

Konen faller i god jord

ROLF LARSSON

Linköping i februari 1997

Som ett av SGF:s laboratoriekommittés uppdrag anges att informera om nyheter och utveckling inom området som kan förväntas vara av allmänt intresse. Den pågående "Europastandardiseringen" av våra vanligaste provningsmetoder och hur denna påverkar svensk praxis berör oss alla.

Konen faller i god jord

Rolf Larsson

Statens Geotekniska Institut

Medlem av SGF:s Laboratoriekommitté och ETC 5

Synopsis

Den svenska fall-konen har vunnit nya internationella framsteg som en metod för bestämning av såväl flytgräns som odränerad skjuvhållfasthet. I det arbete som bedrivits av "European Technical Committee ETC-5, Laboratory Testing" inom den internationella geotekniska föreningen anges konmetoden som "the preferred method" för bestämning av flytgräns. En "pre-standard" för bestämning av odränerad skjuvhållfasthet med konmetoden har också utarbetats.

Den svenska fall-konen har tidigare varit standard för flytgränsbestämning i Norden och sedan 1986 också i Kanada. Efter självständigheten har den också börjat användas i Baltikum. I andra delar av Europa, främst Storbritannien och Irland har en motsvarande konmetod, "the British cone", använts för flytgränsbestämning. Omfattande jämförande undersökningar har visat att resultaten av de svenska och brittiska konmetoderna är likvärdiga och enligt den europeiska kommitténs rekommendationer kan båda metoderna användas utan åtskillnad.

I andra delar av världen, liksom inom delar av Europa, har flytgränsen normalt bestämts med "Casagrandes flytgränsapparat". Denna metod har i återkommande undersökningar visat sig ge resultat som är känsligare för detaljer i apparaturen och är mer beroende av den enskilde användaren. Resultaten har också visat sig systematiskt avvika från vad som erhålls med konmetoderna, vilket kan hänföras till att andra egenskaper hos materialet som t.ex. dess densitet påverkar resultaten.

Bakgrund

Alltsedan Atterberg (1916) introducerade konsistensläran har flytgränsen, w_L , varit en av de basparametrar som använts inom geotekniken för att karakterisera finkorniga jordar. Atterbergs definition av flytgränsen var dock inte helt objektiv. Enligt denna placerades ett omrört prov i en skål med kupad botten, överytan jämnades av och en vertikal skåra skapades som delade provet i två hälften. Skålen fattades sedan med ena handen och dess undersida stöttes sedan upprepade gånger häftigt mot den andra handens insida. Den vattenhalt vid vilken provhalvorna då kom att flyta ihop

i någon punkt definierades som flytgränsen. Måttspecifikationerna var ungefärliga eller saknades och vad som menas med "häftig stöt mot handens insida" var inte heller närmare definierat.

Statens järnvägars geotekniska kommission 1914 - 1922 (1922) presenterade därefter fallkonmetoden för bestämning av dels lerors odränerade skjuvhållfasthet, dels en motsvarighet till flytgränsen definierad som den vattenkvot vid vilket en kon med spetsvinkeln 60° och massan 60 g penetrerar 10 mm i ett omrört prov om den får falla fritt från ett utgångsläge där konens spets tangerar provets avjämnade överyta. Olyckligtvis gav man denna flytgräns en ny beteckning, finlekstalet w_F , eftersom man ansåg att storleken av detta tal avspeglade hur finkornigt materialet var. Av detta namn framgick dock inte klart att denna gräns också motsvarade övergången mellan det plastiska och halvflytande tillståndet vilket är den begreppsmässiga definitionen av flytgränsen.

På 1930-talet lanserade Casagrande (1932) en ny apparat som byggde på Atterbergs ursprungliga metod att bestämma flytgränsen. I denna metod släpptes skålen med kupad botten med fritt fall mot en basplatta i upprepade stötar. Alla mått på skålen, provets dimensioner, skårans form och vidd, fallhöjden och basplattans hårdhet var klart definierade och flytgränsen definierades som den vattenhalt där provhalvorna flöt ihop över en längd av 1/2 tum för 25 stötar med 10 mm fallhöjd. Denna gräns fick internationellt beteckningen w_L .

