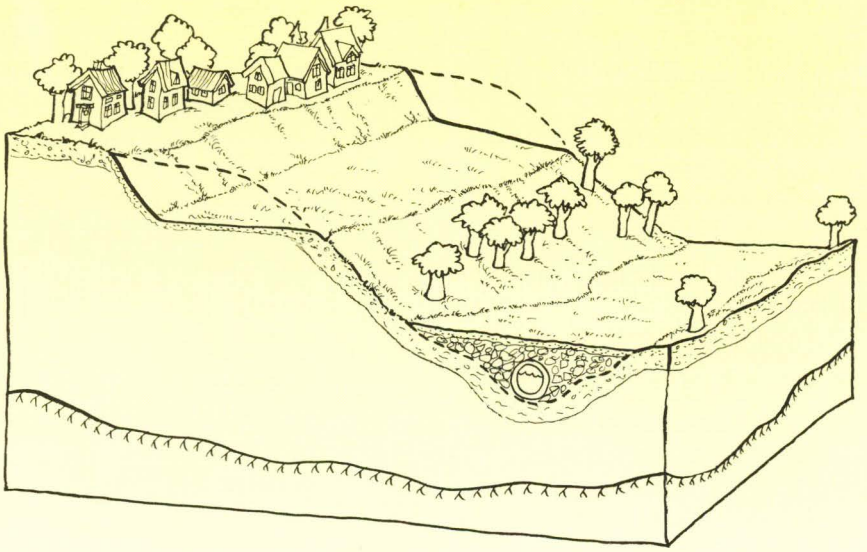
INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

SKREDKOMMISSIONEN
COMMISSION ON SLOPE STABILITY



Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter

Rekommendationer för dimensionering och projektering

Rapport 2:96 Linköping

Skredkommissionen

Skredkommissionen - en IVA-kommission (Ingenjörsvetenskapsakademien), för forskning, utveckling och information i jordskredsfrågor - bildades 1988.

Skredkommissionen har till uppgift att under IVA:s hägn initiera och samordna forskning samt sprida information rörande släntstabilitet, jordskred och metoder för förebyggande åtgärder.

Verksamheten finansieras med avgifter från kommissionens medlemmar och forskningsanslag.

Commission on Slope Stability

The Commission on Slope Stability - a committee of the Royal Swedish Academy of Engineering Science (IVA) - was founded in 1988 for the purpose to handle research, development and information on landslide matters.

The main task of the Commission is to initiate and to co-ordinate research on and to give information about slope stability, landslides as well as methods for preventive measures.

The work of the Commission is financed by research grants and fees of the members.

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

SKREDKOMMISSIONEN
COMMISSION ON SLOPE STABILITY

Rapport 2:96

Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter

Rekommendationer för projektering och dimensionering

Linköping 1996

Rapport	IVA Skredkommissionen c/o Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning	Statens geotekniska institut Biblioteket Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 14 E-post: info@geotek.se
ISSN	1101-105X
ISRN	IVA/SKRED/R--96/2--SE
Upplaga	1 200
Tryckeri	Roland Offset, Linköping, oktober 1996

Förord

Denna skrift vänder sig till dem som dimensionerar och projekterar av förstärkningsåtgärder, dvs. främst geotekniker och tekniska granskare.

Skriften är en uppföljning till Skredkommissionens anvisningar för släntstabilitetsutredningar, Skredkommissionens Rapporter 3-5:95. Dessa anvisningar beskriver hur man i olika steg med successivt fördjupade utredningar kan särskilja de områden där stabiliteten är tillfredsställande och de områden där någon åtgärd i form av restriktioner, övervakning, utrymning eller förstärkning måste vidtas. De behandlar dock inte vilka eventuella förstärkningsåtgärder som bör väljas, hur dessa skall utformas och dimensioneras, eller vilken förstärkningsgrad som krävs.

Då ett behov också föreligger av allmäna riktlinjer för utformning av förstäkningsåtgärder, har Skredkommisionen tagit fram denna rapport med rekommendationer för projektering och dimensionering av förstärkningsåtgärder i naturliga slänter. Rekommendationerna är utarbetade i samråd med en referensgrupp bestående av:

Kenneth Axelsson, LuTH
Per-Evert Bengtsson, SGI
Per Engström, VBB-Viak
Anders Fredriksson, ADG Grundteknik
Rolf Larsson, SGI
Folke Ohlsson, GF Konsult AB
Marianne Nyberg, Vägverket
Elvin Ottosson, SGI
Jan Schälin, SGI
Eskil Sellgren, J&W
Göran Sällfors, CTH
Peter Zackrisson, Banverket
Anna-Lena Öberg, CTH

Arbetet med dessa rekommendationer har samordnats med arbetet i Skredkommissionens arbetsgrupp för förstärkningsåtgärder, som utarbetat Skredkommissionens rapport 1:96 ”Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter. Beskrivning av förekommande metoder och praktiskt genomförande”. Rapport 1:96 vänder sig till en bredare grupp av intressenter som, utan att nödvändigtvis vara geotek-

niker, är involverade vid förstärkning av naturliga slänter. Medlemmar i arbetsgruppen för förstärkningsåtgärder har dessutom ingått i referensgruppen för denna rapport. Avsikten har varit att båda rapporterna skall kunna läsas fristående varför en viss överlappning av innehållen förekommer.

Inför utarbetandet av denna rapport har ett omfattande beräkningsstudie av effekter av olika förstäkningsåtgärder utförts med såväl klassiska som avancerade numeriska metoder. Denna studie utförts i samarbete mellan ADG Grundteknik, Chalmers tekniska högskola, GF konsult AB, Tekniska högskolan i Luleå och Statens geotekniska institut. Ytterligare en beräkningsstudie för jämförelse av totalsäkerhetsfaktorer med brottsannolikhet har utförts av Claes Alén, Chalmers tekniska högskola. Resultaten av dessa studier utgör en del av underlaget för de rekommendationer som ges.

Till alla som deltagit i arbetet med framtagning av denna rapport riktas ett varmt tack.

Linköping i november 1996

Skredkommissionen

Innehållsförteckning

Förord

1. Inledning 8

2. Att beakta före projektering och dimensionering av förstärkningsåtgärder 11

3. Allmänt om förstärkningsåtgärder 13
- Avschaktning av släntkrön
- Uppfyllning vid släntfot
  - Kulvertering eller upphöjning av vattendrag vid släntfot
  - Omgrävning av vattendrag
- Utflackning av slänt
- Portryckssänkning
- Pålar
- Kalk/cementpelare
- Sponter
- Jordspikar

4. Beräkningsstudie av förstärkningsåtgärder i naturliga slänter 30
Huvudresultat av studien
- Långsträckt slänt i normal- till svagt överkonsoliderad lera
- Brant erosionsslänt i normal- till svagt överkonsoliderad lera
- Brant slänt i överkonsoliderad lera
- Brant slänt i silt

5. Lämpligaste förstärkningsåtgärder för olika typer av slänter 43

6. Diskussionsunderlag för val av förstärkningsgrad 46

7. Erforderlig förstärkningsgrad 53

8. Referenser 55

1. Inledning

Inom Skredkommissionens arbetsgrupp för släntbeteende har nya anvisningar för stabilitetsutredningar utarbetats, (Skredkommissionens rapporter 3-5:95). Dessa anvisningar behandlar de utredningar som syftar till att klassificera naturliga slänters stabilitetsförhållanden för olika användningsområden som nyexploatering, befintlig bebyggelse, annan mark eller naturmark.

Anvisningarna beskriver hur man i olika steg med successivt fördjupade utredningar kan särskilja de områden där stabiliteten är tillfredsställande och de områden där någon åtgärd i form av restriktioner, övervakning, utrymning eller förstärkning måste vidtas. Då alla steg i en utredning genomförts och slänten fortfarande bedöms ha en icke tillfredsställande stabilitet, har de utförda undersökningarna också givit underlag för dimensionering av olika förstärkningsåtgärder. De ovan nämnda anvisningarna behandlar dock inte vilka eventuella förstärkningsåtgärder som bör väljas, hur dessa skall utformas och dimensioneras, eller vilken förstärkningsgrad som krävs.

Föreliggande rekommendationer ger en vägledning för vilka förstärkningsmetoder som i första hand bör väljas ur teknisk synpunkt, vilka restriktioner som finns för de olika metoderna samt ger översiktlig orientering om vad som i övrigt bör beaktas vid val av förstärkningsmetod och tillhörande dimensionering. En vägledning för vilken beräkningsmässig förbättring av stabiliteten som bör eftersträvas i olika fall ges också. Rekommendationerna avser förstärkning av befintliga bebyggda slänter med otillfredsställande stabilitet, men som inte rasat eller skredat. Endast i Sverige vanligen använda, eller övervägda, förstärkningsåtgärder beaktas. Förstärkning av omrörda jordmassor, efter nyligen inträffade ras och skred, medför en delvis annorlunda problematik och behandlas inte i denna rapport.

Utformning av förstärkningsåtgärder utgör ofta en kompromiss mellan vad som är önskvärt ur teknisk och ekonomisk synvinkel och vad som är möjligt ur ett antal andra perspektiv, som topografiska förutsättningar, miljösynpunkter, tillgänglighet, legala aspekter, som tillträde till olika områden, samt andra intres-

sen som t.ex. sjöfart i vattenvägar. Vilka miljökonsekvenser som bör beaktas i samband med förstärkningsåtgärder har beskrivits i Skredkommissionens rapport 2:95 ”Naturvärden och miljökonsekvenser i samband med stabilitetsarbeten”.

Några detaljerade anvisningar för förstärkningsåtgärders utformning är således inte möjligt att ge, utan utformningen får bedömas från fall till fall med avseende på ovannämnda lokala förhållanden. Däremot kan vissa allmänna råd ges för hur olika förstärkningsåtgärder kan bedömas och hur en lämplig förstärkning bör utformas ur teknisk synvinkel, för att avsedd förstärkningsgrad skall uppnås. Detta är syftet med dessa rekommendationer, som främst vänder sig till projektörer av förstärkningsåtgärder.

Stabiliteten i naturliga slänter, liksom i förstärkta slänter, beräknas normalt med konventionella beräkningsmetoder. Ur resultaten av dessa beräkningar framgår inte vilka partier av slänten som är mest ansträngda ur hållfasthetssynpunkt, utan i dessa beräkningsmetoder antas att hållfastheten är mobiliserad i lika hög grad i alla delar av tänkta glidytor. Detta är ofta starkt missvisande. I verkligheten är det normalt så att i slänter med låg säkerhet mot brott, dvs. sådana slänter som behöver förstärkas, befinner sig vissa delar av slänten mycket nära brottillståndet. Alla ytterligare spänningsökningar i dessa partier måste därmed omfördelas till mindre ansträngda partier, vilket endast kan ske i samband med vissa deformationer, vilka i sin tur medför risk för skredinitiering. Ett klart önskemål är därför att förstärkningsåtgärder, om möjligt, utformas så att påkänningarna i dessa hårt ansträngda zoner reduceras, vilket inte automatiskt blir ett resultat av att totalstabiliteten beräkningsmässigt förbättras.

I syfte att belysa hur ansträngningsgraden varierar i olika typer av naturliga slänter och hur olika förstärkningsåtgärder i form av avschaktning, uppfyllning och utflackning påverkar ansträngningsgraden i de mest kritiska zonerna, har ett antal beräkningar utförts med avancerade numeriska beräkningsmetoder. Beräkningarna har utförts parallellt med klassiska glidyteberäkningar och ger motsvarande resultat i form av totalsäkerhetsfaktorer, men ger dessutom den önskade bilden av spänningsfördelningen. Resultaten är avhängiga av vad som antas om jordens egenskaper, områdets geologiska historia, jordprofilens dräneringsförhållanden m.m., men avspeglar tämligen väl den spänningssituation som kunnat uppmätas i olika forskningsprojekt. Resultaten visar också att effekten i form av utjämning av spänningskoncentrationer är mycket olika för olika förstärkningsåtgärder, som annars uttryckt i förbättring av beräknad totalstabilitet är likvärdiga.

Den erforderliga förstärkningens omfattning uttrycks normalt som erforderlig höjning av totalsäkerhetsfaktorn. I andra sammanhang har detta ersatts av en högsta tillåtna brottsannolikhet. Erfarenhetsunderlaget är idag inte tillräckligt för att en sådan övergång skall kunna göras för naturliga slänter, men utvecklingen pågår. För att belysa kopplingen mellan totalsäkerhetsfaktor och brottsannolikhet har en säskild beräkningsstudie utförts, vilken också kan ligga till grund för diskussioner om erforderliga åtgärder i de undantagsfall då gängse kriterier av olika orsaker inte är tillämpliga.

2. Att beakta före projektering och dimensionering av förstärkningsåtgärder

Innan en förstärkningsåtgärd övervägs och projekteras måste släntens stabilitet och möjliga orsaker till en försämring av stabiliteten vara klarlagda, så att relevanta åtgärder kan utformas och dimensioneras. Detta innebär i princip att stabilitetsutredningen genomförts enligt Skredkommissionens anvisningar och att:

- en fördjupad utredning och eventuellt också kompletterande utredning har genomförts och redovisats i enlighet med anvisningarna.

- släntens bildningssätt och jordlagerföljd är i detalj kartlagda.

- hållfastheten är bestämd med tillräckligt noggranna metoder och att en heltäckande bild av egenskaperna erhållits genom dessa bestämningar. Denna bild bör i princip överensstämma med vad som empiriskt kan förväntas med hänsyn till jordens sammansättning och bedömda geologiska historia.

- eventuella betydelsefulla anisotropieffekter bestämts och beaktats.

- erosionsrisken och eventuell pågående erosion är kartlagd.

- portryckssituationen i slänten är kartlagd. I de fall portrycken är av avgörande betydelse skall kartläggningen vara gjort i detalj genom att portrycken uppmätts i tillräcklig omfattning.

- extremvärdena för portryckssituationen prognosticerats ur tillräckligt långa mätserier av portrycken i slänten.

- framtida markanvändning och miljökrav är fastställda.

