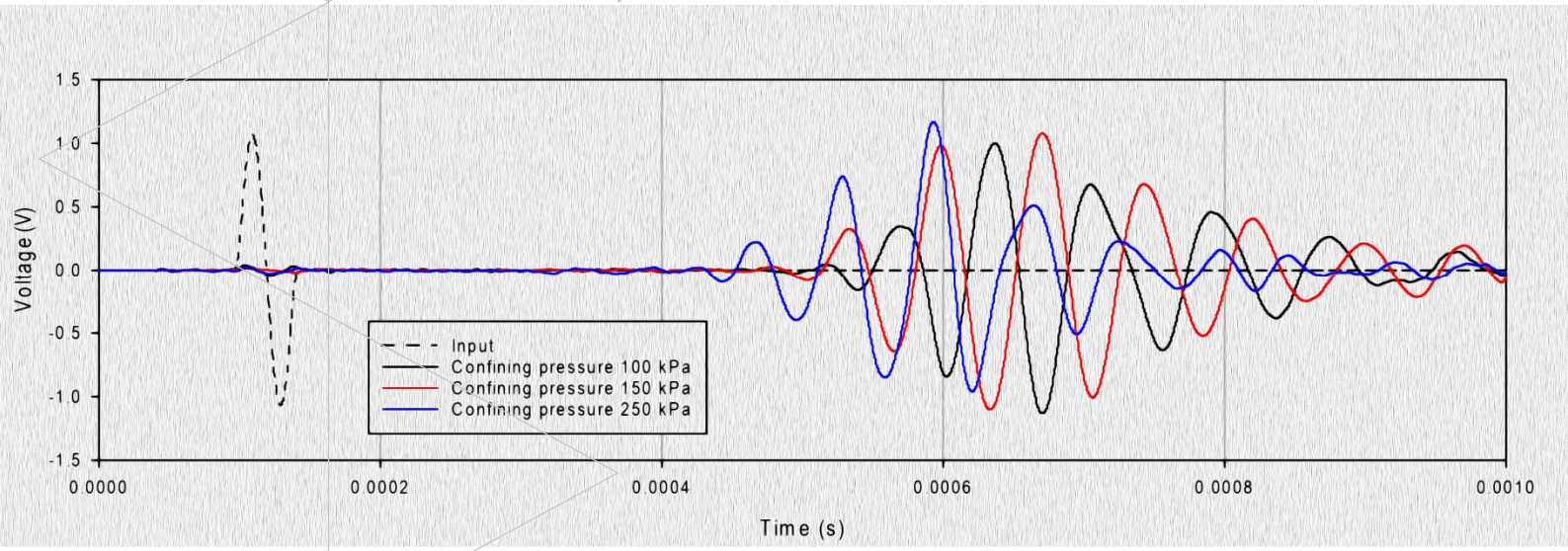
SGI Statens geotekniska institut

Laboratoriestudie av spänningsnivåns och härdningstemperaturens betydelse för hållfasthetstillväxt hos stabiliserad jord

Utvärdering av P- och S-vågor vid olika härdningsförfaranden

Per Lindh



Uppdragsgivare: BIG

2019-01-03

Uppdragsledare: Per Lindh

Granskare: Martin Holmén

Handläggare: Per Lindh

Diarienr: 1.1-1710-0660

Uppdragsnr: 16154/17110

Hänvisa till detta dokument på följande sätt:

Lindh, P 2019, *Laboratoriestudie av spänningsnivåns och härdningstemperaturens betydelse för hållfasthetstillväxt hos stabiliserad jord*, *Utvärdering av P- och S-vågor vid olika härdningsförfarande* , Statens geotekniska institut, SGI, Linköping, 2019-01-03.

Foto på omslag: Per Lindh, Privat

Förord

Detta uppdrag är ett samfinansierat BIG projekt och en samverkan mellan Trafikverket och SGI.

Per Lindh
Uppdragsledare

Martin Holmén
Granskare

Innehållsförteckning

Sammanfattning **2**

1. Bakgrund **3**

2. Uppdragets syfte och mål **4**

3. Utförande **4**

3.1 Inblandning och inpackning 4

3.2 Resonansfrekvensmätningar 6

3.3 Bender elements mätningar 7

4. Provningsförfarande **9**

4.1 Provomgång ett 10

4.2 Provomgång två 14

4.3 Jämförelse med andra resultat 19

5. Slutsatser **21**

Referenser **23**

Sammanfattning

Hållfastheten hos ett stabiliserat material bestäms av bindemedelsmängd, bindemedelstyp, jordtyp och vattenkvot. I en lera är vattenkvoten relativt konstant och då styrs hållfastheten företrädelsevis av bindemedelsmängd och bindemedelstyp.

Resultaten från denna studien visar hur provets spänningsnivå påverkar ger en ökad hållfasthet samtidigt som provets spänningsnivå över en viss nivå ökar hållfastheten hos en stabiliserad lera. En ökad spänningsnivå ger en högre konsolideringsgrad hos det stabiliserade materialet vilket innebär en tätare matris (lägre portal) och därmed en högre hållfasthet. Dock måste en viss spänningsnivå överskridas för att spänningsnivån skall resultera i en högre hållfasthet.

För att utröna vid vilken spänningsnivå som resulterar i en ökad hållfasthet bör ett mer avancerat försöksupplägg utföras.

1. Bakgrund

I dagsläget finns en stor mängd kunskap om djupstabilisering både från laboratorieundersökningar och fältresultat. Kopplingen mellan laboratorieresultat och fältresultat är dessvärre endast indikativ. Resultaten från laboratorieförsöken ger en bra bild mellan olika inblandningsrecept vad gäller bindemedelskombinationer och bindemedelsmängder. Kopplingen mellan laboratorieresultat och fältresultat bristfällig. Bristerna i kopplingen mellan laboratorier och in situ mätning kan hänföras till några huvudpunkter:

- Tillförd blandningsenergi
- Spänningsnivån under härdning
- Temperatur under härdning

Till ovanstående parametrar bör även läggas utvärderingsmetodik. I den laborativa utvärderingen utförs enaxiella tryckförsök varefter provets skjuvhållfasthet beräknas. I fält utföres oftast hållfasthetsutvärderingen utifrån resultat från kalkpelarsonden. Spetstrycket från kalkpelarsonderingen omvandlas till en skjuvhållfasthet med hjälp av empiriska samband. Den stabiliserade pelarens homogenitet beror på val av bindemedel, lerans sensitivitet, spänningsförhållanden och inblandningsarbete. Till ovanstående kan även typ av lermineral spela roll. Inblandningsarbetet består dels av inblandningsverktygets rotation och sjunkningshastighet och på rotation och stigningshastighet, d.v.s. blandningsarbetet på nervägen är också en viktig parameter för att åstadkomma en pelare med homogen kvalitet. Vidare påverkar den aktuella spänningsnivån hur bindemedlet sprids i volymen, d.v.s. trycket i bindemedelstankarna är oftast konstant och detta påverkar pelarens homogenitet speciellt på den översta biten med lågt överlagringstryck.

I dagsläget finns i huvudsak två metoder att mäta S- och P-vågor på provkroppar i laboratorier. Den enklaste och snabbaste och därmed ekonomiska mest fördelaktiga metodiken är resonansfrekvensmätningar, s.k. ”free- free resonant column” mätningar. Denna typ av mätning innebär att provkroppen ligger fritt upplagd på ett mjukt underlag, t.ex. skumgummi, där provkroppen utsätts för ett lättare slag varefter provkroppens resonansfrekvens mäts med hjälp av en accelerometer. Det mjuka underlaget skall säkerställa att provkroppen kan svänga fritt. Nackdelen med metoden är att den inte kan simulera olika spänningsnivåer.

Den alternativa metoden är att använda böjelement, s.k. ”bender element”, vilket innebär att böjelement sticks in i provkroppen eller placeras på provkroppen beroende på om P- eller S-våg skall mätas. Metoden kräver inte att provkroppen är fritt upplagd utan den kan vara placerad mellan en topp och bottenplatta antingen för en enaxiell uppställning eller placerad i en triaxialcell. I triaxialcellen kan olika spänningsnivåer appliceras på provkroppen.

2. Uppdragets syfte och mål

Uppdraget syftar till att undersöka spänningsnivåns betydelse för härdningen av stabiliserad jord. Vidare syftar uppdraget till att jämföra resonansfrekvensmätningar med bender elements mätningar för att jämföra de olika typerna av seismikmätningar och hur dessa kan användas på stabiliserad jord i laboratorier.

Målsättningen med uppdraget är att verifiera att den tänkta metoden fungerar för att användas som en tillverkningsmetod och mätmetod för stabiliserade provkroppar.

3. Utförande

I projektet har tre olika metoder använts;

1. Inblandning av bindemedel med efterföljande inpackning.
2. Resonansfrekvensmätning (P-våg, S-våg) på prover med och utan rör.
3. Härdning i triaxialcell med bender elementsmätningar.

3.1 Inblandning och inpackning

Inblandningsförsöken innefattar en initial homogenisering av jorden, i detta fall lera. Homogeniseringen sker i minst 5 minuter i en större degblandare. När homogeniseringen är klar flyttas jorden till lämpliga behållare i de fall inblandningen inte sker momentant. I samband med detta görs en bestämning av den aktuella vattenkvoten och materialets densitet. Före själva inblandningen bestäms mängden bindemedel och vilken bindemedelskombination som skall användas.

