



**Statens geotekniska institut**

# Metodik för kartläggning av kvicklera

Vägledning



SGI Publikation 46

Linköping 2018

SGI Publikation 46

Hänvisa till detta dokument på följande sätt:  
SGI 2018, *Metodik för kartläggning av kvicklera,*  
*Vägledning*, SGI Publikation 46,  
Statens geotekniska institut, SGI, Linköping

Diariernr: 1.1-1501-0058

Uppdragsnr: 15451

Beställning:

Statens geotekniska institut  
Informationstjänst  
580 93 Linköping  
Tel: 013-20 18 04  
E-post: [info@swedgeo.se](mailto:info@swedgeo.se)

Ladda ner publikationen som  
PDF, [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)

Bilder på omslaget: SGI (vänster och  
mitten), SGU (höger).



**SGI Statens geotekniska institut**

# **Metodik för kartläggning av kvicklera**

Vägledning



**TRAFIKVERKET**

**SGU**

Sveriges geologiska undersökning

**SGI Publikation 46**

Linköping 2018



# Förord

Under åren 2015 till 2018 har Trafikverket, Statens geotekniska institut (SGI) och Sveriges geologiska undersökning (SGU) gemensamt drivit projektet ”Utveckling av metodik för kartläggning av förekomst av kvicklera”. Projektet har i huvudsak finansierats av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB, men även av SGU till viss del.

Det övergripande målet med projektet har varit att ta fram en metodik för kartläggning av områden där kvicklera kan förekomma respektive inte förväntas förekomma. Denna är uppbyggd i steg med olika detaljeringsnivå och innehåller geologiska och topografiska metoder, geofysiska metoder och geoteknisk sondering och provtagning. I projektet har även ingått att i några områden testa, utvärdera och jämföra olika metoder för kartläggning av förekomst av kvicklera. Denna jämförelse och utvärdering av olika metoder beskrivs i Löfroth et.al. (2018).

Metodiken som presenteras i denna rapport är avsedd att användas för kartläggning av kvicklera i tidiga och sena skeden av planerings- och projekteringsprocessen. Målgruppen är de som ska utföra kartläggningen (geotekniker, geologer, geofysiker). Vissa delar i metodiken presenteras också som en kartvisningstjänst.

Ett flertal personer har bidragit i projektarbetet och arbetet med rapporterna. Denna vägledningsrapport har tagits fram av Hjärdis Löfroth, Hanna Blomén, Christoffer With och Jim Hedfors, SGI, Lars Rodhe, Lena Persson och Mehrdad Bastani, SGU, samt Jan Ekström, Trafikverket. Håkan Nordlander, Trafikverket, har varit huvudprojektledare för projektet och Hjärdis Löfroth, SGI, teknisk projektledare. Margareta Nisser, MSB, har medverkat i projektets styrgrupp.

Granskning av rapporten har utförts av HannaSofie Pedersen och Maria Kristensson, SGI, Kristian Schoning, SGU, Carina Hultén och Magnus Karlsson, Trafikverket, samt Andreas Pfaffhuber, NGI, och Torleif Dahlin, LTH. Extern granskning har utförts av Victoria Svahn, Göteborgs stad.

HannaSofie Pedersen, chef för avdelning Klimatanpassning, har beslutat att ge ut publikationen, Linköping i december 2018.



# Innehållsförteckning

<b>Sammanfattning .....</b>	<b>8</b>
<b>Summary.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Inledning.....</b>	<b>11</b>
1.1 Bakgrund .....	11
1.2 Syfte.....	11
1.3 Målgrupper.....	12
1.4 Upplägg .....	12
1.5 Kartvisningstjänst.....	12
<b>2. Allmänt om kvicklera .....</b>	<b>13</b>
2.1 Kvicklera och sensitivitet .....	13
2.2 Kvicklera och resistivitet .....	13
2.3 Inverkan av kvicklera på skredutbredning .....	14
<b>3. Metoder för kartläggning av kvicklera .....</b>	<b>16</b>
3.1 Allmänt.....	16
3.2 Översiktliga topografiska och geologiska metoder.....	16
3.3 Geofysiska metoder .....	23
3.4 Geotekniska metoder .....	29
<b>4. Metodik för kartläggning av kvicklera.....</b>	<b>38</b>
4.1 Beskrivning av ett stegvis tillvägagångssätt.....	38
4.2 Kartvisningstjänst.....	43
<b>Referenser .....</b>	<b>45</b>

## Bilaga

1. Checklista - lokala förutsättningar för bildning av kvicklera
2. Finkorniga jordarter med förutsättningar för kvicklera (lager i kartvisningstjänst)

# Sammanfattning

Kvicklera uppstår när saltjoner i saltvattenavsatta leror med hög salthalt lakas ur. Vid omrörning kollapsar strukturen hos en kvicklera totalt och skjuvhållfastheten reduceras då till nästan noll. Detta innebär att lerans fasthet ändras till rinnande/flytande. Kvicklera förekommer under högsta kustlinjen i områden där sedimenten avsatts i saltvatten i en marin miljö. En lera definieras som kvicklera baserat på dess sensitivitet, som är förhållandet mellan lerans ostörda och omrörda skjuvhållfasthet. För att en lera i Sverige ska definieras som kvicklera ska sensitiviteten,  $S_i$ , vara större än 50 och den omrörda odränerade skjuvhållfastheten,  $c_u$ , vara mindre än 0,4 kPa. Inom områden med kvicklera uppstår ofta efter ett första s.k. initialscred (primärscred), ytterligare bakåtgripande följdskred, vilket innebär att den totala utbredningen av ett skred kan bli omfattande.

Denna rapport, vägledning, är en av tre publikationer som tagits fram inom projektet ”Utveckla metodik för kartläggning av förekomst av kvicklera”. I rapporten beskrivs först kvicklera och dess inverkan på skredutbredning. Därefter presenteras olika metoder för kartläggning av förutsättningar för kvicklera, deras för- och nackdelar, vilka metoder som rekommenderas och vilka metoder som bedöms mindre lämpliga. Slutligen presenteras metodiken, vilken är uppbyggd i steg med olika detaljeringsnivå och omfattar såväl geologiska förutsättningar för bildning av kvicklera samt olika geologiska, geofysiska och geotekniska metoder. Målgruppen är de som ska utföra kartläggningen (geotekniker, geologer, geofysiker). De övriga rapporterna är en tillämpnings- och utvärderingsrapport (Löfroth et al., 2018) och en övergripande webbaserad rapport som kortfattat beskriver problemområdet.

Översiktliga topografiska och geologiska metoder som tas upp är bedömning av geologiska förutsättningar för bildning av kvicklera, modellberäknat kvicklereindex (QCSI) och klassning av skredärr. Geofysiska metoder som beskrivs är flygburen resistivitetmätning (TEM), markbaserad resistivitetmätning (ERT), markbaserad elektromagnetisk mätning (RMT) samt seismiska metoder. De geotekniska metoder som behandlas är arkivsök av tidigare undersökningar inklusive Geoteknisk sektorsportal, CPT- och CPT-R-sondering med mätning av neddrivningsmotstånd, trycksondering, vingsondering samt provtagning i fält och bestämning av sensitivitet på laboratoriet.

Metodiken är uppdelad i ett tidigt och ett sent skede. I det tidiga skedet görs först en bedömning av lerans bildningsmiljö. Finns det geologiska förutsättningar för bildning av kvicklera kan man därefter gå vidare med att bedöma andra faktorer som innebär ökade förutsättningar i syfte att bedöma var inom området förutsättningarna är störst respektive minst. Samtidigt utförs en inventering av tidigare utförda utredningar och information från Geoteknisk sektorsportal. Vid större områden kan det tidiga skedet avslutas med flygburen resistivitetmätning.

I ett sent skede kan såväl flygburna som markmätta geofysiska undersökningar utföras i syfte att öka kunskapen om områdets förutsättningar för kvicklera och för att skilja delområden där förutsättningar för kvicklera finns från delområden där förutsättningar för kvicklera inte bedöms finnas. Geotekniska sonderingar, företrädesvis CPT/CPT-R med mätning av det totala neddrivningsmotståndet, eller alternativt trycksondering, utförs som



nästa steg för bedömning av om kvicklera förekommer inom ett område. Slutligen utförs alltid kolvprovtagning med fallkonförsök på laboratoriet i utvalda punkter där geoteknisk sondering utförts. Fallkonförsöken är den enda metoden för bestämning av lerans sensitivitet och därmed om leran är högsensitiv eller kvick och i så fall hur kvick den är.

För att verifiera förekomst av kvicklera erfordras alltid geoteknisk provtagning och sensitivitetsbestämning på laboratoriet.

## Summary

Quick clay occurs when salt ions in saltwater-deposited, saline-heavy clays are leached out. When remoulded, the structure of the quick clay collapses completely, and the shear strength is reduced to almost zero. This results in the consistency of the clay changing to runny/liquid. Quick clay occurs below the highest shoreline in areas where sediment has been deposited in saltwater in a marine environment. A clay is defined as quick clay based on its sensitivity, i.e. the relationship between the undisturbed and remoulded shear strength of the clay. In Sweden, for a clay to be defined as quick clay the sensitivity,  $S_t$ , must be more than 50, and the remoulded, undrained shear strength,  $c_u$ , must be less than 0.4 kPa. In areas in which quick clay is present, a primary landslide is often followed by a subsequent retrogressive landslide. As a result, the total landslide spread could be extensive.

This report, *Guidance*, is one of three publications produced within the *Development of a Methodology for Quick Clay Mapping* project. The report begins with a description of quick clay and its impact on landslide spread. This is then followed by a presentation of the various methods employed to map preconditions for the occurrence of quick clay, the advantages and disadvantages of these methods, which methods are recommended, and which methods are considered less suitable. Finally, the methodology is presented, built up in stages with varying levels of detail – including the geological preconditions for the formation of quick clay – along with different geological, geophysical, and geotechnical methods. The target group is made up of the specialists responsible for conducting the survey (geoengineers, geologists, geophysicists).

The general topographical and geological methods that are addressed are: assessment of geological preconditions for the formation of quick clay, model-based quick clay index calculation (QCSI), and classification of landslide scars. The geophysical methods that are described are: airborne resistivity measurement (TEM), ground-based resistivity measurement (ERT), ground-based electromagnetic measurement (RMT), and seismic methods. The geotechnical methods that are addressed are: archive searches focusing on previous surveys, including the Geotechnical Sector Portal, CPT and CPT-R sounding with measurement of penetration resistance, static pressure sounding, vane testing, field sampling, and laboratory-based sensitivity determination.

The methodology is divided into an early phase and a late phase. In the early phase, the first step is an assessment of the environment in which the clay/silt is formed. If there are geological preconditions for the formation of quick clay, it is possible to proceed with an assessment of other factors that would entail heightened preconditions, the purpose being to assess where in the area the preconditions for quick clay formation are most likely and least likely to exist. An inventory is also made of previously performed surveys, along

with information from the Geotechnical Sector Portal. In the case of more extensive areas, it is possible to conclude the early phase with airborne resistivity measurement.

In a late phase, both airborne and ground-based geophysical surveys are conducted to obtain further information about the area's quick clay preconditions, and to distinguish sub-areas where findings show that quick clay preconditions are present from subareas where preconditions are not present. In the next step, geotechnical soundings, primarily CPT/CPT-R with measurement of the total penetration resistance, or static pressure sounding, are carried out to assess the occurrence of quick clay in the area. Finally, piston sampling with fall cone tests is always conducted in the laboratory at individual points where geotechnical sounding has been carried out. Fall cone testing is the only method available for determining the sensitivity of the clay, thereby ascertaining whether the clay is highly sensitive or quick, and if so, how quick.

In order to verify the occurrence of quick clay, geotechnical sampling and laboratory-based sensitivity determination are always required.

# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund

Under åren 2015 till 2018 har Trafikverket, Statens geotekniska institut (SGI) och Sveriges geologiska undersökning (SGU) gemensamt drivit projektet ”Utveckling av metodik för kartläggning av förekomst av kvicklera”. Projektet har i huvudsak finansierats av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

Det övergripande målet med projektet har varit att ta fram en metodik för kartläggning av områden där kvicklera kan förekomma respektive inte förväntas förekomma. Metodiken är uppbyggd i steg med olika detaljeringsnivå och innehåller såväl geologiska, hydrogeologiska, och topografiska metoder, som flygburen geofysik, markmätt geofysik samt geoteknisk borrhning och provtagning.

Denna rapport, vägledning, är en av tre publikationer som tagits fram inom projektet. I rapporten beskrivs metodiken, vilka metoder som rekommenderas och vilka metoder som bedöms mindre lämpliga för kartläggning av kvicklera. Målgruppen är de som ska utföra kartläggningen (geotekniker, geologer, geofysiker).

De övriga publikationerna är:

- En övergripande webbaserad rapport som kortfattat beskriver problemområdet och vilken metodik projektet rekommenderar. Målgruppen för denna rapport är centrala myndigheter, länsstyrelser och kommuner.
- En utvärderingsrapport som redovisar erfarenheter av tillämpningen av de olika ingående metoderna i utvalda försöksområden. Målgruppen är de som ska utföra kartläggningen (geotekniker, geologer, geofysiker).

En workshop hölls i januari 2017 för att få in synpunkter på förslaget till metodik från de olika målgrupperna.

## 1.2 Syfte

Syftet med denna vägledning är att:

- Beskriva en lämplig metodik för kartläggning av kvicklera för användning vid tidiga respektive sena skeden i planerings- eller projekteringsprocesser. Metodiken är inte tillräcklig för bedömning av förutsättningar för skred.
- Kortfattat beskriva metoder som är lämpliga att använda för kartläggning av förutsättningar för kvicklera eller kvicklera i olika skeden, syftet med respektive metod, hur metoderna skall användas, metodernas för- och nackdelar samt begränsningar. Hänvisning görs till litteratur där respektive metod beskrivs utförligare.
- Ge rekommendationer för användning och redovisa vid vilka tillfällen och förutsättningar som olika metoder är mer eller mindre lämpliga. Även ta upp metoder som vi inte rekommenderar för kartläggning av kvicklera samt varför dessa metoder inte rekommenderas.

