Statens geotekniska institut

Inverkan av förändringar i porvattnets kemi, främst salturlakning, på naturlig leras geotekniska egenskaper

Litteraturstudie

Rolf Larsson

GÄU - delrapport 31

Linköping 2011

GÄU
Göta älvutredningen
2009 - 2011

Foto: SGI

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Göta älvutredningen - delrapport 31

Inverkan av förändringar i porvattnets kemi, främst salturlakning, på naturlig leras geotekniska egenskaper – Litteraturstudie

Effects of changes in pore water chemistry, particularly leaching of salts, on the properties of natural clays. A literature study

Rolf Larsson

LINKÖPING 2011

Göta älvutredningen
delrapport 31

Statens geotekniska institut (SGI)
581 93 Linköping

Beställning

SGI
Informationstjänsten
Tel: 013-20 18 04
Fax: 013-20 19 14
E-post: info@swedgeo.se
www.swedgeo.se

Dnr SGI 6-1001-0034

Uppdragsnr SGI 1990

FÖRORD

Göta älvutredningen (GÄU)
För att möta ett förändrat klimat och hantera ökade flöden genom Göta älv har Regeringen gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att under en treårsperiod (2009-2011) genomföra en kartläggning av stabiliteten och skredriskerna längs hela Göta älvdalen inklusive del av Nordre älv. Tidigare utförda geotekniska undersökningar har sammanställts och nya undersökningar har utförts längs hela älven. Metoderna för analys och kartering av skredrisker har förbättrats. Nya och utvecklade metoder har tagits fram för att förbättra skredriskanalyser och stabilitetsberäkningar, förbättra kunskapen om erosionsprocesserna längs Göta älv, bedöma effekten av en ökad nederbörd på grundvattensituationen i området, utveckla metodiker för kartläggning och hantering av högsensitiv lera (kvicklera) samt utveckla metodik för konsekvensbedömning. Utredningen har genomförts i samverkan med myndigheter, forskningsinstitutioner samt nationella och internationella organisationer.

Denna delrapport är en del i SGI:s redovisning till Regeringen.

Salturlakning
Studien har utförts med stöd från Göta älvutredningen och resultat från studien har förts in i utredningsarbetet. Rapporten är tidigare också publicerad i SGI:s rapportserie Varia som nummer 611. Studien är avsedd att ge praktisk information för geotekniker och rapporten har granskats och kommenterats av kollegor såväl inom som utom institutet.

Linköping 2011

Marius Tremblay
Uppdragsledare, Göta älvutredningen

INNEHÅLL

Förord 3

Syfte och begränsning 6

Sammanfattning och slutsatser 7
Allmänt 7
Avsättning 7
Ostörd lera med bibehållen porvattenkemi 7
Ostörd urlakad lera 8
Marin lera
Söt- och brackvattenavsatt lera
Omrörd lera 8
Andra inverkande faktorer 9

Historik för forskning inom det aktuella ämnet 10

Litteratursammanställningar om kvicklerebildning 11

Allmänna teorier om kemisk inverkan och kvicklerebildning 11

Leras struktur 11

Effekter av salturlakning i marin lera 12
Konsistensgränser och sensitivitet 12
Förkonsolideringstryck 14
Odränerad skjuvhållfasthet 19
Omrörd skjuvhållfasthet 19

Effekter av urlakning i söt- och brackvattenavsatt lera 20

Inverkan av olika salter 20

Inverkan av pH 21

Inverkan av mineralsammansättning 21

Effekter av vittring 22

Effekter av tillförsel av olika substanser 23

Kvicklerebildning och gränser 24

Betydelse av kvicklereförekomst 27

Mekanisk påverkan för nedbrytning av lerans struktur 29

Jordförstärkning genom jontillförsel 31

Litteratur 32

SYFTE OCH BEGRÄNSNING

Denna studie är gjord främst för geotekniker och avser att kortfattat belysa hur porvattnets kemi påverkar naturligt avsatt leras geotekniska egenskaper och speciellt hur dessa kan förändras om porvattnets kemi ändras efter lerans avsättning. Den ur geoteknisk synpunkt intressantaste processen i detta avseende är salturlakning i marina leror, men också andra processer och faktorer spelar en stor roll. De geotekniska egenskaper som studerats är konsistensgränser, struktur, förkonsolideringstryck, hållfasthet, sensitivitet och den mekaniska påverkan som behövs för att bryta ned den naturliga strukturen.

SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

Allmänt

De kemiska förhållanden som råder i jorden och som oftast beskrivs med porvattnets kemiska sammansättning påverkar såväl de sammandragande som frånstötande krafter som verkar mellan enskilda lerpartiklar. Förändringar i porvattnets kemi är normalt en ”geologisk process” som tar mycket lång tid. Några större förändringar i en leras egenskaper inom överskådlig tid från en utförd grundundersökning för en geoteknisk frågeställning kan därför normalt inte påräknas. Naturligt sker förändringarna genom vattengenomströmning på grund av hydrauliska gradienter och diffusion på grund av kemiska gradienter, vilka båda är långsamma processer. En påtaglig förändring inom begränsad tid kan därför normalt endast ske inom ett mycket begränsat avstånd från kontaktytorna i lerlagrets ränder. En avsiktlig förändring i porvattnets kemiska sammansättning kan dock ske med hjälp av diffusion från tätt placerade ”saltbrunnar”, med c/c-avstånd ungefär som för vertikaldräner, eller med hjälp av elektrofores där likström används för att transportera in jonerna i jorden. Kunskap om den naturliga processen är främst ett hjälpmedel för att förstå variationer i jordens egenskaper och hur dessa uppkommit, samt att med kunskap om geologi och hydrogeologi kunna uppskatta var förutsättningar för sådana variationer kan finnas.

Avsättning

Vid leras avsättning genom sedimentering bestämmer de kemiska förhållandena och förutsättningar i det omgivande vattnet (samt storlek och mineral hos partiklarna) om partiklarna kommer att avsättas som enskilda partiklar eller som aggregat av hopklumpade partiklar som dragits samman i suspensionen innan avsättningen. I det senare fallet bestämmer de kemiska förhållandena i det omgivande vattnet också i hög grad storleken på aggregaten. Lera som avsatts som aggregat har som regel en öppnare struktur med större porvolym än lera som avsatts som enskilda partiklar.

Ostörd lera med bibehållen porvattenkemi

Om den kemiska sammansättningen i leran och dess porvatten förblir oförändrad efter avsättningen kommer lerans förkonsolideringstryck och hållfasthet i huvudsak att styras av dess belastningshistoria och ålder, dvs. de krypeffekter som utvecklas med tiden efter avsättning och belastning. Direkta kemiska cementeringseffekter som påverkar hållfastheten i naturligt avsatta svenska leror har veterligt inte rapporterats.

Den omrörda skjuvhållfastheten vid oförändrad porvattenkemi i naturligt avsatt lera kan normalt inte heller kopplas direkt till denna kemiska sammansättning. Porvattnets kemi påverkar visserligen så att frånstötande och sammandragande krafter mellan partiklarna gör den omrörda leran mer lättflytande respektive trögflytande vid samma vattenkvot. De sammandragande krafterna medför dock redan vid avsättningen normalt större aggregat med en öppnare struktur och högre vattenkvot, vilket i princip ger ett mer lättflytande material direkt efter omrörning, och dessa två effekter jämnar mer eller mindre ut varandra. Det efterföljande tixotropa hårdnandet efter omrörningen påverkas dock troligen. Generellt kan sägas att naturligt avsatt lera utan efterföljande förändring i porvattnets kemi normalt inte är vare sig speciellt högsensitiv eller kvick.

Ostörd urlakad lera

Marin lera

Om marin lera urlakas med sötvatten och saltinnehållet minskar så minskar också de sammanhållande krafterna från de ursprungliga saltjonerna. Denna effekt kan dock motverkas av andra samtidigt pågående processer som tillför eller frigör andra typer av joner. Om salturlakningen är den enda processen kommer de krafter som håller ihop aggregaten i leran, och därmed dess struktur, att försvagas. Är leran normalkonsoliderad kan detta medföra att strukturen i leran inte längre kan bära trycket från ovanliggande jord och last utan att sättningar uppstår. Detta kan antas ske gradvis så att leran hinner konsolidera successivt i samma takt som nedbrytningen sker. Förkonsolideringstrycket självläks därmed och leran fortsätter att i princip vara normalkonsoliderad. Urlakningen medför samtidigt en reduktion i flytgräns medan konsolideringen medför en lägre vattenkvot och tätare struktur. Ur hållfasthetssynpunkt motverkar dessa faktorer varandra och för normalkonsoliderad lera som förblir normalkonsoliderad torde eventuella förändringar i skjuvhållfasthet normalt vara måttliga.

Är leran överkonsoliderad medför en ren salturlakning att strukturen försvagas och att förkonsolideringstrycket sjunker om processen går tillräckligt långt. Experimentellt har visats att hela den naturliga överkonsolidering i storleken 1,3 – 1,5 som ofta uppmäts i norska leror kan gå förlorad och att sättningar kan uppstå då leran på detta vis blir normalkonsoliderad. Motsvarande hållfasthetsminskning har också uppmätts. För de saltvattenavsatta lerorna i områdena runt Göta älv, som ofta har en överkonsolideringsgrad av cirka 1,3, skulle en motsvarande process resultera i en reduktion i förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet av cirka 25 %.

Ovanstående processer kopplas ofta till kvicklerebildning. För att en lera skall bli kvick fordras dock att urlakningen samtidigt medför att flytgränsen blir klart lägre än den naturliga vattenkvoten. Detta är ofta fallet men är inget krav för att förkonsolideringstryck och hållfasthet skall kunna brytas ned av en urlakningsprocess.

För marin lera vars struktur inte helt kollapsat är processen reversibel så att tillförsel av salt, och då lämpligen kalium- istället för natriumsalt, kan förstärka lerans struktur och därmed höja dess förkonsolideringstryck och odränerade skjuvhållfasthet. Ett praktikfall med en höjning av den odränerade skjuvhållfastheten av upp till 4 ggr utan någon samtidig konsolidering och vattenkvotsminskning har rapporterats.

Söt- och brackvattenavsatt lera

En söt- och brackvattenavsatt lera har inte motsvarande saltinnehåll och strukturella uppbyggnad med stora aggregat och kan därmed inte brytas ned på motsvarande sätt av urlakning som en marin lera. Påverkan på förkonsolideringstryck och ostörd skjuvhållfasthet blir därmed mindre om någon.

Experimentellt har visats att infiltration av extremt dispergerande ämnen kan bryta ned strukturen även i söt- och brackvattenavsatt lera. Detta är dock ingen naturlig process. Att något vanligt förekommande medel i naturen eller i t.ex. spillvatten i påtaglig grad skulle kunna bryta ned de ostörda egenskaperna i denna typ av lera har veterligt inte påvisats.

Omrörd lera

Den kemiska miljön spelar en stor roll för egenskaperna i omrörd lera, vilket speglas genom att den omrörda lerans egenskaper i hög grad kan relateras till den kemiska sammansättningen hos porvattnet En högre salthalt medför i princip större sammandragande krafter mellan lerpartiklarna och en mer trögflytande omrörd massa. En ren urlakning får som följd att salthalten sjunker, de sammandragande krafterna sjunker och den omrörda massan blir mer lättflytande. Uttryckt med geotekniska begrepp

betyder detta att flytgränsen sjunker. Plasticitetsgränsen påverkas i mycket liten grad och även om en åtföljande konsolidering i naturen skulle medföra att vattenkvoten sjunker så är minskningen i flytgräns normalt betydligt större. Detta betyder i sin tur att plasticitetsindex minskar och såväl flytindex som kvasiflytindex (relationen w_N/w_L) ökar. Då de senare ökar, minskar den omrörda hållfastheten och lerans sensitivitet ökar. Om flytgränsen sänks så mycket att flytindex (och kvasiflytindex) blir väl över 1,0 finns risken att leran blir kvick. Mycket av forskningen har gått ut på att studera gränser för när kvicklera uppstår men dessa är av olika anledningar mycket diffusa. Även om leran inte blir kvick gäller dock generellt att en minskande salthalt ger en lägre flytgräns och högre sensitivitet.

Andra inverkande faktorer

Ovanstående är ett förenklat sätt att med geotekniska termer beskriva vad som händer då en marin lera lakas ut med rent sötvatten. Förhållandet mellan porvattnets kemi och leras omrörda egenskaper är dock mycket mer komplicerat än så även vid naturliga processer. Inverkan av olika joner varierar t.ex. stort och även de ingående lermineralen har betydelse. Det genomströmmande urlakande vattnet kan innehålla ämnen som förstärker eller motverkar effekten av saltreduktionen och i fall där ingen saltreduktion sker ändå ge motsvarande effekter. Vittringseffekter kan medföra att joner i lerpartiklarna frigörs och att de urlakade jonerna ersätts av likvärdiga eller effektivare joner. Den senare processen påverkas av faktorer som andra joner i porvattnet och pH. Det behövs mycket små mängder av effektivare joner för att kompensera en urlakning av de naturliga natriumjonerna och en urlakning av det naturliga saltet i marin lera behöver därmed inte medföra någon påtaglig förändring i jordens egenskaper. I naturen kan processen också vara reversibel så att urlakad marin lera kan bli högsensitiv eller kvick för att senare återgå till att bli mer normalsensitiv eller till och med lågsensitiv på grund av efterföljande vittringsprocesser eller tillförsel av salter på annat sätt. I laboratoriet observeras detta ofta då prover av marin kvicklera regelmässigt efter en mer eller mindre lång lagringstid upphör att vara kvicka trots att ingen uttorkning skett, vilket tillskrivs vittringseffekter.