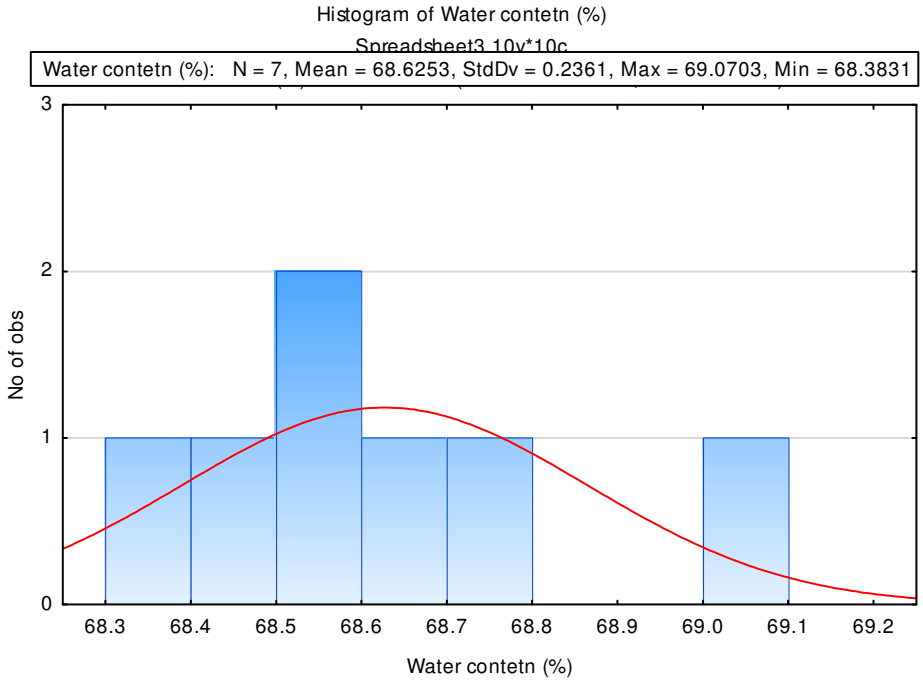
Vid inblandningen vägs jord och bindemedel upp och blandas sedan i 5 minuter i en köksassistent. Direkt efter inblandningen påbörjas inpackningen i provtagningshylsor. Vanligtvis används vanliga provtagningshylsor med höjden 170 mm där hylsan manuellt packas antingen i skikt upp till ca 150 mm eller att lera fylls i hylsan varefter en last på 100 kPa läggs på i 5 sek. Efter tillverkningen av provkroppen förseglas provkroppen med tätslutande gummilock varefter provkroppen lagras i hylsan. I den nuvarande metodbeskrivningen skall provkropparna lagras i klimatrum med en temperatur på 7 ºC. I detta försök har proverna lagrats i både 7 och 20ºC.

Vid provning trimmas provkroppen till 100 mm för att uppnå ett slankhetstal på 2 vilket är standard för enaxiella tryckförsök. I den traditionella metodiken packas proverna direkt i hylsan utan någon hållare. Den modifierade varianten med 100 mm långa hylsor visas i Figur 1.

Figur 1. Foto visande inpackningsutrustning för att packa in provkroppar med en höjd på 100 mm. Foto Per Lindh.

Detta innebär att proverna packas och trimmas direkt vid tillverkningen till höjden 100 mm. Detta innebär att resonasfrekvensmätningar kan påbörjas direkt efter provet uppnått en viss hållfasthet. Tidpunkten för första mätningen brukar vara efter en eller två dagar efter inpackning.

Leran som användes vid försöken var en västkustlera från Gläborg med en vattenkvot 68,6 %. Lerprovet var väl paraffinerat men lagrat under en längre tid varför den uppmätta vattenkvoten kan variera något mot ursprunglig vattenkvot.



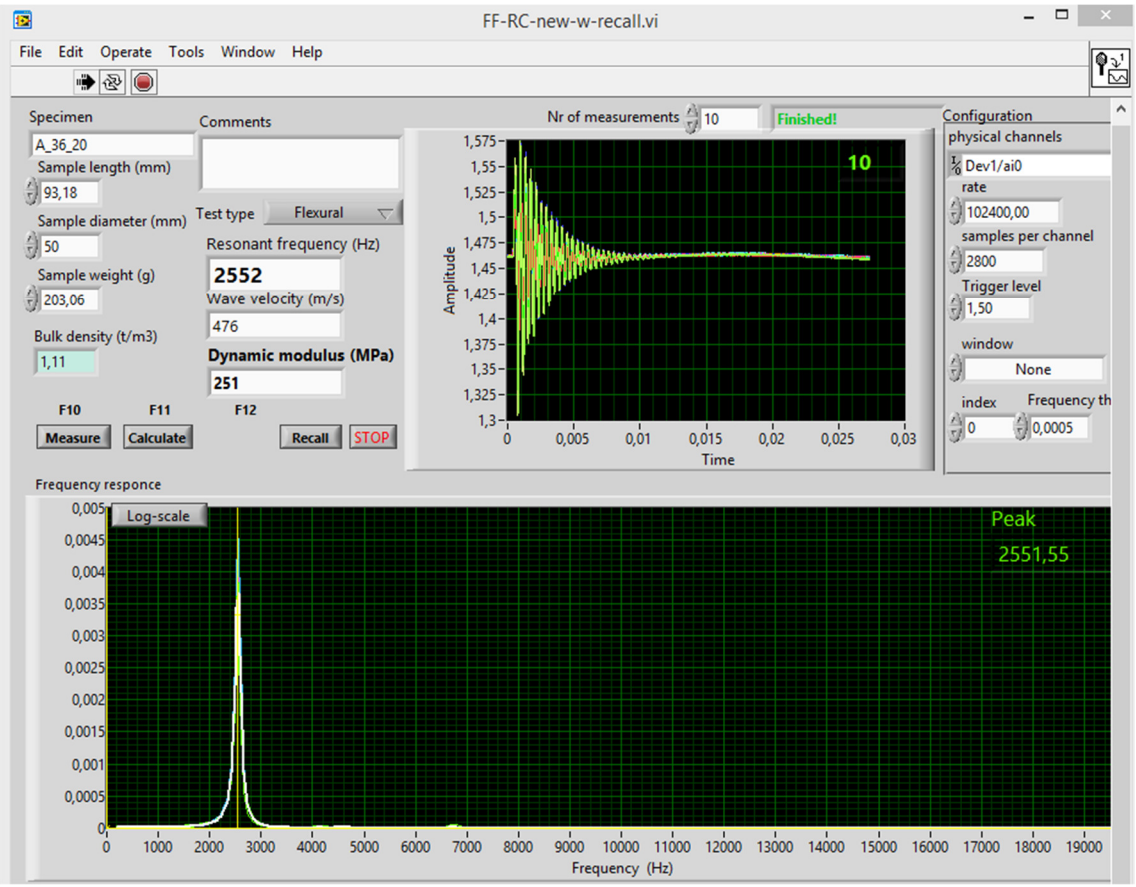
Figur 2. Graf visande vattenkvotsbestämning av leran från Gläborg. Den naturliga vattenkvoten bestämdes till w_N=68,6 %. Här bör påpekas att leran togs från en blockprovtagnings prov som var paraffinerad men lagrad under en längre period.

Densiteten på leran bestämdes till 1,53 ton/m^3. Som bindemedel valdes cement och bränd kalk i ett förhållande på 50/50 och en inblandningsmängd på 80 kg bindemedel per kubikmeter lera. Valet av 80 kg bindemedel per kubikmeter lera baserades på att inte erhålla en allt för hög hållfasthet då detta kan ge problem med att överföra signalen genom provet vid ”bender element”-mätningar. Det är oklart om problemet uppstår på sändarsidan, mottagarsidan eller båda.

3.2 Resonansfrekvensmätningar

För en cylindrisk provkropp finns tre fundamentala svängningsmoder. Dessa svängningsmoder är axiell mod, böjmod och torsionsmod. Den axiella svängningsmoden genererar kompressionsvåg (”primary wave”, P-våg). Torsionsmoden genererar skjuvvågor (”secondary wave”, S-våg). P- och S-vågor är de som primärt används vid ytvågsseismik, ”cross-hole” och ”down hole” seismik. S-vågen har en fördel då denna inte nämnvärt påverkas av materialets vattenmättnadsgrad. P-vågen däremot påverkas i stor utsträckning av vattenmättnadsgraden. I en omättad provkropp ger P-vågsmätningen materialets P-vågshastighet emedan i en vattenmättad provkropp bidrar vattnet till att öka den utvärderade P-vågen då vattnets P-vågshastighet oftast är större än den solida jordkroppens hastighet. Detta fenomen kan användas för att bestämma om en provkropp är vattenmättad eller inte.

Böjmoden genererar en böjvåg vilket man förenklat kan beskriva som en kombination av S- och P-vågor. Böjvågen är väldigt enkel att excitera och ger oftast den bästa signalen, se Figur 3, vilket leder till man gärna använder detta och i vissa fall felaktigt beräknar skjuvvågen från böjvågsmätningarna (Verástegui-Flores, 2015).

