

Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

SGF Notat 1:2018

Konflytgränsen

SGF:s Laboratoriekommitté

Linköping 2018

Förord

Bestämning av jordarters flytgräns är en av de mest utförda laboratorieanalyserna. En jords flytgräns påverkar i hög grad dess beteende och geotekniska egenskaper och är således av stor betydelse. Den idag använda bestämningsmetodiken av flytgränsen utarbetades på Statens Geotekniska Institut i början av 1960-talet och har sedan dess använts inom svensk geoteknik i princip utan undantag. Metoden baseras på en s k enpunktsbestämning som avsevärt förenklar bestämningen jämfört med den s k flerpunktsbestämningen.

Från och med 2017 gäller en ny europeisk och internationell standard där flerpunktsbestämningen förordas men tillåter enpunktsbestämning i de länder där tillfredsställande underlag finns. I samband med införandet av dessa standarder initierade SGF:s Laboratoriekommitté ett projekt i syfte att dels utreda underlaget för den förenklade enpunktsbestämningen, dels upprätta ett notat som vidareför den hittills använda enpunktsbestämningen då underlaget var tillfredsställande.

Notatet har författats av Sölve Hov, GeoMind/LabMind, och Martin Holmén, Statens Geotekniska Institut. Det har granskats av följande medlemmar i SGF:s Laboratoriekommitté: Tobias Thorén, Bohusgeo, Nancy Bono, GeoMind. Notatet har remissgranskats av Leif Eriksson, f d Statens Geotekniska Institut, som även bidragit stort med värdefulla fakta och analyser.

Stockholm och Linköping, april 2018

Sölve Hov

Martin Holmén

Vill man lära känna ett jordslags egenskaper rätt, har man att först och främst studera jordslagets konsistensformer och konsistensgränser, samt de viktigaste konsistensformernas konsistensgrader. Albert Atterberg (1912).

Innehållsförteckning

Förord

<u>1</u>	<u>INLEDNING</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>OM KONSISTENSGRÄNSER</u>	<u>2</u>
2.1	Allmänt	2
2.2	Hållfasthet vid flytgränsen	3
<u>3</u>	<u>HISTORIK</u>	<u>4</u>
3.1	Atterbergs konsistensgränser	4
3.2	SJs finlekstal	6
3.3	Casagrandes stötflytgräns	7
3.4	Rudolf Karlssons konflytgräns	8
3.5	Internationell praxis	13
<u>4</u>	<u>SS 027120 (F D SVENSK STANDARD) – SS-EN 17892-12</u>	<u>13</u>
<u>5</u>	<u>INVERKANDE FAKTORER</u>	<u>15</u>
5.1	Inverkande faktorer av jordens uppbyggnad	15
5.2	Inverkande faktorer vid bestämning av flytgränsen	17
5.3	Naturliga variationer	20
<u>6</u>	<u>REKOMMENDERAD UTVÄRDERING MED ENPUNKTSBESTÄMNING</u>	<u>23</u>
6.1	Inledning	23
6.2	Rekommenderad utvärdering med enpunktsbestämning	23
6.3	Utvecklingsbehov	24
<u>7</u>	<u>REFERENSER</u>	<u>25</u>

1 INLEDNING

Finkorniga jordarters beteende och egenskaper är i stor grad beroende av dess konsistensgränser. Från att den svenske kemisten och jordbruksforskaren Albert Atterberg i början av 1900-talet utarbetade systematiken att bestämma ett antal konsistensgränser, d v s olika vattenkvoter en jord har vid olika konsistensformer i omrört tillstånd, har de används inom i princip alla professioner som har jord som arbetsmaterial, däribland jordbruk, keramik och geoteknik.

Konsistensgränserna, och särskilt flytgränsen, har stor påverkan på geotekniska egenskaper och har historiskt kopplats ihop med flera geotekniska egenskaper, parametrar och samband, exempelvis:

- Empirisk korrigering av skjuvhållfasthet utvärderad från fallkonförsök i laboratorium samt från vingförsök och CPT-sondering i fält (μ);
- Empiriska korrelationer mellan olika geotekniska parametrar, såsom mellan odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck samt skjuvmodul
- Empiriska korrelationer för jordtryckskoefficienten K_0 i lera

I Sverige används idag i princip endast flytgränsen för dessa korrelationer. Internationellt används dock ofta plasticitetsindex, d v s sifferdifferensen mellan flytgränsen och plasticitetsgränsen. Även här finns ett stort antal korrelationer och samband, bland annat utvärdering av fältundersökningar, förhållande mellan olika geotekniska parametrar och för materialparametrar i avancerade konstitutiva jordmodeller.

Utöver att vara användbar vid identifiering och klassificering av jordarter samt för bedömning av jordarternas geotekniska egenskaper, har det visat sig att olika jordarter i omrört tillstånd har flertalet gemensamma egenskaper vid konsistensgränserna, särskilt vid flytgränsen. Oorganiska omrörda leror med vattenkvot vid flytgränsen, oavsett siffervärde, har funnits en permeabilitet av omkring $2,5 \times 10^{-9}$ m/s, ett negativt portryck omkring 6 kPa och en skjuvhållfasthet av ca 1,6 kPa (Nagaraj et al, 1991, Mitchell & Soga, 2005, Russel & Mickle, 1970, m fl).

Den internationellt vanligaste metoden att undersöka en leras flytgräns är med Casagrandes stötflytgränsapparat (stötflytgränsen), medan man i ett antal länder, däribland Sverige, Norge, Kanada och Storbritannien, använder konapparaten (konflytgränsen), se Figur 1.



Figur 1. Konapparat för bestämning av konflytgränsen och Casagrandes stötflytgränsapparat

Konflytgränsen definieras av den vattenkvot en omrörd jord har vid ett visst konintryck med en viss kon (detta varierar mellan olika länder). Ursprungligen användes en s k flerpunktsbestämning eftersom det normalt är svårt att genom uttorkning eller uppblötning erhålla den exakta vattenkvoten för att erhålla det definierade konintrycket. Flerpunktsbestämningen innebär att leran provas vid olika vattenkvoter, normalt tre eller fyra, varpå en medelvärdeslinje ritas upp i ett diagram med vattenkvot och konintryck. Därifrån kan den vattenkvot avläsas som motsvarar det definierade konintrycket.

Detta är dock tidskrävande och för att förenkla denna bestämning har man därför i flera länder utarbetat s k enpunktsbestämningar, d v s att man empiriskt tagit fram värden på medelvärdeslinjens lutning för att utifrån endast en provning kunna räkna fram vattenkvoten motsvarande det definierade konintrycket. Att bestämma konflytgränsen med enpunktsbestämning för normalsvenska leror, där naturlig vattenkvot ligger förhållandevis nära flytgränsen, tar normalt ca 2 – 5 minuter. Vid flerpunktsbestämning kan tiden öka upp till 30 – 45 minuter.

2 OM KONSISTENSGRÄNSER

2.1 Allmänt

Med konsistens menas en omrörd jords grad av fasthet, d v s egentligen skjuvhållfasthet, och formbarhet. Karakteristiskt för kohesionsjordar, i motsats till friktionsjordar, är att de inom vissa vattenkvotsgränser har plastisk konsistens. Vid lägre vattenkvot har de halvfast eller fast konsistens och vid högre vattenkvot flytande konsistens. Jordens beteende vid de tre huvudsakliga konsistensformerna kan beskrivas som följande:

- Fast konsistens: jorden är inte formbar, sprött brott inträffar vid liten deformation
- Plastisk konsistens: formbar, behåller sin form efter deformation
- Flytande konsistens: flyter genom inverkan av sin egen tyngd

Konsistensformerna och -gränserna definierades av Albert Atterberg i början av 1900-talet och illustreras i Figur 2.

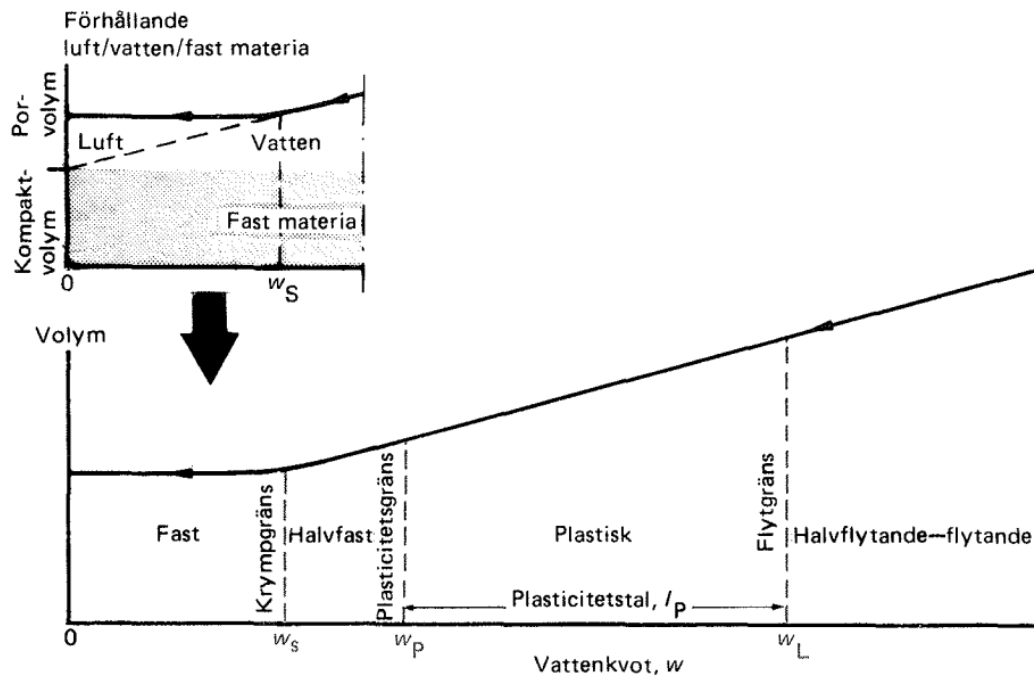
I grunden beror konsistensgränserna, d v s siffervärdet av de olika vattenkvoterna vid gränstillstånden, på jordens vattenbindningsförmåga. Vattenbindningsförmågan beror i sin tur på lerhalt, typ av lermineral och organiska kolloider samt saltinnehållet i porvattnet, se vidare kapitel 5.

Konsistensgränserna är beroende av respektive bestämningsmetod. Eftersom övergångarna mellan de olika konsistensområdena är successiv, krävs en definition av varje konsistensgräns. Vad gäller plasticitetsgränsen definieras denna som den lägsta vattenkvot jorden kan ha för att ett prov kan rullas ut till en 3 mm tunn tråd utan att smulas sönder.

För bestämning av flytgränsen har två metoder utvecklats; stötflytgränsen och konflytgränsen. För stötflytgränsen används den s k Casagrandes stötflytgränsapparat vilken består av en skål där man i ett omrört prov skär en fåra. Stötflytgränsen är definierad som den vattenkvot provet har då fåran flyter ihop 1/2 tum (12,7 mm) när skålen fallit 10 mm mot ett styvt underlag 25 gånger. Konflytgränsen bestäms med konapparaten och definieras i Sverige som vattenkvoten ett prov har då en kon med 60 grams vikt och 60° konvinkel får 10 mm konintryck.

Den enda konsistensgräns som har en tydlig definierbar fysikalisk egenskap är krympgränsen. Denna konsistensgräns bestäms däremot enbart i samband med undersökningar av en leras krympningsegenskaper, vilket betyder att den normalt sällan bestäms.

De av Atterbergs konsistensgränser som idag används är huvudsakligen plasticitetsgränsen och flytgränsen, och i Sverige nästan enbart konflytgränsen.



Figur 2. Konsistensformer och konsistensgränser (ur Karlsson, 1974)

2.2 Hållfasthet vid flytgränsen

Både stötflytgränsen och konflytgränsen är i princip enkla hållfasthetsbestämningar. En jords flytgräns kan därför sägas definieras av en viss hållfasthet i omrört tillstånd. Vattenkvoten vid denna hållfasthet är jordens flytgräns.

