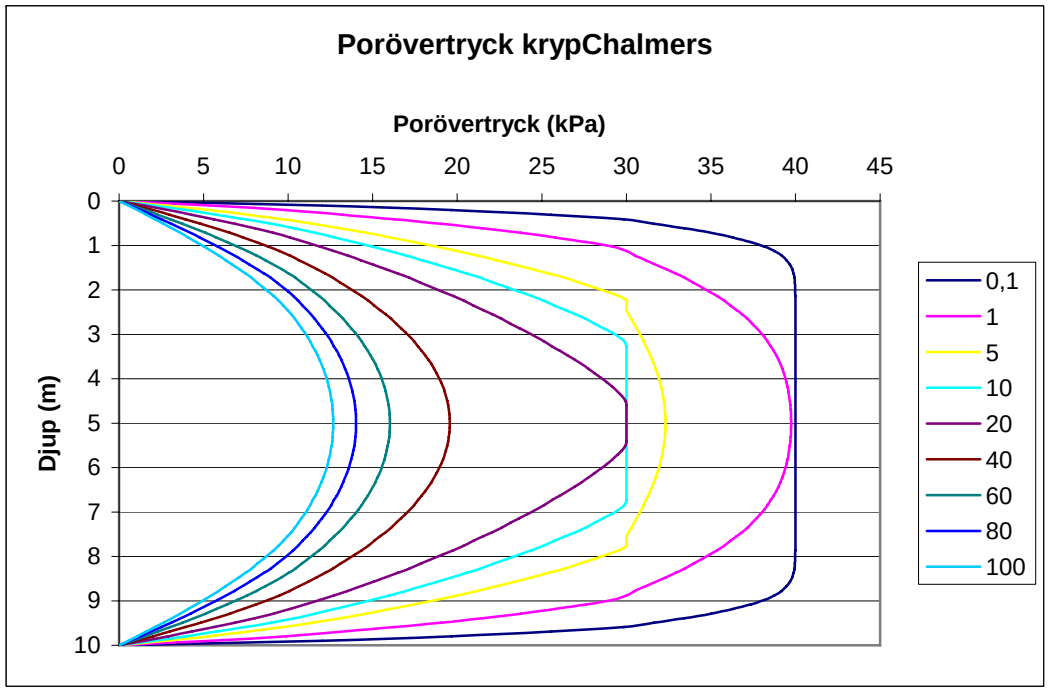

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
10
20
30
40
50
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

17. krypR7

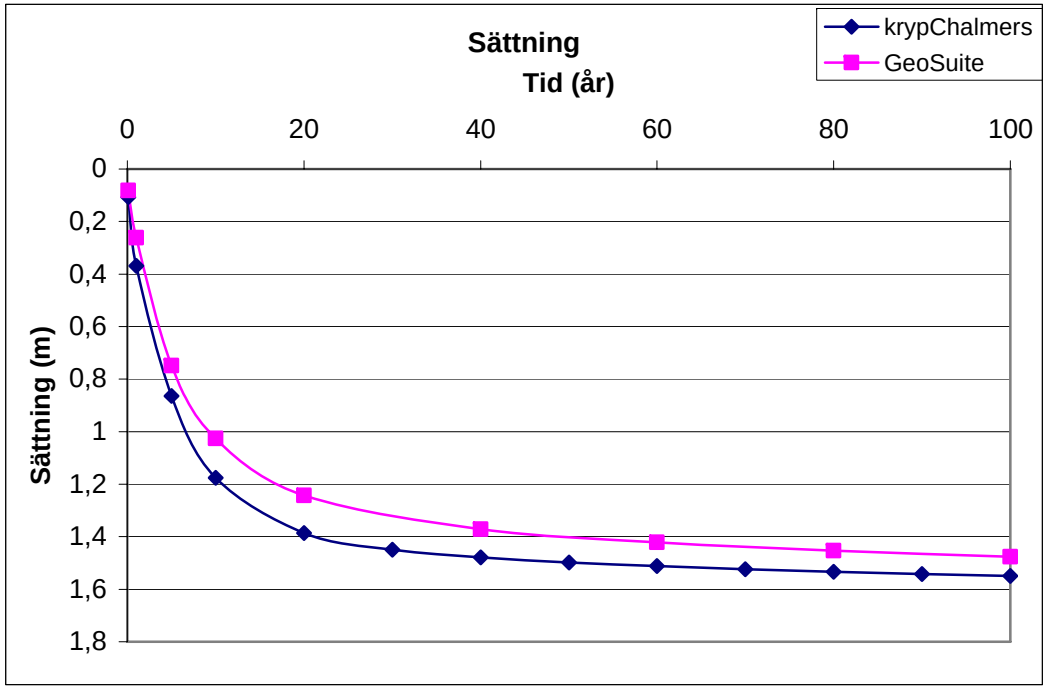

Sättning
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Sättning (m)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6

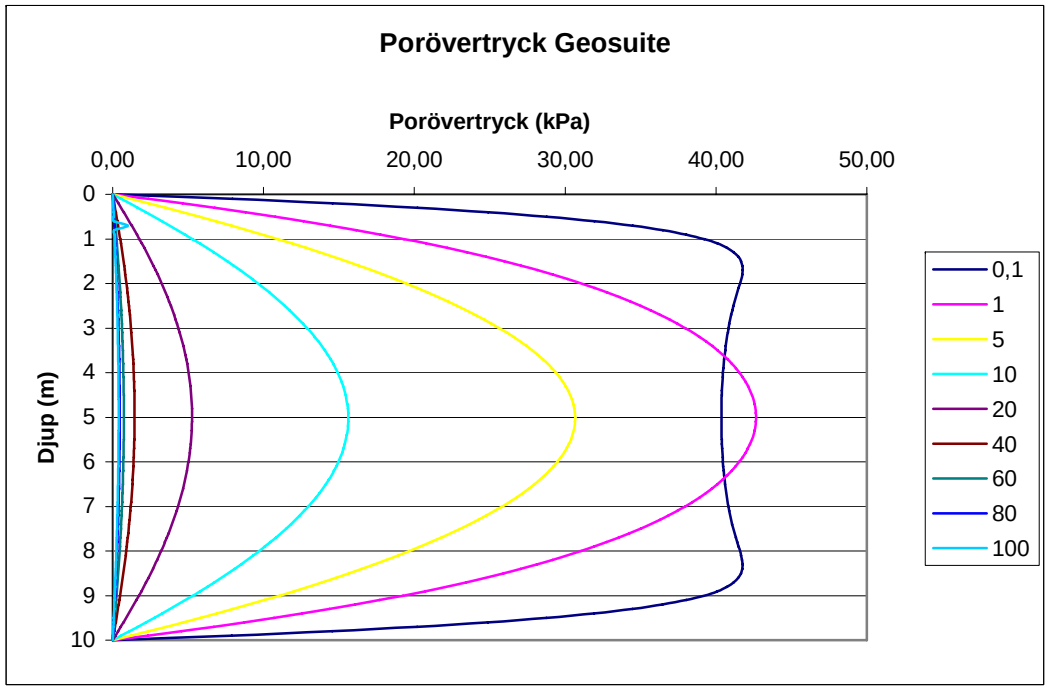

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

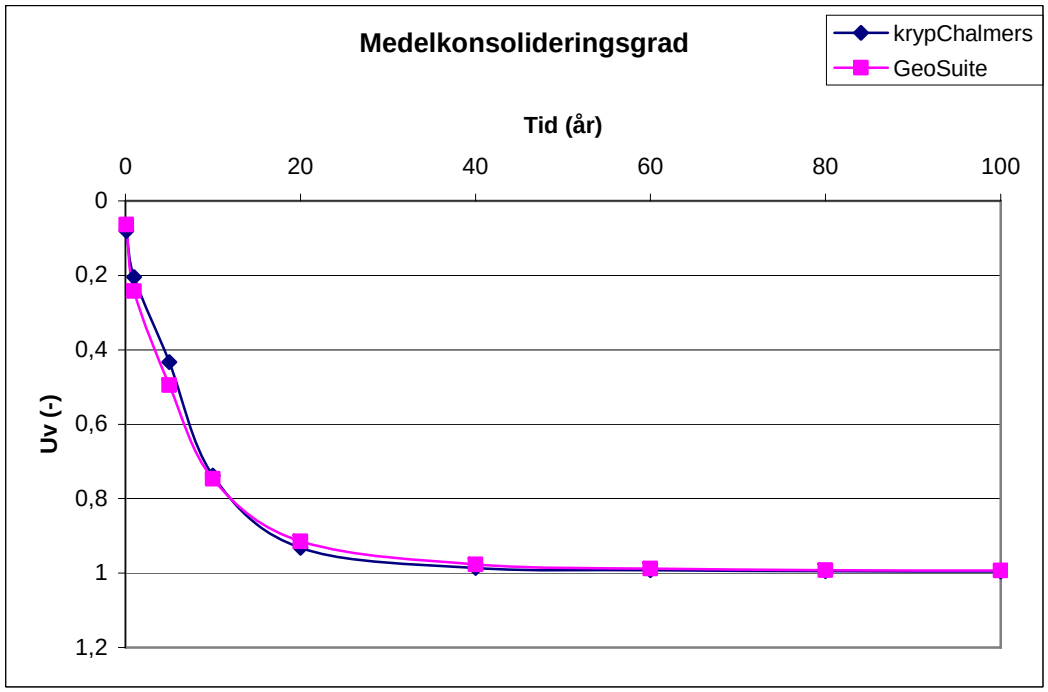

Medelkonsolideringsgrad
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
20
40
60
80
100
Uv (-)
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9