Båda försökstyperna har sedan använts och en viss osäkerhet har rått om hur resultaten relaterar till varandra och vad som skall betraktas som den "rätta" flytgränsen.

Svenska jämförelser och svensk praxis

På 1950-talet bedrevs omfattande studier av konförsöket av Statens geotekniska institut, (Hansbo 1957 och Karlsson 1961). Bland de faktorer som studerades var inverkan av konens spetsvinkel och massa och Hansbo visade teoretiskt att jordens skjuvhållfasthet kunde beräknas ur

$$\tau_{fu} = Kg \frac{m}{i^2}$$

Där K = konfaktor beroende av konens spetsvinkel
 g = tygdkraftens acceleration
 m = konens massa
 i = konintryck

Genom kalibrering mot laboratorievingsborr visade Karlsson (1961) att vid provning av omrörda prover kunde konfaktorn K sättas till 0,8 för 30° -koner och 0,27 för 60° -koner. För ostörda prover visade Hansbo (1957) att den konfaktor som skulle appliceras för att ge motsvarande värden på skjuvhållfastheten som i fält varierade med provtagningskvaliteten. På basis av omfattande kalibreringar mot vingförsök i fält används konfaktorn 1,0 för att beräkna den ostörda odränerade skjuvhållfastheten ur konintryck med 30° -koner i prover som tagits med den svenska standard-kolvprovtagaren (Hansbo 1975).

Omfattande jämförelser gjordes också mellan finlekstalet w_F och flytgränsen enligt Casagrande w_L

SGI Varia 460

varvid man fann att dessa i stora drag överensstämde men att det fanns en systematisk avvikelse som kunde relateras till dels flytgräns, dels jordens sammansättning. En linjär regression gav sambandet

$$w_{L_{\text{Casagrande}}} = 1,13 w_{F_{\text{kon}}} - 0,05 \quad \text{där vattenkvoterna anges i decimaltal}$$