Casagrandes stötflytgräns baseras i grunden på ett dynamiskt släntstabilitetsbrott och stötflytgränsen motsvarar därför ett värde av ett förhållande mellan skjuvhållfastheten och densiteten (ex Muir Wood, 1990). Eftersom en jords densitet minskar vid ökande vattenkvot kommer en jord med relativt hög flytgräns att visa en lägre hållfasthet, d v s ett mindre antal stötar, jämfört med en jord med relativt låg flytgräns (Haigh, 2012). Enligt Leroueil & Bihan (1996) minskar hållfastheten från 2,8 till 1,2 kPa när stötflytgränsen ökar från 25 till 75 %.

Fallkonförsöket motsvarar däremot ett värde på hållfastheten utan att påverkas av jordprovets densitet och därmed också utan att påverkas av varierande vattenkvot, d v s konintrycket är oberoende av jordprovets densitet och vattenkvot förutsatt att provets skjuvhållfasthet är densamma (Vardanega & Haigh, 2014, Koumoto & Houlsby, 2001 m fl).

Utifrån en djupgående teoretisk och empirisk studie föreslog Hansbo (1957) följande beräkning av skjuvhållfastheten från fallkonförsöket:

$$\tau = K \frac{Q}{i^2} \quad \text{Ekv. 1}$$

där τ = skjuvhållfasthet (kPa)
K = empirisk konstant beroende av konvinkel (-)
Q = konens vikt (N)
i = konintryck (mm)

Hansbo (1957) hade för omrörda leror funnit att $K = 0,3$ för 60° -konen, medan Karlsson (1961) fann $K = 0,27$ och Muir Wood (1985) $K = 0,29$. Dessa värden baserades på jämförelser mellan fallkonförsöket och laboratorievingsförsök. Internationellt är Karlssons K-faktorer för omrörda leror allmänt vedertagna.

Då konflytgränsen definieras som 10 mm konintryck med 60g- 60° -konen ger detta med $K = 0,27$ en hållfasthet av ca 1,6 kPa. Med Muir Woods (1985) konfaktor är hållfastheten ca 1,7 kPa, vilket också överensstämmer med exempelvis Russel & Mickle (1970) och Wroth & Muir Wood (1978).

Plasticitetsgränsen, som motsvarar vattenkvoten då en tråd av lera bryts sönder vid 3 mm, motsvarar i och för sig inte någon specifik hållfasthet men kan ändå förenklat sägas motsvara en ungefärlig hållfasthet. Enligt Skempton & Northey (1953) och Sharma & Bora (2003) är hållfastheten vid plasticitetsgränsen ca 100 gånger hållfastheten vid flytgränsen, d v s ca 160 kPa. Försök med att bestämma plasticitetsgränsen med fallkonförsöket har gjorts men inte lett till någon framgång.

3 HISTORIK

3.1 Atterbergs konsistensgränser

Konsistensgränserna definierades ursprungligen av den svenske kemisten och jordbruksforskaren Albert Atterberg (1911, 1912 och 1916). Atterbergs arbete med jord omfattade, förutom konsistensgränserna, även kornstorleksfördelning och kapillaritet.

Jordartsforskningen på denna tid, och även långt före Atterberg, hade sin huvudsakliga användning inom jordbruk och keramik. En viktig del avseende leror var deras formbarhet, d v s plasticitet, och egenskapen att behålla formen även efter uttorkning. Andra viktiga egenskaper var styvhet och vattenbindningsförmåga. Före Atterberg hade flertalet forskare presenterat ett stort antal metoder för att försöka klassificera lerors plasticitet, och bland annat förekom metoder och bestämningsprinciper som påminner om både konförsöket och stötflytgränsapparaten (Atterberg 1911).

Atterberg (1911) presenterade sju konsistensgränser baserade på lerors beteende i omrörd form, se översikt i Tabell 1. Atterberg framhöll att den nedre trögflytbarhetsgränsen (flytgränsen) och utrullgränsen (plasticitetsgränsen) var de viktigaste, men eftersom övergångarna mellan flytande, plastisk och fast form är successiv, fanns behov av flera konsistensgränser.

Tabell 1. Ursprungliga konsistensgränser enligt Atterberg (1911)

Atterberg (1911)	Engelsk översättning av Casagrande (1932a)
Öfre trögflytbarhetsgränsen	Upper limit of viscous flow
Vattentäthetsgränsen	-
Nedre trögflytbarhetsgränsen / flytgränsen	Lower limit of viscous flow (liquid limit)
Klibbgränsen	Sticky limit
Utrullgränsen	Rolling limit (plastic limit)
Gränsen för sammanpackbarhet	Cohesion limit
Krympningsgränsen	Shrinkage limit

Den öfre trögflytbarhetsgränsen definierade den övre gränsen mellan flytande och plastisk form. Denna definierades som vattenkvoten då en fåra i en lerfylld skål sluts inom en halv minut. Vattentäthetsgränsen var en gräns som Atterberg utan vidare undersökning förde vidare från tidigare forskare och definierade den vattenkvot då leran inte längre suger upp vatten genom uppblötning. Atterberg bedömde att denna låg strax under den öfre trögflytbarhetsgränsen.

Den nedre trögflytbarhetsgränsen, eller av Atterberg enbart också kallad flytgränsen, definierades som vattenkvoten då en fåra i en lerfylld skål sluts genom ett antal upprepade häftiga slag mot handens insida.

Klibbgränsen definierades som den vattenkvot då en lera precis inte klibbar fast vid en metall, exempelvis en spatel. Klibbgränsen var viktig inom jordbruket då lerjordarna behöver vara bearbetningsbara, plastiska, men däremot inte klibba fast mot jordbruksredskapen.

Utrullgränsen, även av Atterberg kallad nedre plasticitetsgränsen definierades som vattenkvoten då en lera kunde med fingrarna rullas ut till fina trådar utan att smulas sönder.

Gränsen för sammanpackbarhet definierades som vattenkvoten då små klumpar av lera inte lät sig fästas till varandra vid sammanpackning.

Krympningsgränsen definierades som den vattenkvot då leran vid uttorkning inte längre minskar i volym.

Atterberg (1916) justerade sina konsistensgränser till lättflytgränsen, trögflytgränsen, skakflytgränsen, stötflytgränsen (tidigare nedre trögflytbarhetsgränsen eller flytgränsen), klibbgränsen, utrullgränsen och krympningsgränsen. Särskilt övergången mellan plastisk och halvflytande var mer detaljerad.

Atterberg definierade vidare plasticitetsdifferensen, nu kallad plasticitetstalet, som differensen mellan flytgränsen och utrullgränsen. Plasticitetsdifferensen var särskilt viktig inom den keramiska industrin där en hög plasticitet innebar att en lera kunde bearbetas under längre tid innan uttorkning. Inom jordbruket fanns i motsats behov av lera med låg plasticitet.

Atterberg hade i mitten av 1910-talet blivit internationellt erkänd som jordartsforskare då hans förslag till kornstorleksindelning blivit antagen som internationell standard vid en konferens i Berlin år 1913 (Bjerrum och Flodin, 1960). Atterberg redovisade även sina arbeten på tyska,

inklusive hans arbeten om konsistensgränserna. Dessa två faktorer är högst sannolikt en bidragande orsak till varför Terzaghi (1925) i den tyska läroboken Erdbaumechanik införde Atterbergs konsistensgränser i den internationella geotekniken. Atterbergs konsistensgränser kom genom detta att bli allmänt accepterad inom geotekniken.

3.2 SJs finlekstal

I Sverige fick Statens Järnvägars geotekniska kommission stort genomslag för de geotekniska arbeten som kom att utföras från 1920-talet och framåt. I kommissionens slutbetänkande (SJ, 1922), d v s innan publicering av Terzaghis lärobok, rekommenderades användningen av några av Atterbergs konsistensgränser. De utarbetade däremot också en annan parameter, finlekstalet, som på 1950- och 1960-talen kom att omarbetas till ett flytgränsvärde.

Kommissionen särskilde dock på flytgränsen och finlekstalet. Enligt slutbetänkandet bestämdes ett antal av Atterbergs konsistensgränser, däribland flytgränsen, endast vid påträffande av torrskorpelera vid utförande av geotekniska fältundersökningar. Flytgränsen föreslogs bestämmas enligt Atterbergs metod, d v s att man i en porslinsskål formade en fåra i leran som genom ett antal slag mot handen skulle sluta sig. Denna metod att bestämma flytgränsen förefaller varit något man endast utförde i fält, innan prover tagits in till laboratorium. Kommissionen rekommenderade dock att där lämpligt ersätta dessa konsistensgränser med de s k hållfasthetstalen, vattenkvoterna och finlekstalet hos torrskorpeleran. För den lösare underliggande leran verkar konsistensgränserna i fält inte ha bestämts. Istället bestämdes endast hållfasthetstalet, vattenkvoten och finlekstalet i laboratorium.

Finlekstalet syftade till att med en enkel och snabb metod bestämma jordens finleksgrad, d v s ett mått på hur finkornigt jordmaterial var (kornstorleken). Ju finkornigare jord, desto mer vatten kan den hålla vid lika konsistens. Den metod som kommissionen valde var att använda den fallkonapparat som tagits i bruk för att bestämma skjuvhållfastheten, kallad konsistens av kommissionen. En detaljerad beskrivning av konförsökets utveckling och utformning ges i SGF Notat 2:2018.

Hållfasthetsbestämning med fallkonapparaten utformades så att man genom olika konviktter och spetsvinklar på konerna kunde beräkna ett relativt hållfasthetsvärde. Ju större konintryck, desto lägre hållfasthetsvärde. Som standardkon valdes en kon med 60 graders spetsvinkel och 60 grams vikt. Provnings utfördes på ”ostörda” och omrörda prover.

Som jämförelsebas för finlekstalet valdes ett visst hållfasthetstal som motsvarade 10 mm konintryck med standardkonen. Den vattenkvot som leran för det fallet uppmättes till, definierades som lerans finlekstal.

Genom att systematiskt utföra hållfasthetsbestämningar på ett 20-tal omrörda leror där vattenkvoterna varierades, kunde kommissionen utarbeta tabeller och grafer med en bedömd tillräckligt noggrann korrelation mellan vattenkvot och hållfasthet (konsistens). De kunde med denna korrelation utföra endast en bestämning av en leras hållfasthet (konsistens) i omrört tillstånd, för att räkna fram lerans finlekstal. För att få tillräcklig noggrannhet tog de fram fyra olika korrelationer beroende på lerans bedömda finlekstal. Denna s k enpunktsbestämning innebär en stor fördel eftersom man inte behövde göra flera konförsök på leran med olika vattenkvoter, s k flerpunktsbestämning, vilket var och är en tidskrävande process.

Enpunktsbestämningen gjordes utifrån grafer som visade ett s k jämförelsetal som funktion av finlekstalets storleksordning. Finlekstalet beräknades sedan utifrån uppmätt vattenkvot och detta jämförelsetal enligt:

$$w_F = \frac{w}{J} \quad \text{Ekv. 2}$$

där w_F = finlekstalet
 w = Uppmätt vattenkvot
 J = Jämförelsetal

Fördelen med denna enpunktsbestämning var att man i geotekniska undersökningar endast behövde göra en enkel omräkning, genom ovan beskrivna sätt, för att erhålla finlekstalet då man utförde hållfasthets- och vattenkvotsbestämningar.

Kommissionen anmärkte att "trots att finlekstalet inte ger ett verkligt mått på materialets finlek, har det dock en mycket stor betydelse för en ungefärlig bedömning av denna." (SJ 1922). Ingen koppling gjordes till Atterbergs flytgräns. Även Ekström (1927) gav en detaljerad genomgång av finlekstalet och Atterbergs flytgräns utan att göra någon koppling mellan de två.

