



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



Kvicklera – bildning och egenskaper – Litteraturstudie

KARIN RANKKA

Varia 526

LINKÖPING 2003

Den yttersta konsekvensen av kvicklera – ett skred.
Bilden visar skredet vid Göta, den 7 juni 1957.



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Varia **526**

Kvicklera – bildning och egenskaper
– Litteraturstudie

KARIN RANKKA

LINKÖPING 2003

Varia	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Litteraturtjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--03/526--SE
Projektnummer SGI	11300
Dnr SGI	1-0202-0134
©	Statens geotekniska institut

FÖRORD

Under 2002 har etapp 1 i projektet Kartering av kvicklereförekomst drivits vid Statens geotekniska institut, SGI. Syftet med etapp 1 har varit att genom litteraturstudie och personliga kontakter sammanställa befintlig kunskap om bildning av kvicklera och dess geotekniska egenskaper. Resultatet har sammanställts i denna varia.

Projektet har genomförts av Karin Rankka, som också är författare till rapporten. Värdefulla synpunkter har under arbetets gång fåtts av Rolf Larsson, Karsten Håkansson, Claes Alén och Bo Lind, alla SGI, Tor Løken, NGI och Roland Pusch, Geodevelopment. Ett stor tack riktas till dessa personer.

Projektet har finansierats av Räddningsverket och SGI.

Linköping i december 2002

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning	6
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Projektet ”Kartering av kvicklera”	9
2 Kvicklera	10
3 Leras beståndsdelar	12
3.1 Lermineral	12
3.2 Lerpartikeln	14
3.3 Systemet lerpartiklar/vatten	15
4 Bildning av Kvicklera	19
4.1 Inledning	19
4.2 Faktorer som påverkar sensitiviteten	19
4.3 Principer för kvicklerebildning	27
5 Geotekniska egenskaper hos kvicklera	29
5.1 Aktivitet och lermineral	29
5.2 Portal och vattenkvoter	30
6 Exempel på kvicklereförekomst vid några olika försöksplatser	33
6.1 Tinghuset i Drammen, Norge	33
6.2 Jönåker och Ugglum	34
6.3 Åtorp, Munkedal	35
7 Referenser	37

SAMMANFATTNING

Kvickleror är leror vilkas lerskelett vid omrörning faller samman och vars skjuvhållfasthet därmed sjunker till värden nära noll. Dessa leror kan därför orsaka stor förödelse vid ett eventuellt skred. Det är ofta inte kvickleran i sig som initierar ett skred men omfattningen av skredet beror till stor del av jordens känslighet för störning. Kvikklara definieras som en lera med sensitiviteten större än eller lika med 50 och med en omrörd odränerad skjuvhållfasthet mindre än 0,4 kPa. Sensitiviteten anger förhållandet mellan den odränerade skjuvhållfastheten i ostört respektive omrört tillstånd.

Kvikklara bildas genom långsamma geologiska processer. De flesta kvickleror har bildats i avlagringar som avsattes i saltvatten vid den senaste istidens avsmältning. Då isen drog sig tillbaka höjdes landet ur havet och lerorna kom att hamna ovan havsytan. Leravlagringarna har därefter utsatts för urlakning varvid jonkoncentrationen i porvattnet har förändrats. Urlakningen har skett genom infiltration av regnvatten, artesiska tryck och diffusion. Dessa processer är mycket långsamma och innebär att förekomsten av kvikklara är mer vanlig i mindre mäktiga leravlagringar medan det i tjockare avlagringar eventuellt endast återfinns kvikklara närmast ett permeabelt skikt eller nära markytan. Det finns dock även kvickleror som avsatts i bräckt eller sötvatten. Genom kontakt med exempelvis organiska ämnen, så som torv och andra humusrika jordar, kan jonkoncentrationen i porvattnet ändras så att leran får kvicka egenskaper.

En lera består av fasta partiklar som bildar ett kornskelett och i hålrummen däremellan finns luft och/eller vätska. De fasta partiklarna består av lermineral men även av andra mineral. Lermineralen har bildats genom kemisk vittring av exempelvis glimmer, fältspat och amfiboliter. Exempel på lermineral är illit, montmorillonit och klorit. Gemensamt för lermineralen är att de är uppbyggda av skikt av plana nätverk av aluminiumhydroxid eller magnesiumhydroxid och kiseloxid. I kontakt med en vätska kommer alltid ett visst antal av lermineralens positiva joner att ersättas med positiva joner av lägre valens. Detta innebär att lermineralens yta är negativt laddad. För att kompensera den negativa laddningen drar mineralen till sig positiva joner från vätskan, exempelvis K^+ , Na^+ och Ca^{2+} . Koncentrationen av positiva joner i vätskan avgör hur stor "sfär" utanför lermineralet som kommer att behövas för att kompensera laddningen. Ju större jonkoncentration i vätskan desto mindre "sfär". Denna "sfär" kallas för det diffusa elektriska dubbellagret.

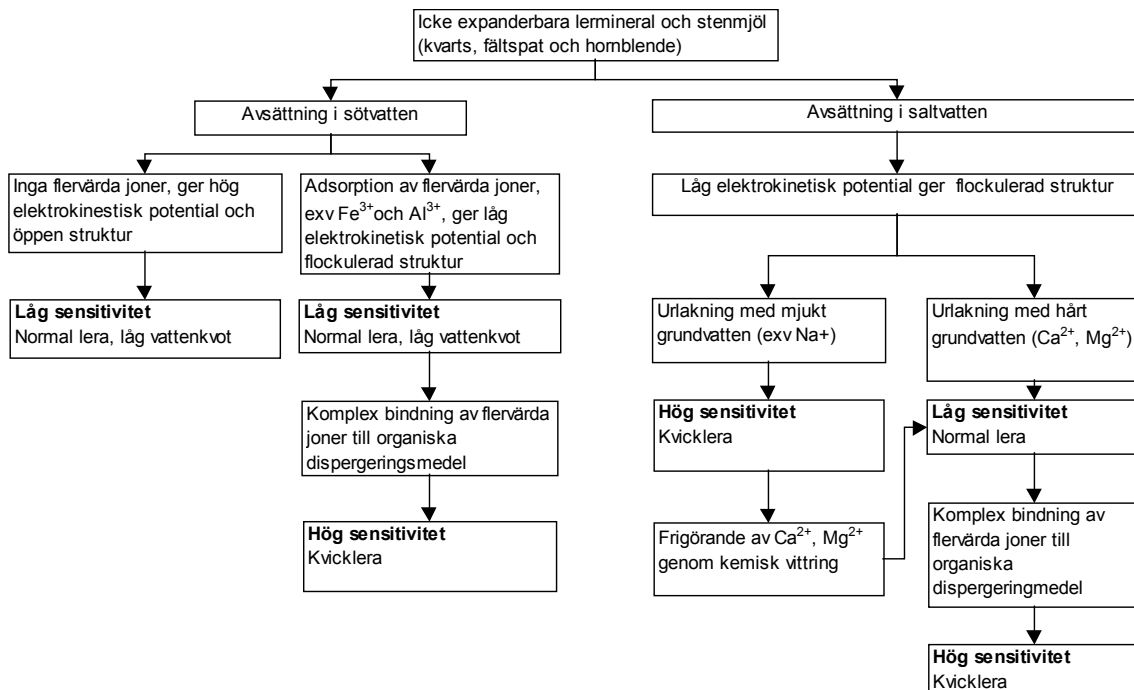
Lersedimentens struktur beror på jonkoncentrationen i vattnet som de avsätts i. Om partiklarna avsätts i ett saltvatten, som har hög jonkoncentration, kommer "sfären" att vara liten och partiklarna kommer nära varandra. Därmed överväger de attraherande krafterna mellan partiklarna och dessa kan flockuleras. Stora aggregat bildas som sedan sedimenterar utan någon speciell riktning och ger en lera med högt portal. Om partiklarna däremot sedimenterar i ett sötvatten är "sfären" stor och de repellerande krafterna mellan partiklarna överväger och partiklarna kan inte komma nära varandra. Därmed bildas en lera med orienterade partiklar och ett lägre portal än en saltvattenavsatt lera.

Forskning kring anledningen till att vissa leror har utbildat kvicka egenskaper startade redan på 1940-talet. Rosenqvist (1946) presenterade teorin att salthalten i saltvattenavsatt lera hade urlakats och därigenom gett leran dess kvicka egenskaper. Senare forskning har visat att låg salthalt är en nödvändig faktor för hög sensitivitet men att det inte alltid är en tillräcklig faktor. Det finns således saltvattenavsatta leror med låg salthalt som inte

är kvicka. Anledningen till detta är att jonsammansställningen i porvattnet har stor betydelse för bildning av kvicklera. Jonsammansställningen beror förutom på urlakningen även på eventuell vittring av lermineralen varvid joner kan frigöras från lermineralen till porvattnet. Ju större andel envärda joner av totala antalet joner i porvattnet desto större förutsättningar för en hög sensitivitet. Då koncentrationen av flervärda joner därmed är lägre måste varje lerpartikel öka sitt diffusa dubbellager för att uppnå laddningsneutralitet. Vid omrörning av leran är omflockulering inte längre möjlig och en lera med mineralpartiklar flytande i porvatten bildas. Eftersom portalet i den ursprungliga leran var högt fås efter omrörning en lera med en konflytgräns lägre än vattenkvoten.

Sensitiviteten kan öka då organiska, men även oorganiska, ämnen påverkar lersedimenten. Dessa ämnen fungerar då som dispergeringsmedel och löser upp positiva joner från mineralytan och binder dessa till sig. Därvid ökar den negativa laddningen på lerpartikels yta och därigenom ökar det diffusa dubbellagrets utbredning.

Brenner et al. (Brand och Brenner, 1981) gjorde en sammanställning över principerna för kvicklerebildning. Sammanställningen återges i *Figur S.1*



Figur S.1. Principer för kvicklerebildning (efter Brenner et al. (i Brand & Brenner, 1981)).

Kvicklorer domineras av icke svällande lermineral och låga aktivitetstal. Till svällande lermineral hör smektitmineralen (exempelvis montmorillonit och saponit). Aktivitetstalet, a_c , definieras som

$$a_c = \frac{I_p}{l_c}$$

där $I_p = w_L - w_p$ ($w_L =$ flytgräns, $w_p =$ plasticitetsgräns)
 $l_c =$ lerhalt, viktsprocent av totala finjordsmängden

Om aktivitetstalet är mindre än 0,75 definieras leran som lågaktiv.

Karaktäristiskt för kvickleror är att de har en konflytgräns som är lägre än den naturliga vattenkvoten. Sammanställningar gjorda i Göta Älvutredningen (Statens offentliga utredningar, 1962) och av Larsson och Åhnberg (2003) visar att förhållandet mellan lerans vattenkvot och flytgräns normalt överstiger 1,1 för leror som är kvicka.

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Nästan alla lerskred i Sverige, Norge och Kanada med stora konsekvenser kan rubriceras som kvicklereskred. Omfattningen av ett lerskred styrs till stor del av jordens känslighet för störning och speciellt då förekomsten av kvicklera. Ur skredrisksynpunkt utgör därför kvicklera en stor riskfaktor. För att kunna göra relevanta bedömningar av utbredningen av riskområden vid såväl översiktliga skredriskkarteringar som specifika stabilitetsutredningar är det nödvändigt att kunna ange om kvicklera förekommer i området och i så fall med vilken utbredning.

Den enda i dag tillförlitliga och praktiskt använda metoden för bestämning av kvicklera är upptagning av ostörda prover av leran och efterföljande fallkonförsök på jorden i ostört och omrört tillstånd. För att kartera utbredningen av kvicklera erfordras en mycket omfattande provtagning. Av ekonomiska skäl är därför metodiken inte tillämplig för kartering av kvicklerans utbredning utan begränsas i princip till punktvisa bestämningar i utvalda beräkningssektioner.

Kvicklera är vanligt förekommande i de delar av världen med geologiska och klimatiska förutsättningar som liknar de i Sverige, dvs. också i till exempel Norge och Kanada. Mycket arbete har därför redan tidigare lagts ner för att studera de grundläggande förutsättningarna för och egenskaperna hos kvicklera. Mycket av denna forskning bedrevs på 1950- och 60-talet.

1.2 Projektet "Kartering av kvicklera"

Under 2002 startades ett projekt vid Statens geotekniska institut med titeln "Kartering av kvicklera". Syftet med projektet är att inventera befintliga och utarbeta nya metoder, direkta och indirekta, vilket möjliggör kartering av förekomst av kvicklera i naturliga slänter. Dessutom syftar projektet till att befintlig kunskap om kvickleras bildning och egenskaper sammanställs på ett lättillgängligt sätt. Projektet har en tvärvetenskaplig karaktär där det gäller att insamla kunskapen hos specialister inom geoteknik, geologi, hydrogeologi, geofysik och jordkemi samt att presentera denna på ett enhetligt sätt. Projektet indelades i fem etapper:

1. Kunskapssammanställning om kvicklera
2. Geologiska och hydrogeologiska förutsättningar för kvicklerebildning.
3. Kontroll av bedömda förutsättningar för kvicklerebildning i urlakad lera med geofysiska mätningar.
4. Kontroll av kvicklereförekomst, jordlagerföljder och övriga egenskaper genom provtagning och sondering.
5. Utarbetande av generella kriterier och arbetsmetodik för kvicklerekartering

Etapp 1 utfördes under 2002 med finansiella medel från Statens geotekniska institut och Räddningsverket. Resultatet från detta arbete presenteras i denna rapport. Syftet med rapporten är att beskriva den kunskap som finns framtagen om kvicklerans bildning och egenskaper på ett sådant sätt att idag yrkesverksamma geotekniker får en god förståelse för kvicklera.

Arbetet med de övriga etapperna planeras att genomföras under 2003 och 2004.