Innan dessa utredningar är utförda bör inga förstärkningsåtgärder dimensioneras. Är underlaget bristfälligt föreligger stor risk för att förstärkningsåtgärderna antingen över- eller underdimensioneras. En betydande risk föreligger då också att förstärkningsåtgärderna inte är relevanta för att bemästra det verkliga stabili-

tetsproblemet för den aktuella slänten, på både kort och lång sikt. Vidare finns också risken att de projekterade åtgärderna inte uppfyller de krav på miljö och framtida markanvändning som kan framkomma i efterhand. Ovannämnda utredning behövs också för den slutliga bedömningen av om förstärkning överhuvudtaget skall göras, eller om befintlig eller planerad markanvändning istället förändras så att befintliga anläggningar rivs eller flyttas och/eller att planerad nyexploatering stoppas.

3. Allmänt om förstärkningsåtgärder

Stabilitetsproblemen i naturliga slänter beror i princip på att slänten är alltför hög och brant i förhållande till jordens hållfasthet i kombination med rådande portryck. Dessutom tillkommer inverkan av påförd yttre belastning på slänten, men denna effekt är oftast begränsad i förhållande till de involverade jordmassornas påverkan. Den vanligaste förstärkningsåtgärden är följaktligen att disponera om jordmassorna i slänten. Andra tänkbara åtgärder är att förbättra hållfastheten, eller att sänka portrycken. En ytterligare tänkbar åtgärd är införande av stabiliserande element i slänten. En omdisponering av jordmassorna är dock normalt - inte minst av ekonomiska skäl - ett förstahandsalternativ och övriga åtgärder är andrahandsåtgärder, som får tillgripas om det första alternativet av någon anledning inte kan genomföras, eller är olämpligt. I många fall kan det bli aktuellt med en kombination av olika åtgärder.

Olika förstärkningsåtgärder som kan användas beskrivs närmare i Skredkommissionens rapport 1:96 ”Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter. Beskrivning av förekommande metoder och praktiskt genomförande”. I rapport 1:96 ges bland annat en mer detaljerad beskrivning av förstärkningarnas utformning samt praktiska och miljömässiga synpunkter på förstärkningsarbetenas genomförande. I föreliggande rapport ges endast en kort genomgång av de metoder som normalt används med allmänna synpunkter på deras tillämpbarhet.

De metoder som behandlas är:

Omdisposition av massor (Förändringar i geometrin)

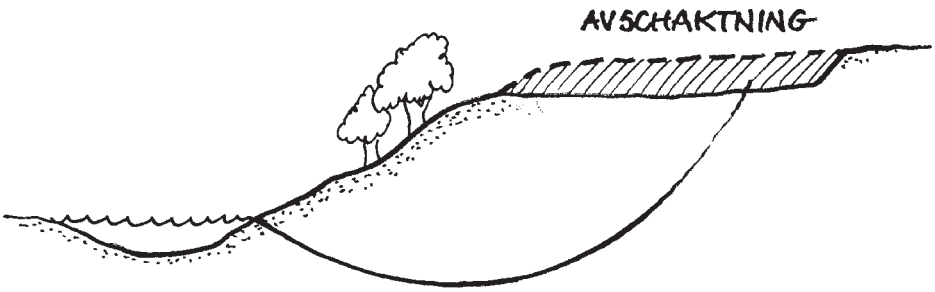
- Avschaktning och eventuellt utbyte av massor vid släntkrön mot lätt fyllning
- Uppfyllning vid släntfot
- Utflackning av slänt (Minskning av släntlutning)

Portryckssänkning

Förstärkande element

- Pålar
- Kalk/cementpelare
- Spont
- Jordspikar

Avschaktning av släntkrön



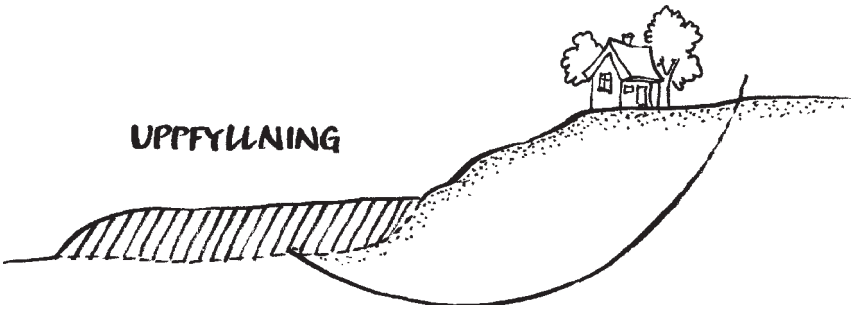
Avschaktning av släntkrön är en av de mest använda metoderna för förstärkning, bl.a. på grund av att den ofta är måttligt kostnadskrävande och relativt enkel att utföra. Metoden ger beräkningsmässigt en god effekt på stabiliteten vid användande av odränerad analys för djupa glidytor. Effekten minskar dock för grunda glidytor och vid kombinerad eller dränerad analys till att i princip upphöra i så branta slänter att problemet i huvudsak är relaterat till släntlutningen och där de kritiska glidytorna går mycket grunt och närmast parallellt med slänten. Metoden är ofta olämplig i de fall höga portryck är en bidragande orsak till släntens otillfredsställande stabilitet, eftersom också de mothållande krafterna då kraftigt reduceras vid avschaktning. I de fall släntens belastningshistoria medfört att hårt ansträngda partier skapats vid släntfoten, vilket är mycket vanligt vid höga och branta slänter, har åtgärden begränsad effekt vad beträffar utjämning av denna spänningskoncentration.

Metodens främsta tillämpning är således vid förbättring av stabiliteten av slänter med måttlig lutning, i normalkonsoliderad eller endast svagt överkonsoliderad lera, där djupet till fast botten är stort och där hållfasthetsökningen med djupet är förhållandevis liten, d.v.s där de kritiska glidytorna går djupt.

Metodens utförande innebär ofta att schaktredskap och transportfordon kommer att operera i släntens överkant, vilket kan medföra stora vibrationer och temporärt försämrad stabilitet i störningskänslig jord. I det långa perspektivet måste beaktas att den utförda avlastningen medför att skjuvhållfastheten under den avlastade ytan kan komma att sänkas något på grund av avlastningseffekter. En ny torrskorpa med ungefär samma tjocklek som den ursprungliga bortschaktade kommer på sikt att utbildas och vattenfyllda sprickor måste beaktas vid bedömning av släntens framtida stabilitet. Portryckssituationen i slänten kommer också med tiden att anpassas till den nya geometrin.

Metodens användbarhet kan begränsas av befintlig bebyggelse och anläggningar i närheten av släntkrönet, vilket medför ett komplicerat genomförande och ofta krav på återfyllning med lättare massor upp till ursprunglig marknivå och/eller åtgärder för isolering av befintliga installationer mot tjäle. Vid naturmark bör man ur miljösynpunkt se till att matjordstäcket återförs och att motsvarande vegetation som den ursprungliga återskapas. Vid annat användningsområde, som medför att en viss bärighet krävs, måste eventuella krav på efterföljande utläggning av bärlager och behov av kompenserande avschaktning, eller utbyte av massor mot lätt fyllning, beaktas.

Uppfyllning vid släntfot



Denna metod ger vid odränerad c-analys motsvarande effekt som avlastning vid släntkrön. Metoderna kombineras ofta, varvid det material som schaktas av vid släntkrönet ofta kan användas som fyllningsmaterial vid släntfoten. Uppfyllning vid släntfot i form av ett erosionsskydd bör alltid utföras då risk för försämring av stabiliteten i form av erosion vid slänttån föreligger. Erosionsrisken medför också att det endast är grövre jordmassor som kommer ifråga för utläggning i vatten. Utlagda massor under vatten vid slänttån får dock en begränsad effekt på stabiliteten, eftersom det då endast är materialets effektiva densitet under vatten som kan påräknas som stabiliserande bidrag. Å andra sidan medför varje form av upplastning vid släntfoten att vertikalspänningarna ökar och därmed den dränerade hållfastheten. Detta medför en förbättring av stabiliteten vid en dränerad analys och i varierande mån också vid kombinerad analys. Vid dränerad analys blir effekten av utläggning av massor i torrhet vid släntfot klart bättre än motsvarande avschaktning vid släntkrön. Metoden är också klart lämpligare då stabilitetsproblemen förorsakas av höga porvattentryck.

Vid branta slänter, där kritiska glidytor går mycket grunt och i det närmaste parallellt med slänten, har uppfyllning vid släntfoten mycket liten eller ingen effekt. Spänningskoncentrationer vid slänttån åtgärdas effektivt, men spänningskoncentrationer längre upp i slänten förblir i stort sett opåverkade.

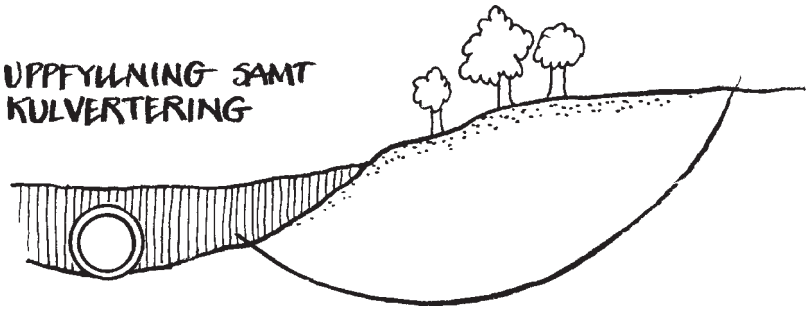
Vid fyllningsarbetena skapas ofta vibrationer av schaktmaskiner och transportfordon, som i störningskänslig jord kan förorsaka en temporär hållfasthetsnedsättning. I det längre tidsperspektivet kan en viss hållfasthetsökning påräknas, då jorden konsoliderat för tilläggslasten. Tilläggslasten bör dock normalt inte vara så stor att spänningarna överskrider förkonsolideringstrycket i kompressibla jordar och därmed förorsakar stora deformationer. Sådana deformationer skulle medföra dels risk för skador på installationer i jorden under fyllningen, dels att stora rörelser uppstår i slänten då jordmassorna i denna måste följa med

i rörelserna för att få erforderligt stöd av uppfyllningen. Risken härför är begränsad, eftersom jorden vid slänttån i erosionsslänter normalt har en viss överkonsolidering.

Metodens användbarhet begränsas av befintlig bebyggelse och anläggningar vid släntfoten. Vid utfyllning i vatten fordras vattendom. Uppfyllning vid släntfot är en effektiv metod som används i stor omfattning, men som samtidigt ofta starkt påverkar naturen i vattendrag och dess närhet. Ett stort antal miljöaspekter måste därför ofta beaktas.

Vid uppfyllning vid släntfot kan hållfastheten i fyllnadsmaterialet tillgodoräknas för glidytor som slår upp genom fyllningen. Härvid måste dock kontrolleras att glidytor som passerar förbi under fyllningen och slår upp utanför inte ger lägre säkerhet.

- *Kulvertering eller upphöjning av vattendrag vid släntfot*



I slänter mot mindre vattendrag (bäckar) finns ofta inte tillräckligt utrymme för stödfyllning och samtidigt bevarad vattenfåra. I vissa fall tillåter de topografiska förhållandena att vattendraget höjs upp och leds ovanpå fyllningen, men ofta måste en kulvert för vattendraget läggas i fyllningens botten. Ingrepp i vattendrag fordrar normalt vattendom.

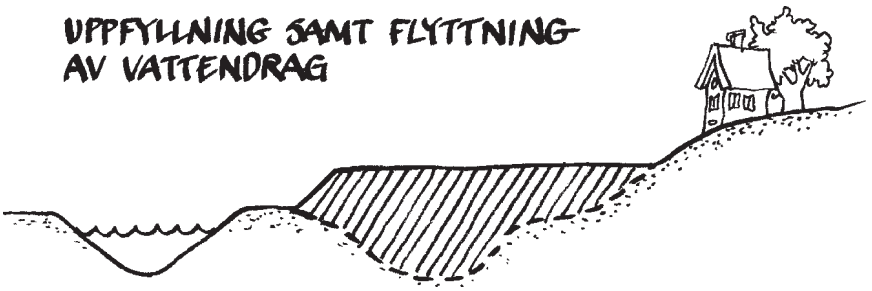
En upphöjning av vattendraget är ofta fördelaktig ut miljösynpunkt, men ställer speciella krav på fyllningens sammansättning. Denna bör vara så tät att vattnet inte rinner ned i fyllningen, varför finkornig jord som t.ex. packad lera är lämpligast. Vidare måste åtgärder vidtas för att motverka erosion i vattenfåran.

En kulvert utgör ett hålrum, som i viss mån reducerar effekten av stödfyllning-

en. Utförandet kräver att vattendraget temporärt leds om, vilket i sig kan påverka stabiliteten under denna tid. Arbetet utförs lämpligen under sommartid då vattenflödet är lägst och eventuell påverkan på fisk- och djurliv är minst.

Kulverteringens längd och utformning styrs förutom av stabiliseringsbehovet också av miljöintressen. In- och utlopp måste utformas så att vattnet verkligen leds in i kulverten och inte går vid sidan av och förorsakar erosion.

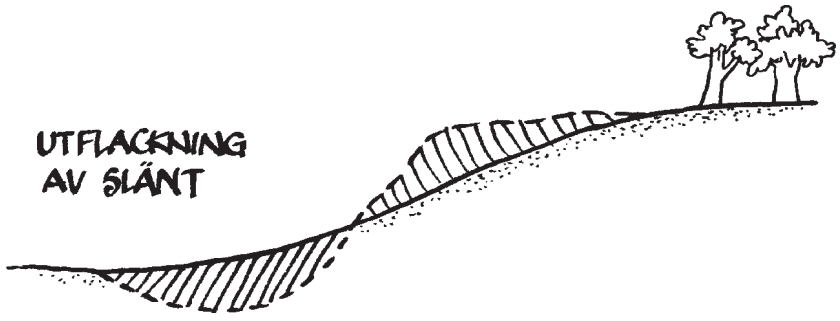
- *Omgrävning av vattendrag*



Ibland kan omgrävning av ett vattendrag och igen- och överfyllning av den gamla vattenfåran vara ett alternativ till kulvertering. Detta gäller främst då marken utanför släntfoten är relativt plan, eller då ravinens botten vid släntfoten är relativt bred och stabilitetsproblemen främst gäller den sida av ravinen där vattendraget går. I en dalgång innebär en omgrävning att vattendraget kommer närmare slänten på motsatta sidan och det måste då kontrolleras att inte nya stabilitetsproblem uppstår för denna slänt.

