LUFTENS ROLL I VATTENMÄTTAD JORD – EN BORTGLÖMD FAKTOR I GEOTEKNIKEN

Roger Knutsson [A,B], Viktor Wiklund [A,C], Samrit Dumre [A], Sven Knutsson [A], Jan Laue [A]

[A] Luleå tekniska universitet

[B] GEOREK AB

[C] Boliden AB

SAMMANFATTNING

I geotekniken förutsätter vi vanligen att vatten är inkompressibelt, dvs. att porvattnets volym inte förändras med ökade vattentryck. För stängda (odränerade) system innebär en totalspänningsökning på vattenmättad jord att porvattentrycket ökar med samma storlek.

Vatten kan innehålla luft, både som bubblor och som löst luft. Att avlägsna bubblor är en återkommande utmaning i laboratoriemiljö om målet är att vattenmätta jorden. En vanlig metod för att reducera mängden luftbubblor är att öka vattentrycket så att luften övergår till löst form i vattnet. Luftens löslighet i vatten är både temperatur- och spänningsberoende. Även då det i litteraturen är känt att luft ökar kompressibiliteten hos luft-vatten-mixen, så är dess praktiska betydelse sällan beaktad i jordmekaniken.

I studier genomförda på LTU har effekterna av löst luft i vatten studerats i samband med odränerad skjuvning. Odränerade triaxialförsök har utförts på en sandjord där porvattnets luftinnehåll varierats. Genom noggrant arbete med vattenmättnad kunde både avluftat vatten och kranvatten generera B-värde över 95%, vilket betraktas som vattenmättat. För att lyckas lösa upp luften krävdes betydande baktryck (back pressure). Trots vattenmättnad genererades högre porvattenövertyck i jorden med lågt luftinnehåll än i jorden med högt luftinnehåll. För jorden med avluftat vatten genererades ett sprött brott med mycket låg residualhållfasthet. Å andra sidan innebar den lösta luften i kranvattnet att en högre skjuvhållfasthet kunde mobiliseras i jorden. Ingen sprödhet uppvisades i dessa test. Resultatet belyser behovet av att ytterligare studera luftinnehåll i vattenmättad jord. Beroende på vattnets luftinnehåll, både i laboratoriemiljö och i fält, kan jordens laboratoriebestämda skjuvhållfasthet vara felaktig.

SUMMARY

In geotechnical engineering, water is typically assumed to be incompressible, meaning that the volume of pore water does not change with increasing water pressure. For closed (undrained) systems, an increase in total stress on a water-saturated soil results in pore water pressure increase of the same magnitude.

Water can contain air, both as bubbles and as dissolved air. Removing bubbles is a recurring challenge in laboratory testing, when saturated soils are aimed for. A common method for reducing air bubbles is to increase the water pressure and as result air goes into dissolved form in the water. The solubility of air in water depends on both temperature and stress. Although it is well documented that air increases the compressibility of the air-water mixture, its practical significance is seldom considered in soil mechanics.

At Luleå University of Technology, dissolved air in water and its effect on pore-pressure generation during undrained shearing is being studied. Undrained triaxial tests have been performed on a sand in which the air content in the pore water was varied. Through careful saturation procedures, samples with pore water with both de-aired water and tap water generated B-values above 95%, which is normally regarded as saturated. Significant back pressure was required in order to dissolve the air. Despite fully saturated samples, higher excess pore-water pressures were generated in the soil with low air content compared with that in in the soil with high air content. For the soil with de-aired water, a brittle response with very low residual strength occurred. In contrast, for the soil with tap water, the dissolved air (and its effect on water compressibility) allowed a higher shear strength to mobilized. No brittleness was observed in this test. The results highlight the need for further studies of air content in saturated soils. As a consequence of the air content in the pore water, both in the laboratory and in the field, the estimated shear strength of the soil may be inaccurate.