### 1.3 Målgrupper

Målgruppen för denna vägledningsrapport är de som ska utföra en kartläggning av kvicklera i något skede av planerings- eller projekteringsprocessen. Det kan vara geologer, geofysiker eller geotekniker, vilka ska välja metoder och upphandla eller utföra geofysiska- och geotekniska fältundersökningar samt tillhörande analys av mätresultat. Dessa tolkade resultat skall sedan analyseras och ligga till grund för bedömningar av förekomst av kvicklera.

### 1.4 Upplägg

I rapporten ges först en kort introduktion om vad kvicklera och sensitivitet är, hur kopplingen är mellan sensitivitet och resistivitet samt vilken inverkan kvicklera kan ha i händelse av ett skred. Därefter beskrivs olika geologiska, geofysiska och geotekniska metoder för kartläggning av förutsättningar för kvicklera eller kvicklera. För- och nackdelar samt begränsningar med respektive metod tas upp och rekommendationer ges för användning av metoderna. Slutligen beskrivs en rekommenderad metodik för kartläggning av kvicklera, uppdelad i steg för tidigt respektive sent skede i planerings- och projekteringsprocessen. Avsikten är att belysa hur man ska gå tillväga för att ta reda på om det kan finnas kvicklera i ett område vid t.ex. lokalisering eller planeringen av ett bostadsområde, en väg, järnväg eller någon annan konstruktion.

### 1.5 Kartvisningstjänst

De översiktliga metoder som ingår i det tidiga skedet av planeringsprocessen och som också kan presenteras som en karta, finns också som en kartvisningstjänst (WMS). Denna kartvisningstjänst finns tillgänglig på SGI:s hemsida: [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se) och beskrivs närmare i avsnitt 4.2.

## 2. Allmänt om kvicklera

### 2.1 Kvicklera och sensitivitet

Kvicklera uppstår när saltjoner i saltvattenavsatta leror med hög salthalt lakas ur (Rankka et al. 2004). Vid omrörning kollapsar strukturen hos en kvicklera totalt och skjuvhållfastheten reduceras då till nästan noll. Detta innebär att lerans fasthet ändras till rinnande/ flytande. Kvicklera förekommer under högsta kustlinjen i områden där sedimenten avsatts i saltvatten i en marin miljö. Leror som avsatts i bräckt vatten kan också uppvisa kvicka egenskaper även om det är mer ovanligt. När en lera sedimenterad i havsmiljö höjer sig på grund av landhöjningen (som fortfarande pågår) kan lerans salter lakas ur när grundvatten och nederbördsvatten infiltrerar in och genom leran. Salthalten kan också minska genom diffusion av salt från jordlager med hög salthalt till jordlager med låg koncentration av salter. Alla saltvattenavsatta leror har inte kvicka egenskaper utan av stor betydelse är vilken salthalt leran har idag. Erfarenhetsmässigt bör salthalten ha minskat till 2 gram per liter i porvattnet, för att kvicka egenskaper ska kunna utvecklas (Torrance, 1974). En fortsatt urlakning av kvickleran kan genom fortsatt jonbyte leda till att den tidigare kvicka leran återigen stabiliseras (Löfroth et al., 2011). Urlakad lera som åter stabiliserats påträffas främst där mycket lakning har skett. I Löfroth et al. (2011) finns exempel där den översta delen av jordprofilen är urlakad men inte kvick. Kvicklera förekommer som sammanhängande skikt eller som mer avgränsade partier i en lerlagerföljd.

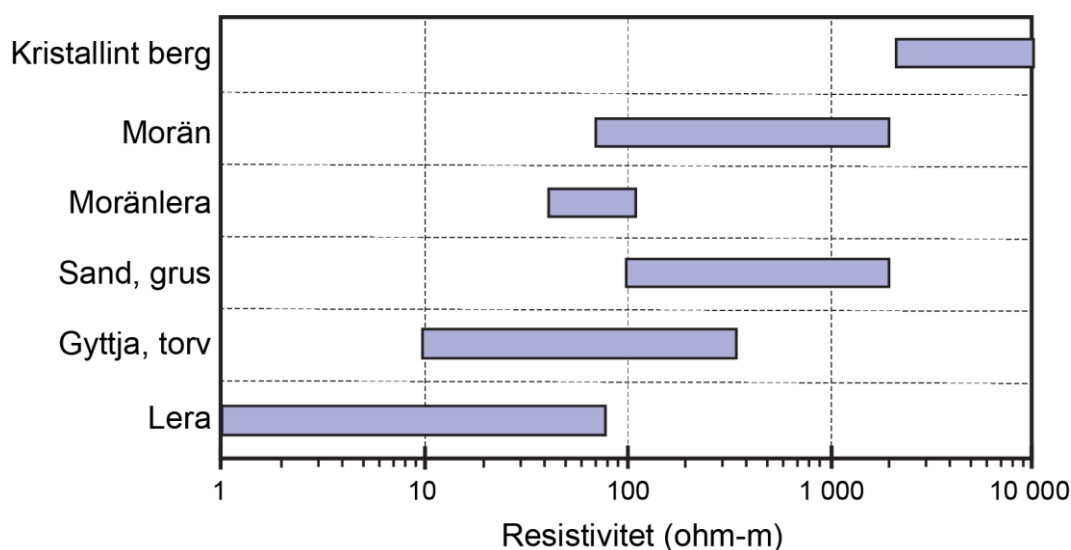
En lera definieras som kvicklera baserat på dess sensitivitet, som är förhållandet mellan lerans ostörda och omrörda skjuvhållfasthet. Detta förhållande tillsammans med storleken på den omrörda skjuvhållfastheten avgör om leran klassas som kvicklera eller ej. För att en lera i Sverige ska definieras som kvicklera ska sensitiviteten,  $S_r$ , vara större än 50 och den omrörda odränerade skjuvhållfastheten,  $c_u$ , vara mindre än 0,4 kPa. (Larsson, 2008)

Söderblom (1974) visade att även sötvattenavsatt lera kan bli kvick beroende på aktivitet från organiskt material, t.ex. en sötvattenavsatt lera under torv. Förekomst av kvicklera under organisk jord har påträffats på några platser längs Sveriges nordöstra kust (Söderblom, 1974). Eftersom metodiken bygger på utlakning av salt från saltvattenavsatta leror, kan denna typ av kvicka leror inte kartläggas med metodiken presenterad i denna rapport. Däremot kan kolvprovtagning med fallkonförsök på laboratoriet (se avsnitt 3.4.6) användas för bestämning av sensitiviteten även hos dessa leror.

### 2.2 Kvicklera och resistivitet

Finkorniga jordars elektriska resistivitet är beroende av porositeten, jon- och saltinnehållet i porvattnet, kornstorleksfördelning, lerinnehåll och eventuellt elektriskt ledande mineral. För såväl icke urlakad lera som för urlakad lera är det saltinnehållet som huvudsakligen bestämmer lerans resistivitet. I högsensitiv lera och kvicklera är saltinnehållet generellt lägre än i opåverkad marin lera på grund av urlakning av salt i porvattnet. Vid mätning av en leras resistivitet är det därmed möjligt att särskilja förekomst av urlakad lera

från icke urlakad lera. Att en lera är urlakad betyder dock inte nödvändigtvis att leran är kvick, bara att förutsättningarna finns. Tidigare studier har indikerat att för västsvenska förhållanden behöver resistiviteten vara större än 5 ohm-m för att saltinnehållet i leran ska vara tillräckligt lågt för att leran ska kunna vara kvick (Söderblom, 1969, Rankka et al., 2004, Lundström et al., 2009, Löfroth et al., 2011). I denna studie har dock kvicklera påträffats i områden där resistiviteten varit så låg som 4 ohm-m (Löfroth et al., 2018). Det är därför viktigt att jämföra uppmätt resistivitet mot sensitivitet bestämd med provtagning och laboratorieförsök i varje enskilt undersökningsområde. Det är också tveksamt om en lägre gräns i resistivitet, under vilken kvicklera inte kan förekomma, kan anges. I Figur 2.1 visas en schematisk bild över resistivitetsfördelningen i några jord- och bergarter.



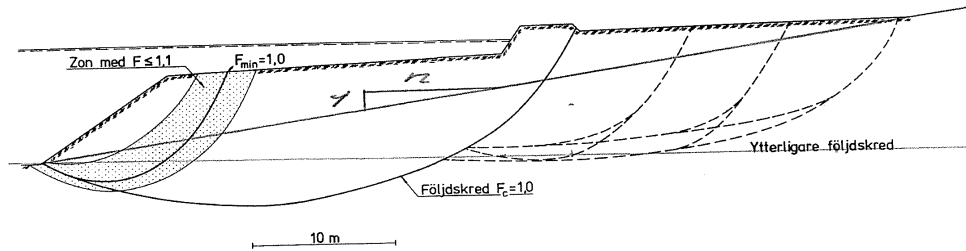
Figur 2.1 Schematisk bild som visar resistivitetsfördelningen i några jord- och bergarter (Modifierad efter Triumph, 1992).

### 2.3 Inverkan av kvicklera på skredutbredning

Inom områden med kvicklera uppstår ofta efter ett första s.k. initialscred (primärscred), ytterligare bakåtgripande följscred, vilket innebär att den totala utbredningen av ett skred kan bli omfattande. Det bedöms vara tillräckligt med ett tunt sammanhängande skikt av kvicklera (<1 m) för att följscred ska kunna utvecklas. En översiktlig metod för beräkning av skredutbredning för bakåtgripande skred har använts i Göta älvdalen (Åhnberg et al., 2011). Metoden bygger på tumregler för skred i kvicklera som utvecklats genom jämförelser med exempel på inträffade skred längs Göta älv, samt bedömning av sannolikhet för ett initialscred.

För bedömning av skredutbredningen utgår man från den kritiska glidyten närmast släntkrön (initial glidyta) med en lägsta säkerhet av 1,3 för odränerad analys och 1,2 för kombinerad analys. Den fortsatta utbredningen bakåt bestäms med hjälp av en linje från släntfot med lutningen 1:n, se Figur 2.2. Faktorn  $n$  är en funktion av sensitiviteten hos leran inom den jordvolym som berörs av initialscredet.

För initiala glidytor vid eller under strandlinjen beräknas en vidare utsträckning bakåt med hjälp av faktorn  $n$  gånger slänthöjden. Metodiken har sedan förenklats för praktisk tillämpning vid skredriskanalyser för Göta älv, Norsälven och Sävån (SGI, 2012, Bergdahl et al., 2015 SGI, 2017).



Figur 2.2 Bedömning av utbredning av sekundära skred i sensitiv lera. (Underlag från Larsson, et.al., 1994).

## 3. Metoder för kartläggning av kvicklera

### 3.1 Allmänt

I detta kapitel beskrivs geologiska förutsättningar för bildning av kvicklera samt olika geologiska, geofysiska och geotekniska metoder för kartläggning av förutsättningar för kvicklera. För att bestämma om kvicklera förekommer i ett område krävs dock geoteknisk provtagning och bestämning av sensitivitet på laboratoriet (se kapitel 3.4.6). Underlag som kan användas för bedömning av geologiska förutsättningar tas upp liksom hänvisning till litteratur där olika metoder beskrivs utförligare.

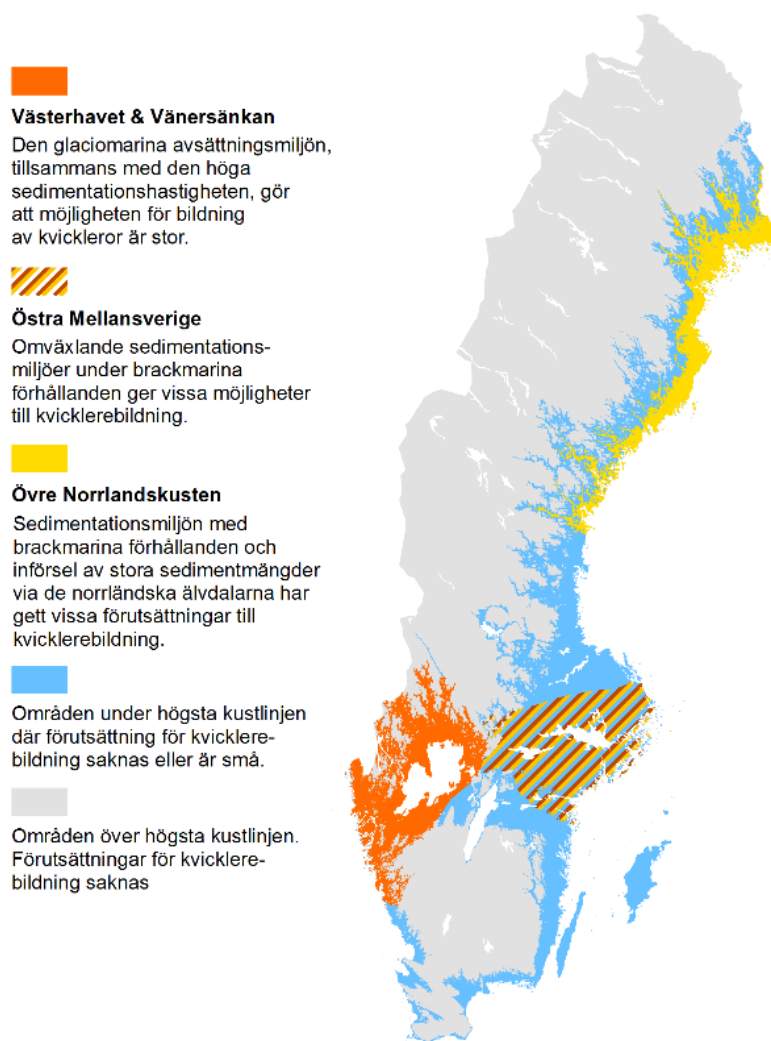
### 3.2 Översiktliga topografiska och geologiska metoder

#### 3.2.1 Bedömning av geologiska förutsättningar för bildning av kvicklera

##### **Bedömning av bildningsmiljö - Beskrivning**

Områden med lera under högsta kustlinjen som varit täckta av salt havsvatten och brackvatten har potential för kvicklerebildning. De mest gynnsamma förutsättningar för bildning av kvicklera finns i områden som varit täckta av salt havsvatten, såsom Västerhavet längs västkusten från norra Halland och norrut och i Vänerbäckenet, se Figur 3.1. Leror avsatta i vatten med lägre salthalt – brackvatten – har mindre gynnsamma förutsättningar för kvicklerebildning. Sådana områden finns i Mälardalen och i angränsande områden i östra Svealand samt längs Norrlandskusten från Västernorrland och norrut. I områden som ligger över högsta kustlinjen, och alltså inte varit täckta av salt- eller brackvatten, saknas förutsättningar för bildning av kvicklera. En närmare beskrivning finns i Schoning, (2016).