Även söt- och brackvattenavsatt lera som inte påverkas i högre grad av urlakning kan få reducerad flytgräns och omrörd skjuvhållfasthet samt förhöjd sensitivitet och bli kvick av naturliga orsaker. Detta sker då dispergerande ämnen och joner som ger upphov till frånskjutande krafter mellan lerpartiklarna tränger in i jorden. Större zoner där detta har uppstått på naturlig väg kan påträffas i lera under organisk jord (eller virkesupplag som använts under lång tid) och där organiska syror och andra substanser med tiden trängt långt in i den underliggande jorden. Mer begränsade zoner med denna typ av påverkan kan påträffas under tillfälliga virkesupplag, runt läckande spillvattenledningar m.m. Organisk jord som torv, gyttja och dy eller organisk lera och sulfidlera är i sig själv dock inte högsensitiv.

Ovanstående sammanfattning avser jordar med normala sammansättningar hos såväl den fasta fasen som porvattnet för svenska förhållanden.

HISTORIK FÖR FORSKNING INOM DET AKTUELLA ÄMNET

Betydelsen av porvattnets kemi i lera observerades av geologen G. Holmsen (1929 och 1934) i samband med kartering av inträffade lerskred, främst kvicklereskred, i Norge. Samtliga dessa skred hade gått i marint avsatt lera och sensitiviteten och skredutbredningen kunde till synes relateras till salturlakning. Då Norges Geotekniske Institutt bildats kom en av dess första prioriterade uppgifter att bli studier av salturlakning i lera. Dessa kom att pågå under många år och omfattade såväl naturlig lera som i laboratoriet artificiellt sedimenterad lera, (Bjerrum 1954, 1955a, 1955b, 1967, 1972, Bjerrum och Rosenqvist 1956, Bjerrum et al. 1969, Kazi and Moum 1972, Löken 1970, Moum et al. 1968, 1971, Rosenqvist 1953, 1955a, 1955b, 1978, 1984a, 1984b, Torrance 1974).

I Sverige startade större undersökningar av porvattenkemins inverkan på SGI i samband med Götaälvutredningen (1962), och fortsattes sedan av Söderblom (1969, 1974a, 1974b). En annan undersökning utfördes under samma tid på Stockholms Universitet (Thalme 1968, Thalme et al. 1966). De svenska undersökningarna kom att omfatta även andra aspekter än salturlakning i marin lera.

Andra undersökningar utfördes i Kanada, (Penner 1965, Torrance 1975, 1976), England (Skempton and Northey 1952, Moore et al. 1952), USA (Mitchell and Houston 1969), Malaysia (Ting and Ooi 1977) och Thailand (Brenner et al. 1978, Woo and Moh 1977). Dessa undersökningar kompletterar kunskaperna om porvattenkemins inverkan, men resultaten är av olika geologiska anledningar ofta inte direkt applicerbara på svenska förhållanden.

Den dittills utförda forskningen rörande inverkan av porvattnets kemi summerades av Brenner et al. (1981) till symposiet “Engineering geology of soft clay” i Bangkok 1981.

Senare studier om förändring i leras egenskaper vid främst urlakning har utförts bl.a. i Kanada, (Torrance 1994), Japan (Ohtsubo et al. 1982, 1983, Torrance and Ohtsubo 1995) och i Korea, (Kim 2008, Kim and Do 2009).

I Sverige har senare tids forskning främst varit inriktad på förekomst och lokalisering av kvicklera med hjälp av geologisk kunskap samt geotekniska och geofysiska metoder, (t.ex. Dahlin et al. 2001, Rankka et al 2004, Andersson-Sköld et al. 2005).

Av olika anledningar har forskningen ofta kommit att fokusera på kvicklerebildning trots att detta endast är ett extremt slutresultat av en förändring i leras porvattenkemi. Forskningen har därmed i hög grad kommit att utföras på omrörd lera i laboratoriet och det har främst varit förändringar i den omrörda hållfastheten som studerats. Undersökningarna på ostörda prover av naturlig lera är betydligt färre och underlaget för detaljerade slutsatser beträffande förkonsolideringstryck och ostörd skjuvhållfasthet är därmed mer begränsat.

LITTERATURSAMMANSTÄLLNINGAR OM KVICKLEREBILDNING

En detaljerad sammanställning av den forskning om inverkan av porvattnets kemi och främst kvicklerebildning som utförts fram till 1980 presenterades av Brenner et al. (1981). En senare sammanställning över forskningen rörande kvicklerebildning och kvickleras egenskaper på svenska presenterades av Rankka (2003). Dessa sammanställningar innehåller också detaljerade beskrivningar av leras uppbyggnad, inverkan av olika joner och kemiska och mineralogiska förutsättningar m.m.

ALLMÄNNA TEORIER OM KEMISK INVERKAN OCH KVICKLEREBILDNING

Fram till 1960-talet berörde teorierna om porvattenkemins betydelse och kvicklerebildningens orsaker så gott som enbart salturlakning av marin lera. Efter främst Söderbloms (1974 a och b) rapporterade erfarenheter kunde dessa teorier utvidgas och göras mer generella. De mest åberopade av dessa generella teorier presenterades av Rosenqvist 1978 och Torrance 1983.

LERAS STRUKTUR

Många har tillskrivit effekten av urlakning på leras ostörda egenskaper som att det uppstår en svagare och/eller instabil struktur, bl.a. Woo and Moh (1977) och Mitchell and Houston (1969). Vad som konkret menas framgår dock oftast inte. Det hela blev dock avsevärt klarare efter att Pusch (1970) presenterade mikroskopbilder på den strukturella uppbyggnaden hos marin respektive sötvattenavsatt lera och bilden har med tiden blivit ännu klarare allteftersom mikroskopen och mikroskoperingstekniken utvecklats.

Pusch visade hur marint avsatt lera är uppbyggd av stora aggregat av lerpartiklar och siltkorn omgivna (klädda) av lerpartiklar. Dessa aggregat, i viss litteratur omnämnda som Pusch-partiklar, bildas redan då de enskilda partiklarna svävar omkring i suspensionen av lera och saltvatten på grund av de sammandragande krafter som uppstår med hjälp av saltjonerna och avsätts sedan i denna form. Lerans struktur bildas på detta vis av stora aggregat som överför de krafter som sedan uppstår på grund av överlagringstryck och andra laster via kontaktpunkterna mellan aggregaten och internt inom partikelsamlingen i aggregaten. Dessa aggregat håller sedan ihop och strukturen bevaras i stort upp till höga tryck, även om kontaktpunkterna successivt förstoras och aggregatens form elastiskt förändras allteftersom spänningarna ökar.

Förutsättningen för detta är att de krafter som håller ihop aggregaten förblir intakta. En urlakning som ger en salthaltsminskning medför att dessa krafter minskar, för många salter speciellt efter att ett visst tröskelvärde underskrids. Aggregaten kan då falla sönder, ungefär som korn som krossas, vilket gör att tidigare förkonsolideringstryck och hållfasthet reduceras.

I brackvattenavsatt lera är dessa aggregat avsevärt mindre och i sötvattenavsatt lera ännu mindre eller obefintliga. För att bryta ned en struktur i dessa leror fordras därför att något ämne tillförs som skapar så stora repellerande krafter mellan partiklarna att dessa förskjuts trots de tryckkrafter som håller dem på plats. Sådana ämnen finns, men är sällsynta i naturliga sammanhang.

I omrört tillstånd verkar ett saltinnehåll så att partiklarna i den omrörda massan tenderar att bilda nya aggregat, (Jacobsson och Pusch 1972), vilket ökar den omrörda skjuvhållfastheten, minskar sensitiviteten och troligen förstärker lerans tixotropa egenskaper.

Motsatt verkar dispergerande ämnen som skapar repellerande krafter mellan partiklarna så att partiklarna förblir åtskilda vilket ger en lägre omrörd skjuvhållfasthet, högre sensitivitet och troligen försvagade tixotropa egenskaper.

Ett saltinnehåll ger därmed en högre flytgräns och vid oförändrad vattenkvot en högre omrörd skjuvhållfasthet och lägre sensitivitet medan ett innehåll av dispergerande ämnen ger motsatt effekt.

EFFEKTER AV SALTURLAKNING I MARIN LERA

Konsistensgränser och sensitivitet

Effekten av salturlakning studerades av Holmsen (1938) och Rosenqvist (1946) som konstaterade att en minskande salthalt medförde en minskad flytgräns och ett minskat plasticitetsindex.

Vidare undersökningar på Norges Geotekniske Institutt av salturlakning i lera, (Bjerrum 1954 och 1955) visade att vid ren urlakning av marin lera hände inte mycket förrän salthalten gått ned till cirka 15 g/l (1,5 %). Sedan började plasticitetsindex att sakta sjunka och denna minskning accelererade sedan med minskande salthalt. Ned till cirka 10 g/l var ändringen endast marginell, mellan 10 och 5g/l påtaglig och under 5g/l stor. I princip har motsvarande funnits även i andra undersökningar men gränsvärdena har varierat, bl.a. beroende på hur salthalten mätts. Torrance (1974) angav de två lägre motsvarande gränserna för samma lera till 5 respektive 2 g/l, Fig.1. Samtidigt med att plasticitetsindex förändras ändras också lerans aktivitetstal (plasticitetsindex/lerhalt) eftersom lerhalten förblir konstant.

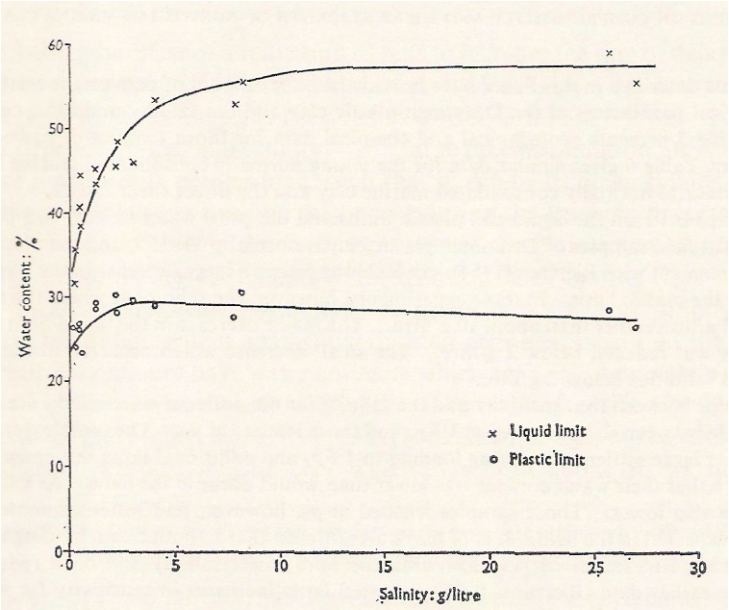


Fig. 1. Förändring i flytgräns och plasticitetsgräns vid urlakning av en norsk lera (Torrance 1974).

Salturlakning av leror från Oslotrakten befanns typiskt sänka plasticitetsindex från 24–34 % till 5–9 %.

Försök utfördes också med artificiell sedimentering av lera i saltvatten, (ca 35 g salt/l), konsolidering och urlakning till cirka 1g/l. På grund av urlakningen sjönk flytgränsen från ca 43 till 27 %, plasticitetsgränsen från ca 19,5 till 18 % och plasticitetsindex från ca 24 till 9 %. Flytindex ökade från ca 0,9 till 2,38 och sensitiviteten från ca 6 till 90. Den omrörda skjuvhållfastheten minskade från ca 5 till 0,1 kPa och kvoten mellan ostörd skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck minskade stort.

I en senare undersökning av Bjerrum och Rosenqvist (1956) utfördes försök med artificiell sedimentation i saltvatten (35g/l) och påföljande urlakning med sötvatten. Provhöjden var cirka 150 mm och urlakningen pågick under 18 månader. En vätskevolym motsvarande tre gånger

porvattenvolymen hade då genomströmmat proven och salthalten hade sjunkit till ca 5 g/l. Flytgränsen hade sjunkit från ca 49 till 28 % och plasticitetsindex från ca 27 till 10 % och sensitiviteten hade ökat från ca 5 till 110. Under den långa tid som urlakningen skedde steg samtidigt kaliumhalten och plasticitetsgränsen något, viket hänfördes till vittring.

I naturlig lera in situ i Drammen konstaterade Bjerrum (1967) att flytgränsen i vissa delar av lerprofilen minskat från 47 till 37 % på grund av urlakning samtidigt som vattenkvoten endast minskat med 1–3 % och sensitiviteten ökat från 8 till 300.

Bjerrum (1954) fann en linjär korrelation mellan flytindex och logaritmen för sensitiviteten i norska leror och angav en övre gräns för salthalten i kvickleror till ca 7 g/l. Denna gräns beror dock på den använda mätmetoden och de gränser som anges idag är normalt lägre. Motsvarande relationer mellan kvasi-flytindex (w_N/w_L) har funnits i svenska leror (SOU 1962, Larsson och Åhnberg 2003), Fig. 2.