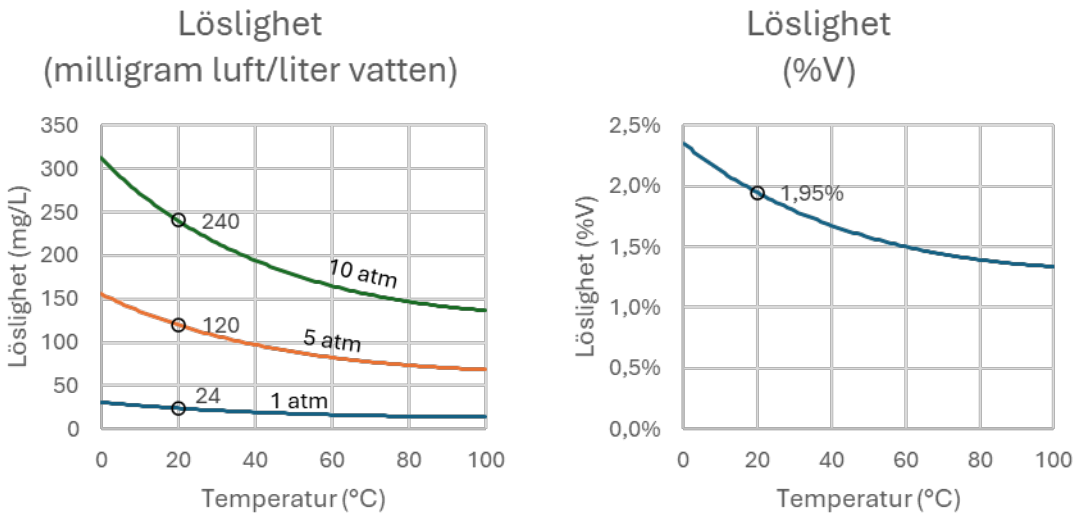
1 BAKGRUND

Vatten beskrivs ofta som en enkel och välkänd substans, men i naturen är vattnet sällan helt ”rent”. I nästan allt vatten finns en viss mängd luft löst, främst bestående av syre och kväve. Vid rumstemperatur kan ca 25 mg luft per liter vatten vara löst. Denna luft spelar en viktig roll i många naturliga och tekniska processer, från hur vatten beter sig i marken till hur livet i sjöar och hav kan existera.

En av de mest välkända konsekvenserna av löst luft är kanske den som fiskar är helt beroende av. Trots att vatten består av H_2O, är det inte dessa syreatomer som fiskarna via sina gälar använder. Istället utvinner fiskarna det lösta syret, som vid 20°C typiskt ligger på 9 mg/L, och som tillsammans med andra gaser bildar en osynlig gaslösning. Utan detta syre skulle vattenmiljöer snabbt bli obeboeliga för de livsformer vi omger oss av.

Löst luft gör sig också påmind i vardagen. När man värmer vatten i en kastrull minskar gasernas löslighet kraftigt, och den luft som tidigare var osynligt löst i vattnet börjar frigöras. De första små bubblorna som bildas längs kastrullens botten är alltså inte ånga, utan just luft som lämnar sin lösning när temperaturen stiger.

Luftens löslighet i vatten illustreras i Figur 1, där vänster figur illustrerar massa luft (milligram) per liter vatten för tre olika tryck (1 atm, 5 atm resp. 10 atm), och höger figur illustrerar lösligheten uttryckt som volymprocent (volymen luft delat med volymen vatten). Ur figurerna blir det tydligt att lösligheten minskar med ökad temperatur. Det är även tydligt att med ökat tryck så kan större massa luft lösas i vattnet. Vid 20°C är lösligheten 24mg/L vid atmosfärstryck, men ökar linjärt med trycket till 120mg/L och 240 mg/L vid 5 resp. 10 atm. I höger figur finns enbart en kurva som representerar löslighet (volymprocent). Oavsett tryck så är det samma mängd volym (vid en given temperatur) som är tillgänglig för löst luft. Ökat tryck innebär således att luften komprimeras, och det får plats med högre massa för samma volym. För kurvorna i Figur 1 förutsätts luften bestå av kväve (78,08%V), syre (20,95%V), argon (0,93%V) och koldioxid (0,04%V).



Figur 1. Vänster: Löslighet (luft i vatten) uttryckt som milligram luft per liter vatten; tydligt temperatur- och tryckberoende. Höger: Löslighet uttryckt som volymprocent (volym luft /volym vatten); tydligt temperaturberoende, men oberoende tryck.

I tekniska sammanhang kan löst luft få betydande konsekvenser. Rent vatten är i praktiken inkompressibelt, men även små mängder luft - i löst form eller som mikroskopiska bubblor – kan öka vattnets kompressibilitet påtagligt.

Kompressibilitet (β) är ett mått på hur mycket ett material minskar i volym när det utsätts för ett tryck. Enheten är Pa^{-1}. Ett annat uttryck är bulkmodulen (K), vilket är styvheten som motsvarar kompressibiliteten. Bulkmodulen är inversen av kompressibiliteten (1/β), med enheten Pa.