Figur 3.1 Förutsättning för bildning av kvicklera, baserad på lerors avsättningsmiljö (salt-, brack- eller sötvatten) (efter Schoning 2016).

Bedömning av förutsättningar för kvicklera baserat på bildningsmiljö görs lämpligen enligt följande:

- Ligger området under högsta kustlinjen? (*Högsta kustlinjen*, [www.sgu.se](http://www.sgu.se))
- Består avlagringarna i området av finkorniga jordarter (lera, silt)? Observera att lera ofta förekommer under ytliga lager av andra jordarter främst postglacial sand och torv, men även under andra typer, se Bilaga 2. (*Jordarter*, [www.sgu.se](http://www.sgu.se))
- Är de finkorniga jordarterna avsatta i saltvatten eller brackvatten? (Figur 3.1)

Om svaret på dessa frågor är ja, så finns förutsättningar för förekomst av kvicklera.

#### **Fördelar**

- Det är möjligt att enkelt göra en första övergripande gallring av om kvicklera kan förekomma i ett specifikt område.

**Nackdelar, begränsningar**

- Det är inte möjligt att bedöma om mindre områden inom en avsättningsmiljö har en högre eller lägre potential för bildning av kvicklera.

**Rekommendationer för användning**

- Bör användas initialt som ett underlag för bedömning av om förekomst av kvicklera är möjlig.
- Förslagsvis används framtagna kartvisningstjänster för bedömning av hur bildningsmiljön påverkar möjligheten för förekomst av kvicklera, se avsnitt 4.2 och [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se).

**Bedömning av lokala förutsättningar för bildning av kvicklera – Beskrivning, syfte**

Inom ett område som bedömts ha förutsättning för kvicklera enligt ovan, kan man gå vidare med att bedöma andra faktorer som teoretiskt eller erfarenhetsmässigt innebär ökade förutsättningar för bildning och förekomst av kvicklera. Syftet är att t.ex. få en uppfattning om hur förutsättningarna kan variera inom ett område. Bedömningen kan göras med hjälp av geologiska och topografiska kartor. God kännedom om de geologiska förhållandena i området och tillgång till arkivmaterial med resultat från geofysiska och/eller geotekniska undersökningar, ökar tillförlitligheten i bedömningen. Det är viktigt att notera att förekomst av faktorer som är gynnsamma för bildning av kvicklera inte nödvändigtvis är detsamma som att det förekommer kvicklera. Faktorer som kan ge eller indikera förutsättningar för kvicklera är:

- Förekomst av skredärr, särskilt skredärrrens form, se avsnitt 3.2.3.
- Förekomst av vattenförande skikt i och under leran.
- Lerområdet ligger i direkt anslutning till isälvsavlagring (ås, delta) eller randbildning.
- Närhet till berg/moränsluttning (uppströms).
- Små lermäktigheter (<10 m) inom hela eller delar av området.
- Uppåtriktad grundvattenströmning (artesiska förhållanden) vid en sluten akvifer (grundvattenmagasin) under leran, eller nedåtriktad grundvattenströmning (nedåtriktad gradient) t.ex. vid kuperad terräng, genomsläppliga lager (Brand och Brenner, 1981).
- Lerområdets höjd över nuvarande havsytta. Högre liggande lerområden har kunnat lakas ut under längre period.

En mer utförlig beskrivning av faktorer som ökar möjligheten för bildning av kvicklera presenteras i Rankka et al. (2004).

**Fördelar**

- Det är ett relativt enkelt sätt att göra en första övergripande bedömning av var inom ett enskilt område det är mest troligt att finna kvicklera.

- Denna övergripande bedömning kan utgöra ett underlag för att avgöra var inom ett område geofysiska och geotekniska undersökningar bäst placeras.

#### ***Nackdelar, begränsningar***

- En del faktorer är relativt svårbedömda. Särskilt om man enbart har tillgång till kartor.
- Någon verifiering av olika faktorerers inverkan på förutsättningar för förekomst av kvicklera har inte gjorts och träffsäkerheten är därmed inte känd.

#### ***Rekommendationer för användning***

- Kan användas i ett tidigt utredningsskede i områden där förutsättningar för kvicklera finns baserat på den geologiska bildningsmiljön.
- Förslagsvis används en checklista för bedömning av förekomst av olika faktorer som bör beaktas vid bedömning av förutsättningar för bildning av kvicklera. En sådan checklista presenteras i Bilaga 1.

### **3.2.2 Modellberäknat kvicklereindex (QCSI)**

#### **Beskrivning av metoden, syfte**

Bildning av kvicklera påverkas av geologiska, topografiska och hydrogeologiska förhållanden, se Rankka et.al., (2004) och kapitel 3.2.1 ovan. Dessa förhållanden kan kvantifieras med hjälp av GIS-analyser.

En modell har utvecklats där ett antal parametrar har använts för att beräkna ett index som beskriver hur sannolikheten för kvicklera varierar i landskapet (Persson, 2014). Ett flertal av dessa parametrar överensstämmer med de faktorer som tas upp i Rankka et.al. (2004) och kapitel 3.2.1 ovan. De parametrar (kriterier) som använts i modellen är lermäktighet, grundvattenmagasinsmäktighet, förutsättningar för permeabel skiktning, flödesackumulation, relativt höjdläge i förhållande till havsnivån, avstånd till biflöden, avstånd till sandig morän, avstånd till isälvsmaterial, avstånd till berggrund i dagen, vattenflöde i nedre akvifer och tid för urlakning. Geotekniska observationsdata har använts för att validera modellen. Indexvärdet, benämnt QCSI (Quick Clay Susceptibility Index), ger ett mått på sannolikheten att påträffa kvicklera inom ett specifikt område. Ju högre QCSI-värdet är, desto större bedöms sannolikheten för att kvicklera har kunnat bildas utifrån de i modellen specificerade geologiska, topografiska och geohydrologiska förhållandena. Metoden beskrivs mer utförligt i Persson (2014) och i Bilaga 1 i Löfroth et al. (2018) där resultatet presenteras i en karta för Västsverige.

**Fördelar**

- Presentation av resultatet i en karta kan ge en överskådlig bild av var inom ett område det finns störst förutsättningar för kvicklera baserat på modellberäknat kvicklereindex (QCSI).

**Nackdelar, begränsningar**

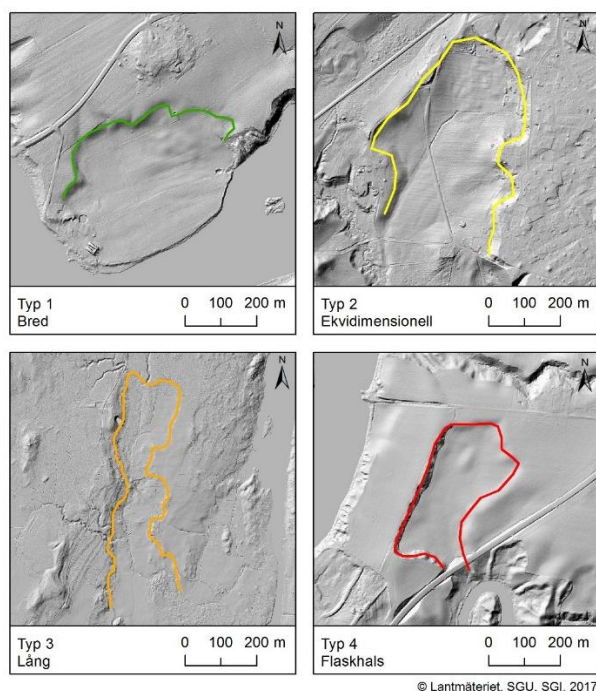
- Den utvärdering som gjorts i Löfroth et.al. (2018) visar inte någon tydlig korrelation mellan ökande QCSI-värde och sannolikhet för att påträffa kvicklera.
- Utvärderingen i Löfroth et.al. (2018) indikerar att ett undre QCSI-värde, under vilket kvicklera troligen inte förekommer, skulle kunna identifieras för ett specifikt område om QCSI jämförs med resultat från fallkonförsök i området. Den jämförelse som gjorts längs Säveån indikerar dock att det är en mycket liten del av området där QCSI är lägre än detta undre gränsvärde och där kvicklera därmed troligen inte förekommer.

**Rekommendationer för användning**

- Baserat på de begränsningar av metoden som redovisas ovan, bedöms nyttan av en karta över QCSI vara mindre än att studera inverkan av olika geologiska och hydrogeologiska faktorer var för sig, vilka beskrivs i avsnitt 3.2.1.

**3.2.3 Klassning av skredärr****Beskrivning, syfte**

Form och utbredning av tidigare inträffade skred kan utgöra ett underlag för bedömning av förekomst av kvicklera. Drygt 1 800 skredärr i SGU:s databas Jordskred och raviner har analyserats (Melchiorre et al., 2014). Skredärren har indelats i fyra morfologiska klasser, vilka ger en indikation på om skredet skett genom glidning eller flytning och om kvicklera varit involverat, se Figur 3.2. Typ 1 indikerar att skredet skett genom glidning. Typ 2 indikerar glidning eller flytning. Typ 3 indikerar flytning (högsensitiv lera, möjligen kvicklera). Typ 4 indikerar kvicklera.



Figur 3.2. Fyra olika typer av morfologiska klasser för indelning av skredärr enligt en inventering utförd av Melchiorre et al. (2014). Typ 1 indikerar att skredet skett genom glidning. Typ 2 indikerar glidning eller flytning. Typ 3 indikerar flytning (högsensitiv lera, möjligen kvicklera). Typ 4 indikerar kvicklera.

Markytans lutning inom skredområdena, dvs. det område som avgränsas av skredärr och dess öppning, har beräknats för knappt hälften av de 1 800 skredärr (övriga skredärr är för små för att en beräkning ska ge meningsfulla resultat). Låg lutning hos markytan tyder på skredrörelser genom flytning. Om markytan lutar mindre än 5–10 grader kan det vara fråga om kvicklera eller åtminstone högsensitiv lera. Lutar markytan brantare än 10–20 grader kan det indikera ras- och glidprocesser.

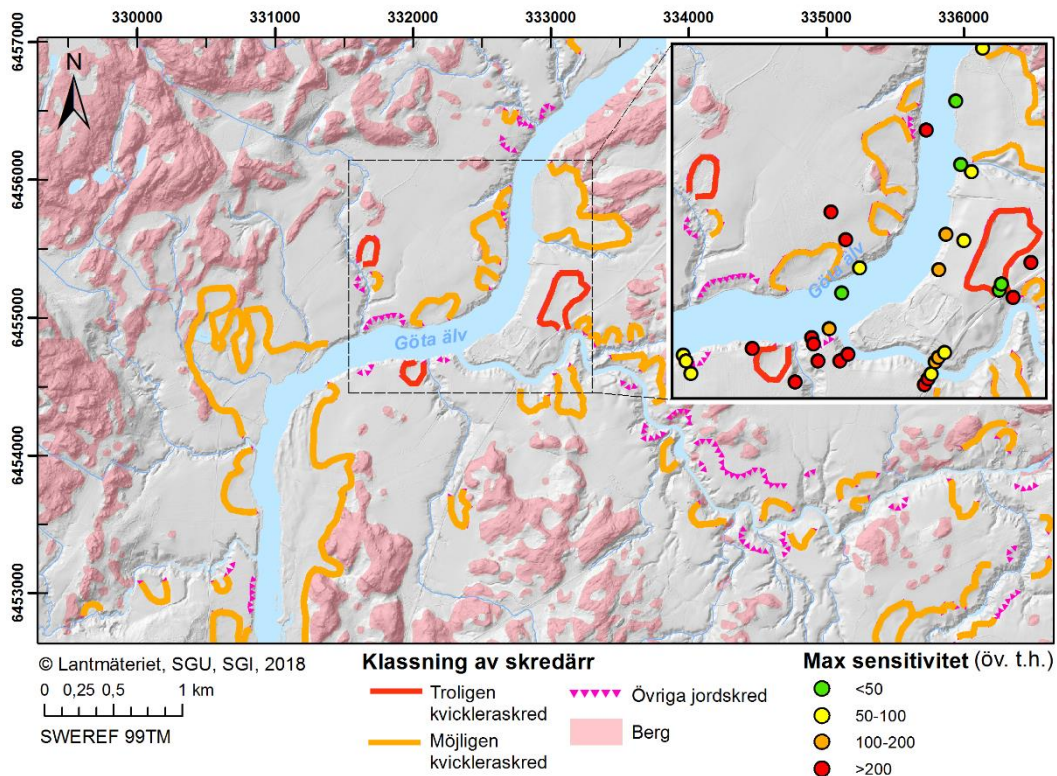
En jämförelse mellan klassning av skredärr och områden där kvicklera konstaterats genom provtagning har gjorts inom fältområdena Lödöse och Slumpån (Löfroth et.al., 2018). Jämförelsen visar att ett tydligare underlag borde kunna erhållas om kriterierna lutning och skredärrsform kombineras och vissa klasser slås ihop.