Arbeten med omgrävning bör planeras så att stabiliteten inte försämras under utförandet. De utförs lämpligen under sommartid då vattenföringen är låg. Omgrävning av vattendrag kräver vattendom och för denna en miljökonsekvensutredning innan arbetena kan starta. En omgrävning kan dessutom förändra strömningsförhållandena i vattendraget, vilket kan innebära nya problem med erosion på andra ställen längs vattenfåran. Särskilda studier måste göras och eventuella åtgärder vidtas för att förhindra en sådan utveckling. Speciellt känsliga är meandrande vattendrag.

Utflackning av släntt

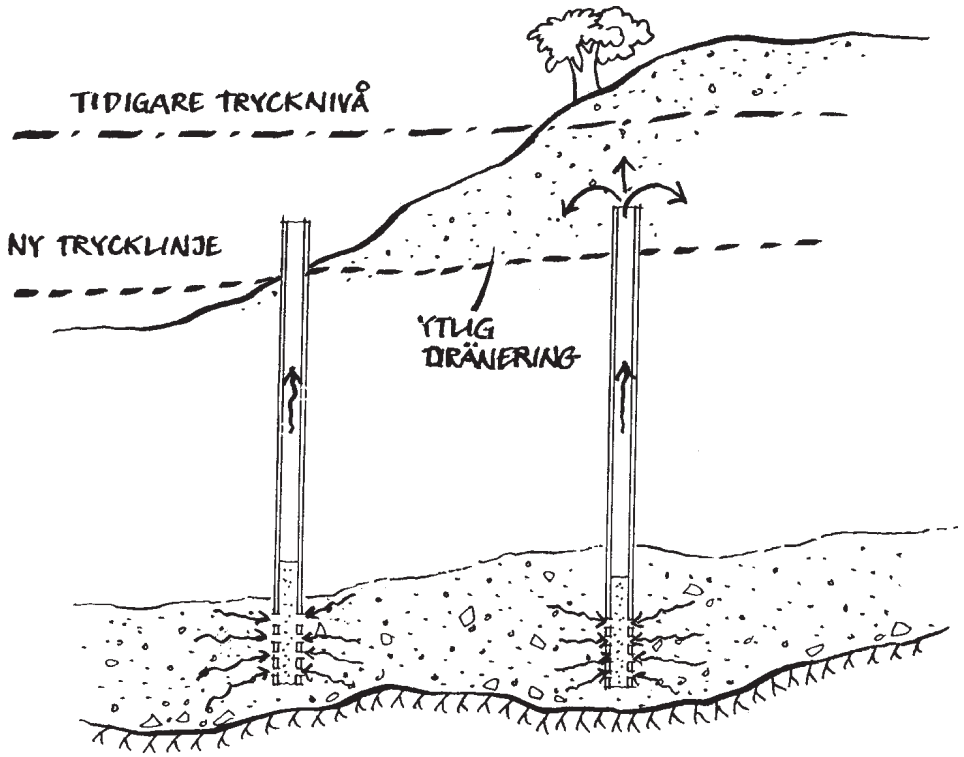


Utflackning är den enda verksamma metoden med omdisponering av massor då stabilitetsproblemen främst beror på att en slänt är för brant och då kritiska glidytor går grunt och närmast parallellt med slänten. Utflackningen görs normalt genom att massor förs ned från släntens överdel till dess nedre del, så att en ny slänt med flackare lutning bildas. I vissa fall, där tillgängligt utrymme vid släntkrön eller släntfot förhindrar en sådan lösning, kan det bli aktuellt att utföra en triangulär stödfyllning eller avschaktning.

En utflackning av slänten är gynnsam för att utjämna spänningskoncentrationer, såväl i släntens övre del som vid släntfoten. För mycket djupa glidytor i främst normalkonsoliderad lera, med stor mäktighet och låg hållfasthetstillväxt med djupet, har metoden dock en betydligt sämre effekt än om motsvarande massförflyttning utformas som en jämn avschaktning och/eller jämn uppfyllning, med större horisontell utbredning vid släntkrön respektive släntfot.

En utflackning av en slänt innebär i princip att all befintlig växtlighet förstörs. För att tillfredsställa såväl miljöintressen som krav på förhindrad ytterosion i slänten bör eventuellt tidigare matjordstäcke och växtlighet återställas. I annat fall bör normalt tillses att ny växtlighet skapas.

Portryckssänkning



Porvattentryck i vattenförande skikt har ofta stor inverkan på en slänts stabilitet. Speciellt gäller detta då omgivande topografi medför att mycket höga och ibland artesiska tryck kan råda eller utbildas i skikten. I många fall är stabiliteten helt avhängig av att portrycken i skikten inte överstiger vissa nivåer. Uppfyllningar kan i viss mån avhjälpa problemen, medan avschaktningar skall undvikas i slänter med skikt med höga portryck.

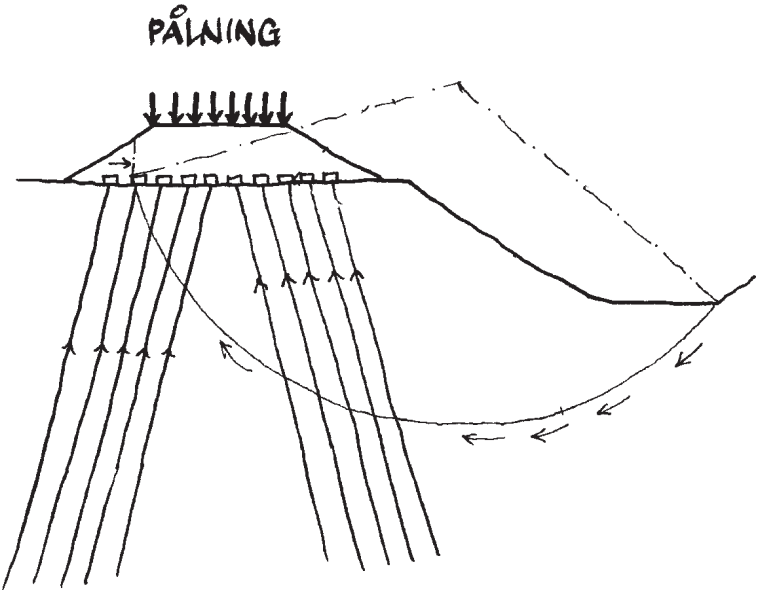
I vissa fall används därför portryckssänkning eller portryckskontroll för att säkerställa stabiliteten. Vanligast är att man vidtar åtgärder för att portrycken inte skall stiga till en högre nivå än den normalt rådande, men det händer att man också sänker de rådande trycken. I det senare fallet måste risken för sättningar och konsekvenserna av dessa utredas. Denna risk omfattar ofta inte enbart den aktuella slänten, utan också omgivande områden. Några andra miljökonsekvenser har åtgärden dock normalt inte.

Den vanligaste metoden för grundvattenkontroll är att installera öppna rör,

filterbrunnar eller vertikaldräner med bräddavlopp på fastställd nivå. Topografi och tryckförhållanden skall då vara sådana att dräneringen kan ske med självtryck. Problemet med system för portryckssänkning är normalt deras funktion på lång sikt. Någon övervakning av portrycken sker normalt inte, utan på sin höjd kontrolleras att de installerade dräneringsvägarna till synes fungerar. En sådan fortlöpande kontroll fordrar dock en ansvarig organisation och ett program för övervakning, vilket saknas i många äldre system.

Vid svårare förhållanden kan det bli aktuellt att installera rörbrunnar med pumpar. De senare kan styras med automatiska övervakningssystem, som mäter portryck och som larmar vid kritiska nivåer. Också i detta fall måste det finnas en ansvarig organisation och program för åtgärder om kritiska nivåer på portrycken nås. I naturliga slänter används system av detta slag normalt endast under kortare perioder, tills dess att mer permanenta och underhålls- och övervakningsfria åtgärder kunnat utföras. I vissa typer av permanenta schakter används de dock som slutlig lösning.

Pålar



Pålning för stabilisering av jordmassor utförs normalt i form av bankpålning för en i efterhand utlagd bank. För stabilisering av naturliga slänter med från början dålig stabilitet fordrar metoden ofta att en avschaktning utförs innan pålningen utförs och de avschaktade massorna kan sedan återföras först en tid därefter. Själva pålningen utgör ett störningsmoment som temporärt försämrar stabiliteten och vid all pålning i närheten av slänter rekommenderas någon form av övervakning så att sluttningens stabilitet inte äventyras. I homogen lerjord inträffar alltid en kraftig störning och hållfasthetsnedsättning inom en zon kring pålen, samtidigt som horisontaltrycken ökar och horisontalrörelser uppstår på grund av massundanträngningen. De senare kan i viss mån begränsas genom propptagning innan pålarna slås ned. Vidare medför pålning att höga portryck byggs upp närmast pålen och vid förekomst av inbäddade mer permeabla skikt kan portrycksökningen spridas över ett större område. Dessa faktorer, tillsammans med de vibrationer som skapas i samband med pålslagningen, medför stor risk att stabiliteten för närliggande sluttningspartier påtagligt försämras.

Pålning i slänter används ändå i vissa fall och främst då en slänt skall belastas med en tillskottsbelastning vid släntkrönet. Pålningsarbetet utförs då med övervakning och efter en plan så att inte alltför stor försvagning inträffar inom ett större parti av sluttningen, utan att hållfastheten efter installation av ett antal pålar får återuppbyggas innan ytterligare pålning utförs i partiet. Eventuellt måste en temporär förstärkning, i form av t.ex. en uppfyllning vid släntfot, utföras.

Vid stabilitetsbetraktelser räknas pålen endast kunna ta upp axiallaster från dels den påförda lasten som t.ex. byggnader, väg- och järnvägsbankar eller jordmassor på pålplattor eller påldäck, dels de påhängskrafter som skapats av vidhäftningen mellan jord och påle i den del av pålen som befinner sig ovan den tänkta glidytan. Någon avskjuvningskraft i tillägg till denna axiallast kan inte påräknas. Vid bankpålning med pålplattor slås därför normalt ett antal av de yttre pålraderna med en viss lutning för att kunna ta upp horisontalkrafter och för att därmed få en bättre verkan vid den uppkomna belastningssituationen. Vanlig lutning hos pålarna är 4:1. Vid stabilitetsberäkningen måste också kontrolleras att den del av pålen som är lokaliserad under den tänkta glidytan kan ta upp axialkraften från pålagd last och påhängskrafter från jorden ovan glidytan. I annat fall får endast bärigheten hos pålen under glidytan påräknas som stabiliserande kraft. Vid beräkning av vidhäftning mellan påle och jord antas normalt att denna är cirka 80 % av ursprunglig skjuvhållfasthet i jorden.

Kalk/cementpelare

Installation av kalk/cementpelare är en metod för djupstabilisering av finkornig jord. Pelaren tillverkas på plats genom att ett blandningsverktyg trycks ned i jorden till önskat djup under samtidig rotation. Under den påföljande uppdragningen med fortsatt rotation sprutas kalk eller en blandning av kalk och cement ut genom verktyget och blandas in i jorden. Eventuellt kan också andra stabiliseringsmedel bli aktuella. Efter att det inblandade stabiliseringsmedlet reagerat med jorden bildas en förstärkt pelare, med signifikant högre hållfasthet än den ursprungliga jorden.

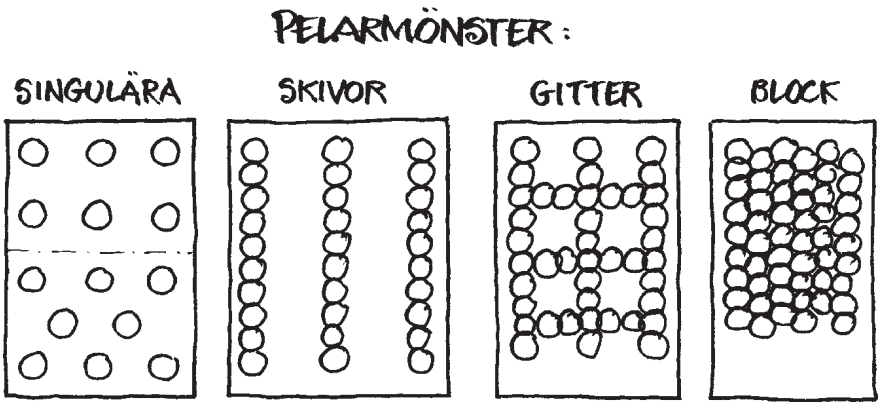
Metoden medför att man vid installationen fullständigt rör om den ursprungliga jorden i pelaren, till i princip en tung vätska utan egen hållfasthet. Dessutom påverkas jorden runt pelaren av vibrationer och de extra horisontalkrafter som uppstår på grund av att jorden i pelaren förlorat sin hållfasthet, vilket bland annat resulterar i förhöjda horisontaltryck, horisontaldeformationer och stora portrycksökningar. I pelarens närhet motsvarar portrycken direkt efter installationen ofta det totala överlagringstrycket. Den använda metoden att spruta in stabiliseringsmedel med tryckluft kan förorsaka ytterligare tryckökningar, med åtföljande horisontaldeformationer och hävningar i jorden. En viss risk för uppspräckning av jorden föreligger också. Den avsedda hållfasthetsförbättringen erhålls först efter en tid då stabiliseringsmedlet reagerat med jorden och porövertrycken utjämnats.

Dessa faktorer medför att metoden normalt endast används i stabil mark, där ingrepp eller belastningar senare skall göras. Pelarinstallationerna kan då utföras i god tid innan dessa ingrepp görs, så att installationen kan ske utan stabilitetsproblem och att en reell hållfasthetsförbättring uppnåtts då belastningen ökar. I de fall topografiska och belastningsmässiga förutsättningar för stabilitetsproblem föreligger måste installationen ske under mycket stor försiktighet och i etapper så att inte hållfasthetsreduktionen på grund av omrörning blir för stor inom ett större parti, eller att stora portrycksökningar uppstår över en större yta. Eventuellt måste temporära stabilitetsförbättrande åtgärder i form av stödfyllningar utföras, för att installationen av kalk/cementpelare skall kunna genomföras.