Kompressibiliteten i rent vatten (ingen luft) är till viss del beroende av temperatur och tryck, och är för temperatur 20°C och atmosfärstryck ca $4{,}1 \cdot 10^{-10}$ Pa^{-1}.

För luft betraktad som ideal gas är kompressibiliteten starkt beroende av tryck, men inte av temperatur. För 1 atmosfärstryck är kompressibiliteten i luft ca $9{,}9 \cdot 10^{-6}$ Pa^{-1}, dvs. ca 24 tusen gånger högre kompressibilitet än för rent vatten.

Uttryckt som bulkmoduler (K=1/β) är dessa ca 2,5GPa och ca 0,1MPa för vatten respektive luft.

I de fall som det finns luft i vattnet beräknas kompressibiliteten för vatten-luft-mixen (β_{mix}) förenklat:

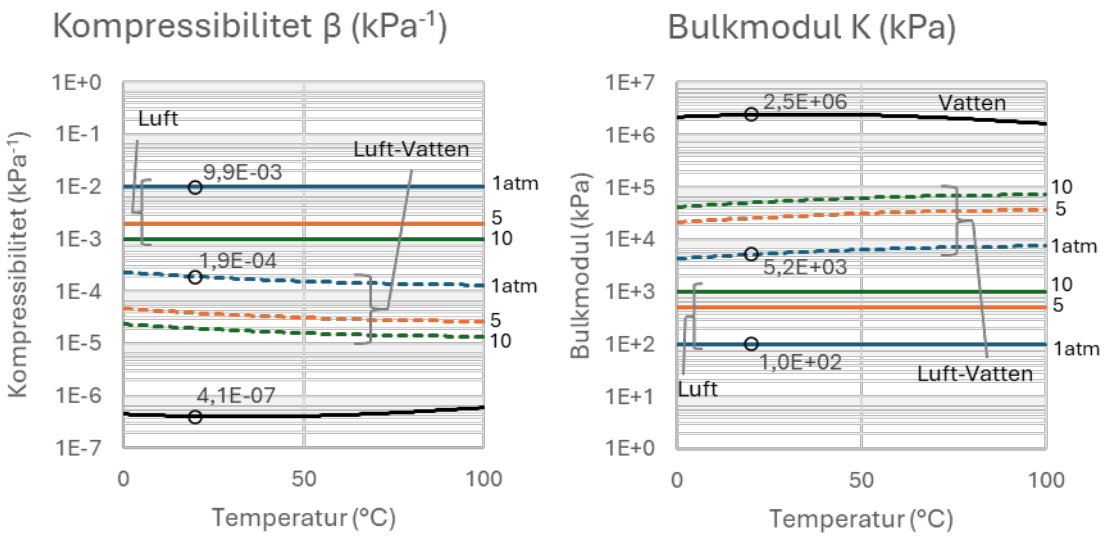
$$\beta_{mix} = \frac{1 - \varphi_{air}}{1/\beta_w} + \frac{\varphi_{air}}{1/\beta_{air}}$$

Där φ_{air} är volymfraktionen av luft i vatten
β_w kompressibilitet rent vatten
β_{air} kompressibilitet luft

I Figur 2 redovisas kompressibilitet (vänster) och bulkmodul (höger) för olika temperaturer och tryck (1atm, 5atm och 10atm). För vattnet finns enbart en kurva då det är förhållandevis oförändrat vid olika tryck. De heldragna kurvorna (blå, orange och grön) representerar luft vid olika tryck, och de streckade kurvorna motsvarar beräknade värden där det finns löst luft i vattnet. Notera att kompressibilitet och bulkmodul här anges i enheterna kPa^{-1} respektive kPa (1000Pa = 1kPa).

För de beräknade värdena i Figur 2 (löst luft i vatten) har det antagits att maximal mängd luft är löst i vattnet, dvs temperaturberoende volymfraktioner enligt Figur 1 (höger). Inga luftbubblor finns i vattnet.

De svarta cirklarna motsvarar värden vid temperatur 20°C och 1 atm. För luft-vatten-mixen så är kompressibiliteten och bulkmodulen beräknade till $1{,}93 \cdot 10^{-7}$ Pa^{-1} respektive $5{,}19 \cdot 10^{6}$ Pa (dvs. 5,19MPa). Detta motsvarar 472 gånger högre kompressibilitet (eller lägre bulkmodul) jämört med rent vatten.