Även om kommissionen inte i klartext uttalade finlekstalets sammanhang med Atterbergs flytgräns, valdes däremot sannolikt konintrycket 10 mm för att någorlunda motsvara den flytgränsbestämning Atterberg hade föreslagit. Detta torde vara fallet eftersom det inom jordartsforskningen var väl känt att en leras vattenbindningsförmåga, d v s finleksgraden, tydligast påverkade övergången mellan plastisk och flytande konsistens. Finleksgraden påverkar inte plasticitetsgränsen, klibbgränsen eller någon annan av Atterbergs gränser lika tydligt.

3.3 Casagrandes stöflytgräns

Som tidigare beskrivits införde Terzaghi (1925) Atterbergs konsistensgränser i internationell geoteknik. Hans fortsatta publiceringar i USA, exempelvis Terzaghi (1926), beskriver konsistensgränserna relevans och påverkan på lerors deformations- och hållfasthetsegenskaper.

Enligt Terzaghi fanns då i princip alla nödvändiga laboratoriemetoder för att undersöka en jords geotekniska egenskaper, men eftersom dessa metoder tog relativt lång tid att utföra fanns ett stort behov av att snabbt och preliminärt kunna klassificera jordar. Terzaghi rekommenderade för denna preliminära klassificering Atterbergs flytgräns, plasticitetsgräns och krympningsgräns. Terzaghi (1926) noterar dock att konsistensgränsernas korrelation med jordens geotekniska egenskaper är komplexa och nästintill omöjliga att med säkerhet korrelera, och drar slutsatsen att de inte bör användas för mer än en preliminär klassificering av jordens egenskaper.

På Terzaghis uppmaning utförde Casagrande, som var Terzaghis medarbete och student vid MIT i USA, fortsatt forskning kring konsistensgränserna med särskild inriktning på att försöka ta fram en standardiserad och upprepningsbar bestämning av Atterbergs flytgräns. Efter ett antal års arbete föreslog Casagrande (1932a) en apparat för att minimera felkällor i bestämningen av flytgränsen. Apparaten, som syftade till att mekanisera Atterbergs handmetod, bestod av en mässingsskål fäst till ett stativ. Genom en vev lyftes skålen till en viss höjd varpå den repetitivt föll ned på stativets bottendel. Casagrande definierade flytgränsen då fåran i leran, formad med ett standardiserat skårverktyg, slöts 1/2 tum (12,7 mm) efter 25 upprepade slag mot stativets bottendel.

Försök utfördes med olika vattenkvoter varpå resultaten plottades i ett diagram med antal slag på abskissan i logaritmisk skala och vattenkvoten på ordinatan i aritmetisk skala. Utifrån

punkterna ritas en rak medelvärdeslinje som Casagrande benämnde flytkurva. Flytkurvan kan matematisk beskrivas som:

$$w = -F \times \log N + C \quad \text{Ekv. 3}$$

där w = vattenkvot (% eller dec)
 F = flytindex (flytkurvans lutning)
 N = antal slag (st)
 C = konstant (% eller dec)

Normalt förfarande enligt Casagrande var att använda denna flerpunktsbestämning för att med hjälp av flytkurvan läsa av stötflytgränsen. Enligt Rao (1968) började man under 1950-talet i USA, Storbritannien och Kanada ta fram förslag på enpunktsbestämningar med Casagrandes stötflytgränsapparat.

Enligt Casagrande (1932a) representerar antalet slag jordprovets skjuvhållfasthet i omrört tillstånd. Utifrån detta drog Casagrande slutsatsen att alla jordar har samma hållfasthetsvärde vid flytgränsen, men att hållfastheten vid plasticitetsgränsen däremot kunde variera stort mellan olika jordar. Casagrande (1932a, 1932b) påpekade också att eftersom försök med flyt- och plasticitetsgränserna utförs på omrörda leror kan de omöjligt reflektera mekaniska, d v s geotekniska, egenskaper av leran med intakt struktur.

Efter Casagrandes (1932a) förslag till en standardiserad flytgränsapparat infördes denna på kort tid i många länder inom kort tid. Apparaten utformades dock något olika, huvudsakligen med varierande material på apparatens bottendel som skålen slår mot, samt skålens fallhöjd. Särskilt stor skillnad fanns mellan USA och Storbritannien. Det visade sig även finnas skillnader i hur laboratoriepersonal utförde försöket, exempelvis hur skärningen av fåran utfördes (Casagrande, 1958).

Trots att jämförande försök i de flesta fall gav liknande värden på flytgränsen gjorde Casagrande (1958) ett antal förtydliganden av bland annat bottendelens materialtyp. Casagrande påpekade också att apparaten i princip utsätter jordmaterialet för ett dynamiskt skjuvbrott, vilket är en stor nackdel för finkorniga jordar som har olika grader av dilatans vid skakning. Detta, tillsammans med den variation som fanns mellan olika länder, ledde Casagrande (1958) till att efterfråga en bättre metod för bestämning av flytgränsen. Han indikerar att ett förenklat direkt skjuvförsök, eller ett liknande hållfasthetsförsök, kunde vara möjligt men sammanfattar att inget sådant försök har kunnat utvecklas som är lika enkelt och snabbt genomfört som Casagrandes metod.

3.4 Rudolf Karlssons konflytgräns

Från 1920-talet och under en längre tid därefter användes och redovisades i Sverige både flytgränsvärdet och finlekstalet i geotekniska undersökningar. Från 1930-talet och framåt bestämdes flytgränsen med Casagrandes flytgränsapparat, medan finlekstalet bestämdes med konapparat. Även om finlekstalet i praktiken så småningom kom att ersätta stötflytgränsen (Beskow, 1951), tycks dessa ha levt parallellt under en längre tid då exempelvis Fredén (1956) redovisar forskning kring Casagrandes flytgräns och försök till enpunktsbestämning.

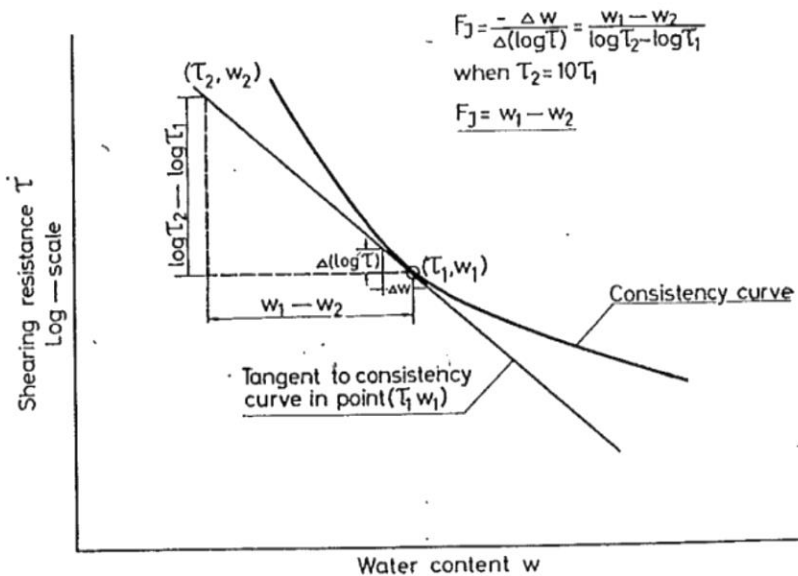
Studier utförda på Statens Geotekniska Institut under 1950-talet visade däremot att SJs kommissions enpunktsbestämning inte var tillräckligt noggrann. Att dessutom Casagrande (1958)

efterfrågade en bättre metod än stötflytgränsen ledde Rudolf Karlsson, då laboratoriechef på SGI, till att sammanställa och publicera forskning kring finlekstalet internationellt (Karlsson 1961, 1963).

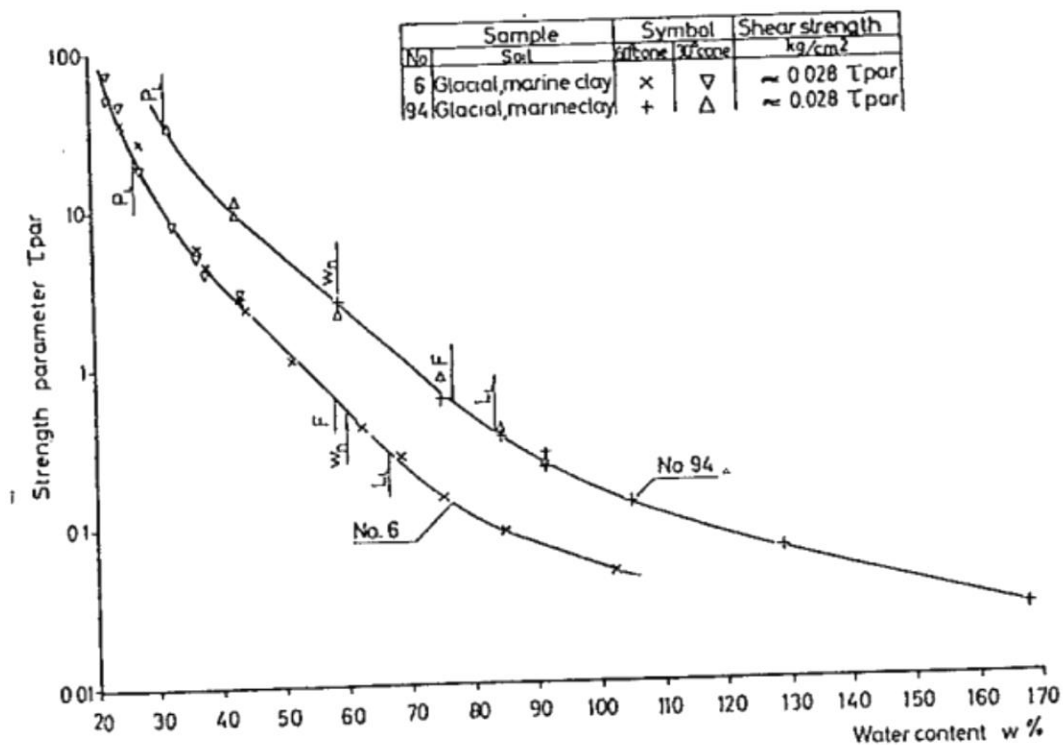
I Karlsson (1961), som är bakgrunden till vår nuvarande enpunktsbestämning av konflytgränsen, sammanställdes resultat från ett antal försök på olika jordarter. Förutom jämförelser mellan Casagrandes stötflytgräns och finlekstalet bestämd med konapparaten, gjordes även försök med laboratorievinge för kalibrering av fallkonförsöket för omrörda leror. Karlssons föreslagna enpunktsbestämning baserades på att det fanns ett unikt samband mellan uppmätt hållfasthet och vattenkvot i omrört tillstånd för en lera.

Casagrande (1932) definierade flytkurvan som sambandet mellan antal slag och vattenkvot, och vidare att antalet slag var proportionellt med lerans hållfasthet, vilket innebar att detta kunde ersättas med en hållfasthetsbestämning gjord med konapparaten. Principen var densamma som i SJ (1922). Karlsson (1961) använde den hållfasthetsberäkning av fallkonförsöket presenterat av Hansbo (1957) där hållfastheten beräknas utifrån konens vikt, konintryck och en empirisk konfaktor.