Metoden för tillverkning av kalk/cementpelare medför en påtaglig risk för att horisontella svaghetsskikt skall bildas i pelarna, på grund av ofullständig tillförsel av stabiliseringsmedel eller ofullständig inblandning. Enskilda pelare antas därför endast kunna uppta axiallaster. För att kunna uppta krafter i andra rikt-

ningar installeras pelarna så att de griper in i varandra och bildar samverkande skivor eller block. Samverkan med omgivande ostabiliserad jord kan endast påräknas i vissa fall och någon draghållfasthet i kalkpelarförstärkningar kan aldrig påräknas.

Stabilitetsberäkning i kalk/cementpelarförstärkningar bygger på halv-empiriska metoder. Pelare i aktivzonen, som i huvudsak belastas axiellt, antas ofta samverka med omgivande jord. Ett medelvärde av skjuvhållfastheterna i pelare och oförstärkt jord, som viktats med ledning av respektive areatäckningsgrad, används då som odränerad skjuvhållfasthet. Den odränerade skjuvhållfastheten i pelaren maximeras normalt till 100 kPa. Som dränerad skjuvhållfasthet i denna zon används normalt $\phi' = 30^{o}$ och ett på motsvarande viktat värde av effektiv kohesion i pelare och oförstärkt jord. Den effektiva kohesionen antas normalt vara 30 % av den odränerade skjuvhållfastheten, dvs. normalt max. 30 kPa. Singulära pelare installeras normalt endast för sättningsreduktion under markbelastningar. Vid låg säkerhet mot skjuvbrott i den oförstärkta jorden, vilket är fallet i slänter som förstärks, rekommenderas att pelarna installeras i form av skivor eller gitter.



Exempel på singulärt placerade pelare och pelare i skivor, gitter eller block. Ur SGF Rapport 4:95 ”Kalk- och kalkcementpelare”.

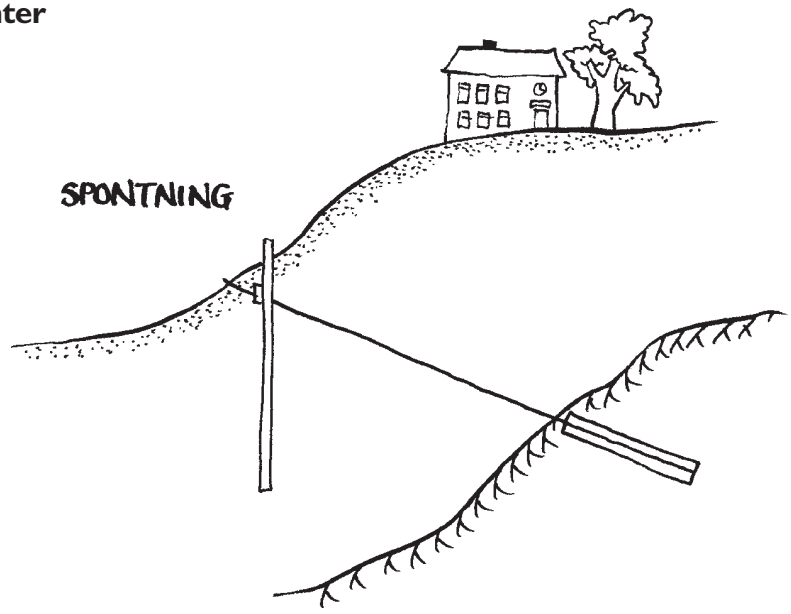
I zoner med direkt skjuvning och i passivzoner måste pelarna installeras så att de tillsammans utgör skivor eller block. Någon samverkan med oförstärkt jord kan inte påräknas, utan den förstärkta jorden antas uppta alla krafter. Vid installation av pelare i skivor måste också stabiliteten för jorden mellan skivorna med tillhörande stöd av ändyteeffekter från påhängskrafterna på pelarskivorna beräknas. Detta för att säkerställa att jorden har möjlighet att hänga fast i skivorna.

Den dränerade hållfastheten beräknas med $\phi' = 30^o$ och en effektiv kohesion som är 10 % av den odränerade skjuvhållfastheten, dvs normalt max 10 kPa, i direkta skjuvzoner och 0 i passivzoner. Vid stabilitetsberäkningen måste såväl odränerad som kombinerad analys beaktas. Som en följd av ovanstående begränsningar är de beräknade förstärkningseffekterna i direkta skjuvzoner och passivzoner ofta mycket måttliga utom på större djup.

Maximalt installationsdjup är för närvarande cirka 20 m. Kalk/cementpelarna kan normalt inte tillverkas så att de får bra direktkontakt med fast botten under de lösa jordlagren och kontrollberäkningar måste därför alltid utföras för glidytor som passerar under pelarförstärkningen.

Ovanstående begränsningar medför att kalk/cementpelare endast i undantagsfall används för stabilisering av naturliga slänter. Även andra pelare som tillverkas genom inblandning av stabiliseringsmedel in situ, t.ex. jetpelare, är tänkbara alternativ med ungefär motsvarande restriktioner. Dimensioneringsprinciperna för kalk/cementpelare är normalt på säkra sidan för vanliga applikationer. Vid installation av pelare i områden där förutsättningar för stabilitetsproblem föreligger redan vid pelarnas installation är dock störnings- och påverkansfaktorerna så stora att mycket stor försiktighet måste iakttas, alla beräkningsantaganden måste göras med stor försiktighet och erforderlig beräknad säkerhet skall vara högre än för t.ex. omdisposition av jordmassor. Skred som följd av kalkpelarinstallation har inträffat i ett antal fall.

Sponter



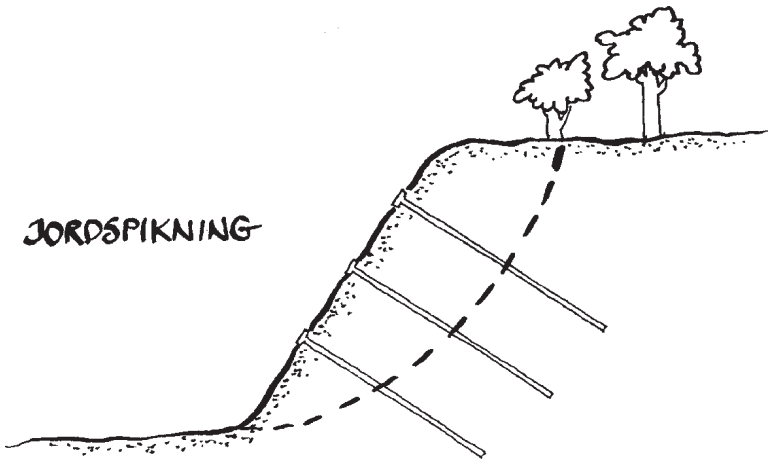
Förstärkning med spont är en relativt ovanlig förstärkningsmetod vid större slänter. Metoden används mest i samband med temporära åtgärder, som tillfällig omledning av vattendrag, omledning av trafik etc. Svårigheten är ofta att kunna förankra sponten så att den kan ta upp aktuella horisontalkrafter. Vid ringa djup till fast botten är problemet inte så stort, men vid större lerdjup blir användning av spont för det aktuella ändamålet begränsat. Sponter kan ibland komma till användning för att stabilisera branta partier med mindre omfattning i en större slänt.

Vid stabilitetsberäkning med glidytor som medför att hela sponten ligger inom den tänkta glidkroppen tas endast hänsyn till eventuella krafter i stag som förankrats utanför glidkroppen. För glidytor som skär igenom sponten beaktas krafter i sponten.

Installation av sponter innebär en störning av jorden, på motsvarande sätt som pålning men denna är normalt betydligt mindre. För att minska denna effekt trycks sponten ofta ned i lera och finsilt eller alternativt vibreras ned i grövre jord istället för att slås. Om detta reducerar alla störningseffekter är osäkert och en kontroll av portryck och rörelser i jorden bör alltid utföras.

Används spont endast för temporära åtgärder kan den i vissa fall dras upp när övriga arbeten utförts. Detta är främst en teknisk fråga om stabiliteten så tillåter, men också en ekonomisk fråga.

Jordspikar



Jordspikning används för stabilisering av mycket branta slänter, där de kritiska glidytorna går grunt och där utflackning av slänten är ett orealistiskt eller svårgenomförbart alternativ. Metoden innebär att ett stort antal dragstag slås eller skjuts in i jordmassan, eller alternativt installeras i förborrade hål och injekteras fast i jorden. Vid rörelser i jorden kommer dessa spikar att ta upp skjuv-, böj- och dragkrafter samt överföra motsvarande tryckkrafter till jorden i glidzonen. Detta resulterar i en ökning av skjuvhållfastheten inom den armerade zonen. Jordspikarna måste föras in så långt bakom alla kritiska glidytor i slänten att den bakomliggande delen av spikarna kan ta upp de resulterande dragkrafterna utan att dras ut.

Metoden har fått stor användning i främst Europa och Nordamerika. Den har tills relativt nyligen varit obeprövad i Sverige, men har använts i viss omfattning i främst siltslänter i Norge. Metoden används för såväl schakter som naturliga slänter. I Sverige har metoden på senare tid använts i ett par branta naturliga slänter, där en befintlig väg i sluttens överdel, bebyggelse vid sluttkrön och en större älv vid sluttfoten respektive bebyggelse vid sluttfoten förhindrat förstärkning genom utflackning av slänten.

Störningseffekterna i jorden vid spikarnas installation är normalt begränsade, på grund av spikarnas relativt små dimensioner och den typ av jord som är aktuell vid höga och branta slänter. Vissa problem kan uppstå vid arbete i de branta slänterna, men erforderlig utrustning för installation av spikarna är relativt lätt och utgörs normalt av vanligen förekommande geoteknisk borrutrustning, var-

för inverkan av vibrationer och belastningar är måttlig.

Jordspikning i naturliga slänter bör utföras så att befintlig vegetation i görligaste mån bevaras. Där vegetation saknas, eller avlägsnats, kombineras jordspikningen med någon form av geonät samt åtgärder för att främja en snabb beväxtning av markytan för att förhindra yterosion och för att tillfredsställa miljökrav.

Med tanke på långtidseffekter måste jordspikarnas beständighet säkerställas, t.ex. måste jordspikar av stål ofta rostskyddas. För jordspikar som injekterats fast utgör injekteringsmedlet ofta ett fullgott rostskydd och det är då endast den yttre delen vid markytan som behöver åtgärdas.

4. Beräkningsstudie av förstärkningsåtgärder i naturliga slänter

I syfte att skapa ett underlag för rekommendationer för val av förstärkningsåtgärder, på basis av hur de beräkningsmässigt påverkar sluttningens totalstabilitet och spänningssituationen i slänten, har en studie utförts i samarbete med ADG Grundteknik, Chalmers tekniska högskola, GF konsult AB, Tekniska högskolan i Luleå och Statens geotekniska institut. Studien har omfattat fyra typslänter, som ansetts vara representativa för i Sverige vanligen förekommande naturliga slänter med stabilitetsproblem:

1. Långsträckt, relativt flack sluttning i normal- till svagt överkonsoliderad lera, där de beräkningsmässigt farligaste glidytorna går djupt.

2. Brant erosionssluttning i normal- till svagt överkonsoliderad lera, där de beräkningsmässigt farligaste glidytorna går på mer begränsat djup.

3. Brant erosionssluttning i överkonsoliderad lera, där dränerad skjuvhållfasthet är helt dimensionerande, de beräkningsmässigt farligaste glidytorna går relativt grunt och portryckssituationen är av mycket stor betydelse.

4. Brant erosionssluttning i silt/sandjord, där de farligaste glidytorna går mycket grunt.

För dessa typfall har fyra verkliga slänter identifierats. Data från undersökningar i dessa har analyserats och värderats för att bli relevanta och geometrin har i viss mån justerats, så att den blivit mer allmängiltig och att slänten fått en beräkningsmässigt otillfredsställande stabilitet och därmed varit i behov av förstärkning. Stabilitetsanalyser har sedan utförts för dessa geometrier med klassiska beräkningsmetoder och omfattningen av åtgärderna för att uppnå en viss procentuell förbättring av slänten med olika förstärkningsmetoder har sedan beräknats.

I beräkningarna har samtliga ovan nämnda förstärkningsmetoder beaktats för någon eller några av de olika slänterna. Metoderna har behandlats var för sig

och inte i kombination med varandra, vilket ofta kan vara den optimala lösningen. I de flesta fall har inte heller någon optimal lösning för utformningen sökts, utan avlastningar och uppfyllningar har beräknats med horisontella överytor och mycket stor utbredning. Många av metoderna har dock redan från början framstått som klart olämpliga för det aktuella fallet och beräkningar har då inte utförts. Studien är också förenklad i så motto att störningseffekter vid installation av spont, kalk/cementpelare och pålar inte beaktats. Med de mycket låga säkerhetsfaktorer som de olika slänterna har i sitt ”naturliga” tillstånd torde det inte heller vara möjligt att utföra dessa åtgärder utan omfattande temporära förstärkningsåtgärder. I studien har inga långtidseffekter, som hållfasthetsförändring på grund av avlastning och bildande av ny uppsprucken torrskorpa, beaktats. Dessa förändringar medför att effekten av avlastning vid släntkrön blir något mindre med tiden. Förändringar i portryckssituationen på grund av ändrad geometri beaktas också mycket förenklat. Vid beräkningarna har också endast använts program med cirkulärcylindriska glidytor, vilket kan ge något missvisande resultat, speciellt i branta slänter med överkonsoliderad lera eller friktionsjord. Effekten av de olika metoderna har vidare beräknats utan avseende på om åtgärden verkligen avhjälper orsaken till stabilitetsproblemet. I samtliga branta erosionsslänter är grundorsaken mer eller mindre att hänföra till erosionen, vilken endast avhjälps genom utläggning av erosionsskydd. Utläggning av erosionsskydd borde således ingå som en del i förstärkningen, oavsett vilka övriga åtgärder som vidtas.