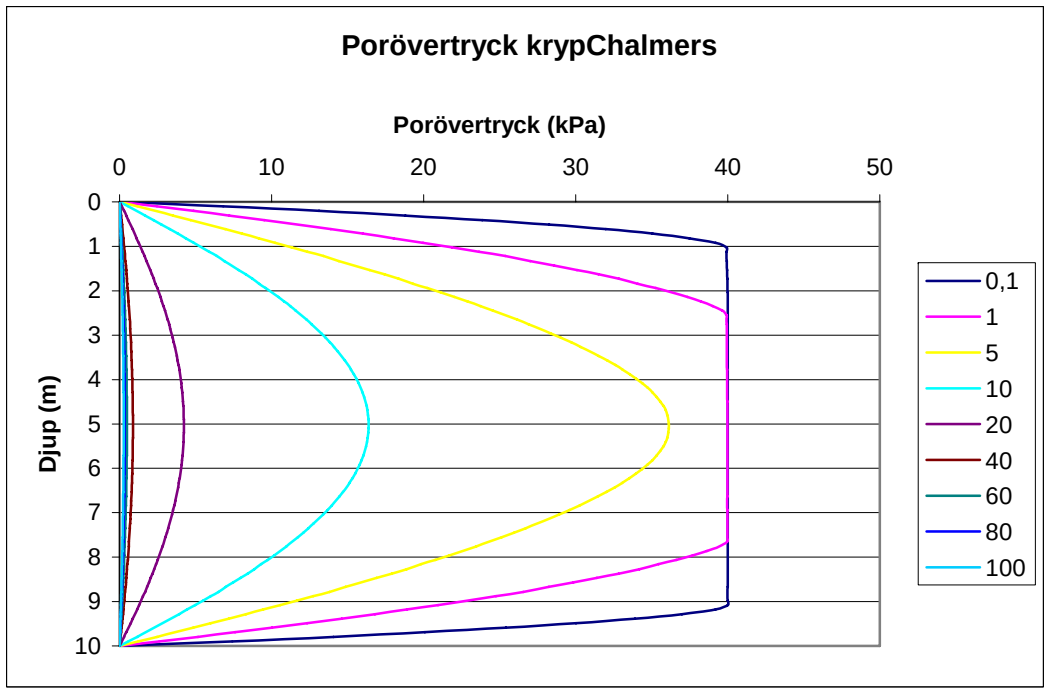

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

18. kryp1B

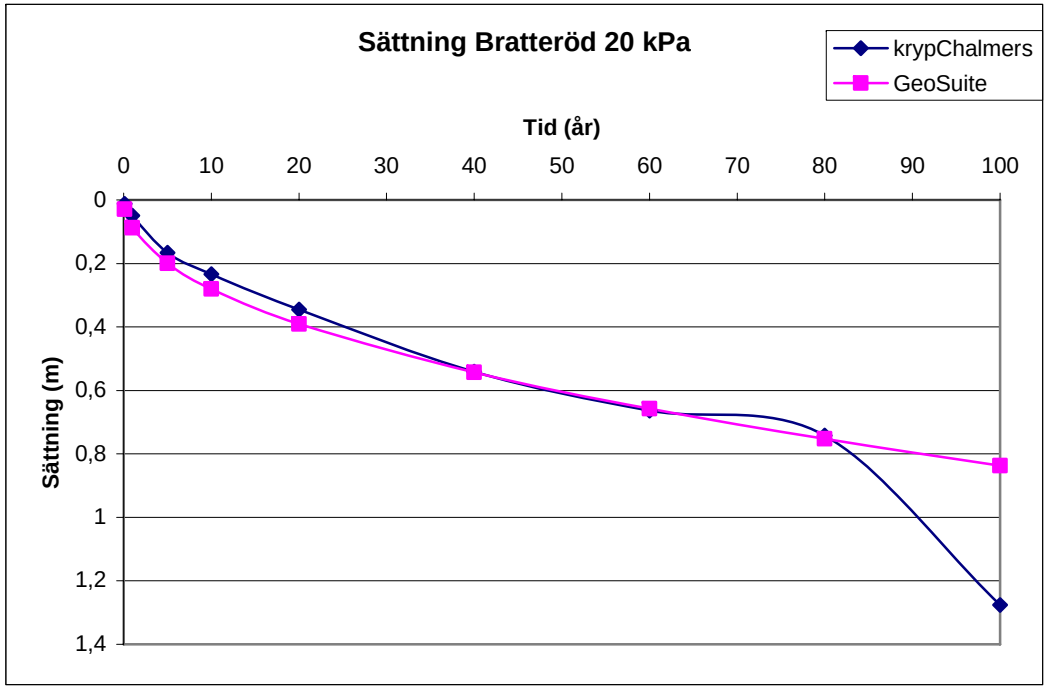

Sättning
Tid (år)
krypChalmers
GeoSuite
Sättning (m)
0
20
40
60
80
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8

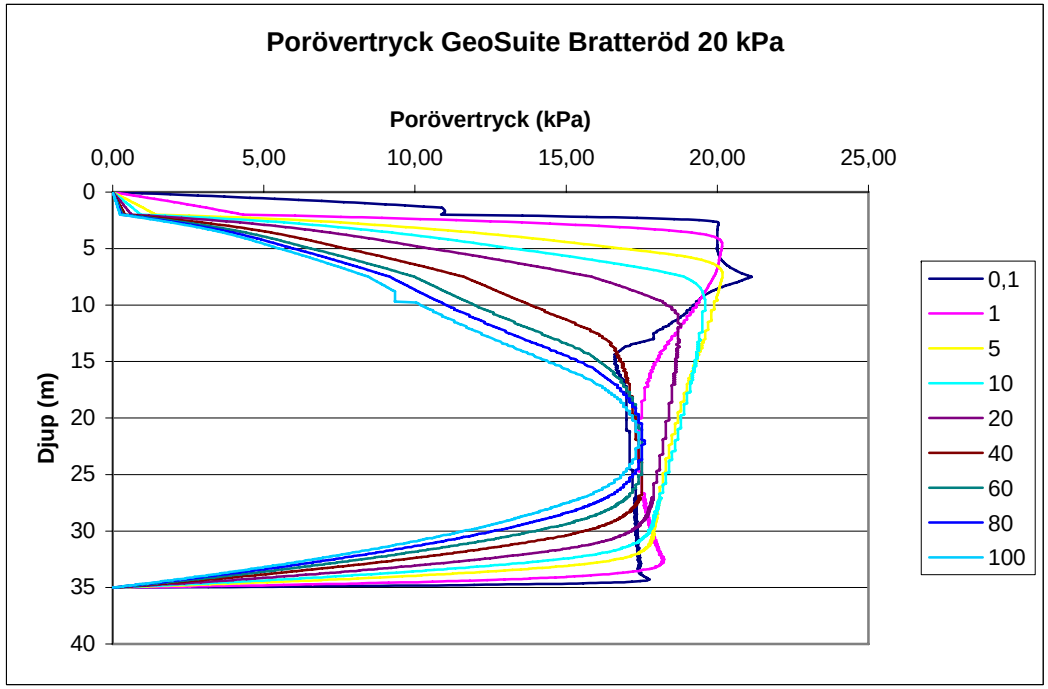

Porövertryck Geosuite
Porövertryck (kPa)
0,00
10,00
20,00
30,00
40,00
50,00
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

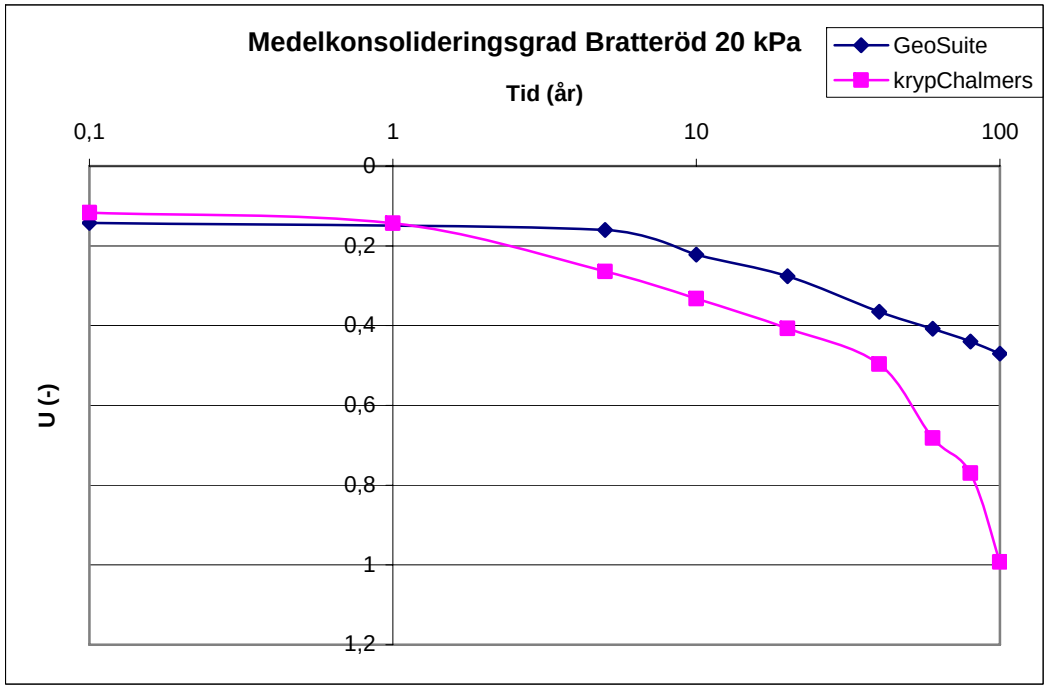

Medelkonsolideringsgrad
Tid (år)
krypChalmers
GeoSuite
Uv (-)
0
20
40
60
80
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2

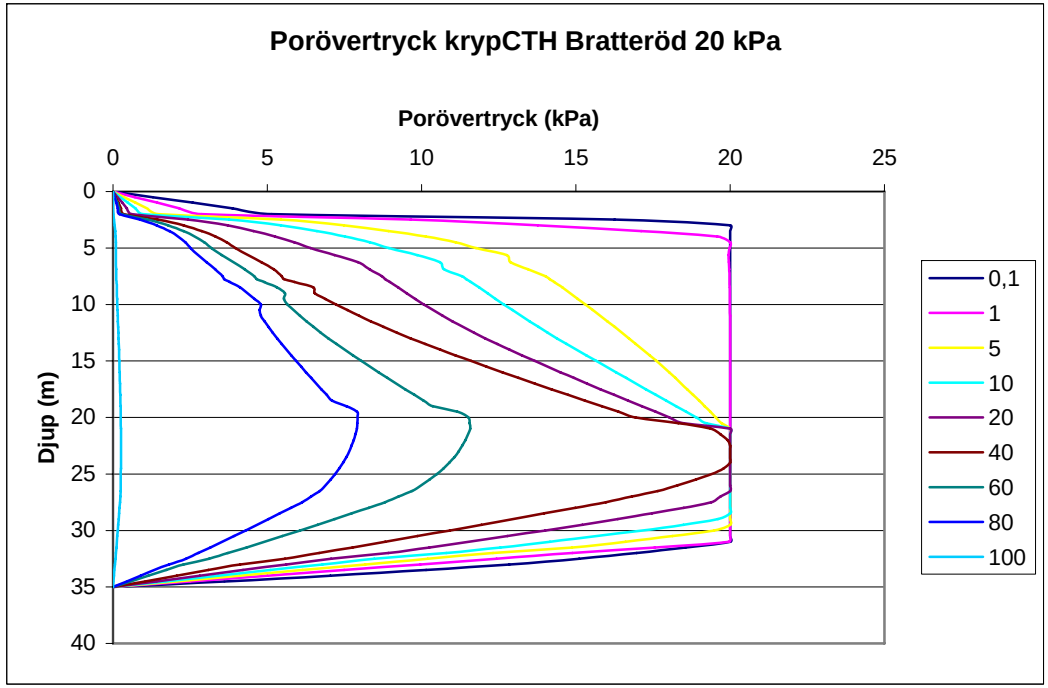

Porövertryck krypChalmers
Porövertryck (kPa)
0
10
20
30
40
50
Djup (m)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

