



VARIA 560:I



Släntstabilitet i jord

Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga
naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat

Deluppdrag I

Carina Hultén, Mats Olsson, Karin Rankka
Victoria Svahn, Karin Odén, Mats Engdahl

Varia	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Litteraturtjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--05/560--SE
Projektnummer SGI	12370
Dnr SGI	I-0502-0100
Foto omslag	SGI

FÖRORD

Regeringen har i regleringsbrevet för år 2005 (M2004/4162/A) gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att redovisa en handlingsplan för institutets arbete de närmaste åren med att förutse och verka förebyggande för att förhindra ökad risk för ras och skred med anledning av prognoser för ett förändrat klimat. Uppdraget är begränsat till att innefatta naturolyckor, dvs. ras, skred, erosion, översvämning och tillhörande miljökonsekvenser. Redovisningen innefattar således inte andra geotekniska konsekvenser såsom påverkan på grundläggning av byggnader och transportinfrastruktur eller VA-frågor till följd av förändrat klimat.

Institutet har valt att som underlag för denna handlingsplan genomföra tre delutredningar för att specifikt beskriva skred och ras, erosion och översvämningar respektive förorenings-spridning. Föreliggande rapport redovisar deluppdraget om jordskred och ras och har sammanställts av Carina Hultén, Mats Olsson, Karin Rankka, Victoria Svahn och Karin Odén, SGI samt Mats Engdahl, SGU. Yvonne Andersson-Sköld, SGI, har medverkat vid sammanställningen av kapitlet om klimatförändringar.

Författarna vill framföra ett stort tack för värdefulla synpunkter och kommentarer som har lämnats av Markku Rummukainen, Gunn Persson, Lars Johansson och Johan Andréasson samtliga SMHI samt av Elvin Ottosson, Åke Johansson, Bo Berggren, SGI .

Linköping i september 2005

Författarna

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord	3
Sammanfattning	6
1 Inledning	8
Bakgrund	8
Syfte	8
2 Klimatförändringar	9
2.1 Allmänt	9
2.2 Klimatförändringar i Norden	9
2.3 Påverkan av jords egenskaper med ökat vatteninnehåll	11
2.4 Samband mellan nederbörd och grundvattennivåer	15
2.5 Samband mellan nederbörd och portryck	19
3 Vad påverkar slänters stabilitet?	20
3.1 Allmänt	20
3.2 Nederbördsmängdens betydelse på släntstabilitet – Typfall	21
3.2.1 Typfall 1	21
3.2.2 Typfall 2	23
3.2.3 Typfall 3	25
3.2.4 Typfall 4	27
3.2.5 Sammanfattning av analysen från typfallen	28
4 Inverkan av klimatförändring för olika topografiska och geologiska förhållanden	30
4.1 Allmänt	30
4.2 Indalsälven (nipslänt)	31
4.2.1 Topografiska och geologiska förutsättningar	31
4.2.2 Påverkan på stabilitet	32
4.3 Göta älv (lösa lerområden)	34
4.3.1 Topografiska och geologiska förutsättningar	34
4.3.2 Påverkan på stabilitet	36
4.4 Fasta lerområden	39
4.5 Slamströmmar	39
4.5.1 Allmänt	39
4.5.2 Klimatförändringarnas inverkan på slamströmmar	41
5 Omfattning, konsekvenser och osäkerheter	43
5.1 Omfattning och konsekvenser	43
5.2 Prognostisering av portryck samt förändring av jordegenskaper	44
5.3 Geotekniska fältmetoder och portrycksmätningar	45
5.4 Krav på säkerhetsfaktorer och åtgärder	45
5.5 Samhällsplanering	46
6 Slutsatser	47
Referenser och litteratur	48

SAMMANFATTNING

Klimatförändringar studeras i globala och regionala klimatmodeller, i vilka scenarier för nordiska förhållanden redovisas av SMHIs Rossby Centre. Scenarierna visar att klimatförändringarna kommer att bli särskilt stora i områden med arktiskt klimat men även i kalltempererat klimat, till exempel i de nordiska länderna och i Baltikum.