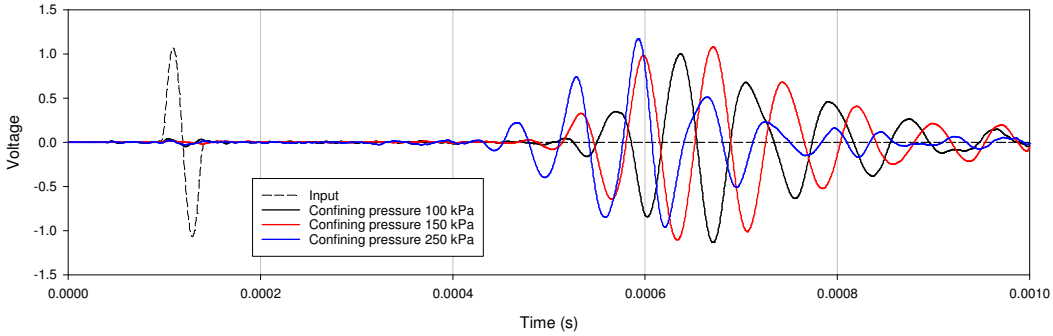


Figur 3. Skärmklipp från seismikprogrammet testande böjmod på en stabiliserad provkropp.

Användningen av böjmoden för att beräkna skjuvvågshastigheten ger en överskattning av densamma på cirka 5 %.

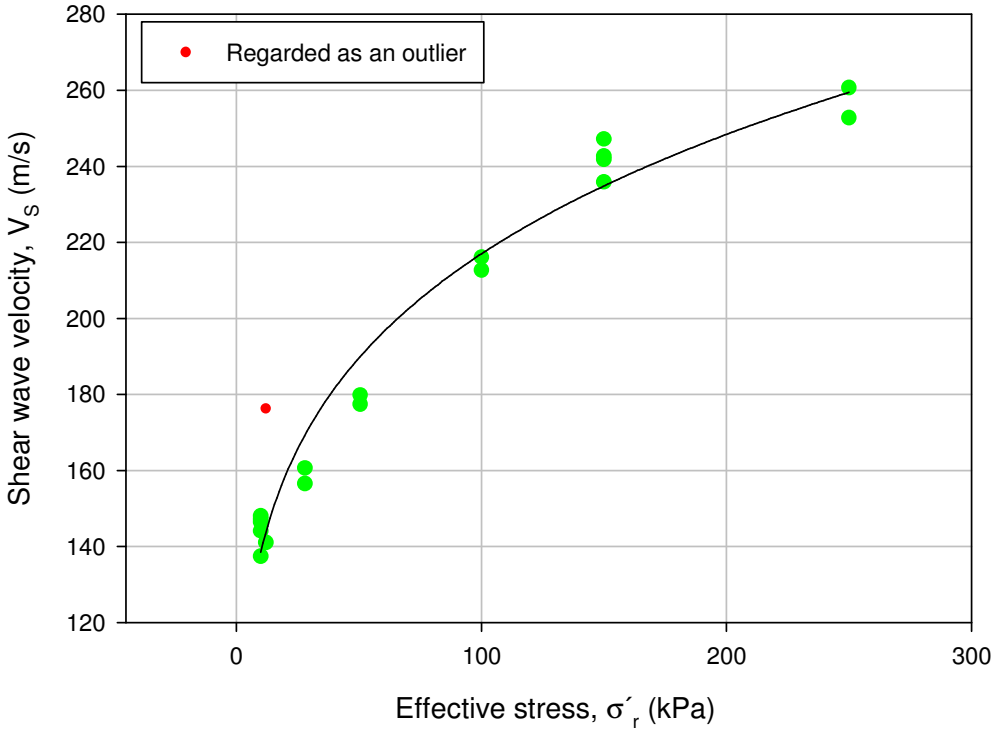
3.3 Bender elements mätningar

I ett tidigare BIG projekt (Lindh, 2016) utfördes bender elements försök på stabiliserade provkroppar. Inom ramen för det projektet uppdagades problem med böjelementensin-sticksdjup vilket resulterade i en modifiering av utrustningen. På grund av tidsbrist blev där inte utförda några referensprovningar. Därför valdes att utföra referensprovningar i detta projekt för att säkerställa utrustningens funktion. Referensprovningen utfördes på sand vilket fylldes i en s.k. ”split mould” direkt på bottenpidestalen i triaxialcellen varef-ter topplattan monterades. Vid försöken användes tre olika celltryck, 100, 150 och 250 kPa. Vid varje celltryck utfördes bender elements försök, se Figur 4.



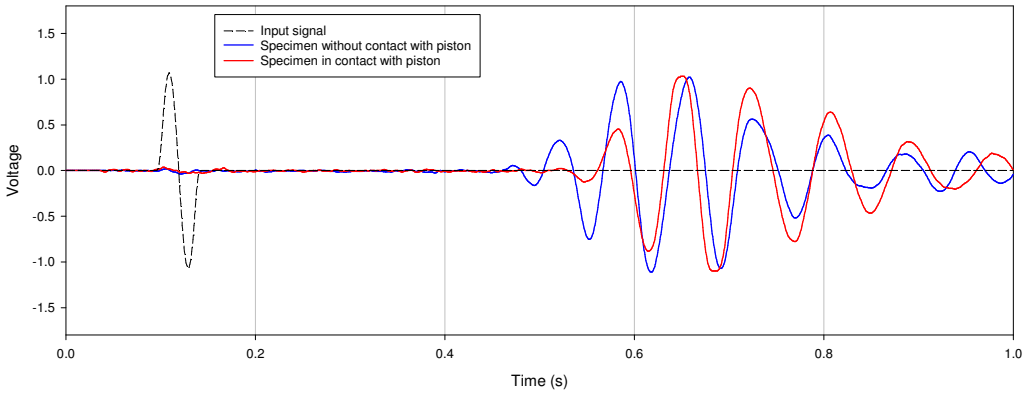
Figur 4. Graf visande mätresultaten från bender elements mätningarna med omgivningstrycken 100, 150 och 250 kPa. Resultaten följer förväntat resultat med en snabbare respons vid högre cell-tryck.

Resultaten från referensprovningen är helt i linje med förväntat resultat, d.v.s. ju högre celltryck desto kortare svarsrespons, se Figur 5.



Figur 5. Graf visande skjuvvågen beroende av effektivspänningen.

Vidare testades mätsystemets integritet i ett kopplat och ett frikopplat tillstånd. I det frikopplade tillståndet hade provkroppen ingen kontakt med triaxialcellens pistong och i det kopplade fallet var provkroppen sammankopplad med pistongen. I Figur 6 visas signal och svarssignaler för det kopplade och frikopplade systemet.



Figur 6. Graf visande mätsystemets integritet. Resultatet visar på att det kopplade systemet förändrar systemets responstid.

Anledningen till skillnaden i responstid är ännu inte helt utredd och är troligen en kombination av orsaker, t.ex. en större massa hos det kopplade systemet jämfört med ett frikopplat system. Skillnaden bör beaktas vid jämförande provning.

Den använda bender elements utrustningen är inte anpassad för generering och mätning av P-vågor varför endast S-vågsmätning har utförts i dessa försök.

4. Provningsförfarande

I försöksserien ingick både prover som under hela tiden fram till tryckning lagrats i hylsan där provet packats in och prover som avformats efter 7 dygn för att kunna mäta flexmod (≈ skjuvvåg) samt prover som efter tillverkning fick härda i en triaxialcell med olika effektivspänningar. I bender elementstestningen användes tre olika effektivspänningsnivåer 50, 100 och 150 kPa för de tre olika omgångarna.

I beräkningarna har provkropparnas mognadstal beräknats enligt

$$M_T = [20 + (T - 20) \cdot K]^2 \cdot \sqrt{t}$$

Där T = temperatur (°C) och t = tid (dagar) (Åhnberg och Holm, 1987; Kujala och Kuusipuro, 1993; Lindh, 2017).

Faktorn K bestäms enklast genom att mäta utvecklingen av P-vågshastigheten mot lagringstiden. Detta görs för provkroppar lagrade vid t.ex. 7 och 20 °C varefter K faktorn anpassas så att kurvorna för P-vågshastighet mot mognadstal går in i varandra. K faktorn varierar med bindemedelstyp.

Provkropparna har antingen lagrats i rör under hela härdningsprocessen eller i rör under 6 eller 7 dygn varefter de avformats och trimmats till rätt dimension. Triaxialprovet monterades direkt in i cellen efter tillverkningen varefter celltrycket ökades till förutbestämd nivå. Proverna lagrades i klimatrum antingen i 7 °C eller i 20 °C. De prover som lagrats utan rör lagrades i plastpåsar med en fuktad papperstuss för att säkerställa en relativ fuktighet (RF) på 100 %.