Bratteröd

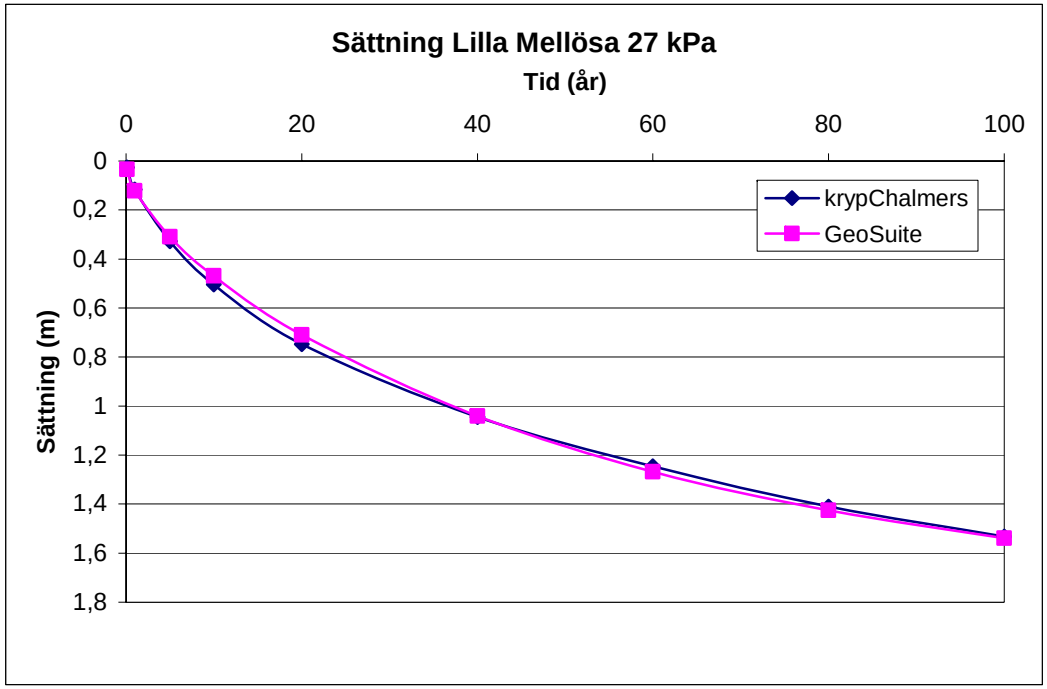

Sättning Bratteröd 20 kPa
krypChalmers
GeoSuite
Tid (år)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Sättning (m)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4

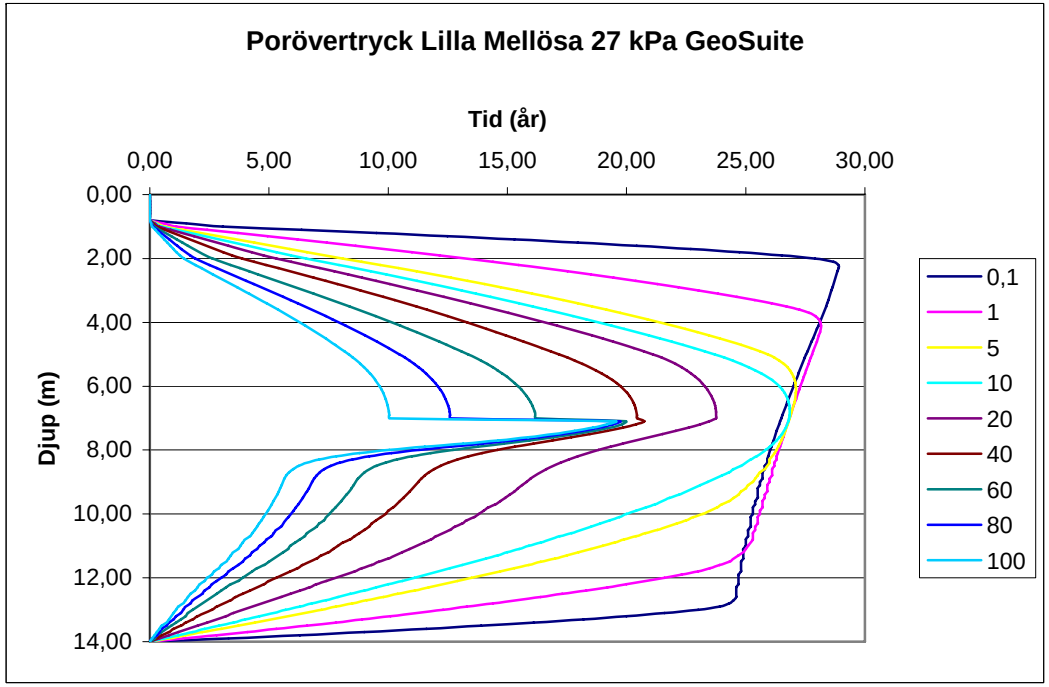

Porövertryck GeoSuite Bratteröd 20 kPa
Porövertryck (kPa)
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
25,00
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

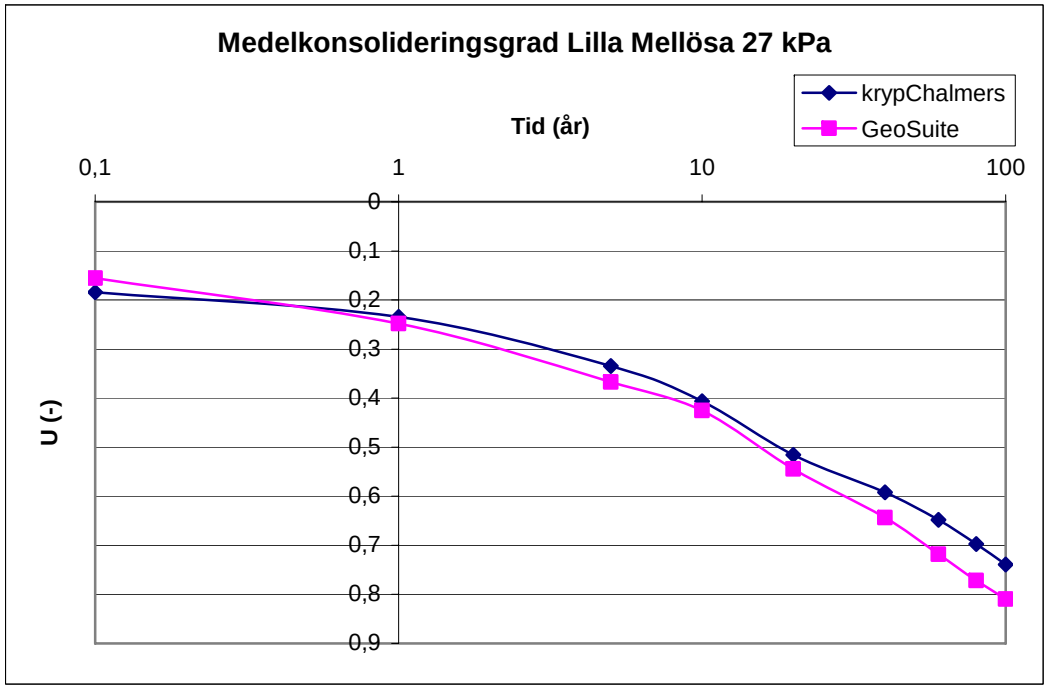

Medelkonsolideringsgrad Bratteröd 20 kPa
GeoSuite
krypChalmers
Tid (år)
0,1
1
10
100
U (-)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2

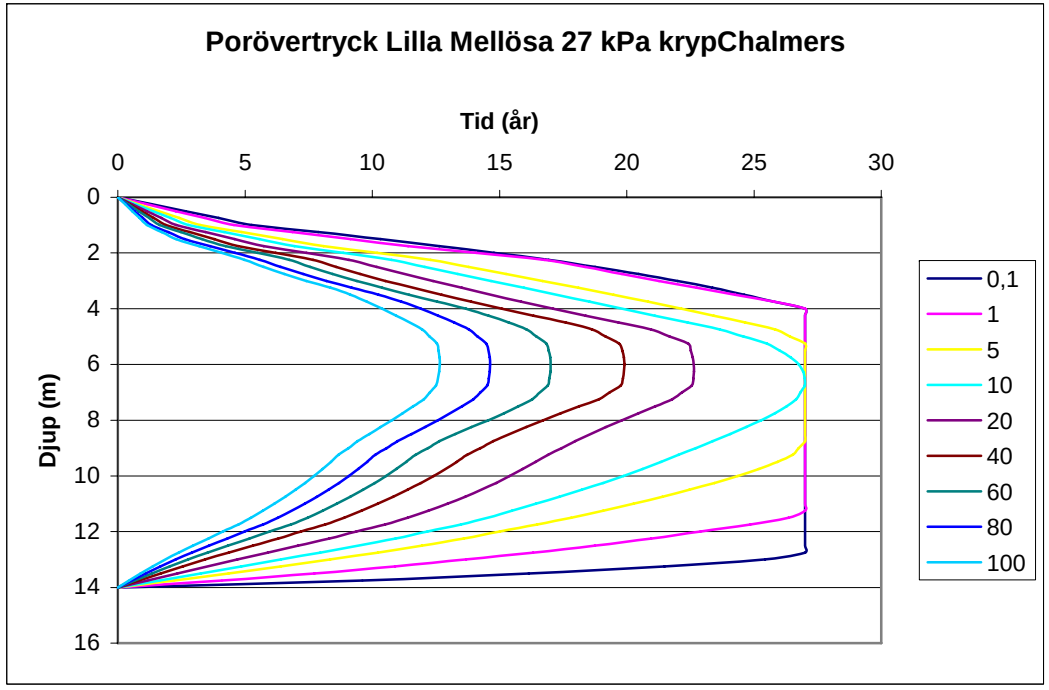

Porövertryck krypCTH Bratteröd 20 kPa
Porövertryck (kPa)
0
5
10
15
20
25
Djup (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
0,1
1
5
10
20
40
60
80
100