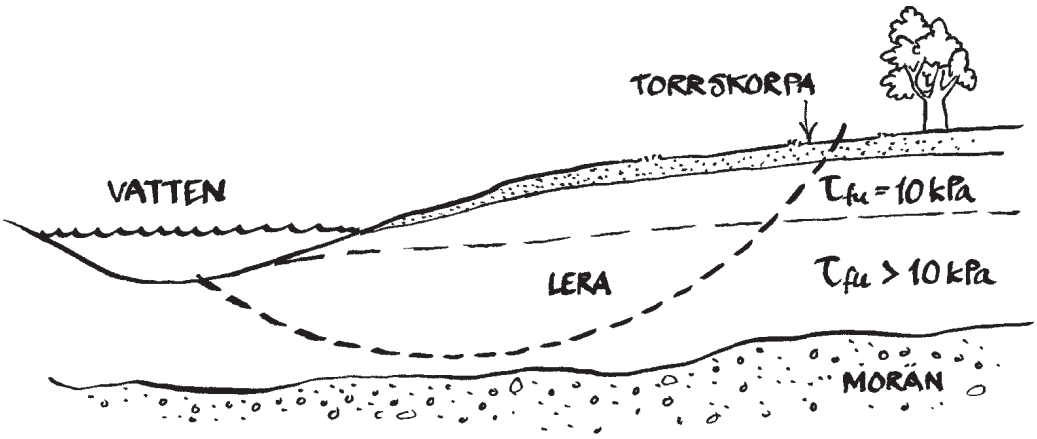
Utöver dessa beräkningar har bildandet av de olika slänterna simulerats med avancerade numeriska beräkningsmetoder. Resultaten av dessa beräkningar är beroende av vilka beräkningsantaganden som gjorts och stor vikt har lagts vid att antagandena skall vara rimliga och att resultaten skall motsvara de spänningstillstånd, som med ledning av befintliga empiriska observationer, kan antas råda i motsvarande slänter i naturligt tillstånd. Slänterna har sedan analyserats beträffande inverkan av några av de aktuella förstärkningsåtgärderna, främst avschaktning och uppfyllning och i något fall portryckssänkning.

Beräkningsresultaten har sammanställts och arkiverats i Skredkommissionens arkiv.

I det följande anges de viktigaste resultaten av de utförda beräkningarna, med kommentarer och slutsatser.

Huvudresultat av studien

- ***Långsträckt slänt i normal- till svagt överkonsoliderad lera***



Slänten består av ett 15 - 20 m mäktigt lerlager på morän, som sluttar ned mot ett vattendrag. Slänten är minst 100 m lång och i de övre delarna är lutningen endast 4-5 grader (cirka 1:13). Cirka 40 m från strandkanten ökar lutningen ett par grader och inom de närmsta 15 metrarna är den cirka 15 grader (1:4). Vattendraget är ett par meter djupt och cirka 20 m brett. Lerlagret täcks av en tunn torrskorpa, cirka 1 m tjock, och den odränerade skjuvhållfastheten är 10 kPa ned till 5 m djup och ökar sedan med 1,5 kPa/m. Grundvattenytan följer underkant torrskorpa till vattenbrynet och portrycken är hydrostatiska.

Vid beräkningarna med **klassiska beräkningsmetoder** har alternativen avschaktning, uppfyllning och spont studerats. På grund av att slänten redan är mycket flack bedömdes en ytterligare gradvis utflackning vara orealistisk. Eftersom någon utpräglad aktivzon, eller pådrivande koncentrerad ytlast, inte finns bedöms inte heller pålning eller kalk/cementpelare vara effektiva alternativ.

Beräkningarna visar att alternativet med spont är orealistiskt då såväl spontdjup, spontkrafter som erforderliga stagkrafter blir mycket stora. Erforderliga krafter och spontdjup blir något större enligt kombinerad analys än enligt odränerad analys, även då endast samma procentuella förbättring i förhållande till motsvarande beräkning för oförstärkt tillstånd avses.

Beräkningarna visar också att erforderlig avschaktning för att erhålla samma procentuella förbättring, blir större enligt kombinerad analys än enligt odränerad analys. Detta trots att eventuella långtidseffekter på hållfastheten inte beaktats. Erforderlig uppfyllning blir beräkningsmässigt i ungefär samma storlek som den erforderliga avschaktningen, men vid denna åtgärd återfinns inte motsvarande skillnad vid de olika beräkningstyperna. I detta fall är leran så lös att den uppfyllning som kan göras vid släntfoten, utan att större konsolideringssättningar uppstår, är begränsad.

Slänten har också analyserats med **avancerade numeriska beräkningsmetoder**. I dessa beräkningar har den rådande spänningssituationen i slänten beräknats, med antagande av att de något brantare partierna i släntens nederdel och vattenfåran skapats genom erosion. Beräkningarna visar då att i detta oförstärkta tillstånd är skjuvhållfastheten i leran i det närmaste till fullo mobiliserad i stora delar av slänten, speciellt i de djupare liggande partierna.

Analys av effekter av olika förstärkningsåtgärder har endast gjorts för alternativen avschaktning vid släntkrön respektive uppfyllning vid släntfot. Avschaktningen har utformats som ett kilformigt ingrepp bakom det brantare partiet, där det avschaktade partiet givits en plan överyta med en brantare bakkant. Uppfyllningen vid släntfot har också gjorts kilformig och innebär i princip en utflackning av det brantare partiet i släntens nederdel.

Resultatet av avschaktningen blir att påkänningen minskar för de djupast liggande partierna i leran, medan påkänningsgraden förblir hög inom ett stort parti under släntkrönet. Dessutom ökar påkänningsgraden i leran bakom det avschaktade partiet. Den studerade avschaktningen går ned under den tidigare fria grundvattenytan och effekterna på längre sikt beror till stor del på vad som med tiden kommer att hända med portrycken i slänten.

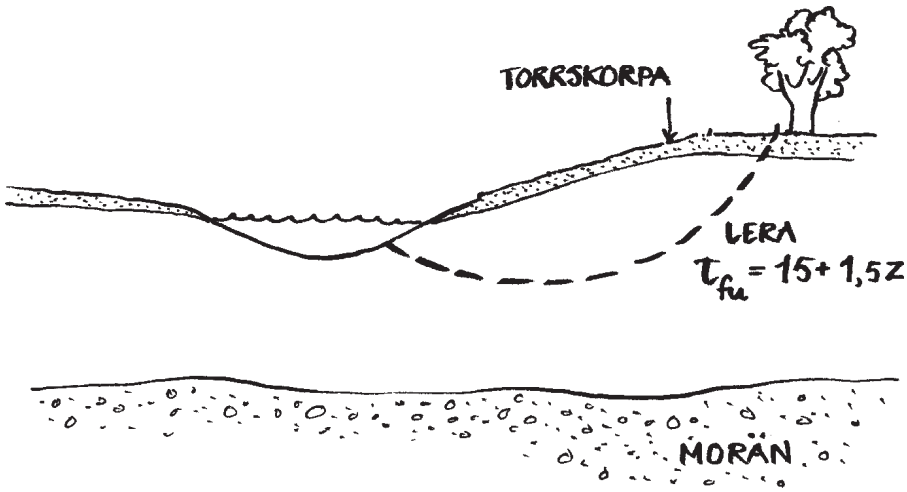
Den föreslagna uppfyllningen sänker skjuvpåkänningsgraden i leran inom alla delar av slänten. Portryckssituationen antas bli i stort sett oförändrad, jämfört med förhållandena före uppfyllningen. Att alla delar påverkas positivt torde delvis bero på den föreslagna utformningen, som snarare innebär en utflackning av det brantare partiet genom en uppfyllning med varierande tjocklek än en mer traditionell uppfyllning vid släntfoten.

Den beräkningsmässigt effektivaste förstärkningsåtgärden, som såväl höjer den totala säkerhetsfaktorn som sänker påkänningsgraden i alla hårt ansträngda partier, utan att skapa nya sådana, är således en uppfyllning-utflackning av släntens

nedre brantare parti med ungefär den utformning som studerats. Åtgärden innebär också i princip en direkt återställning av de förhållanden som kan antas ha varit rådande innan den senare delen av erosionsprocessen skapade den höga ansträngningsgraden.

Slutsats:
I det aktuella fallet bör en uppfyllning vid släntfot, i form av ett erosionsskydd, läggas ut. Denna bör kombineras med ytterligare uppfyllning vid släntfot, gärna i form av en triangulär uppfyllning, som medför en samtidig utflackning av slänten. Eventuellt kan den ytterligare uppfyllningen kombineras med, eller ersättas av, en avschaktning vid släntkrön. Vid projekteringen bör förstärkningseffekten också i det långa perspektivet och vilka sättningar och rörelser en uppfyllning kan förorsaka beaktas. Såväl odränerad som kombinerad analys måste utföras för att efekterna skall kunna bedömas. Den slutliga utformningen av förstärkningsåtgärderna styrs troligen också i hög grad på andra faktorer, t.ex. miljöaspekter.

- ***Brant erosionsslänt i normal- till svagt överkonsoliderad lera***



Slänten utgörs av en erosionsslänt i lera på fast botten av morän på berg. Totala slänthöjden är 13 m och släntlutningen är 1:3. Vid släntfoten finns ett cirka 20 m brett vattendrag med maximalt vattendjup 1,4 m. Bakom släntkrönet är markytan plan och leran överlagras av en cirka 2 m tjock torrskorpa, vilken i slänten tunnas ut mot vattendraget. Porvattentrycken är hydrostatiska, från underkant torrskorpa respektive vattenytan i vattendraget. Den odränerade skjuvhållfastheten är 15 kPa +1,5 kPa/m, räknat från nivån för underkant torrskorpa ovanför krönkant.

Beräkningar med **klassiska beräkningsmetoder** har utförts för såväl avschaktning, uppfyllning, utflackning, spont, kalk/cementpelare som pålar. Störningseffekter har dock ej beaktats och inte heller har ifrågasatts om samtliga metoder varit praktiskt genomförbara.

Beräkningarna visar att vid avschaktning erfordras, för samma procentuella förbättring av säkerhetsfaktorn, ungefär 1,5 ggr så stor avschaktning enligt kombinerad analys som enligt dimensionering med enbart odränerad analys. Detta trots att eventuella hållfasthetsförändringar inte beaktats.

Vid uppfyllning vid släntfoten ger de olika analysmetoderna inte någon påtaglig skillnad i erforderlig förstärkning. Uppfyllningen behöver gå relativt högt upp i slänten för att erforderlig beräknad förbättring av säkerhetsfaktorn skall erhållas, eftersom den farligaste glidytan flyttar sig uppåt allteftersom uppfyllningen vid slänttån fortskrider.

Inte heller vid utflackning av slänten erhålls någon påtaglig skillnad i erforderlig omfattning mellan c-analys och kombinerad analys.

Beräkningar har även utförts för alternativen spont, kalk/cementpelare och pålar. Av dessa torde pålar vara det enda realistiska alternativet och det enda som beräknats mera detaljerat. Erforderlig pålning är tämligen omfattande och sträcker sig från en bit bakom krönkant till långt ned i slänten.

Vid beräkningarna med **avancerade numeriska beräkningsmetoder** har förutsatts att slänten är en erosionsslänt, som skapats genom att ett vattendrag eroderat ned från en horisontell markyta. Processen medför att vertikalspänningarna under det eroderade partiet kraftigt reduceras, medan reduktionen i horisontalspänningar är betydligt mindre. Detta resulterar i mycket höga horisontalspänningar i förhållande till vertikalspänningarna vid släntens tå och i ravinens botten, och jordens skjuvhållfasthet är här till fullo mobiliserad.

En beräkning där slänten drivs till brott genom en generell procentuell sänkning av hållfasthetsparametrarna visar en i det närmaste helt cirkulärcylindrisk glidyta vid odränerad analys, medan glidytan i en dränerad analysen får en planare form i aktivzonen och i den direkta skjuvzonen, med en övergång med en mindre radie mellan dessa zoner.

Någon förstärkning genom portryckssänkning är inte aktuell, eftersom jorden är normal- eller endast svagt överkonsoliderad för nuvarande portryckssituation.

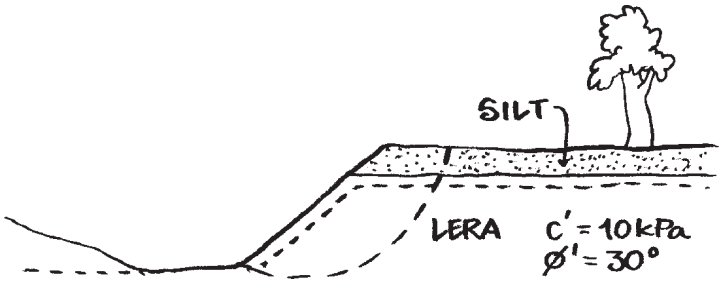
Den beräknade effekten på denna spänningskoncentration, till följd av en avschaktning vid släntkrönet, beror på vad som i beräkningarna antas om dräneringssituationen. Vid en odränerad analys reduceras spänningskoncentrationen relativt mycket, medan en dränerad analys visar på en mer begränsad effekt. Den största reduktionen i mobiliserad skjuvspänning, i förhållande till tillgänglig skjuvhållfasthet, uppstår för båda beräkningarna i skjuvytans övre del i aktivzonen.

Den beräknade effekten av en horisontell upplastning vid släntfoten visar att utjämningseffekten är mycket stor för spänningskoncentrationerna i de delar som ligger under och strax innanför uppfyllningen, medan effekten är mycket liten för partier som är lokaliserade högre upp och längre in i slänten. Detta gäller vid såväl dränerad som odränerad analys.

Den beräkningsmässigt mest effektiva förstärkningsåtgärden, som både höjer den totala säkerhetsfaktorn, utjämnar spänningskoncentrationer och sänker påkänningsgraden inom hela slänten, är således en utflackning som innefattar triangulär upplastning vid släntfoten och motsvarande avlastning vid släntkrönet

Slutsats:
För den aktuella slänten, som skapats av erosion, är utläggning av ett erosionsskydd vid slänttån ett måste. Detta kompletteras sedan lämpligen med ytterligare uppfyllning, utflackning eller avschaktning, allteftersom övriga omständigheter medger. Eventuella långtidseffekter på hållfasthet och porvattentryck bör prognosticeras och beaktas. Såväl odränerad som kombinerad analys krävs för att förstärkningseffekterna skall kunna utvärderas och även glidytor med en form som avviker från den cirkulärcylindriska bör analyseras. Den använda metoden, eller kombinationen av metoder, bör helst utformas så att en utjämning av befintliga spänningskoncentrationer i slänten erhålls. Detta åstadkoms bäst genom en utflackning, som innehåller såväl uppfyllning vid släntfot som avschaktning vid släntkrön.