De utförda jämförelserna inom fältområden visade att skredärr av typ 4 med lutning inom skredärr mindre än 10 grader innebär troligen kvicklereskred. Skredärr av övriga typer (1, 2 och 3) tillsammans med en lutning mindre än 10 grader ger indikationer på att det kan ha varit kvicklereskred (möjligen kvicklereskred). Därmed föreslås följande kombinationer av typ och lutning:

- En klass med form typ 4 (flaskskred) och lutning <10 grader - troligen kvicklereskred
- En klass med form typ 1, 2 och 3 samt lutning <10 grader - möjligen kvicklereskred

- Övriga skredärr är inte klassade utan presenteras som skredärr enligt SGU:s symbol-sättning, det vill säga:
  - Skredärr med form typ 1, 2 och 3 samt lutning  $\geq 10$  grader
  - Skredärr med form typ 4 samt lutning  $\geq 10$  grader
  - Skredärr som är för små för att analys av form och lutning ska kunna göras

Klassningen av skredärr presenteras i en karta, se Figur 3.3.



Figur 3.3 Skredärr i försöksområde Slumpån efter omklassning enligt beskrivning ovan. Maximal sensitivitet från provtagning har medtagits (i utsnittet) som jämförelse med klassning av skredärr.

### Fördelar

- Om det finns skred av en viss typ (se ovan), erhålls en bild av var inom ett område kvicklera troligen eller möjligen förekommer/har förekommit.

### Nackdelar, begränsningar

- När ett skred gått inom ett område är leran inte längre kvick på platsen för skredet. Det innebär att klassningen bara kan visa var det funnits kvicklera, men det är inte säkert att det förekommer kvicklera intill ett skredärr.
- Kwicklera kan förekomma även inom områden där det inte finns några skredärr, eftersom förutsättningarna för ett initialscred beror på andra faktorer, såsom topografi, närhet till vattendrag med erosion, hållfasthet hos leran mm.

**Rekommendationer för användning**

- Om det finns skredärr i ett område kan klassningen av skredärr användas i tidiga utredningsskedan som en indikation på förekomst av kvicklera.
- Om det inte finns några skredärr inom området kan inte några slutsatser dras om förekomst av kvicklera.

**3.3 Geofysiska metoder**

Lera som urlakats på salt har generellt högre elektrisk resistivitet i jämförelse med omgivande icke urlakad lera eftersom den elektriska resistiviteten stiger när salthalten sjunker i lervolyten (se till exempel Rankka et al., 2004 och Solberg, 2007). Det är därför möjligt att kartlägga områden med förutsättningar för kvicklera med hjälp av geofysiska metoder, framförallt med elektriska och elektromagnetiska metoder, vilka ger en bild av resistivitetfördelningen i marken. Det finns flera tidigare exempel där markbaserade metoder som ERT (Elektrisk resistivitetstomografi) och RMT (Radiomagnetotellurik) använts för att kartlägga förekomst av kvicklera (Dahlin et al., 2013; Shan et al., 2014 och Kalscheuer et al., 2013).

Laboratorieförsök på svenska leror har visat att en salthalt lägre än 2 gram per liter porvatten motsvarar en resistivitet mellan cirka 6 och 13 ohm-m (Rankka et al., 2004). Detta är dock ingen absolut gräns utan kan variera från område till område, beroende på bland annat kornstorlek och lerans mineralsammansättning.

Med elektriska och elektromagnetiska mätningar kan man endast få information om områden med urlakad lera, dvs. där förutsättningar finns för kvicklera (Löfroth & Persson, 2016).

En begränsning som gäller de flesta geofysiska metoder orsakas av inversionsmetodiken, dvs. steget från uppmätta data till beräkning av modell. Det är inte möjligt att återskapa skarpa kontraster, t.ex. övergång från en lågresistiv lera till en högresistiv berggrund utan resistivitetsmodellen visar alltid en successiv övergång. Detta medför svårigheter att utifrån modellerna bedöma till exempel möjlig förekomst av kvicklera med begränsad mäktighet nära underliggande friktionsjord/berg under mäktiga lågresistiva icke-kvicka lerlager.

**3.3.1 Flygburen resistivitetmätning (TEM)****Beskrivning, syfte**

TEM (Transient Elektromagnetisk mätning) är en geofysisk metod där man skickar ut en kraftig ström i en kabelslinga som sedan slås av momentant. Vid strömvärlag induceras en ström i marken som utbreder sig nedåt och utåt likt en rökring. Strömmen i marken orsakar ett magnetiskt fält som uppmäts i en mottagarpole.

Storleken på fältet och hur snabbt det avklingar är beroende av markens ledningsförmåga. Över en högresistiv markvolym är den uppmätta signalen i mottagarspolen svag i jämförelse med över en lågresistiv.

Mätningarna utförs på cirka 30-50 m höjd över markytan med en sändarram försedd med mottagarspolar som hänger under en helikopter. Vid bearbetningen rensas störda data, som är påverkade av t.ex. kraftledningar, elstängsel och järnväg, bort. Med inversionsteknik skapas därefter en resistivitetsmodell för varje mätpunkt, som visar resistivitetsfördelningen i marken ned till ett djup av flera hundra meter beroende på mätsystem. Vid modelleringen görs antagandet att marken är endimensionell, dvs. att resistiviteten enbart varierar med djupet. De resistivitetsmodeller som tas fram kan antingen visualiseras som en sektion längs flyglinjen eller i plan där resistiviteten interpoleras till en yttäckande bild för olika djupsnitt. Det finns även möjlighet att interpolera resistivitetsdata till en 3D-modell för visualisering i någon 3D-programvara.

Vid kartläggning av kvicklera bör ett mätsystem som ger detaljerad yt nära information väljas. En utförligare beskrivning av helikopterburna elektromagnetiska mätningar för kartläggning av kvicklera redovisas i Pfaffhuber et.al, (2017) och Löfroth et.al, (2018).

#### **Fördelar**

- Stora områden kan undersökas på kort tid.
- Ger yttäckande information om resistivitetsfördelningen i marken från ytan och ned till ett djup av minst 50 till 100 m.
- Informationen kan användas till andra ändamål t.ex. detaljerad hydrogeologisk modellering, geologisk kartläggning, bedömning av jordlager, miljöundersökning etc.
- Flygburna TEM-mätningar ger resistivitetsmodeller med bra upplösning som i de flesta fall är jämförbara med resultaten från markburna geofysiska mätningar (ERT och RMT) (Löfroth et.al., 2018). De flygburna TEM-mätningarna har även ett större djupseende i jämförelse med markmätningar.

#### **Nackdelar, begränsningar**

- Hög etableringskostnad.
- Mätområdet bör ha en viss storlek (minst några 100 linjekilometer) för att flygmätningen ska vara kostnadseffektiv.
- Kraftledningar och andra elektriska installationer stör mätningarna.
- Ej tillåtet att flyga över tät bebyggelse eller större vägar på grund av hängande last, vilket begränsar var metoden kan användas.
- Eftersom inversionen av TEM-data bygger på antagandet att resistiviteten enbart varierar i djupled, blir resistiviteten felaktig i områden med stora resistivitetsvariationer i sidled, t.ex. små lerområden mellan berg i dagen. Detta bekräftas av jämförelser utförda i försöksområde Lödöse (Löfroth et.al., 2018).



- Då det inte är möjligt att återskapa skarpa resistivitetskontraster (se kapitel 3.3), är det svårt att utifrån TEM-mätningarna bedöma möjlig förekomst av kvicklera med begränsad mäktighet nära underliggande friktionsjord/berg under mäktiga lågresistiva icke-kvicka lerlager.
- De TEM-mätningar som utförts i Västernorrland av Löfroth et.al. (2018) visar att det generellt förekommer högre resistivitet i icke-kvick lera inom område Torsåker jämfört med fältområdena i Västsverige. Det beror på att jordlagren innehåller silt som generellt har en högre resistivitet i jämförelse med lera. Sammanfattningsvis tyder högre resistivitet på att kvicklera kan förekomma, medan jämförelsevis lägre resistivitet tyder på icke-kvick lera i dessa områden (Löfroth et.al., 2018). Ytterligare jämförelser skulle dock behöva utföras för att detta skulle kunna verifieras.
- Geofysiska mätningar måste alltid kompletteras med geoteknisk provtagning.

#### **Rekommendationer för användning**

- Flygburen resistivitetmätning (TEM) är lämpligt för kartläggning av förutsättningar för kvicklera i större områden (minst några 100 linjekilometer). För att verifiera förekomst av kvicklera erfordras dock geoteknisk provtagning och sensitivitetsbestämning på laboratoriet.
- Det är viktigt att känna till begränsningarna som beskrivs ovan vid tolkningen av data, framförallt om man ska bedöma inom vilka områden det är sannolikt med kvicklere-förekomster.
- För att kunna utvärdera förutsättningar för kvicklera med TEM mätningar behöver redovisningsskalan anpassas så att skillnader i resistivitet i det lågresistiva området mellan 1 och 10 ohm-m kan urskiljas.
- Redovisningen bör göras som diskret redovisning så att gränser i resistivitet urskiljs tydligt. Detta är särskilt viktigt då jämförelser ska göras med utvärderad kvicklera från geoteknisk sondering och provtagning.
- Informationen inom ett område kan även användas för t.ex. bedömning av jordlagerförhållanden och djup till berg.

### **3.3.2 Markbaserad resistivitetmätning (ERT)**

#### **Beskrivning, syfte**

Med ERT (Electrical Resistivity Tomography), mäts markens elektriska resistivitet genom att en ström utsänds i marken via två strömelektroder och samtidigt mäts spänningen med ett antal elektroder vid olika punkter, ofta med 2 eller 5 meters mellanrum, längs mätlinjen. Genom att öka avståndet mellan strömelektroder erhålls en större djupkänning och variationer av markens resistivitet i djupled kan modelleras. Data tolkas sedan med s.k. inversionsprogram och beroende på datainsamlingsgeometrin kan resultaten presenteras som en-, två- eller tredimensionell resistivitetsmodell. En utförligare beskrivning

av markbaserad resistivitetsmätning för kartläggning av kvicklera redovisas i Lundström et al., (2009), Löfroth et.al, (2011), Dahlin et.al, (2013) och Shan et.al, (2014).

### **Fördelar**

- Ger kontinuerlig information om resistivitetsfördelningen i marken längs mätlinjen.
- Datainsamlingen genomförs relativt snabbt upp till ca 1 km/dag beroende på terräng.
- Fungerar generellt bra för undersökning av mindre områden, jämfört med flygburen TEM. Markmätningar är också motiverade i ”besvärliga” områden med stora variationer i topografi och jorddjup.
- Av de geofysiska metoderna som tas upp här (TEM, ERT och RMT), så är ERT den metod som är minst känslig för elektriska ledningar m.m. (jämför text under begränsningar, nedan).

### **Nackdelar, begränsningar**

- Då det inte är möjligt att återskapa skarpa resistivitetskontraster (se kapitel 3.3), är det svårt att utifrån mätningarna bedöma möjlig förekomst av kvicklera med begränsad mäktighet nära underliggande friktionsjord/berg under mäktiga lågresistiva icke-kvicka lerlager. Detta bekräftas av jämförelser utförda i försöksområde Strömstad (Löfroth et.al., 2018).
- Den resistivetsmodell som erhålls har begränsad djupinformation i början och slutet av mätlinjen.
- Markmätningarna (ERT) utförda i Löfroth et.al., (2018) visar att ytliga, torra sandlager kan medföra sämre datakvalité. I fältområde Torsåker i Västernorrland har detta inneburit att resistiviteten mätt med ERT generellt ligger högre än TEM och CPT-R (Löfroth et.al., 2018). Detta medför att bedömning av eventuell förekomst av kvicklera från ERT är svår att göra i liknande områden.
- Existerande infrastruktur: Mätningarna är känsliga för alla objekt som finns inom strömmens räckvidd, dvs. existerande kablar, rör, och andra elektriskt ledande långsträckta konstruktioner i galvanisk kontakt med marken påverkar resistivetsmodellen. Det kan vara svårt att skilja på responsen från dessa jämfört med geologiska förändringar (NIFS, 2015).

### **Rekommendationer för användning**

- Markbaserad resistivitetsmätning (ERT) är lämplig för kartläggning av förutsättningar för kvicklera i mindre områden och områden med stora variationer i topografi och jorddjup. För att verifiera förekomst av kvicklera erfordras dock geoteknisk provtagning och sensitivetsbestämning på laboratoriet (se kapitel 3.4.6).
- Markbaserad ERT kan användas som komplement till flygburen TEM i delar av undersökningsområdet där TEM inte ger användbara resultat p.g.a. störning från exempelvis kraftledningar, eller områden man inte får flyga över.

- För övrigt gäller motsvarande rekommendationer som för flygburen resistivitetsmätning:
- Det är viktigt att känna till begränsningarna som beskrivs ovan vid tolkningen av data, framförallt om man ska bedöma inom vilka områden det är sannolikt med kvicklereförekomster.
- För att kunna utvärdera förutsättningar för kvicklera behöver redovisningsskalan anpassas, så att skillnader i resistivitet i det lågresistiva områden mellan 1 och 10 ohm-m kan urskiljas.
- Redovisningen bör göras som diskret redovisning så att gränser i resistivitet urskiljs tydligt. Detta är särskilt viktigt då jämförelser ska göras med utvärderad kvicklera från geoteknisk sondering och provtagning.
- Informationen inom ett område kan även användas för t.ex. bedömning av jordlagerförhållanden och djup till berg.

### 3.3.3 Markbaserad elektromagnetisk mätning (RMT)

#### **Beskrivning av metoden, syfte**

Med RMT-metoden (Radiomagnetotellurik) bestäms markens resistivitet med hjälp av elektromagnetiska signaler från avlägsna radiosändare i frekvensområdet 10–250 kHz. Djupkänningen är beroende av markens resistivitet och sändarens frekvens. Högre frekvenser ger mer ytnära och detaljerad information och lägre frekvenser tränger djupare ner i marken, men ger sämre upplösning. Insamlade data tolkas med hjälp av inversionsprogram och resultaten presenteras som resistivitetsmodeller i likhet med ERT-metoden. Den maximala djupkänningen för RMT-metoden uppgår i områden med lera till ca 50 meter (Löfroth et.al., 2018). I Sverige utförs metoden för närvarande endast av SGU och Uppsala universitet (Persson & Bastani, 2014). En utförligare beskrivning av markbaserad elektromagnetisk mätning för kartläggning av kvicklera redovisas i Shan et.al, (2014) och Wang et.al, (2016).