Lilla Mellösa 27 kPa

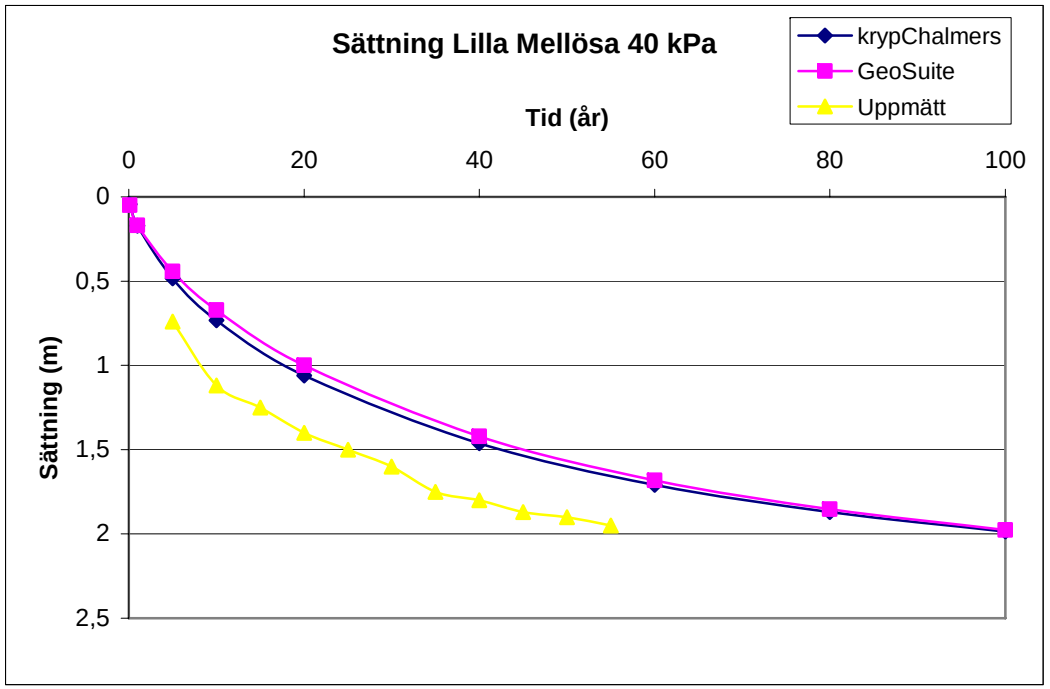


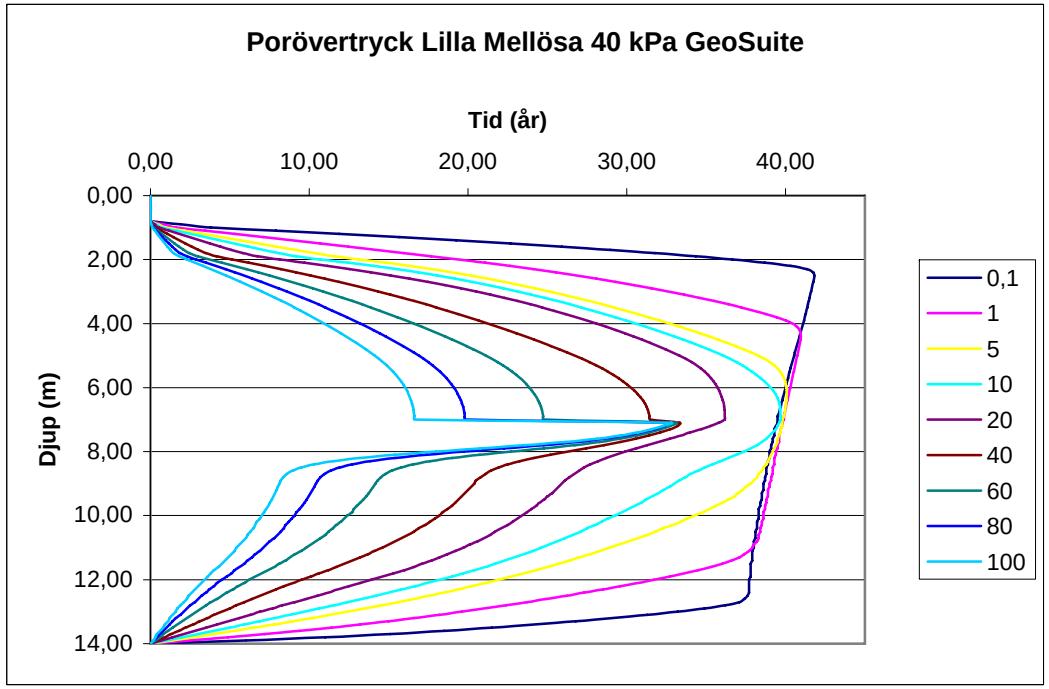


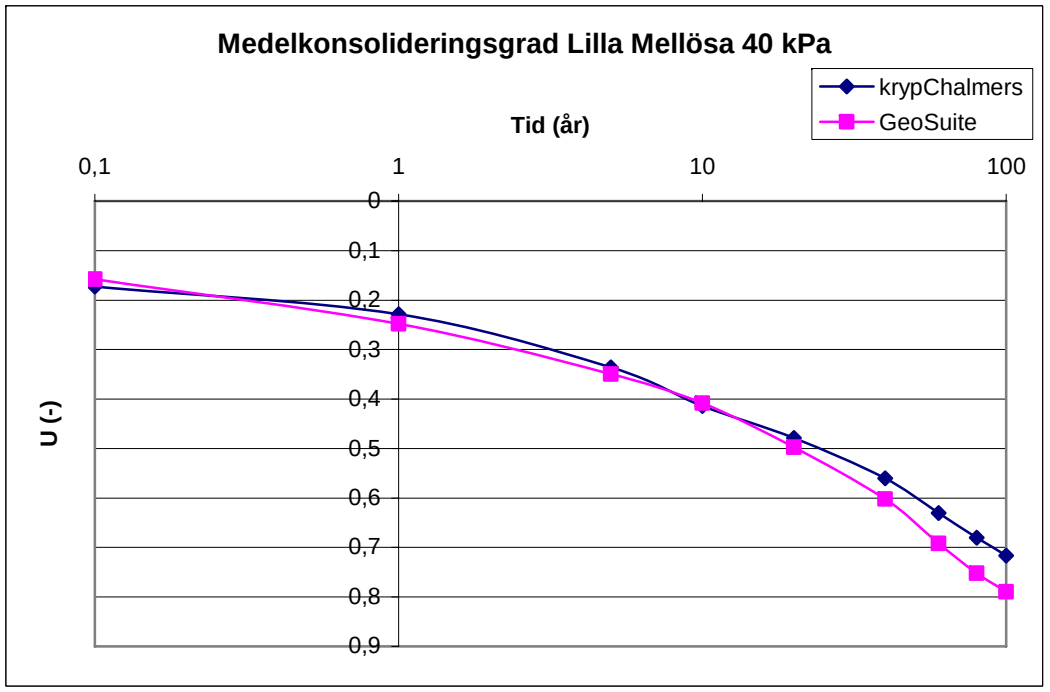


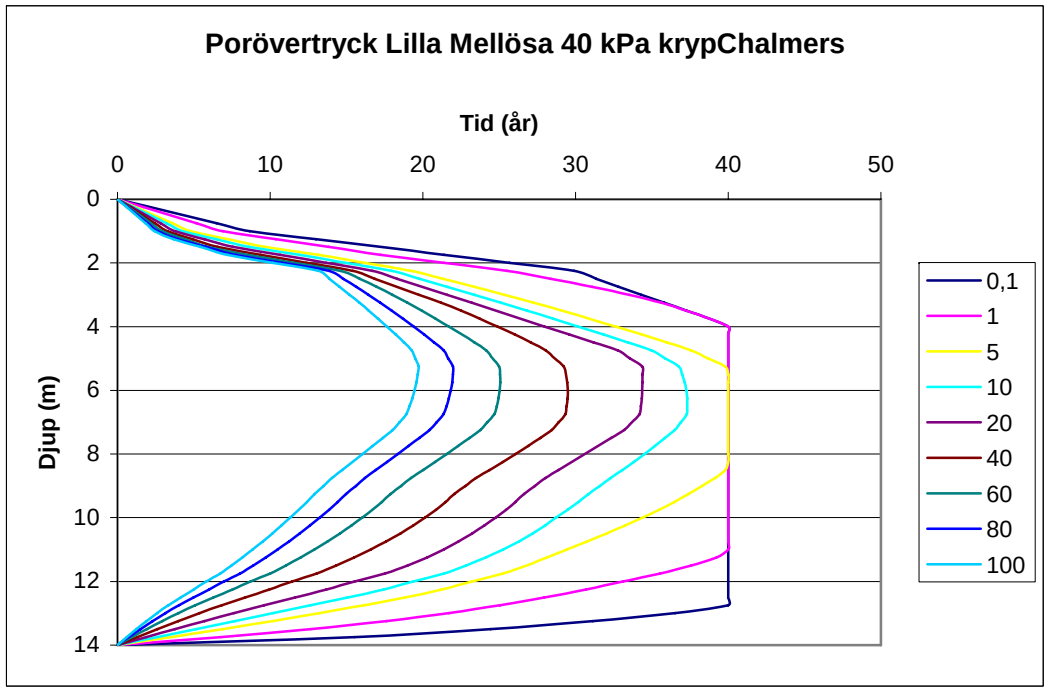


Lilla Mellösa 40 kPa

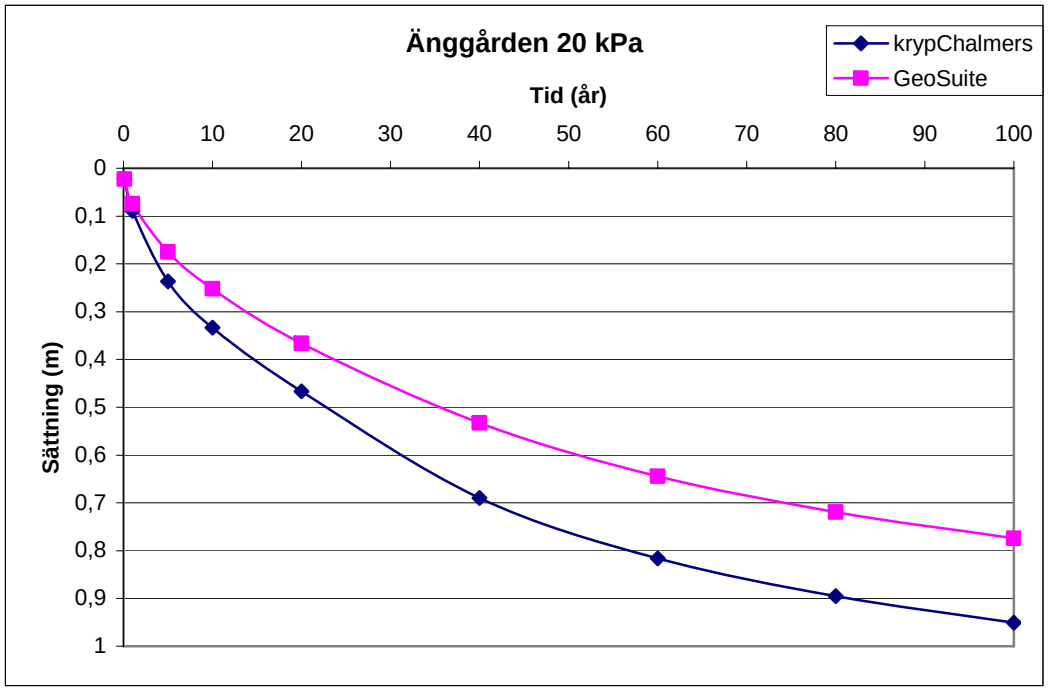