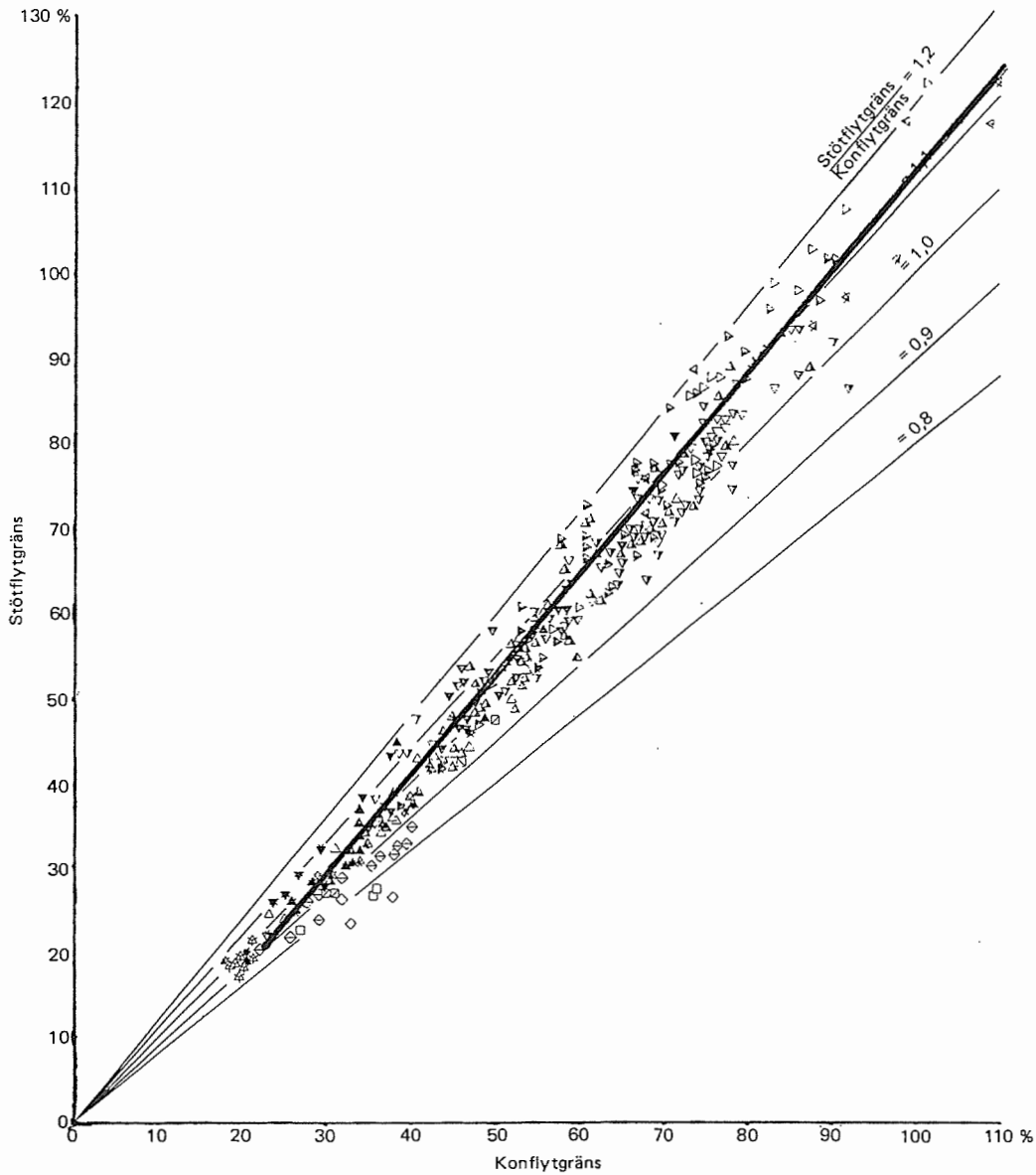


Fig. 1. Jämförelse mellan konflytgräns och stötflytgräns för svenska finkorning jordar, (Karlsson 1974).

Skillnaden förklarades med att förutom jordens fasthet påverkas resultaten i Casagrandes metod också av jordens densitet, vilken varierar med dess sammansättning och vattenkvoten vid försöket. (Som ytterligare anledning till skillnaden angav Sowers et al (1959) att mycket siltiga jordar undergår tillfällig liquefaction vid stötbehandlingen i Casagrandes apparat.)

Jämförelser mellan de olika metodernas tillförlitlighet visade att konmetoden gav avsevärt mindre spridning i resultat vid repeterade försök och då olika användare utförde försök på identiska prover. Jämförande provningar visade också att resultaten av Casagrandes metod är känsliga för vilken apparat som används eftersom bland annat olika material används i basplattan av olika tillverkare och olika specifikationer använts i olika länder.

På basis av dessa undersökningar rekommenderade SGF:s laboratoriekommitté (Karlsson 1974) att konmetoden skulle användas för bestämning av flytgränsen och finlekstalet bytte namn till konflytgränsen och betecknades w_L , vilken dock i viss mån skiljer sig från stötflytgränsen med samma beteckning. Svensk standard finns för båda metoderna men stötflytgränsen har i praktiken endast använts som komplement i samband med forskningsrapporter eller projekt med utländska intressenter.

De svenska undersökningarna ledde också till att en enpunktsmetod kunde utarbetas. Med denna kan flytgränsen beräknas ur enstaka provningar där konintrycken faller inom gränserna 7,0 och 14,9 mm.

Ett ytterligare indirekt resultat av de svenska undersökningarna var att konflytgränsen kunde ges en alternativ definition som den vattenkvot vid vilken den omrörda odränerade skjuvhållfastheten är 1,6 kPa.