Prognosen för nederbörden i Norden, bortsett från Sydskanandinavien under sommaren, pekar på mera nederbörd. Nederbördens och vattentillgångens årsmedelvärden bedöms öka med upp till 30 %. Ökningen kan orsakas av fler nederbördsdagar och häftigare regn. Nederbörden ökar relativt jämnt på höst, vår och vinter, men sommartid beräknas nederbörden bli intensivare, trots att den i medeltal minskar något.

Jords egenskaper är beroende av det inbördes förhållandet mellan korn, vatten, jonsammansättning och gas. Jordens hållfasthet indelas traditionellt i odränerad och dränerad skjuvhållfasthet beroende på bland annat tidsperspektivet. Den dränerade skjuvhållfastheten är beroende av den effektivspänning som styrs av vatteninnehållet i jorden. Om en jords vatteninnehåll ökar till exempel vid ökat vatten- eller portryck minskar den spänning som bärs av kornskelettet och jorden får då en lägre hållfasthet.

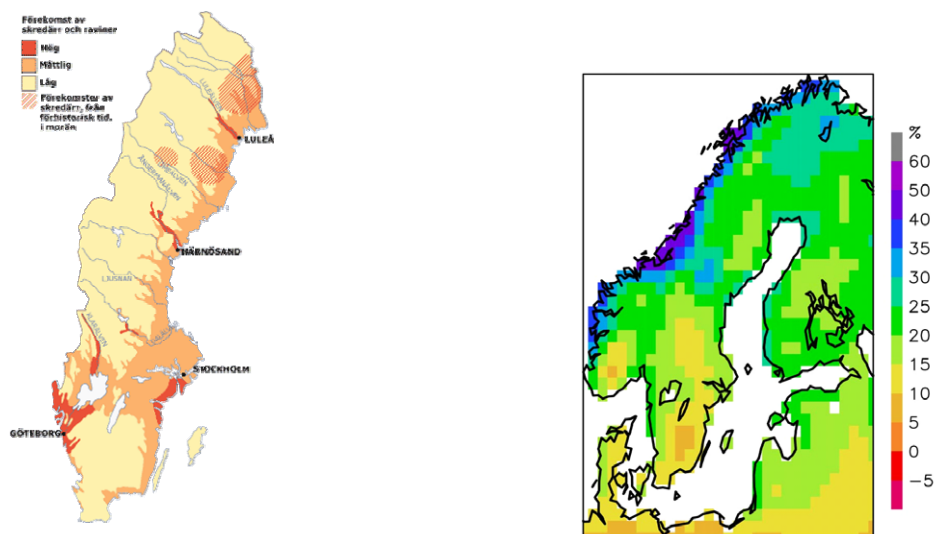
De förändringar av portryck eller grundvattennivåer som en klimatförändring innebär ger en försämring av stabiliteten jämfört med dagens situation. Speciellt tydligt är detta vid snabba kortvariga förändringar, till exempel häftiga regn, som tillsammans med ökad erosion i vattendragen kvantitativt leder till stor försämring av stabiliteten. Detta kan speciellt komma att påverka områden som ligger i anslutning till vattendrag och särskilt i erosionskänslig jord. I slänter med små djup till vattenförande skikt, som snabbare påverkar grundvattentrycket, försämras stabiliteten mer än vid stora lerdjup. I områden med kvicklera kan ett initialskred fortplanta sig bakåt och skredområdet bli mycket stort. I jordar där inverkan av ”falsk kohesion” idag bidrar till att branta slänter inte rasar innebär en klimatförändring tillsammans med erosion att stabiliteten försämras kraftigt.

Bebyggelse, industrier och infrastruktur är till stor del historiskt lokaliserade till vattendrag och kommer att påverkas av de ökade nederbörds mängderna. Många områden som idag anses stabila kommer att få lägre säkerhet mot ras och skred. Dessa områden kan komma att behöva stabilitetsförbättrande åtgärder. För att minska erosion kan erosionskyddande åtgärder behöva vidtas i långt större omfattning än idag.