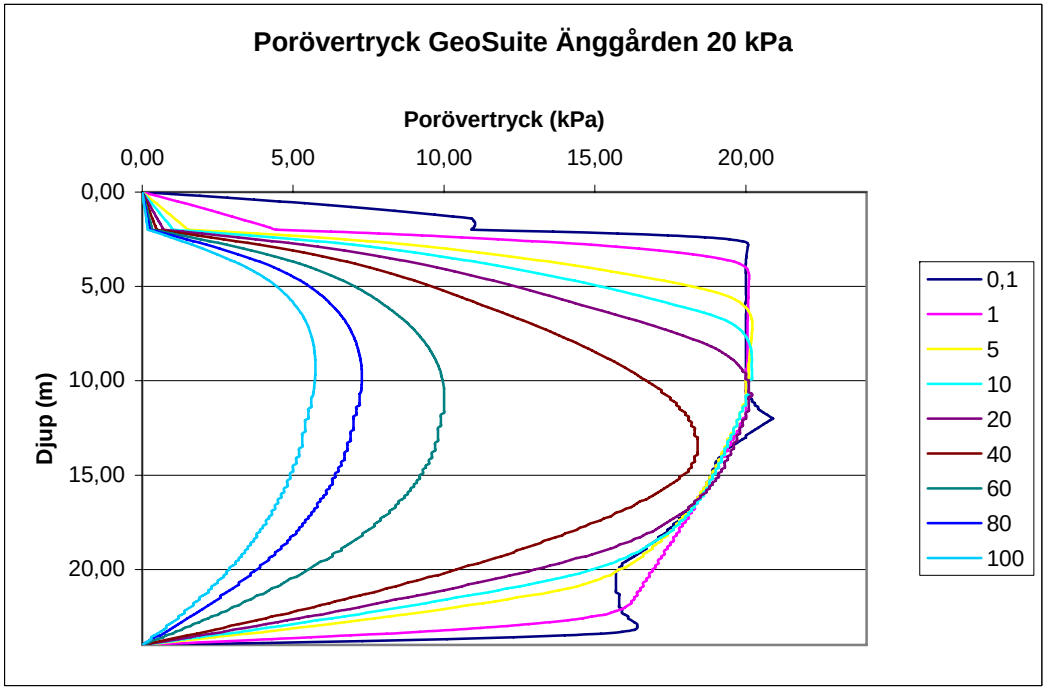


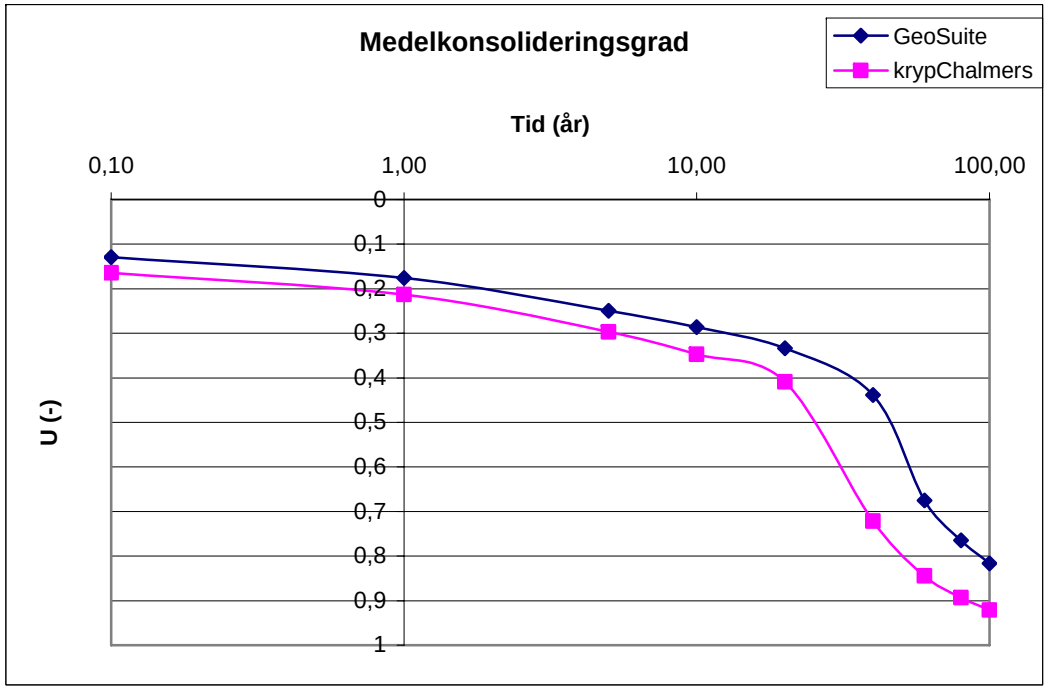


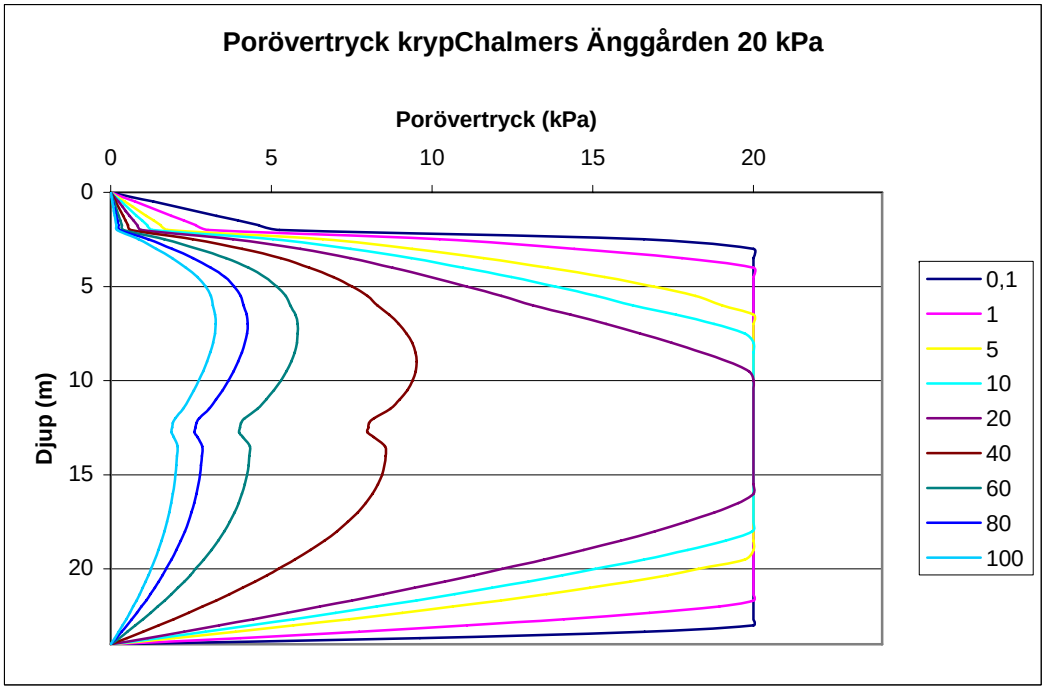


Änggården 20 kPa

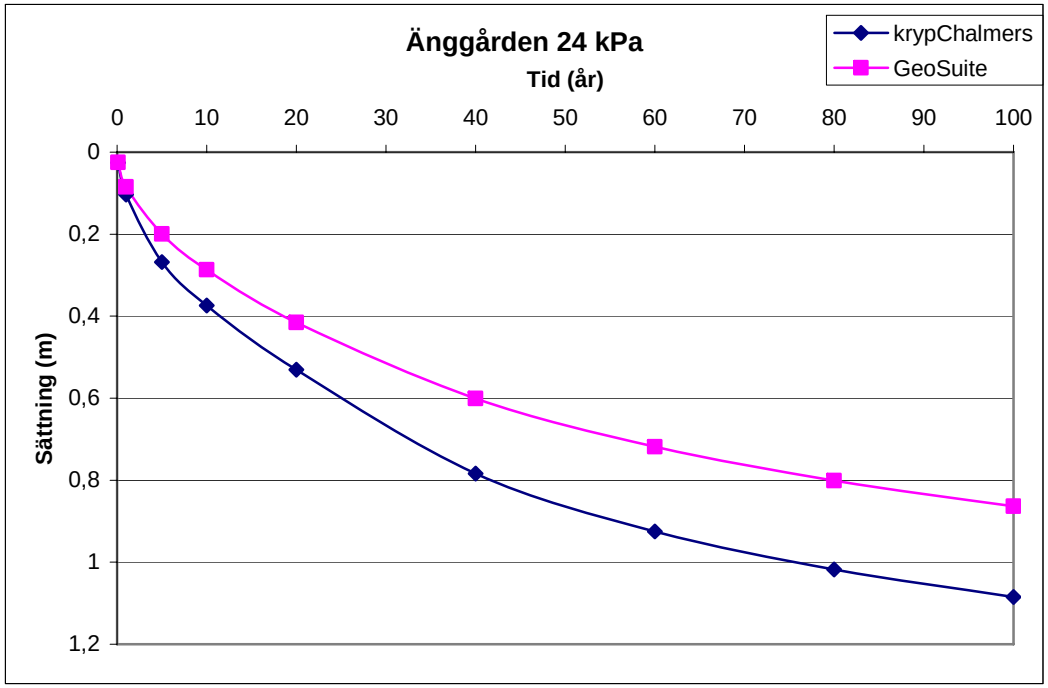


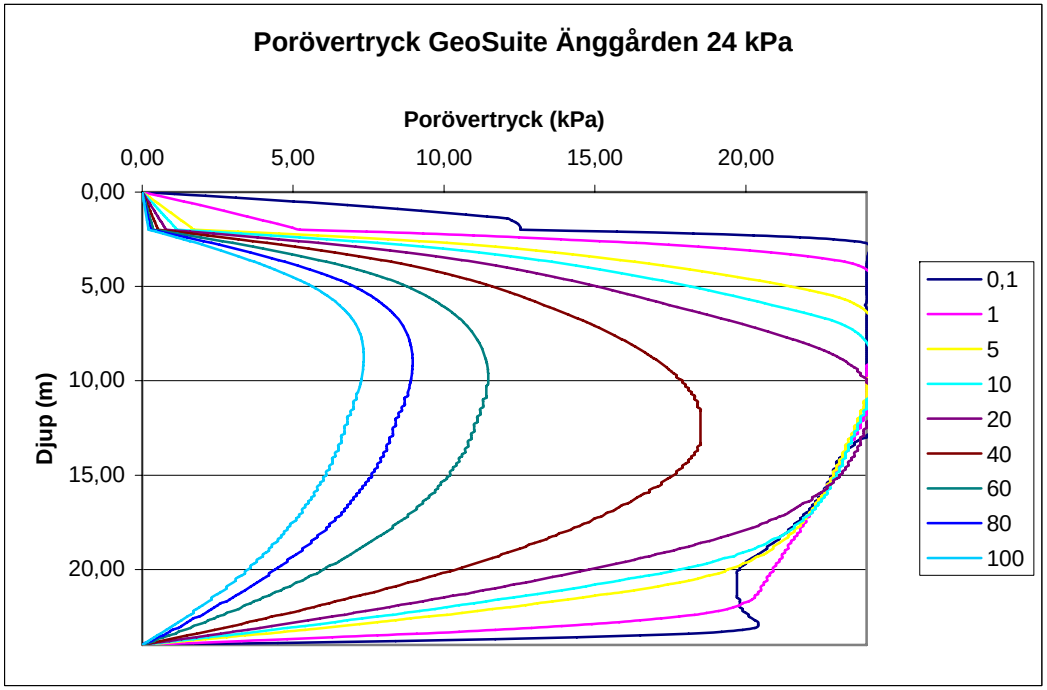