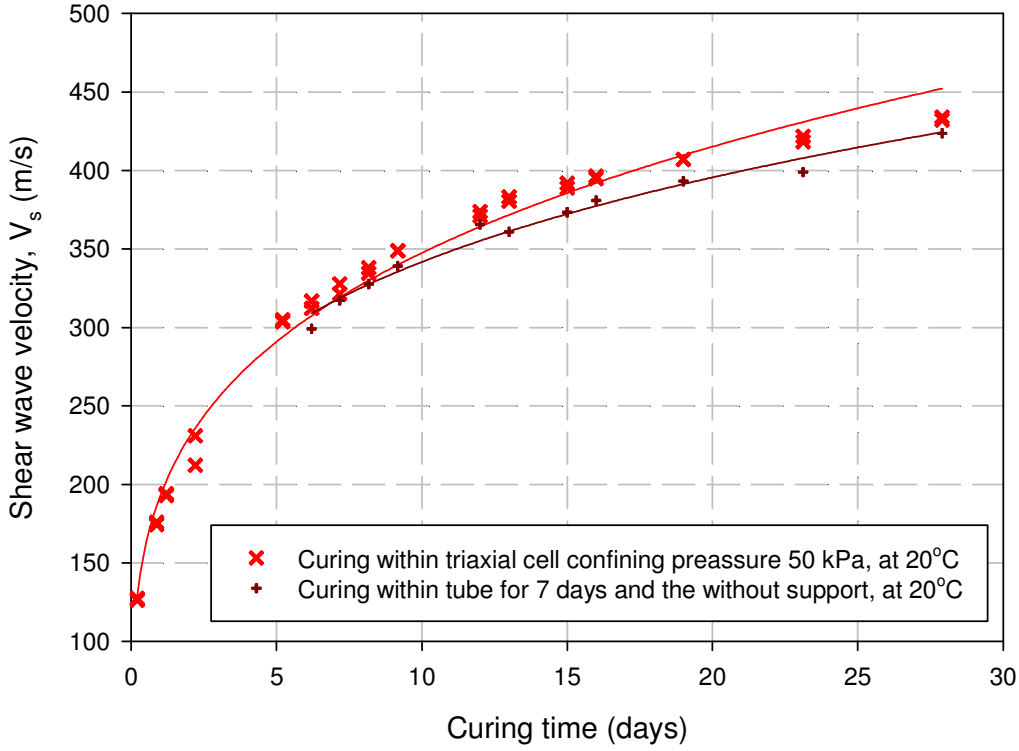
4.1 Provomgång ett

I den första provomgången tillverkades 4 provkroppar. Två av provkropparna användes för lagring i rör vid 7 respektive 20 °C. Prov nummer tre användes för lagring i triaxialcell med en temperatur på 20 °C och en effektivspänning på 50 kPa. Det fjärde provet lagrades i 20 °C men avformades efter 7 dygn för att möjliggöra flexvågsmätningar som sedan räknades om till skjuvågshastighet. Resultaten från försöken redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Resultat från provomgång 1. Skjuvhållfastheten $q_u/2$ är bestämd genom ett enaxiellt tryckförsök på samtliga provkroppar, d.v.s. provet härdat i triaxialcell blev urmonterat innan mätning av V_P och $q_u/2$.

Prov	Lagrings temperatur (°C)	Lagringstid (dagar)	V_P (m/s)	V_S (m/s)	$q_u/2$ (kPa)
BE1	7	28 (i rör)	571	331	171
BE2	20	28 (i rör)	586	362	293
BE3	20	7 (i rör) 21 (utan rör)	714	424	405
BE4	20	28 (i triaxcell)	810	243	393

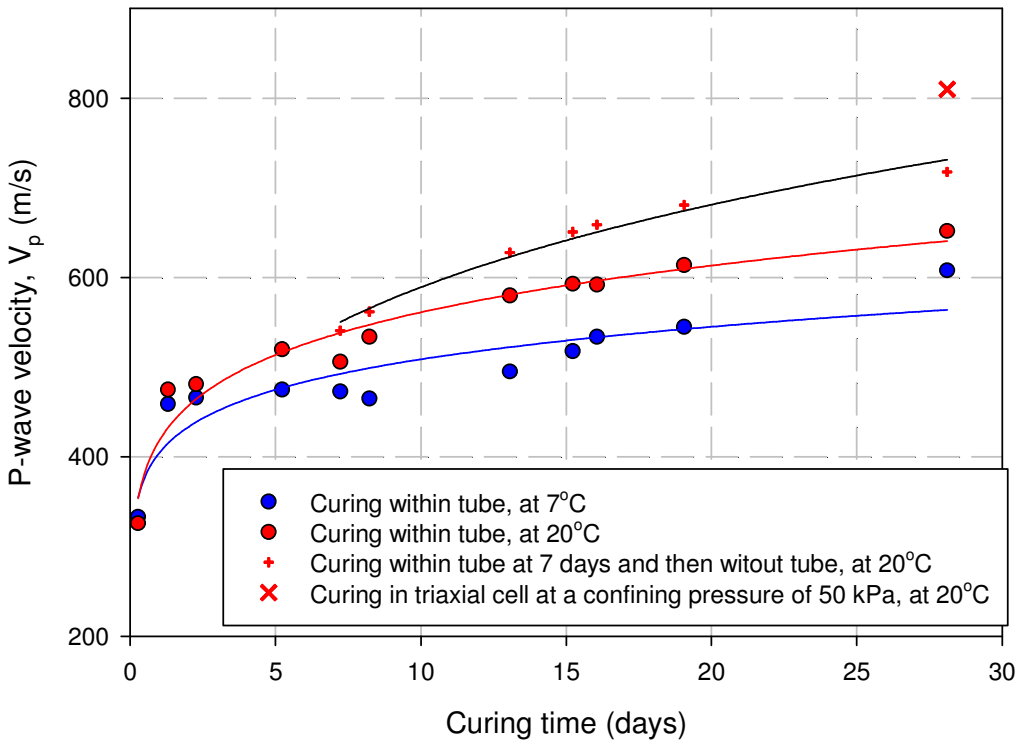
En jämförelse mellan skjuvvågshastigheternas tillväxt mot tid för prov härdade utan omgivningstryck och prov härdat i en triaxialcell med en effektivspänning på 50 kPa redovisas i Figur 7.



Figur 7. Skjuvvågshastigheten mot lagringstid för prov härdats dränerat i triaxialcell med en effektivspänning på 50 kPa och prov lagrat utan omgivningspåverkan. Skjuvvågshastigheten för provkropp BE3 är baserat på flexmodshastigheten vilken är multiplicerad med 0,95 för att erhålla skjuvvågshastigheten.

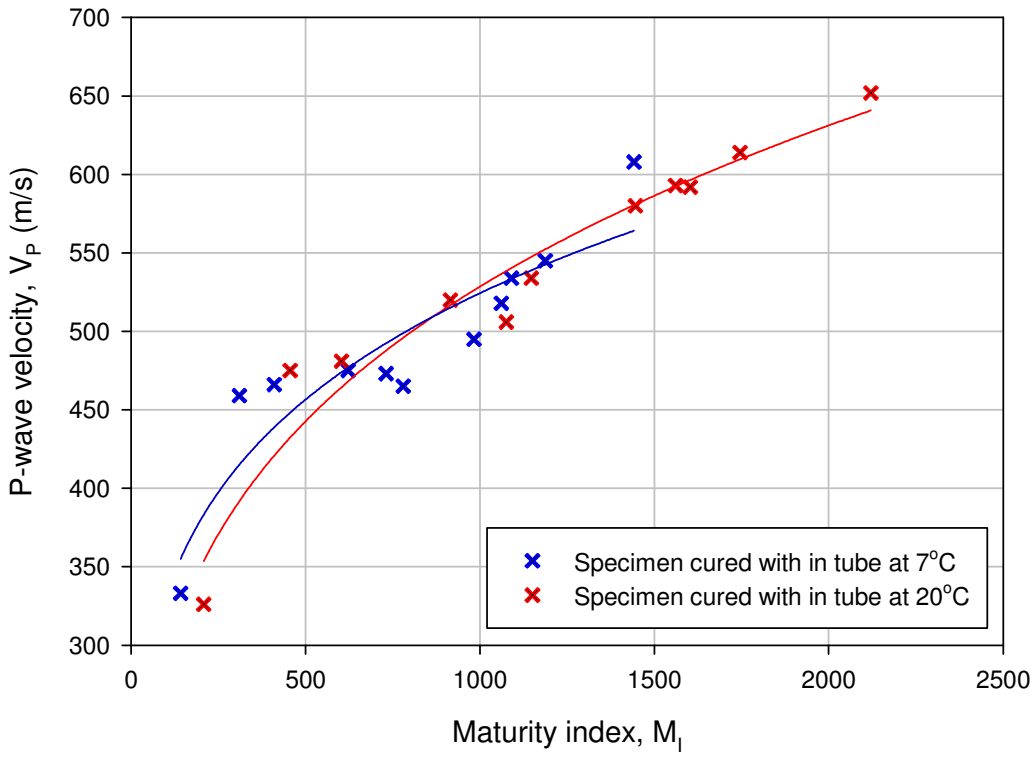
Skillnaden i skjuvvågshastighet mellan de olika härdningsförloppen är liten vilket också avspeglas i en liten skillnad i sluthållfasthet.