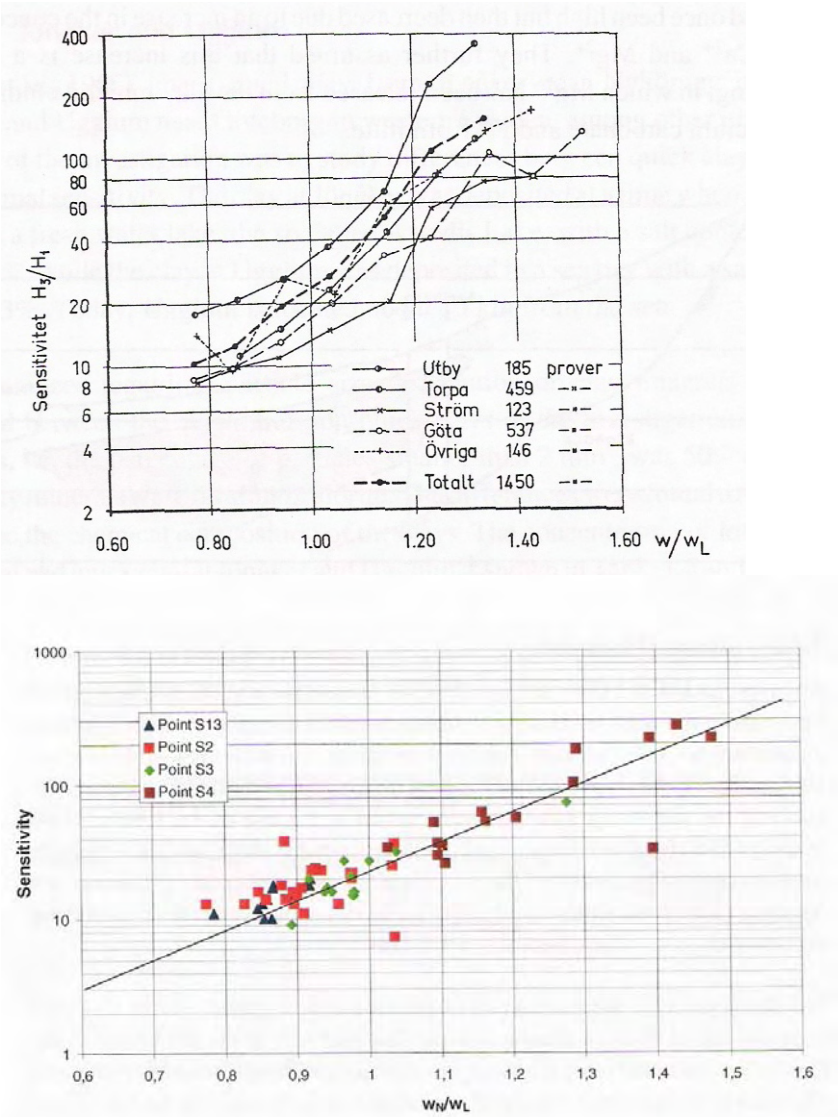


Fig. 2. Relationer mellan kvasiflytindex och sensitivitet för a) leror i Götaälvdalen (SOU 1962) b)ett område i Munkedal i Bohuslän (Larsson och Åhnberg 2003).

Även för kanadensiska leror fann Locat och Demers (1988) ett klart samband mellan flytindex och omrörd skjuvhållfasthet (samt viskositeten) i omrörda lermassor.

Urlakningsförsök på en engelsk och en norsk marin lera av Skempton och Northey (1952) resulterade inte i någon påtaglig nedsättning av den odränerade skjuvhållfastheten men plasticitetsindex och den omrörda skjuvhållfastheten sjönk och visade ett klart samband mellan de senare parametrarna. Även om sensitiviteten därmed ökade vid urlakningen erhölls dock inga höga värden ur ett svenskt perspektiv.

Motsvarande resultat med minskande flytgräns och plasticitetsgräns samt ökande sensitivitet vid urlakning av leror i Thailand och Malaysia erhölls av Brenner et al. (1978) och Ting och Ooi (1978). Trots att salthalten sänktes till under 1 g/l erhölls dock ingen kvicklera.

Salthalten har dessutom en stor betydelse för risken för erosion, såväl yttre som inre, utom för s.k. structured (cementerade?) kanadensiska leror, (Lefebvre et al. (1986). En minskande salthalt medför således större risk för erosion på grund av att de sammandragande krafterna mellan partiklarna minskar.

Förkonsolideringstryck

Urlakning ökar kompressibiliteten i en lera. I normalkonsoliderad lera kan detta medföra en kompression även vid konstant last och att kompressionen vid ökande last därefter ökar. (Bjerrum 1967). En jämförelse mellan ”naturlig” och urlakad Drammenlera i fält antydde att urlakningen förorsakat en 1–3 % lägre vattenkvot och därmed en viss sättning.

Torrance (1974) visade att urlakning av en artificiellt sedimenterad marin norsk lera medförde en stor minskning av kvasiförkonsolideringstrycket då salthalten gick under 2 g/l. Torrance hänförde detta till en ökande kryphastighet snarare än minskande hållfasthet, vilket dock är två olika sätt att beskriva i stort sett samma sak.

Proverna som hade en överkonsolideringsgrad av 3,0 urlakades genom diffusion och då salthalten sjönk under cirka 1,3 g/l uppstod en sättning av cirka 8 % av provhöjden, Fig. 3. Salthaltsgränsen är något osäker men klart mindre än 2 g/l. Efter urlakningen fick olika mängder av natrium- respektive magnesiumjoner diffundera in i en del av proverna. Vid den efterföljande belastningen var påverkan på förkonsolideringstrycket svår att utvärdera, men de prover som fått ett tillskott av natrium och magnesiumjoner var klart mindre kompressibla än de som bara lakats ur.

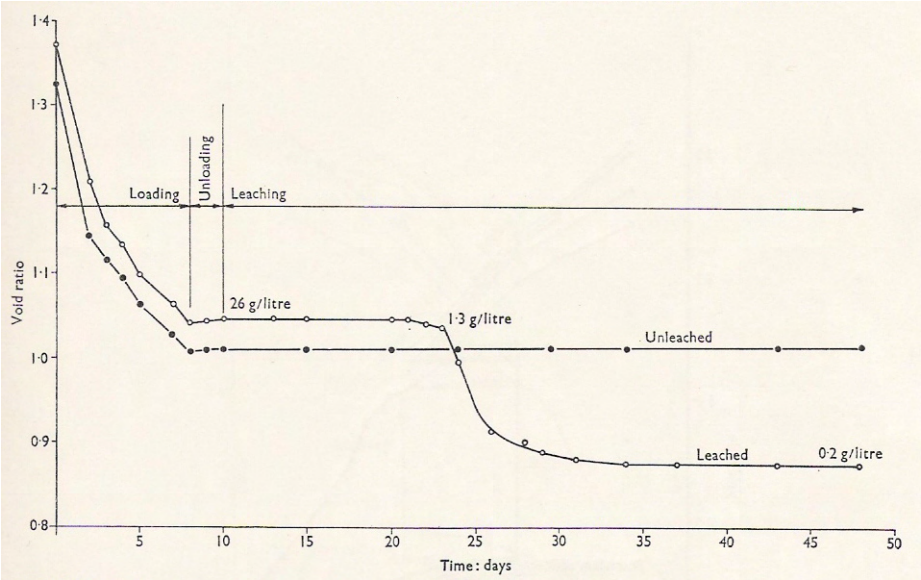


Fig. 3. Kompression vid urlakning av en överkonsoliderad artificiell marin norsk lera (Torrance 1974.)

En serie prover av ”ostörd” Drammenlera konsoliderades till strax över förkonsolideringstrycket för att få en ”normalkonsoliderad” lera. Efter två veckor lakades proverna genom diffusion mot saltlösningar med 8, 4, 2 och 1 g/l. Efter en vecka ökade kryphastigheten i samtliga prover men ökningen var klart högre ju lägre salthalten var i diffusionsvätskan. Saltlösningen med 4 g/l ersattes efter en tid med en med 1 g/l, vilket resulterade i en kraftig sättningsökning cirka en vecka senare, Fig. 4. Försöken avslutades efter 78 dagar och resultaten visar på en kraftig sättningsökning då salthalten i diffusionsvätskan var lägre än 2 g/l, Fig. 5.

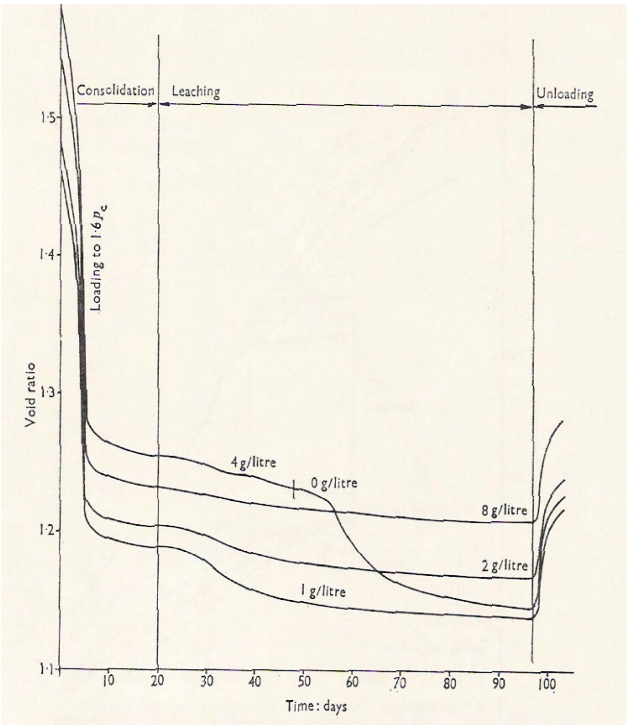


Fig. 4. Kompression vid urlakning av normalkonsoliderad norsk lera (Torrance 1974).

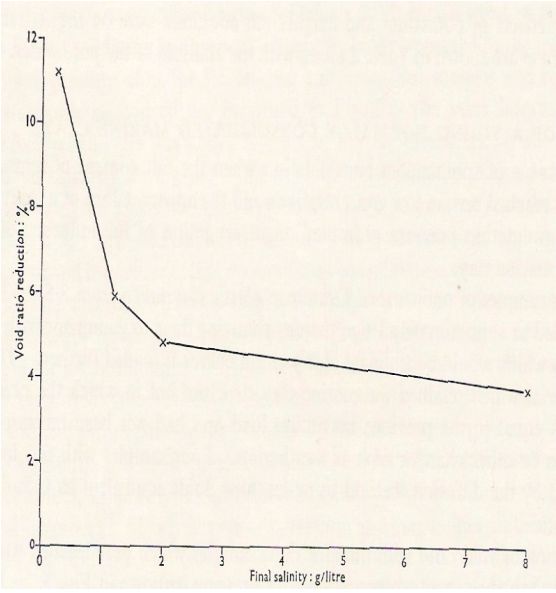


Fig.5. Kompression som funktion av salthalt vid urlakning av normalkonsoliderad norsk lera (Torrance 1974).

Nästa provserie konsoliderades väl över det naturliga förkonsolideringstrycket och avlastades sedan till en tiondel av detta nya förkonsolideringstryck. Proverna urlakades sedan med diffusion mot saltlösningar med 8, 4, 3, 3, 1 och 0 g/l, varpå de återbelastades, Fig. 6. Under avlastningen och urlakningen svällde proverna, mer ju lägre salthalten i diffusionsvätskan var, Fig. 7a. Återbelastningskurvorna visade sedan att förkonsolideringstrycken reducerats med accelererande storlek då salthalten sjunkit. Reduktionen i förkonsolideringstryck var som mest cirka 30 %, Fig. 7b. I den aktuella leran är överkonsolideringsgraden i fält mellan 1,4 och 1,6. En reduktion av förkonsolideringstrycket med 30 % skulle helt eller nästan helt radera ut denna överkonsolidering.

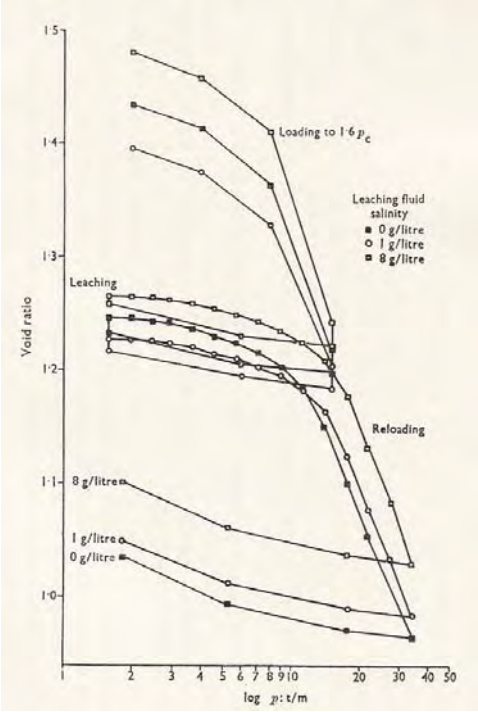
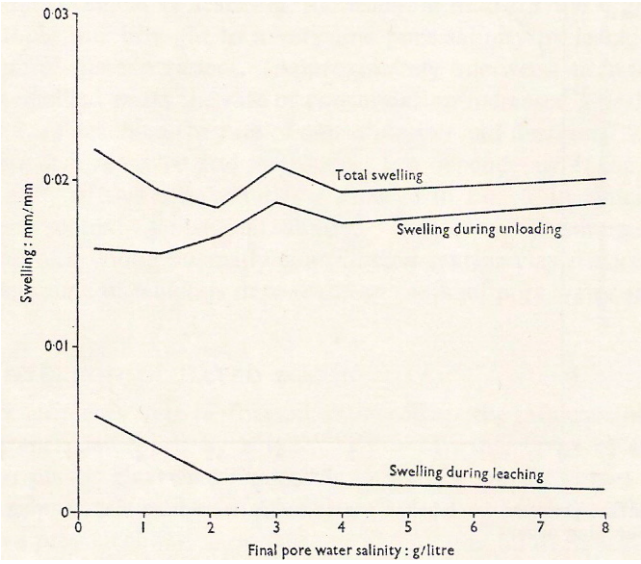


Fig.6. Resultat från några av försöken med urlakning och förnyad belastning av överkonsoliderad naturlig marin norsk lera (Torrance 1974).