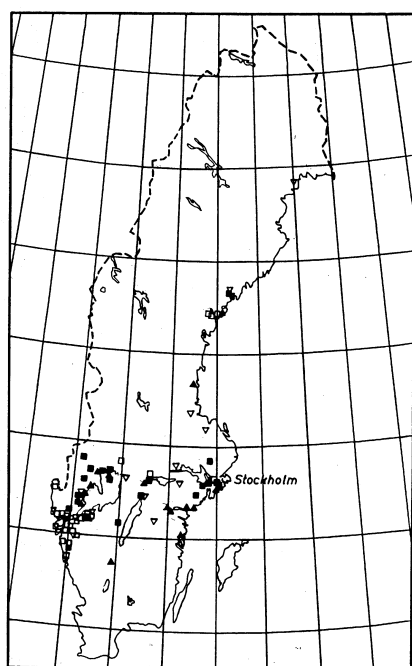
2 KVICKLERA

Kvicklera förekommer företrädesvis i Sverige, Norge, Finland och Kanada. Sammanställningar av kvicklereförekomster i Sverige gjorda av Wenner (i Talme et al, 1966), Söderblom (1974) och av Jerbo & Hall (1961) visas i *Figur 1a-c*.

En lera benämns som kvick om dess sensitiviteten är större eller lika med 50 och om dessutom dess omrörda odränerade skjuvhållfasthet är mindre än 0,4 kPa (20 mm intryck med kon 60g och 60°). Sensitiviteten anger förhållandet mellan den odränerade skjuvhållfastheten i ostört respektive omrört tillstånd. Klassificering av lerors sensitivitet kan göras enligt *Tabell 1*.

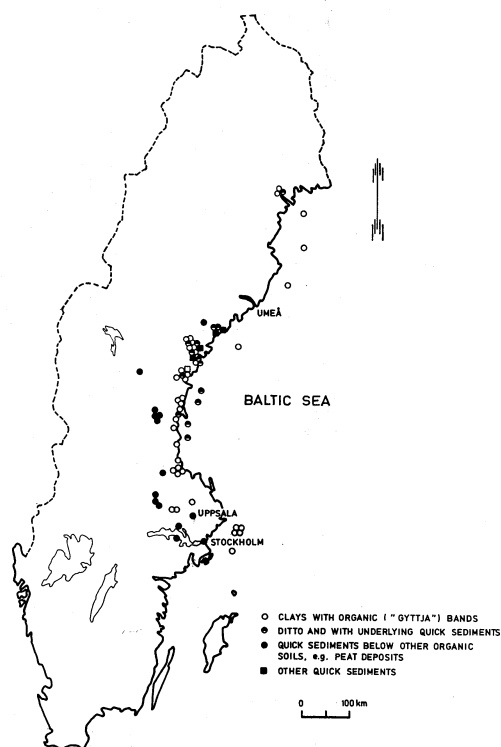
Tabell 1. Klassificering av leror med hänsyn till sensitivitet.

Benämning	Sensitivitet
Lågsensitiv	<8
Mellansensitiv	8-30
Högsensitiv	>30

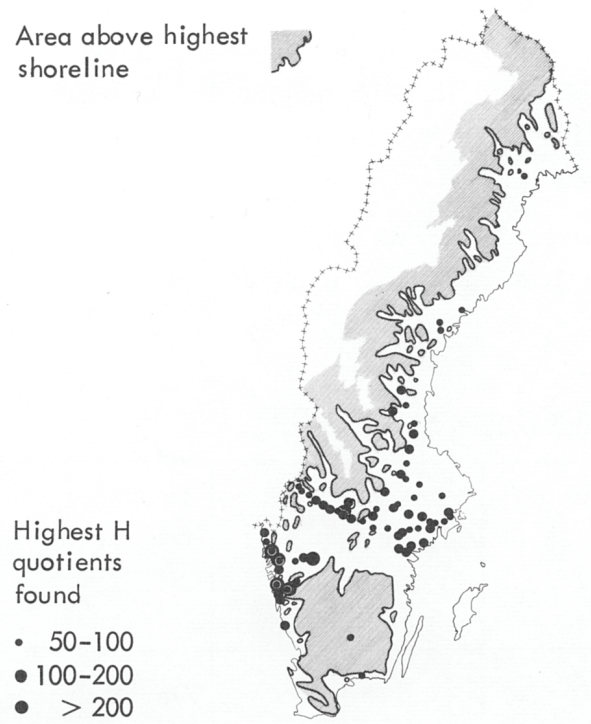


Map showing the occurrence of different types of quick clays in Sweden
 ▽ non-varved quick clays in connection with peat or other organic materials
 ▲ varved quick clays in connection with peat or other organic materials
 □ other non-varved quick clays
 ■ other varved quick clays

Figur 1a. Förekomst av kvicklera i Sverige (efter Söderblom, 1974).



Figur 1b. Förekomst av kvicklera i östra Sverige (efter Jerbo & Hall, 1961).



Figur 1c. Förekomst av kvicklera längs olika sträckningar av Sveriges järnvägsnät (efter Wenner (i Talme et al, 1966)).

3 LERAS BESTÅNDSDELAR

För att förstå under vilka omständigheter en lera kan omvandlas till en kvicklera krävs en god kännedom om lerans olika beståndsdelar. Leror har fasta, flytande och/eller gasformiga beståndsdelar. De fasta partiklarna bildar ett bärande kornskelett och mellan kornen finns hålrum som antingen kan vara fyllda med gas eller vätska eller en blandning av bådadera.

3.1 Lermineral

Med mineral menas de såsom en del av jordskorpan uppträdande fasta, kemiskt och fysikaliskt homogena kroppar som antingen består av ett grundämne, en legering eller, vilket är det vanligaste, en kemisk förening (Loberg, 1980). Över 90% av den kontinentala jordskorpan mineralogiska sammansättning utgörs av mineral tillhörande silikatgruppen (kisel och syre-föreningar). De vanligast förekommande lermineralen är kaolinit, illit (hydratiserad glimmer), smektit (montmorillonit, saponit med flera) och klorit, se *Tabell 2*. I Sverige dominerar illit. Lermineral är ett så kallat sekundärt mineral och har vanligtvis bildats genom kemisk vittring av andra silikatmineral (exempelvis glimmer, amfiboliter och fältspat). Med kemisk vittring menas sådan vittring som sker då vatten, ensamt eller tillsammans med ämnen från luft- och/eller marklagren, bryter ner ett mineral eller bergart, ofta under inverkan av förhöjd temperatur. Vid kemisk vittring av kalifältspat, $K[AlSi_3O_8]$, kan exempelvis lermineralet kaolinit bildas. En förenklad formel för vittringsförloppet kan skrivas;



Arten och mängden lermineral i ett vittringssediment beror främst på klimat men även av ursprungsmaterialet, dräneringsförhållanden och vegetationsförhållanden (Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981)).

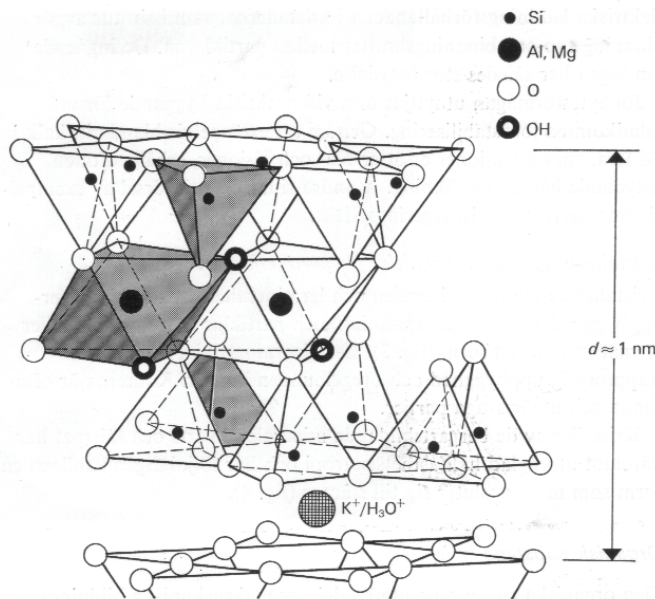
Tabell 2. Sammanställning av data för olika lermineral. (efter Mitchell, 1976)

**meq=milliekvivalenter, dvs den mängd av ämnet som i den kemiska processen motsvarar en mol av det andra ämnet*

<i>Lermineral</i>	<i>Kemisk beteckning</i>	<i>Bindningar mellan skikt</i>	<i>Jonbyte</i>	<i>Utbytesförmåga av katjoner (meq/100g)*</i>
Kaolinit	$Al_4 Si_4 O_{10} (OH)_8$	O-OH, stark	Litet	3-15
Illit	$(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Mg, Fe)_{4,6} O_{20} (OH)_4$	K-joner, starkt	Några Si alltid utbyta mot Al. K ger balans mellan lagren	10-40
Montmorillonit (smektit gruppen)	$Si_8 (Al_{3,34} Mg_{0,66}) O_{20} (OH)_4$	O-O, väldigt svag, expanderbar	Mg utbytt mot Al	80-150
Klorit	$(SiAl)_8 (Mg, Fe)_6 O_{20} (OH)_4$ (2:1 lager)	$(MgAl)_6 (OH)_{12}$	Al mot Si i 2:1 lager Al mot Mg i mellanlager	10-40

Gemensamt för lermineralen gäller att de är uppbyggda av skikt bestående av plana nätverk av aluminiumhydroxid eller magnesiumhydroxid (Al/Mg(O/OH)-oktaedrar) och kiseloxid (SiO_4 -tetraedrar), se *Figur 2*. Tetraedisk koordination betyder att en katjon

omges av fyra syrejoner medan oktaedisk koordinatation betyder att en central katjon omges av sex syrejoner (Appelo och Postma, 1994). Tetraedisk koordinatation har mindre katjoner som Si eller Al och oktaediska har större som Mg, Fe, Mn, C, Na eller K. Stabiliteten hos strukturen beror på hur väl katjonen passar in mellan syrejonerna (Troedsson & Nykvist, 1980). Syrets jonradie är 1,32 nm (10^{-9} m) och en katjon med jonradien 0,30 nm skulle vare den teoretiskt mest lämpliga i en tetraedisk koordinatation. Kisel har en jonradie på 0,39 nm och är det grundämne som bäst passar in mellan syrejonerna och ger den mest stabila strukturen (Troedsson & Nykvist, 1980). Magnesiumjoner (Mg^{2+}) har en jonradie på 0,78 nm, aluminium (Al^{3+}) på 0,57 nm och Fe^{3+} har en jonradie på 0,67 nm, för att nämna några exempel.



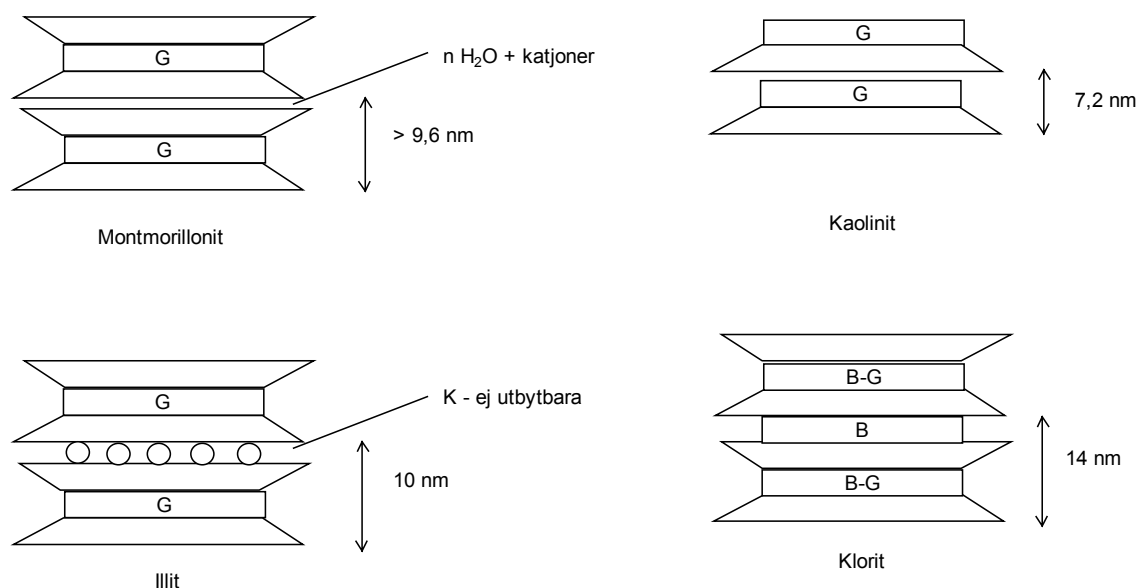
Figur 2. Kristallgitter hos lermineralet illit (efter Hansbo, 1975).

Följande är ett referat från material i "Geochemistry" av Appelo och Postma (1994) samt "Fundamentals of soil behavior" av Mitchell (1976).

Hur dessa plana nätverk är uppbyggda på varandra avgör vilket lermineral som bildats. I kaolinit byggs lager av oktaedrar (o) och tetraedra (|) upp enligt schemat o | o | o |. Uppbyggnad av tetraediskt lager med tjockleken 3 nm och ett oktaediskt lager med tjockleken 4 nm ger en upprepning med 7 nm:s intervall. I smektit byggs lagren upp enligt schemat | o | | o | | o | med en minsta lagertjocklek av 9,6 nm. I en annan grupp av lermineral, dit till exempel klorit hör, omges varje oktaeder av två tetraedrar och mellan dessa treskikt-lager finns en oktaeder enligt schemat | o | o | o | o | o | o |. Bindningen | o | betecknas även 2:1.

I illit och muskovit består ett minerallager av ett nätverk av aluminium- eller magnesiumhydroxid omgivet av två nätverk av kiseloxid. Ett minerallager av illit binds samman med ett annat minerallager med hjälp av positiva kaliumjoner eller positiva hydroniumjoner enligt schemat | o | K^+ | o | K^+ | o |. Bindningen mellan de olika minerallagren i illit är mycket stark och vanligtvis är motjonerna inte utbytbara. I montmorillonit däremot är jonerna utbytbara och distansen kan därmed öka mellan lagren och ge en svällande effekt (kallat expanderbara lermineral).