Då det gäller resultat från P-vågshastigheten redovisas dessa i Figur 8. Spridningen i mätresultat inom de prover som lagrats i rör BE1 och BE2 visar på dålig homogenitet i proverna. Vidare visar P-vågsmätningarna att den avformade provkroppens (BE3) P-vågshastighet var i samma nivå direkt efter avformning som provkroppen lagrad i rör. Uttryckning och trimning av provkroppen brukar normalt generera störningar som ger en sänkning av P-vågshastigheten.



Figur 8. P-vågshastighet mot lagrings tid för tre olika prover samt slutvärdet för en provkropp lagrad i en triaxialcell med effektivspänningen 50 kPa. P-vågshastigheten på triaxialprovet är mätt efter urmontering från cell Spridningen i resultaten mellan blå och röda cirklar visar på en dålig homogenitet i provkropparna.

I Figur 9 visas P-vågshastighet mot mognadstal. K faktorn sattes till 0,27 för att erhålla en god överensstämmelse mellan prov lagrat i 7 °C respektive 20 °C. Då samtliga prov lagrades i 28 dygn blev mognadstalet för prover lagrade i 7 °C knappt 1500 enheter.



Figur 9. P-vågshastigheten mot mognadstal för prov lagrat i 7 respektive 20 °C. K faktorn bestämdes i detta fallet till 0,27.

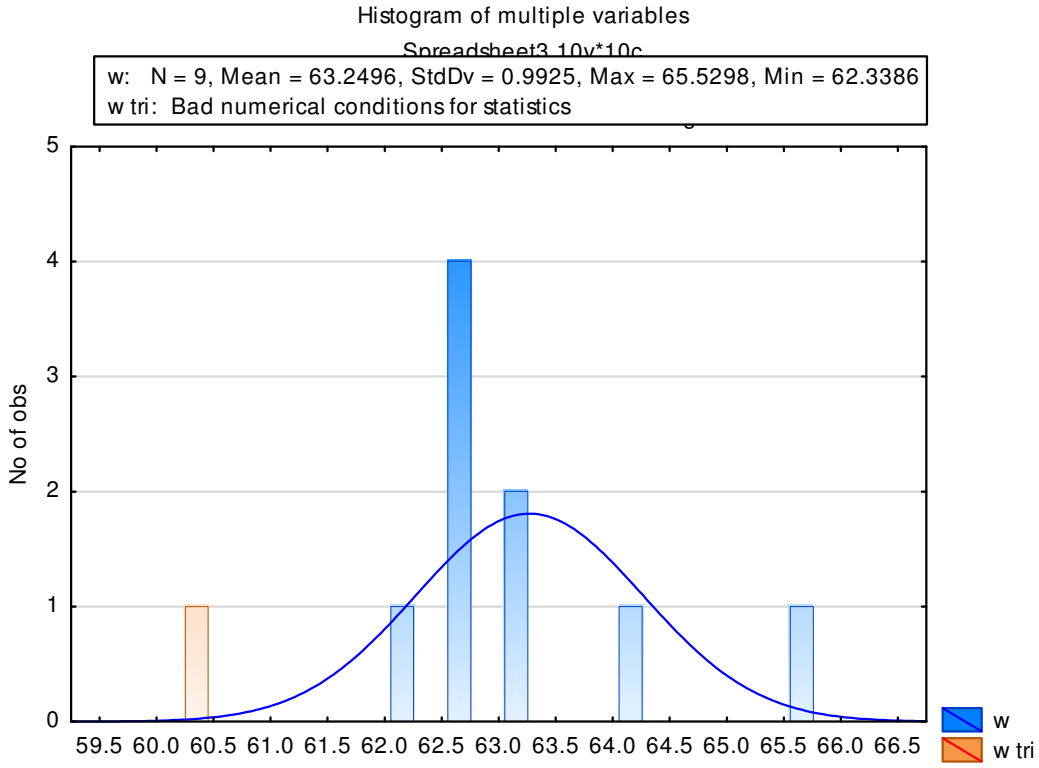
4.2 Provomgång två

I provomgång två tillverkades 10 provkroppar där en av provkropparna användes för lagring i triaxialcell med en effektivspänning på 150 kPa. Fyra provkroppar härdades i rör men avformades efter 6 dygn för att möjliggöra flexmodsmätningar (≈ skjuvvåg). Sammanställning av prover redovisas i Tabell 2.

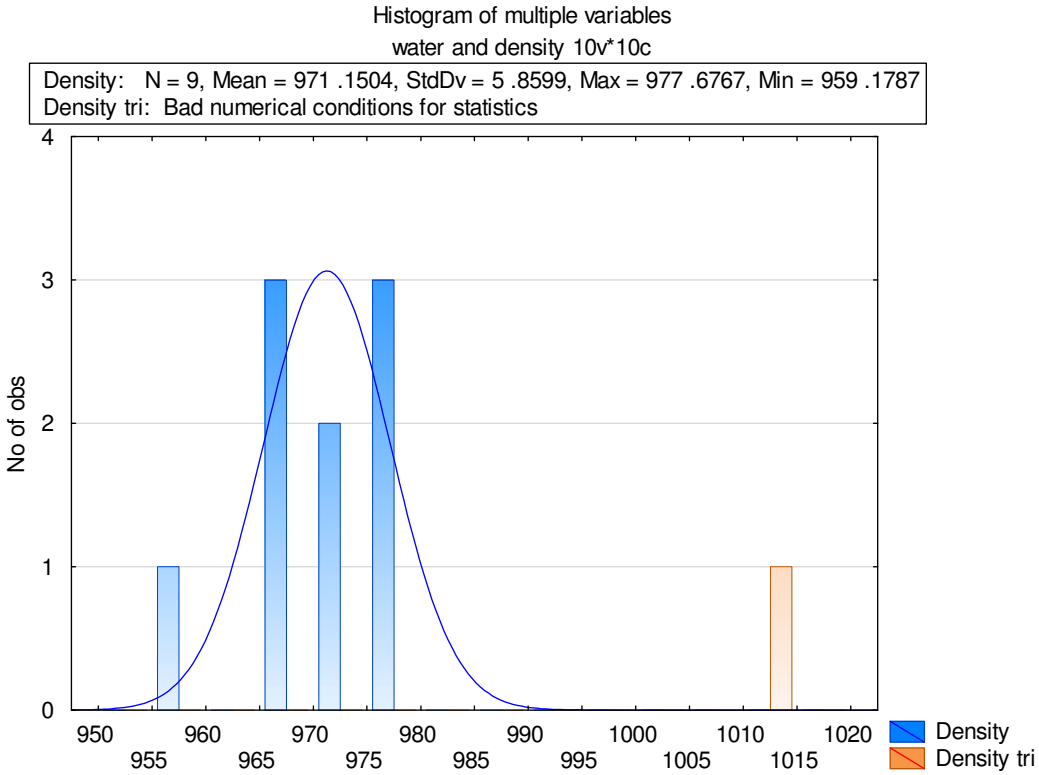
Tabell 2. Resultat från provomgång 2. *) *Prov 4 var skadat och kasserades*. Skjuvhållfastheten $q_u/2$ är bestämd genom ett enaxiellt tryckförsök på samtliga provkroppar, d.v.s. provet härdat i triaxialcell blev urmonterat innan mätning av V_P och $q_u/2$.

Prov	Lagrings temperatur (℃)	Lagringstid (dagar)	V_P (m/s)	V_S (m/s)	$q_u/2$ (kPa)
BE1	20	6 (i rör) 22 (utan rör)	801	-	447
BE2	20	6 (i rör) 22 (utan rör)	789	-	446
BE3	20	28 (i triaxcell)	907	-	607
BE4*	7	6 (i rör) 22 (utan rör)	-	-	-
BE5	7	6 (i rör) 22 (utan rör)	718	-	305
BE6	20	28 (i rör)	794	461	449
BE7	20	28 (i rör)	797	468	427
BE8	20	28 (i rör)	796	472	375
BE9	7	28 (i rör)	713	421	292
BE10	7	28 (i rör)	713	427	301

I samband med de enaxiella tryckförsöken bestämdes provkropparnas vattenkvot, se Figur 10. Resultaten visar på en lägre vattenkvot hos det triaxialhärdade provet. Provet har haft tillgång till vatten under hela härdningsförloppet, d.v.s. dränerat härdningsförlopp.