Figur 2: Vänster: Kompressibilitet vs temperatur. Höger: Bulkmodul. Rent vatten (svart), luft (heldragna blå, orange och grön), samt luft-vatten-mix (streckade). Blå =1atm, Orange=5atm, och Grön=10atm.

Kompressibilitet i jordars porvatten har studerats av bl.a. Fredlund (1976), Schwab et al. (2004), Fonesca et al. (2021). En djupare beskrivning av aktuell studie återges i Samrit Dumres examensarbete (Dumre 2025).

1.1 Frågeställning

I denna studie avses följande frågeställning att besvaras:

Påverkas den odränerade skjuvhållfastheten av löst luft i vattnet?

2 METOD

I denna studie utfördes triaxialförsök på en siltig sand (ca 26% finjordshalt). Försöken utfördes som aktiva (dvs. kompression), med isotropisk konsolidering följt av odränerad skjuvning. De studerade proverna tillverkades i laboratorium med mål att nå samma lagringstäthet (samma portal) inför skjuvning. I studien varierades porvattnets luftinnehåll samt vattenmättnadsmetodik för att studera porvattnets effekt på porvattenövertryck och jordens mekaniska respons.

Provtillverkningen utfördes genom att ”bygga” proverna på plats i triaxialapparaten. Genom en tredelad form, med membranet på insidan, byggdes en provkropp upp genom att stegvis placera sanden i membranet. Provtillverkningen följde det som i litteraturen kallas ”moist tamping method” samt ”under compaction method”, där det tillförda materialet placerades i fuktigt tillstånd (ca 7% vattenkvot) samt med

varierande inpackning och med målet att nå ett homogent prov med lös lagring (Ladd 1978).

Efter tillverkning vattenmättades proverna. Två metoder nyttjades:

- **S1** Genomströmning (flushing) av porvatten och baktryck (back pressure) till 800 kPa.
- **S2** Genomströmning av koldioxid (CO2), genomströmning av porvatten och baktryck till 50 kPa.

Vid genomströmning (flushing) trycks vatten upp genom provet med målet att porvolymen ska fyllas med vatten. Genomströmningen sker med låg gradient för att undvika att kornskelettet störs av de hydrauliska krafterna. Genomströmning med koldioxid är en metod där porluften först ersätts med koldioxid. Vid efterföljande vattengenomströmning löses koldioxiden upp i vattnet, som därmed påskyndar vattenmättnadsfasen (koldioxid löses lättare än luft).

Vid backtryck trycksätts porvattnet så att kvarvarande luft kan lösas upp. Samtidigt påförs yttre laster så att effektivspänningen i provet bibehålls.

Efter vattenmättnad utfördes en sk. B-check. Systemet stängs tillfälligt (odränerat) och en yttre last (isotropiskt) påförs snabbt. Responsen i porvattnet mäts, och bör (om vattenmättat med inkompressibelt vatten) öka lika mycket som den påförda lasten. Ett B-värde beräknas som kvoten mellan portrycksökningen och den påförda lasten. Vanligtvis nyttjar många laboratorium ett krav på B-värde om 0,95 för att betrakta vattenmättnadsfasen som lyckad, och för att betrakta provet som vattenmättat.

I denna studie nyttjades två typer av porvatten:

- **Kranvatten**
- **Avluftat och avjonat vatten**

Luftmängden har inte mätts direkt i denna studie utan syreinnehållet uppskattades till 10,6 mg/L (vid 15°C) för kranvattnet, och 3,1 mg/L (vid 19,5°C) för det avluftade och avjonade vattnet (således ej fullständigt avluftat). För kranvattnet innebär detta mycket nära maximal löslighet (vid högre halter genereras luftbubblor), medan det för det avluftade och avjonade vattnet innebär det ca 0,7 volymprocent luft.

Uppmätta B-värden redovisas i Tabell 1. Generellt uppnåddes högre B-värde för prover som vattenmättats med metod S1, dvs. med högre baktryck. Med denna vattenmättnadsmetodik kunde både avluftat vatten och kranvatten uppnå samma B-värde (0,96). Detta kunde ej uppnås med metod S2 (lägre baktryck), trots genomströmning med koldioxid.