#### **Fördelar**

- RMT-mätningar genomförs relativt snabbt, upp till 1 km/dag beroende på terräng och ger en kontinuerlig bild av resistivitetsfördelningen längs mätlinjen.
- Fordrar inga långa kabelutlägg (som vid ERT-mätning).

#### **Nackdelar, begränsningar**

- Metoden är känslig för elektromagnetiska störningar (kablar och elledningar).
- Jämförelser utförda i Löfroth et.al., (2018) visar att RMT har sämre djupkänning än TEM (och i vissa fall ERT). Det innebär att om överliggande lågresistiva lager är för mäktiga kan information om djup till fastare jordlager och urberget inte fås från RMT. För övrigt bedöms metoden ge likvärdiga resultat som markmätt ERT.

**Rekommendationer för användning**

- För markbaserad elektromagnetisk mätning (RMT) gäller motsvarande rekommendationer som för markbaserad resistivitetsmätning (ERT):
  - RMT är lämpligt för kartläggning av förutsättningar för kvicklera i mindre områden och områden med stora variationer i topografi och jorddjup. För att verifiera förekomst av kvicklera erfordras dock geoteknisk provtagning och sensitivitetsbestämning på laboratoriet. (se kapitel 3.4.6).
  - Det är viktigt att känna till begränsningarna som beskrivs ovan vid tolkningen av data, framförallt om man ska bedöma inom vilka områden det är sannolikt med kvicklereförekomster.
  - För att kunna utvärdera förutsättningar för kvicklera behöver redovisningsskalan anpassas så att skillnader i resistivitet i det lågresistiva områden mellan 1 och 10 ohm-m kan urskiljas.
  - Redovisningen bör göras som diskret redovisning så att gränser i resistivitet urskiljs tydligt. Detta är särskilt viktigt då jämförelser ska göras med utvärderad kvicklera från geoteknisk sondering och provtagning.
  - Informationen inom ett område kan även användas för t.ex. bedömning av jordlagerförhållanden och djup till berg.

**3.3.4 Seismiska metoder****Beskrivning, syfte**

Seismiska metoder består av två olika typer: reflektions- och refraktionsseismik. Med båda metoderna alstras ljudvågor med hjälp av t.ex. en fallande vikt eller dynamit. Ankomsttiden registreras sedan med hjälp av geofoner som sprids längs en eller flera profiler. Baserat på mätmetoden bearbetas data på olika sätt. Med refraktionsseismik beräknas skjuvvågs- eller tryckvågshastighet av lager under mätlinjen och resultaten presenteras i form av sektioner (Donohue et al., 2012; Malehmir et al., 2016). Det finns även möjlighet att genomföra inversion (tomografi) och ta fram hastighetssektioner (Wang et al., 2016). Bearbetning av reflektionseismisk data är något mer komplicerad och resultaten presenteras i form av reflektorer (lagergränser) längs en sektion.

Seismiska metoder kan vara användbara vid kartläggning av kvicklera för att identifiera till exempel tunna sandlager som inte kan urskiljas med elektriska och elektromagnetiska metoder. Metoden har även använts i Sverige för att bestämma lerans skjuvvågshastighet (Comina et al., 2017), som har en direkt koppling till skjuvhållfastheten.

**Fördelar**

- Bra upplösning på djupet, ger skarpa lagergränser.

***Nackdelar, begränsningar***

- Kostsam och relativt tidskrävande datainsamling i fält.
- Känslig för brus från omgivningen, dvs. seismiska vågor som uppkommer på annat sätt t.ex. från stark vind, biltrafik.
- Kan inte användas direkt för bedömning av förutsättningar för kvicklera. Däremot skulle den kunna användas för bedömning av förekomst av permeabla lager som gynnar förekomst av kvicklera.

***Rekommendationer för användning***

- Kan användas vid kartläggning av kvicklera för att identifiera till exempel tunna sandlager som inte kan urskiljas med elektriska och elektromagnetiska metoder.
- Kan däremot inte användas direkt för bedömning av förutsättningar för kvicklera.

**3.4 Geotekniska metoder****3.4.1 Tidigare utförda undersökningar*****Arkivsök av tidigare undersökningar - Beskrivning, syfte***

För att få kunskap om kvicklera förekommer inom eller i närheten av ett område kan man få information från tidigare utförda geotekniska utredningar och studera resultat från tidigare utförda undersökningar inom samma, eller närliggande, område. Tidigare utförd kolvprovtagning och även sondering kan ge information om eventuell förekomst av kvicklera. Sådant arkivmaterial kan sökas genom kontakt med aktuell kommun och/eller myndigheter och deras geotekniska arkiv.

Genom att läsa den tidigare utförda geotekniska utredningen kan man få en uppfattning om kvicklera förekommer inom aktuellt område. För att få närmare information om var och hur mycket kvicklera som förekommer behöver man studera resultaten från utförd sondering och provtagning. Detta görs lämpligen innan planering och utförande av ytterligare geoteknisk sondering och provtagning eller geofysiska undersökningar inom området och kan också utgöra underlag för planeringen av dessa nya undersökningar.

***Fördelar***

- En uppfattning av om kvicklera förekommer inom ett område kan fås i ett tidigt skede utan kostsamma undersökningar.

***Nackdelar, begränsningar***

- Det kan vara svårt att få tag på arkivmaterial hos kommuner.
- Undersökningar har inte tidigare utförts inom alla områden.

***Rekommendationer för användning***

- Arkivsök av tidigare utförda geotekniska undersökningar bör alltid utföras. I synnerhet kolvprovtagning men även sondering från tidigare utförda undersökningar är av intresse.

**Geoteknisk sektorsportal - Beskrivning**

Nyare, och i vissa fall även äldre, geotekniska undersökningar kan finnas digitalt i Geoteknisk sektorsportal, som är en nationell samlingsplats för underlag från geotekniska undersökningar och som kan nås från SGI:s hemsida; ([www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)). Här kan man kostnadsfritt söka och lagra information om undersökningsområden och borrhål. Portalen vänder sig till alla som använder geotekniska utredningar hos bland annat kommuner, myndigheter, företag, fastighetsägare, byggherrar, konsulter och entreprenörer. Portalen innehåller geotekniska undersökningsområden och information från enskilda borrhål, där utförd kolvprovtagning kan ge information om eventuell förekomst av kvicklera. Geoteknisk sektorsportal är ett resultat av samarbete mellan Lantmäteriet, Trafikverket, SGI, SGU och SKL. SGI är huvudman och ansvarar för redaktörskapet av den Geotekniska sektorsportalen.

***Fördelar***

- En uppfattning av om kvicklera förekommer inom ett område kan fås i ett tidigt skede utan kostsamma undersökningar.
- I den geotekniska sektorsportalen kan man snabbt få en uppfattning om förekomst av kvicklera ifall det finns närliggande provtagningspunkter.

***Nackdelar, begränsningar***

- I den geotekniska sektorsportalen saknas flertalet undersökningar som utförts innan portalen upprättades.

***Rekommendationer för användning***

- Den geotekniska sektorsportalen bör alltid nyttjas som en del av inventeringen av tidigare undersökningar inom ett område.

### 3.4.2 CPT-sondering

#### **CPT-sondering med mätning av neddrivningsmotstånd, Beskrivning, syfte**

Huvudsyftet med CPT-sondering är oftast att få en bra bild av lagerföljder, relativ fasthet och variationer i jordens egenskaper mot djupet. Vid CPT-sondering mäts spetsmotståndet, mantelfriktionen mot en "friktionshylsa" ovanför spetsen och det porvattentryck som genereras vid spetsen under neddrivningen. CPT-sondering beskrivs utförligare i SGF (2013) och Larsson, R (2015) och regleras i standarden SS-EN ISO 22476-1:2012.

För att kunna bedöma förekomsten av kvicklera behöver det totala neddrivningsmotståndet vid CPT-sondering mätas. Det uppmätta neddrivningsmotståndet, kompletterat med tyngden av borrhängerna och reducerat med spetskraften, motsvarar mantelfriktionen längs stängerna (i kN). Denna mantelfriktion jämförs sedan med en mantelfriktion av 1 kPa/m längs med stängerna. I de fall lutningen på kurvan för mantelfriktion längs stängerna mot djupet är mindre än lutningen på kurvan för 1 kPa mantelfriktion per meter, klassas leran som kvicklera (Löfroth, 2011, Åhnberg et al., 2014).

Denna utvärdering från CPT-sondering resulterar i att man tolkar något mer lera som kvicklera än vad som finns i ett område (Löfroth, 2011). Detta är alltså på säkra sidan så att områden med kvicklera inte missas. Ett verktyg i Excel för att bedöma kvicklereförekomst i ett område utifrån sonderingsresultat finns nedladdningsbart från SGI:s hemsida ([www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)).

#### **Fördelar**

- Användning av CPT för bedömning av om kvicklera förekommer inom ett område ger resultat något på säkra sidan. Näst efter kolvprovtagning med laboratoriebestämning är det den säkraste metoden.
- Det är en snabbare och billigare metod än provtagning.
- Eftersom CPT-sondering är en standardmetod för bestämning av jordlagerföljd och jordegenskaper utförs den ofta ändå av andra anledningar än kvicklerekartläggning.

#### **Nackdelar, begränsningar**

- Metoden är inte lämplig för bedömning av kvicklera i jordlager som är skiktade och består av omväxlande siltig lera, lerig silt och silt. Det är heller inte lämpligt att använda metoden när leran överlagras av mäktiga fasta friktionslager (Löfroth et.al., 2018). I så fall behöver förborring göras genom de fasta friktionslagren.
- Den ger endast bestämning av kvicklera i en enskild punkt.

#### **Rekommendationer för användning**

- Bedömning av kvicklera från CPT bör alltid göras vid CPT-sondering i lera. Detta görs genom att neddrivningsmotståndet mäts och därefter utvärderas kvicklera utifrån

mantelfriktionen längs stängerna, t.ex. med av SGI framtaget verktyg i Excel ([www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)).

- Metoden bör användas som ett komplement till provtagning för bedömning av kvicklereförekomst.
- Det är den säkraste sonderingsmetoden för bedömning av kvicklera och bör därför väljas före andra sonderingsmetoder. Näst efter kolvprovtagning med laboratoriebestämning är det den säkraste metoden.
- Metoden bör inte användas i skiktade jordlager med omväxlande lera och silt, eller där leran överlagras av mäktiga friktionslager. I så fall behöver förborring göras genom de fasta friktionslagren.

#### **CPT-sondering med resistivitetsmätning (CPT-R) samt mätning av neddrivningsmotstånd, Beskrivning**

CPT-sondering kan kompletteras med mätenheter som kontinuerligt registrerar resistiviteten på ett specifikt djup under sonderingen och kallas då CPT-R. Även vid CPT-R-sondering behöver det totala neddrivningsmotståndet mätas för att förekomsten av kvicklera ska kunna bedömas. Metoden har tidigare använts och utvärderats i Sverige av bland andra Löfroth et al. (2011) samt av Dahlin et al. (2014).

#### **Fördelar**

- Utöver de fördelar som finns med CPT-sondering med mätning av neddrivningsmotstånd, kan med CPT-R en jämförelse och korrelation fås mot utförda flygburna/markbaserade resistivitetsmätningar.

#### **Nackdelar, begränsningar**

- Samma som för CPT-sondering.

#### **Rekommendationer för användning**

- I områden där flygburna eller markbaserade resistivitetsmätningar utförts bör företrädesvis CPT-R-sondering utföras i stället för CPT-sondering.

### **3.4.3 Trycksondering**

#### **Beskrivning, syfte**

Vid trycksondering, även kallad mekanisk trycksondering eller totaltrycksondering, trycks sonderingsspetsen ner i jorden och den totala neddrivningskraften registreras (SGF, 2013). För trycksondering gäller att det uppmätta neddrivningsmotståndet, kompletterat med tyngden av stängerna, motsvarar mantelfriktionen längs stängerna (i kN). På samma sätt som för CPT-sondering gäller även för trycksondering att i de fall lutningen



på kurvan för mantelfriktion längs stängerna mot djupet är mindre än lutningen på kurvan för 1 kPa/m mantelfriktion, klassas leran som kvicklera.

Utvärdering av metoden visade att nästan alla nivåer som utvärderats som kvicklera med fallkonförsök på prov från kolvprovtagning klassificerades även som kvicklera med trycksondering. Dessutom identifierades ytterligare nivåer som kvicklera enligt trycksondering, vilka inte utvärderats som kvicklera enligt fallkonförsöken (Löfroth, 2011). Detta är alltså på säkra sidan så att områden med kvicklera inte missas. Däremot överskattas förekomsten av kvicklera. Ett Excelverktyg för att bedöma kvicklereförekomst i ett område utifrån sonderingsresultat finns nedladdningsbart från SGI:s hemsida ([www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)).

#### ***Fördelar med metoden***

- Metoden är säker eftersom den utvärderar kvicklera på samma nivåer som fallkonförsöken gör.
- Eftersom trycksondering är en standardmetod vid geoteknisk undersökning så finns oftast väldigt många undersökningspunkter. Därmed får man en bra uppfattning om kvicklerans utbredning och kan använda den som en första metod för att ge underlag för ytterligare undersökningar och provtagningar i utpekade områden.
- Trycksondering är en snabbare metod än CPT-sondering och därmed mer ekonomisk.

#### ***Nackdelar, begränsningar***

- Med metoden bedöms ett för stort antal extra nivåer i leran som kvicklera för att metoden skall anses vara riktigt bra.
- Det är inte lämpligt att använda metoden när leran överlagras av mäktiga fasta friktionslager eller omväxlande fasta och lösa lager.
- Den ger endast bestämning av kvicklera i en enskild punkt.