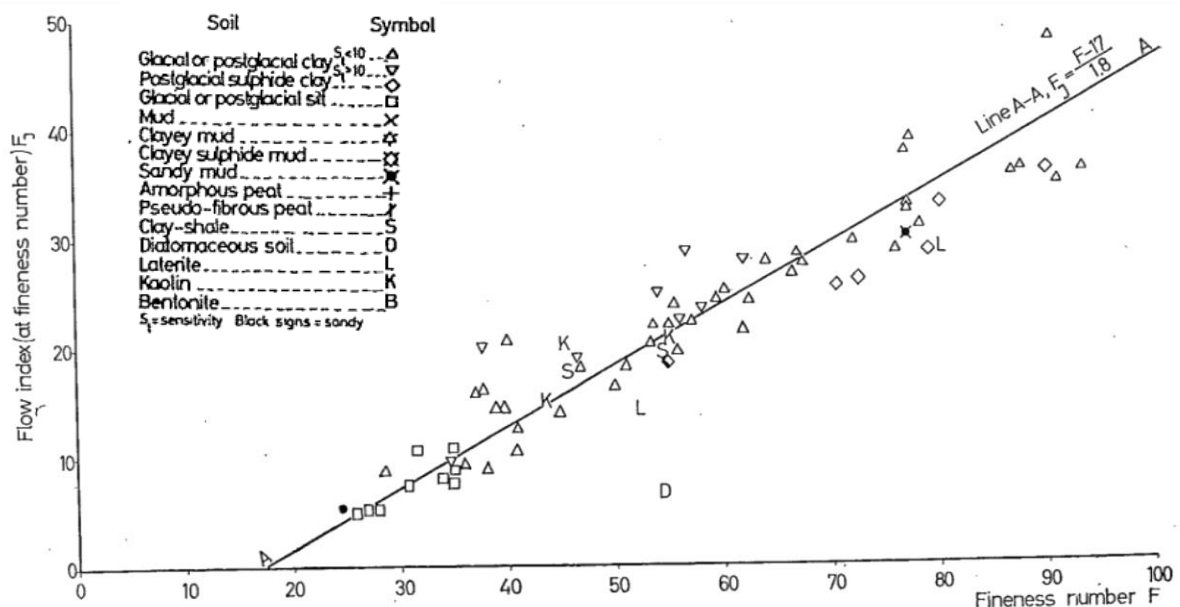
Flytkurvan bestämd med fallkonen benämndes av Karlsson (1961) istället konsistenskurva, och dess lutning vid finlekstalet benämndes konsistenstalet, F_j . Konsistenstalet är alltså skjuvhållfasthetens variation vid förändring av jordens vattenkvot i punkten på kurvan som motsvarar finlekstalet (konflytgränsen). Definitionen av konsistenstalet visas i Figur 4 och ett exempel på en konsistenskurva återges i Figur 5. Konsistenstalet för ett större antal jordprover visade sig öka proportionellt med värdet på finlekstalet, se Figur 6.



Figur 4. Definition av konsistenstal (ur Karlsson, 1961).



Figur 5. Exempel på konsistenskurva för en glaciallera (ur Karlsson, 1961). F = finlektal (konfliktgräns), L = stötflytgräns (Casagrande) och w_n = naturligt vattenkvot.



Figur 6. Variation av konsistenstalet, F_j , som funktion av finlekstalet (ur Karlsson, 1961).

Följande samband mellan konsistenstalet och finlekstalet utvärderades, se Figur 6:

$$F_J = \frac{w_L - 17}{1,8} \quad \text{Ekv. 4}$$

Utifrån en uppmätt vattenkvot relativt nära konflytgränsen, kunde en enpunktsbestämning härledas från ovan angivna samband enligt följande, se även Figur 5.

$$F_J = \frac{w - w_L}{\log(\tau_w / \tau_{wL})} = \frac{w - w_L}{\log(i^2 / 10^2)} \quad \text{Ekv. 5}$$

Ekvation 4 och 5 ger:

$$w_L = M \cdot w + N \quad \text{Ekv. 6}$$

där
$$M = \frac{1,8}{1,8 + 2 \log\left(\frac{i}{10}\right)}$$

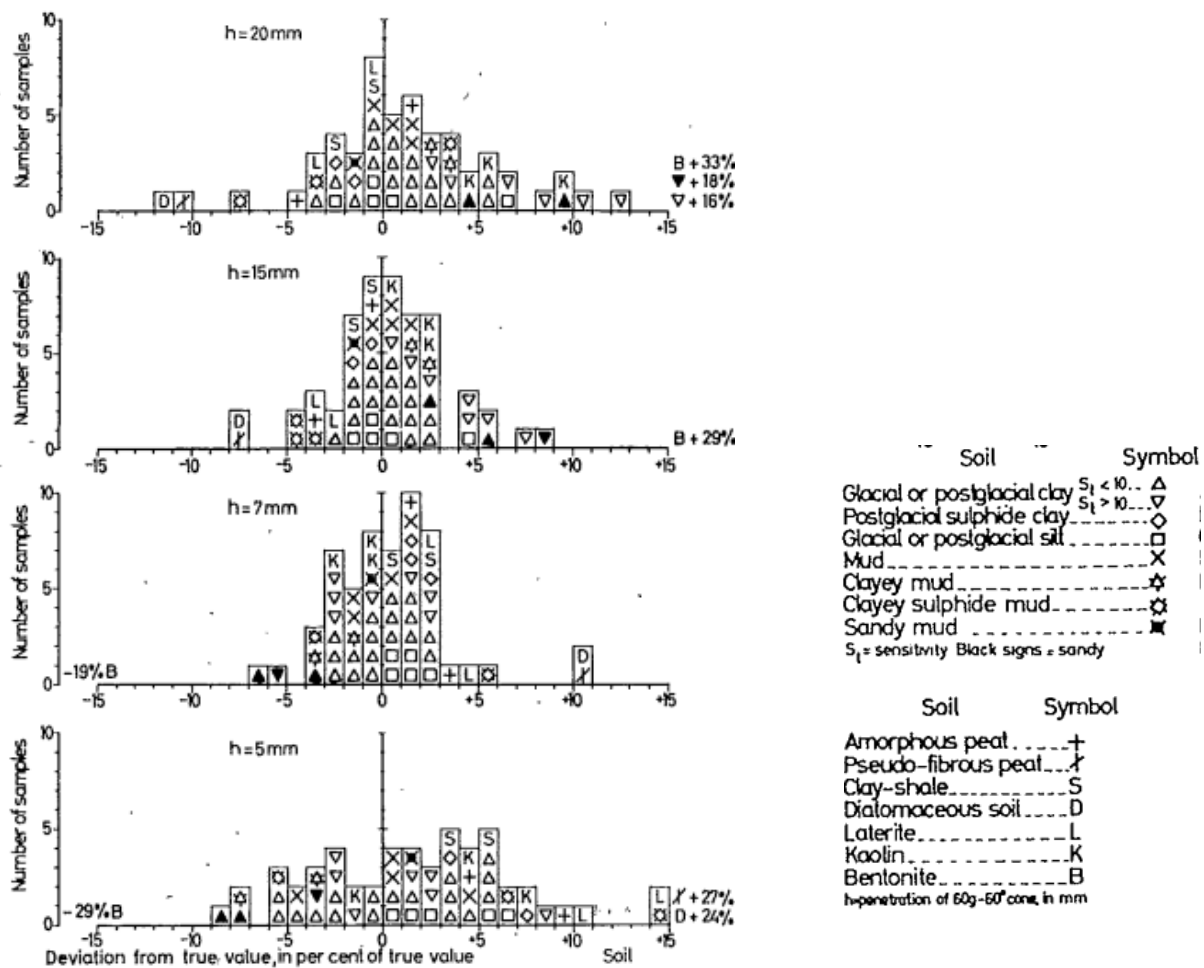
$$N = \frac{34 \log\left(\frac{i}{10}\right)}{1,8 + 2 \log\left(\frac{i}{10}\right)}$$

Tabellvärden för M och N utarbetades och återges i kapitel 4 i föreliggande notat.

Karlsson (1961) gjorde jämförelser mellan enpunktsbestämningen enligt Ekvation 6 och uppmätt finlekstal från den faktiska konsistenskurvan där flerpunktsbestämning använts. Totalt jämfördes 56 st jordprover, varav:

- 19 st prover av oorganisk lera med $S_t < 10$
- 8 st prover av oorganisk lera med $S_t > 10$
- 5 st prover av siltjordar
- 3 st prover av sulfidlera
- 10 st prover av gyttja
- 11 st prover av torv, bentonit, kaolin etc.

Jämförelsen mellan flerpunktsbestämningen och den föreslagna enpunktsbestämning visas i Figur 7. På grund av för stora skillnader och för stor spridning vid små respektive stora konintryck begränsades enpunktsbestämningen till konintryck mellan 7 och 15 mm. Begränsningen krävdes också eftersom konsistenskurvan inte heller var linjär även i den semi-logaritmiska skalan, se exempel i Figur 5, medan konsistenstalet antogs vara approximativt linjär inom det begränsade område kring finlekstalet. Karlsson (1961) angav att felet inom intervallet 7 – 15 mm vid enpunktsbestämning var mindre än $\pm 5 \%$.



Figur 7. Jämförelse mellan enpunktsbestämning och flerpunktsbestämning (ur Karlsson, 1961).

För leror med mycket hög flytgräns, leror med mycket hög sensitivitet, styva leror och för bentonitleror samt för torv bedömdes metoden ge för stora fel. För dessa jordar rekommenderades att man alltid utförde flerpunktsbestämning.

Karlsson (1961) jämförde vidare uppmätta konflytgränser med stötflytgränser enligt Casagrande (1932). Resultatet visade att de var åtminstone tillräckligt likvärdiga, dock inte för gyttjiga eller organiska leror eller siltjordar. En mer omfattande jämförelse gjordes av Karlsson (1974) som i princip visar samma resultat. Studier av leror inom Göta älvdalen har däremot visat att för högsensitiva leror kunde konflytgränsen vara betydligt lägre än stötflytgränsen (Caldenius & Lundström, 1956).

Karlssons föreslagna enpunktsbestämning infördes i SGFs Laboratieanvisningar år 1974, Karlsson (1974, 1981) och i svensk standard SS 02 71 20. Veterligen har inga jämförelser mellan denna enpunkts- och flerpunktsbestämning utförts sedan Karlsson (1961).

Karlssons arbete under sent 1950-tal och tidigt 1960-talet visade på ett systematiskt sätt att finlekstalet var tillräckligt lika Casagrandes flytgräns, och man införde därför begreppen konflytgräns, istället för finlekstalet, och stötflytgräns. Begreppet finlekstal levde dock vidare under lång tid. Tidigare hade finlekstalet förkortats F men från SGI:s beteckningssystem publi-

cerat 1959 förkortades stötflytgränsen w_L och konflytgränsen eller finlekstalet w_F . Dessa förkortningar hängde kvar fram till och med början av 1980-talet, exempelvis i Handboken BYGG (1972) och i SGF:s beteckningssystem från exempelvis 1974 och 1980. Nu förkortas konflytgränsen w_L (L = eng. liquid limit).

3.5 Internationell praxis

Casagrandes stötflytgräns spreds snabbt internationellt efter publiceringen 1932 och har i de flesta länder använts sedan dess. I princip är utförandet mellan olika länder lika, förutom att bottendelens material kan variera. Exempelvis finns varianter med hårdplast och olika typer av hårda träslag. Det finns även motoriserade apparater.

Huvudsakligen föredras flerpunktsbestämningar, men enpunktbestämningar finns också framtagna. Den amerikanska standarden ASTM D4318 (1983/2014) tillåter exempelvis en enpunktbestämning för slag mellan 20 och 30.

Karlssons internationella publiceringar ledde ett antal länder, däribland Norge, Finland, Kanada, Storbritannien, Frankrike, Indien, Nya Zeeland, Kina och Japan, till att inarbeta konflytgränsen som alternativ eller föredragen metod. Val av konvinkel, massa och konintryck varierar däremot något, se översikt i Tabell 2. Samtliga dessa länder tillåter, med vissa begränsningar, enpunktbestämningar av konflytgränsen även om flertalet förordar flerpunktsbestämningen.

Tabell 2. Internationell historisk definition av konflytgränsen.