De prognosmetoder avseende grundvatten och portryck som idag normalt används vid stabilitetsbedömningar är osäkra och utveckling av nya metoder krävs för att kostnadseffektivt kunna utföra rätt förstärkningsåtgärder. Anvisningar och rekommendationer för stabilitetsutredningar som utgör underlag för samhällplanering m. m. behöver utvecklas och förändras med avseende på prognostisering av portryck och vattenstånd och deras påverkan på släntstabiliteten.

För att analysera hur nederbördsökningar kommer att påverka olika typer av jordar krävs ökad kunskap om både de hydrauliska egenskaperna och jordens hållfasthetsegenskaper. Kunskapen om sambanden mellan portrycksförändringar, jordens spänningsförhållanden och hydrauliska egenskaper kommer att vara nödvändiga att utveckla för att kunna förbättra prognostiseringsmetoder och beräkningsmodeller.

De områden som kommer att påverkas är främst de som redan för dagens förhållanden är kända skred- och rasområden. De flesta av dessa områden kommer även att få en stor nederbördsförändring enligt SMHI Rossby Centre klimatscenarium, se Figur S1.



a) Frekvens av skredärr och raviner i Sverige (Sveriges geologiska undersökning, 2005)

b) Prognosticerad nederbördsförändring år 2100 jämfört med år 1961-1990 (SMHI Rosby Centre, 2005)

Figur S1. Kartor över Sverige visande a) frekvensen av skredärr och raviner (www.sgu.se, 2005) b) prognosticerad nederbördsförändring år 2100 (www.smhi.se, 2005).

Inom samhällplaneringen krävs att hänsyn måste tas till den framtida klimatförändringen. Behovet av bättre planeringsunderlag avseende skred och ras kommer att öka. Planlagda områden som precis klarar dagens rekommenderade säkerhet för skred och ras kan komma att behöva omarbetas eftersom även mindre procentuella försämringar av stabiliteten påverkar säkerhetsmarginalen för ett skred. Nationell kartering av stabilitetsförhållanden som underlag för planeringsarbetet saknas idag men skulle behöva utvecklas.

Idag finns inte tillräcklig kunskap kring hur nederbörd påverkar jordslänter, både naturliga och de som kommit till i samband med bebyggelse. Detta gäller även bergslänter, som dock inte studerats inom detta deluppdrag. Forskningen kommer att kräva ett nära samarbete mellan geologer, geotekniker, hydrologer och geohydrologer för att vi ska kunna lära oss mer om hur nederbördsökningar kommer att påverka olika typer av jordar.

1 INLEDNING

Bakgrund

Regeringen har i regleringsbrev M2004/4162/A gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att, med anledning bland annat av att nederbördsmängderna kan komma att öka, redovisa en handlingsplan för institutets arbete de närmaste åren med att förutse och verka förebyggande för att förhindra riskerna för ras och skred. SGI har valt att i uppdraget innefatta naturolyckor, det vill säga ras, skred, erosion, översvämning och tillhörande miljökonsekvenser. Andra konsekvenser som påverkan på grundläggningar, nedsatt bärförmåga eller VA-frågor till följd av förändrat klimat behandlas inte.

I ovanstående uppdrag ingår att specifikt beskriva 1) skred och ras, 2) erosion och översvämningar, samt 3) förorenings-spridning. Detta görs i form av tre deluppdrag. Föreliggande rapport redovisar deluppdrag 1. Rapporten skall utgöra en del av underlaget som skall ligga till grund för det ovan beskrivna regeringsuppdraget.

Syfte

Syftet med föreliggande rapport är att förklara hur jordslänters stabilitet påverkas och ändras vid förändrat klimat med främst ökade nederbördsmängder. Exempel på möjliga scenarier och dess orsak och verkan har genomförts. Bergslänter kommer också att påverkas av en klimatförändring men har inte studerats inom detta deluppdrag.