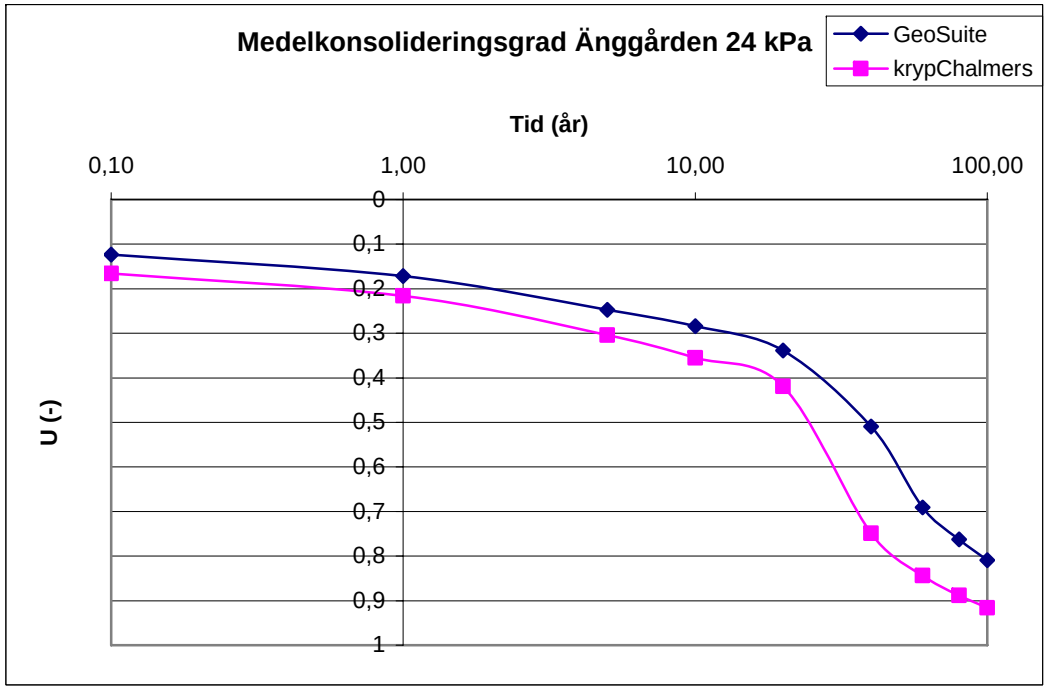


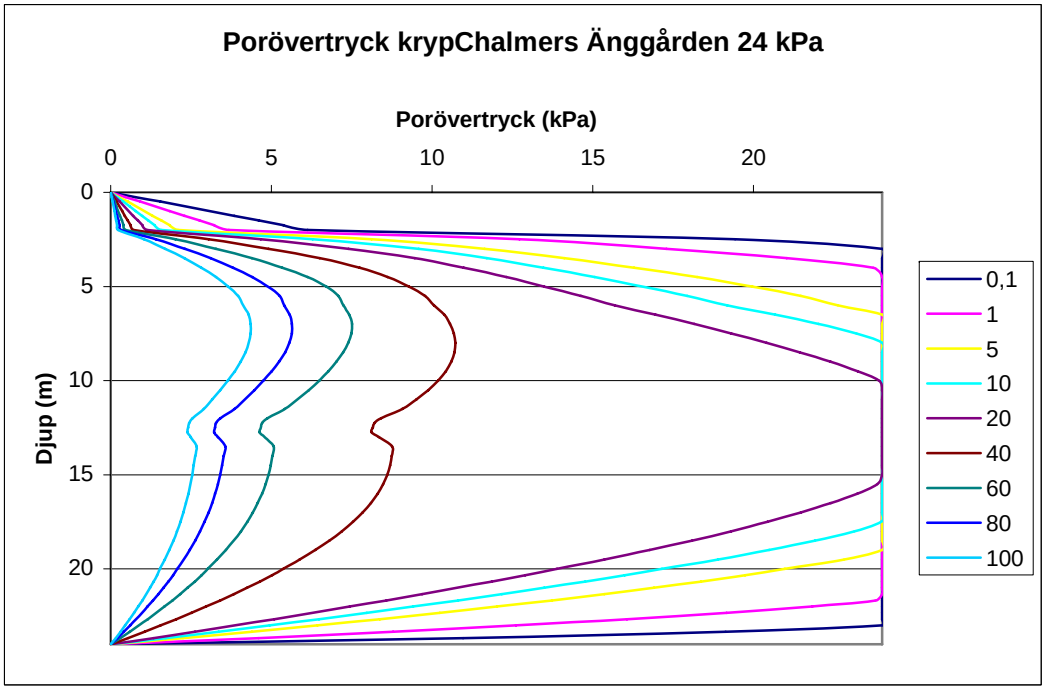


Änggården 24 kPa

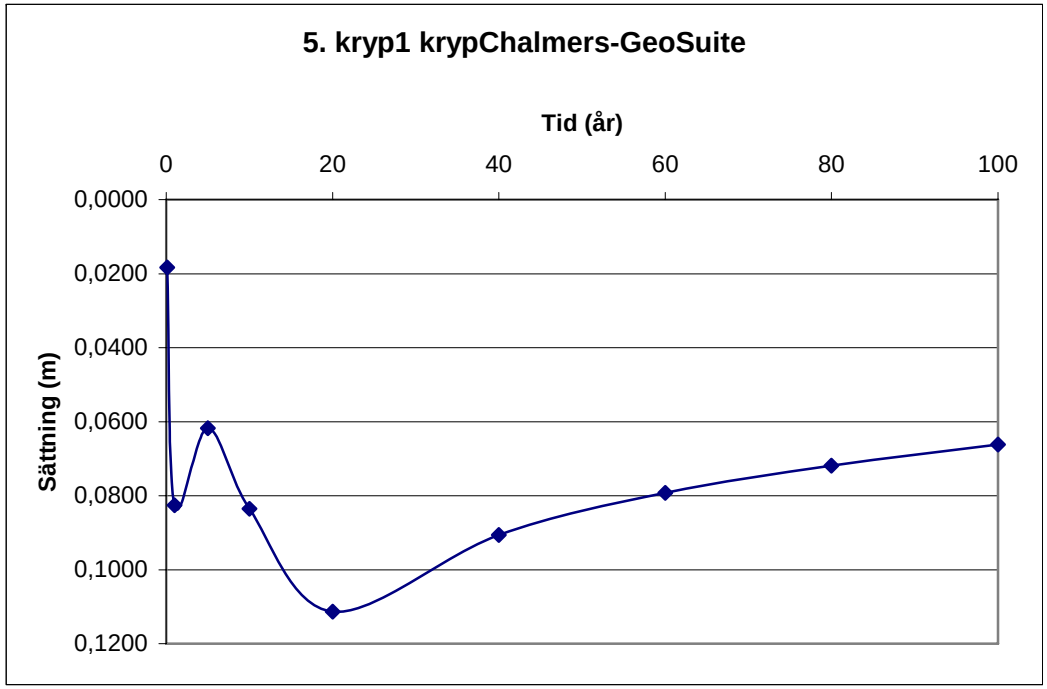


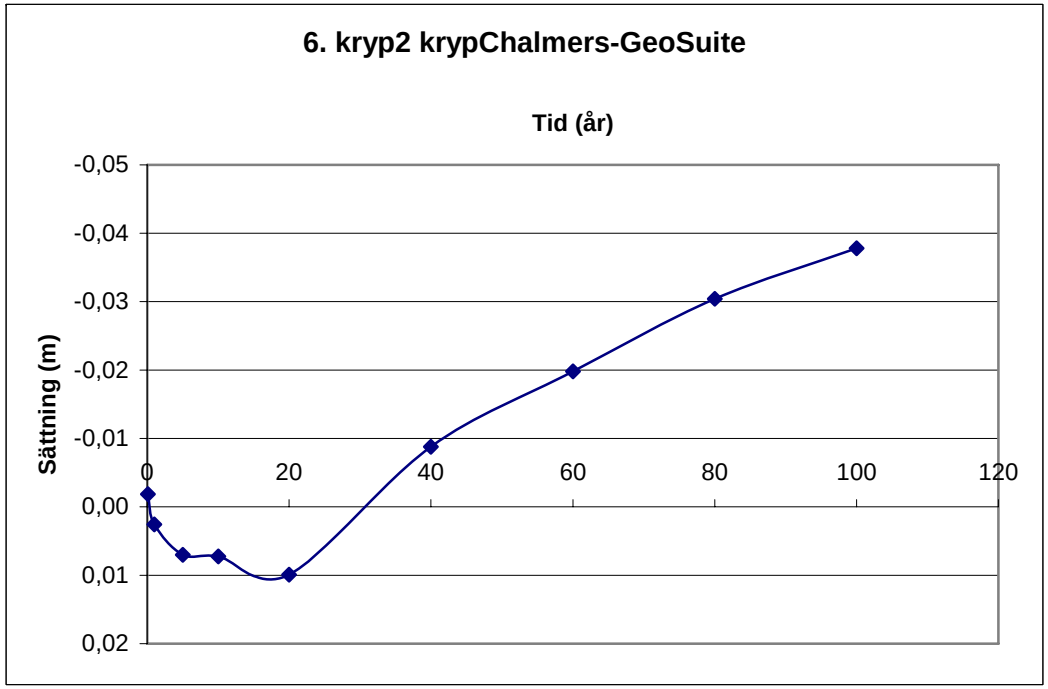


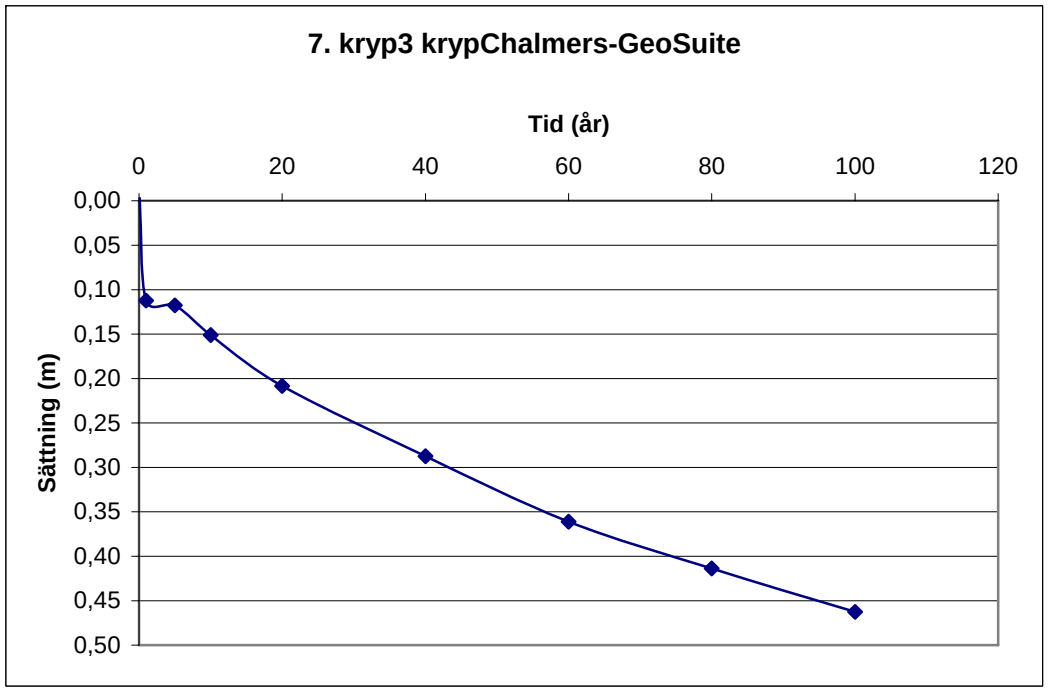