Land	Konvinkel (°)	Konmassa (gram)	Konintryck vid flytgränsen (mm)	Hållfasthet (kPa) *
Sverige	60	60	10,0	1,59
Norge	60	60	10,0	1,59
Finland	60	60	10,0	1,59
Storbritannien	30	80	20,0	1,57
Kanada	60	60	10,0	1,59
Frankrike	30	80	17,0	2,17
Japan	60	60	11,5	1,20
Indien	31	148	25,4	1,80
Nya Zeeland	30	80	20	1,57
Kina	30	76	17	2,06

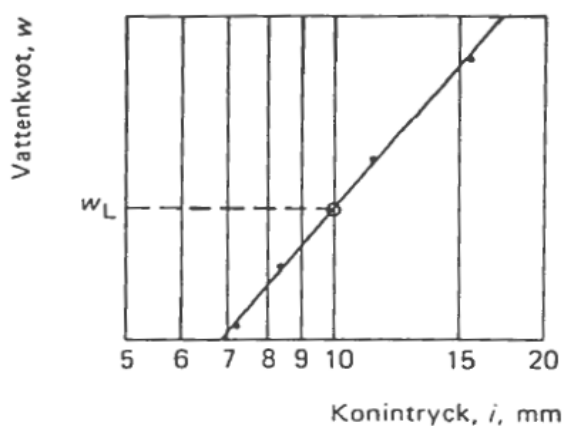
* Beräknad med Karlssons (1961) konfaktorer.

4 SS 027120 (F D SVENSK STANDARD) – SS-EN 17892-12

Tidigare svenska standard, SS 027120, beskriver hur både en punktsbestämning och en flerpunktsbestämning utförs med hjälp av en 60g-60°-kon. Standarden innehåller en kravspecifikation på kon och blandningskål. I beskrivningen av provberedning ges två olika alternativ för

provberedning, en för naturfuktig jord och en för jord som innehåller material större än 0,4 mm, som då skall lufttorkas, sönderdelas och siktas innan det fuktas upp och provas. I SS-EN 17892-12 skall provet istället våtsiktas genom 0,4 mm sikt och därefter dekanteras och torkas till lämplig vattenkvot i maximalt 50 °C.

Provet rörs om och blandas i blandningsskålen, varefter ytan planas av mot skålens ovankant. Konen sänks ner till jordprovets yta och frigörs, varefter konintrycket avläses efter 5 sekunder. Om konintrycket ligger utanför 7,0 - 14,9 mm så måste vattenkvoten justeras, annars omrörs provet på nytt och konintrycket bestäms med mellanliggande omrörningar till dess samma eller minskande konintryck uppmäts. Sedan tas två delprover ut till vattenkvotsbestämning. Vid enpunktsbestämning beräknas konflytgränsen sedan med hjälp av vattenkvoten utifrån ekvation och tabell som visas i 5.2. Vid flerpunktsbestämning torkas provet ut eller fuktas upp till ytterligare minst två vattenkvoter som provas. Vattenkvoterna plottas sedan linjärt mot de logaritmiska konintrycken och linjens skärning med 10 mm konintryck ger konflytgränsen, se Figur 8.



Figur 8. Bestämning av konflytgränsen med flerpunktsmetoden (ur SS 027120).

I SS-EN ISO 17892-12 ”Bestämning av flytgräns och plasticitetsgräns” anges flerpunktsmetoden som standardmetod. Det finns dock utrymme i den för en enpunktsbestämning, förutsatt att jordarnas plasticitetsegenskaper är väl kända och att robusta korrektionsfaktorer är framtagna.

Materialet och utrustningen som används till provning av flytgränsen, vare sig Casagrandes apparat eller konapparaten, ska inte bestå av material som reagerar kemiskt med jorden.

Provning av flytgränsen, och allmänt konsistensgränser, bör utföras på så färskas prover som möjligt utan väntetid. Detta för att undvika uttorkning och oxidering. Det är viktigt att provet är helt omrört och att luft inte blandas in vid omrörning.

SS-EN ISO 17892-12 gäller som svensk standard från 2018 och den skiljer sig från tidigare svensk standard SS 027120 främst genom att den föreskriver flerpunktsmetoden som standardmetod. Den är också mer detaljerad i beskrivningen av hur provberedning och provning ska gå till. Konapparaten som beskrivs i standarden är av en typ som är ovanlig i Skandinavien, men vanlig i länder som enbart använder fallkonen till att bestämma konflytgränsen. I

denna typ av apparat låses konen 5 sekunder efter släppet och en noggrann mätning av konintrycket kan göras mot den låsta överdelen av konens stav.

Vid rapportering skall anges om en- eller flerpunktsmetoden använts för att bestämma konflytgränsen. Konens vinkel och vikt skall anges och om enpunktsmetoden använts så ska konintryck och korrektionsfaktorer anges.

I de fall material större än 0,4 mm siktats bort är det viktigt att följa beredningsproceduren så att andelen bortsiktat material av ursprungligt prov kan rapporteras.

5 INVERKANDE FAKTORER

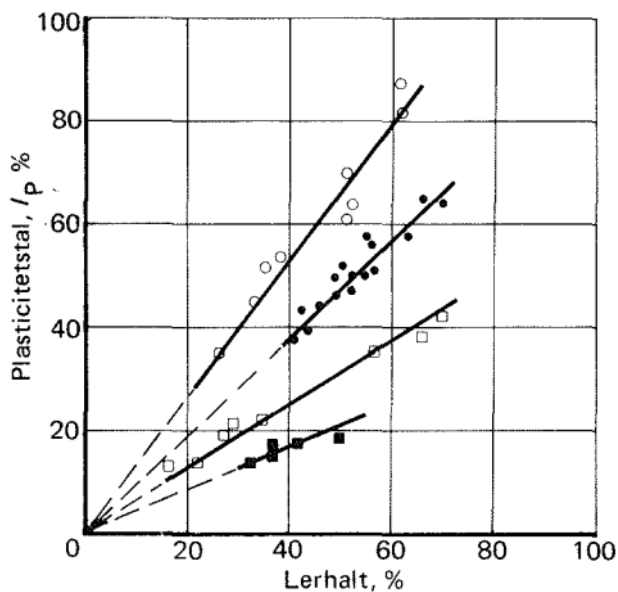
5.1 Inverkande faktorer av jordens uppbyggnad

Konsistensgränserna beror på jordens vattenbindningsförmåga. Vattenbindningsförmågan beror i sin tur på lerhalt, typ av lermineral och dess specifika yta, organiska kolloider samt saltinnehåll i porvattnet (elektrolythalten).

Det vanligast förekommande lermineralet i skandinaviska leror, både glaciala och postglaciala, är illit. Det förekommer dock nästan alltid en mindre andel andra lermineral, bland annat klorit, kaolinit och även andra partiklar inom lerfraktionen, d v s partikelstorlek $< 2 \mu\text{m}$, som däremot inte är lermineral, exempelvis kvarts, fältspat, amfibol och kalcit (Pusch, 1974).

Ett mått på hur typen av lermineral vid en viss lerhalt påverkar jordens plasticitet är aktivitetstalet. Skempton (1953) definierade aktivitetstalet, a_c , som kvoten mellan plasticitetstalet I_p (%) och lerhalt (%), d v s ju högre aktivitetstal ett viss lera har, desto större vattenbindningsförmåga givet en viss lerhalt. Ju högre lerhalt en jord har, desto högre plasticitetstal, se exempel i Figur 9 samt exempelvis Seed et al (1964). Ett ökande plasticitetstal innebär vidare allra oftast en ökande flytgräns eftersom plasticitetsgränsen för svenska oorganiska leror inte avviker särskilt mycket från ca 20 – 25 %. Skempton använde ursprungligen flytgränsen men övergick sedan till plasticitetstalet för definition av aktivitetstalet (Skempton, 1953). För leror med organiskt innehåll är flytgränsen, liksom plasticitetstalet, högre. Generellt gäller att ju högre organiskt innehåll, d v s mängden organiska kolloider, desto högre plasticitetsgräns och flytgräns.

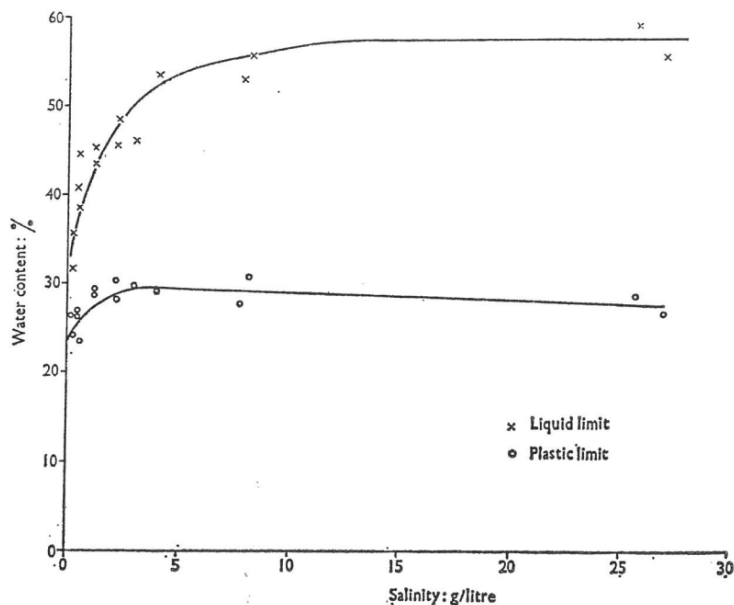
Lermineralet kaolinit ger upphov till en lågaktiv lera ($a_c < 0,75$), medan lermineralet montmorillonit, även kallat smektik, ger upphov till en högaktiv lera ($a_c > 1,25$). De skandinaviska illitiska oorganiska lerorna tillhör huvudsakligen de låg- och mellanaktiva lerorna (mellanaktiva leror har $a_c = 0,75 - 1,25$). Gyttjiga och högt sulfidhaltiga leror har hög aktivitet medan sensitiva leror, särskilt kvickleror, har låg aktivitet.



Figur 9. Förhållanden mellan lerhalt och plasticitetsal för fyra olika leror (ur Skempton, 1953).

Porvattnets elektrolythalt, i dagligt tal salthalt, har stor påverkan på en leras flytgräns. Med benämningen salt menas i dagligt tal oftast natriumklorid, NaCl. Vad gäller lerors porvatten och dess kemiska sammansättning finns däremot också ett flertal andra joner som påverkar konsistensgränserna. Exempelvis har kaliumjoner en långt större påverkan på en leras flytgräns jämfört med natrium. Det är därför lämpligt att använda benämningen elektrolythalt för att täcka in samtliga förekommande joner i leror. De vanligaste förekommande (positivt laddade) jonerna i skandinaviska leror är natrium, magnesium, kalcium och kalium. Lerors elektrolythalt kan förändras över tid, exempelvis vid urlakning som resulterar i högsensitiva leror.

I princip gäller att ju högre elektrolythalten är, desto större attraherande krafter råder mellan lerpartiklarna. Detta innebär att en leras skjuvhållfasthet ökar med ökande elektrolythalt med oförändrad vattenkvot, och att en leras flytgräns ökar med ökande elektrolythalt. Detta gäller dock endast upp till en viss nivå varefter flytgränsen blir oberoende av ännu högre elektrolythalt, se exempel i Figur 10. Plasticitetsgränsen påverkas inte lika mycket av ökad elektrolythalt. På samma sätt blir då även en leras aktivitet högre ju högre elektrolythalten är eftersom lerhalten är oförändrad.



Figur 10. Exempel på flyt- och plasticitetsgränsernas beroende av elektrolythalten i gram per liter porvatten (ur Torrance, 1974).