#### ***Rekommendationer för användning***

- Då trycksondering används inom ett lerområde bör bedömning av kvicklera alltid göras. CPT-sondering bör dock väljas i första hand, dvs. före trycksondering för bedömning av kvicklera.
- Metoden är kostnadseffektiv för att ge en uppfattning om kvicklereförekomst över ett större område jämfört med andra sonderingsmetoder.

### 3.4.4 Andra sonderingsmetoder

#### **Beskrivning av metoderna, syfte**

Bedömning av förekomst av kvicklera från ett par andra sonderingsmetoder har utvärderats i Sverige. Dessa metoder är vrid-trycksondering (dreietrykksondering) och totalsondering (Rankka et.al., 2004). Båda dessa metoder har utvecklats och används i Norge bl.a. för tolkning av jordlagerförhållanden.

Vrid-trycksondering är en norsk metod utvecklad på 1960-talet. Den använder en vriden spets som roteras ner i marken med konstant tryck och rotationshastighet. Sonderingsmotståndet registreras vid neddrivningen. Metoden kan användas i de flesta jordar från lera till grus. Lera som är kvick eller mycket sensitiv ger en i stort sett vertikal sonderingskurva, medans mindre sensitiv lera visar på ett ökat sonderingsmotstånd mot djupet (NIFS, 2015).

Totalsonderingsmetoden utvecklades i Norge för att få fram en metod som var känslig nog för att registrera alla lager i en jordprofil och dess relativa fasthet, men den skulle ändå vara robust nog att ta sig igenom alla typer av fyllningar och jordlager så väl som stora block och berg. Metoden anpassad efter svenska förhållanden benämns JB-totalsondering. Vid vridtryckskedet under JB-totalsondering trycks borrhängerna ned i marken med konstant tryck- och rotationshastighet. Neddrivningskraften registreras under hela sonderingen. Metoden beskrivs mer utförligt i SGF (2012).

Resultatet från vridtryckskedet kan ge underlag för att bedöma jordart och värdera fastheten hos materialet. Om kurvans lutning är vertikal eller negativ kan det antas vara kvicklera på de nivåerna.

#### **Fördelar**

- Metoderna har testats i Sverige och det är möjligt att bedöma förekomst av kvicklera från metoderna (Rankka, et.al., 2004).

#### **Nackdelar, begränsningar**

- Metoderna är främst lämpade för grövre jordar och totalsondering även för bestämning av djup till berg.
- Det finns inte någon gräns framtagen för när leran bedöms som kvick utifrån resultatet av dessa metoder. Den enda bedömning som finns är att sonderingskurvan ska vara i stort sett vertikal.

#### **Rekommendationer för användning**

- För bedömning av förekomst av kvicklera bör i första hand CPT-sondering eller trycksondering användas.

### 3.4.5 Vingsondering

#### **Beskrivning av metoden, syfte**

Vingsondering (vingförsök) används för att mäta den odränerade skjuvhållfastheten i kohesionsjordar. Vid försöket trycks en vinge fäst på sondstänger ner i marken till försöksnivån med en borrhandsvagn. Sedan roteras instrumentet, mekaniskt eller elektriskt, med en konstant hastighet till dess att brott uppstår (efter 2–4 minuter). Detta ger den odränerade skjuvhållfastheten. Den omrörda skjuvhållfastheten kan fås fram om ett nytt försök görs på samma nivå efter en hastig omrörning ca 20 varv (SGF, 2013). Vingsondering är den enda in situ-metoden som har använts för att uppskatta både den ostörda och den omrörda odränerade skjuvhållfastheten (Rankka et al., 2004). I SGF (1993) beskrivs den rekommenderade standarden för vingförsök i fält.

#### **Fördelar**

- Vingsondering är den enda in situ-metoden som har använts för att uppskatta både den ostörda och den omrörda odränerade skjuvhållfastheten.

#### **Nackdelar, begränsningar**

- Tidigare undersökningar visar att resultaten från vingförsök ofta underskattar sensitiviteten i jorden, särskilt vid kvicklorer (Rankka et al., 2004).

#### **Rekommendationer för användning**

- Metoden rekommenderas inte för bedömning av kvicklera eftersom den underskattar förekomsten av kvicklera.

### 3.4.6 Provtagning i fält och bestämning i laboratoriet

#### **Fallkonförsök - Beskrivning av metoden, syfte**

Uptagning av ostörda prover i fält sker vanligen med en kolvprovtagare. Vid provtagningen pressas en cylindrisk provtagare ner i jorden och ostörda prov stansas ut i de 3 provhyllsorna. Metoden fungerar bäst i lera och gyttja men kan även användas i silt och finsand (SGF, 2013). Metoden finns beskriven i SGF (2009). I Sverige används idag två typer av kolvprovtagare, St I och St II. Provtagare St II har till skillnad från St I ett skyddsror i vilket det yttre provtagarröret är inkapslat under neddrivningen. Genom dess konstruktion underlättas en jämn utstansning av provet, vilket är en fördel för provkvaliteten (SGF, 2013). För att proverna skall hålla god kvalitet och förbli ostörda är det viktigt att transporten från fält till laboratoriet sker under goda förhållanden, dvs. att vibrationer och stora temperaturvariationer undviks. Frysning får absolut inte förekomma.

I laboratoriet används ostörda jordprov från kolvprovtagning vid fallkonförsök för bestämning av odränerad skjuvhållfasthet i finkorniga jordar. Vid försöket förs en kon, upphängd i en fallkonapparat, ned mot provet tills spetsen precis möter provet. Konen släpps sedan och faller fritt varefter inträngningsdjupet i provet mäts. Provets odränerade skjuvhållfasthet kan sedan beräknas. Konförsök styrs av standarden ISO/TS 17892-6:2004.

Även den omrörda odränerade skjuvhållfastheten mäts med fallkonförsök i laboratoriet efter att provet har rörts om. Därefter beräknas sensitiviteten för materialet som den ostörda skjuvhållfastheten dividerat med den omrörda skjuvhållfastheten. Både ostörd och omrörd skjuvhållfasthet kan bestämmas med metoden, dock krävs ostörda kolvprover för bestämning av den ostörda hållfastheten vilket innebär en högre kostnad i fält jämfört med skruvprovtagning.

#### ***Fördelar med metoden***

- Det är den enda metoden för bestämning av lerans sensitivitet och därmed för bestämning av om leran är högsensitiv eller kvick och i så fall hur kvick den är.
- Eftersom kolvprovtagning är en standardmetod för upptagning av prover för bestämning jordegenskaper, används den även för andra syften vid projektering av t.ex. väg och järnväg. Därmed innebär inte mätningarna någon större merkostnad.

#### ***Nackdelar med metoden, begränsningar***

- Den ger endast bestämning av kvicklera i en enskild punkt och endast på de nivåer där provtagning görs.

#### ***Rekommendationer för användning***

- Kolvprovtagning med fallkonförsök på laboratoriet bör alltid utföras som komplement till sondering och eventuella andra metoder för att fastställa vilken sensitivitet leran har och om den är kvick.

#### ***Kvasiflytindex - Beskrivning, syfte***

På laboratoriet görs rutinmässigt bestämning av lerans vattenkvot och flytgräns på ostörda prover. Minskande salthalt medför att lerans flytgräns minskar. I Sverige har relationen mellan kvasiflytindex (vattenkvot/flytgräns,  $w_N/w_L$ ) och sensitivitet använts. Enligt tidigare svenska undersökningar av sensitivitet bör kvasiflytindex vara högre än 1,1 för att leran ska vara kvick. I studien som ligger till grund för denna vägledning (Löfroth et.al., 2018) visar kvasiflytindex relativt stor spridning och ligger mellan 1,0 och 1,3 för en sensitivitet kring 50, dvs. motsvarande kvicklera.

#### ***Fördelar***

- Metoden är ett bra komplement eller stöd till bestämning av sensitivitet med fallkonförsök. Detta kan vara värdefullt t.ex. då upptagna kolvprover misstänks vara störda

eller när leran är siltig/siltskiktad, och bestämningen av den ostörda odränerade skjuvhållfastheten därmed är osäker.

***Nackdelar, begränsningar***

- Metoden visar relativt stor spridning i resultaten (Löfroth et.al., 2018).

***Rekommendationer för användning***

- Metoden bör användas som ett komplement eller stöd till bestämning av sensitivitet med fallkonförsök, särskilt då upptagna prover misstänks vara störda eller leran är siltig/siltskiktad.
- Den kan inte användas i stället för bestämning av sensitivitet med fallkonförsök.

## 4. Metodik för kartläggning av kvicklera

### 4.1 Beskrivning av ett stegvis tillvägagångssätt

#### 4.1.1 Uppdelning i skeden

Den övergripande målsättningen med projektet har varit att utveckla en metodik för kartläggning av förekomst av kvicklera inom ett specifikt område. Metodiken är uppbyggd i steg med ökande detaljeringsnivå och innehåller de geologiska, geofysiska och geotekniska undersökningsmetoder som rekommenderas i kapitel 3. Syftet med en stegvis uppbyggd metodik är att få till ett kostnadseffektivt användande av resurser.

En grov indelning av tillämpliga metoder kan göras i tidiga, respektive sena skeden i planerings- och projekteringsprocessen. En schematisk presentation av metodiken för tidigt respektive sent skede visas i Figur 4.2 och Figur 4.3. Skiljelinjen utgörs av behovet av att komplettera utredningen med landbaserade geofysiska och geotekniska fältundersökningar. Till det tidiga skedet kan t.ex. översiktsplaner och lokaliseringsutredningar hänföras medan t.ex. detaljplaner och väg- järnvägsplaner oftast associeras till det senare skedet, se Figur 4.1. I de allra tidigaste skedena, såsom länsstyrelsernas regionala planeringsunderlag och åtgärdsvalsstudier vid planering av väg- och järnväg, berörs inte geotekniska frågeställningar och förekomst av kvicklera är därmed inte aktuell.

Myndighet	Skeden som beskrivs i metodik för kartläggning av kvicklera		
	Tidigt skede	Sent skede	
Trafikverket	Lokaliseringsutredning	Vägplan, järnvägsplan (huvuddelen av geoundersökningarna utförs här)	Förfrågningsunderlag, bygghandling (mindre del av geoundersökningar utförs här)
Kommuner	Översiktsplan (ÖP), områdesbestämmelser.	Detaljplan (alltid detaljerad geoteknisk utredning)	Bygglov
MSB	Översiktlig stabilitetskartering	Detaljerad stabilitetsutredning	Fördjupad stabilitetsutredning (krav för stadsbidsärenden)

Figur 4.1 Schematisk presentation över tidiga och sena skeden då kartläggning av kvicklera bör beaktas.

### 4.1.2 Tidigt skede

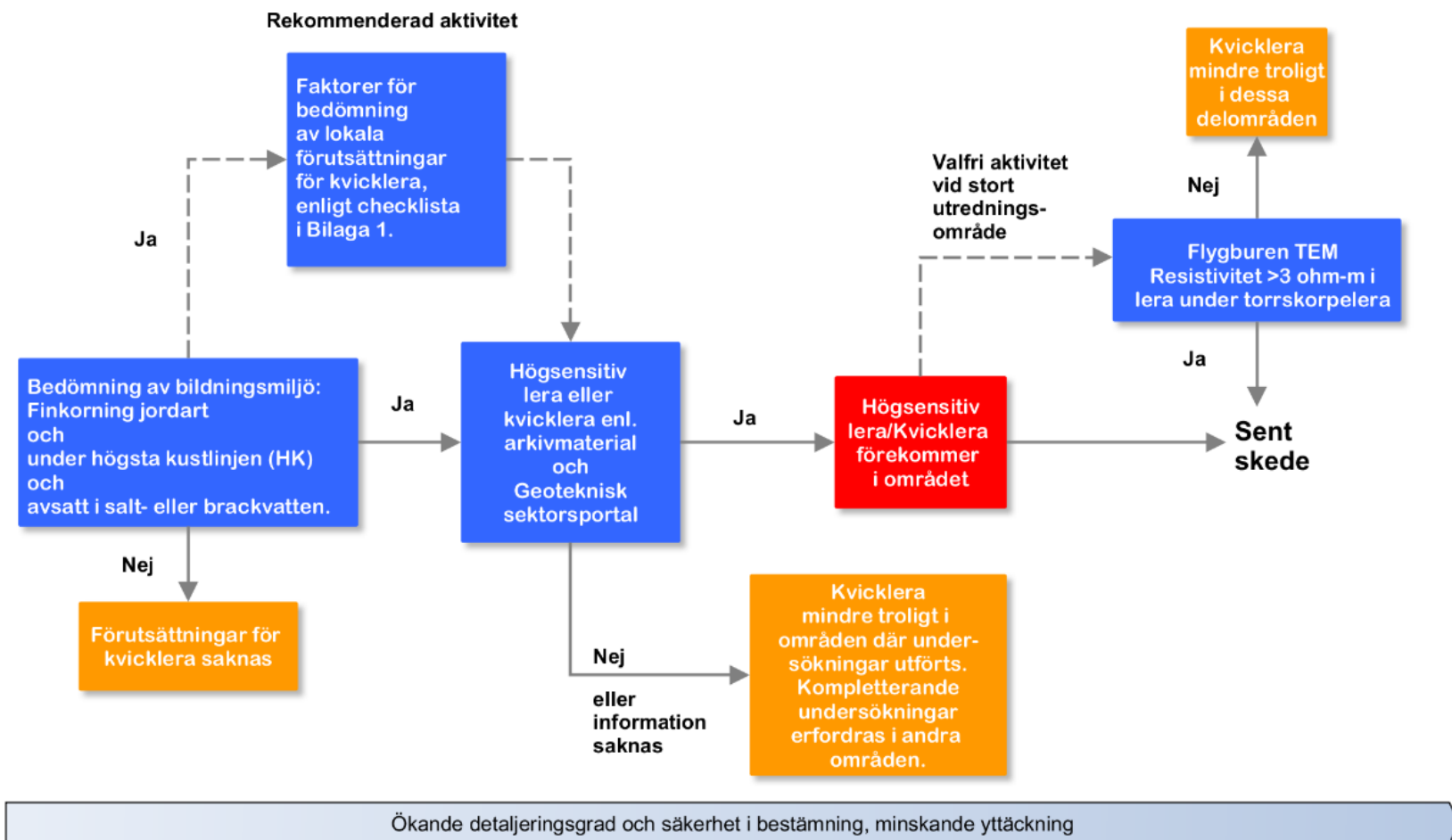
I ett tidigt skede (Figur 4.2) görs först en bedömning av bildningsmiljön för i området förekommande avlagringar av finkorniga jordarter, dvs. om området ligger under högsta kustlinjen och om den finkorniga jorden är avsatt i saltvatten, brackvatten eller sötvatten (avsnitt 3.2.1). Detta ger en relativt snabb och yttäckande första bild över förutsättningarna för bildandet av kvicklera.