2 KLIMATFÖRÄNDRINGAR

2.1 Allmänt

Mycket tyder på att det globala klimatet håller på att förändras och det mest tydliga tecknet på förändring är den uppmätta höjningen av jordens medeltemperatur. Detta konstateras exempelvis av IPCC (2001), EEA (2004) och av WHO (2002). De avsmältningar som uppmäts av exempelvis glaciärer och av havsis på Arktis, stödjer bilden av en pågående global uppvärmning. Den främsta orsaken till uppvärmningen av jorden under de senaste 30–50 åren verkar ha varit utsläppen av växthusgaser. Även det framtida klimatet beror bland annat på omfattningen och typen av utsläpp. Eftersom det är svårt att på kort tid reducera utsläppen tyder de klimatscenarier som gjorts på att det fortsätter bli varmare även under de närmaste 50 till 100 åren (t.ex. IPCC, 2001, SMHI, 2005).

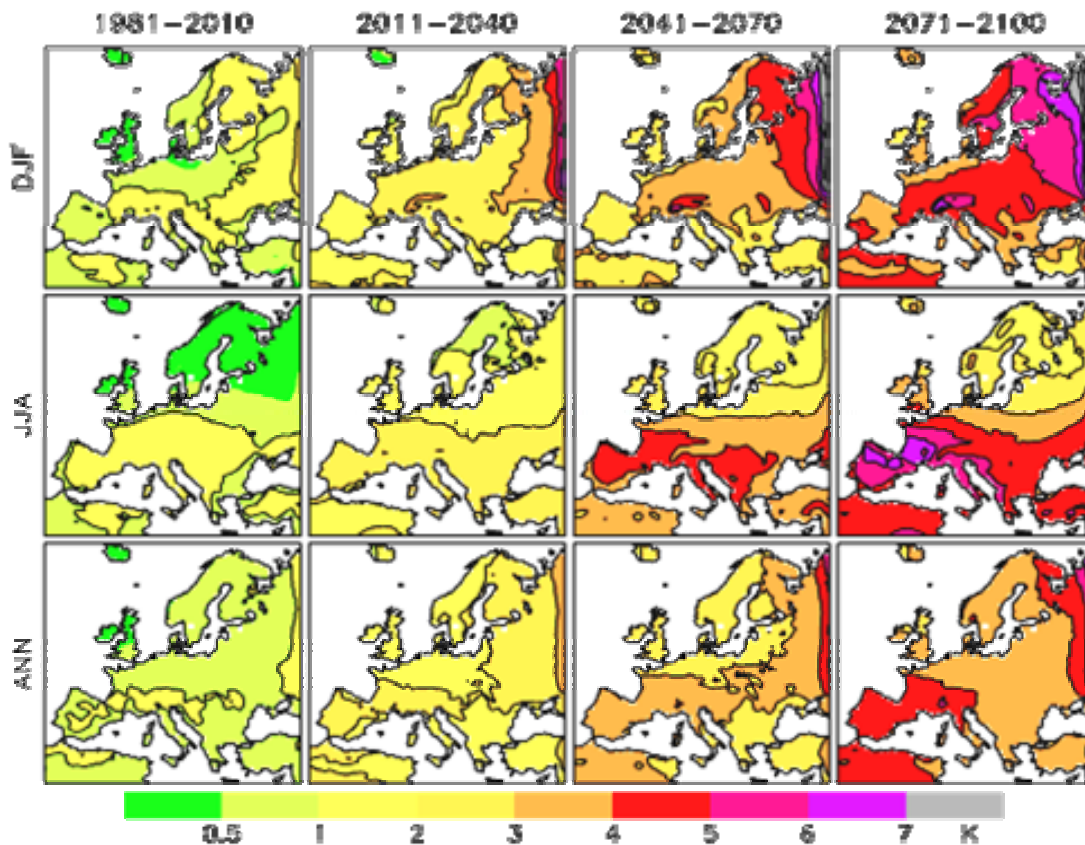
En förhöjd temperatur kan leda till en ökad avdunstning samtidigt som en varmare atmosfär kan innehålla mer vatten. Detta påverkar vattnets kretslopp och möjliggör exempelvis fler och häftigare regn. Det kan också leda till starkare, svåra stormar och förändringar i andra typer av extrema vädersituationer.

Klimatförändringar studeras i olika globala och regionala klimatmodeller. Scenarier för nordiska förhållanden redovisas av SMHI:s Rossby Centre (se SMHI, 2005a, och SMHI, 2005b). Scenarier visar att klimatförändringen kommer att bli särskilt stor i områden med arktiskt klimat men även områden med kalltempererat klimat kommer att få stora förändringar. Framförallt påverkas dessa områden, vilka innefattar de nordiska länderna och Baltikum, vintertid. Längre söderut i Europa beräknas speciellt somrarna bli varmare och torrare.