Andra konmetoder

Konmetoden är mycket praktisk och andra varianter har under åren utarbetats runt om i världen. Bland de mer kända är Vasilyev-konen som använts i stor utsträckning inom de länder som ingått i det forna Sovjetunionen och Warszawapakten. Den förutom den svenska konen mest använda i Västvärlden är den brittiska konen. Dessutom finns bl.a. en fransk kon, en indisk kon och en amerikansk kon från Georgia Institute of Technology. De olika konernas massa och spetsvinkel visas i Tabell 1.

Tabell 1. Olika koner som varit i bruk.

Kon	Konvinkel, °	Massa, g	Konintryck vid flytgränsen, mm	Ekvivalent odränerad skjuvhållfasthet vid flytgränsen, kPa *)	Referens
Svensk	60	60	10	1,6	Karlsson (1974)
Brittisk	30	80	20	1,6	BSI (1975)
Indisk	31	148	25,4	1,8	Uppal and Aggarwal (1958)
Fransk	30	80	17	2,2	Leflaive (1971)
Vasilyev	30	76	10	(6,0)	Vasilyev (1949)
Georgia Tech.	30	75	10	(5,9)	Sowers et al (1959)

*) Beräknad enligt Karlsson 1961

Av dessa metoder är de två sista inte helt jämförbara med de övriga eftersom de fyra första avser koner med fritt fall medan de två sista enligt Sowers et al. (1959) avser koner som får penetrera långsamt tills hela vikten bärs av jorden.

Som framgår av tabellen bör resultaten från de svenska och brittiska konerna vara mycket likartade, medan resultaten från den indiska konen bör avvika något och den franska konen ytterligare något. Av de olika konerna är det dock främst de svenska och brittiska som används i någon större grad. För flytgränsbestämning är den svenska konen standardiserad i Norden och i Kanada och den brittiska konen i Storbritannien. För bestämning av ostörd odränerad skjuvhållfasthet är endast den svenska konen standardiserad i Sverige, Finland och Norge där utrustningen är densamma men provtagning, provning och utvärdering skiljer.

Önskemål om gemensam standard och jämförande undersökningar

Önskemålen om en gemensam standard för främst flytgränsbestämning har funnits sedan länge och har då bland annat baserats på behovet av att kunna överföra erfarenheter mellan olika länder. Behovet har accentuerats genom den ökande internationaliseringen och Europaintegrationen.

Motsvarande undersökningar som de svenska har senare utförts i andra länder. I Storbritannien har omfattande undersökningar utförts av bl.a. Sherwood and Ryley (1970), Houlsby (1982) och Wood (1985). Dessa undersökningar har i princip bekräftat Hansbo's (1957) teoretiska utvärdering av konförsöket (Houlsby 1982) och att flytgränsen i princip kan relateras till en omrörd odränerad skjuvhållfasthet i storleken 1,6 kPa. De har också visat att konförsöket är enklare att utföra och mer oberoende av användare och utrustning (Sherwood and Ryley 1970), vilket också bekräftats av amerikanska undersökningar (Sowers et al 1959). Undersökningarna har också visat att resultaten från de svenska och brittiska konerna är i det närmaste identiska (Wood 1985). Undersökningarna har i huvudsak koncentrerats på den brittiska konen och den brittiska Casagrande apparaten (som skiljer sig något från den amerikanska som vid behov används i Sverige) och liknande men inte helt identiska relationer mellan konflytgräns och stötflytgräns har erhållits. En enpunktsmetod motsvarande den svenska har också utarbetats för den brittiska konen.

I samband med introduktionen av den svenska konmetoden i Kanada och dess standardisering 1986 utfördes omfattande jämförande undersökningar vilka nyligen publicerats (Leroueil and Le Bihan 1995). Dessa undersökningar visar motsvarande relation mellan konflytgräns och stötflytgräns (med amerikansk apparatur) som uppmätts i Sverige. Vidare visas att resultaten från de svenska och brittiska konerna är likvärdiga. En enpunktsmetod har utarbetats, vilken är snarlik den svenska och vilken vid en jämförelse inom de angivna gränserna för konintryck mellan 8 och 12 mm ger skillnader som är mindre än 1 % av utvärderad flytgräns.