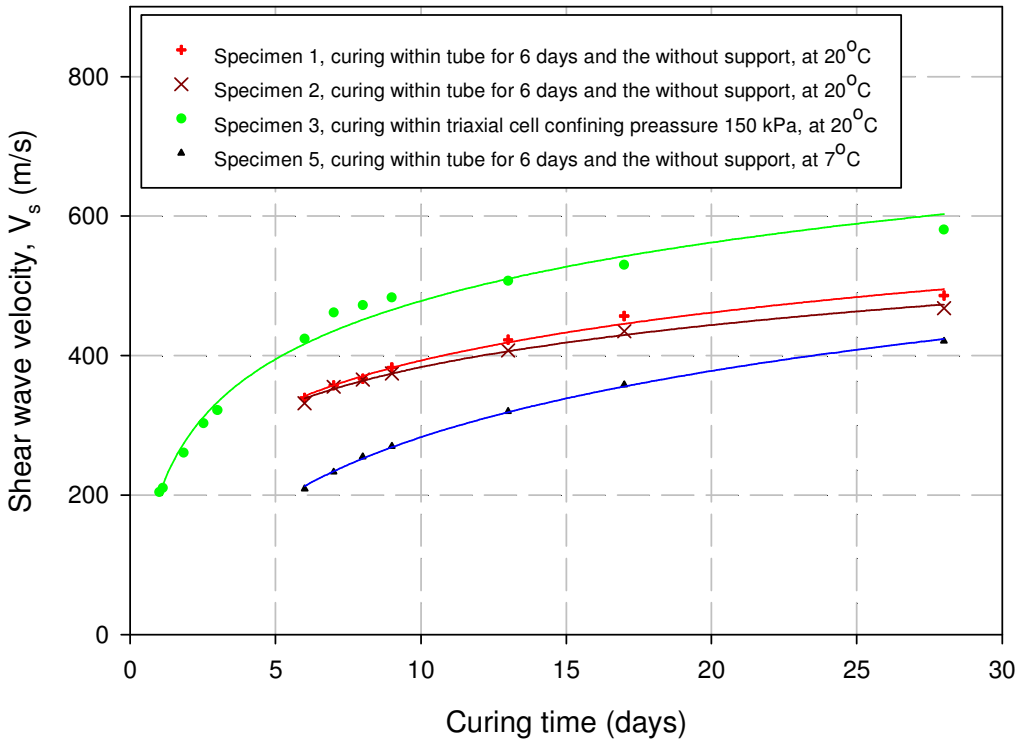


Figur 10. Histogram över de lagrade provkropparnas vattenkvot vid tryckning för provomgång två. Då endast ett prov kördes i triaxialcell finns endast ett värde på den vattenkvoten och detta bör vägas in i bedömningen.



Figur 11. Histogram över densiteten för provkroppar i provomgång två. Då endast ett prov kördes i triaxialcell finns endast ett värde på denna densiteten vilket detta bör vägas in i bedömningen.

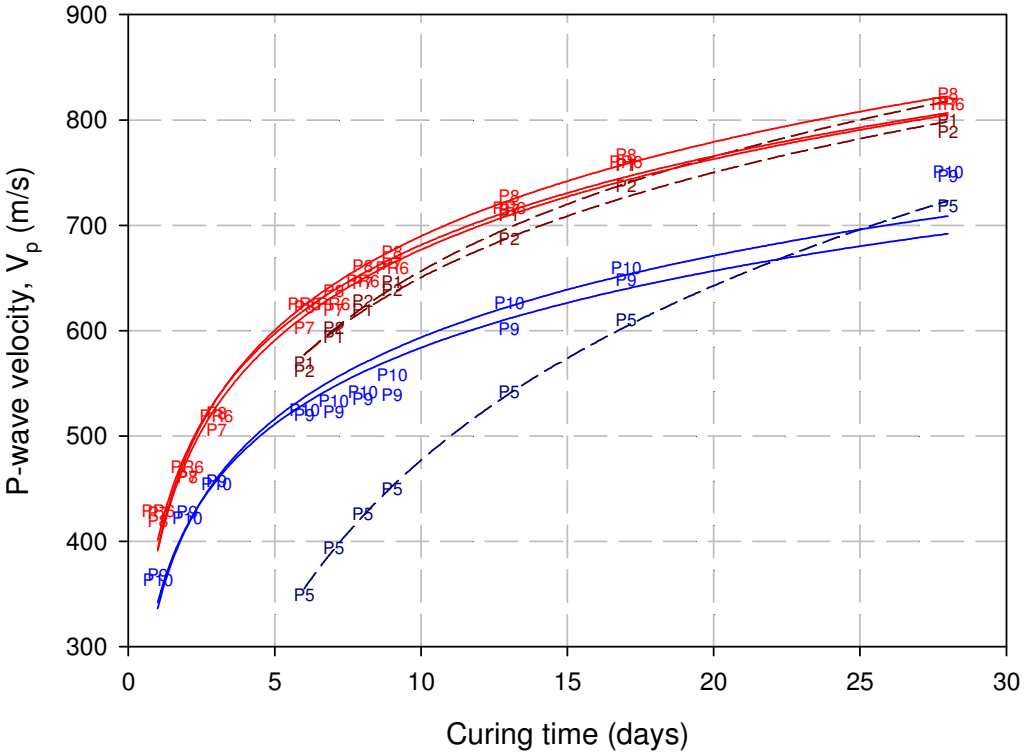
I Figur 12 visas resultat för prov lagrat i triaxialcell med en effektivspänning på 150 kPa och provkroppar lagrade utan stöd. I detta fall avformades provkropparna efter 6 dygn för att möjliggöra flexmodsmätningar. I fallet med härdning i triaxialcell utfördes endast ett prov då endast en cell med bender elements var tillgänglig. Två prover lagrades i 7 °C och två prover i 20 °C. Ett av 7 °C proverna skadades under avformningen och kunde därför inte testas vad gäller seismikmätningar.



Figur 12. Skjuvvågshastigheten mot lagringstid för provkroppar lagrade i olika temperatur- och spänningsnivåer. Skjuvvågshastigheten för provkroppar 1, 2 och 5 är baserat på flexmodshastigheten vilken är multiplicerad med 0,95 för att erhålla skjuvvågshastigheten. Triaxialprovet har härdats dränerat med en effektivspänning på 150 kPa.

Resultatet visar på en tydlig skillnad dels mellan de två olika spänningsnivåerna vid härdning dels en signifikant skillnad mellan de två olika lagringstemperaturerna, Båda fenomenen var i enlighet med förväntningarna.

För att vidare undersöka skillnader i de prover som lagrades i och utan rör mättes provernas P-vågshastighet, se Figur 13. Då proverna P1, P2 och P5 tillverkades i normala provtagningshylsor kunde inte P-vågsmätningar utföras förrän efter avformning (Lindh, 2016). Grafen visar på tydliga skillnader mellan de prover som mätts i rör och de som avformats efter 6 dygn. Skillnaden i P-vågshastighet efter avformning beror på dels störningen vid uttryckningen och trimningen till korrekt dimension dels på förändring i spänningsnivå hos det aktuella provet.

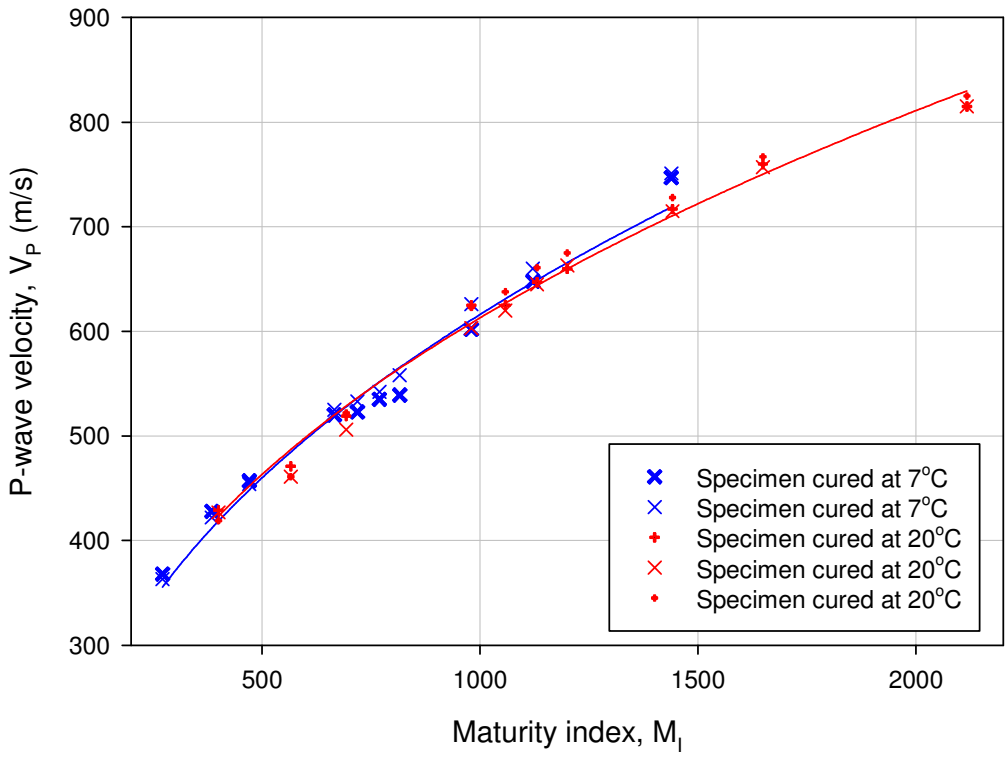


Figur 13. P-vågshastighet mot lagringstid för prover lagrade i 7 °C (blå) respektive 20 °C (röda). De streckade regressionslinjerna visar på prover som avformats efter 6 dygn. Den lägre P-vågshastigheten för de streckade regressionerna beror på störningar i provet på grund av avformning (spänningsnivå) och trimning. Differensen mellan störda och ostörda prover minskar dock med tiden.