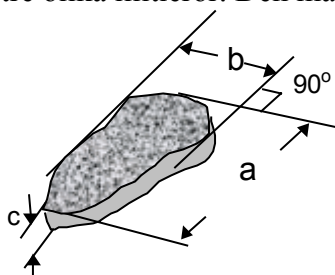
I *Figur 3* visas den strukturella uppbyggnaden för montmorillonit, kaolinit, illit och klorit,



Figur 3. Schematiskt diagram över strukturen för montmorillonit, kaolinit, illit och klorit, (efter Mitchell, 1976).

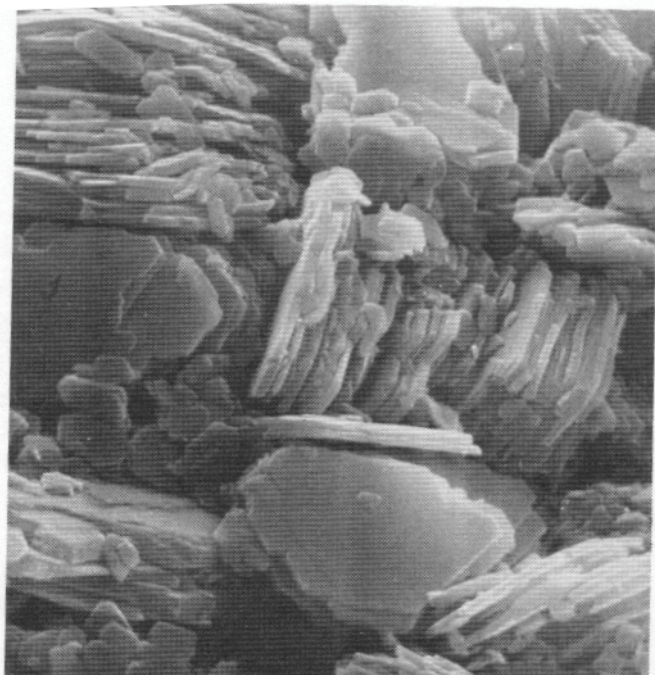
3.2 Lerpartikeln

En leras fasta beståndsdelar byggs upp av små kristallina partiklar. Kornstorleken *ler* är partiklar med kornstorlek mindre eller lika med 0,002 mm. En lera består till minst 40 viktsprocent av total finjordshalt av partiklar tillhörande kornstorleken ler men partiklar av bergartsbildande mineral tillhörande siltfraktionen och sandfraktionen ingår också normalt. Till de bergartsbildande mineralen hör kvarts, fältspat, karbonater och glimrar (exempelvis muskovit och biotit). En *lermineralpartikel* är uppbyggd av enbart lermine-
 ral och dess kornstorlek är vanligen inte större än 0,002 mm (2000 nm) men kaolinit- och illitpartiklar kan vara upp till ca 10 000 nm stora (se Mitchell, 1976). Pusch (1970) studerade bland annat den maximala diametern, *a*, (se *Figur 4*) för partiklar som var under 0,002 mm. Studierna gjordes med hjälp av transmissionselektronmikroskop för tre olika illitleror. Den maximala diametern varierade mellan 4 och 2000 nm.



Figur 4. Schematisk lerpartikel (efter Pusch, 1970).

De vanligaste lermine-
 ralpartiklarna har flat form, se *Figur 5*. Mitchell (1976) skriver att en partikel av mineralet illit är något tunnare vid kanterna än vid mitten och har en terrasserad yta.



Figur 5. Väckristalliserad kaolinit från Cornwall, England, fotograferad genom svepelektronmikroskop (efter Tovey, 1971).

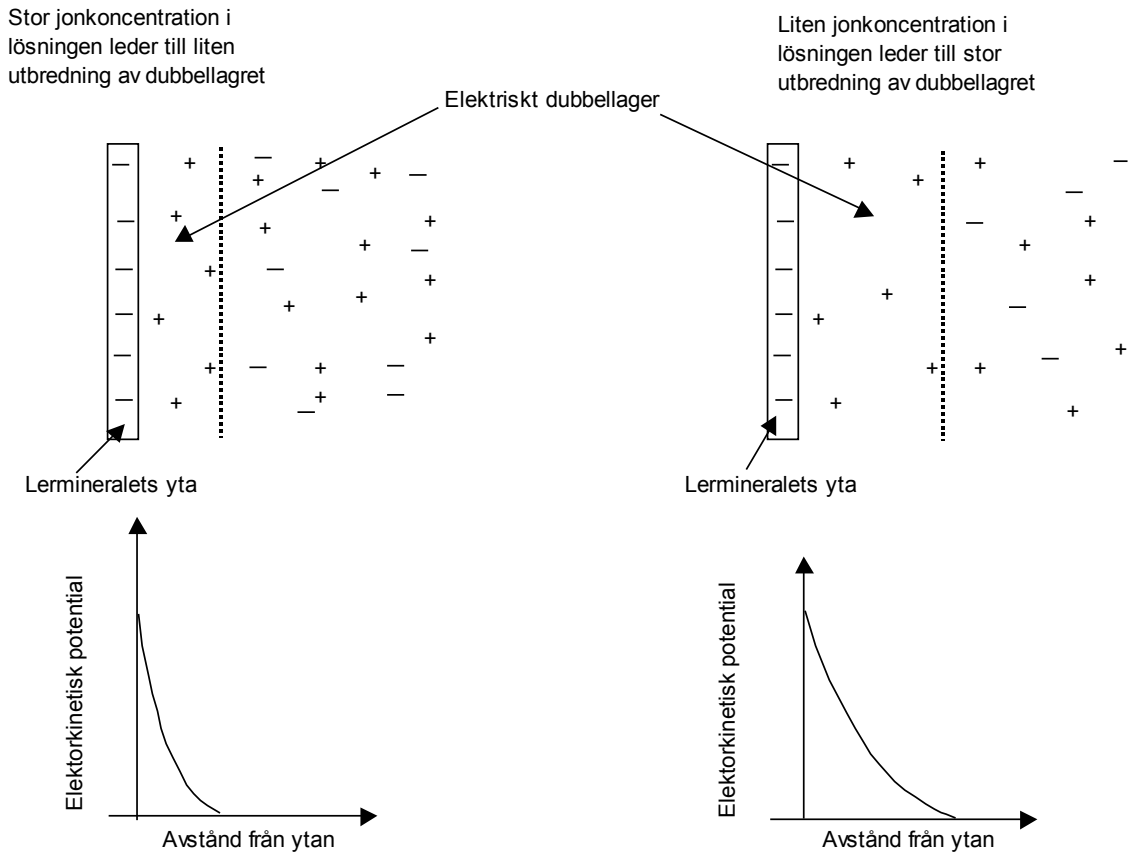
3.3 Systemet lerpartiklar/vatten

I ett system där både vatten och lerpartiklar ingår pågår en ständig reaktion dem emellan. Lermineral har en hög jonbyteskapacitet som gör att joner från till exempel omgivande vatten kan ersätta joner som är löst bundna till lerpartikeln.

Enligt Mitchell (1976) är de vanligast förekommande katjonerna i leras porvatten kalcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), natrium (Na^+) och kalium (K^+). De vanligaste anjonerna i jord är sulfat (SO_4^{2-}), klorid (Cl^-), fosfat (PO_4^{3-}) och nitrat (NO_3^-). I sötvatten är kalcium den katjon som dominerar medan koncentrationen av magnesium är hög i saltvatten (Talme, 1968). Möjligheten för en jon att bli utbytt av en annan beror huvudsakligen på jonernas valenstal, tillgång på olika typer av joner, jonernas bindningsstyrka och jonernas storlek i hydratiserat tillstånd (i porvatten). Vanligtvis ersätter mindre katjoner större katjoner men det kan även finnas möjlighet för det omvända. Så kan till exempel Ca^{2+} bytas mot Na^+ , Na^+ mot Ca^{2+} , Fe^{3+} mot Mg^{2+} och så vidare. Följande serie anger den relativa bindningsstyrkan av de i marken vanligast förekommande jonerna i fallande ordning: Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Na^+ (Troedsson & Nykvist, 1980). Løken (1970) fann samma samband vid kemiska analyser av leror.

I mineralgittret hos alla lermineral, förutom kaolinit, är alltid ett visst antal positiva joner utbytta mot positiva joner med lägre valenstal. Detta ger en negativt laddad yta på mineralets långsidor. I illit, till exempel, är alltid ett visst antal Si^{4+} utbytta mot Al^{3+} . För att uppnå neutral laddning attraherar och binder ytan positiva joner som exempelvis K^+ , Na^+ och Ca^{2+} . I en lera med låg vattenkvot och vattenmättnadsgrad är dessa katjoner starkt bundna. De katjoner som inte behövs för att neutralisera den negativa laddningen fälls istället ut som salt på lerpartikelens yta (Mitchell, 1976). Vid hög vattenmättnadsgrad kan de positiva jonerna gå i lösning samtidigt som de hålls tillbaka av den negativt laddade partikelytan. Dessa kompenserande joner i vätskan som omger de laddade par-

tiklarna kallas motjoner. Motjonerna bildar inte något väl definierat lager kring den laddade partikeln utan ett mer utspritt lager där tätheten minskar med avståndet från ytan. Detta lager av laddade partiklar kallas det *diffusa elektriska dubbellagret*, se *Figur 6*. Vid hög jonkoncentration i lösningen blir dubbellagrets utbredning liten medan det vid liten jonkoncentration krävs ett mycket större dubbellager för att uppnå laddningsneutralitet. Dubbellagrets utbredning är ett mått på systemets elektrokinetiska potential, se *Figur 6*. Katjonerna är termiskt rörliga och ett utbyte av joner försiggår mellan detta och porvattnet. Per tidsenhet rör sig lika många katjoner ut ur som in i det diffusa dubbellagret (Troedson och Nykvist, 1980).



Figur 6. Det elektriska dubbellagrets utbredning beroende på jonkoncentrationen i lösningen.

Lerpartiklarna i en suspension påverkar varandra med både repellerande och attraherande krafter. De repellerande krafterna uppkommer då lerpartiklarnas yta har samma laddning. Hur stark repulsionen blir mellan partiklarna avgörs av storleken på lerpartiklarnas diffusa elektriska dubbellager. Vid hög jonkoncentration i vätskan blir dubbellagret utsträckning liten och lerpartiklarna kan komma närmare varandra. De attraherande krafterna utgörs dels av van der Waals bindningskrafter (krafter som ger upphov till fluktuerande dipol bindningar) och dels av vätebindningar och Coulombsk attraktion genom att partiklarnas kanter kan vara positivt laddade och basplanen negativt laddade. De repulsiva krafterna är större än de attraherande då lerpartiklar befinner sig i en saltfri lösning. Tillsätts däremot salt överväger inte längre de repulsiva krafterna och partiklarna flockulerar. Flockuleringen är ett bevis för att det existerar attraherande krafter mellan partiklarna (van Olphen, 1977). Flera teorier har föreslagits för att förklara fördel-

ningen av joner runt laddade ytor i kolloider. Någon beskrivning av de olika teorierna ges inte här utan intresserade läsare hänvisas till exempelvis Mitchell (1976).

Följande är ett referat av en utförligare beskrivning av Mitchell (1976) och (Appelo och Postma, 1994).

Lermineralens kanter har en kristalluppbyggnad som skiljer sig från basplanens och därmed är även de diffusa elektriska dubbellagren olika. Laddningen på kanterna beror av lösningens pH-värde. Det pH värde där dispergerade partiklar har sin lägsta rörlighet i ett elektriskt fält benämns punkten med noll nettoladdning (point of zero net proton charge, pH_{PZNPC}). Lermineralen har en förmåga att byta anjoner när pH i vattnet är under pH_{PZNPC} och kan byta katjoner när pH är över detta värde. Positiva ytladdningar förekommer därför vid sura förhållanden och negativa ytladdningar vid basiska förhållanden.

Appelo och Postma (1994) anger värden på $\text{pH}_{\text{PZNPC}} = 4,6$ för kaolinit och för montmorillonit ett pH_{PZNPC} lägre än 2,6. Alltså är pH-värdet mycket lågt då lermineralen har en förmåga att byta anjoner. Inverkan av lösningens pH beskrivs vidare i Kapitel 4.2.

Partiklar som befinner sig i en suspension med en stor förekomst av positiva joner kommer att förenas, det vill säga flockuleras och aggregeras, vilket kan leda till en mängd olika typer av partikelarrangemang. Flockuleringen leder till sedimentering och att det avsatta materialet får en öppen struktur. Enligt van Olphen (1977) kan flockuleringen ske på följande sätt (se *Figur 7*);

1. *Plan mot plan*

Det ger stora, tjocka flak

2. *Kant mot plan*

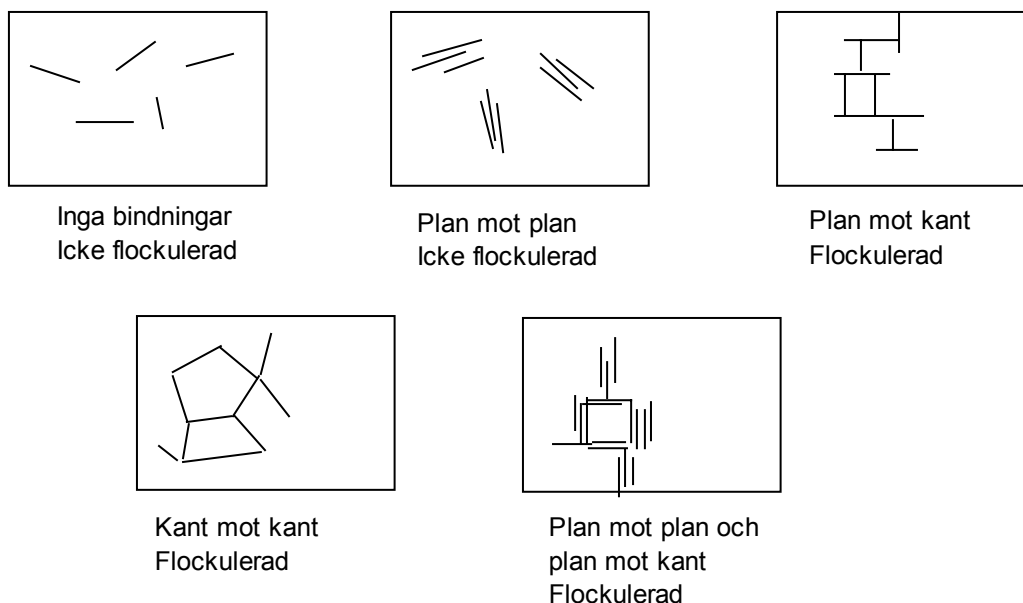
Det ger tredimensionell korthusstruktur

3. *Kant mot kant*

Det ger tredimensionell korthusstruktur

En kombination av de ovan nämnda bindningssätten kan också förekomma, enligt van Olphen (1977). Exempelvis kan plan mot plan och kant mot plan förekomma samtidigt, se *Figur 7*.