2.2 Klimatförändringar i Norden

Mellan åren 1996 och 2003 genomfördes ett svenskt regionalt klimatmodelleringsprogram, SWECLIM (Swedish Regional Climate Modelling program). Inom SWECLIM utfördes regionala klimatscenarier utifrån ett par utsläppsscenarioer och olika globala modeller. I utvärderingen har simuleringarna jämförts mot mätdata över Sverige. Sedan SWECLIM avslutades, har detta arbete fortsatt vid SMHI:s Rossby Centre. I den svenska klimatmodelleringen har man utgått från dels den tyska globala klimatmodellen ECHAM4/OPYC3 från Deutsches Klimarechenzentrum GmbH (DKRZ) och Max-Planck institutet för meteorologi i Hamburg, dels från globala klimatmodeller vid Hadley Centre i Storbritannien (Hadley Centre, 2005).

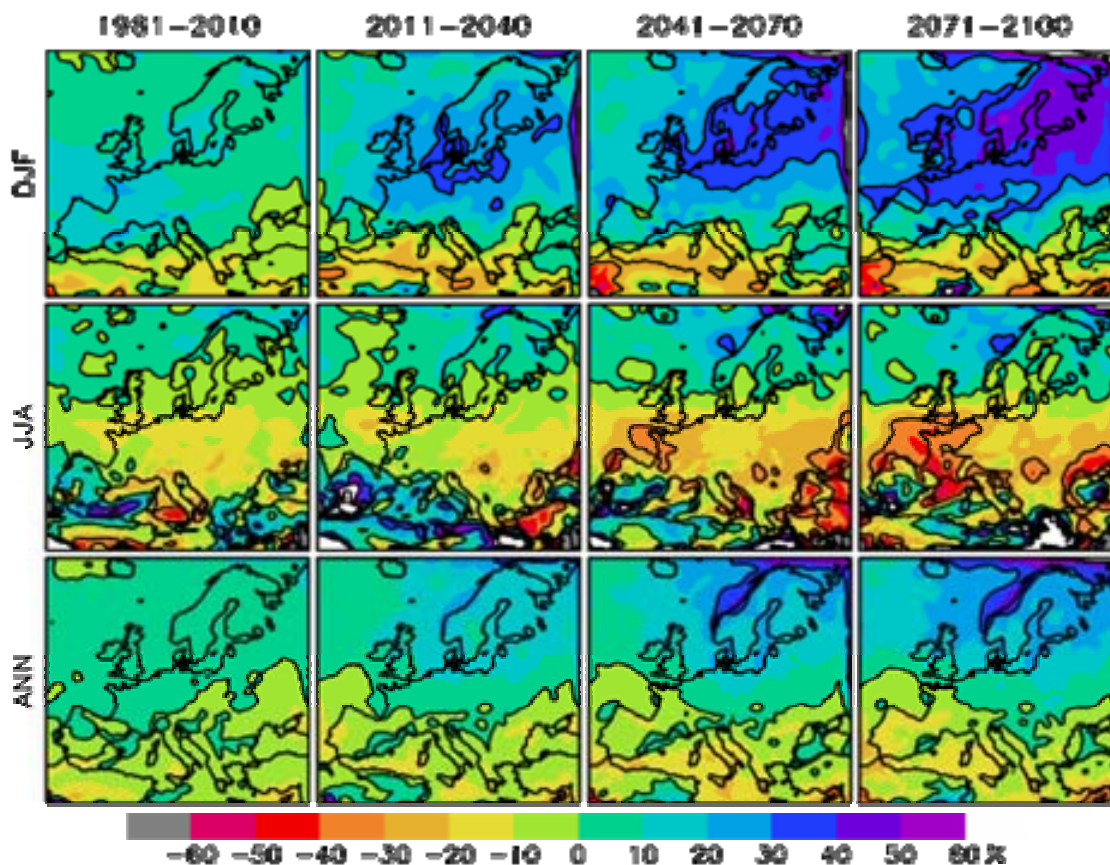
Medan de regionala klimatscenarierna som studerades inom SWECLIM avsåg perioden 2071–2100, har man senare vid Rossby Centre tagit fram beräkningar som sträcker sig från dagens klimat (det vill säga perioden 1961–90) fram till 2100 (se SMHI, 2005a). Resultaten visar att årsmedeltemperaturen i Sverige kan komma att öka med mellan 2,5 och 4,5 grader. Jämfört med temperaturökningen för helåret påverkas vintertemperaturen något mer och sommartemperaturen något mindre. Resultatet kan bli att årstiderna förskjuts och att vi får en kortare vintersäsong. De beräknade förändringarna framträder som signifikanta redan vid början av 2000-talet, se *Figur 1*.