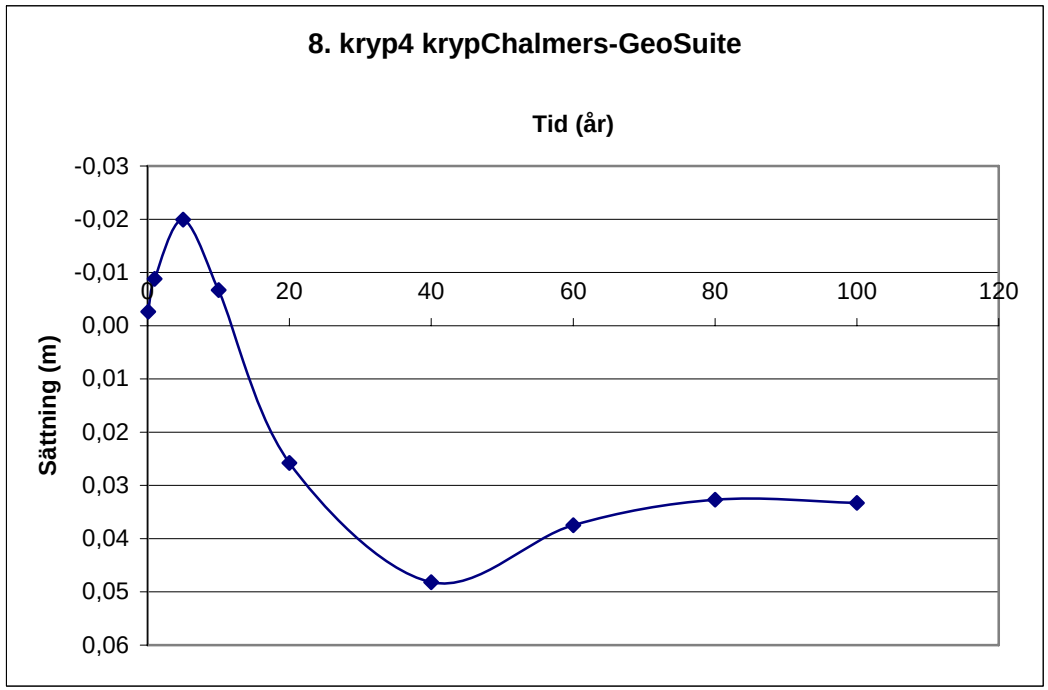


Resultatdifferenser

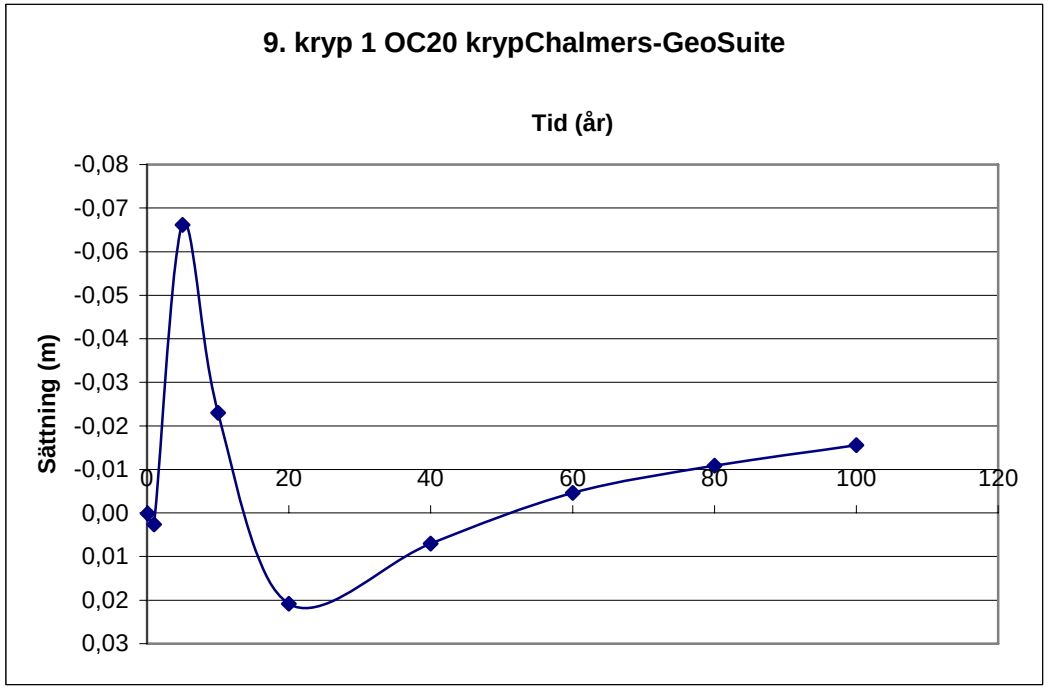


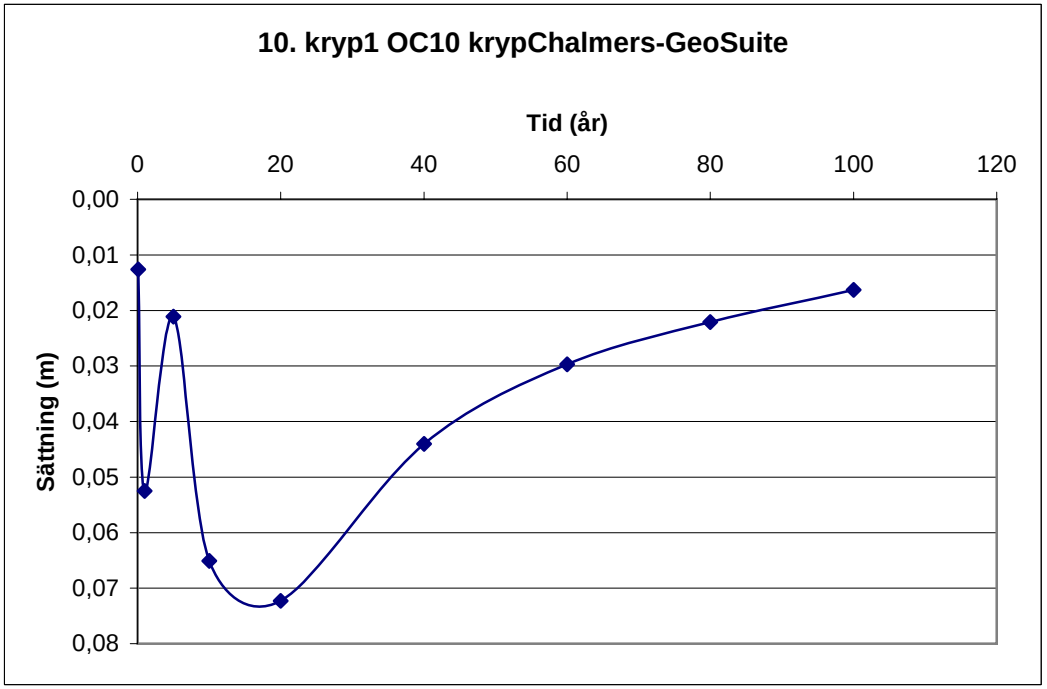


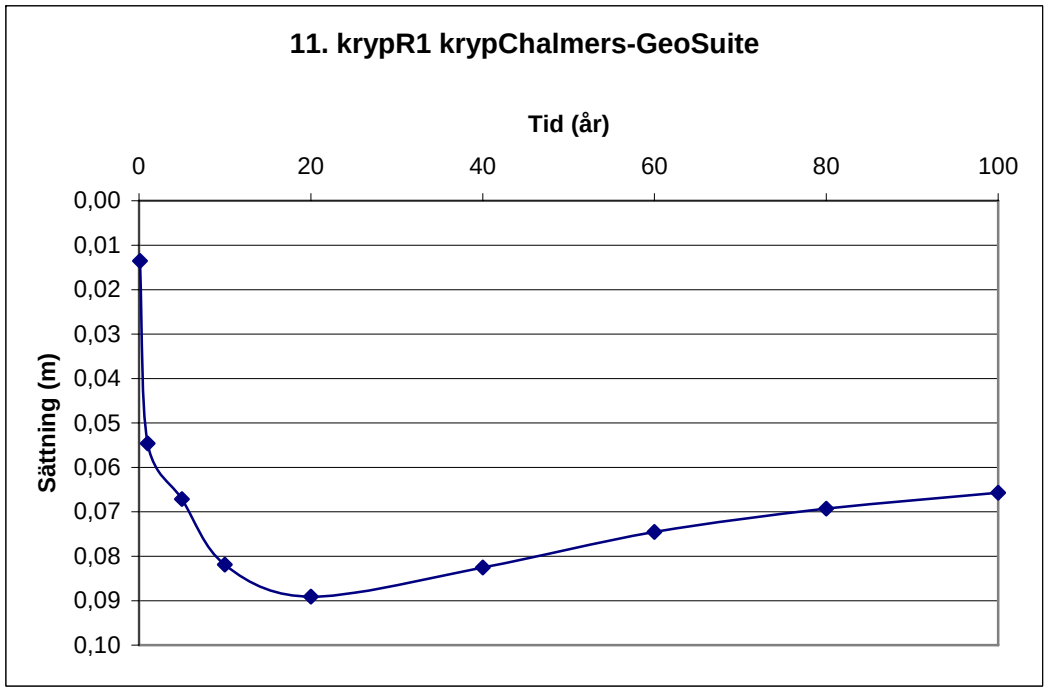


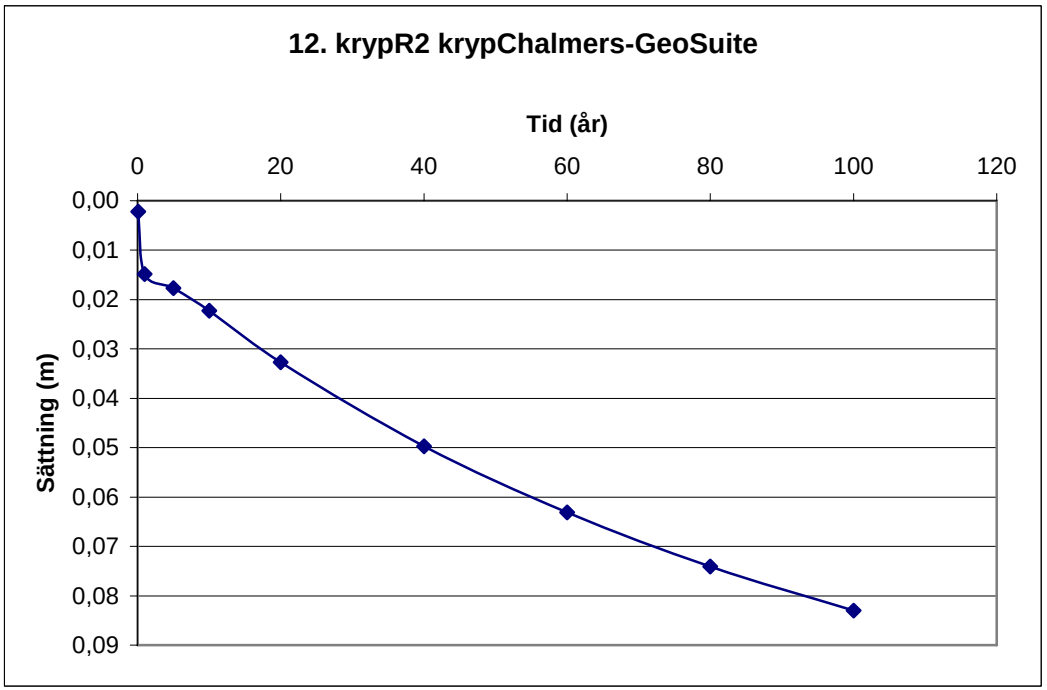