Förslag på andra typer av partikelföreningar finns också, se exempelvis Rosenqvist (1955) och Tan (1957). En viktig faktor som påverkar partikelbindningen är variationen i partikelstorlek. De minsta partiklarna är mest rörliga och ytaktiva och kopplas i första hand samman (Pusch, 1962). Om antalet positiva joner i porvattnet är litet kommer endast ett fåtal partiklar att förenas medan flera partiklar kommer att förenas om jonkoncentrationen är hög. Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981) anger att flockuleringen även påverkas av typ av lermineral, organiskt innehåll, partikelkollisioner och temperatur. Antal partikelkollisioner påverkas i sin tur av mediets turbulens, temperatur och koncentration av partiklar. När det gäller typ av lermineral har Whitehouse et al. (1969) experimentellt visat att kaolinit och illit kan flockulera vid lägre klorid halt än montmorillonit.

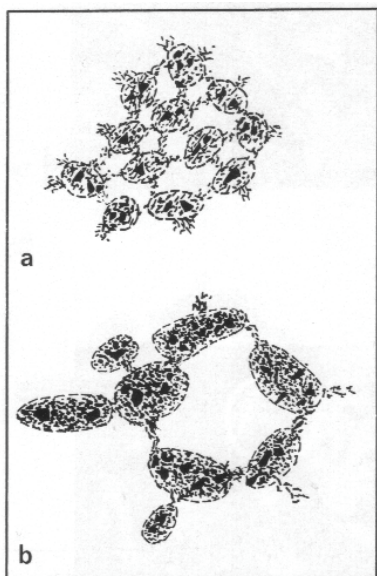


Figur 7. Olika typer av partikelbindningar i lersuspensioner (efter van Olphen, 1977).

Efter istiden avsattes lerpartiklarna där vattenhastigheten var låg; det vill säga först på avstånd från iskanten och sedan främst i havs- och sjövikar som postglaciala sediment. Beroende på bland annat antalet partiklar och salthalten i vattnet bildades sediment med olika strukturell uppbyggnad. Dessa sediment påverkades sedan under ytterligare avsättning och efter avsättning. Gemensamt för leror i Sverige som avsattes på detta viset är att de är uppbyggda av aggregat förenade genom länkar bestående av mindre partiklar. Pusch (1970) visade att aggregaten i saltvattenavsatt lera är större och tätare än de aggregat som avsatts i sötvatten, se *Figur 8*. Detta kan förklaras med att det elektriska dubbellaget är mindre i en suspension med hög koncentration av katjoner än i en med låg och därför kan partiklarna komma närmare varandra och bilda stora aggregat. När dessa stora aggregat sedimenterar kommer de att arrangeras utan någon speciell riktning och en struktur med högt porositet erhålls. Mindre partiklar bildar länksystem som håller ihop aggregaten. I en suspension med låg katjonhalt kommer varje aggregat endast att bestå av några få partiklar och dessa kan därför sedimentera i en mycket tätare och mer likriktad struktur.

För att den öppna strukturen skall bibehållas under den successiva belastningsökning som de efterföljande överlagrande sedimenten ger upphov till anser Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981) att det bör råda en låg avsättningshastighet..

Pusch (1970) undersökte några olika lerors strukturella uppbyggnad. Han fastställde lerornas strukturella parameter, som definierade som kvoten mellan total porarea, P , och total undersökt area, T , hos elektronoptiska bilder av ultratunna, det vill säga "2-dimensionella" snitt. Han fann att "de högsta sensitivitetsvärdena erhöles för de lerprover som hade de högsta P/T -värdena vilket antyder att en mycket hög porositet är en nödvändig förutsättning för att en lera skall vara kvick" (Pusch, 1970).



Figur 8. Schematisk bild av partikelaggregat i sötvattenavsatt lera (a) och i saltvattenavsatt lera (b), (efter Pusch, 1970).

4 BILDNING AV KVICKLERA

4.1 Inledning

Forskning kring bildning och förekomst av kvicklera har utförts sedan 1940-talet främst i Sverige, Norge och i Kanada. Rosenqvist (1946) redogjorde redan 1946 för teorin att salthalten i saltvattenavsatt lera hade urlakats och därigenom gett leran dess kvicka egenskaper.

Följande är ett referat av Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981).

Kvicklera förekommer i områden som var nedisade under den pleistoceniska epoken (1,65 miljoner till 10 000 år sedan). De har huvudsakligen påträffats i Ryssland, Norge, Finland, Sverige, Kanada och Alaska. Dessa områden karaktäriseras av isotatisk landhöjning efter isens tillbakadragande. Uppkomsten av mycket hög sensitivitet är vanligen orsakad av processer som skett efter lerlagrens avsättningen. Alla sediment med kvicka egenskaper är geologiskt unga och de flesta är avsatta i saltvatten men i vissa fall även i bräckt eller sött vatten.

4.2 Faktorer som påverkar sensitiviteten

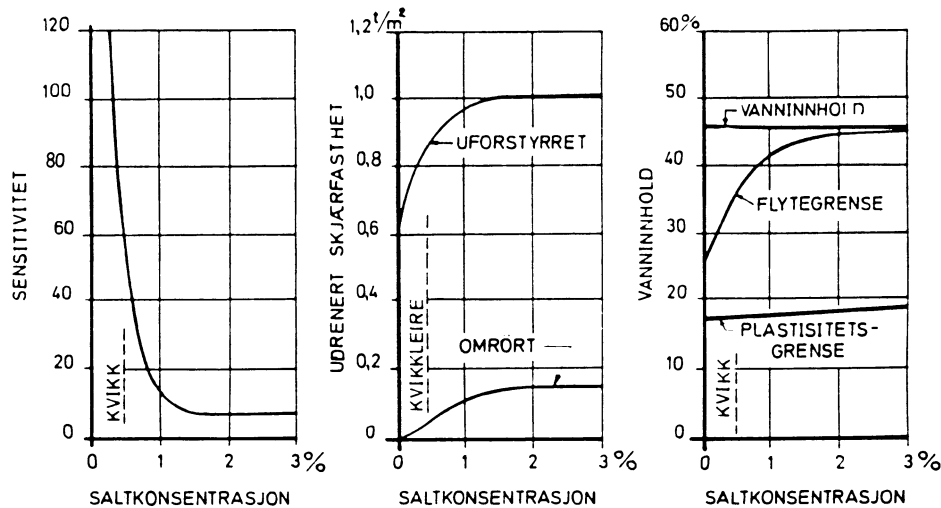
Urlakning av salt

Leror avsatta i saltvatten innehåller en viss mängd salt. Med salt avses i allmänt språkbruk natriumklorid (NaCl) medan man med salt inom kemin avser kemiska föreningar som består av katjoner och anjoner, exempelvis kaliumvätefosfat (KH_2PO_4). I lösning förekommer dessa som fria joner, exempelvis Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , CO_3^{2-} , K^+ , men bildar salt vid indunstning. Man får dock vara observant då man studerar litteratur på vad som egentligen avses med benämningen salt. I jord måste man skilja mellan porvattnets kemiska sammansättning så som den bestäms genom analys av utpressat vatten och

mängden och arten av adsorberade joner så som de bestäms i samband med jonbytesanalys.

Den ursprungliga salthalten i porvattnet hos en avlagring kan minska på grund av urlakning. Urlakningen är en process som avlägsnar ämnen, exempelvis saltjoner i lösning från en del av jordprofilen. Salturlakning är en normal process i alla tempererade regioner med marina leror som genom landhöjningen har höjts över havsytan (Torrance, 1978). I princip finns tre olika typer av urlakningsprocesser; regnvatten som perkolerar genom avlagringen, uppåtriktad hydraulisk gradient och diffusion av salt mot zoner med lägre koncentration. En kombination av dessa typer förekommer också.

Urlakningen påverkar krafterna mellan partiklarna men inte den flockulerade strukturen som sådan (Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981)). Däremot påverkar urlakningen partiklarnas förmåga att omflockuleras efter omrörning. En saltvattenavsatt lera är, som beskrivits i Kapitel 3.3, uppbyggd av stora och täta aggregat förenade genom länksystem. Om saltet i denna lera urlakas och leran därefter rörs om kommer partiklarna inte att kunna förenas till stora aggregat igen. Lerans vattenhållande förmåga, vilket avspeglas i dess flytgräns, minskar därmed. Då portalet och därmed vatteninnehållet var högt vid lerans ursprungliga avsättning kommer istället en lervälling med många små och åtskilda partiklar i en lös vattmig suspension att bildas. Detta ger en reduktion av den omrörda skjuvhållfastheten och leran får därmed en hög sensitivitet. Förändring av vattenkvoter vid urlakning studerades av Rosenqvist (1955) och av Bjerrum (1954b), se *Figur 9*.

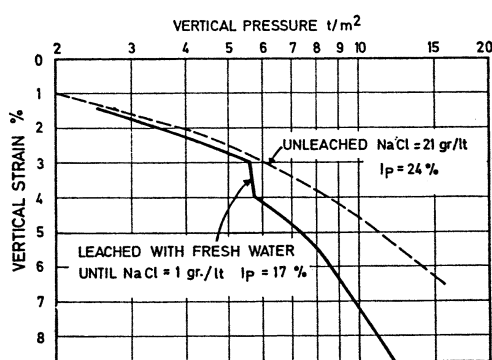


Figur 9. Förändring i vattenkvot och odränerad skjuvhållfasthet vid förändring av porvattnets saltkoncentration (efter Bjerrum, 1954b).

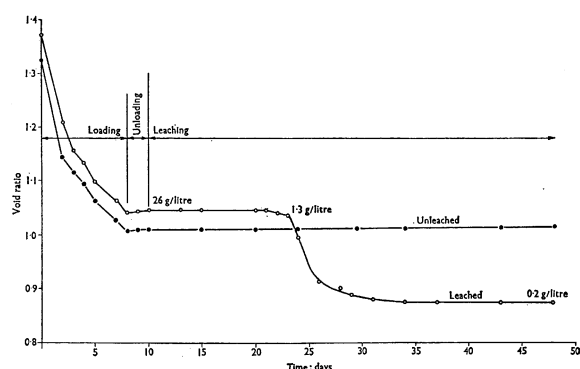
Urlakningens hastighet beror främst på den hydrauliska gradienten och på den hydrauliska konduktiviteten (Torrance, 1978). Förekomst av permeabla skikt, exempelvis silt- och sandskikt, som står i förbindelse med ytvatten eller andra vattenförande skikt, ökar möjligheten till urlakning. Genom att studera vilken typ av vegetation som förekommer inom ett område kan det vara möjligt att lokalisera så kallade utströmningsområden (områden som har en uppåtriktad gradient).

Tidigare ansåg man att låg salthalt, som ett resultat av urlakning, var den dominerande faktorn för bildning av kvicklera. Den ursprungliga kvickleremodellen, framtagen av Rosenqvist (1946), som baserades på försök på norska saltvattenavsatta leror, visade ett samband mellan hög sensitivitet och låg salthalt. Senare forskning av bland andra Talme (1968), Söderblom (1969) och Penner (1965) har visat att låg salthalt är en förutsättning för hög sensitivitet men att det inte alltid är en tillräcklig faktor. Det finns således saltvattenavsatta leror med låg salthalt som inte är kvicka. Förklaringen till detta ges i avsnittet "Jonsammansställningen i porvattnet".

Urlakningen kan även orsaka en reduktion av den *ostörda* skjuvhållfastheten. Undersökningar gjorda av Bjerrum & Rosenqvist (1956) visade att både den ostörda och omrörda skjuvhållfastheten kan minska efter urlakning, se *Figur 9*. Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981) skriver att urlakning inte enbart orsakar en reduktion av skjuvhållfasthet utan att den också ökar kompressibiliteten, det vill säga kompressionsmodulen minskar (om vatten har möjlighet att avgå). Bjerrum (1967) simulerade den geologiska historien för en urlakad lera i laboratoriet. En saltvattenavsatt lera belastades till 55 kPa därefter lakades den ur med sötvatten och belastades ytterligare. Spännings-töjnings kurvan för lerprovet visas i *Figur 10*. Försöket visar att under urlakning erhöles en direkt kompression och vid ytterligare belastning därefter ett spännings-töjningssamband med lägre kompressionsmodul jämfört med den icke urlakade lerans. Anledningen till ökningen i kompressibilitet är den stora reduktionen i vattenhållande förmåga (flytgräns) som uppstår vid urlakning och den därmed åtföljande kraftiga minskningen i naturlig vattenkvot om leran har en belastning nära förkonsolideringsspänningen och belastas ytterligare. Torrance (1974) utförde urlakningsförsök på en saltvattenavsatt lera i ödometer. En kompression erhöles då salthalten understeg 1,3 g/l, se *Figur 11*.



Figur 10. Resultat från urlakningstest i laboratoriet på ett lerprov från Drammen, Norge (efter Bjerrum, 1967).



Figur 11. Urlakningsförsök på saltvattenavsatt lera i ödometer (efter Torrance, 1974).

Göta Älvutredningen (Statens offentliga utredningar, 1962) skriver att några allmänna regler för urlakningens förlopp kan ställas upp enligt följande:

- Lerans läge i förhållande till recipienten bestämmer urlakningens djup
- Urlakningens hastighet är större ju grovkornigare sediment som finns. Förekomst av sandskikt och moränavlagringar gynnar urlakningen
- Urlakningen är oftast fullständig vid dalsidorna och vid små lerdjup
- Urlakningen sker genom diffusion i kombination med grundvattenströmning

- Ovanifrån urlakas leror av kolsyrehaltigt regnvatten varvid Cl^- utbyts mot bland annat bikarbonatjoner (HCO_3^-). (Regnvattnets koldioxid reagerar med vatten och bildar kolsyra H_2CO_3 som upplöses i HCO_3^- och vätejoner)

Göta Älvutredningen menar att en kombination av diffusion och grundvattenströmning föreligger för att urlakning skall inträffa. Talme (1968) visade på sambandet mellan permeabla skikt och kvicklera men anger inte att det dessutom måste föreligga en kombination med diffusion.