Skillnaden i P-vågshastighet är störst för det prov som lagras i 7 °C vilket är helt förväntat eftersom härdningsprocessen är starkt temperaturberoende. Vad som däremot sticker ut är att härdningsförloppet har en högre tillväxt jämfört med prover lagrade i rör. Vidare visar grafen på en högre tillväxthastighet i P-våg för det avformade provet P5 som lagrats i 7 °C. En teori är att provet får mikrosprickor vid avformning och därmed bättre aktiverar bindemedlet. Anledningen till att prov P5 ger en snabbare tillväxt jämfört med proverna P1 och P2 som är lagrade i 20 °C är del att dessa prover blir mindre störda på grund av hanteringen på grund av en högre mognadsnivå dels att en större andel av bindemedlet har hunnit reagera hos proverna lagrade vid 20 °C.

I vissa projekt används 7 dygnshållfastheten för bestämning av den tidiga hållfastheten. Då avformas proverna efter 7 dygn och testas enaxiellt. Ovanstående resultat visar på att man bör iakttaga en viss försiktighet när man tolkar 7 dygns hållfastheter i jämförelse med till exempel 28 dygns hållfastheter.

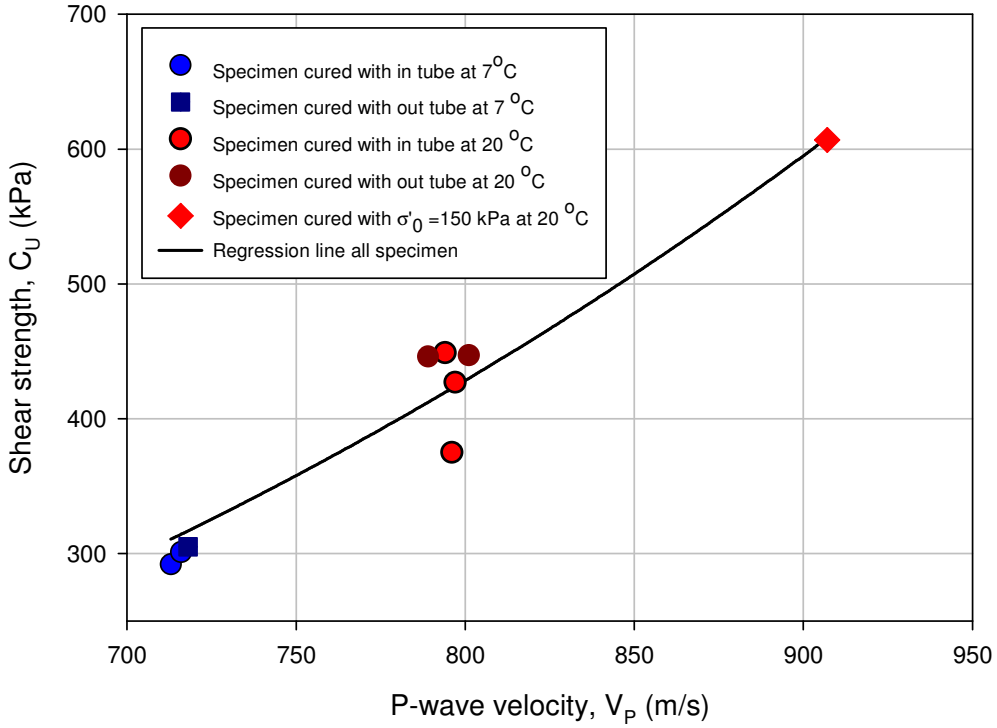
Som en jämförelse beräknades mognadstalet som för fem olika prover ur serie två. Tre av proverna var lagrade i 20 °C och två av proverna var lagrade i 7 °C. I Figur 14 redovisas provernas P-vågshasighet mot mognadstalet.



Figur 14. P-vågshastigheten mot mognadstal för prover lagrat i 7 respektive 20 °C. K faktorn bestämdes i detta fallet till 0,27.

Med en K faktor på 0,27 erhålls en mycket god överenstämmelse mellan de olika provkropparna, jämför provomgång 1.

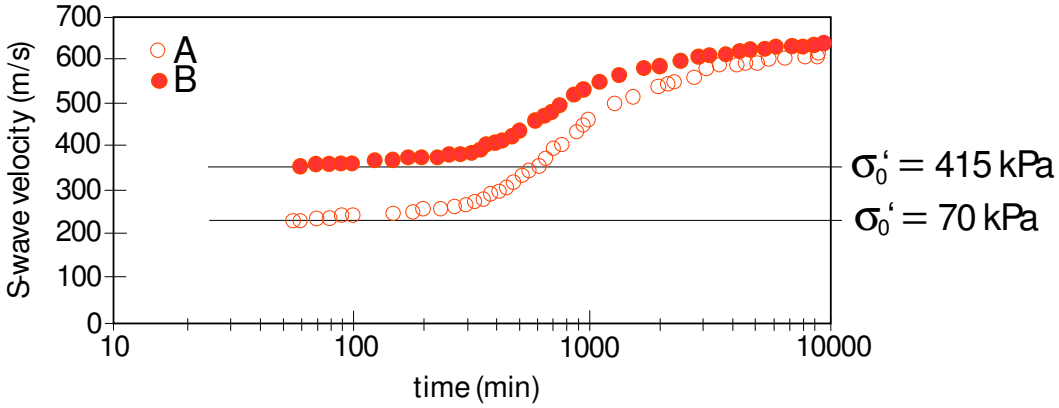
I Figur 15 visas skjuvhållfastheten som funktion av P-vågshastigheten för prover ingående i provomgång två.



Figur 15. Graf visande skjuvhållfasthet som funktion av P-vågshastigheten.

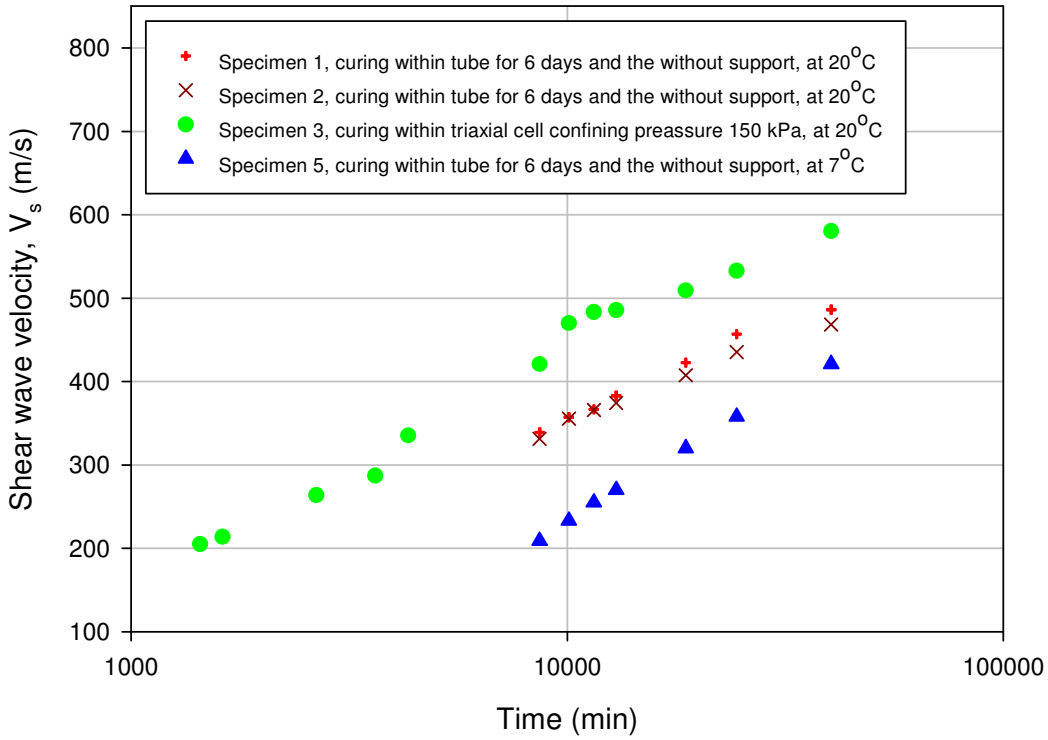
4.3 Jämförelse med andra resultat

De två olika försöksomgångarna använde samma lera och samma bindemedelskombination och mängd. Skillnaden mellan omgångarna bestod företrädelsevis av skillnaden i effektivspänning mellan de i triaxialcell lagrade provkropparna. Resultatet från denna studien kan jämföras med resultat presenterade av Santamarina *et al* (2001) se Figur 16.



Figur 16. Skjuvvågshastigheten mot lagringstid för prover lagrade i olika spänningsnivåer. Efter Santamarina *et al* (2001).