Resultatdifferenser

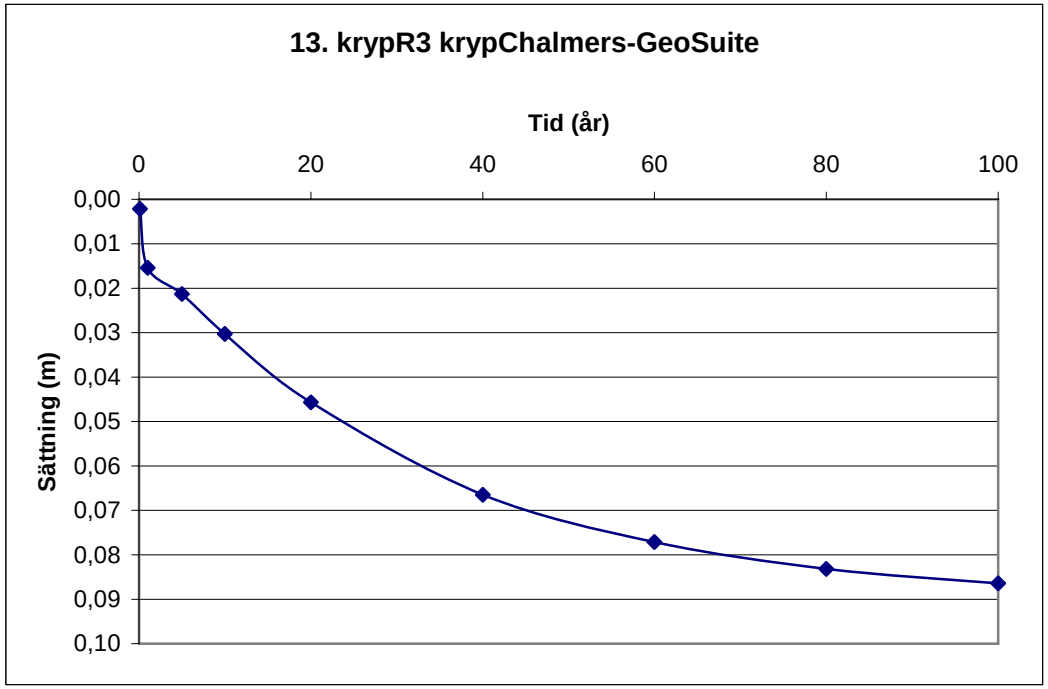


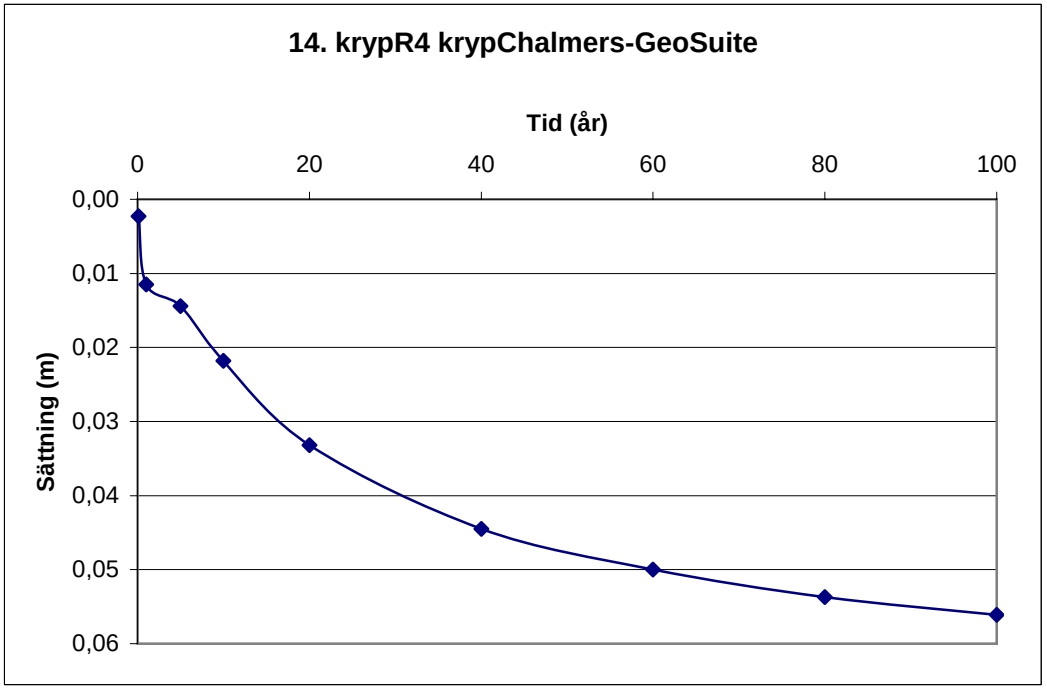


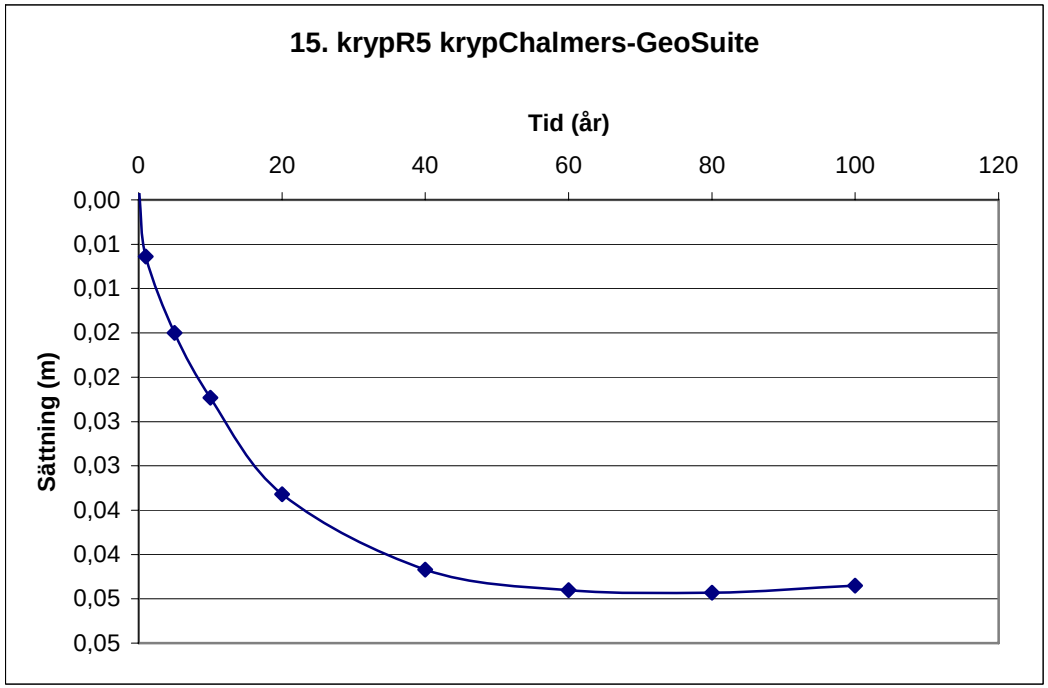


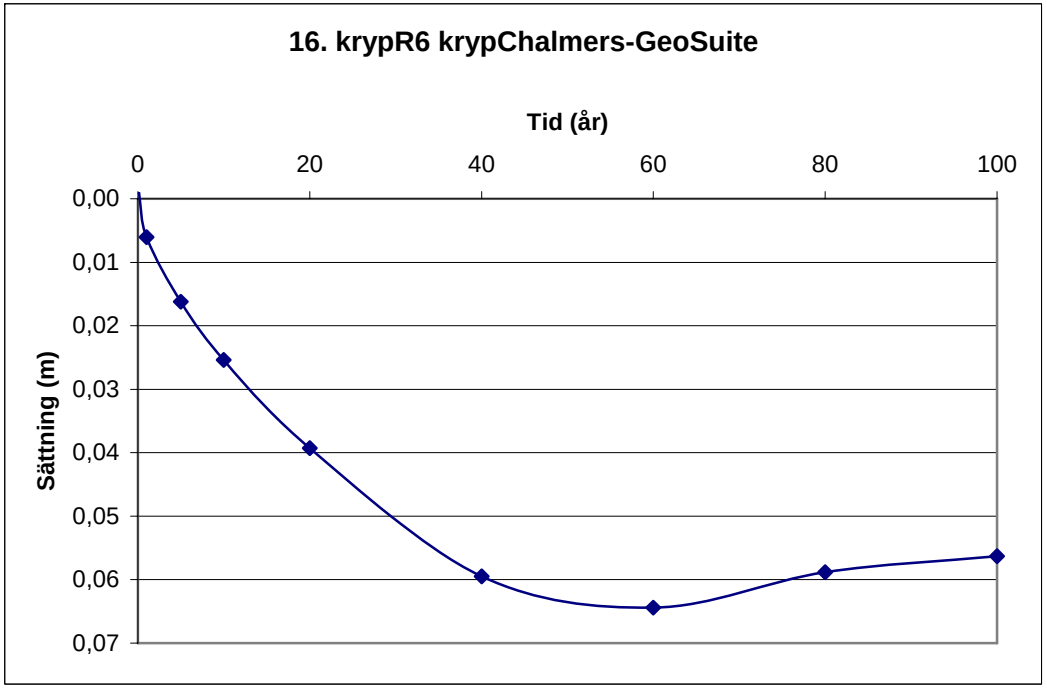


Resultatdifferenser









Resultatdifferenser