Värden på diffusionskonstanten, D , finns framtagna exempelvis för joner i vatten. Atkins (1982) anger att diffusionskonstanten för Na^+ är $1.33 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ och för Cl^- är $2.03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ i en fri vattenfas. Vid spridning genom diffusion i två riktningar kan sträckan som jonen förflyttats sig under en viss tid bestämmas enligt:

$$\bar{x} = \sqrt{2 \cdot D \cdot t}$$

där $D =$ diffusionskonstant $[m^2/s]$
 $t =$ tiden $[s]$

Spridning genom diffusion av Na^+ i en fri vattenfas under 5000 år ger då en sträcka av ca 20 m. Söderblom (1969) studerade diffusion av salter i naturliga leravlagringar. En diffusionskonstant, D , på mellan 0,11 och 0,14 cm^2/dag ($1,27 \cdot 10^{-10}$ och $1,62 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) uppmättes i Surte längs Göta Älv. För en period av 5000 år innebär det en diffusion längs en sträcka av mellan 6 och 7 meter.

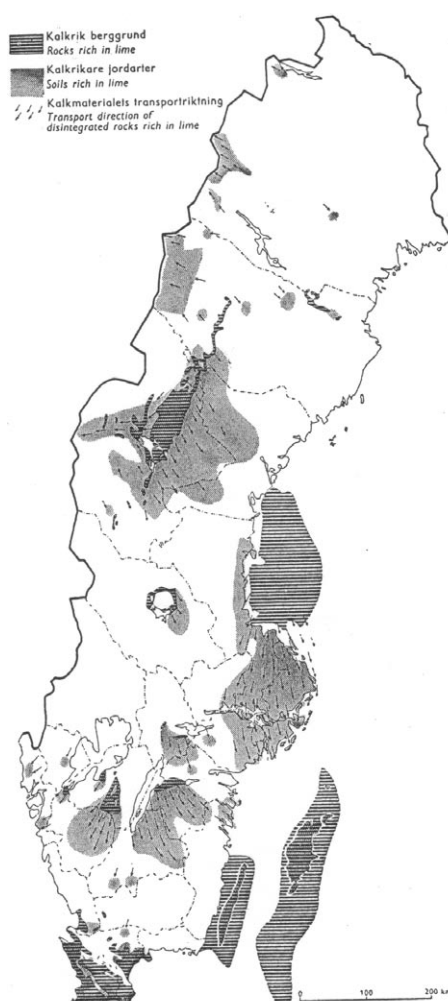
Göta Älvutredningen anger att för Göta Älv gäller att leravlagringarna norr om Lilla Edet har urlakats mer eller mindre fullständigt. Söder om Lödöse har flera borrhningar visat på leror med ursprunglig salthalt (samma som för havsvattnet). I Lödöse låg Sveriges hamn mot västerhavet för cirka 500 år sedan och mycket stora delar av marken söder därom har endast legat över havsytan mindre än 1000 år.

Jonsammansättningen hos porvattnet

Det har visat sig att jonsammansättningen i porvattnet har stor betydelse för bildning av kvicklera. Andel Na^+ , K^+ i leran påverkar i princip sensitiviteten så att ju större antal Na^+ och K^+ av totala antalet joner (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) i porvattnet desto större förutsättningar för en hög sensitivitet. En stor andel envärda katjoner i porvattnet leder till ett stort diffust dubbellager. För att uppnå jämvikt krävs att dubbellagret får en större utbredning då porvattnet består av envärda joner jämfört med om porvatten består av tvåvärda joner (förutsatt att det är lika många envärda som tvåvärda i de olika lösningarna). Ett stort diffust dubbellager leder till större repulsiva krafter mellan partiklarna och minskning av lerans hållfasthet. Efter omrörning förhindrar dessa krafter en omflockulering av lerpartiklarna, vilket också ökar sensitiviteten.

Fällman et al. (2001) studerade flockulering av kolloider i suspension vid olika jonstyrka. De konstaterade att en minskning av jonstyrkan försämrade flockuleringen betydligt. Dessutom gav porvatten med Ca^{2+} respektive Mg^{2+} en bättre flockulering än porvatten med envärda katjonerna.

I Sverige finns två huvudsakliga typer av grundvatten; så kallade håra och mjuka vatten. Hårt vatten har Ca^{2+} och Mg^{2+} som dominerande katjoner. Om en lera urlakas med hårt vatten kommer ett porvattensystem som innehåller mest tvåvärda joner att bildas och då blir leran normalt inte kvick, oberoende av saltsammansättningen i leran före urlakningen. (se exempelvis Söderblom, 1974). Mjukt vatten däremot innehåller Na^+ som dominerande katjoner och ger vid urlakning ett porvattensystem där envärda joner dominerar över tvåvärda, vilket är en god förutsättning för kvicklerebildning. Hårt vatten förekommer där omgivande berggrund består av kalksten. Lundqvist (1958) har sammanställt en karta som visar förekomst av kambrosilur-material i avlagringar och i berggrunden, se *Figur 12*. Söderblom (1969) anger att det inte är nödvändigt att Ca^{2+} och Mg^{2+} avlägsnas från leran för att deras inverkan skall upphöra. De kan istället bindas i komplex med företrädevis organiskt material. De finns då inte kvar som fria katjoner i porvattnet eller i det elektriska dubbellagren.



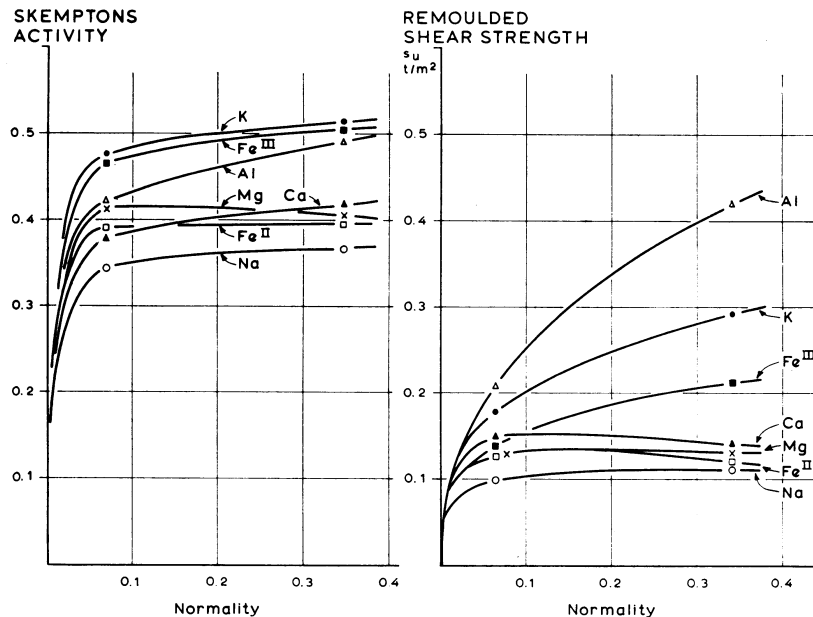
Figur 12. Spridning av kambrosilur-material från berggrunden (efter Lundqvist, 1958).

Talme (1968) skriver att kvicklera oftast förekommer i postglacial lera och att den återfinns omedelbart ovan en glacial lera och att det ofta finns ett permeabelt lager över, under eller i kvicklerelagret. En glacial lera har oftast större andel kalciumkarbonat än en postglacial lera, vilket enligt Talme (1968) kan vara en förklaring till att det glaciala leran mer sällan är kvick. Den ursprungliga halten av kalciumkarbonat i glacialleran avgörs av andelen kalksten i omgivande berg och var leran avsatts i området.

Jonsammansättningen i porvattnet kan förändras även genom vittring av mineraler. Vid vittring kan positiva joner som varit bundna till lerpartiklarna frigöras och öka koncentrationen av positiva joner i porvattnet (se Kapitel 6.1). Troedsson & Nykvist (1980) beskriver hur den jämvikt som uppstår mellan olika skikt förändras till exempel på grund av rötters andning då vätejoner frigörs. När till exempel Al^{3+} ersätter Si^{4+} i lermineralet illit blir mineralet mer lättvittrat eftersom den nya jonen sämre passar in i gittret. Vätejoner kan vandra in i mineralet och tränga ut andra joner. Om dessa leds bort med grundvattnet och nya vätejoner tillförs leder processen till vittring.

Om salt tillsätts en kvick lera ökar dess omrörda skjuvhållfasthet. Det visade bland andra Talme et al. (1966) i försök med lera från Ugglum utanför Göteborg. Till ett 100 g lerprov tillsattes 0,5 meq av 6 olika salter (NaCl , KCl , CaCl_2 , MgSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,

FeCl₃). Alla salter gav efter tillsättandet ett ökat värde på den omrörda skjuvhållfastheten men störst effekt gav de två- och trevärda jonerna. Moum et al. (1971) utförde också försök med att öka den omrörda skjuvhållfastheten för kvicklera genom att tillsätta olika saltjoner (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, Fe²⁺, Fe³⁺). Andelen joner tillsatta till lösningen normaliserade vid redovisningen genom att uttrycka den som jonernas molaritet (mol/liter) delat med jonernas valenstal. Resultaten redovisas i *Figur 13*. Försöken visade att Al³⁺ och K⁺ ökade den omrörda skjuvhållfastheten mest effektivt för ett och samma värde på molaritet/valenstal.

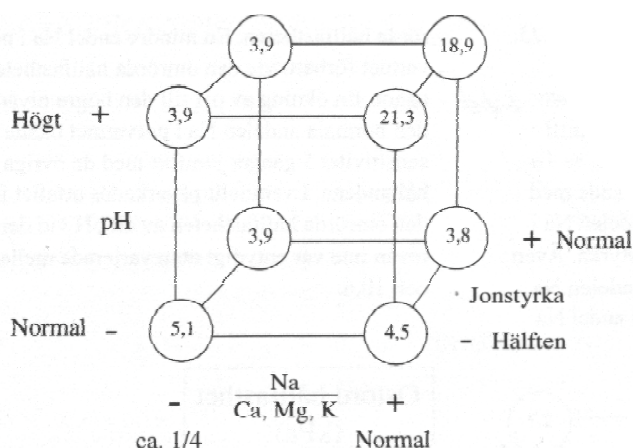


Figur 13. Olika joners förmåga att öka den odränerade skjuvhållfastheten för en kvicklera från Myrer, Oslo (efter Løken, 1970).

pH-värde

Porvattnets pH-värde påverkar lerans egenskaper. Främst är det vid sedimentens bildning som pH-värdet är av betydelse men även förändringar i lerans kemiska sammansättning efter bildningen påverkas av porvattnets pH-värde.

Fällman et al. (2001) utförde laborieförsök på lös, lågsensitiv lera med ursprung från Holma mosse, Östergötland. Tre olika parametrars inverkan på lerans oströrda respektive omrörda skjuvhållfasthet efter uppslamning, sedimentering och konsolidering studerades. Leran rördes ut i en vattenlösning med olika kemisk sammansättning. De olika parametrarna som varierades var porvattnets pH-värde, jonstyrka och relationen mellan olika jonslag. Därefter centrifugerades och konsoliderades proverna. Uppmätta värden för sensitivitet vid olika jonstyrka (25 respektive 50 mM), pH-värde (pH 6–8 respektive pH 9,5–10,5) och andel natriumjoner i förhållande till andel kalcium-, magnesium- och kaliumjoner visas i *Figur 14*. Försöken visade att vid normal andel natriumjoner i förhållande till mängden kalcium-, magnesium- och kaliumjoner ($\text{Na}/(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}) \approx 5,5$) ökade sensitiviteten drastiskt med ökande pH-värde, se *Figur 14*. Någon förändring av sensitiviteten vid lågt pH-värde och sänkt andel natriumjoner ($\text{Na}/(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}) \approx 1,5$) erhöles inte medan däremot sensitiviteten ökade vid ett högt pH-värde då andelen natriumjoner ökades.



Figur 14. Mätvärden för sensitivitet relaterade till andel natriumjoner i porvattnet, pH-värde och jonstyrka (efter Fällman et al., 2001)

Det kan påpekas att den använda metoden för framställning av artificiell lera, det vill säga att snabbt konsolidera en suspension av lerpartiklar, inte ger den luckra aggregatdominerade struktur som är en förutsättning för uppkomst av mycket hög sensitivitet (Pusch, 2002).

Talme (1968) undersökte pH-värdets betydelse för omrörd leras skjuvhållfasthet. Sur lösning (väteklorid) och basisk lösning (natriumhydroxid) tillsattes både prover med normal och kvick lera. Den omrörda skjuvhållfastheten ökade vid tillsättning av den sura lösningen och minskade vid tillsättning av den basiska lösningen, både för den normala och den kvicka leran.

Bjerrum (1967) anger att då regnvatten perkolerar genom en leravlagring kan man anta att följande processer äger rum;

Regnvatten innehåller löst O_2 och CO_2 . CO_2 reducerar pH-värdet i porvattnet och om reduktionen pågår under tillräckligt långt tid så kommer pH-värdet att slutligen nå en så låg nivå att ett sönderfall av fältspat, glimmer och klorit startar. Sönderfallet leder till att flervärda joner, som sitter på mineralets ytor, frigörs.

Som beskrivits tidigare leder en ökad andel flervärda joner i porvattnet till en minskad utsträckning av det elektriska dubbellagret och därmed mindre repellerande krafter mellan partiklarna och således lägre sensitivitet.

Mitchell (1976) skriver att om däremot porvattnets pH-värde är högt finns det en tendens att vätejoner går i lösning ($SiOH \rightarrow SiO^- + H^+$), och därmed ger högre negativ laddning på partikelytan. Detta leder till en utbredning av dubbellagret och således eventuellt till högre sensitivitet.