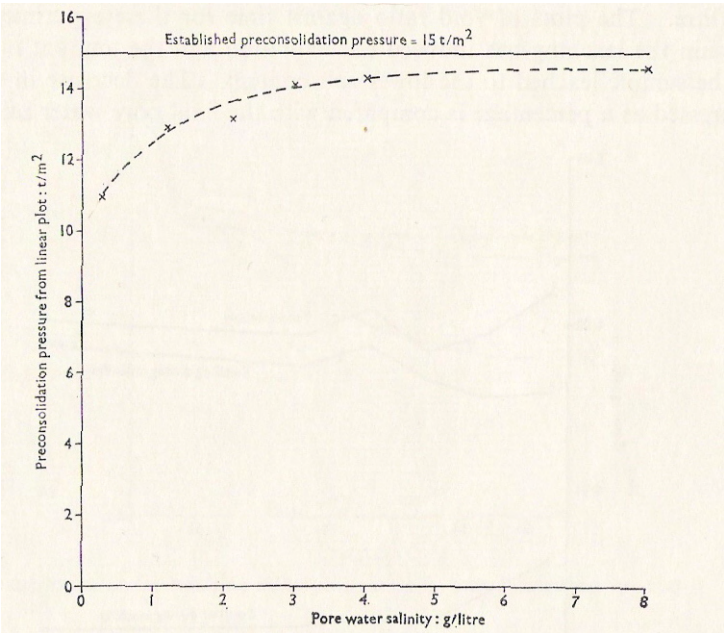


Fig. 7. Svällning och reduktion av förkonsolideringstryck vid urlakning av en överkonsoliderad naturlig norsk marin lera. (Torrance 1974)

En förnyad provserie med naturliga prover konsoliderade till in-situspänningarna, dvs. med bibehållen överkonsolideringsgrad av 1,4–1,6, urlakades med diffusion mot saltlösningar med 0, 0,5 och 26 g/l, Fig. 8. Lakning mot 0 och 0,5 g/l resulterade i en slutlig salthalt hos provet av 0,45 respektive 1,45 g/l efter 2 månader. Under denna tid uppstod sättningar i proverna av cirka 0,5 % av provhöjden vid lakning mot 26 g/l, 1,5 % vid lakning mot 0,5 g/l och 3,8 % vid lakning mot 0 g/l. Det sista värdet tyder på ett klart överskridande av förkonsolideringstrycket medan det mellersta mest liknar ett gränsfall.

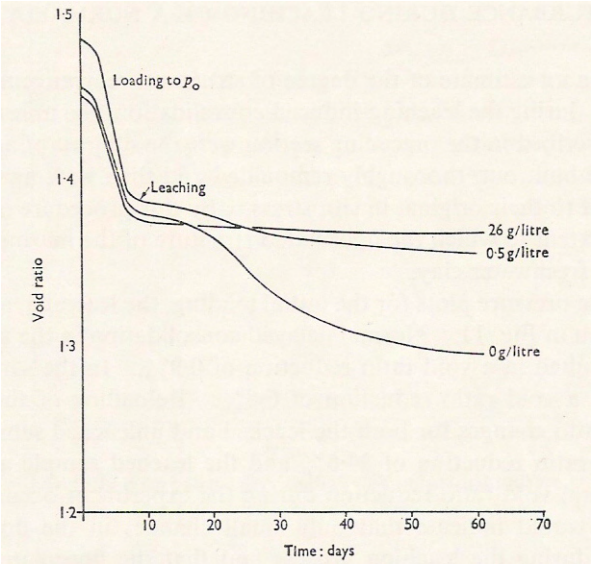


Fig. 8. Kompression vid urlakning av en svagt överkonsoliderad naturlig norsk lera (Torrance 1974).

Motsvarande prover monterades i direkt skjuvapparat och urlakningen resulterade i att den odränerade skjuvhållfastheten reducerades med cirka 20 % då salthalten sjönk från 26 till 0,47 g/l. Reduktionen var inte fullt lika stor som den för förkonsolideringstrycket, men också i detta fall komprimerades det urlakade provet med cirka 2,5 % under urlakningsfasen.

I koreansk lera tyckte sig Kim (2008) kunna spåra en förändring i sonderingsresultat från CPT (q_t och Δu), vilket kan kopplas till förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet, då salthalten på grund av urlakning gick under 10 á 15 g/l. Också förändringar (minskningar) i överkonsolideringsgraden uppskattad ur ödometerförsök tycktes kunna kopplas till denna gräns.

Kim & Do (2009) utförde urlakningsförsök på koreansk marin lera i laboratoriet. En sänkning av salthalten från 17 till 3 g/l resulterade i en minskning av förkonsolideringstrycket med 10 – 20 % och kompressibiliteten för högre spänningar ökade, Fig. 9.

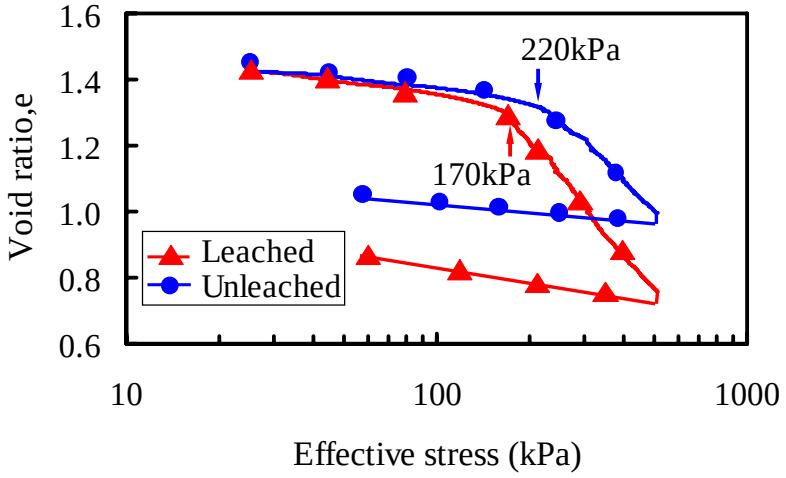


Fig. 9. Exempel på resultat från CRS-ödometerförsök på naturlig och urlakad koreansk lera (Kim and Do (2009.)

Odränerad skjuvhållfasthet

Enligt Bjerrum (1954) medför sänkningen i salthalt en reduktion av den odränerade skjuvhållfastheten med uppskattningsvis upp till 30 %. Enligt Mitchell & Houston (1969) kan reduktionen bli upp till 50 %.

Torrance (1974) monterade som ovan nämnts prover av svagt överkonsoliderad lera i direkt skjuv-apparat och urlakningen resulterade i att den odränerade skjuvhållfastheten reducerades med cirka 20 % då salthalten sjönk från 26 till 0,47 g/l, Fig. 10. Reduktionen var inte fullt lika stor som den för förkonsolideringstrycket, men under urlakningsfasen komprimerades det urlakade provet med cirka 2,5 %.

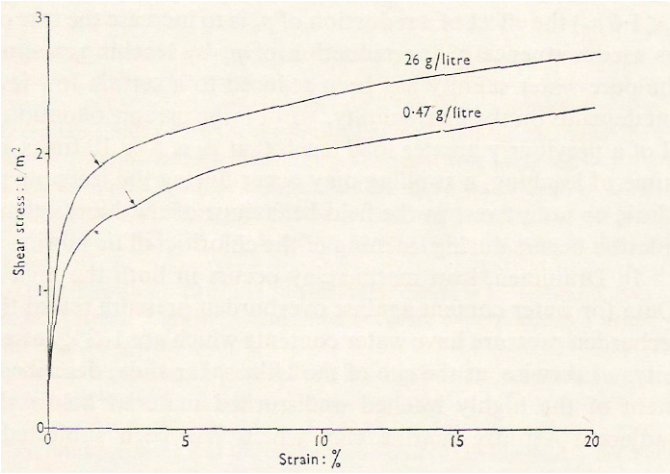


Fig. 10. Reduktion av odränerad skjuvhållfasthet vid direkt skjuvning på grund av urlakning av en svagt överkonsoliderad norsk lera (Torrance 1974).

Moum et al. (1971) studerade urlakad kvick Drammenlera med salthalt lägre än 0,35 g/l och jämförde med icke kvick lera i samma område. Den odränerade skjuvhållfastheten i kvickleran befanns vara cirka hälften av den i icke kvick lera med motsvarande belastningshistoria.

Woo and Moh (1977) utförde försök på Bangkoklera där en sänkning av salthalten från 35 till 7 g/l resulterade i en reduktion av den odränerade skjuvhållfastheten med cirka 15 %.

Omrörd skjuvhållfasthet

Rosenqvist (1955) angav att en ökande salthalt ger högre flytgräns, plasticitetsindex samt högre omrörd skjuvhållfasthet vid samma vattenkvot.

Motsvarande har funnits i så gott som samtliga undersökningar, (bl.a. Söderblom i Sverige (1969), Skempton and Northey i England (1952) etc.)

Di Maio (1996) fann att en ökande salthalt upp till 35 g/l gav högre residualhållfasthet i glidplan. Friktionsvinkeln ϕ_{res} ökade därmed med ökande salthalt från ca 6 till 14º. Också i japansk lera har residualhållfastheten befunnits öka med ökande salthalt om än inte fullt så mycket, (Tiwari et al. 2005).

Torrance (1974) visade att urlakning utöver att sänka förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet dessutom sänkte den omrörda skjuvhållfastheten mycket mer och därmed ökade sensitiviteten.

EFFEKTER AV URLAKNING I SÖT- OCH BRACKVATTENAVSATT LERA

Några påtagliga effekter av ren urlakning i söt- och saltvattenavsatt lera har veterligt inte rapporterats. Förutsättningar för någon påtaglig förändring finns endast i brackvattenavsatt lera, men dessa torde även här vara mycket mindre än för marin lera. Försök med urlakning av sötvattenavsatt lera (salthalt ca 0,2 g/l) med destillerat vatten gav en marginell reduktion i flytgräns men inga andra mätbara förändringar (Nilsson 1986). Några resultat från direkta urlakningsförsök på brackvattenavsatt lera har inte återfunnits i litteraturen.

INVERKAN AV OLIKA SALTER

Moum et al. (1968) visade att kaliumjoner är ca dubbelt så effektiva som natriumjoner när det gäller att få lerpartiklar att attraheras och höja upp flytgräns och omrörd skjuvhållfasthet. Natriumjoner och tvåvärda järn-, magnesium- och calciumjoner har tröskelvärden vid en normalitet (molaritet/valens) av cirka 0,1 (mol/l)/valens varefter inverkan inte ökar påtagligt medan aluminium-, kalium- och trevärda järnjoner ger större inverkan ju fler joner som finns upp till höga koncentrationer, (Løken 1970), Fig. 11. Tröskelvärdet vid en normalitet av 0,1 mol/l stämmer väl överens med erfarenheterna från urlakning av ostörda naturliga norska leror, där salthaltsminskningen resulterar i påtagligt förändrade egenskaper först då salthalten går under ungefär motsvarande koncentration, (Bjerrum 1954 och 1955, Torrance 1974). Den högre effektiviteten hos kaliumjoner, och det faktum att dessa inte har något tröskelvärde för ytterligare inverkan, har medfört att kaliumsalt använts i praktiska fall där jordförstärkning genom salttillförsel utförts, (Rosenqvist 1980).

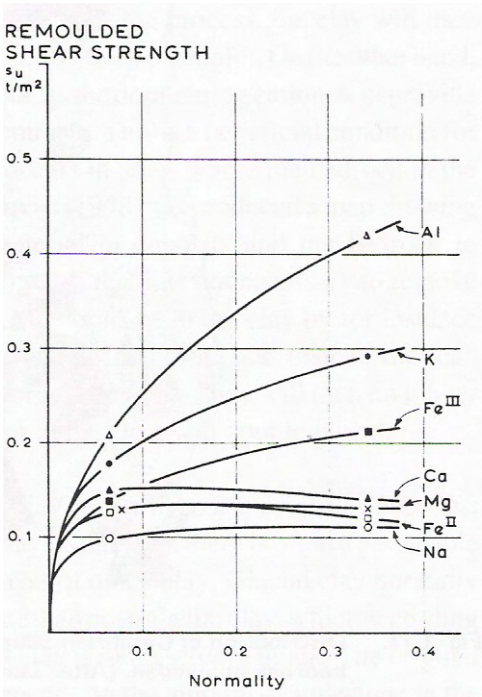


Fig. 11. Inverkan av olika joner på den omrörda skjuvhållfastheten i en lera (Løken 1970).

Av de envärda jonerna ökar inverkan med ökande atomvikt från litium till natrium, kalium och cesium, (Rosenqvist 1984).

Det är därmed inte enbart den totala salthalten som är avgörande utan i hög grad jonsammansättningen. Thalme et al. (1966) och Thalme (1968) fann således att det inte främst var mängden joner i porvattnet som avgjorde sensitiviteten utan sammansättningen. I såväl marint som sötvattenavsatt svensk kvicklera befanns att halterna av tvåvärda magnesium- och kalciumjoner var låga. Motsvarande har senare visats av Söderblom (1974).

Moum et al. (1971) visade att urlakad Drammenlera med salthalt lägre än 0,35 g/l var kvick om kalium-, magnesium- och kalciumkoncentrationen i det kvarvarande saltet var låg men inte kvick om den var högre. Tillsättning av en mindre mängd magnesium till kvickleran tog bort kvickheten.

Den odränerade skjuvhållfastheten i kvickleran befanns vara cirka hälften av den i icke kvick lera med motsvarande belastningshistoria. Enligt resonemanget skulle tillförsel av en mindre mängd av t.ex. tvåvärda magnesiumjoner återföra den odränerade skjuvhållfastheten till ”normala” värden.

Enligt Yong et al. (1979) uppstår deflockulering (upplösning av aggregat) och skiljande av partiklar då de frånstötande krafterna blir större än de s.k. van der Waalska krafterna. Detta sker vid ett överskott av natriumjoner i förhållande till total salthalt, då salthalten är låg, och då det finns bikarbonat-karbonat- hydroxid- och/eller fosfatjoner med flera. Detta kopplades till erosionsbenägenhet, men torde vara tillämpligt även på övriga aspekter.

Enligt SS-EN 1997-2 beror tendensen för dispergerande erosion i en jord på lerans mineralogi och kemi och på de lösta salterna i jordens porvatten och i det eroderande vattnet. Leror med hög dispergerbarhet har vanligen hög natriumhalt i förhållande till totalt joninnehåll.

Effekten av olika salter beskrivs idag oftast med begreppet jonstyrka, (t.ex. Fällman et al. 2001), ju högre jonstyrka desto högre attraktionskraft mellan lerpartiklarna. Jonstyrkan ökar med den sammanlagda positiva laddningen, dvs. ju fler joner och desto högre valens hos dessa desto högre jonstyrka.