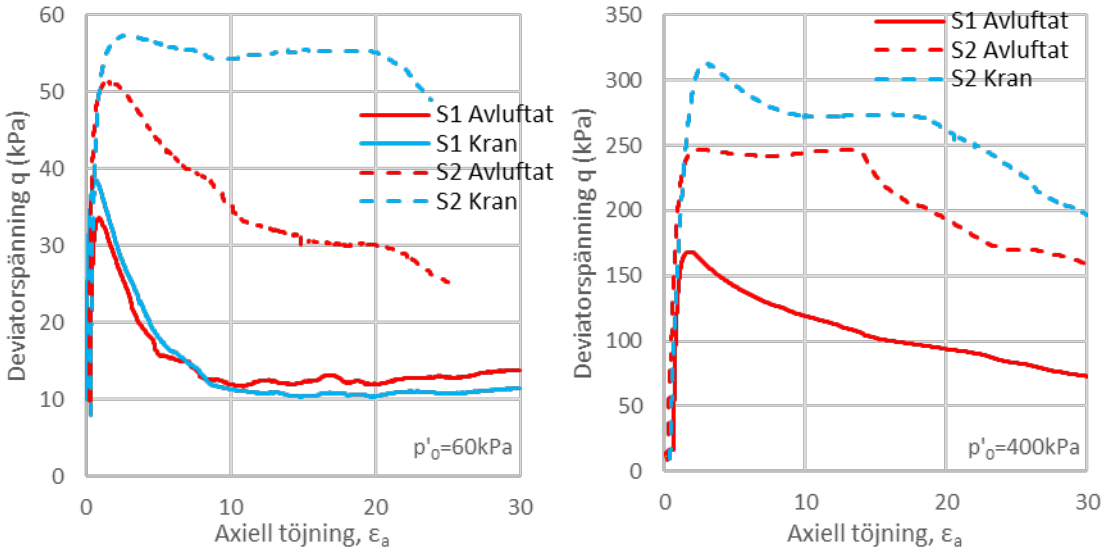
Tabell 1. B-värde efter vattenmättnadsfas

		Vattenmättnadsmetod	Avluftat och avjonat vatten	Kranvatten
S1	Prov 1 Prov 2	Flushing + 800kPa baktryck	0,96 0,96	0,96
S2	Prov 1 Prov 2	Flushing CO2+H2O + 50kPa baktryck	0,91 0,93	0,90 0,88

Sammanfattningsvis utfördes 7 triaxialförsök (3st S1-prover och 4st S2-prover) där samtliga tillverkades med mål att nå samma portal (=1) motsvarande mycket lös lagring. Portalet minskade sedan under konsolidering. De som benämns ”Prov 1” i Tabell 1 konsoliderades till ca 60kPa, och de som benämns ”Prov 2” konsoliderades till ca 400kPa. Resultatet från skjuvningen redovisas i följande kapitel.

3 RESULTAT

I Figur 3 redovisas deviatorspänning vs axiell töjning från de utförda triaxialförsöken. I vänster figur visas resultatet från konsolideringsspänningar 60 kPa och i höger för konsolideringsspänningar 400 kPa. Röda kurvor motsvarar tester med avluftat vatten, och blå motsvarar tester med kranvatten. De heldragna kurvorna motsvarar vattenmättnadsmetodik S1 (dvs högt baktryck, och höga B-värden) och de streckade kurvorna metod S2 (lägre baktryck och sämre B-värden).



Figur 3. Deviatorspänning vs axiell töjning. Vänster: Tester utförda efter konsolidering till ca 60kPa. Höger: Tester utförda efter konsolidering till ca 400kPa.

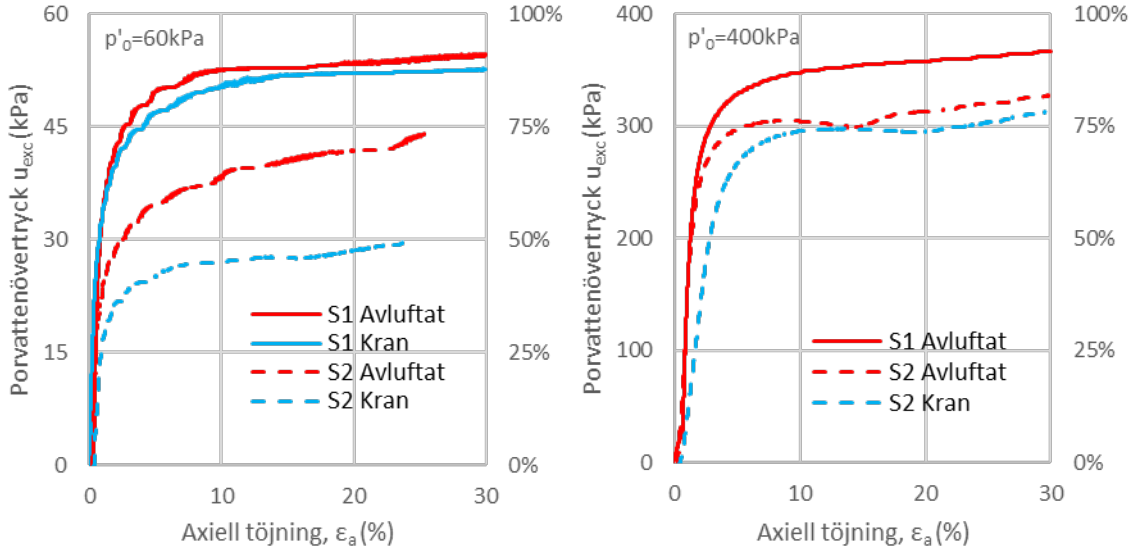
För S1-proverna (konsoliderade till 60kPa, vänster figur) utvecklades en peak i uppmätt deviatorspänning vid ca 1% axiell töjning, följt av mjuknande beteende, för