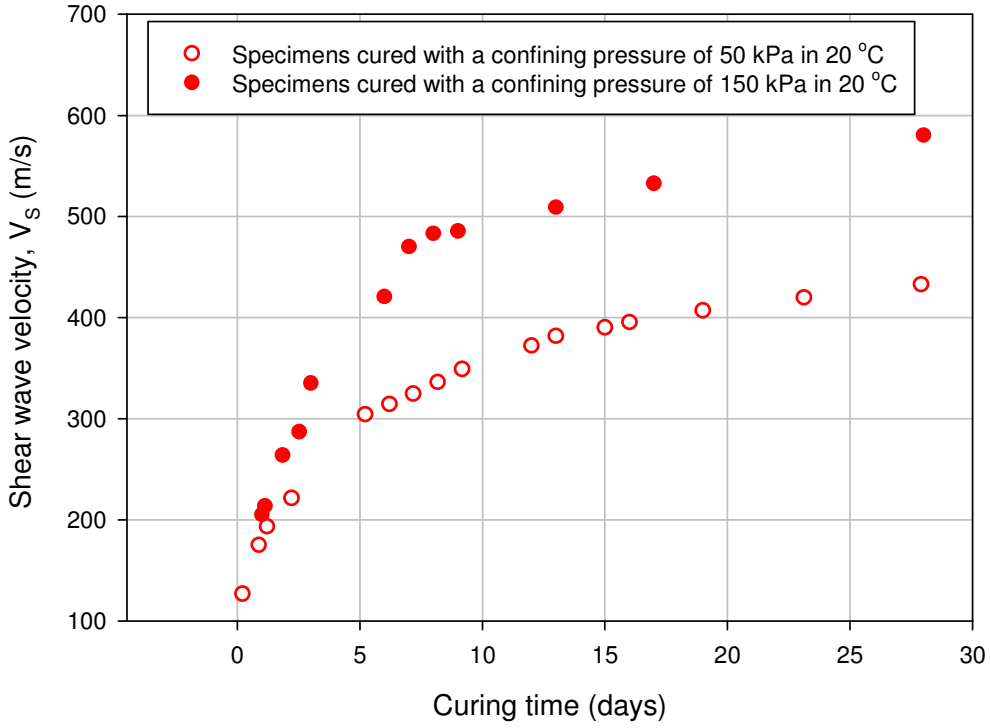
Santamarina *et al* (2001) använde en sand som basmaterial. Proverna lagrades med en omgivningsspänning på 70 respektive 415 kPa. I Figur 16 syns att cementeringen överlagrar effekten av skillnad i spänningsnivå.



Figur 17. Graf visande skjuvvågshastigheten mot lagringstiden i minuter.

I Figur 17 redovisas samma data som i Figur 12 men med logaritmisk tidsaxel i minuter i ställer för dagar för att lättare jämföra med resultaten i studien av Santamarina et al (2001). Graferna skiljer sig åt genom att i denna studien går linjerna inte ihop. Anledningen är att i denna studien är basmaterialet en lera som kan konsolidera men även att i denna studien används både kalk och cement vilket ger en långsammare härdningsprocess jämfört med en ren cement.

I Figur 18 redovisas mätdata från de två olika provkropparna lagrade vi de två spänningsnivåerna 50 och 150 kPa. Resultatet visar på att provkroppens spänningsnivå vid lagring har en större effekt på skjuvvågshastigheten jämfört med resultaten presenterade av Santamarina et al (2001).



Figur 18. Graf visande skjuvvågshastigheter för prover lagrade med en effektivspänning på 50 respektive 150 kPa. Proverna är lagrade i 20 °C upp till 28 dygn.

5. Slutsatser

För låga effektivspänningsnivåer (<50 kPa) ger resonansfrekvensmätningar likvärdiga resultat som BE-försök.

Alla prover i en serie bör tillverkas i 100 mm hylsor för att möjliggöra P-vågsmätningar direkt på alla prover för att bedöma homogeniteten i serien, d.v.s. även de prover som skall avformas efter 7 dygn för flexmodsmätningar. Prover lagrade i rör kan inte användas för flexmodmätningar då röret påverkar resultatet för mycket.

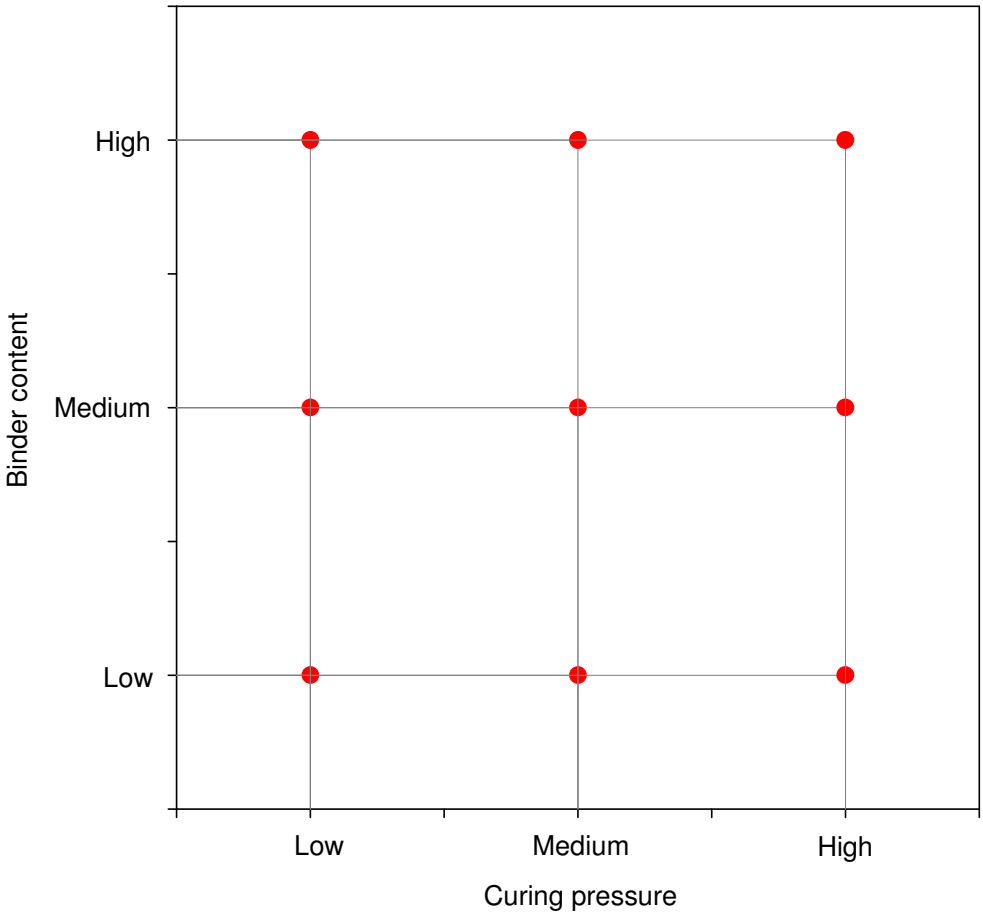
För att erhålla bästa möjliga passning av K faktorn till mognadstalet bör prover lagrade i 7 °C lagras längre än 28 dygn för att erhålla en bättre passning gentemot prover lagrade i 20 °C.

Prover som avformas och trimmas efter 7 dygn erhåller skador som kan påverka hållfastheten vilket gör att 7 dygns hållfastheten bör beaktas med viss försiktighet.

Härdningsförloppet i en triaxialcell innebär att provet placeras i en triaxialcell i snar anslutning till inpackningen. Detta innebär att provet tillåts konsolidera under härdningsfasen vilket ger en lägre porvolym som i sin tur resulterar i en lägre vattenkvot i provet.

Här bör påpekas att djupa pelare med höga omgivningstryck tryck ger sämre inblandning in situ men också bättre härdningsförhållanden jämfört med pelare på grund nivå.

Framtida forskning inom detta område kan med fördel fokuseras på spänningsnivåns betydelse för hållfastheten och hållfasthetstillväxten vid olika bindemedelsmängder, se Figur 19. Anledningen till försöken är att bestämma vid vilken spänningsnivå i förhållande till bindemedelsmängd inte längre påverkar sluthållfastheten. Genom att göra denna bestämning kan man lättare optimera minsta möjliga bindemedelsmängd vid olika spänningsnivåer/djup.



Figur 19. Försökuppställning för att utvärdera spänningsnivåns betydelse vid olika bindemedelsmängder.

Vidare bör följande scenario testas för att isolera spänningsnivåns betydelse för själva skjuvvågen. Härdning i triaxialcell med en effektivspänning på xxx kPa och BE mätningar under härdningstiden varefter provet avlastas till en effektivspänning på noll med efterföljande BE mätningar. Därefter avlastas provet och Free-Free resonant column mätningar utförs.

Referenser

Kujala K., Kuusipuro K. (1993) Bestämning av mognadsgrad hos kalpelare. Kalkpelardagen 1993 Stockholm.

Lindh P., (2017) Alternativ laboratorieinpackning av stabiliserad jord. Metod för inpackning samt utvärdering av acceleratorer vid laboratorieförsök. Metodutvecklingsprojekt 15229/330 SGI. Liköping.

Lindh P., (2017) Seismik testning av stabiliserad jord med bender element vid triaxialförsök. Resultatrapport BIG. SGI., Linköping.

Verástegui-Flores, 2015 Evaluation of the free–free resonant frequency method to determine stiffness moduli of cement-treated soil. Soils and Foundations -Tokyo- 55(5) September 2015.

Santamarina J. C., Klein K. A. and Fam M. A. 2001. SOILS AND WAVES. Wiley

Åhnberg H., Holm G., 1987. Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord. SGI Rapport 30. Linköping 1987.

Text

Statens geotekniska institut
581 93 Linköping

E-post: sgi@swedgeo.se
Växeln: 013–20 18 00