5.2 Inverkande faktorer vid bestämning av flytgränsen

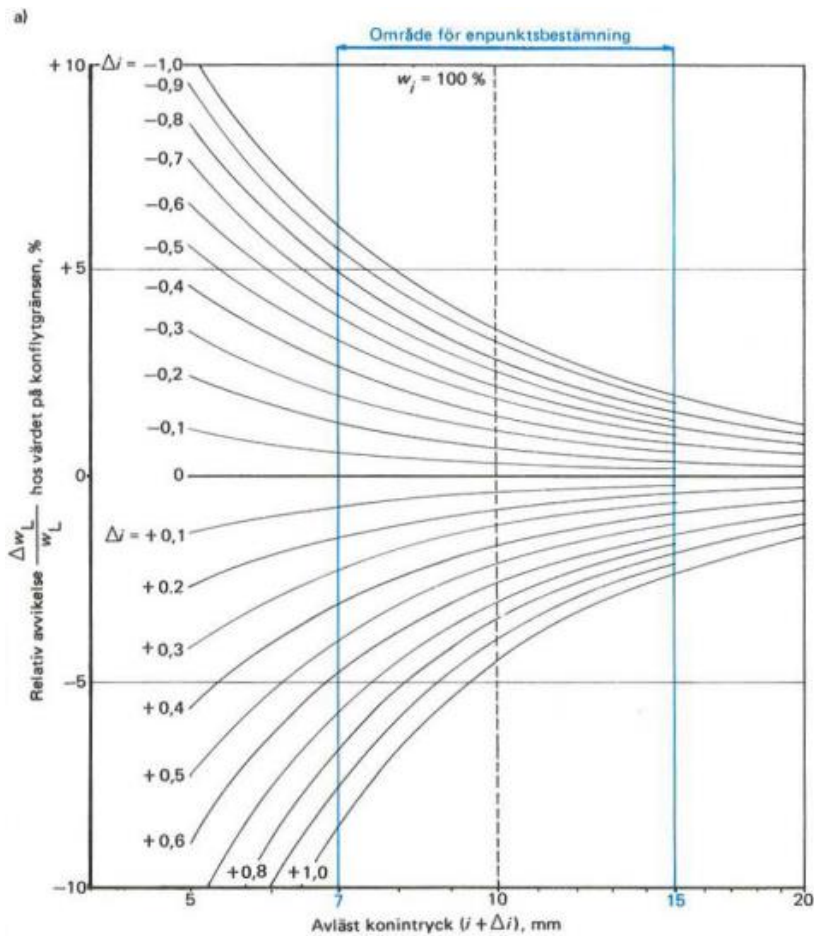
Uttorkning av en lera, vare sig lufttorkad eller ugnstorkad, medför oftast en viss minskning av både plasticitetsgränsen och flytgränsen (Casagrande 1932, Karlsson 1974). Detta gäller särskilt organiska leror och sulfidleror. Minskningen verkar däremot vara temporär då jorden kan återfå sina ursprungliga konsistensgränser efter några dygn.

Normal praxis i Sverige, åtminstone sedan 1960-talet, är att torka ut ett jordprov genom att använda en gipsplatta som snabbt suger åt sig jordprovets fukt. Hur detta eventuellt påverkar flytgränsvärdet har det veterligen inte utförts några studier av. Det kan dock tänkas att flytgränsvärdet till viss del ökas genom att gipsen ger jordprovet en högre skjuvhållfasthet. Det har även gjorts försök med uttorkning på papper, som inte släpper fibrer, och på glasplattor, men någon jämförande systematisk studie mellan olika torkmetoder har veterligen inte utförts.

Då uppblötning av jordprover krävs används ofta destillerat vatten, men vissa laboratorium använder också vanligt kranvatten. Effekten av detta har veterligen heller inte studerats men risk finns att flytgränsen sänks, särskilt vid användandet av destillerat vatten då porvattnets elektrolythalt sänks.

Lagring av prover kan i hög grad påverka lerors konsistensgränser på grund av exempelvis oxidation (Karlsson, 1974). Detta gäller särskilt organiska leror, sulfidleror och högsensitiva leror. Karlsson (1961) anger exempelvis att en oxiderad sulfidleras flytgräns kan vara mindre än halva värdet jämfört med dess ursprungliga flytgräns.

Andra faktorer som påverkar bestämningen av konflytgränsen är kopplad till själva utförandet och konapparaten. I samband med utarbetande av laboratorieanvisningar år 1974 gjordes en omfattande teoretisk och empirisk studie av effekten av felkällor vid bestämning av konflytgränsen. Grafer togs fram över hur flytgränsbestämningen påverkas av felaktigt konintryck, exempelvis ett avläsningsfel, konens massa och spetsvinkel samt konens initialplacering, se Figur 11 och 12.



$$w_L = M \cdot w_i + N \quad (3)$$

$$\text{där } M = \frac{1,8}{1,8 + 2 \lg \frac{i}{10}}$$

$$N = \frac{34 \lg \frac{i}{10}}{1,8 + 2 \lg \frac{i}{10}}$$

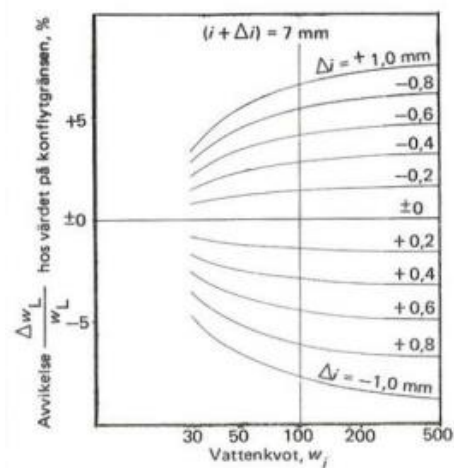
Enligt ekvation (3)

för utvärdering av konflytgränsen vid enpunktsbestämning ger en avvikelse Δi hos värdet på kontrycket följande avvikelse hos värdet på konflytgränsen.

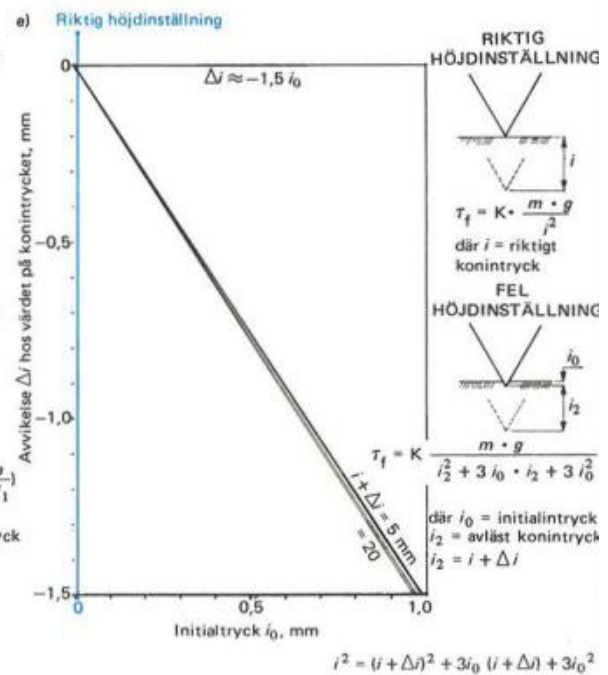
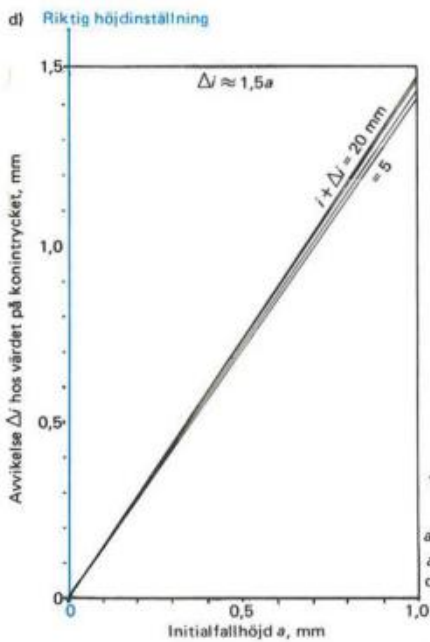
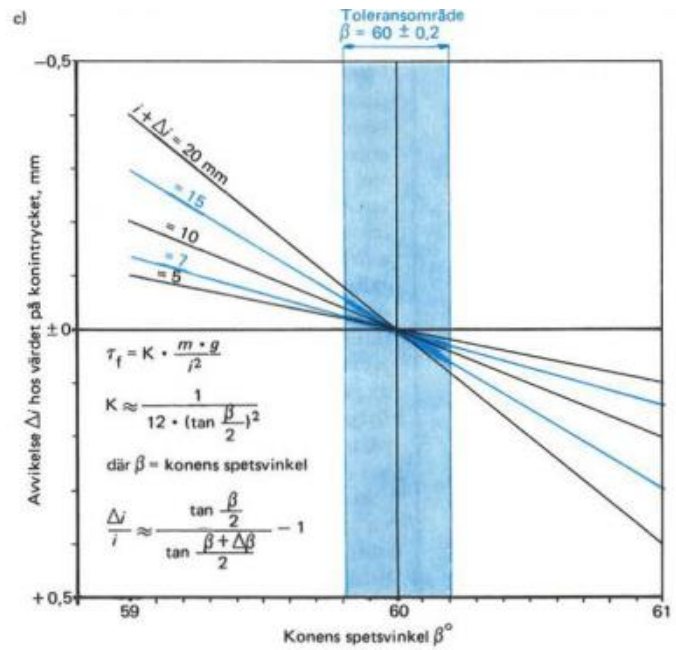
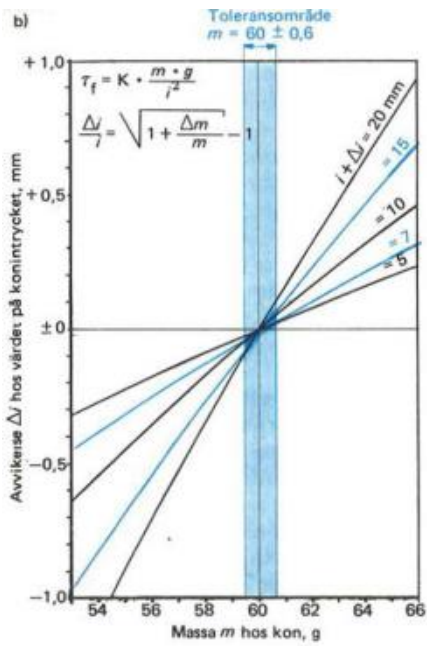
$$\frac{\Delta w_L}{w_L} = \frac{M^1 \cdot w_i + N^1}{M \cdot w_i + N}$$

$$\text{där } M^1 = \frac{1,8}{1,8 + 2 \lg \frac{i + \Delta i}{10}}$$

$$\text{och } N^1 = \frac{1,8 + 34 \lg \frac{i + \Delta i}{10}}{1,8 + 2 \lg \frac{i + \Delta i}{10}}$$



Figur 11. Inverkan av olika faktorer vid bestämning av konflytgränsen, a) felaktigt konintryck (ur Karlsson, 1974; SGF Laboratorieanvisningar del 6)