att sedan nå residuala tillstånd (någorlunda konstant) efter ca 10% töjning. För provet med kranvatten var peakevärdert högre än för provet med avluftat vatten, ca 38kPa respektive ca 33kPa. Om peakvärdet betraktas som ett mått på jordens hållfasthet resulterar kranvatten i ca 15% högre uppmätt hållfasthetet än vad som uppmätts då porvattnet består avluftat vatten. Däremot uppnåddes ungefär samma deviatorspänning 12 kPa vid residualt tillstånd.

För S2-proverna (CO2-flsuhing och lågt baktryck) så var det bara provet med avluftat vatten som det utvecklades en tydlig peak. Generellt utvecklades högre deviatorspänningar för S2-proverna jämfört med S1-proverna, med residuala tillstånd på ca 30kPa (avluftat) respektive 55kPa (kranvatten). Efter ca 20% töjning kunde ett visst mjuknande beteende observeras för S2-proverna. Tolkningen av detta är att det mera är en effekt av försöksmetod och utrustning och utgör inte ett beteende för det testade materialet.

För testerna som utfördes för de höga konsolideringsspänningarna (höger figur) kan samma beteende noteras som observerats för proverna med lägre konsolideringsspänning. För S2-proverna utvecklades högre deviatorspänning än för S1-provet, och det var även högst deviatorspänning för provet med kranvatten. För det avluftade vattnet (S1) utvecklades en peak följt av mjuknande beteende.

I Figur 4 redovisas porvattenövertryck vs axiell töjning. I vänster figur visas resultatet från konsolideringsspänningar 60 kPa och i höger figur för konsolideringsspänningar 400 kPa. På vänster axel redovisas uppmätta porvattenövertryck i kPa och på höger sida av diagrammet kan porvattenövertrycket avläsas i procent av initial medeleffektivspänning. Porvattenövertrycket är alltså normaliserat mot effektivspänningen100% innebär således att det pga. skjuvning utvecklas lika stort porvattenövertryck som den initiala effektivspänningen, dvs. ett tillstånd som ofta benämns ”liquefaction” eller flytjordstillstånd.