En större jämförande undersökning mellan olika metoder att bestämma flytgränsen har också nyligen utförts i Estland (Lemberg and Oll 1995). I denna erhöles en relation mellan konflytgränsen och stötflytgränsen av $w_L = 1,13 w_F - 0,042$ vilket kan jämföras med den svenska

$$w_L = 1,13 w_F - 0,05 .$$

Redan då den europeiska kommittén ETC-5 startade sitt arbete var det således ganska väl belagt hur de olika metoderna förhöll sig till varandra, även om de kanadensiska och estländska undersökningarna inte var publicerade vid denna tidpunkt. Trots detta fanns en viss osäkerhet eftersom

ett stort antal deltagare inte varit i kontakt med någon konmetod eller endast en variant av denna. Det beslutades därför att en gemensam jämförande studie skulle göras. I studien har laboratorier i England, Holland, Irland, Tyskland och Sverige medverkat samtidigt som andra deltagare nöjt sig med att bekanta sig med metoderna. En av SGI:s konapparater befinner sig t.ex. på turné i Europa sedan ett par år tillbaka.

Också resultatet av denna studie visade att resultaten från de svenska och brittiska konerna är likvärdiga, såväl beträffande flytgräns som spridning i resultat och känslighet för användare och utrustning, Fig. 2. Någon direkt skillnad i användarvänlighet kunde inte heller konstateras. De uppmätta relationerna mellan stötflytgräns och konflytgräns faller väl in i de samband som tidigare funnits av Karlsson (1974), Fig. 3.

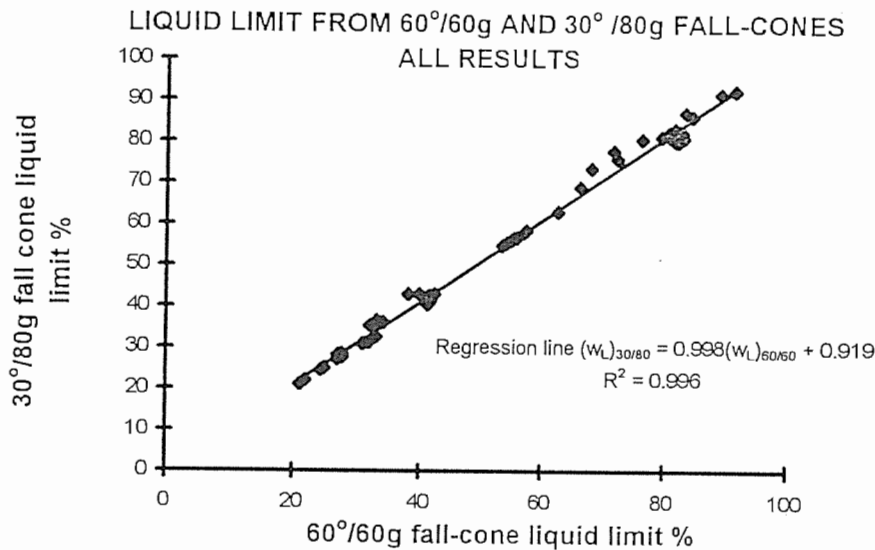


Fig. 2. Jämförelse mellan uppmätta flytgränser med svensk respektive brittisk kon i ETC-5:s studie. (Farrell et al 1996)