Figur 1. Beräknade regionala temperaturändringar ($^{\circ}\text{C}$) på vintern (DJF, överst), på sommaren (JJA, mellersta raden) och för helåret (ANN, längst ner). Ändringarna visas jämfört med perioden 1961–1990. Dessa regionala beräkningar är gjorda vid Rosby Centre på SMHI med den regionala klimatmodellen RCAO och baseras på en beräkningar med den tyska ECHAM4/OPY3 globala klimatmodellen och ett utsläppsscenario enligt s.k. SRES B2. (SMHI, 2005a).

Beräkningar av nederbördsscenarierna i Norden, bortsett från södra Skandinavien under sommaren, indikerar att en större mängd nederbörd kan förväntas (se **Figur 2**). Nederbördens och vattentillgångens årsmedelvärden för hela landet bedöms öka med upp till 30 %. Ökningen orsakas både av fler nederbördsdagar och av häftigare regn. Nederbördsmängderna ökar under höst, vår och vinter. Sommartid ändras nederbördsmängderna mindre i landets norra delar medan de minskar i Sydsverige där nederbörden ändå blir intensivare. För vissa delar av södra Sverige kan den ökade medeltemperaturen dock ge en ökad avdunstning från mark och vatten, vilket kan medföra ett vattenunderskott.

Havsnivån kommer att stiga på grund av klimatförändringarna. Detta eftersom en ökad medeltemperatur leder till en avsmältning av glaciärer samt en termisk expansion av världshaven. Redan idag stiger nivån i världshaven med cirka 1–2 mm/år enligt Church et al (2001). De scenarier som redovisas av SMHI för åren fram till 2100 visar att höjningen av havsvattenytans regionala nivå påverkas både av den globala höjningen och lokala effekter. I södra Sverige kan havsytans nivå stiga med över 50 cm. Ett förändrat klimat kommer dessutom även att påverka vindar och vågor längs våra kuster.



Figur 2. Beräknad regional nederbördsförändring (%) jämfört med perioden 1961–1990. Övriga förutsättningar enligt Figur 1. (SMHI, 2005a).

2.3 Påverkan av jords egenskaper med ökat vatteninnehåll

Jord består vanligen av mineral, vatten och gas. Kornen, eller partiklarna, bildar tillsammans ett kornskelett som bär de laster som påförs jorden. Mellan kornen finns hålrum, porer, som är fyllda med antingen vatten, gas eller en blandning av bådadera. Vattnet i porerna innehåller även en del lösta salter eller joner. Jordens egenskaper är starkt beroende av det inbördes förhållandet mellan korn, vatten, jonsammansättning och gas.

Förhållandet mellan jordens totalspänning, σ_o och den spänning som bärs av kornskelettet, effektivspänningen σ'_o , samt portrycket, u beskrivs för en vattenmättad jord som

$$\sigma_o = \sigma'_o + u \quad (\text{ekv. 1})$$

Jords hållfasthet indelas traditionellt i odränerad och dränerad hållfasthet. När skjuvdeformationen till brott sker så hastigt att vatten inte hinner avgå talar man om odränerat brott och odränerad skjuvhållfasthet. Den odränerade skjuvhållfastheten i finkornig jord, kohesionsjord, antas kunna uttryckas som en konstant oberoende av rådande effektivspänningar. Denna är normalt dimensionerande för korttidsstabiliteten hos slänter i kohesionsjord. Om skjuvdeformationen äger rum långsamt så att portrycksförändringar hinner utjämnas talar man om dränerat brott och dränerad skjuvhållfasthet.