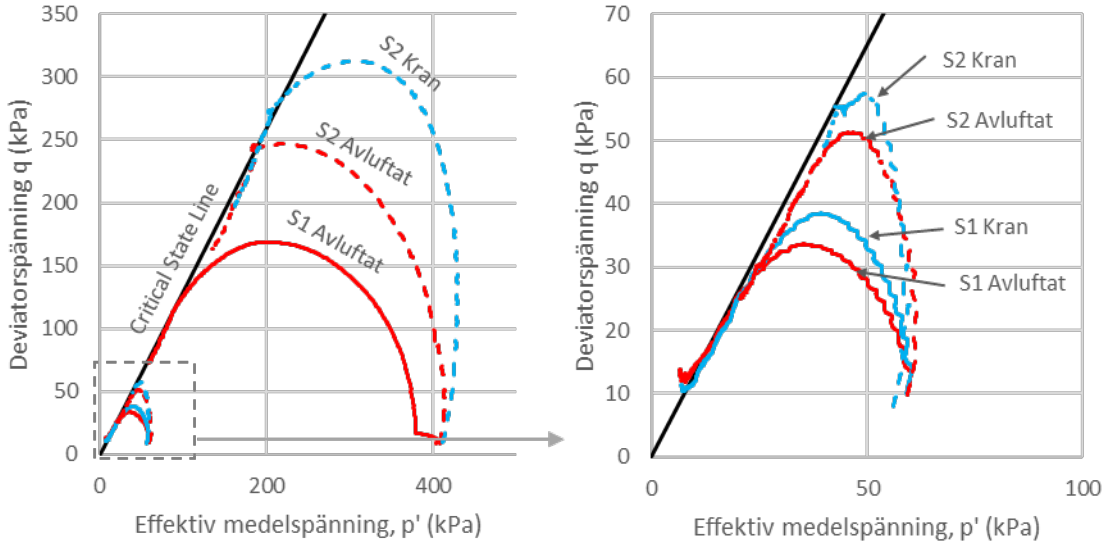


Figur 4. Porvattentryck som genereras under skjuvningen. Vänster: Tester utförda efter konsolidering till ca 60kPa. Höger: Tester utförda efter konsolidering till ca 400kPa.

Högst porvattenövertryck utvecklades för S1-tillverkade prover. De tre försöken som utförts med S1-metodik innebar porvattenövertryck motsvarande ca 90% av initiala konsolideringspänningarna. Det är även för dessa försök som det utvecklades ett utpräglat deformationsmjuknande beteende, se Figur 3. Det är även tydligt att det genererades högre porvattentryck för prover med avluftat vatten jämfört med om porvattnet var kranvatten. De skjuvinducerade porvattentrycken (Figur 4) förklarar således storleksordningen mellan resultaten i Figur 3 (deviatorspänningar).

I Figur 5 redovisas effektiva spänningsvägar (deviatorspänning vs effektiv medelspänning) samt utvärderad Critical State Line (CSL). Eftersom samtliga prover utförts på lösa prover, och vid odränerade tillstånd, så viker samtliga spänningsvägar av åt vänster innan de följer (och slutligen stannar av) längs Critical State Line. Att de viker av åt vänster beror på att det utvecklas ett porvattenövertryck (Figur 4). Som visas i Figur 3 och Figur 4, blir det tydligt att högre deviatorspänning kan mobiliseras i försöken där proven vattenmättats enligt metod S2 jämfört med S1. Därutöver, utvecklas högre deviatorspänningar i proverna med kranvatten jämfört med avluftat vatten.

Samtliga försök når samma Critical State Line (svart linje) med lutning 1,3 (motsvarande friktionsvinkel 32°). Porvattnets luftinnehåll (och metodik för mättnad) verkar således inte ha effekt på CSL, utan enbart på vägen dit.



Figur 5. Effektiva spänningsvägar (q vs. p'). Vänster: Samtliga resultat. Höger: Axlar anpassade för att förtydliga resultatet vid p'$_0$=60 kPa.

Sammanfattningsvis visar resultatet att:

- För proverna som vattenmättats med S1 (högt baktryck) utvecklades högre porvattentryck än för dem som tillverkats med metod S2 (lågt baktryck). Detta går i linje med att B-värden är högre för S1-prover än för S2-prover.
- Följaktligen utvecklades lägre deviatorspänning för S1-proverna än för S2-proverna.
- Även då både proverna med avluftat vatten och kranvatten kunde vattenmättas till samma B-värde (S1-proverna), så genererades högre porvattentryck i avluftat vatten än i kranvatten. Följaktligen blev deviatorspänningen lägre för prover med avluftat vatten än för de med kranvatten.
- Samtliga försök nådde samma CSL, oavsett hur porvattentrycket utvecklades.

4 DISKUSSION

Denna studie visar att prover vattenmättade med hjälp av högt baktryck (back pressure) ger högre B-värde än om samma prover vattenmättas med lägre baktryck. Även då metod S2 innehöll steg med koldioxidgenomströmning kompenserade detta ej för det lägre baktrycket, med lägre B-värde som följd. S2-proverna med B-värden under 0,95 betraktas således som ”omättade” enligt vedertagen praxis. För dessa prover kan det således ha bevarats luft i form av bubblor, vilket kan förklara efterföljande (låga) portrycksrespons och (höga) deviatorspänning.

Vad som dock ännu inte besvarats, avseende vattenmättnadsmetodiken, är frågan ”Vad är att betrakta som vattenmättat?”. Med ökat baktryck kan luftbubblor lösas i vattnet. Luften komprimeras så att den ”får plats” i vattnets lösningsbara volym. Men

det betyder ju inte att luften försvunnit, och luftens inverkan på kompressibiliteten är även kvar. Vid fullt vattenmättad porvolym kan det ännu finnas löst luft, som påverkar kompressibiliteten. Hur detta återspeglar B-värden, och vilket krav på B-värden som bör råda i lab, är frågor som behöver studeras ytterligare.