SGI Varia 460

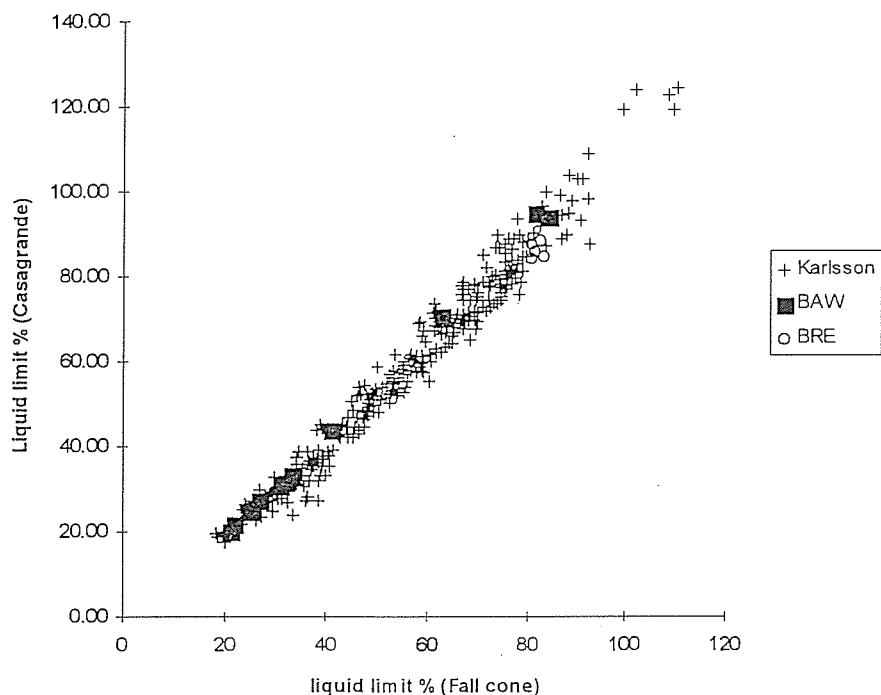


Fig.3. Jämförelse mellan stötflytgräns och konflytgräns i ETC-5:s studie presenterade tillsammans med data från Karlsson (1974). (Farrell et al. 1996).

ETC-5:s rekommendation för flytgränsbestämning

På basis av det samlade erfarenhetsunderlaget rekommenderar ETC-5 att konmetoden används för bestämning av flytgränsen (Farrell et al 1997). Såväl den svenska som den brittiska konen kan användas och resultaten kan betraktas som likvärdiga. Metoden har visat sig vara okänslig för apparaturens design och endast principen med koner med specificerade mått och vikter som släpps med fritt fall samt provberedning och utvärdering är angivna i detalj. Detta för att lämna utrymme för utveckling av apparaturen så att t.ex. avläsning i framtiden skall kunna göras digitalt med beröringsfria givare. Enpunktsmetoderna ingår inte direkt i rekommendationen men finns med i en not.

ETC-5:s rekommendation för bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten med fallkonförsök

En rekommendation för hur den odränerade skjuvhållfastheten kan bestämmas genom fallkonförsök har också utarbetats, (Larsson et al. 1997). Enligt denna rekommendation skall detta försök ses som ett "index test" vars resultat är ett konintryck i det aktuella provet som kan räknas om till en approximativ odränerad skjuvhållfasthet för jordprovet i det skick det föreligger vid provningstillfället i laboratoriet.

Denna hållfasthet beräknas för såväl intakta som omrörda prover med de konfaktorer som angivits ovan, dvs. 0,8 för 30°-koner och 0,27 för 60°-koner. För översättning till odränerad skjuvhållfasthet vid ostörda in situ förhållanden krävs empirisk erfarenhet av den aktuella provtagningsmetoden och tillhörande provhantering och provningsmetodik. Som ett exempel anges den svenska standardkolvprovtagaren med provning av jorden innesluten i provhylsan och tillhörande konfaktor 1,0 för 30°-koner.

Våra norska kollegor använder en annan typ av provtagare och en provningsmetodik där provningen sker efter att provet tryckts ut ur provhylsan samt en för detta förfarande väl beprövad utvärderingsmetod och kan således fortsätta med detta. För provtagningsmetoder för vilka motsvarande erfarenhet saknas kan metoden å andra sidan inte användas för uppskattning av in-situ hållfastheten förrän ett erforderligt empiriskt jämförelseunderlag skapats.