I Göta Älvutredningen (Statens offentliga utredningar, 1962) menar man att det krävs att pH-värdet ligger inom vissa gränser för att leran skall kunna vara högsensitiv. Värden på dessa gränser ges dock inte i utredningen.

Dispergeringsmedel

Dispergeringsmedel är ämnen som i likhet med tvätt- och diskmedel löser upp bindningar och sår partiklar. Det rör sig främst om i naturen förekommande organiska ämnen men även vissa oorganiska substanser. När organiska substanser agerar som dispergeringsmedel kan de binda tvåvärdade joner (Ca^{2+} , Mg^{2+}) och ändra jonsammansställningen vilket kan expandera det diffusa dubbellagret (Brenner et al. (Brand & Brenner 1981)). Enligt Söderblom (1974) fungerar dispergermedlen så att de binder till sig katjoner från lerpartikeln och på så sätt ökar den negativa laddningen på partikelytan. Därmed ökar utsträckningen av partiklarnas dubbellager. Bland oorganiska dispergeringsmedel finner man silikater, fosfater, sulfider och bikarbonater.

Penner (1965) studerade inverkan av kemiska dispergeringsmedel på lerors omrörda skjuvhållfasthet. Tillsättning av natriummetafosfat ($\text{Na}(\text{HPO}_3)_x$) hade visat sig ge en ökad sensitivitet i omrörd lera. Uppmätningar av den elektrokinetiska potentialen visade att denna ökade vid tillförsel av natriummetafosfat. Penner (1965) förklarade detta med att partiklar som tidigare hölls ihop med starka van der Waals krafter separeras genom omrörning. Vid tillsättning av natriummetafosfat adsorberas fosfaten till mineralytorna och därmed ökar de repulsiva krafterna mellan lerpartiklarna. De repulsiva krafterna är för höga för att partiklarna efter omrörning skall kunna återförenas, och därmed minskar den omrörda skjuvhållfastheten.

Om sötvattenavsatta leror med flockulerad struktur och lågt aktivitetsstal, påverkas av ett dispergeringsmedel kan leran få kvicka egenskaper. Detta visade Söderblom (1974) indirekt genom att behandla sötvattenavsatt lera med olika dispergeringsmedel vilket gav upphov till mycket låg omrörd skjuvhållfasthet. Försöken utfördes så att kaolinitlera (artificiell) omrördes och den omrörda skjuvhållfastheten uppmättes. Därefter tillsattes dispergermedlet och leran omrördes återigen och den omrörda skjuvhållfastheten bestämdes på nytt. Han visade också på förekomst av en kvick sötvattenavsatt lera, överlagrad av torv.

Enligt Söderblom (1974) påverkar organiska ämnen leror på flera olika sätt ur kemisk synvinkel. Förutom deras förmåga att agera som ett dispergeringsmedel kan vissa organiska ämnen agera som cementeringsämnen och därmed ge leran en stabil gelstruktur och i vissa fall kan de ge leran en heterogen, finsprickig struktur och på så sätt öka permeabiliteten lokalt.

Partikelform

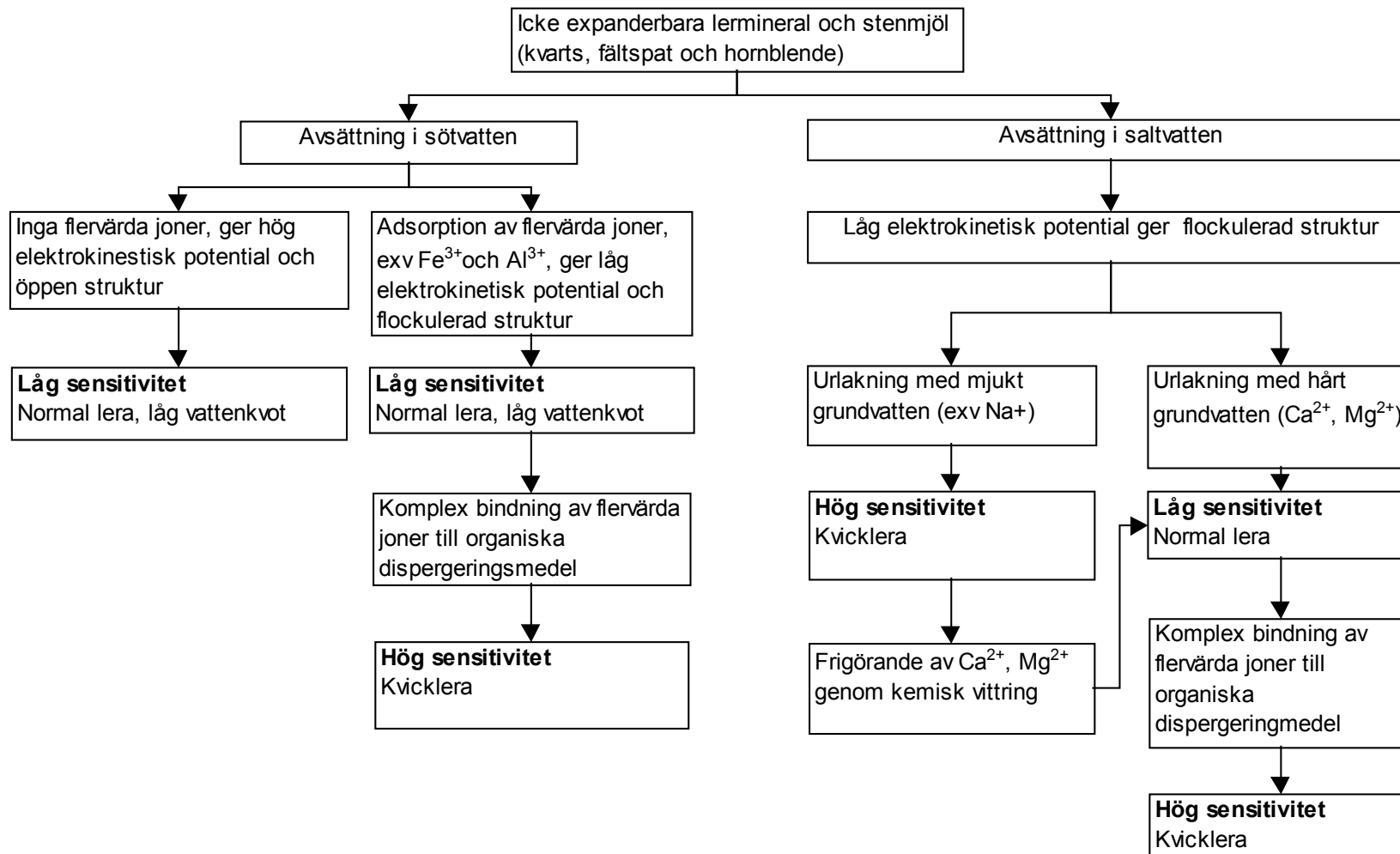
Pusch (1962) menar att även partiklarnas form har en betydelse för lerors benägenhet att utveckla kvicka egenskaper. Partiklar med utpräglad flat form (stort a/c-värde) separeras till en högre grad än partiklar av liksidig form vid omrörning (Pusch, 1962). Detta gäller framförallt vid låga densiteter och för normalkonsoliderade leror.

4.3 Principer för kvicklerebildning

Rosenqvist, (1978) har ställt upp följande generella teori för bildning av kvicklera.

1. Lerpartiklar av icke svällande mineral sedimenterar i flockulerat tillstånd eftersom den elektrokinetiska potentialen är låg (litet elektriskt dubbellager), antingen beroende på salthaltigt vatten eller beroende av adsorption av hårt bundna motjoner så som Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} och Mg^{2+} .
2. Efter avsättning och måttlig konsolidering ökar den elektrokinetiska potentialen (elektriska dubbellagrets utbredning ökar) exempelvis på grund av urlakning, reduktion av trevärt till tvåvärt järn (Fe^{3+} till Fe^{2+}), eller bindning av flervärda joner till exempelvis organiska föreningar.
3. Om leran därefter utsätts för mekanisk omrörning likriktas partiklarna. Omflockulering är därefter inte möjlig på grund av de höga inbördes repulsiva krafterna och det är endast möjligt för partiklarna att skapa nya kontaktytor efter avsevärd minskning av vattenkvoten, det vill säga konsolidering.

I *Figur 15* visas principerna för kvicklerebildning, sammanställda av Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981).



Exempel på icke svällande lermineral är exv illit och klorit. Smektit är ett svällande mineral.

Figur 15. Principer för kvicklerebildning (efter Brenner et al., i Brand & Brenner, 1981).

5 GEOTEKNISKA EGENSKAPER HOS KVICKLERA

I detta kapitel beskrivs typiska geotekniska egenskaper hos kvickleror. Det är framförallt vad gäller relationerna mellan vattenkvoter och konsistensgränser samt aktivitetstal, som kvicklera skiljer sig från icke kvick lera. Så visade till exempel Talme et al. (1966) att kvicklera och normal lera mineralogiskt sett kan tillhöra samma typ av lera och att skillnaden i sensitivitet inte berodde på skillnader i kornstorleksfördelningen. Istället beror, som visats i Kapitel 4.1 och 4.2, skillnaden i sensitivitet på mikrostrukturella och fysikaliska/kemiska förhållanden i lerans porvatten.

5.1 Aktivitet och lermineral

Två krav för att lera skall kunna bli kvick är att sedimenten måste domineras av lågaktiva och icke svällande mineraler.

Lerors aktivitetstal infördes av Skempton (Skempton (1955)). Han studerade bland annat förhållandet mellan lerors plasticitetsindex och lerinnehåll. Detta förhållande kallade han lerans aktivitetstalet, a_c , vilket definieras som:

$$a_c = I_p / I_c$$

där $I_p = w_L - w_p$
 $I_c =$ lerhalt, viktsprocent av totala finjordsmängden

Skempton (1955) fann att aktivitetstalet är olika för olika lermineral men i stort sett är oberoende av de ingående lerpartiklarnas storlek (alltså en rät linje då plasticitetsindex plottas mot lerinnehållet), se *Tabell 3*. Aktivitetstalet är främst beroende av de ingående lermineralens jonbyteskapacitet och specifika yta samt halten av organiska kolloider (Hansbo, 1975). Enligt Bjerrum (1954a) kan man göra en indelning med hänsyn till aktivitetstalet enligt *Tabell 4*.

Tabell 3. Aktivitetstal, a_c , för några olika mineralslag. Sammanställning från Skempton (1955) och Mitchell (1976).

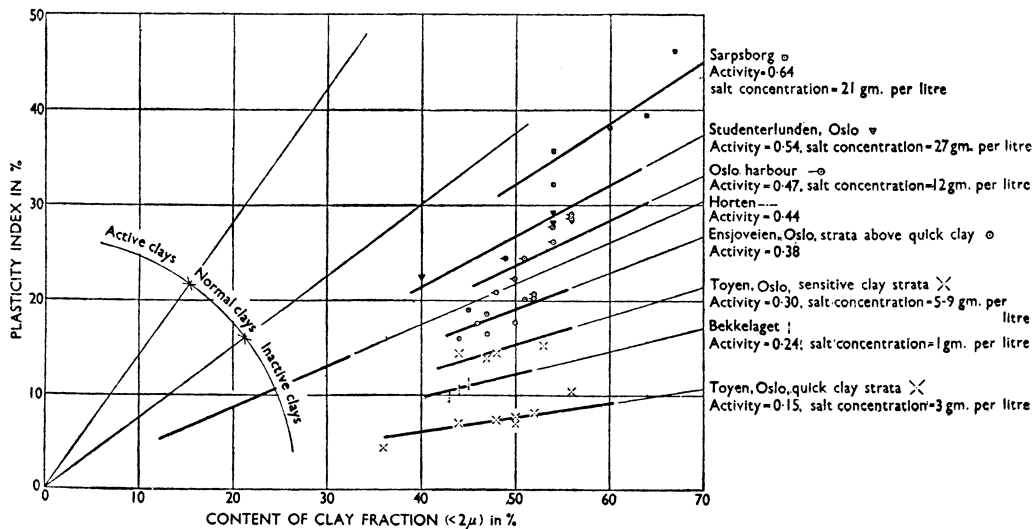
<i>Mineral</i>	<i>Aktivitetstal, a_c</i>
Muskovit	0,23
Kaolin	0,40 – 0,5
Smektit *	1-7
Illit	0,5 – 1

* För montmorillonit är aktivitetstalet beroende på typen av adsorberad katjon. En Na-montmorillonit har ett värde på 6 medan en Ca-montmorillonit har ett betydligt lägre värde, 1.5 (enligt Skempton, 1955)

Tabell 4. Benämning av lera med hänsyn till aktivitetstal (enligt Bjerrum, 1954a).

<i>Aktivitetstal</i>	<i>Benämning</i>
$0 < a_c \leq 0,75$	<i>lågaktiv</i>
$0,75 < a_c \leq 1,4$	<i>normal</i>
$1,4 < a_c \leq \infty$	<i>aktiv</i>

Bjerrum (1955) sammanställde värden på lerinnehåll och plasticitetsindex för flera norska leror, se *Figur 16*, och fann att alla proverna föll inom gruppen lågaktiva leror $0,15 < a_c \leq 0,65$. Kviklerors aktivitet är oftast mindre än 0,5 (Mitchell, 1976).



Figur 16. Aktivitet för några norska leror (efter Bjerrum, 1955).

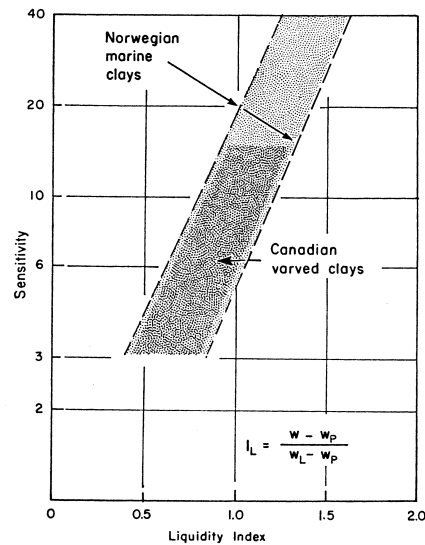
Vissa lermineral, som montmorillonit, har som tidigare beskrivits (se Kapitel 3.1), en expanderande förmåga. Dessa mineral återfinns endast i mycket liten mängd bland de lersediment som har visat sig kunna utveckla kvicka egenskaper. Rosenqvist (1978) skriver att "ingen kvicklera har hittats i sediment som består av mer än några få procent expanderande mineraler av smektitgruppen".