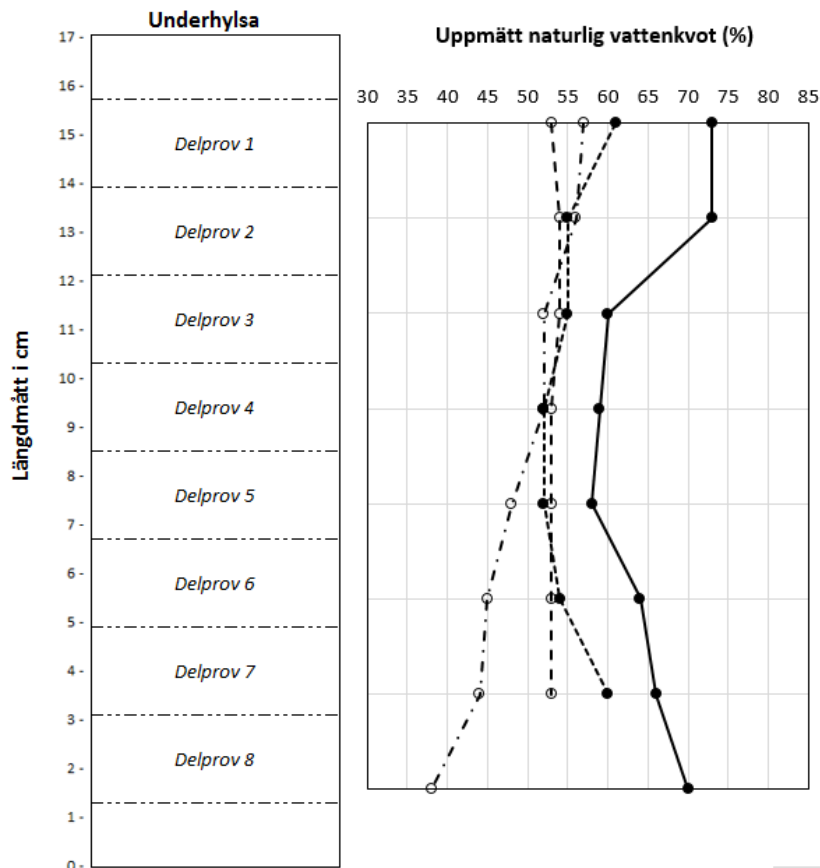


Figur 12. Inverkan av olika faktorer vid bestämning av konflytgräns, b) massa hos konen, c) konens spetsvinkel, d) initialfallhöjd hos konen, och e) initialintryck hos konen (ur Karlsson, 1974; SGF Laboratorieanvisningar del 6)

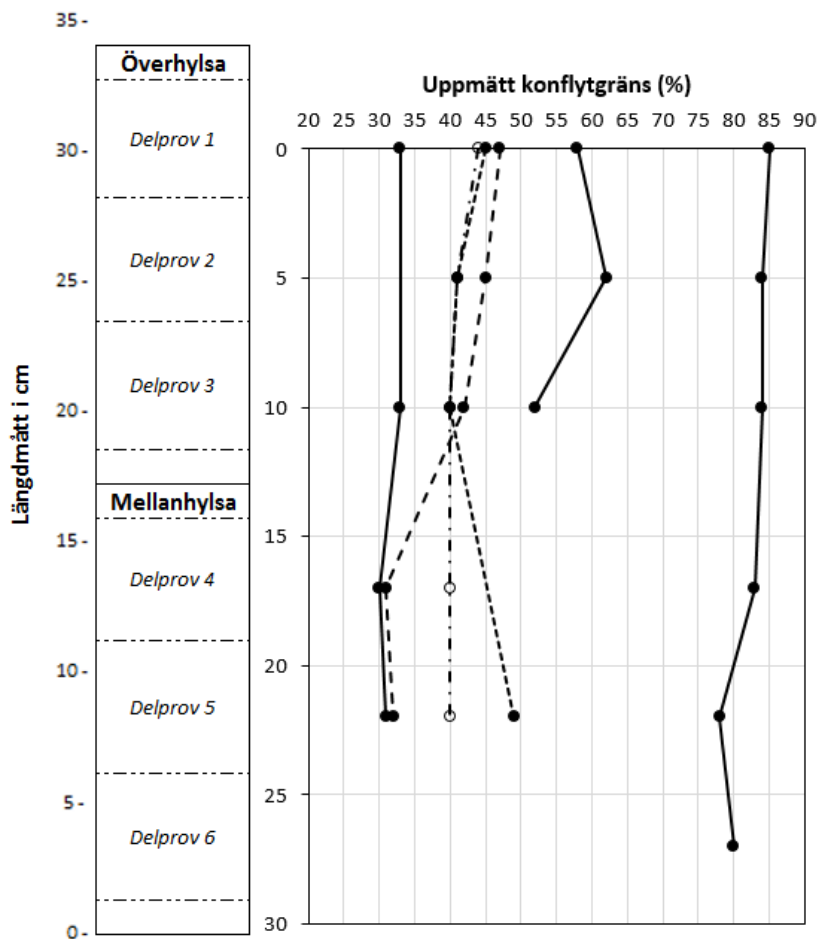
5.3 Naturliga variationer

Bestämning av en jords flytgräns har i sig inget egenvärde inom geotekniken, utan syftar till att klassificera och korreleras mot andra geotekniska parametrar. Det är därför värdefullt att tydliggöra en leras naturliga variation och påverkan på empiriska korrelationer vid varierande konflytgräns.

Exempel på en leras naturliga variation visas i Figur 13 och 14 där vattenkvot- och konflytgränsbestämningar har utförts på delprover från provhysla med 2 respektive 5 cm tjocklek.

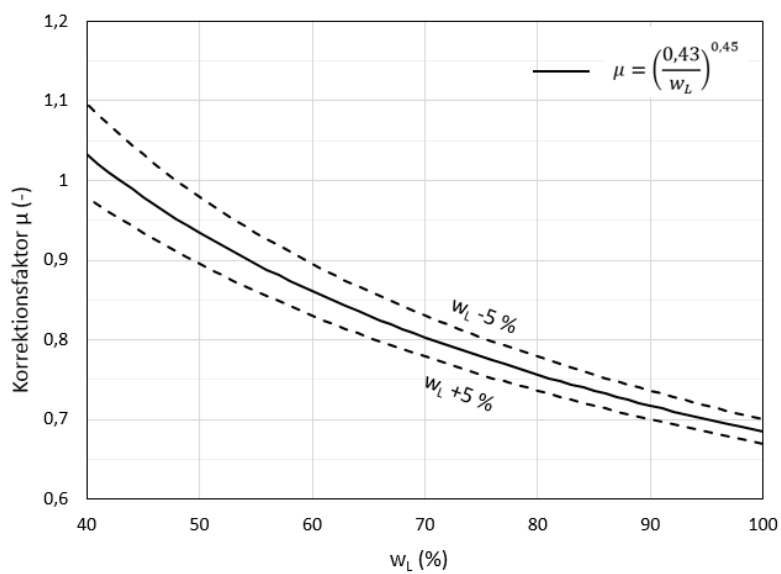
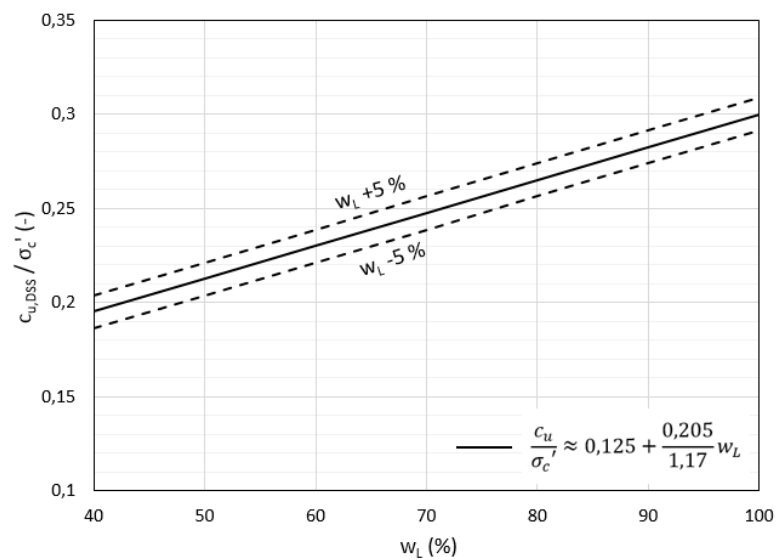
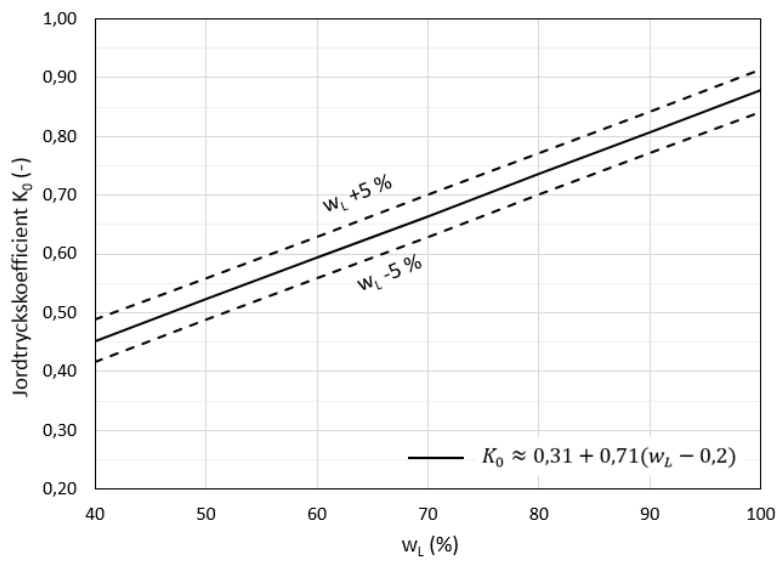


Figur 13. Exempel på naturlig variation av naturlig vattenkvot för 4 st kolprover från östra Mälardalen. Bestämningar gjorda på delprov med 2 cm tjocklek i underhysla.



Figur 14. Exempel på naturlig variation av konflytgränsen för 6 st kolvprover från östra Mälardalen (bestämd med enpunktsbestämningen). Bestämningar gjorda på delprov med 5 cm tjocklek i över- och mellanhylsan.

Figur 15 visar exempel på variationen av empiriska korrelationer för jordtryckskoefficienten K_0 , mellan odränerad direkt skjuvhållfasthet och förkonsolideringstrycket samt för korrektionsfaktor vid utvärdering av fallkon- och vingförsök samt CPT-sondering. Angivna samband finns beskrivna i Larsson et al (2007) och Larsson (1977).



Figur 15. Exempel på variation för empiriska korrelationer och korrekstionsfaktor för utvärdering av kon- och vingförsök med $\pm 5\%$ ändring av flytgränsen.

6 REKOMMENDERAD UTVÄRDERING MED ENPUNKTSBESTÄMNING

6.1 Inledning

I föreliggande notat rekommenderas en fortsatt användning av enpunktsbestämningen, huvudsakligen av följande orsaker:

- Den har använts i svensk praxis i princip utan undantag i Sverige sedan 1960-talet;
- I princip all forskning sedan 1960-talet har utförts med enpunktsbestämning och därmed baseras alla empiriska korrelationer som innefattar konflytgränsen på enpunktsbestämningen;
- Enpunktsbestämning har enligt Karlsson (1961) visat sig stämma överens med flerpunktsbestämning med en variation av ca $\pm 5\%$.

6.2 Rekommenderad utvärdering med enpunktsbestämning

Föreslagen enpunktsbestämning baseras i sin helhet på den metod som föreslogs av Karlsson (1961) och som beskrivs i f d SS 027120. Beräkning av flytgränsen görs enligt Ekvation 7 eller 8 med faktorer M och N enligt Figur 16. Enpunktsbestämningen begränsas till konintryck 7 – 14,9 mm.