Vad som innebär en reell förändring från nuvarande praxis i Sverige är att de konfaktorer av 0,8 och 0,27 som funnits empiriskt och som krävs för överensstämmelse mellan svenska och brittiska koner vid flytgränsbestämning tillämpas. Hittills har förenklade faktorer av 1,0 och 0,25 använts också för omrörd jord, vilket underlättade på den tid då datorerna och miniräknarna inte fanns. Detta ansågs inte ha någon direkt praktisk betydelse för uppskattningen av sensitiviteten, vilket är det huvudsakliga ändamålet med bestämningen av hållfastheten hos jorden i omrört tillstånd. Detta bör vi alltså sent omsider ändra på i enlighet med våra egna empiriska erfarenheter.

Referenser

Atterberg, A. (1911). Lerornas förhållande till vatten, deras plasticitetsgrader och plasticitetsgränser. Kungl. Lantbruksakademins Handlingar och Tidskrift Nr 2, p. 133-139. Stockholm

Atterberg A. (1916). Konsistensläran - en ny fysikalisk lära. Svensk Kemisk Tidskrift. Årg. 28. p. 29 - 37. Stockholm.

Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. U.S. Bureau of Public Roads, Vol. 13, No. 8, pp. 121-136.

Farrell, E., Larsson, R. and Schuppener, B., (in cooperation with ETC-5), (1997). Determination of Atterberg Limits. In Print.

Farrell, E., Schuppener, B. and Wassing, B. (1996). ETC Fall-cone study, Kommer i Ground Engineering våren 1997, Också i tysk version som "Fallkegelversuch - Ergebnisse der Studie des ETC 5. Geotechnik, No. 1996/4, pp. 260-265.

Hansbo, S. (1957). A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. Statens geotekniska institut, Proceedings No. 14, Stockholm.

Houlsby, G.T. (1982). Theoretical analysis of the fall cone test. Geotechnique Vol. XXXII, No. 2, pp. 111-118.

Karlsson, R. (1961). Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remoulded clays. Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 1, pp. 191-184.

Karlsson, R. (i samarbete med SGF:s laboriekommitté)(1974). . Konsistensgränser. Byggforskningens Informationsblad B11:1974. Stockholm.

Larsson, R., Farrell, E. and Foged, N., (in cooperation with ETC-5), (1997). Determination of undrained shear strength by fall cone tests. In Print.

Leflaive, E. (1971). Les limites d'Atterberg et le pénétromètre à cône. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No. 50, pp.123-131.

Lemberg, U. and Oll, K. (1995). Comparison of soil classification in east and west. Proceedings, XI European Geotechnical Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen, Vol. 3. pp. 155-159.

Leroueil, S. and Le Bihan, J.-P. (1996). Liquid limits and fall cones. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, pp. 793-798.

Sherwood, P. T. and Ryley, M. D. (1970). An investigation of a cone penetrometer method for the determination of the liquid limit. Geotechnique, Vol. 20, No. 2, pp. 203-208.

Sowers, G. F., Vesic, A. and Grandolfi, M. (1959). Penetration tests for liquid limit. American Society for Testing and Materials. Special Technical Publication No. 254, pp. 216-224.

Uppal, H. L. and Aggarwal, H. R. (1958). A new method of determining the liquid limit of soils. Bulletin 19, Central Road Research Institute, New Delhi.

Vasilyev, A. M. (1949). Basic principles of the methods and techniques of laboratory determination of physical soil properties. (Hänvisning i Sowers et al 1959). Vasilyev-konen också beskriven i GOST 5180 (1984): Soviet Union Building Code; Soils; Laboratory methods for determination of physical characteristics. USSR State Building Committee, Moscow.

Wood, D.M. (1985). Some fall-cone tests. Geotechnique, Vol. XXXV, No.1, pp. 64-68.