INVERKAN AV pH

Surhetsgraden i porvattnet, pH, påverkar vittringsprocesserna. Ett högt pH kan bland annat frigöra vätejoner, vilket kan leda till ökad sensitivitet. Ett lågt pH kan ge ökande nedbrytning av partiklar med frigörande av flervärda positiva joner med minskande sensitivitet som följd, (bl.a. Bjerrum 1967, Mitchell 1976, Torrance 1998, Fällman et al. 2001).

INVERKAN AV MINERALSAMMANSÄTTNING

Bjerrum (1954 och 1955) visade tidigt på betydelsen av ingående lermineral och visade att en av förutsättningarna för att kvicklerebildning skulle ske var att de ingående lermineralen var lågaktiva.

Begreppet aktivitet och aktivitetstal (plasticitetsindex/lerhalt) används sällan i Sverige, men en hög aktivitet innebär att flytgräns och plasticitetsindex blir höga redan vid en måttlig lerhalt.

Partiklarna i normala svenska leror består normalt av en blandning av låg- och mellanaktiva lermineral och låg till inaktiva bergartsmineral (Pusch 1974). Med avseende på mineralsammansättning finns därmed normalt förutsättningar för stor påverkan av t.ex. salthalt. Däremot kan organiska jordar som gyttja torv och sulfidlera ur denna synpunkt räknas som högaktiva (Karlsson 1974).

Aktiviteten beror dock inte enbart på ingående ler- och bergartsmineral. Eftersom plasticitetsindex varierar med saltinnehållet medan lerhalten är konstant ändras också aktiviteten med saltinnehållet, (Bjerrum 1954), Fig. 12. Klassificeringen av ler- och bergartsmineral görs normalt med avseende på

saltfritt material, medan jordar oftast klassificeras med avseende på sin naturliga porvattenkemi där både mineral och saltinnehåll påverkar.

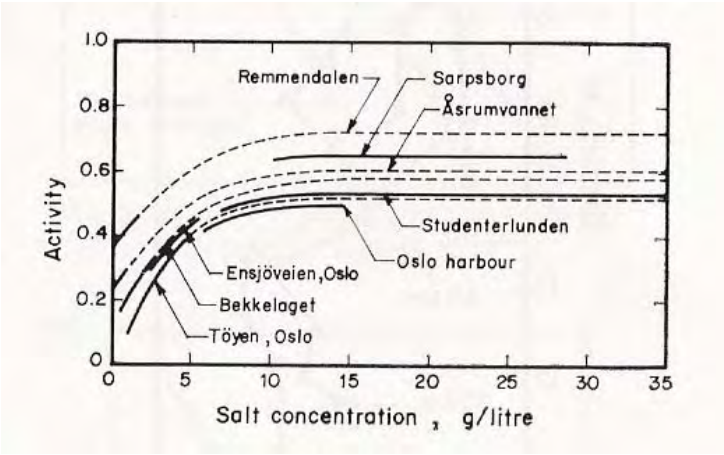


Fig. 12. Inverkan av salthalt på aktivitetstal, (Bjerrum 1954).

Ohtsubo et al. (1983) har visat att i japanska leror med ett annat ler- och mineralinnehåll än de norska är sensitiviteten ofta högre vid motsvarande flytindex och kvickleror har där saltinnehåll lägre än 1g/l. Sensitiviteten anges vara relaterad till främst lerinnehåll, lermineral och salthalt. Ju lägre aktivitet desto högre sensitivitet.

Enligt Mitchell och Houston (1969) är aktivitetstalet i kvicklera normalt lägre än 0,5 och Torrance och Ohtsubo (1995) och Torrance (1996) anger att aktiviteten måste vara under 1,0 för att lera skall kunna bli kvick.

EFFEKTER AV VITTRING

Urlakning med vatten som innehåller löst koldioxid kan resultera i en hållfasthetsökning och sensitivitetsminskning om det medför att karbonater löses upp och kalciumjoner frigörs. På motsvarande sätt kan oxidationsmedel bryta ned klorit och frigöra magnesiumjoner. Vidare kan kalium frigöras ur fältspat och mica, bl.a. illit, trevärda aluminiumjoner ur klorit och fältspat samt två och trevärda järnjoner ur klorit (Bjerrum 1967, Brenner et al. 1981). Dessa processer är beroende av jordens surhetsgrad (pH-värde), redoxpotential Eh (benägenhet till kemiska oxidation eller reduktion) och jordtemperaturen.

Vittring som t.ex. medför tillförsel av kalium kan höja förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet och minska kompressibiliteten. En på detta vis vittrad lera uppvisar dock normalt inget markant förkonsolideringstryck (Bjerrum 1967 och 1973). Järn- och aluminiumjoner antas kunna medföra en viss cementering, men enligt Bjerrum (1967) är cementeringseffekter i norska leror mycket svaga eller obefintliga.

Studier av Drammenlera av Moum et al. (1971) ledde till antagandet att stora delar av lervolymen som tidigare hade varit kvick på grund av urlakning senare hade ”de-sensitiviterats” och återfått ”normal” sensitivitet och hållfasthet på grund av vittring som fällt ut magnesiumjoner ur klorit, kalciumjoner från kalciumkarbonat och kaliumjoner från illit.

Torrskorpelera är aldrig kvick eller högsensitiv. Bjerrum et al. (1969) tillskriver detta att vittring löser ut joner som ökar plasticiteten och i vissa fall cementerar. Järn och aluminiumjoner anses mest aktiva i denna process (Moum 1969). Man får dock inte glömma att en stor del av anledningen till torrskorpebildningen och dess egenskaper beror på vattenkvotsminskningen på grund av uttorkning.

En vittringsprocess som ofta observeras uppstår vid lagring av upptagna prover i laboratoriet. Här konstateras ofta att prover av kvicklera efter en tid upphör att vara kvicka trots att ingen förändring i vattenkvot skett. Söderblom (1974) visade att detta kan tillskrivas att halten av tvåvärda magnesium- och kalciumjoner ökar med tiden efter provtagning (även vid förvaring i provburkar med gummilock i klimatrum). Också Torrance (1975) konstaterade att lagring har en stor inverkan på den kemiska sammansättningen i porvattnet och att jonmängden generellt ökade med tiden.

EFFEKTER AV TILLFÖRSEL AV OLIKA SUBSTANSER

Urlakning med ”hårt” grundvatten som innehåller tvåvärda kalcium- och/eller magnesiumjoner resulterar inte i samma effekter som urlakning med rent (”mjukt”) vatten. Även om salthalten i stort reduceras, påverkas inte jorden på samma sätt eftersom de tvåvärda jonerna som har större effekt då anrikas i jorden (Söderblom 1974).

Organiska och oorganiska dispergeringsmedel, bland annat organiska silikater, fosfater, sulfider och bikarbonater, reducerar omrörd skjuvhållfasthet. Organiska ämnen kan binda t.ex. kalcium- och magnesiumjoner och därmed ändra den kemiska sammansättningen och neutralisera inverkan av dessa joner, (Söderblom 1974). Hänvisande till Söderblom anger Rosenqvist (1980) att ett stort antal organiska substanser kan vara dispergerande och höja sensitiviteten och eventuellt skapa kvicklera.

Möjliga effekter av läckande spillvattenledningar har diskuterats, (t.ex. Söderblom 1974, Rosenqvist 1984). En studie på SGI (Nilsson 1986) på en sötvattenavsatt lera (nuvarande salthalt ca 0,2 g/l) från Linköping visade att infiltration av spillvatten (hämtat vid inloppet till vattenreningsverket), lignin och destillerat vatten resulterade i en marginell reduktion av salthalt och flytgräns men i övrigt inga påtagliga effekter. Infiltration av koncentrerat diskmedel och natriumpyrofosfat hade en mer dramatisk effekt på flytgränsen och skapade en extrem kvicklera (ej mätbar omrörd skjuvhållfasthet). Försök i ödometer och triaxialapparat visade att urlakning med destillerat vatten inte gav någon påtaglig effekt, att infiltration med natriumpyrofosfat bröt ned strukturen även i denna typ av lera och i stort halverade förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet. Infiltration med maskindiskmedel (som innehåller ett antal olika kemikalier) resulterade å andra sidan i en förstärkt struktur med närmast fördubblat förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet. Exakt vilka kemiska förändringar som givit denna effekt kunde dock inte utläsas ur de efterföljande analyserna.

Natriumpyrofosfat är ett starkt dispergerande ämne som bland annat används vid sedimentationsförsök för kornstorleksanalys i laboratoriet för att skapa frånstötande krafter mellan partiklarna och förhindra att de enskilda partiklarna flockulerar och bildar aggregat. Infiltration med natriumpyrofosfat var således ett extremfall som utfördes för att undersöka om det överhuvudtaget var möjligt att kemiskt bryta ned den naturliga strukturen hos en sötvattenavsatt lera. Detta visade sig vara fallet, men motsvarar knappast något i naturen realistiskt förekommande fall. Inget av de andra medlen gav några negativa effekter på den ostörda strukturen och risken för att detta skulle uppstå i naturen bedömdes därför som liten. I marin lera kan olika substanser dock tänkas förstärka effekten av salturlakningen. Att den omrörda skjuvhållfastheten kan minska dramatiskt vid tillförsel av olika substanser hade redan tidigare visats av Söderblom (1974) och en sådan påverkan konstaterades också i denna undersökning.

Undersökningar i kanadensiska leror har visat att medel som löser upp karbonater, gips och järnföreningar (d.v.s. försämrar befintlig cementering) kan reducera kvasi-förkonsolideringstrycket med mer än 50 %, (Bjerrum 1967). Detta har dock ingen större relevans för svenska förhållanden.

KVICKLEREBILDNING OCH GRÄNSER

Vad som menas med kvicklera i Sverige är klart definierat, men detta begrepp varierar från land till land och förefaller vara ett subjektivt begrepp som beror på vilka typer av lera man är van vid. Så angav t.ex. Skempton och Northey 1952) i England att kvicklera var lera med en sensitivitet S_t högre än 16!. Denna definition har senare använts på andra håll. Rosenqvist (1953) föreslog en indelning med hänsyn till sensitivitet enligt:

Sensitivitet	Benämning
8–16	Något kvick
16–32	Medelkvick
32–64	Mycket kvick
>64	Extra kvick

Denna indelning har använts i en del äldre litteratur. Efter 1974 gäller NGFs definition i Norge att för kvicklera skall sensitiviteten vara högre än 30 samtidigt som den omrörda skjuvhållfastheten skall vara lägre än 0,5 kPa. Motsvarande gränser i Sverige är 50 respektive 0,4 kPa, (Karlsson och Hansbo 1992). Inte ens inom Skandinavien har vi således riktigt samma definition för begreppet kvicklera.

Bjerrum (1954, 1955) visade tidigt på betydelsen av ingående lermineral och visade att en av förutsättningarna för att kvicklerebildning skulle ske var att de ingående lermineralen var lågaktiva.

Enligt Mitchell och Houston (1969) är aktivitetstalet i kvicklera normalt lägre än 0,5 och Torrance och Ohtsubo (1995) och Torrance (1996) anger att aktiviteten måste vara under 1,0 för att lera skall kunna bli kvick.

En annan förutsättning med hänsyn till den svenska definitionen av kvicklera är att vattenkvoten är klart högre än flytgränsen. Flytgränsen bestäms med fallkonförsök på omrörd jord och motsvarar ett konintryck av 10 mm för 60 g–60º konen. Detta motsvarar en omrörd skjuvhållfasthet av 1,6 kPa. För att samma lera skall klassificeras som kvicklera fordras att intrycket för samma kon är > 20 mm, dvs. att den omrörda skjuvhållfastheten är < 0,4 kPa. För detta fordras att vattenkvoten är klart högre än flytgränsen. Enligt svenska undersökningar av sensitivitet bör kvasiflytindex (vattenkvot/flytgräns) vara högre än ca 1,1 för att lera skall kunna vara kvick med avseende på kravet att sensitiviteten skall vara högre än 50, (SOU 1992, Larsson och Åhnberg 2003). För kriteriet att den omrörda skjuvhållfastheten skall vara lägre än 0,4 kPa kan de samband mellan konintryck, vattenkvot och flytgräns som tagits fram av Karlsson (1974) användas, Fig. 13. Dessa samband används främst för enpunktsmetoden för flytgränsbestämning, men kan i princip användas även för ovannämnda hållfasthetskriterium. Sambanden visar att kvasiflytindex normalt skall vara större än ca 1,2 för att den omrörda skjuvhållfastheten skall vara mindre än 0,4 kPa. Med hänsyn till angivna felmarginaler i sambanden blir också denna gräns att kvasiflytindex skall vara större än 1,1.