- ***Brant slänt i överkonsoliderad lera***



Exemplet utgörs av en 15 m hög slänt i starkt överkonsoliderad lera, med lutningen 1:1,5. Leran överlagras av ett 3 m tjockt siltlager. Överkonsolideringsgraden är så hög att dränerad analys blir dimensionerande i alla delar av slänten och de effektiva hållfasthetsparametrarna är $c' \approx 10$ kPa och $\phi' = 30^{o}$. Den fria grundvattenytan ligger cirka 4 m under markytan några meter bakom släntkrönet och närmar sig gradvis markytan för att sammanfalla med denna vid släntens botten. Något vattendrag vid slänttån antas inte, men angiven geometri och släntens bildning antyder att ett vattenflöde, åtminstone tidvis, torde förekomma.

Beräknade farligaste glidytor med **klassiska beräkningsmetoder** är markerade tåcirklar och glidytorna går relativt brant på begränsat djup in i slänten. Förstärkningsåtgärder i form av avschaktning, uppfyllning, grundvattensänkning samt kalk/cementpelare och pålar har studerats.

Beräkningsmässigt blir avschaktningar något mer omfattande än uppfyllningar, på grund av att
effektivspänningar och mothållande skjuvkrafter också minskar vid avlastningen. Detta kompenseras i viss mån vid djupare avschaktningar, genom att grundvattenytan och portrycken då också sänks.

I detta fall ger en sänkning av porvattentrycken beräkningsmässigt god effekt.

På grund av den branta glidytan och dess begränsade djup har kalk/cementpelare och pålar installerade bakom krönkanten beräkningsmässigt ingen effekt. Ett begränsat antal pålar installerade i den branta slänten skulle dock beräkningsmässigt ha god effekt.

I beräkningarna med **avancerade numeriska beräkningsmetoder** har också denna slänt antagits vara skapad av erosion i ett plant område. Jorden består i detta fall av en från början överkonsoliderad lera. Processen har också här skapat en spänningssituation som medför att skjuvhållfastheten inom ett parti vid släntens tå till fullo är mobiliserad. Också i släntens övre delar är skjuvhållfastheten nästan helt mobiliserad.

Beräkningarna omfattar endast dränerad analys och en jämförelse mellan alternativen avschaktning och uppfyllning. Stora avschaktningar medför dock också en samtidig grundvattensänkning, varför denna effekt studerats indirekt. Beräkningsresultaten visar också i detta fall på en icke helt cirkulär farligaste glidyta för den dränerade analysen.

Den fria grundvattenytan har antagits ligga 4 m under markytan i partiet bakom släntkrönet och gradvis övergå till att sammanfalla med markytan vid slänttån. Portrycken antas hydrostatiska från grundvattenytans nivå. En grundvattensänkning kan antas ge motsvarande geometri för grundvattenytan, med en lägre nivå i partiet bakom släntkrön och motsvarande gradvisa övergång till markytans nivå vid släntfoten. Detta medför att effektivspänningarna i den potentiella glidytans centrala delar ökar och den lokala säkerhetsfaktorn i dessa delar, liksom totalstabiliteten, ökar markant. Spänningarna i glidytans översta del liksom vid släntens tå påverkas dock mycket lite och en mycket hög mobiliseringsgrad av skjuvhållfastheten kvarstår vid slänttån.

En avschaktning vid släntkrönet ökar den totala säkerhetsfaktorn, men ger mycket liten effekt på mobiliseringsgraden av hållfastheten vid släntens tå. Höjningen av den totala säkerhetsfaktorn med avlastning sker relativt långsamt, eftersom också de effektiva spänningarna minskar och därmed mothållskrafterna. Vid avschaktningar större än 4 m ökar effekten markant, vilket beror på att grundvattenytan då också sänks.

En uppfyllning vid släntfoten ger en bättre effekt på totalstabiliteten än motsvarande avschaktning. Uppfyllningen ger en mycket markant effekt på lokalstabiliteten vid släntens tå och partiet närmast innanför denna och reducerar därmed effektivt mobiliseringsgraden av skjuvhållfastheten i denna del av slänten. Längre in i slänten och i glidytans övre del har åtgärden dock ingen effekt på mobiliseringsgraden.

Den beräkningsmässigt mest effektiva åtgärden, som såväl höjer den totala säkerhetsfaktorn, utjämnar spänningskoncentrationer som sänker påkänningsgra-

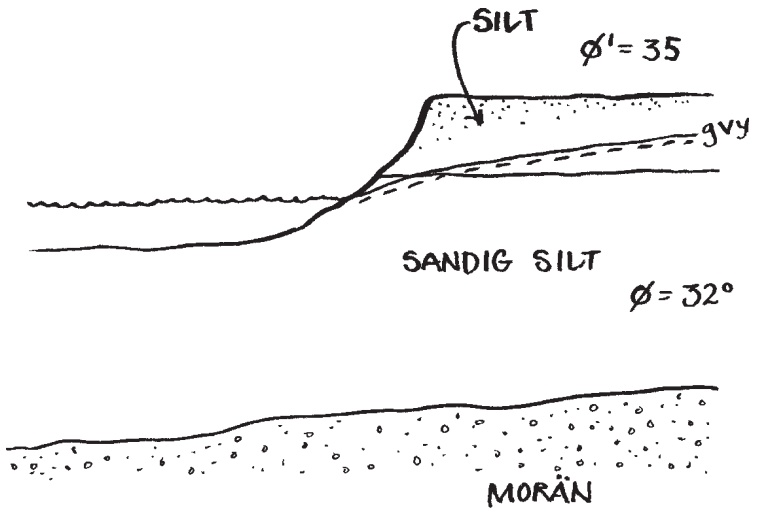
den i hela slänten är således en form av utflackning, som innefattar en triangulär upplastning vid släntfoten och motsvarande avlastning vid släntkrönet, eventuellt i kombination med en portryckssänkning. Enligt de utförda beräkningarna skulle upplastning vid släntfoten ge en något bättre effekt på totalstabiliten än motsvarande avschaktning. Beroende på den geometriska utformningen av åtgärderna och permeabilitetsegenskaper i massorna, kan dock en viss förändring i grundvattenytans nivå och geometri förväntas, vilket också kommer att påverka den totala effekten av åtgärderna till avschaktningens fördel och delvis modifiera relationen mellan effekterna av de olika åtgärderna.

Slutsats:
För den aktuella slänten bör behov av eventuellt erosionsskydd utredas. Stabiliteten säkras i första hand genom utflackning, uppfyllning och/eller avschaktning i lämplig kombination. Vid beräkning av stabiliseringseffekten bör även glidytor med en form som avviker från den cirkulärcylindriska analyseras. Erforderlig utsträckning av såväl avschaktning som uppfyllning i horisontalled är begränsad, varför alla dessa åtgärder i princip innebär en utflackning av slänten, om än i trappstegsformat.

Portryckssänkning skulle kunna vara ett komplement, eller alternativ, om långtidseffekten kan säkerställas.

Också pålning skulle kunna vara ett alternativ, om släntens geometri inte får ändras. Detta skulle dock i praktiken fordra att siltlagret i släntens överdel temporärt schaktades av och sedan återfylldes en tid efter att pålarna installerats.

- ***Brant slänt i silt***



Slänten i exemplet är 45 m hög och har släntlutningen 1:1,4 mot ett vattendrag vid släntfoten. Slänten står således något brantare än naturlig rasvinkel och stabiliteten är avhängig av eventuella ”cementeringskrafter” och effekter av negativa portryck, på grund av kapillärkrafter, sk falsk kohesion. Jorden antas bestå av siltig sand, med en friktionsvinkel som varierar mellan 32º och 35º. Grundvattenytan antas bakom släntkrönet vara belägen på 24 m djup under markytan och inom slänten gradvis övergå till att motsvara vattenytan i vattendraget vid släntfoten. Om ingen hänsyn tas till negativa portryck, måste ett mindre kohesionsintercept av någon kPa antas för att slänten beräkningsmässigt skall stå. Antas negativa portryck råda ovan fria grundvattenytan och vara i den storlek som erfarenhetsmässigt brukar uppmätas i slänter av denna typ, ökar den beräknade säkerhetsfaktorn till 1,1 á 1,2. De beräknade farligaste glidytorna är mycket branta och ytliga och går i princip från släntkrön till släntfot.

Beräkningar har utförts med klassiska beräkningsmetoder för alternativen avschaktning, uppfyllning och utflackning. Beräknad erforderlig avschaktning, respektive uppfyllning, sträcker sig i princip över halva slänthöjden. Erforderlig utsträckning i horisontalled är mycket begränsad och åtgärderna har beräknats bli utförda i trappsteg, vilket i princip är detsamma som en utflackning av slänten. Beräkningsresultatet är något avhängigt av den använda beräkningsmetoden, där cirkulärcylindriska glidytor använts, men resultatet kan sammanfattas som att slänten måste flackas ut. En utflackning av slänten torde också

medföra en viss förändring av portryckssituationen. Denna förändring är dock svår att bedöma och antagandena om den framtida portryckssituationen måste göras med försiktighet. Ett alternativ till utflackning, vilket dock inte medtagits i beräkningarna, är jordspikning, vilket är användbart för att armera släntens ytskikt och att tvinga ned de potentiella glidytorna på större djup, där den beräknade säkerhetsfaktorn är betydligt högre.

Slutsats:
För den aktuella slänten måste som första åtgärd ett erosionsskydd läggas ut vid släntfoten. Därefter finns två alternativ; antingen flackas slänten ut i erforderlig grad eller också säkras stabiliteten genom jordspikning. I båda fallen måste dessutom tillses att senare yterosion i slänten förhindras.

5. Lämpligaste förstärkningsåtgärder för olika typer av slänter

Nedan ges en sammanfattning av lämpligaste förstärkningsåtgärder för olika typer av slänter baserad på utförda beräkningar och övriga geotekniska aspekter

Det kan konstateras att **lämpligaste förstärkningsåtgärd ofta är en kombination av olika åtgärder**. Val av åtgärd baseras ofta inte främst på den beräkningsmässiga effekten efter att den utförts, utan på avväganden om åtgärden överhuvudtaget är genomförbar och vilka övriga effekter den har på omgivning och miljö samt en bedömning av hur effektiv åtgärden är på lång sikt.

För att effekterna av olika åtgärder också på lång sikt skall kunna värderas erfordras att framtida förändringar i portryck och skjuvhållfasthet bedöms och att **såväl odränerad c-analys som kombinerad analys utförs** i normalkonsoliderad och svagt överkonsoliderad lera. Effekten av de olika åtgärderna är dock inte till alla delar beräkningsbar och för att åtgärdernas effekt på spänningsfördelningen i jordmassan skall kunna uppskattas krävs **mer avancerade beräkningar** än med klassiska beräkningsmetoder. Resultatet av mer avancerade beräkningar är beroende av vilka antaganden som görs och får ofta snarare ses som kvalitativt än kvantitativt, dvs de beskriver spänningssituationerna och förändringarna i princip, men inte nödvändigtvis deras exakta storlek.

För att stabiliteten av slänter mot vattendrag skall kunna säkras också på lång sikt erfordras att eventuell **erosion vid släntfoten förhindras**. Den långsiktiga erosionen är ofta huvudorsaken till att slänten utbildats och att ett stabilitetsproblem föreligger. Oavsett vilken förstärkningsåtgärd som används måste vidare erosion effektivt stoppas. Beräkningsmässigt har dock utläggning av endast ett erosionsskydd normalt mycket liten inverkan. Även i andra slänter än mot sjöar och vattendrag är det väsentligt att säkerställa att erosion inte kan uppstå. I branta slänter med erosionskänsligt material måste också någon form av **skydd mot yterosion** anordnas, t.ex. i form av en kombination av nät och/eller växtlighet.

I de flesta fall är **utflackning**, genom en kombination av uppfyllning vid släntfot och avschaktning vid släntkrön, att föredra ur teknisk synvinkel. Undantagen är främst fall med måttligt branta slänter, i mäktiga avlagringar av normal- till svagt överkonsoliderad lera med låg skjuvhållfasthetstillväxt på djupet, där de kritiska glidytorna följaktligen går mycket djupt. I dessa fall får horisontella avschaktningar vid släntkrön respektive horisontella uppfyllningar vid släntfot med större utbredning beräkningsmässigt en bättre effekt. I flacka slänter är också en ytterligare gradvis utflackning av slänten ofta ett orimligt alternativ från ekonomisk samt arbets-, miljö- och återställningsmässig synpunkt.

Vid **avschaktningar** i lera krävs, för att den långsiktiga stabiliteten skall säkras, oftast en större avschaktning än vad som beräknas med en traditionell odränerad analys, vilken endast gäller för korttidsfallet. På grund av avschaktningen minskar vertikalspänningarna och en dränering medför att dränerad hållfasthet blir dimensionerande inom större delar av glidytan än tidigare, vilket reducerar effekten. Detta accentueras ytterligare om portrycken är höga. Vidare kommer med tiden en ny torrskorpa och sprickor att utbildas, vilka vid beräkningarna i likhet med övrig stabilitetsberäkning av slänter måste antas vara vattenfyllda. För att riktigt kunna bedöma effekten i det långa tidsperspektivet, måste också **den långsiktiga förändringen i grundvattenytans läge och portrycken i slänten prognosticeras** och en uppskattning göras av möjliga **förändringar av den odränerade skjuvhållfastheten**, på grund av jordens anpassning till den nya spänningssituationen. De flesta av dessa effekter, utom den eventuella portryckssänkningen, medför att effekten av avschaktningen på stabiliteten reduceras. Ovannämnda effekter, med undantag av den framtida torrskorpebildningen, gäller också i de fall avschaktningen ersätts med utbyte av jordmassor mot lätt fyllning.

Vid **uppfyllningar** vid släntfot måste fyllningen få ett ordenligt stöd av fast underliggande jord, så att den inte skapar påhängskrafter på slänten. Detta krav kan beaktas genom att tillse att spänningarna i jorden efter fyllningens utläggning stannar väl under förkonsolideringstrycket, så att inga stora konsolideringssättningar och åtföljande risk för sättningsskador och släntrörelser uppstår. Vid uppfyllning av finkorniga massor skall beaktas att grundvattenytans läge och portrycken i jorden kan stiga i släntens nederdel och under fyllningen, vilket medför en reducerad stabilitetsförbättring. Uppfyllning på finkornig jord medför också en initiell portrycksförhöjning, som utjämnas då materialet konsoliderar. Detta innebär att det kan ta en viss tid innan full stabiliseringseffekt uppnås. Konsolideringen medför också en mindre hållfasthetstillväxt, vilken dock normalt inte påräknas. Större konsolideringssättningar, som påtagligt höjer

hållfastheten, kan som ovan nämnts normalt inte tillåtas. Utfyllnad i vatten kan på grund av erosionsrisken normalt endast göras med grövre massor. Effekten av uppfyllningen reduceras, eftersom det för den del av fyllningen som ligger under vattenytan endast är jordens effektiva tunghet under vatten som påverkar stabiliteten. Arbeten i vatten medför också miljökonsekvenser och fordrar normalt vattendom.