Finns det geologiska förutsättningar för bildning av kvicklera kan man därefter gå vidare med att bedöma andra faktorer som innebär ökade förutsättningar för förekomst av kvicklera, i syfte t. ex. att få en uppfattning om var inom området förutsättningarna är störst respektive minst (avsnitt 3.2.1). En checklista har tagits fram för att underlätta bedömningen (Bilaga 1).

Samtidigt utförs en inventering av befintligt underlag (avsnitt 3.4.1). I ett tidigt skede innebär det att göra en sammanställning av redan utförda utredningar, vilka det senare under projektets gång kan finnas behov av att återkomma till och fördjupa sig i. Det innebär också att hämta information från den Geotekniska sektorsportalen (avsnitt 3.4.1) om utförd provtagning och bedömning av kvicklera inom aktuellt område. Detta kan sedan utgöra ett underlag vid framtagande av en plan för fortsatta undersökningar. Notera att frånvaro av kvicklera inom dessa områden inte i sig innebär att området är fritt från kvicklera.

Vid större områden kan ett tidigt skede avslutas med att utredningen kompletteras med flygburen resistivitetmätning (TEM) (avsnitt 3.3.1). Detta är en geofysisk metod som ger yttäckande information på kort tid men också har en hög etableringskostnad varför den bäst lämpar sig för större områden. Med geofysiska metoder kan förutsättningarna för förekomst av kvicklera bedömas. Som en första ansats på säkra sidan kan 3 ohm-m antas som ett gränsvärde över vilket förutsättningar för förekomst av kvicklera finns (gäller även för markbaserad resistivitetmätning). Tidigare studier har visat på ett gränsvärde av 5 ohm-m. Löfroth et al. (2018) har dock visat att kvicklera kan förekomma där lägre resistivitet uppmätts varför det erfordras att gränsvärdet klarläggs för respektive område efterhand som utredningen blir mer detaljerad.

# Tidigt skede



Figur 4.2. Flödesschema över metodik för kartläggning av kvicklera i tidigt skede



### 4.1.3 Sent skede

I de fall då resultat från det tidiga skedet inte finns tillgängliga utförs utredningsstegen från det tidiga skedet inledningsvis i det sena skedet.

I ett sent skede (Figur 4.3) kan såväl flygburna som markmätta geofysiska undersökningar utföras i syfte att öka kunskapen om områdets förutsättningar för kvicklera och för att skilja delområden där förutsättningar för kvicklera finns, från delområden där förutsättningar för kvicklera inte bedöms finnas. Markmätta geofysiska mätningar (ERT och RMT) utförs för att få en kontinuerlig bild av förutsättningarna för kvicklera längs en mätlinje (avsnitt 3.3.2 respektive 3.3.3). Utifrån resultatet av de geofysiska mätningarna görs sedan en bedömning av var geotekniska undersökningar ska utföras.

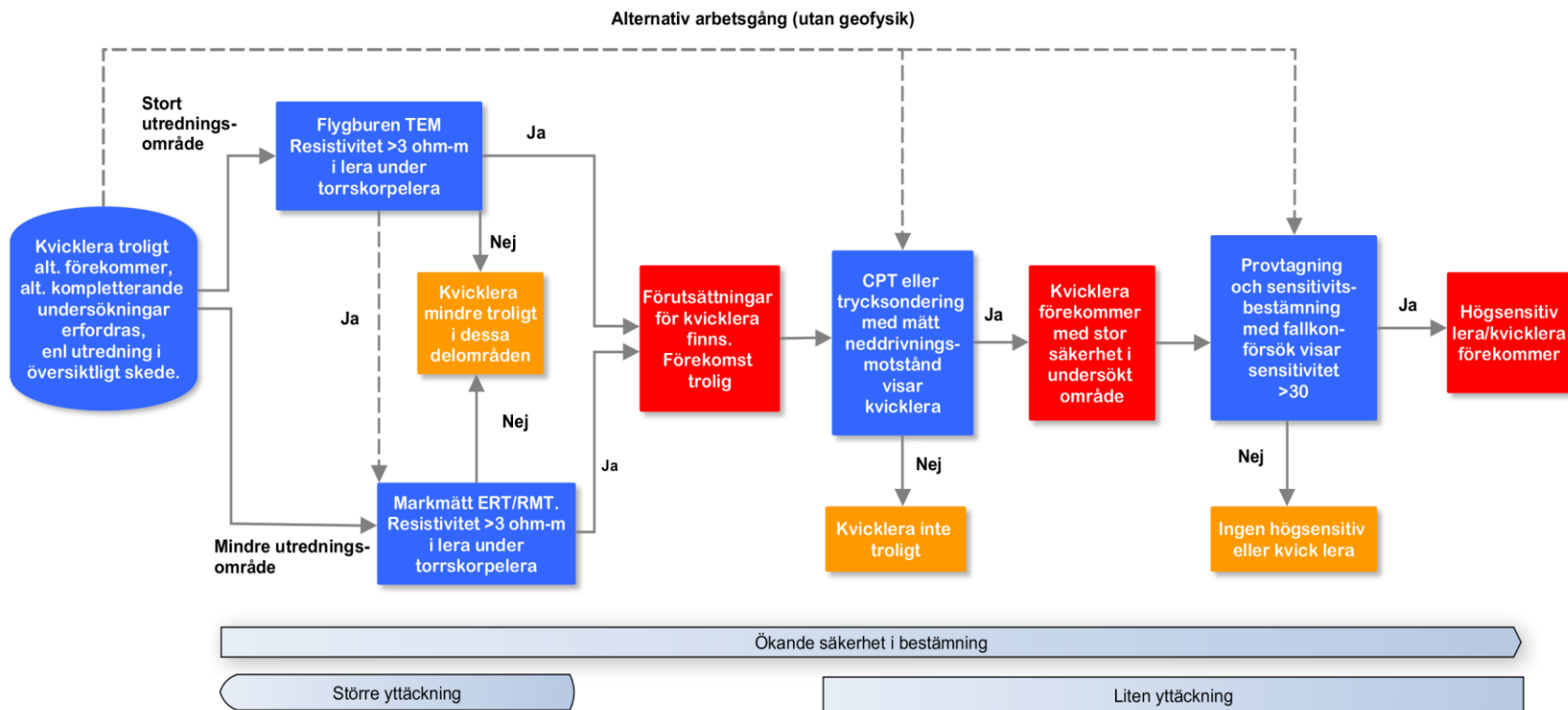
Geotekniska sonderingar, företrädesvis CPT/CPT-R med mätning av det totala neddrivningsmotståndet, eller alternativt trycksondering, utförs som nästa steg för bedömning av om kvicklera förekommer inom ett område (avsnitt 3.4.2 och 3.4.3). De är mindre tids- och kostnadseffektiva än geofysiska mätningar, men erfordras för att kunna bedöma om kvicklera förekommer inom ett område. Det är också standardmetoder för bedömning av jordlagerföljd och, för CPT, även jordegenskaper, varför de ofta utförs ändå av andra anledningar än kvicklerekartläggning. Geotekniska sonderingar utförs också för att kalibrera resistivitmätningar, bl.a. avseende indelning och tolkning av lager. I detta avseende medger CPT-R en direkt koppling mellan uppmätt resistivitet och förekomst av kvicklera, vilket inte fås med CPT eller trycksondering.

Slutligen utförs alltid kolvprovtagning med fallkonförsök på laboratoriet i utvalda punkter där geoteknisk sondering utförts (avsnitt 3.4.6). Fallkonförsöken är den enda metoden för bestämning av lerans sensitivitet och därmed om leran är högsensitiv eller kvick och i så fall hur kvick den är. Som ett komplement till fallkonförsök bör även kvasiflytindex (vattnkvot/flytgräns) bestämmas, då dessa parametrar alltid tas fram vid rutinundersökning av kolvprover (avsnitt 3.4.6).

Såväl geofysiska mätningar som geotekniska sonderingar visar på svårigheter att kartlägga kvicklera i områden med varierande jordlagerförhållanden med omväxlande skikt av lera, siltig lera, lerig silt, silt och sand såsom i Västernorrland (avsnitt 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.4.2 och 3.4.3). Metodiken för kartläggning av kvicklera för sent skede är därför bättre lämpad för de jordlagerförhållanden som råder i Västsverige.

Notera att för att ta fram underlag för att kalibrera och verifiera tolkningen av jordlagerföljd från geofysiska metoder är det nödvändigt att utföra geoteknisk sondering och provtagning, med exempelvis CPT eller trycksondering och kolvprovtagning. För att bestämma gränsvärde för resistivitet erfordras att resultat från undersökningar i fält verifieras med fallkonförsök på upptagna kolvprover. Provtagning med exempelvis kolvprovtagare krävs även för att fullt ut nyttja resultaten från geotekniska sonderingar, vilket kan vara till stor nytta i projekt utifrån andra frågeställningar. Ett tunt sammanhängande skikt kvicklera (<1 m) bedöms vara tillräckligt för att följdskred ska kunna utvecklas.

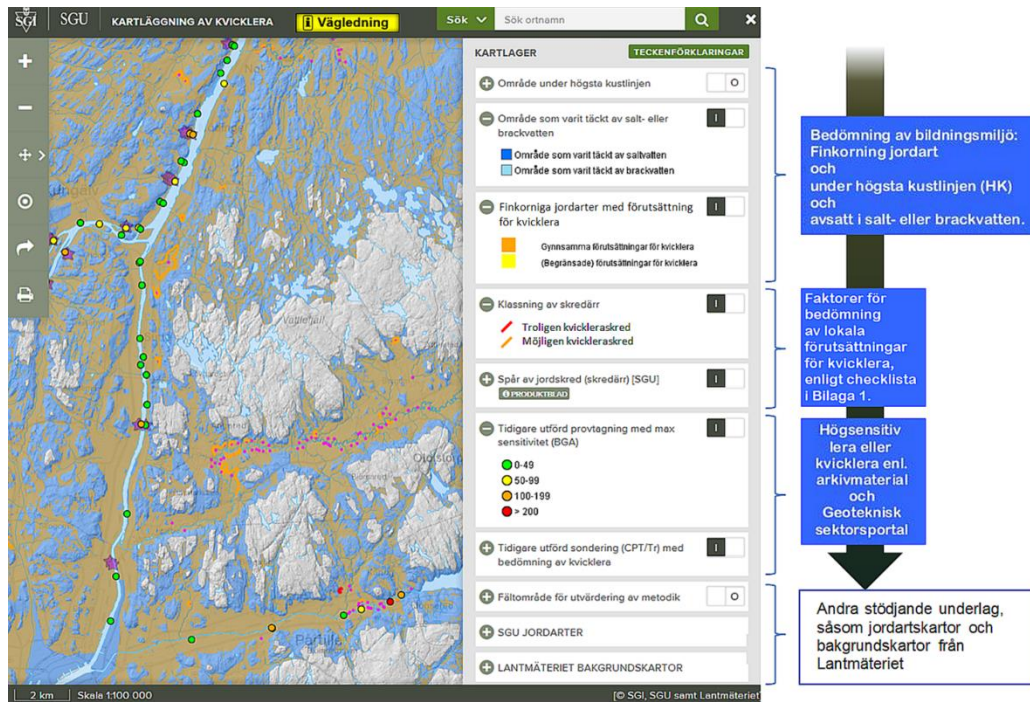
# Sent skede



Figur 4.3 Flödesschema över metodik för kartläggning av kvicklera i sent skede. Fämst lämpad för västsvenska förhållanden.

## 4.2 Kartvisningstjänst

Via SGI:s hemsida [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se) når man kartvisningstjänsten Kartläggning av kvicklera. Tjänsten tillhandahåller geografisk information som stödjer arbetet med kartläggning av kvicklereområden. Det stegvisa tillvägagångssätt som beskrivs i metodiken (avsnitt 4.1.2) speglas i kartvisaren genom lager av information med ökande detaljeringsnivå (Figur 4.4).



Figur 4.4 Utsnitt ur kartvisningstjänsten för kartläggning av kvicklera. Kartan täcker hela Sverige och presenterar relevant information (med ökande detaljeringsnivå) via teckenförklaringens utformning. De blåa textrutorna (från Figur 4.2) indikerar vilka kartlager som kan användas för respektive steg i arbetsmetodiken.

Tjänsten startar i skala 1:1 000 000 och förutom bakgrundskarta, är endast lagret för *Område som varit täckt av saltvatten eller brackvatten* påslaget. Vid nästa skalsteg (1:500 000) tänds lagret för *Finkorniga jordarter med förutsättning för kvicklera* (se Bilaga 2) tillsammans med lagret *Område under högsta kustlinjen (HK)*. Detta är en bra utgångspunkt för att t.ex. avgöra om det finns förutsättningar för kvicklera i området i fråga. Utifrån detta underlag kan man således svara på frågorna i första rutan i flödesschemat för tidigt skede, **bedömning av bildningsmiljö** (Figur 4.2). Med hjälp av checklistan (Bilaga 1) och nästföljande kartsnitt, *Klassning av skredärr* (och spår av jordskred), går man vidare för att etablera om dessa **lokala förutsättningar** (tillsammans med andra) är vanligt förekommande i området och i så fall var inom området. Det sista steget som kartvisningstjänsten stödjer är frågan om **högsensitiv lera** eller **kvicklera** förekommer. I karttjänsten ges information om lerors sensitivitet från utförda provtagningar samt bedömningar av kvicklereförekomst från punktvisa sonderingar.