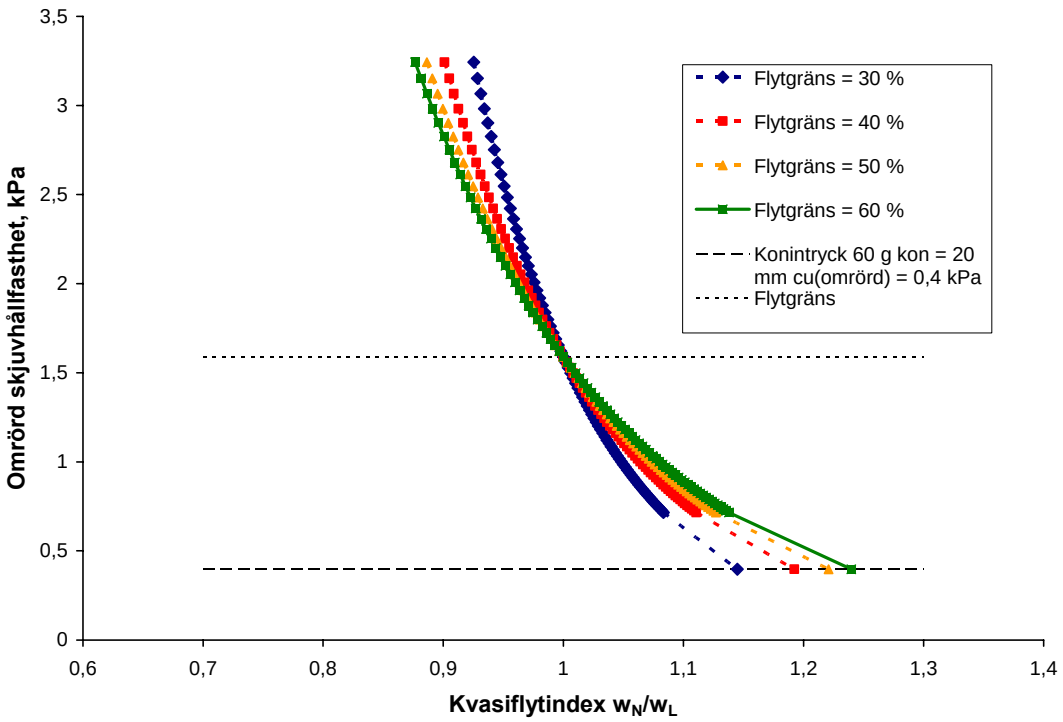


Fig. 13. Samband mellan omrörd skjuvhållfasthet och kvasiflytindex enligt Karlsson (1974).

Kriterier som medverkar till en låg omrörd skjuvhållfasthet och hög sensitivitet är enligt Rosenqvist (1978) och Torrance (1983):

- låg lerhalt
- låg organisk halt
- hög vattenkvot
- låg salthalt
- hög andel envärda katjoner i förhållande till flervärda
- organiska och oorganiska dispergerande ämnen
- lågaktiva mineral

Torrance och Ohtsubo (1995) anger att för marin lera gäller att salturlakning skall sänka flytgränsen mer än den vattenkvotsminskning som kan uppstå på grund av konsolidering.

För sötvattenavsatta leror skall dispergerande ämnen ge samma effekt, (Torrance 1983).

I båda fallen gäller att sänkningen av flytgränsen skall medföra att den blir klart lägre än vattenkvoten.

Olika gränser för salthalter har angetts, ibland till och med för samma lera. Detta beror bland annat på att olika definitioner och olika mätmetoder använts. Salthalten kan bland annat uttryckas som salthalt i jorden eller som salthalt i utpressat porvatten. Den kan mätas med jonselektiva elektroder i utpressat porvatten eller suspensioner av lera och vatten eller genom detaljerade kemiska analyser eller, vilket också är vanligt, indirekt genom mätning av resistiviteten i jorden vilken grovt omräknas till salthalt. Metoderna ger som regel mer eller mindre skilda resultat, men vilken metod som använts och vad angivna värden egentligen avser framgår ofta inte i de rapporterade undersökningarna. I några fall skriver man en sak men menar troligen något annat. Mätning av resistivitet är den vanligaste metoden i fält och utförs vid sonderingar och geofysiska undersökningar. Kemiska analyser är mer exakta och ger möjlighet till vidare analyser med avseende på inverkan av olika joner.

Salthaltsmätningar och resistivitetsmätningar ger dock endast besked om ifall förutsättningar ur detta perspektiv finns för att lera skall kunna vara kvick. För att klarlägga om detta verkligen är fallet krävs geotekniska undersökningar (normalt fallkonförsök på upptagna jordprover).

Torrance (1974) angav att för kvickleror bör salthalten vara under 2 g/l, vilket synes vara den gräns som oftast används i Sverige och Norge. Refererande till Grondin (1978) anger Locat et al. (1985) att gränsen för kvickleror går vid 2 g/l även i kanadensiska leror. Fältmätningar av salthalter i norska och kanadensiska kvickleror har visat på salthalter som normalt är lägre än 1 g/l.

Salthaltsgränser skall betraktas med stor försiktighet eftersom de förutsätter en viss komposition hos leran och jonerna i dess porvatten och att det är en viss definierad kemisk process som försiggått. Andra sammansättningar och andra processer, separata eller samtidigt pågående, kan markant förändra dessa gränser. Andersson-Sköld et al. (2005) anger sålunda en gräns för en svensk kvicklera på 5,6 g/l, vilket tillskrivs att det sannolikt utöver utlakning pågått parallella processer som bidragit till att leran är kvick redan vid denna höga salthalt

Salthaltsgränserna är starkt avhängiga av ingående salter. Gränsen för kalciumsalt är t.ex. mycket lägre än för natriumsalt (Torrance 1998). Som ovan angetts räcker det med mycket låga halter av tvåvärda positiva joner för att lera inte skall vara kvick. Locat et al. (1985) anger att andelen envärda natrium- och kaliumjoner skall utgöra minst 70 % av den totala saltmängden (natrium + kalium + magnesium + kalcium) för att lera skall vara kvick

Penner (1965) angav gränsen för kvicklera som en resistivitet ≥ 4 Ωm. Ledningsförmågan i lera utgörs av ledningsförmåga i porvätskan plus ledningsförmågan längs porernas väggar, dvs. längs partikelytorna. Resistiviteten blir därmed en funktion av porvätskans kemi, vattenkvot (porvolym), kornstorleksfördelningen i leran, lerans strukturella uppbyggnad (porstorlek) och mineral i partiklarna. För svenska leror med normala mineralinnehåll och porvattenkemier ger de samband som presenterats av Larsson (1975) att gränsen för kvicklera vid 2 g/l motsvarar resistiviteter mellan 6–13 Ωm (Andersson-Sköld et al. 2005). Mätningar i fält i samband med Götaälvutredningen (SOU 1962) gav gränsvärden mellan 5 och 10 Ωm (Söderblom (1969). För de flesta leror i t.ex. Götaälvområdet och Bohuslän tycks denna gräns ligga nära 7 Ωm, (Söderblom 1969, Dahlin et al. 2001). Resistiviteten är dock som ovan nämnts ett relativt grovt mått på saltinnehållet och andra gränser har därmed föreslagits för norska leror och även för en del svenska (Andersson-Sköld et al. 2005).

Ohtsubo et al. (1983) har visat att i japanska leror med ett annat ler- och mineralinnehåll än de norska och svenska är sensitiviteten ofta högre vid motsvarande flytindex och kvickleror har där saltinnehåll lägre än 1g/l.

BETYDELSE AV KVICKLEREFÖREKOMST

Enligt Bjerrum (1954) medför sänkningen i salthalt en reduktion av den odränerade skjuvhållfastheten. Denna reduktion angavs som en möjlig utlösande faktor för kvicklereskred som inträffat under perioder då ingen annan orsak som höga portryck, låga vattenstånd, laster etc. kunde förklara varför skreden utlöstes just vid den aktuella tidpunkten. Bjerrum var dock mycket noga med att påpeka att en förutsättning för att detta skulle kunna ske var att släntens beräkningsmässiga stabilitet redan var nära 1,0. Att slänterna var instabila konstaterades således redan vid en vanlig grundundersökning och den utlösande faktorn i form av pågående urlakning var endast ”halmstråt som knäckte kamelens rygg”. Den naturliga huvudanledningen till den instabila situationen och även för kvicklereskred är som regel erosion vid släntfoten, (Bjerrum et al. 1969).

Inte heller i något annat känt fall har kvicklereskred utlösts utan att den beräkningsmässiga stabiliteten i området eller delar därav varit mycket låg. Den huvudsakliga betydelsen av kvicklereförekomst är därför att konsekvenserna av ett initialskred eller en annan lokal försvagning i lermassan riskerar att bli desto större. Den störningspåverkan som fordras för att åstadkomma en sådan försvagning är eventuellt också mindre.

I de fall ett lokalt skred eller en lokal hållfasthetsnedsättning inträffar i kvicklera innebär detta att den relativa hållfasthetsnedsättningen blir större än i mindre sensitiv jord. Inträffar det i övre delen av en slänt innebär det att tillskottskrafterna på nedanförliggande jordmassor blir större. Är också dessa högsensitiva kan risken för att hållfastheten i partier av dessa skall brytas ned med ytterligare påskjutskrafter på nedanförliggande partier vara större osv. Risken för framåtgripande följdskred är därmed större.

Inträffar ett skred i kvicklera i de nedre delarna av en slänt, flyter de skredade massorna ofta iväg och lämnar en brant kant utan mothållande krafter mot de kvarvarande massorna. Om detta resulterar i instabilitet i det bakomliggande partiet och detta består av kvicklera, flyter även dessa massor iväg och lämnar en ny brant kant mot bakomliggande jordmassor osv. Risken för bakåtgripande skred blir därmed också större i kvicklera.

Det finns dock ingen magisk gräns vid benämningen kvicklera utan riskerna för ovanstående förlopp ökar endast gradvis med sensitiviteten och motsvarande förlopp, om än normalt inte lika häftiga och omfattande, kan under vissa omständigheter inträffa även i låg- och normalsensitiv lera.

En speciell risk i kvicklereområden är att om ett initialskred eller dess utbredning når ned i kvicklera kan skredmassorna förvandlas till en flytande tung vätska. Även om skreden inte blir framåtgripande i egentlig mening kan skredmassorna därmed flyta iväg långa sträckor över endast svagt lutande terräng och ödelägga eller hota konstruktioner i deras väg. Många sådana strömmar av flytande lermassor har uppstått genom historien och det mest spektakulära exemplet i modern tid är skredet i Saint-Jean-Vianney i Kanada 1971 där cirka 7 millioner kubikmeter lera rann iväg med en uppskattad hastighet av 26 km/h och den nästan tio meter höga frontvågen spolade bort en vägbro tre kilometer bort innan massorna slutligen rann ut i ett befintligt vattendrag (Tavenas et al. 1971). Ett annat skred med motsvarande omfattning inträffade i Rissa i Norge 1978. Här rann skredmassorna direkt ut i en sjö, men mängden och hastigheten hos de utrinnande massorna skapade flodvågor som anställde stor skada i andra änden av sjön 4 km längre bort, (t.ex. www.geoportalen,no). Ett senare exempel med mer måttlig omfattning från Norge är skredet i Overhalla 2007, där skredmassor flöt iväg över 400 m och kom att täcka mer än 100m av riksvägen mellan Namsos och Skage (www. tronderavisa.no). Också i Sverige inträffar skred av detta slag och ett senare exempel är skredet i Bärfendal 1977, där cirka 6000 kubikmeter lermassor från ett lokalt skred flöt iväg cirka 400 m innan de nådde ett vattendrag och med mycket knapp marginal undgick att ta med sig en jordbruksfastighet på vägen (Skredkommissionen1990), Fig. 14.

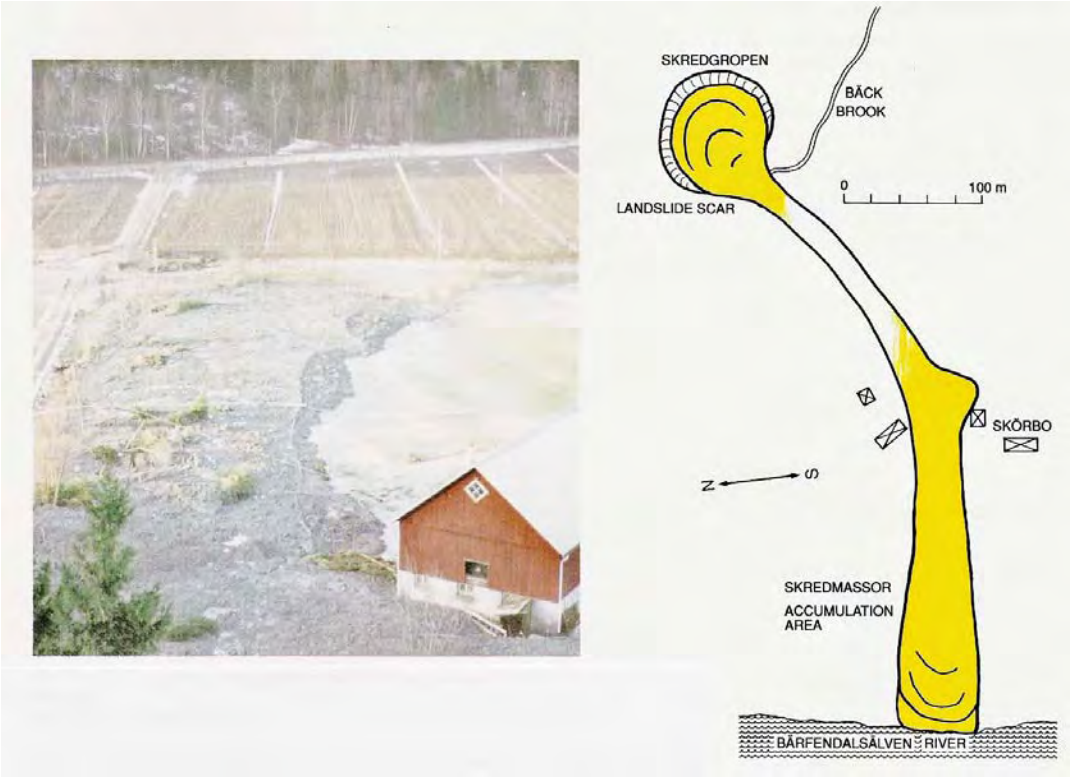


Fig. 14 Skredet i Bärfendal; Ström av flytande lermassor och hotad byggnad efter skredet och schematisk bild av skredets och skredmassornas utbredning. (Skredkommissionen 1990).