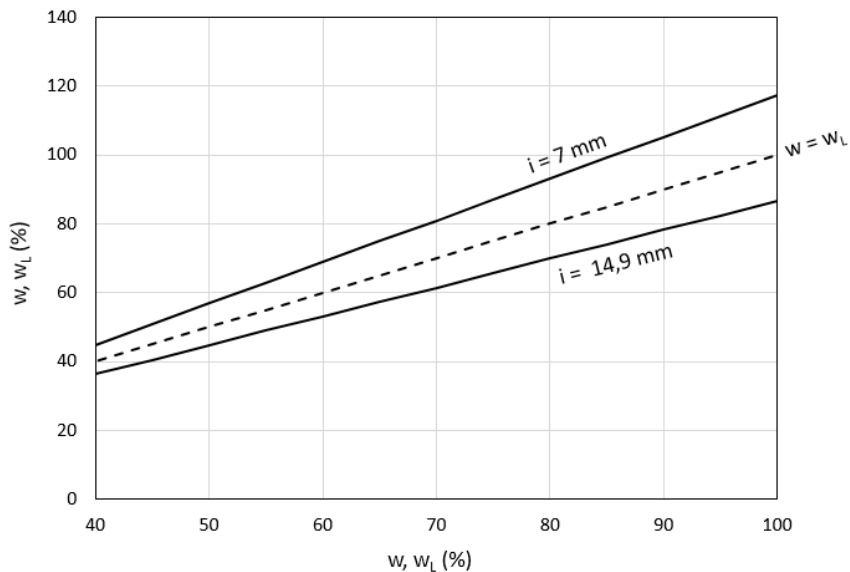
$$w_L = \frac{1,8 w_i + 17 \log(i/10)^2}{1,8 + \log(i/10)^2} \quad \text{Ekv. 7}$$

$$w_L = M \cdot w_i + N \quad \text{Ekv. 8}$$

<i>i</i>		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7,	<i>M</i>	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,14	1,13
	<i>N</i>	-0,035	-0,034	-0,032	-0,030	-0,029	-0,027	-0,026	-0,025	-0,023	-0,022
8,	<i>M</i>	1,12	1,11	1,11	1,10	1,10	1,09	1,08	1,07	1,07	1,06
	<i>N</i>	-0,021	-0,019	-0,018	-0,017	-0,016	-0,014	-0,013	-0,012	-0,011	-0,010
9,	<i>M</i>	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1,01	1,00
	<i>N</i>	-0,009	-0,008	-0,007	-0,006	-0,005	-0,004	-0,003	-0,003	-0,002	-0,001
10,	<i>M</i>	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96
	<i>N</i>	0	+0,001	+0,002	+0,002	+0,003	+0,004	+0,005	+0,005	+0,006	+0,007
11,	<i>M</i>	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92
	<i>N</i>	+0,007	+0,008	+0,009	+0,009	+0,010	+0,011	+0,011	+0,012	+0,013	+0,013
12,	<i>M</i>	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89
	<i>N</i>	+0,014	+0,014	+0,015	+0,015	+0,016	+0,017	+0,017	+0,018	+0,018	+0,019
13,	<i>M</i>	0,89	0,88	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86
	<i>N</i>	+0,019	+0,020	+0,020	+0,021	+0,021	+0,022	+0,022	+0,022	+0,023	+0,023
14,	<i>M</i>	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84
	<i>N</i>	+0,024	+0,024	+0,025	+0,025	+0,025	+0,026	+0,026	+0,027	+0,027	+0,027

Figur 16. Tabell för värden på M och N från olika konintryck i mm (ur f d SS 027120)

Figur 17 visar tillåtet spann för uppmätta konintryck för enpunktsbestämning. Som exempel kan för en lera med konflytgräns $w_L = 80\%$ enpunktsbestämningen användas om den naturliga vattenkvoten är mellan ca 70 och ca 93 %. Är vattenkvoten lägre eller högre måste leran torkas ut alternativt tillsätts destillerat vatten för att enpunktsbestämningen kan användas.



Figur 17. Tillåtet spann för uppmätta konintryck för enpunktsbestämning och resulterande skillnader i vattenkvot.

Flerpunktsbestämning bör dock utföras vid följande förutsättningar:

- Jordar med en vattenkvot som skiljer mer än 40 %-enheter från konflytgränsen (bestämd med enpunktsbestämning)
- Torv (om konsistensgränser bedöms relevanta)
- Bentonitleror
- Smektitrika leror
- När större noggrannhet krävs av bestämningen

6.3 Utvecklingsbehov

I samband med genomgången av underlaget för enpunktbestämningen identifierades behov av ett antal studier för att utreda bestämningens tillförlitlighet. Den huvudsakliga anledningen till detta var att Karlsson (1961) gjorde begränsningar i enpunktbestämningen utan att dessa vidareförts vid utarbetande av f d SS 07120. Detta gäller särskilt:

- Prover med vattenkvot betydligt lägre än konflytgränsen, t ex torrskorpelera;
- Prover med vattenkvot betydligt högre än konflytgränsen, d v s högsensitiva och kvicka leror;
- Jordprover av lera med konflytgräns över 150 %.

Vidare bör följande faktorer studeras i syfte att undersöka i vilken grad de påverkar bestämningen av konflytgränsen:

- Uppblötning av jordprover med destillerat vatten eller kranvatten;
- Uttorkning av jordprover på gipsplatta, torkduk eller glas;
- Påverkan av lagring och oxidering.

7 REFERENSER

- ASTM D4318 (1983/2014). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- Atterberg, A., 1911. Lerornas förhållande till vatten, deras plasticitetsgränser och plasticitetsgrader. Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar och Tidskrift, 50(2): 132-158.
- Atterberg, A., 1912. Jordslagens konsistens och styfleksgrader. Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar och Tidskrift, 51(1), p. 93-123, Stockholm.
- Atterberg, A., 1916. Konsistensläran – en ny fysikalisk lära. Svensk Kemisk Tidskrift, Vol. 28, p 29-37, Stockholm.
- Beskow, G., 1951. Amerikansk och svensk jordklassifikation. Statens Vägintitut, Meddelande 81, Stockholm.
- Bjerrum, L. & Flodin, N., 1960. The development of soil mechanics in Sweden, 1900-1925. Géotechnique, 10(1): 1-18.
- Casagrande, A., 1932a. Research on the Atterberg limits of soils. Public Roads, 13(8): 121-136.
- Casagrande, A., 1932b. The structure of clays and its importance in foundation engineering. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. 14, 1932, pp. 168-209.
- Casagrande, A. 1958. Notes on the design of the liquid limit device. Géotechnique, 8(2): 84-91.
- Fredén, S. 1956. Några undersökningar över snabbmetoder för bestämning av lerors flytgräns. Geologiska Föreningen i Stockholm, Förhandlingar, Band 78, Häfte 1, pp. 143-155.
- Haigh, S.K., 2012. Mechanics of the Casagrande liquid limit test. Canadian Geotechnical Journal, 49(9): 1015-1023.
- Hansbo, S., 1957. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. Swedish Geotechnical Institute, Proceedings No. 14, Stockholm.
- Houston, W.N., & Mitchell, J.K., 1969. Property interrelationships in sensitive clays. Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE, 95(SM4): 1037-1062.
- Karlsson, R., 1961. Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remoulded clays. Proc. 5th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, p. 171-184, Paris.
- Karlsson, R. 1963. On cohesive soils and their flow properties. Swedish Geotechnical Institute, Reprints and preliminary reports, No. 5.
- Karlsson, R., 1974. Konsistensgränser. Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar. Del 6. Byggeforskningens informationsblad Bl. 1. Stockholm.
- Karlsson, R., 1981. Consistency Limits (in cooperation with the Laboratory Committee of the Swedish Geotechnical Society). Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, Document D6:1977.
- Koumoto, T. & Houlsby, G.T., 2001. Theory and practice of the fall cone test. Géotechnique, 51(8): 701-712.

- Larsson R., Sällfors G., Bengtsson P-E., Alén C., Bergdahl U., Eriksson L., 2007. Skjuvhållfasthet– utvärdering i kohesionsjord, Statens geotekniska institut, Information 3, Linköping.
- Larsson, R., 1977. Basic behaviour of Scandinavian soft clays. Swedish Geotechnical Institute, Report No. 4, Linköping.
- Leroueil, S. & Bihan, J-P., 1996. Liquid limits and fall cones. Canadian Geotechnical Journal, 33(5): 793-798.
- Locat, J. & Demers, D., 1988. Viscosity, yield stress, remoulded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. Canadian Geotechnical Journal, 25(4): 799-806.
- Mitchell, J. K. och Soga, K., 1993. Fundamentals of Soil Behaviour. John Wiley&Sons, Inc., New York.
- Muir Wood, D., 1985. Some fall-cone tests. Géotechnique 35(1), 64-68.
- Muir Wood, D., 1990. Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Nagaraj, T.S., Pandian, N.S. och Narasimha Raju, P.S.R., 1991. An approach for prediction of compressibility and permeability behaviour of sand-bentonite mixes. Indian Geotechnical Journal 21, 3, 271-282.
- Pusch, R., 1974. Densitet, vattenhalt och portal, Bygghörsningens informationsblad Bl. 5. Stockholm.
- Rao, C.B., 1968. Determination of liquid limit of soil by one point method. Journal of soil mechanics and foundation engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 387-395.
- Russel, E.R. & Mickle, J.L., 1970. Liquid limit values of soil moisture tension. Journal of soil mechanics and foundation division, ASCE, 96, pp. 967-987.
- Seed, H.B., Woodward, J.F. & Lundgren, R., 1964. Clay mineralogical aspects of the Atterberg limit. Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE, Vol. 90, No. SM4, pp. 107-131.
- SGF Notat 2:2018. Fallkonförsöket. Svenska Geotekniska Föreningen, Stockholm.
- Sharma, B. and Bora, P.K. 2003. Plastic limit, liquid limit and undrained shear strength of soil-reappraisal. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129, No. 8, pp.774-777.
- SJ, 1922. Statens Järnvägars geotekniska kommission 1914-1922. Slutbetänkande angivet till Kungl. Järnvägsstyrelsen den 31 maj 1922. Geotekniska meddelanden Nr 2, Statens Järnvägar, Stockholm.
- Skempton, A.W. & Northey, R.D., 1953. The sensitivity of clays. Géotechnique, 3(1), 30-53.
- Skempton, A.W., 1953. The colloidal "activity" of clays. Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, p. 57-61, Zürich.
- Svensk standard SS 02 71 20, 1990. Geotekniska provningsmetoder – Konflytgräns. SIS.
- SS-EN ISO 17892-12. Geoteknisk undersökning och provning - Laboratorieundersökning av jord - Del 12: Bestämning av Atterbergs konsistensgränser. SIS.
- Terzaghi, K. 1925. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Franz Deuticke, Leipzig-Vienna.

Terzaghi, K., 1926. Simplified soil tests for subgrade and their physical significance. *Public Roads*, 7(8): 153-162.

Torrance, J.K., 1974. A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clays. *Géotechnique*, 24(2), pp. 155-173.

Vardanega, P.J. & Haigh, S.K., 2014. The undrained strength – liquidity index relationship. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(9): 1073-1086.

Wroth, C.P., & Muir Wood, D. 1978. The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(2): 137-145.

SGF Notat

- 1:2004 Packning och packningskontroll av blandkornig och finkornig jord
- 2:2004 Direkta skjuvförsök - en vägledning
- 3:2004 Laborarieutrustningar med stora provdimensioner - en sammanställning
- 1:2005 Våra framtida geotekniska arbetsredskap - en introduktion
- 2:2005 Permeabilitetsbestämning genom laborieförsök
- 3:2005 Packningsresultat ytpackning - väsentliga faktorer analyserade med AHP-3:2007
Laborieprovning för geotekniska utredningar
- 4:2005 Karakteristiskt värde - utredning kring riktlinjer hur vi skall tillämpa Euorkod (EN 1997-1 och EN 1997-2) modellen
- 1:2007 Medlemsmatrikel 2006
- 2:2007 Resultatkontroll genom bestämning av luftporhalt och vattenkvot
- 3:2007 Laborieprovning för geotekniska utredningar
- 1:2009 Jämförande sonderingar – Jb-totalsondering, CPT och hejarsondering

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 1300 enskilda medlemmar, med minst två års praktisk erfarenhet av geoteknik. Dessutom ingår ca 30 korporativa medlemmar i form av institutioner, högskolor, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med Grundläggning, ingenjörsgologi och miljöteknik i ett nationellt och internationellt perspektiv.

Föreningen företräder i Sverige den internationella föreningen, the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

I SGF:s Rapport- och Notatserier utges föreningens metodbeskrivningar, monografier och dokumentation från konferenser, temadagar m.m.