Portryckssänkningar ger beräkningsmässigt en god stabilitetsförbättrande effekt i överkonsoliderad lera, silt och friktionsjord. Portrycksbegränsning kan också vara effektiv i mer normalkonsoliderad lera med skikt, där portrycken periodvis kan vara mycket höga. Portryckssänkning används dock relativt sällan, på grund av problem med att säkerställa dess varaktighet på lång sikt.

Pålning är ett alternativ som främst används då ytterligare belastningar skall påföras bakom släntkrönet. Det kan också vara ett alternativ då släntens geometri av olika orsaker inte kan ändras. Pålning i slänter måste utföras med stor försiktighet och fordrar normalt övervakning av rörelser och portryck. I slänter med otillfredsställande stabilitet i naturligt tillstånd erfordras ofta temporära stabiliserande åtgärder, tills dess att pålarna installerats samt porövertrycken utjämnats och hållfastheten i leran återställts. Några långsiktiga negativa effekter på förstärkningen därefter behöver normalt inte påräknas.

Spont används normalt endast för temporära åtgärder och för eventuell stabilisering av lokala partier i en slänt, utom i de fall jordförhållandena medger begränsade spontlängder och goda möjligheter till förankring av dragstag i fast botten på begränsat avstånd från sponten. Permanenta sponter måste dimensioneras med beaktande av korrosionsrisk i spont och dragstag.

Jordspikning är ett alternativ till utflackning i mycket branta slänter där de farliga glidytorna går relativt grunt. Jordspikar måste dimensioneras med beaktande av korrosionsrisk. Förstärkningsåtgärden måste dessutom kombineras med ett effektivt skydd mot yterosion eftersom släntens lutning bibehålls.

Kalk/cementpelare och **andra in-situ tillverkade pelare** bör normalt inte användas i områden där förutsättningar för stabilitetsproblem föreligger. Dessa metoder kan ändå bli aktuella i fall där släntens geometri av någon anledning inte kan ändras. Uförandet måste då ske med stor varsamhet och fordrar normalt övervakning av portryck och rörelser samt ofta temporära stabilitetshöjande åtgärder.

6. Diskussionsunderlag för val av förstärkningsgrad

I de tidigare kapitlen har det noggrant framhållits att det är mycket viktigt att den egentliga orsaken till den låga stabiliteten åtgärdas, liksom att åtgärden är sådan att ogynnsamma spänningskoncentrationer i de mest ansträngda delarna av glidytan motverkas. Detta är grundläggande och måste genomsyra hela åtgärdspaketet.

Hitintills har diskussioner om erforderlig förstärkning i de flesta fall kommit att handla om vilken säkerhetsfaktor som en slänt skall förstärkas till. Det vore emellertid önskvärt att kraven sattes i termer av **högsta tillåtna brottsannolikhet**, som formellt gäller vid dimensionering av byggnader. Då skulle säkerhetsfaktorn i sig i princip bli ointressant. En förstärkning till en på förhand given brottsannolikhet får i praktiken mycket olika resultat vad säkerhetsfaktorn beträffar, bl a beroende på vilka orsakerna är till den otillfredsställande stabiliteten och även beroende på vilken förstärkningsmetod som väljs.

Idag är emellertid underlaget delvis begränsat och dimensioneringen av en förstärkningsåtgärd kan därför inte strikt baseras på sannolikhetsteoretiska beräkningar. Nedan redovisas en del analyser av hur brottsannolikheten förändras med en förändring av säkerhetsfaktorn.

Först behandlas, ganska ingående, det fall där odränerad analys är dimensionerande. Därefter diskuteras dränerad analys och kombinerad analys.

Orsaken till osäkerhet i den beräknade säkerhetsfaktorn beror främst av spridningen eller osäkerheten hos:

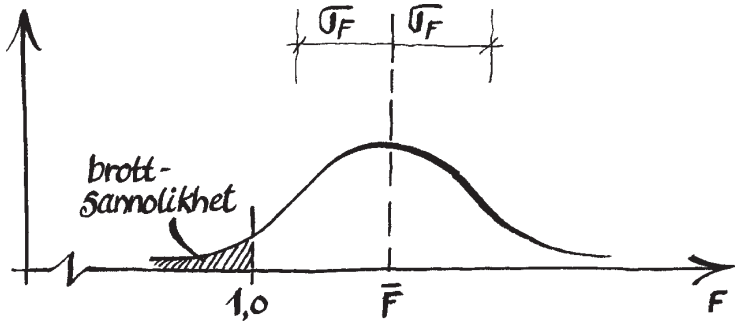
1) parametervärden; hållfasthet, portryck, tunghet, etc
2) geometri; höjd, jordlagers mäktighet, etc
3) beräkningsmodell

Osäkerheten medför att även om slänten har en säkerhetsfaktor större än 1,0 kan skred inträffa, eftersom F har en viss spridning kring sitt medelvärde. Medelvär-

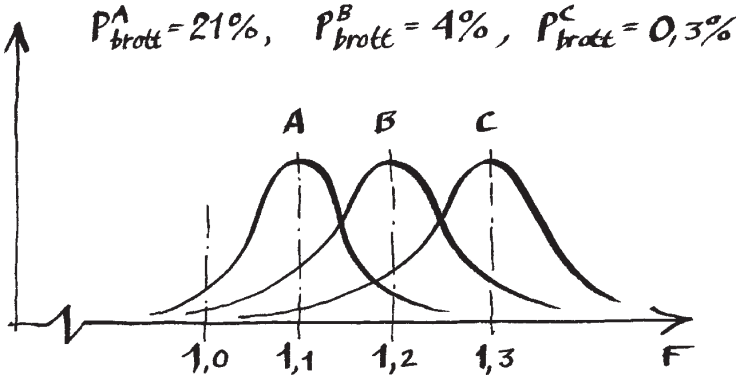
det $\overline{F}$ motsvarar den traditionellt beräknade säkerhetsfaktorn och spridningen uttrycks som varians Var_F eller standardavvikelse σ_F, se *fig 6.1*. Denna är kvadratroten ur variansen. Kvoten av standardavvikelsen och medelvärdet kallas variationskoefficienten, V_F, och uttrycks ofta i procent. Då stora jordvolymer är involverade, som t ex i släntstabilitetsanalys, kan en reduktion av spridningen göras, s k variansreduktion.

$$V_F = \sigma_F / \overline{F}$$

Arean under kurvan i *fig 6.1* är 1 och den del av arean som återfinns till vänster om *F = 1,0* motsvarar sannolikheten för brott (P_{brott}). Olika slänter med olika säkerhetsfaktorer, men med samma standardavvikelse, har således olika brottsannolikhet, se *fig 6.2*. A, B, och C antas vara lognormalfördelade, alla med standardavvikelsen 12 %.

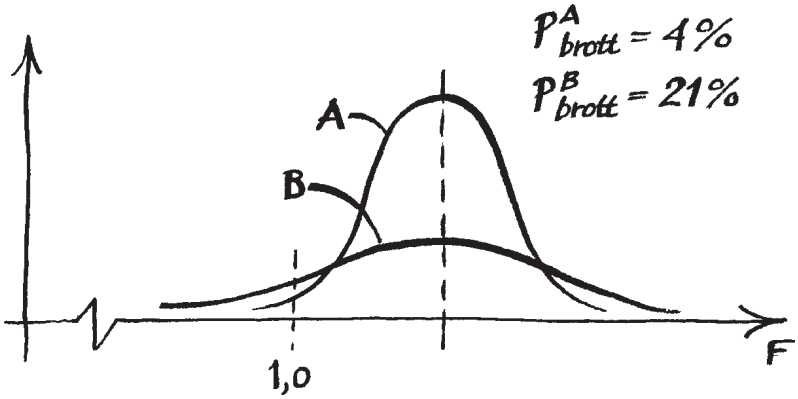


Figur 6.1.



Figur 6.2.

Spridningen hos *F* är också mycket viktig för brottsannolikheten. Två slänter, som beräkningsmässigt har samma säkerhetsfaktor, kan ha mycket olika brottsannolikhet beroende på olika grad av osäkerheter (spridning) vid bestämning av bl a hållfasthet, se *fig 6.3*. A och B antas lognormalfördelade med medelvärdet 1,2 och standardavvikelserna 0,12 respektive 0,24. Vid en förstärkning ökas *F*, vilket medför en minskning av $P_{(brott)}$, vilket ligger till grund för val av förstärkningsgrad.



Figur 6.3.

Det skall dock här poängteras att då den förstärkta slänten analyseras skall de förhållanden som kan förväntas råda i framtiden tas med i beräkningen, t ex bildning av ny torrskorpa vid avschaktning, ev förändring av hållfasthet och portryck etc.

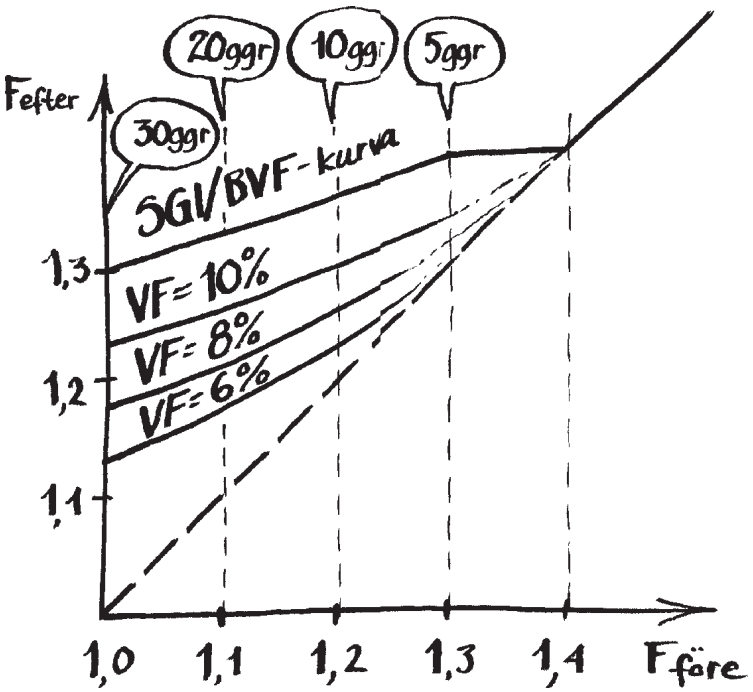
Den beräknade säkerhetsfaktorn får vid normal spridning i parametervärden och geometri en variationskoefficient, på ca 10 %. Enkla beräkningar ger då vid handen att en slänt med säkerhetsfaktorn *F = 1,0* har en brottsannolikhet på 50 %, *F = 1,1* på 18 %, o s v. Säkerhetsfaktorn har antagits vara lognormalfördelad vid dessa och de följande beräkningarna. Då spridningen är ovanligt liten kan V_{Fc} vara ner mot 8 % och i exceptionella fall ända ner till 6 %. I samtliga fall har viss variansreduktion tillgodoräknats, med hänsyn till glidytans geometriska omfattning.

I *tabell 6.1* visas en sammanställning av $P_{(brott)}$ för en rad olika säkerhetsfaktorer och variationskoefficienter. Detta åskådliggörs grafiskt i *fig 6.4*, där även den äldre s k SGI-kurva, som bl a ingår i Banverkets föreskrifter (Banverket 1985), visas. Siffrorna i figuren anger för de fyra kurvorna med olika variations-

koefficienter, vad en förstärkning innebär i minskning av brottsannolikheten vid given variationskoefficient för *F*. Om en slänt t.ex. har säkerhetsfaktorn 1,1 och V_F = 10 % innebär en förstärkning till *F* = 1,27 att brottsannolikheten minskas 20 ggr från 18 % till 0,9 %, *F* har då antagits vara lognormalfördelad.

Tabell 6.1 Brottsannolikheter i % vid olika $\overline{F}$ och V_F.

V_F	$\overline{F}$ 1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
12 %	50	22	6	1,2	0,25
10 %	50	18	4	0,5	0,04
8 %	50	12	1,2	0,1	0,001
6 %	50	6	0,1	0,001	10^{-6}



Figur 6.4.

Men om en slänt (A) som har säkerhetsfaktorn F^A = 1,3 jämförs med en annan slänt, (B), som från början har säkerhetsfaktorn F^B = 1,1 och sedan förstärks så att även den får en säkerhetsfaktor F^{Bf} = 1,3 så torde slänt B ha lägre brottsannolikhet än slänt A. En av anledningarna är att vi vet att slänt B är stabil så

länge säkerhetsfaktorn beräkningsmässigt är större än 1,1, eftersom brott ej inträffat. Detta kan vi inte vara säkra på vad avser slänt A. Statistiskt kan detta beaktas och analyseras enligt följande.

Osäkerheter i materialparametrar, geometri, och beräkningsmodell resulterar i att den beräknade säkerhetsfaktorn hade en viss spridning kring medelvärdet. Anta att F är lognormalfördelad med medelvärde 1,1 och variationskoefficient 10 %. Inför en variabel *h* där all osäkerhet samlas så att

$$F = h \cdot F_{före}$$

I detta fall är h en stokastisk lognormalfördelad variabel med medelvärde 1,0 och variationskoefficient 10 %. $\overline{F}_{före}$= medelvärdet för säkerhetsfaktorn (i detta fall 1,1). *F* blir då lognormalfördelad med medelvärde 1,1 och variationskoefficient 10 %. Men eftersom slänten står, och brottkriteriet är att F = 1,0 innebär det att sannolikheten att *F* är mindre än 1,0 vid detta tillfälle är noll.