Ett flertal skred i kvicklereområden har utlösts på grund av anläggningsarbeten. De flesta av dessa är dock inte närmare utredda, varför inverkan av olika typer av påverkan utöver klara fall som alltför stora laster är svår att kvantifiera. Ett antal av dessa skred har dock helt eller delvis tillskrivits pålningsarbeten, schaktningsarbeten, sprängning och vibrationer i samband med byggtrafik och dumpning av fyllningsmassor. Det finns således anledning till extra försiktighet i samband med anläggningsarbeten i kvicklereområden

Också för svenska förhållanden mer ovanliga utlösande faktorer har angivits. I Norge har t.ex. bombningar under andra världskriget utlöst skred enligt Holmsen och Holmes (1946). Mitchell & Houston (1969) anger att jordbävningen i Anchorage (1964) ökade intresset för uppträdandet hos sensitiv Bootlegger Cove Clay, eftersom stora skred då uppstod i denna typ av lera. Någon senare litteratur om vidare undersökningar i detta område har dock inte påträffats. I Norge rapporterade Solberg (2007) om hur bergras med nedfallande klippblock orsakat storskred i instabila kvicklereområden. Det senaste storskredet där inträffade på grund av att en sprängsalva i bakkanten av ett område med högsensitiv lera och dålig stabilitet pressade ett stort block horisontellt in i lermassorna med lokal plasticering som utvecklades till ett framåtgripande storskred som följd, (Nordal et al. 2009).

MEKANISK PÅVERKAN FÖR NEDBRYTNING AV LERANS STRUKTUR

Leroueil (2001) uttrycker den energi som krävs för att bryta ned lerans struktur som en faktor gånger produkten av odränerad skjuvhållfasthet och plasticitetsindex, ($E=f \cdot c_u \cdot I_P$), Fig.15.

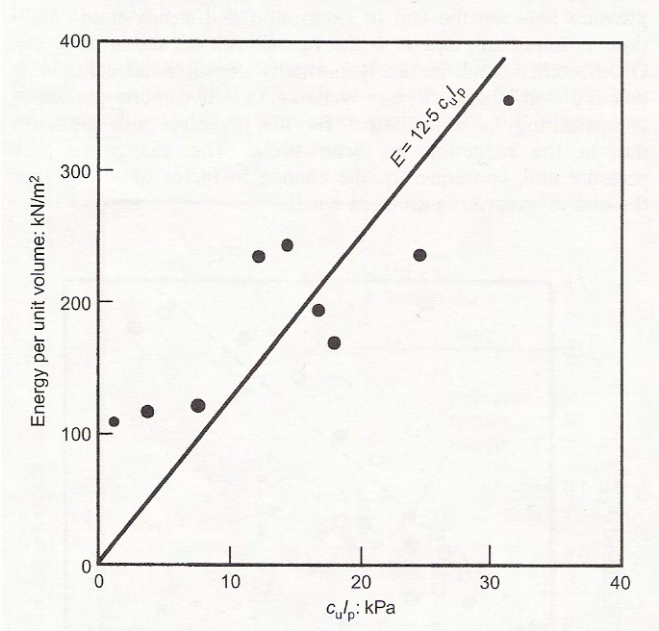


Fig. 15. Erforderlig energi för att uppnå 75 % av kanadensisk leras nedbrytningspotential (Leroueil 2001).

Eftersom en ren urlakning dels sänker plasticitetsindex (I_P), dels eventuellt sänker den odränerade skjuvhållfastheten (c_u) skulle detta innebära att en urlakad lera utan andra effekter skulle fordra mindre energi att bryta ned än en icke urlakad. Tidigare undersökningar av Larsson och Jansson(1981) och Tavenas et al. (1982) hade också indikerat att ju mer lågplastisk leran är, desto mindre omrörningseffekt fordras för att hållfastheten skall brytas ned, Fig. 16. Resultaten indikerar att de leror som är lätta att bryta ned i huvudsak har flytgränser ≤ 40 %. Motsvarande gräns fanns vid en inventering av stora bakåtgripande skred i Kanada, där de mycket långt bakåtgripande skreden också befanns ha inträffat i leror med flytgränser ≤ 40 %, Fig. 17. Spridningen i resultaten är dock relativt stor och även andra faktorer kan antas påverka.

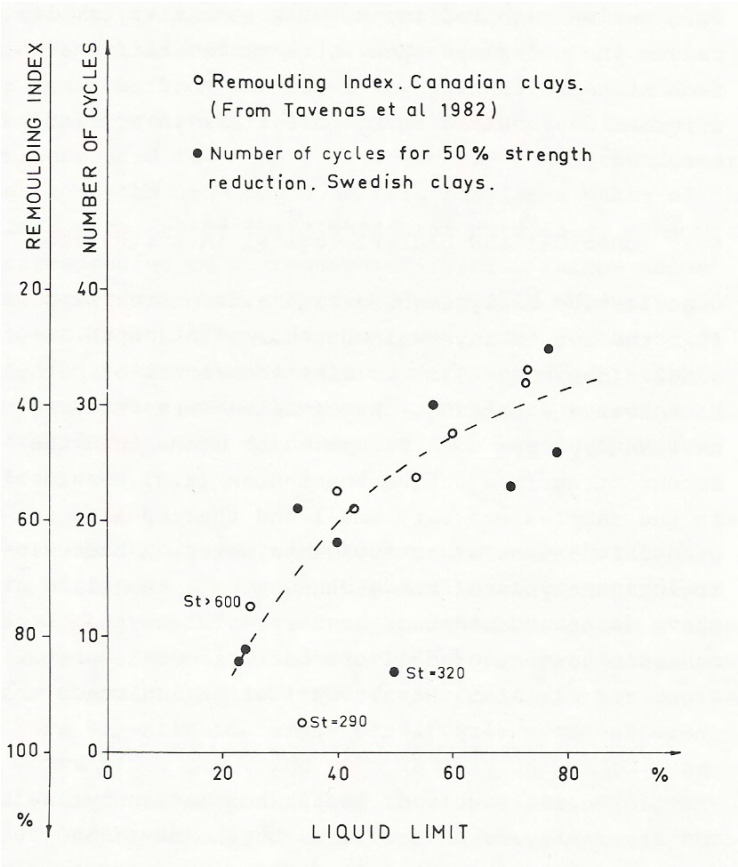


Fig. 16. Resultat från försök att kvantifierar erforderligt arbete för nedbrytning av lerors skjuvhållfasthet, (Larsson och Jansson 1981).

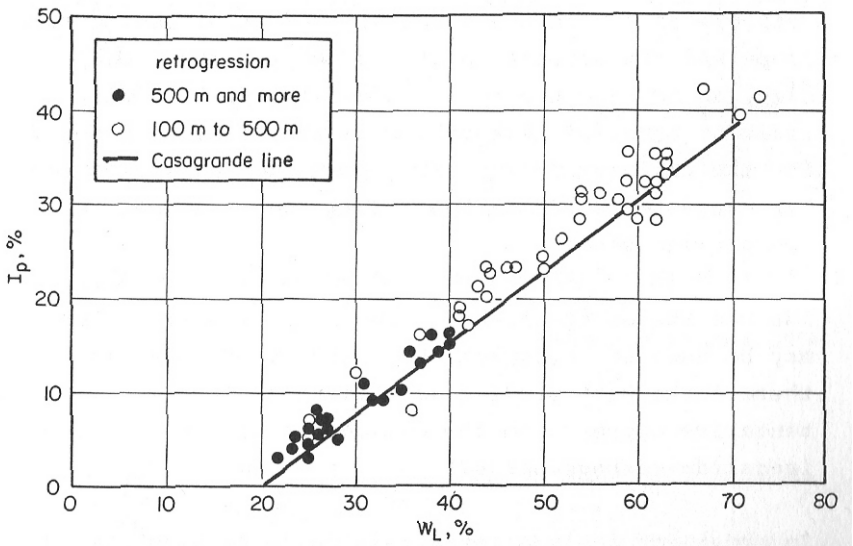


Fig. 17. Flytgräns och plasticitesindex för kanadensiska leror i vilka stora bakåtgripande skred inträffat, (Tavenas et al. 1982).

JORDFÖRSTÄRKNING GENOM JONTILLFÖRSEL

Möjligheten till jordförstärkning genom jontillförsel omnämndes av Bjerrum och Rosenqvist (1956).

Fältförsök med jordförstärkning genom salttillförsel utfördes i Sverige av Thalme (1966). En tillförsel av kalciumklorid genom diffusion resulterade i en ökning i odränerad skjuvhållfasthet mellan 7 och 35 % i kvickleror medan den omrörda skjuvhållfastheten ökade mellan 330 och 1000 %. I mer normalsensitiv lera ökade den omrörda skjuvhållfastheten cirka 100 %.

Försök med elektroinjektion gav varierande resultat inom jordmassan, vilket kan antas bero på att effekten av jontillförseln överlagrats av effekterna av elektroosmos. De senare ger en sönderdelning av befintliga salter och en vattenvandring från anoderna till katoderna. Detta resulterar i en förstärkning av jorden vid anoden och en försvagning vid katoden. Att applicera en elektrisk likström genom jorden kan därmed användas till att öka mantelbärigheten hos pålar, gärna i kombination med tillförsel av positiva metalljoner, eller alternativt minska vidhäftningen vid uppdragning av stålspont, utan tillförsel av extra joner, men är mer komplicerat för förstärkning av en jordmassa, (jämför Bjerrum et al.1967 och Larsson 1974). För den senare applikationen torde en ren konsolidering med hjälp av elektroosmos och utan tillförsel av joner vara mer rationell och kontrollerbar.

Ett lyckat praktikfall med förstärkning genom jontillförsel som rapporterats var byggandet av Haslelinjen på Oslo Ringvej. Vid projekteringen, som utfördes i ett tidigt skede, påträffades ett stort parti med urlakad kvicklera som inte skulle klara belastningen av vägbanken. Det 15 m tjocka lagret av kvicklera stabiliserades genom att saltbrunnar med kaliumklorid installerades i ett rutmönster och saltet fick diffundera ut i jordmassan. Efter 3 år hade den odränerade skjuvhållfastheten ökat ca 4 gånger och vägen kunde byggas utan vare sig sättnings- eller stabilitetsproblem, (Rosenqvist 1978). Hållfasthetsökningen två år efter installation av saltbrunnarna visas i Fig. 18.

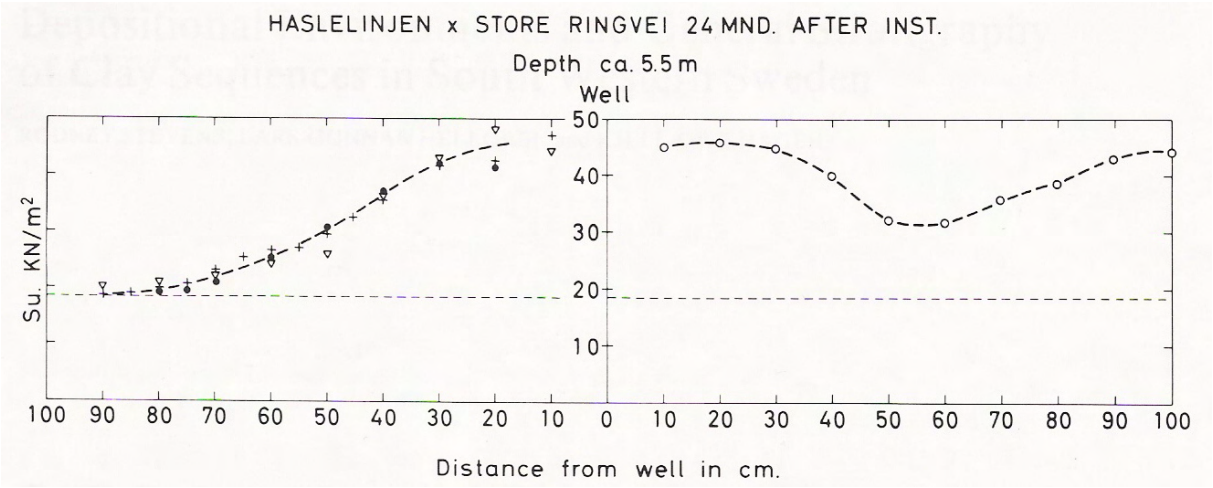


Fig. 18. Uppmätt odränerad skjuvhållfasthet på olika avstånd från saltbrunnar 2 år after att saltbrunnarna installerats. Den streckade linjen markerar uppmätt hållfasthet före salttillförsel, (Rosenqvist 1978).

LITTERATUR

Andersson-Sköld, Y., Torrance, J.K., Lind, B., Odén, K., Stevens, R.L. and Rankka, K. (2005). Quick clay – A case study of chemical perspective in Southwest Sweden. Engineering Geology, Vol. 82, No. 2, pp. 107-118.

Bjerrum, L. (1954). Geotechnical properties of Norwegian marine clays. Geotechnique, Vol. 4, pp. 49-69.

Bjerrum, L. (1955a). Stability of natural slopes in quick clay. Proceedings European Conference on Stability of Earth Slopes. Vol. 2, PP. 16-40, Stockholm.
Även i Geotechnique, Vol. 5, No.1, pp. 101-119.

Bjerrum, L. (1955b). Norske marine leirers geotekniske egenskaper. Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon No. 7. Oslo.

Bjerrum, L. (1967). Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. Seventh Rankine Lecture. Geotechnique, 17, pp. 81-118.
Även i Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon No. 71, Oslo.

Bjerrum, L. (1969). Settlements during leaching. Contribution to 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City. Norges Geotekniske Institutt Publikasjon No. 85, pp. 47-48. Oslo.

Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. State-of -the-Art Report. Proceedings 8th International Conference on Solil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, Vol. 3. pp 111-159.

Bjerrum, L. and Rosenqvist, I. T. (1956). Some experiments with artificially sedimented clays. Geotechnique, Vol. 6, pp 124-136.

Bjerrum, L., Löken, T., Heiberg, S. and Foster, R. (1969). Field study of factors responsible for quick clay slides. Proceedings Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 531-540, Mexico City.

Bjerrum, L, Moum, J, Eide, O. (1967). Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay. Geotechnique, Vol 17, No 3, pp 214-235.

Brenner, R.P., Nutalaya, P. and Youthong, K. (1978). Physical and mineralogical characteristics of Bangkok subsoil from a deep bore hole in Klong Luang District. Proceedings of the 3rd Regional Conference on Geology and Mineral Resources of Southeast Asia, Bangkok, pp. 205-213.