Med hjälp av odränerade triaxialförsök på lös jord belyser denna studie effekter av vattnets luftinnehåll. Vid skjuvning utvecklas högre porvattentryck i vatten med lågt luftinnehåll jämfört med vatten med högre luftinnehåll. Detta konstaterades trots att B-värdena var identiska.

Resultaten från triaxialförsöken resulterade samtliga i samma friktionskvot 1,3 (enligt Critical State Line), motsvarande friktionsvinkel 32°. Detta innebär att den dränerade skjuvhållfastheten således är densamma för alla testade prover. Detta är rimligt eftersom det är samma sorts jord som studerats i försöken. Men den odränerade hållfastheten, oavsett om vi väljer att beskriva den med peak hållfasthet eller residualvärde, är starkt påverkad av luftens innehåll. Desto mer luft, även om den är löst, desto högre skjuvhållfasthet. Det olika luftinnehållet återspeglas inte helt av uppmätta B-värden och dessa ska användas med försiktighet för att avgöra jords vattenmättnadsgrad och luftinnehåll.

Att löst luft i vatten har inverkan på portrycksresponsen vid odränerad skjuvning är, med tanke på den ökade kompressibiliten hos porvattnet inte konstigt. Några få volymprocent luft ökar kompressibiliten flera hundra gånger. I aktuell studie påvisades effekten på ett sådant sätt att det enbart pga. porvattnets luftinnehåll kunde utvecklas deformationsmjuknande beteende eller ej. Med porvatten med lågt luftinnehåll utvecklades mjuknande beteende, vilket inte utvecklades på samma sätt vid luftrikt porvatten. Detta har en betydande skillnad vid analys av flytjordsbeteende.

Luftinnehållet i vatten blir således en viktig fråga inom geotekniken. När odränerad skjuvhållfasthet ska utvärderas på laboratorium bör vattnets luftinnehåll sättas i relation till vad som förväntas i fält. Om prover studeras på laboratorium, där porvattnet är avluftat, utvärderas följaktligen en lägre skjuvhållfasthet jämfört med om porvattnet skulle innehålla luft. Om det i fält finns luft i vattnet, är således den laboratoriebestämda skjuvhållfastheten lägre än vad som råder i fält. Vid dimensionering skulle detta innebära dyrare konstruktioner än nödvändigt.

Å andra sidan kan det även vara på omvänt sätt. Om det på laboratorium INTE nyttjas avluftat vatten, men det i fält råder förhållandevis lägre halter av luft, kommer den laboratoriebestämda skjuvhållfastheten att vara högre än den som råder i fält. Vid dimensionering skulle detta innebära mindre säkra konstruktioner.

5 SLUTSATSER

Följande slutsatser konstateras:

- Vatten kan innehålla löst luft, där lösligheten är temperatur- och tryckberoende.

- Kompressibiliteten är ca 24 tusen gånger högre i luft än i rent vatten.
- Löst luft i vatten (utan fria luftbubblor) kan öka kompressibiliten med en faktor ca 400 gånger jämfört med rent vatten.
- Vid odränerad skjuvning av jord, byggs det upp lägre porvattenövertryck i luftrikt porvatten jämfört med fall då vattnet inte innehåller någon luft.
- I jord med luftrikt porvatten är den odränerade skjuvhållfastheten högre jämfört med samma jord då vattnet inte innehåller luft.
- Vattnet luftinnehåll kan ha stor inverkan på utvärdering av jords odränerade skjuvhållfasthet, och bör ges större utrymme i fortsatt geoteknisk forskning.

6 REFERENSER

Dumre, S. (2025). Impact of compressibility of pore water due to presence of dissolved air – Consequences on mechanical behavior of saturated and near saturated soils. Master's degree project, Luleå University of Technology.

Fonseca, A. V., Cordeiro, D., & Molina-Gomez, F. (2021). Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples. Geotechnics, 95-127.

Fredlund, D. (1976). Density and Compressibility Characteristics of Air-Water Mixture. Canadian Geotechnical Journal, Vol 13, 386 - 396.

Ladd, R. (1978). Preparing Test Specimens Using Under compaction. Geotechnical Testing Journal, Vol 1 (1), 16-23.

Schwab, R., Köhler, H. J., & Schulze, R. (2004). Pore water compressibility and soil behaviour excavation, slopes and draining effects. The Skempton Conference 2004, (pp. 1169 1182). London.