5.2 Portal och vattenkvoter

En lera som sedimenterar med flockulerad struktur, får ett högre portal och därför en högre vattenkvot jämfört med sediment som har en orienterad struktur. Då en flockulerad lera utsätts för urlakning kan det elektriska dubbellagets utbredning minska och därmed leda till att en omflockulering efter omrörning ej är möjlig. Detta leder till en markant sänkning av flytgränsen medan den naturliga vattenkvoten oftast förblir konstant. Karaktäristiskt för kvickleror är att flytgränsen är lägre än den naturliga vattenkvoten. Konflytgränsen definieras som den vattenkvot vid vilken man med en 60 g – 60° fallkon får ett 10 mm intryck. Den omrörda skjuvhållfastheten för ett 10 mm intryck är cirka 1,5 kPa. Undersökningar för stöflytgränsen har givit motsvarande värden. Per definition skall den omrörda hållfastheten vara mindre eller lika med 0,4 kPa för att leran skall klassificeras som kvick. Följaktligen *måste* vattenkvoten vara högre än flytgränsen i en kvicklera.

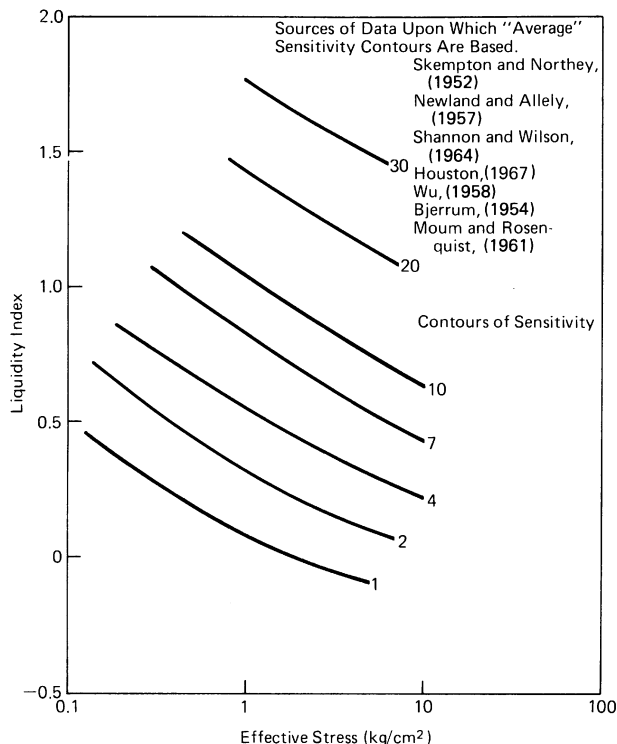
Plasticitetsgränsen minskar endast i mycket liten omfattning vid urlakning, se *Figur 9*. Om flytgränsen sjunker mer än plasticitetsgränsen innebär det att plasticitetstalet ($I_p = w_L - w_p$) sjunker. Brenner et al. (Brand & Brenner, 1981) anger också att kvickleror ofta har låga plasticitetstal ($I_p \approx 10-15$) vilket kan förklaras av att de har hög andel icke aktiva mineral. De huvudsakliga förändringarna i flytgräns, plasticitetsgräns, omrörd skjuvhållfasthet och sensitivitet inträffar då salthalten sjunker under 2 g/liter (Torrance, 1974).

Sensitiviteten ökar med ökande flytindex. Vid konstant överlagringstryck existerar ett nästan linjärt samband mellan logaritmen för sensitiviteten och flytindex, $I_L = (w_n - w_p)/(w_L - w_p)$, se *Figur 17*. Ett ökande flytindex är en följd av att leran genom urlakning, jonutbyte eller genom dispergeringsmedel har erhållit en minskning av flytgränsen, plasticitetsindex och aktiviteten.



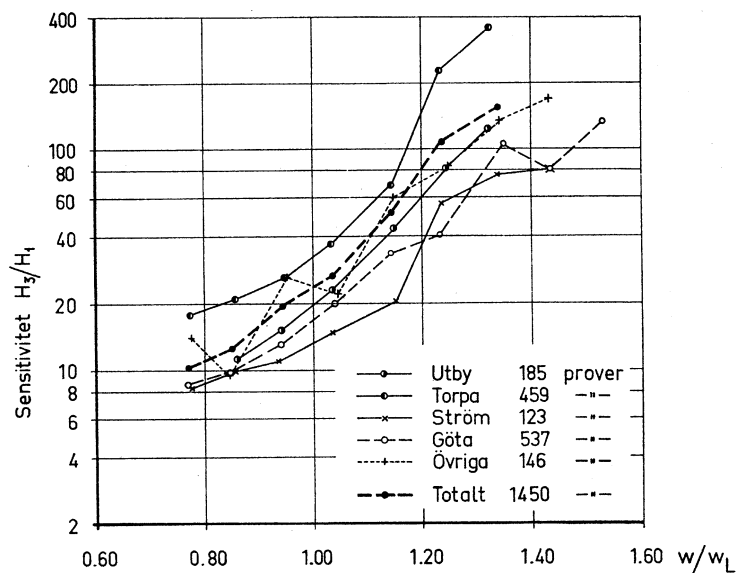
Figur 17. Samband mellan sensitivitet och flytindex för norska och kanadensiska havsvattenavsatta leror (Kenney, 1976).

Ett diagram över normalkonsoliderade lerors förhållande mellan flytindex, effektivspänning och sensitivitet visas i *Figur 18*. Diagrammet, som bygger på medelvärdena för flera olika leror, kan användas för att grovt uppskatta sensitivitet då ostörda prover ej har tagits. Diagrammet är baserad på data från normalkonsoliderade leror från bland annat Norge, England, Kanada och USA.



Figur 18. Generellt samband mellan sensitivitet, flytindex och effektivspänning (efter Mitchell, 1976).

I Göta Älvutredningen (Statens offentliga utredningar, 1962) sammanställdes resultat från 1450 lerprover längs Göta Älvdalen. Sambandet mellan dessa lersors sensitivitet och förhållande mellan vattenkvot och flytgräns redovisas i *Figur 19*. Sammanställningen visar att förhållandet mellan vattenkvot och flytgräns bör överstiga 1,1 för att lera skall vara kvick. Motsvarande resultat har erhållits för lera från Munkedal (Larsson och Åhnberg, 2003).



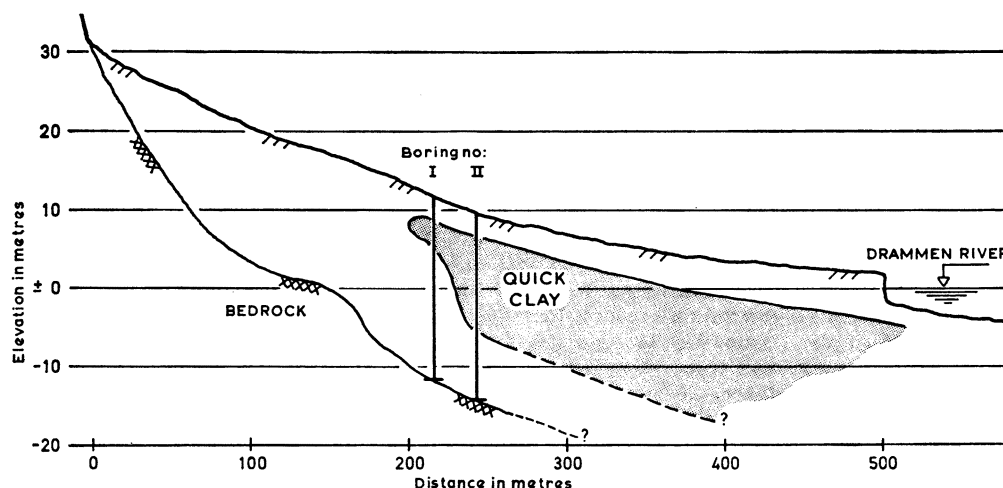
Figur 19. Samband mellan lersors sensitivitet och förhållande mellan vattenkvot och flytgräns för lerprover från Göta Älvdalen (Statens offentliga utredningar, 1962).

6 EXEMPEL PÅ KVICKLEREFÖREKOMST VID NÅGRA OLIKA FÖRSÖKSPLATSER

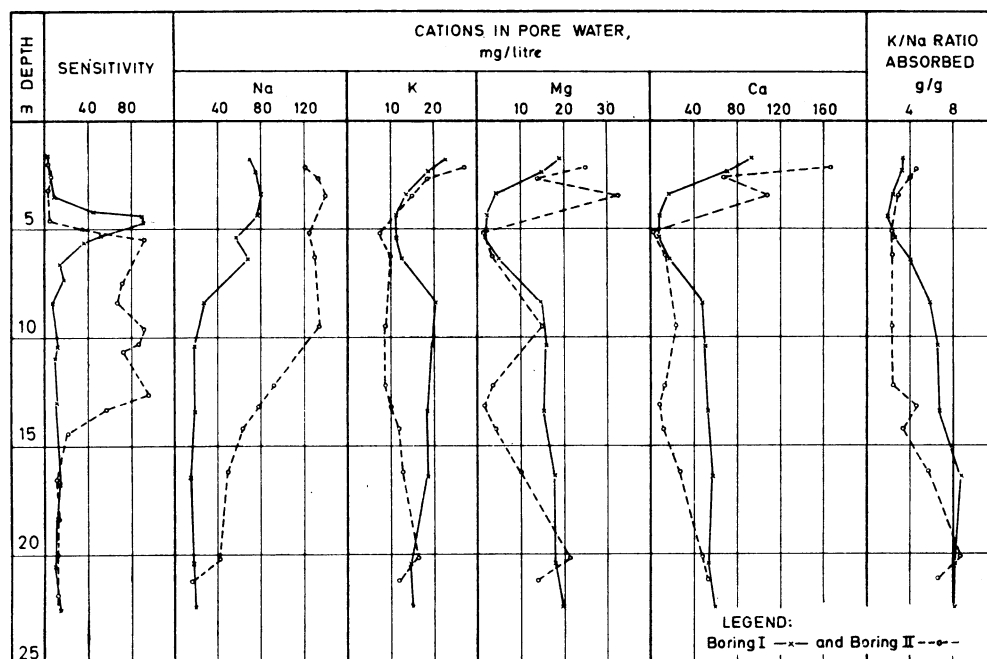
6.1 Tinghuset i Drammen, Norge

Ett typiskt exempel på hur jonsammansställningen och sensitiviteten kan variera med djupet i en saltvattenavsatt lera ges av Moum et al. (1971) samt av Moum et al. (1972). De undersökte och analyserade lerprover från ett område vid Tinghuset i Drammen, Norge. Jorden i området består av lös lera (hållfasthet 15–20 kPa, med svag ökning mot djupet) och en mäktighet mellan 0 och ca 25 m. Leran består av kvarts, fältspat, illit och klorit. Salthalten i porvattnet är mindre än 0,35 %. Genom kemisk analys av olika joner (K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) koncentration mot djupet fann man att det råder en inverterad korrelation mellan Mg^{2+} - och Ca^{2+} - koncentration i porvattnet och sensitiviteten. Resultaten från geotekniska undersökningar och de kemiska analyserna återges i *Figur 20* och *Figur 21*.

Urlakningen har skett både underifrån genom ett artesiskt tryck i botten av sedimenten och från horisontellt strömmande vatten och perkolerande regnvatten i de övre lagren. Urlakningen har dock inte gjort leran kvick i hela jordprofilen, se *Figur 21*, vilket kan antas ha sin förklaring i den varierande koncentrationen av olika saltjoner. Skillnaden i sensitivitet mellan borrpunkterna I och II förklarar författarna med att sensitiviteten i de undre lagren sannolikt varit hög men minskat på grund av en ökad koncentration av K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Författarna antar att denna ökning är resultatet av en vittring där Mg^{2+} frigjorts från lermineralet klorit, Ca^{2+} från kalcium karbonat och K^+ från illit.



Figur 20. Sektion visande lerdjup och förekomst av kvicklera i försöksplatsen Drammen, Norge (efter Moum et al., 1971).



Figur 21. Geotekniska egenskaper och porvattenkemi för lera vid försöksplats Tingshuset, Drammen (efter Moum et al., 1971)

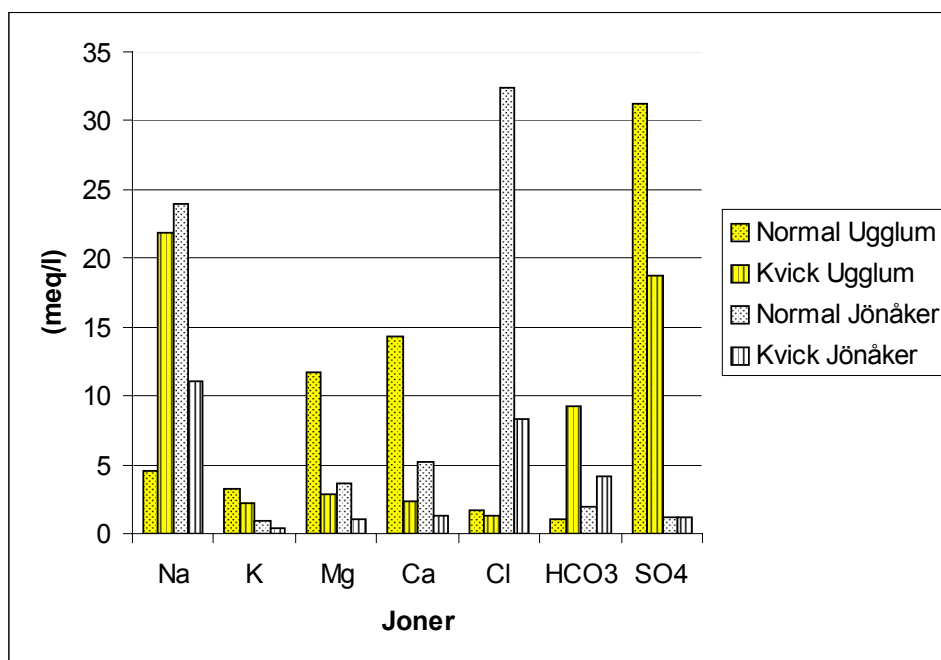
6.2 Jönåker och Ugglum

Talme et al. (1966) undersökte lera från bland annat Jönåker utanför Nyköping och Ugglum utanför Göteborg. Syftet med undersökningen var att studera skillnader mellan kvick och normal lera. Leran i Jönåker avsattes under den tid då Baltiska havet var ett sötvatten hav (den så kallade Ancylussjön) med en salthalt under 0,2% medan däremot leran i Ugglum är avsatt i en havsvik med en salthalt över 3%. Idag ligger Ugglum ca 15 km från havet.