Utöver ovan beskrivna lager, innehåller tjänsten även jordartskartor från SGU i skalorna 1:25 000-1:100 000, 1:200 000 (Västernorrland) och 1:250 000 (Nordligaste Sverige)

samt bakgrundskartor från Lantmäteriet (Topografiska webbkartan, ortofoto 0,50/0,25 m upplösning, terrängskuggning, höjdinformation RH2000, och hydrografi). Alla lager kan tändas och släckas oberoende av varandra.

Från kartvisningstjänsten når man även denna vägledning samt tillämpnings- och utvärderingsrapporten (Löfroth et al., 2018) (via klick i Fältområde för utvärdering av metodik) som i detalj redovisar tillämpning och jämförelser av geofysiska och geotekniska mätningar i utvalda fältområden.

## Referenser

- Bergdahl, K, Odén, K, Löfroth, H, Göransson, G, Jönsson, Å & Kiilsgaard, R 2015, *Skredrisker i ett förändrat klimat – Norsälven. Del 2: Metod för kartläggning*, Statens geotekniska institut, SGI Publikation 18-2, Linköping.
- Brand, EW & Brenner, RP 1981, *Soft clay engineering*, Elsevier, Amsterdam.
- Comina, C, Krawczyk, CM, Polom, U, & Socco, LV 2017, 'Integration of SH seismic reflection and Love-wave dispersion data for shear wave velocity determination over quick clays', *Geophysical Journal International*, vol. 210, no. 3, pp. 1922-1931.
- Dahlin, T, Löfroth, H, Schälin, D & Suer, P 2013, 'Mapping of quick clay using geoelectrical imaging and CPTU-resistivity', *Near Surface Geophysics*, vol. 11, no. 6, pp. 659-670, doi: 10.3997/1873-0604.2013044.
- Dahlin, T, Schälin, D & Tornborg, J 2014, 'Mapping of quick clay by ERT and CPT-R in the Göta Älv River Valley', In L'Heureux, JS, Locat, A, Leroueil, S, Demers, D, Locat, J, (eds), *Landslides in sensitive clays. From geosciences to risk management*, pp. 217-228, Springer, Dordrecht.
- Donohue, S, Long, M, O'Connor, P, Helle, TE, Pfaffhuber, AA & Romoen, A 2012, 'Multi-method geophysical mapping of quick clay', *Near Surface Geophysics*, vol. 10, no. 3, pp. 207-219.
- ISO/TS 17892-6:2004, *Geoteknisk undersökning och provning – Laboratorieundersökning av jord – Del 6: Konförsök*, SIS, Swedish Standards Institute, Stockholm.
- Kalscheuer, T, Bastani, M, Donohue, S, Persson, L, Pfaffhuber, AA, Reiser, F & Ren, Z 2013, 'Delineation of a quick clay zone at Smorgrav, Norway, with electromagnetic methods under geotechnical constraints', *Journal of Applied Geophysics*, vol. 92, pp. 121-136.
- Larsson, R 2008, *Jords egenskaper*, Statens geotekniska institut, SGI Information 1, Linköping.
- Larsson, R 2015, *CPT-sondering. Utrustning – utförande – utvärdering. En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord*, Statens geotekniska institut, SGI Information 15, 3 rev utg., Linköping.
- Larsson, R, Ottosson, E & Sällfors, G 1994, *Agnesbergsskredet*, Statens geotekniska institut, SGI Rapport 44, Linköping.
- Lundström, K, Larsson, R & Dahlin, T 2009, 'Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods', *Landslides*, vol. 6, no. 1, pp. 1-15.
- Löfroth, H 2011, *Kartering av kvickreläreförekomst för skredriskanalyser inom Göta älvutredningen – Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU Delrapport 29, Linköping.
- Löfroth, H & Persson, L 2016, 'Metodik för kartläggning av kvicklera', *Grundläggningdagen 2016: Gränslös geoteknik*, Stockholm, pp. 201-214.

- Löfroth, H, Persson, L, Bastani, M, Rodhe, L, Hedfors, J, With, C, Ekström, J & Engdahl, M 2018, *Tillämpning och utvärdering av metodik för kartläggning av kvicklera*, Statens geotekniska institut, SGI, Linköping.
- Löfroth, H, Suer, P, Dahlin, T, Leroux, V & Schälin, D 2011, *Quick-clay mapping by resistivity – surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU Delrapport 30, Linköping.
- Malehmir, A, Socco, LV, Bastani, M, Krawczyk, CM, Pfaffhuber, AA, Miller, RD, Maurer, H, Frauenfelder, R, Suto, K, Bazin, S, Merz, K & Dahlin, T 2016, 'Near-Surface Geophysical Characterization of Areas Prone to Natural Hazards: A Review of the Current and Perspective on the Future', in Nielsen, L, (ed) *Advances in Geophysics*, pp. 51-146, Elsevier, Amsterdam.
- Melchiorre, C, Smith, C & Rodhe, L 2014, *Analysis of landslide scarp data, Sweden*, Sveriges geologiska undersökning, SGU, Uppsala. Dnr: 315-1895/2014.
- NIFS 2015, *Detektering av kvikkeire – Slutrapport*, Naturfareprosjektet: Delprojekt 6 Kvikkeire, Norges vassdrags- og energidirektorat, Rapport nr 126-2015, Oslo.
- Persson, L & Bastani, M 2014, *Beskrivning av olika geofysiska metoder för kartläggning av kvicklera*, Sveriges geologiska undersökning, PM 2014-09-05, Uppsala.
- Persson, M 2014, *Predicting spatial and stratigraphic quick-clay distribution in SW Sweden*, PhD thesis, University of Gothenburg.
- Pfaffhuber, AA, Persson, L, Lysdahl, AOK, Kåsin, K, Anschütz, H, Bastani, M, Bazin, S & Löfroth, H 2017, 'Integrated scanning for quick clay with AEM and ground based investigations', *First Break*, vol. 35, no. 8, pp. 73-79.
- Rankka, K, Andersson-Sköld, Y, Hultén, C, Larsson, R, Leroux, V & Dahlin, T 2004, *Quick clay in Sweden*, Statens geotekniska institut, SGI Rapport 65, Linköping.
- Schoning, K 2016, *Saltvattenavsatta leror i Sverige med potential för att bilda kvicklera*, Sveriges geologiska undersökning, SGU Rapport 2016:8, Uppsala.
- SGF 1993, *Rekommenderad standard för vingförsök i fält*, Svenska geotekniska föreningen, SGF Rapport 2:93, Linköping.
- SGF 2009, *Metodbeskrivning för provtagning med standardkolvprovtagare. Ostörd provtagning i finkornig jord*, Svenska geotekniska föreningen, SGF Rapport 1:2009, Linköping.
- SGF 2012, *Metodbeskrivning för jord-bergsondering*, Svenska geotekniska föreningen, SGF Rapport 4:2012, Göteborg.
- SGF 2013, *Geoteknisk fälthandbok. Version 1.0*, Svenska geotekniska föreningen, SGF Rapport 1:2013, Göteborg.
- SGI 2012, *Skredrisker i Göta älv dalen i ett förändrat klimat, Slutrapport. Del 2 – Kartläggning*, Statens geotekniska institut, SGI, Göta älvutredningen, GÄU, Linköping.
- SGI 2017, *Skredrisker i ett förändrat klimat – Säveån, Del 2: Metodik för kartläggning*, Statens geotekniska institut, SGI Publikation 38–2, Linköping.

- Shan, C, Bastani, M, Malehmir, A, Persson, L & Engdahl, M 2014, 'Integrated 2D modeling and interpretation of geophysical and geotechnical data to delineate quick clays at a landslide site in southwest Sweden', *Geophysics*, vol. 79, no. 4, pp. EN61-EN75, doi: 10.1190/geo2013-0201.1.
- Solberg, IL 2007, *Geological, geomorphological and geophysical investigations of areas prone to clay slides: Examples from Buvika, Mid Norway*, Phd thesis, Norwegian University of Science and Technology, NTNU. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Doctoral thesis 2007:156.
- SS-EN ISO 22476-1:2012, *Geoteknisk undersökning och provning – Fältundersökning – Del 1: Spetstrycksondering – elektrisk spets, CPT och CPTU*, SIS, Swedish Standards Institute, 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, SGI Proceedings 22, Stockholm.
- Söderblom, R 1974, *Organic matter in Swedish clays and its importance for quick clay formation*, Statens geotekniska institut, SGI Proceedings 26, Stockholm.
- Torrance, JK 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.
- Triumpf, CA 1992, *Geofysik för geotekniker*, Byggforskningsrådet, BFR T31:1992, Stockholm.
- Wang, S, Malehmir, A & Bastani, M 2016, 'Geophysical characterization of areas prone to quick-clay landslides using radio-magnetotelluric and seismic methods', *Tectonophysics*, vol. 677-678, pp. 248-260.
- Åhnberg, H, Larsson, R, Bengtsson, PE, Lundström, K, Löfroth, H & Tremblay, M 2011, *Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer*, Statens geotekniska institut, SGI Göta älvutredningen, GÄU Delrapport 32, Linköping.
- Åhnberg, H, Löfroth, H & Lundström, K 2014, 'Management of quick clay areas in slope stability investigations – the Göta River valley', In L'Heureux, JS, Locat, A, Leroueil, S, Demers, D, Locat, J, (eds), *Landslides in sensitive clays. From geosciences to risk management*, pp. 383-394, Springer, Dordrecht.

# Bilagor



# 1. Checklista – lokala förutsättningar för bildning av kvicklera

Checklista för bedömning av den rumsliga fördelningen av förutsättningar för kvicklera inom ett område där det finns avlagringar av lera eller silt som avsatts i salt- eller brackvatten. Observera att sambanden i de flesta fall bygger på erfarenheter och teoretiska resonemang och inte har verifierats med systematiska undersökningar.

1. Förekomst av skredärr som har en form indikerande skred i kvicklera (se kapitel 3.2.3 i föreliggande vägledning) visar att det åtminstone vid skredtillfället fanns kvicklera på platsen.
2. Förekomst av grovkorniga vattenförande skikt i och under leran ger förutsättning för urlakning och därmed ökade förutsättningar för kvicklera. Exempel på lermarker där sådana skikt är särskilt vanliga är sådana som ligger i direkt anslutning till isälvsavlagring (ås, delta) eller randbildning.
3. I områden där lerlagren tunnar ut mot berg- och moränhöjder kan det finnas ökade förutsättningar för kvicklera, dels för att lermäktigheten är liten (se punkt 4) dels för att det finns vattenförande lager och dels för att möjligheter till infiltration av regn- och ytvatten ofta är goda.
4. I områden med små lermäktigheter finns större möjligheter för infiltration och vattenströmning och därmed urlakning, än i områden med tjocka lerlager. Tunna lerlager torde därför generellt ha större förutsättningar för kvicklera än tjockare.
5. I kuperad lerterräng finns ofta förutsättningar för grundvattenflöden som kan ge urlakning och därmed ökad förutsättning för kvicklera.
6. Artesiskt grundvatten är en indikation på att det finns grundvattenförande lager under leran, vilket ger förutsättning för urlakning och därmed bildning av kvicklera.
7. Högre belägna områden kan, p.g.a. av landhöjningen, ha utsatts för urlakningsprocesser under längre tid än lägre belägna områden och kan därför förväntas ha ökade förutsättningar för kvicklera.



## 2. Finkorniga jordarter med förutsättningar för kvicklera (lager i kartvisningstjänst)

Jordarter som definieras som **finkorniga** och ingår i urvalet för kartvisningstjänsten tillsammans med geografiskt kriterium (områden med tidigare avsättning i salt- eller brackvatten).

**Tabell 1.** Underlag Jordarter 1:25 000 – 1:100 000

JG2	JG2_TX
1	Mossetorv
5	Kärrtorv
6	Gyttja
9	Svämsediment, ler--silt
10	Svämsediment, sand
13	Flygsand
16	Gyttjelera (eller lergyttja)
17	Postglacial lera
19	Postglacial finlera
21	Sand
22	Postglacial grovlera
24	Postglacial silt
28	Postglacial finsand
31	Postglacial sand
36	Skaljord
39	Silt
40	Glacial lera
43	Glacial finlera
44	Glacial grovlera
48	Glacial silt

55	Isälvs sediment, sand
75	Torv
79	Postglacial grovsilt finsand
85	Lera
86	Lera--silt
8114	Oklassat område, tidvis under vatten
8175	Torv, tidvis under vatten
8186	Lera--silt, tidvis under vatten
8802	Älvsediment, grovsilt--finsand
8804	Älvsediment
8806	Älvsediment, ler--silt
8809	Älvsediment, sand
9010	Svämsediment, grovsilt--finsand
9060	Glacial grovsilt--finsand

**Tabell 2.** Underlag Jordarter 1:250 000 (Nordligaste Sverige)

JG2	JG2_TX
75	Torv
86	Lera--silt
8809	Älvsediment, sand

**Tabell 3.** Underlag Jordarter 1:200 000 (Västernorrland)

JG2	JG2_TX
75	Torv
86	Lera--silt
28	Postglacial finsand
31	Postglacial sand
10	Svämsediment, sand

**Tabell 4.** Underlag Jordarter 1:750 000 (Mittnorden)

<b>JG2</b>	<b>JG2_TX</b>
75	Torv
86	Lera – silt
8809	Älvsediment, sand





**Statens geotekniska institut**  
Postadress: 581 93 Linköping  
Tel: 013-20 18 00  
E-post: [sgi@swedgeo.se](mailto:sgi@swedgeo.se)

[www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)

---