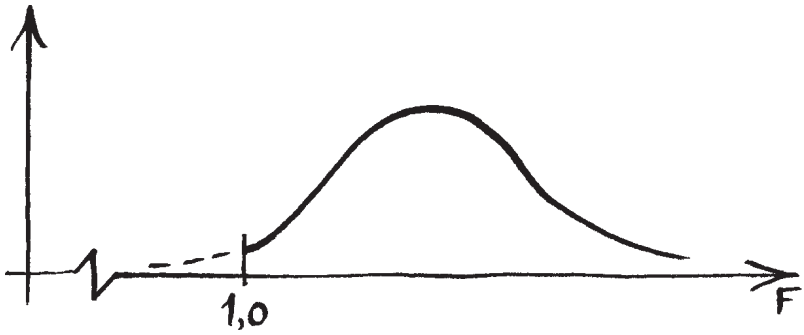
Denna del av *F* kan tas bort och vi erhåller en s k trunkerad lognormalfördelning, se *fig 6.5*. h kan lösas ut och man erhåller då motsvarande trunkerade fördelning, h^{trunk}. Vetskapen att slänten står kvar vid en beräkningsmässig säkerhetsfaktor på 1,1 resulterar i denna trunkering, ingenting annat. När sedan slänten förstärks ökar säkerhetsfaktorn med ett viss belopp *DF*. Detta tillskott i säkerhetsfaktorn är behäftat med en viss osäkerhet, delvis beroende på val av förstärkningsmetod. Vid uppfyllning i passivzonen finns t.ex. osäkerhet beträffande tjockleken på uppfyllnaden, liksom dess densitet. Detsamma gäller vid avschaktning i aktivzonen. Den säkerhetsfaktor, F_f, som erhålls efter förstärkning kan då något förenklat beräknas som

$$F_f = h^{trunk} \cdot \left(\overline{F}_{före} + DF \right)$$

Det är viktigt att komma ihåg att $\overline{F}_{före}$ är ett medelvärde utan spridning och att *DF* är tillskottet i *F* till följd av förstärkningeen. *DF* är behäftat med viss osäkerhet. Detta F_f skall jämföras med en slänt som från början hade den högre säkerhetsfaktorn $F_{hög}$ och som har följande fördelning

$$F = h \times \overline{F}_{hög}$$

Medelvärdet av ($\overline{F}_{före}$ + *DF*) är i detta fall det samma som för $\overline{F}_{hög}$. Skillnaden ligger således främst i trunkeringen av η.



Figur 6.5.

Genomförs beräkningar för de fall som visats i *fig 6.4*, med beaktande av trunkeringen av η fås betydligt lägre brottsannolikheter efter förstärkning. Då motsvarar förstärkningarna enligt figuren ungefär 500,100, 15 och 5 gånger lägre brottsannolikhet, vid förstärkning från 1,0, 1,1, 1,2 resp 1,3 jämfört med tidigare 30, 20, 10 resp 5.

Den genomförda trunkeringen vid $F = 1{,}0$ förutsätter att beräkningsmodellen är helt riktig. En osäkerhet i beräkningsmodellen medför i princip att en mindre eller större trunkering skulle kunna bli aktuell vid en lägre respektive högre säkerhetsfaktor. En känslighetsanalys för detta visar emellertid att inga större skillnader i beräkningsresultat uppstår.

En motsvarande analys för dränerad respektive kombinerad analys är svårare att göra generellt, men i princip erhålls motsvarande resultat. För denna typ av analys är det önskvärt att den statistiska analysen utförs i varje enskilt fall.

Ovanstående beräkningsexempel rörande brottsannolikhet och förstärkningsgrader får inte uppfattas som exakta värden utan de utgör mer formella brottsannolikheter.

För att få en uppfattning om rimliga förstärkningsgrader skulle man i princip kunna resonera enligt följande:

Antag att säkerhetsfaktorn för en slänt har en variationskoefficient på 12 %. Med ett normalt krav på $F_c = 1{,}4$, som kan förväntas inrymma denna variation, innebär det att en slänt skall ha en formell brottsannolikhet enligt *tabell 6.1* på 0,25 %. För att åstadkomma motsvarande formella brottsannolikhet för slänter

med lägre säkerhetsfaktor krävs följande ungefärliga minskning i brottsannolikheten (ggr), vid odränerad analys, se *tabell 6.2*.

Tabell 6.2 Erforderlig minskning i brottsannolikhet (ggr) för att uppnå en formell brottsannolikhet av 0,25 %.

	$F_{före}$				
V_F	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
12 %	200	90	25	5	-
10 %	200	70	15	2	-
8 %	200	50	5	-	-
6 %	200	25	-	-	-

7. Erforderlig förstärkningsgrad

En exploaterad slänt, som efter omfattande undersökningar befunnits ha otillfredsställande säkerhet mot brott, måste förstärkas om inte byggnader evakueras och anläggningar tas ur drift eller alternativt flyttas eller rivs. Den erforderliga förstärkningens omfattning beror på en rad faktorer och måste ofta bedömas från fall till fall. Det är emellertid nödvändigt med vissa övergripande rekommendationer.

Det huvudalternativ som bör eftersträvas är att kraven som anges i Skredkommissionens rapport 3:95 "Anvisningarna för stabilitetsutredningar", Tabell 8:1, med avseende på nyexploatering uppfylls. Som tidigare påpekats, bör minst en fördjupad utredning vara utförd innan förstärkningsåtgärder projekteras. Förutsatt att en sådan utredning utförts enligt anvisningarna, är det de därtill hörande kraven som skall vara uppfyllda. För kohesionsjord gäller att både kraven för odränerad analys och kraven för kombinerad analys skall vara uppfyllda. I sådana fall kan säkerheten anses vara tillfredsställande och **inga restriktioner** för markanvändningen behöver åsättas. Kraven på erforderlig säkerhetsfaktor anges som ett spann, inom vilket säkerhetsfaktorn väljs, beroende på olika icke direkt beräkningsbara gynnsamma och ogynnsamma faktorer. Det faktum att en betydande förstärkningsåtgärd genomförts i slänten får härvid räknas som ett klart gynnsamt förhållande. Vidare bör åtgärderna i görligaste mån avpassas så att de gynnsammaste effekterna med avseende på utjämning av spänningskoncentrationer erhålls.

I de fall kraven för nyexploatering inte kan uppfyllas måste **restriktioner för markanvändningen** införas. I dessa fall gäller normalt att de krav i Tabell 8:1 i anvisningarna, som gäller för befintlig bebyggelse med restriktioner, skall vara uppfyllda. Motsvarande krav på utredningarna och möjligheter att tillgodoräkna sig det gynnsamma förhållandet att en förstärkningsåtgärd utförts gäller som för huvudalternativet.

Det finns emellertid **undantagsfall**, då det ur teknisk, ekonomisk eller miljösynpunkt kan vara motiverat att frångå också dessa krav, men i dessa fall ställs

mer specifika krav på förstärkningsåtgärderna. Dessa skall då utformas så att de är speciellt gynnsamma vad avser förändringen av brottsannolikheten. Detta kan åstadkommas genom att förstärkningsåtgärderna är sådana att:

- Den egentliga orsaken till den dåliga stabiliteten åtgärdas.

- Spänningskoncentrationer utjämnas och en gynnsam spänningsfördelning skapas utefter de kritiska glidytorna.

En utredning skall visa att dessa två punkter beaktats och uppfyllts. En god hjälp för detta och för bedömning av minsta erforderliga säkerhetsfaktor är de tidigare kapitlen i denna rekommendation. Vidare bör en riskanalys genomföras där förändringen av brottsannolikheten kvantifieras. Som diskuterats i kapitel 6 vore det ideala förhållandet egentligen att kraven sattes i termer av en högsta tillåten brottsannolikhet, såsom formellt gäller vid dimensionering av byggnader. Då blev säkerhetsfaktorn i sig i princip ointressant. En förstärkning till högsta tillåten brottsannolikhet skulle i praktiken ge mycket olika resultat på säkerhetsfaktorn, bl a beroende på vilka orsakerna är till den otillfredsställande stabiliteten och även beroende på vilken förstärkningsmetod som används.

Användningen av statistiska metoder och sannolikhetskriterier inom geomekaniken är under utveckling, men idag saknas tillräckligt underlag för att basera kraven på förstärkning strikt på brottsannolikhetskriterier. Dimensioneringen kan dock göras mer nyanserad, på grund av en större insikt om dels slänters beteende och effekt av olika förstärkningsgrader, dels ökad kunskap om statistiska metoders tillämpning inom geotekniken. Diskussionen i föregående kapitel kan tjäna som underlag vid val av förstärkningsgrad i ovannämnda undantagsfall.

8. Referenser

Alén, C. (1996). Skredriskanalys. Arbetsrapport. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Banverket (1995). Stabilitetsanalyser. Föreskrift, BVF 585.10, Borlänge.

Bernander, S., Bredenberg, H., Broms, B., Hellman, L., Lundahl, B., Olofsson, T. & Stoltz, A. (1984). Grundläggning med pålar. Handboken Bygg, Kapitel G 13, Liber Förlag, Stockholm.

Bromhead, E. N. (1992). The stability of slopes. Surrey University Press.

Carlsten, P. & Ekström, J. (1995). Kalk- och kalkcementpelare - Vägledning för projektering, utförande och kontroll. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF, Rapport 4:95, Linköping.

Franzén, G. (1993). Soil Nailing - Jordspikning, en litteraturstudie. Chalmers Tekniska Högskola, Inst, f, Geoteknik med grundläggning, Rapport B 93:11. Göteborg.

Skredkommissionen (1995). Naturvärden och miljökonsekvenser i samband med stabilitetsarbeten. Skredkommissionen, Rapport 2:95, Linköping.

Skredkommissionen (1995). Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Skredkommissionen, Rapport 3-5:95, Linköping.

Skredkommissionens arbetsgrupp för förstärkningsåtgärder (1994). Erosionsskydd i samband med förstärkningsåtgärder för slänter. Skredkommissionen, Rapport 1:94, Linköping.

Skredkommissionens arbetsgrupp för förstärkningsåtgärder (1996). Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter. Beskrivning av förekommande metoder och praktiskt genomförande. Skredkommissionen, Rapport 1:96, Linköping.

Skredkommissionens arbetsgrupp för släntbeteende (1996). Värdering av effekter av ingrepp i slänter. Redovisningar av utförda beräkningar 1-8. Skredkommissionens arkiv. (Opublicerade).

Vägverket, SGI & De Neef Scandinavia AB (1995). Förhindra ras med jordspikning. Broschyr.

Publikationer utgivna av Skredkommissionen

RAPPORT

1:89 **Mätning av spänningar och deformationer i slänter.**
Karin Rankka, Björn Möller, Göran Sällfors

2:89 **Spänningar och deformationer i slänter - praktikfall.**
Björn Möller, Karin Rankka, Göran Sällfors, Helen Åhnberg

1:90 **Ansvars- och ersättningsfrågor vid ras och skred.**
Siv Ann Andermyr
Rapporten utarbetad på uppdrag av arbetsgruppen för kunskapsförmedling.

2:90 **Ras och skred i Sverige.**
Börje Stigler, Per Ahlberg, Curt Fredén, Sven Olofsson, Stig Sjöstedt

1:91 **Mätning av jordtryck och horisontalrörelse.**
Redovisning av tre projekt.
Hjördis Andersson, Inge Brorsson, Karin Rankka, Göran Sällfors

2:91 **Släntstabilitetsberäkningar med klassiska beräkningsmetoder.**
En jämförelse mellan olika beräkningsprogram.
Lars Johansson, Kennet Axelsson

1:94 **Erosionsskydd i samband med förstärkningsåtgärder för slänter.**
Folke Ohlsson, Anders Hallingberg, Lars Johansson, Marianne Nyberg

2:94 **Övervakningssystem för lerslänter.**
Beskrivning av förekommande instrument och metoder.
Folke Ohlsson, Anders Hallingberg, Lars Johansson, Marianne Nyberg

3:94 **Ansvars- och ersättningsfrågor vid ras och skred.**
Siv Ann Andermyr
(2:a upplagan, ersätter Rapport 1:90)

1:95 **Kostnadsansvar vid skred - fyra tänkbara situationer.**
Arbetsgruppen för kunskapsförmedling.

2:95 **Naturvärden och miljökonsekvenser i samband med stabilitetsarbeten.**
Mats Lindqvist, Ola Sjöstedt

Anvisningar för släntstabilitetsutredningar.

3:95 **Anvisningsdel.**

4:95 **Brukaranvisning.**

5:95 **Information.**

1:96 **Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter. Beskrivning av förekommande metoder och praktiskt genomförande.**
Arbetsgruppen för förstärkningsåtgärder.

2:96 **Förstärkningsåtgärder i silt- och lerslänter. Rekommendationer för dimensionering och projektering.**

3:96 **Samhällsnyttig skredkommission.**
Skredkommissionens verksamhet 1988-1996.

INFORMATION

1:90 **Säkerhet i grund och botten.**
Arbetsgruppen för kunskapsförmedling.

FAKTABLAD

April 1992 **Stabilitetsutredning, tekniskt faktablad.**
Arbetsgruppen för släntbeteende.

VIDEOFILM

Sept. 1992 **Ras och skred - säkerhet i grund och botten med tillhörande texthäfte.**
Arbetsgruppen för kunskapsförmedling.

ARBETSRAPPORT

Febr. 1990 **Åtgärdskalender - Exempel.**
Räddningsledares åtgärdskalender vid överhängande fara för skred eller ras.
Arbetsgruppen för kunskapsförmedling.

Febr. 1990 **Ras- och skredfrågor i plan- och byggprocessen.**
Arbetsgruppen för kunskapsförmedling.

Febr. 1990 **Ras- och skredfrågor i plan- och byggprocessen. Underlag för exempel på planbestämmelser som berör ras- och skredproblem.**
Arbetsgruppen för kunskapsförmedling.

1:92 **Inventering av beräkningsprogram i Sverige inom området slänters stabilitet.**
Hjördis Andersson, Per-Evert Bengtsson

1:94 **Anvisningar för släntstabilitetsutredningar.**
(Remiss)
Arbetsgruppen för släntbeteende.

2:94 **Information om Anvisningar för släntstabilitetsutredningar.**
(Remiss)
Arbetsgruppen för släntbeteende.

3:94 **Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Brukaranvisning.**
(Remiss)
Arbetsgruppen för släntbeteende.

Distribution: Statens geotekniska institut, Biblioteket
581 93 Linköping, Tel: 013-20 18 04, Fax: 013-20 19 09. E-post: info@geotek.se

c/o Statens geotekniska institut
581 93 Linköping
Tel. 013-20 18 00, Fax. 013-20 19 14