Vid undersökningarna kunde ingen skillnad mellan den kvicka och den icke kvicka lerans kornfördelning eller ingående mineralslag urskiljas. Andel lerpartiklar mindre än 2 μm var ungefär 50-60 %. Lerorna innehöll i huvudsak lermineralerna illit och klorit. Skillnaden visades sig främst ligga i de olika lerornas kemiska sammansättning. Andel joner (meq/l) för normal respektive kvick lera för Jönåker och för Ugglum visas i Figur 22 samt i Tabell 5. Den kvicka leran från Jönåker visade sig ha mycket lägre total mängd av joner jämfört med den normala leran. Däremot hade den kvicka leran i Ugglum endast lite mindre total mängd joner jämfört med den normala lera. Gemensamt för de bägge lerorna är dock att innehållet av de tvåvärdade jonerna Mg^{2+} och Ca^{2+} är betydligt lägre i den kvicka jämfört med i den normala leran.

Tabell 5. Mängd joner i porvatten för lera från Jönåker och Ugglum (efter Talme et al., 1966).

Försöksplats	Typ av lera	Positiva joner (meq/l)	Negativa joner	Total mängd joner (meq/l)
Jönåker	Normal	33,66	35,54	69,20
	Kvick	13,82	13,52	27,34
Ugglum	Normal	33,87	33,96	67,83
	Kvick	29,28	29,27	58,55



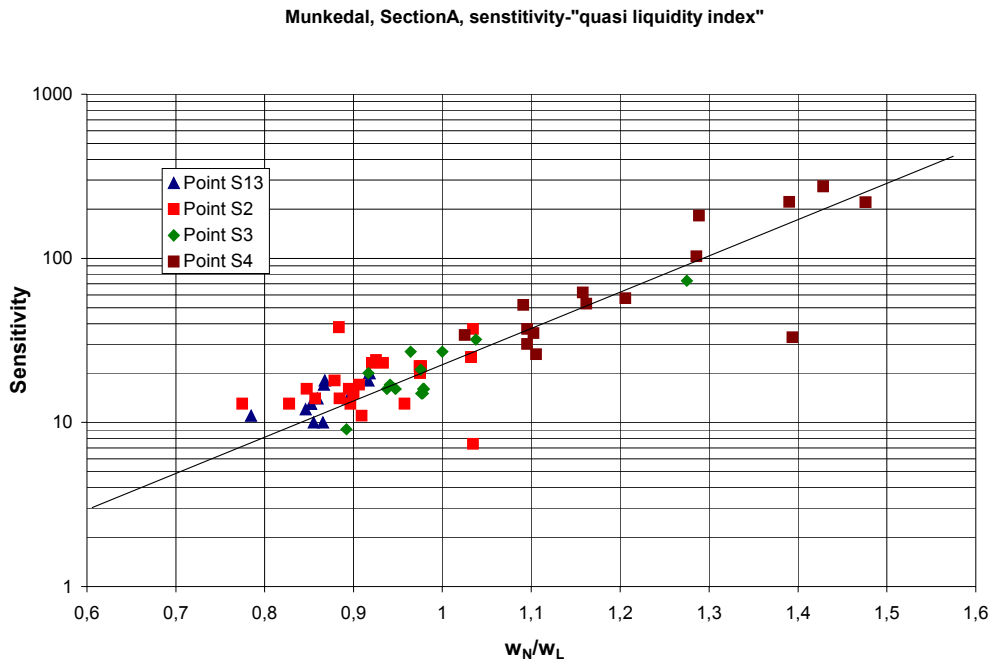
Figur 22. Innehåll av olika joner i porvattnet (meq/l) för lera från Jönåker och Ugglum (efter Talme et al., 1966).

6.3 Åtorp, Munkedal

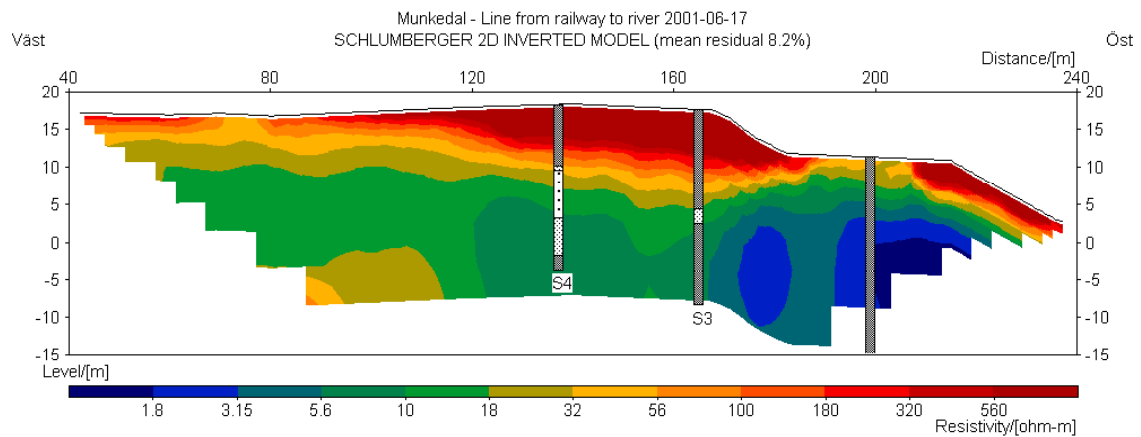
Vid en stabilitetsutredning för en slänt ner mot Öreskilsälven i södra änden av Munkedals samhälle, konstaterades i början av 1980-talet att stabiliteten inte var tillfredsställande. Därför utfördes stabilitetshöjande åtgärder, i form av avschaktning av slänkrön, 1985. För att studera åtgärdernas effekt utfördes ytterligare geotekniska undersökningar i slutet av 1990-talet. Dessa undersökningar omfattade även flera geofysiska metoder. Resultaten från undersökningarna finns presenterade av Larsson och Åhnberg (2003) samt av Dahlin et al. (2001). Någon undersökning av porvattnets kemiska sammansättning har inte utförts i Munkedal.

Jorden i området består av glacial och postglacial lera som är överlagrad av sväm- och deltsediment. Mäktigheten av de olika jordarterna varierar. Inom vissa partier i området konstaterades kvicklerreförekomst vid laboratorieundersökningarna. Den naturliga vattenkvoten är i huvudsak lika med eller något lägre än flytgränsen för den icke kvicka leran. I de partier där kvicklera återfanns är den naturliga vattenkvoten högre än flytgränsen, se *Figur 23*. Vid resistivitetsmätning i området konstaterades att kvicklera påträffades inom partier med en resistivitet som är högre än cirka $7 \Omega\text{m}$, se *Figur 24*. Motsvarande gräns för resistiviteten, vilken i sin tur är kopplad till salthalten, föreslogs av Söderblom (1969). Utbredningen av kvickleran i sidled har inte utretts.

Från undersökningarna kan konstateras att kvicklera är mer förekommande ju längre från älven man kommer.



Figur 23. Samband mellan lerans sensitivitet och förhållande mellan vattenkvot och flytgräns för lerprover från Munkedal. (från Larsson och Åhnberg, 2003).



Figur 24 Sensitivitet och tolkad resistivitet för sonderingar i sektion A, Munkedal. Ytliga lager med hög resistivitet består av svämsediment med sand och silt. (efter Dahlin et al., 2001). Mörka partier i sonderingarna indikerar sensitiviteter under 50, ljusa partier sensitiviteter mellan 50 och 100 och ljusa partier med prickar sensitiviteter över 100.

7 REFERENSER

- Appelo, C.A.J., Postma, D. (1994). *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Atkins, P.W. (1982). *Physical Chemistry*, Oxford University Press. Oxford.
- Bjerrum, L. (1954). Geotechnical properties of Norwegian marine clays. *Geotechnique*, Vol 4, 49-69.
- Bjerrum, L. (1955). Norske marine leirers geotekniske egenskaper. Norges Geotekniske Institutt. Publikasjon 7. Oslo.
- Bjerrum, L., Rosenqvist, I.T. (1956). Some experiments with artificially sedimented clays. *Geotechnique*, Vol 6, pp 124-136.
- 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.
- Brand, E.W., Brenner, R.P. (1981). *Soft clay engineering*. Elsevier.
- Dahlin, T., Larsson, R., Leroux, V., Svensson, M., Wisén, R. (2001). *Geofysik i släntstabilitetsutredningar. Rapport 62*. Statens geotekniska institut. Linköping.
- Fällman, A.-M., Holby, O., Lundberg, K. (2001). *Kolloiders betydelse för hållfasthet och föroreningstransport i jord. Statens geotekniska institut, Rapport 60*. Linköping.
- Hansbo, S. (1975). *Jordmateriallära*. Almqvist & Wiksell, Uppsala.
- Jerbo, A., Hall, F. (1961). Några synpunkter på högsensitiva bottniska sediment. Geologiska föreningen Stockholm. *Förhandlingar*. Stockholm.
- Kenney, T.C. (1976). Formation and geotechnical characteristics of glacial-lake varved soils. Laurits Bjerrum memorial volume. Norges Geotekniska Institutt.
- Larsson, R., Åhnberg, H. (2003). Long-term effects of excavations at crests of slopes, Pore pressure distribution – Shear strength properties – Stability – Environment. Swedish Geotechnical Institute, Report No. 61, Linköping.
- Loberg, B. (1980). *Geologi. Material, processer och Sveriges berggrund*. P A Norstedt & Söners förlag. Stockholm
- Lundqvist, G. (1958). *Beskrivning till jordartskara över Sverige. Sveriges geologiska undersökning*. Stockholm.
- Løken, T. (1970). Recent research at the Norwegian Geotechnical Institute concerning the influence of chemical additions on quick clay. *Geologiska föreningen i Stockholm. Förhandlingar. Volume 92. Part 2*. Stockholm.

- Mitchell, J.K. (1976). *Fundamentals of soil behaviour*. John Wiley & Sons, Inc.
- Moum, J., Løken, T., Torrance, J.K. (1971). A geochemical investigation of the sensitivity of a normally consolidated clay from Drammen, Norway. *Geotechnique*, Vol 21, No 4, 329-340.
- Moum, J., Løken, T., Torrance, J.K. (1972). A geochemical investigation of the sensitivity of a normally consolidated clay from Drammen, Norway. *Geotechnique - Discussion*. Vol 21, No 3, 542-544.
- Penner, E. (1965). A Study of sensitivity in Leda Clay. *Canadian Journal of Earth science*, 2, pp 425-441.
- Pusch, R. (1962). Clay particles; their size, shape and arrangement in relation to some important physical properties of clays. Statens råd för byggforskning. Handling Nr 40. Stockholm.
- Pusch, R. (1970). Clay microstructure. A study of the microstructure of soft clays with special reference to their physical properties. Statens geotekniska institut, Proceedings No 24. Stockholm.
- Pusch, R. (2002). Personlig kontakt.
- Rosenqvist, I.T. (1946). Om leirers kvikkagtighet. Statens Vegvesen. Veglaboratoriet. Meddelande Nr 4. Oslo.
- Rosenqvist, I.T. (1955). Investigations in the clay-electrolyte-water system. Norges Geotekniske Institutt. Publikation No 9, pp 36. Oslo.
- Rosenqvist, I.T. (1978). A general theory for the sensitivity of clays. Proceeding of the interdisciplinary conference held at the University of Luleå. Permont Press.
- Skempton, A.W. (1953). Soil mechanics in relation to geology. Proceeding of the Yorkshire geological society. Hull.
- Statens offentliga utredningar, (1962). Rasriskerna i Götaälvdalen. Betänkande avgivet av Götaälvskommittén. Inrikesdepartementet. Stockholm.
- Söderblom, R. (1969). Salt in Swedish clays and its importance for quick clay formation. Results from some field and laboratory studies. Statens geotekniska institut, Proceedings, No 22. Stockholm.
- Söderblom, R. (1974). Organic matter in Swedish clays and its importance for quick clay formation. Statens geotekniska institut, Proceedings, no 26. Stockholm
- Talme, O., Pajuste, M., Wenner, C.-G. (1966). Secondary changes in the strength of clay layers and the origin of sensitive clay. Byggforskningsrådet, Rapport 46. Stockholm.

Talme, O. (1968). Clay sensitivity and chemical stabilisation. Byggnadsforskningens rapport 56. Stockholm.

Tan, T.K. (1957). Discussion on: soil properties and their measurements. Proceeding 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation engineering. Vol 3, pp 87-89. London.

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. (1978). Post-depositional changes in the pore-water chemistry of the sensitive marine clays of the Ottawa area, eastern Kanada. Engineering Geology, no 14, 135-147.

Tovey, N.K. (1971). A selection of scanning electron micrographs of clays. CUED/CSOILS/Tr5a. University of Cambridge, Department of Engineering.

Troedsson, T., Nykvist, N. (1980). Marklära och markvård. Almqvist & Wiksell Läromedel. Uppsala.

Van Olphen, H. (1977). An introduction to clay colloid chemistry. John Wiley & Sons. New York.

Whitehouse, U.G., Jeffrey, L.M., Debrecht, J.D. (1969). Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters. Proceedings 7th national conference on clays and clay minerals. Washington, D. C., pp 1-79. Pergamon, Oxford.



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