Brenner, R.P., Nutalaya, P., Chilingarian, G.V. and Robertson, J.O. (1981). Engineering geology of soft clay. In Soft Clay Engineering, Eds. Brand. E.W. and Brenner, R.P. Elsevier.

Dahlin, T., Larsson, R., Leroux, V., Svensson, M. och Wisén, R. (2001). Geofysik i släntstabilitetsutredningar. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 62, Linköping.

Di Maio, C. (1996). Influence of pore fluid composition on the residual shear strength of some natural clayey soils. Proceedings Seventh International Symposium on landslides, Vol. 2, pp. 1189-1194, Trondheim.

Fällman, A.M., Holby, O. och Lundberg, K. (2001). Kolloiders betydelse för hållfasthet och föroreningstransport i jord. Statens geotekniska institut, Rapport 60, Linköping.

Holmsen, G. (1929). Lerfaldene ved Kokstad, Gretnes og Braa. Norges geologiske undersøkelese, 132.

Holmsen, G. (1934). Lerfald i årene 1930-1932. Norges geologiske undersøkelese, 140.

Holmsen, G. (1938). Våre leravsetninger som byggegrunn. Norges geologiske undersøkelese, 151.

Holmsen, G. och Holmsen, P. (1946). Lerfald i årene 1940-1945. Norges geologiske undersøkelese, 167.

Ismale, N.F. (1993). Laboratory and field leaching tests on coastal salt-bearing soils. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, Vol. 119, No 3, pp. 453-470.

Jacobsson, A. and Pusch, R. (1972). Thixotropic action in remoulded quick clay. Bulletin International Association of Engineering Geology, No. 5, pp.105-110.

Karlsson, R. (1974). Konsistensgränser. Byggforskningens informationsblad B11:1974. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

Karlsson, R. och Hansbo, S. (1992). Jordarternas indelning och benämning. Geotekniska laboratorieanvisningar 3:e reviderade upplagan. Byggforskningsrådet, Stockholm.

Kazi, A. and Moum, J (1972). Effect of leaching on the fabric of normally consolidated marine clays. Proceedings International Symposium on Soil Structure, Gothenburg, pp. 137-152.

Kim, S.K. (2008). Characterization of deltaic deposits in the Nakdong River mouth, Busan. Keynote/Theme note. Proceedings International Symposium on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Taipei, pp. 75-88.

Kim, Y.-T. and Do, T.-H. (2009). Effect of leaching on the compressibility of Busan clay. Paper submitted to the Korean Society of Civil Engineers Journal of Civil Engineering.

Kjellman, W. (1954). Mechanics of large Swedish landslides. Proceedings, European Regional Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm, Vol.1, pp.75-81.
Även i Geotechnique Vol. 5 (1955), No.1, pp. 74-78.

Larsson, R. (1975). Konsolidering av lera med elektroosmos. Rapport R45:1975 . Byggforskningsrådet, Stockholm.

Larsson, R. and Jansson, M. (1977). The landslide at Tuve November 30 1977. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 18, Linköping.

Larsson, R. and Åhnberg, H. (2003). Long-term effects of excavations at crests of slopes. Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 61, Linköping.

Lefebvre, G., Rohan, K. and Milette, J. P. (1986). Erosivity of intact clay: Influence of the natural structure. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 23, No. 4, pp. 427-434.

Leroueil, S. (2001). Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. 39th Rankine Lecture. Geotechnique, Vol. 51, No. 3, pp. 195-244.

Locat, J. and Demers, D. (1988). Viscosity, yield stress, remoulded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, No. 4, pp. 799-806.

Löken, T. (1970). Recent research at the Norwegian Geotechnical Institute concerning the influence of chemical additions on quick clay. Geologiska föreningen i Stockholm. Förhandlingar. Vol. 92, Del 2. Stockholm.

Michell, J.K. and Houston, W.N. (1969). Causes of clay sensitivity. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. Vol. 95, No. SM3, pp. 845-871.

Moore, J.G., Brown, J.D. and Rashid, M.A.. (1977). The effect of leaching on engineering behaviour of a marine sediment. Geotechnique Vol. 27, No. 4, pp. 517-531.

Moum, J., Löken, T. and Torrance J.K. (1971). A geochemical investigation of the sensitivity of a normally consolidated clay from Drammen, Norway. Geotechnique 21, No 4, pp. 329-340.

- " - Discussion in Geotechnique 22, No. 3, pp. 542-544.
- " - Discussion in Geotechnique 22, No. 4, pp. 675-676

Också i Norges Geotekniske Institutt Publikasjon No 96.

Moum, J., Sopp, O.I. and Löken, T. (1968). Stabilization of undisturbed quick clay by salt wells. Väg- och Vattenbyggaren, No. 8. Också i Norges Geotekniske Institutt Publikasjon No. 81.

Nilsson, G. (1986). Kemisk inverkan på leras geotekniska egenskaper – Labobatoriestudie. Statens geotekniska institut, Varia Nr. 175, Linköping.

Nordal, S., Alén, C., Emdal, A., Jendeby, L., Lyche, E. och Madshus, C. (2009). Skredet i Kattmarksvegen i Namsos. Fjellsprengningsdagen, Bergmekanikkdagen, Geoteknikkdagen, Oslo.

Ohtsubo, M., Takayama, M. and Egashira, K. (1982). Marine quick clays from Ariake Bay area, Japan. Soils and Foundations, Vol. 22, No, 4, pp. 71-80.

Ohtsubo, M., Takayama, M. and Egashira, K. (1983). Relationships of consistency limis and activity to some physical and chemical properties of Ariake marine clays. Soils and Foundations, Vol. 23, No, 1, pp. 38-46.

Penner, E. (1965). A study of sensitivity in Leda clay. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 2, No. 5, pp. 425-441.

Pusch, R. (1970). Clay microstructure. Document D:8 1970. Byggforskningsrådet, Stockholm.

Pusch, R. (1974). Jords uppbyggnad. Byggforskningens informationsblad B14:1974. Byggforskningsrådet, Stockholm.

Rankka, K. (2003). Kvicklera – bildning och egenskaper – litteraturstudie. Statens geotekniska institut, Varia Nr. 526, Linköping.

Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V. and Dahlin, T. (2004). Quick clay in Sweden. Statens geotekniska institute, Rapport Nr. 65, Linköping.

Rosenqvist, I. T. (1946). Om leires kvikkaktighet. Statens Vegvesen, Veglaboratoriet, Meddelelse 4:5, Oslo.

Rosenqvist, I.T. (1953). Considerations on the sensitivity of Norwegian quick clays. Geotechnique, Vol. 3, No. 5, pp. 195-200.

Rosenqvist, I.T. (1955a). Investigations in the clay-electrolyte-water system. Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon No. 9. Oslo.

Rosenqvist, I.T. (1955b). Fysikalsk-kjemisk-mineralogiske undersökelser over norske leirjordarter. Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon No. 7. Oslo.

Rosenqvist, I.T. (1978). General theory for the sensitivity of clays (a summary). Proceedings of the Interdisciplinary Conference on Mechanisms of Deformation and Fracture, pp. 315-319, Luleå.

Rosenqvist, I.T. (1984a). Colloidal physics as a basis for quick clay properties. Striae. Vol. 19, pp. 5-11.

Rosenqvist, I.T. (1984b). Importance of pore water chemistry on mechanical and engineering properties of clay soils. Philosophical Transactions. Royal Society of London, Vol. A 311, pp. 369-373.

Skempton, A.W. and Northey, R.D. (1952). The sensitivity of clays. Geotechnique, Vol. 3, No. 1, pp. 30-53.

Solberg, I.L. (2007). Geological, geomorphological and geophysical investigations of areas prone to clay slides: Examples from Buvika, Mid Norway. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Department of Geology and Mineral Resources Engineering, 2007:156, Trondheim.

Skredkommissionen (1990). Ras och skred i Sverige. Ingenjörsvetenskapsakademien Skredkommissionen, Rapport 2:90, Linköping.

SS-EN 1997-2: 2007. Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner – Del 2: Markundersökning och provning. SIS Förlag, Stockholm.

Statens Offentliga utredningar (1962). Rasriskerna i Götaälvdalen. Betänkande avgivet av Götaälvskommittén. Inrikesdepartementet. Stockholm.

Söderblom, R. (1969). Salt in Swedish clay and its importance for quick clay formation. Statens geotekniska institut. Proceedings No. 22, Stockholm.

Söderblom, R. (1974a). Organic matter in Swedish clay and its importance for quick clay formation. Statens geotekniska institut. Proceedings No. 26, Stockholm.

Söderblom, R. (1974b). New lines in quick clay research. Statens geotekniska institut. Särtryck och preliminära rapporter Nr. 55, Stockholm.

Tavenas, F., Chagnong, J.-Y. and La Rochelle, P. (1971). The Saint-Jean-Vianney landslide: Observations and eyewitnesses accounts. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 3, pp. 463-478.

Tavenas, F., Flon,P., Leroueil, S. and Lebuis, J. (1982). Remoulding energy and risk of slide retrogression in sensitive clays. Symposium on Slopes on Soft Clays, Linköping March 8-10 1982, Statens geotekniska institut, Rapport Nr. 17, Linköping.

Thalme, O.A. (1968). Clay sensitivity and chemical stabilization. Avhandling. Byggforskningen, Rapport 56:1968, Stockholm.

Thalme, O.A., Pajuste, M. and Wenner, C.-G. (1966). Secondary changes in the strength of clay layers and the origin of sensitive clay. Byggforskningsrådet. Rapport 46. Stockholm.

Ting, W. H. and Ooi, T.A. (1977). Some properties of the coastal alluvia of Peninsular Malaysia. Proceedings of the International Symposium on Soft Clay, pp. 89-101, Bangkok.

Tiwari, B., Tuladhar, G.R. and Marui, H. (2005). Variation in residual shear strength of the soil with the salinity of pore fluid. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 131, No. 12, pp. 1445-1456.

Torrance, J.K. (1974). A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clays. Geotechnique Vol. 24, No. 2, pp. 155-173.

Torrance, J.K. (1975). On the role of chemistry in the development and behaviour of the sensitive marine clays of Canada and Scandinavia. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, No. 3, pp. 326-335.

Torrance, J.K. (1976). Pore water extraction and the effect of sample storage on the pore water chemistry of Leda clay. ASTM Special Technical Publication No. STP 599, pp. 147-157. Philadelphia.

Torrance, J.K. (1983). Towards a general model of quick clay development. Sedimentology, No. 30, pp. 547-555.

Torrance, J.K. (1994). Post-depositional processes in high-sensitivity, fine-grained, collapsible sediments. Proceedings NATO Advanced Research Workshop on Collapsible Soils. Loughborough.

Torrance, J.K. (1996). On the development of high sensitivity: Mineralogical requirements and constraints. Proceedings International Symposium on Landslides, Vol. 1, pp. 491-496, Trondheim.

Torrance, J.K. (1999). Physical, chemical and mineralogical influences on the rheology of remoulded low-activity sensitive marine clay. Applied Clay Science, Vol. 14, No. 1-2, pp. 199-223.

Torrance, J.K. and Ohtsubo, M. (1995). Ariake Bay quick clays: a comparison with the general model. Soils and Foundations, Vol. 35, No. 1, pp. 11-19.

Woo, S.M. and Moh, Z.C. (1977). Effect of leaching on undrained shear strength behaviour of a sedimented clay. Proceedings Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Special Session 11, pp. 451-464, Tokyo.

Yong, R.N., Sehti, A.J. Ludwig, H.P. and Jorgensen, M.A. (1979). Interparticle action and rheology of dispersive clays. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division. Vol. 105, No. Gt 10, pp. 1193-1209.

Göta älvutredningen, GÄU delrapporter 1-34

1 Erosionsförhållanden i Göta älv

2 Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag

3 Hydrodynamisk modell för Göta älv. Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och bottenskjuvspänningar

4 Transport av suspenderat material i Göta älv

5 Ytgeologisk undersökning med backscatter - Analys för Göta älv och Nordre älv

6 Bottenförhållanden i Göta älv

7 Bedömning av grundvattenförhållanden för slänter längs Göta älv - Allmän vägledning

8 Känslighetsanalys för variationer i grundvattennivå och val av maximala portryck i slänter längs Göta älv – Exempel från en slänt

9 Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älvdalen till följd av förändrat klimat

10 Studie av portryckens påverkan från nederbörd och vattenståndsvariation i tre slänter längs Göta älv

11 Analys av uppmätta portryck i slänterna vid Äsperöd och Åkerström

12 Metodik för inventering och värdering av konsekvenser till följd av skred i Göta älvdalen

13 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalys, klassindelning och applicering av metodik i hela utredningsområdet

14 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse

15 Metodik konsekvensbedömning - Kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv

16 Metodik konsekvensbedömning - Sjöfart

17 Metodik konsekvensbedömning - Väg

18 Metodik konsekvensbedömning - Järnväg

19 Metodik konsekvensbedömning - Miljöfarliga verksamheter och förorenade områden

20 Metodik konsekvensbedömning - Naturmiljö

21 Metodik konsekvensbedömning - Energi och ledningsnät

22 Metodik konsekvensbedömning - VA-system

23 Metodik konsekvensbedömning - Näringsliv

24 Metodik konsekvensbedömning - Kulturarv

25 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalyser

26 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse och kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv - Fallstudie Ale kommun

27 Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen

28 Metodbeskrivning sannolikhet för skred: kvantitativ beräkningsmodell

29 Kartering av kvicklereförekomst för skredriskanalyser inom Göta älvutredningen. Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer

30 Quick clay mapping by resistivity – Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling

31 Inverkan av förändringar i porvattnets kemi, främst salturlakning, på naturlig leras geotekniska egenskaper – Litteraturstudie

32 Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer

33 Metodbeskrivning för SGI:s 200 mm diameter ”blockprovtagare” - Ostörd provtagning i finkornig jord

34 Sjömätning - Göta älv och Nordre älv

Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute
SE-581 93 Linköping, Sweden
Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800
Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914
E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se