Den dränerade skjuvhållfastheten blir dimensionerande i friktionsjord och normalt för långtidsstabiliteten hos slänter i kohesionsjord.

Den dränerade skjuvhållfastheten, τ_{fd} är beroende av den ovan beskrivna effektivspänningen σ'_o samt jordens inre friktionvinkel ϕ' och ett kohesionsintercept c' , och uttrycks som

$$\tau_{fd} = c' + \sigma'_o \cdot \tan \phi' \quad (\text{ekv. 2})$$

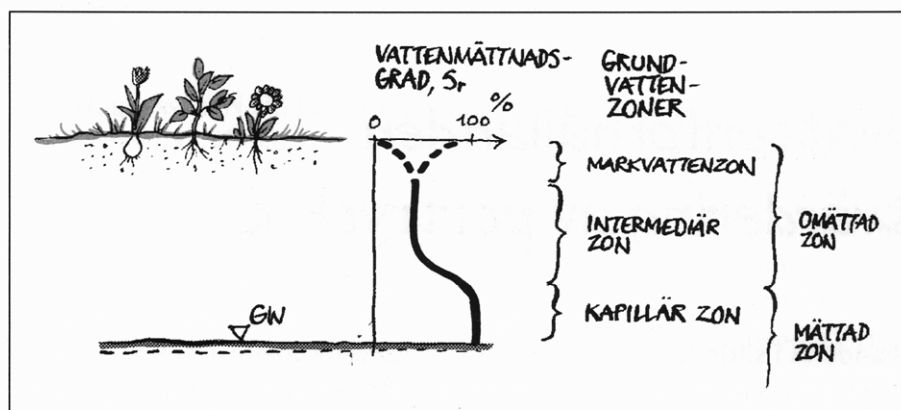
De ovan beskrivna förhållandena, ekv. 1 och ekv. 2, innebär att om en jords vatteninnehåll ökar, till exempel vid ett ökat vatten- eller portryck, minskar den spänning som bärs av kornskelettet genom ett lägre kontaktryck mellan kornen. Jorden får då en lägre dränerad hållfasthet vilket kan leda till att säkerheten på stabiliteten kan minska (Sällfors et al., 1995).

Salvattenavsatta leror eller leror som utsatts för dispergerande joner, till exempel humussyror, kan med ökad grundvattenströmning och grundvattentryck med tiden utsättas för en större urlakning av joner. Bindningskrafterna mellan lerpartiklarna kan genom omrörning eller vibrationer försvinna och lerskelettet, som är uppbyggt med hålrum, faller då ihop varvid skjuvhållfastheten i leran kan sjunka till nära noll. Dessa leror kallas för kvickleror. Kwicklera bildas genom långsamma geologiska processer. De flesta kvickleror har bildats i avlagringar som avsattes i saltvatten vid den senaste istidens avsmältning. Då landet höjde sig kom lerorna att hamna ovan havsytan. Leravlagringarna har därefter utsatts för urlakning, varvid jonkoncentrationen har förändrats. Dessa processer är långsamma och innebär att förekomsten av kvicklera är mer vanlig i leravlagringar med liten mäktighet. I mäktigare avlagringar återfinns eventuellt kvicklera närmast ett permeabelt skikt eller nära markytan (Rankka et al 2004). Inträffar ett skred inom ett område med kvicklera kan skredområdet bli mycket stort eftersom ett initialscred kan fortplanta sig både framåt och bakåt efterhand som leran förlorar sin hållfasthet.

Man brukar skilja på fritt vatten och bundet vatten i jord. Med grundvatten avses fritt vatten som kan strömma i jorden. Ju tätare jorden är desto långsammare går strömningen. Det bundna vattnet kan vara kemiskt eller kapillärt bundet. Vid ökande nederbörd kan grundvattenbildningen öka och beroende på jordars olika genomsläpplighet kommer denna att ta olika lång tid i olika jordar.

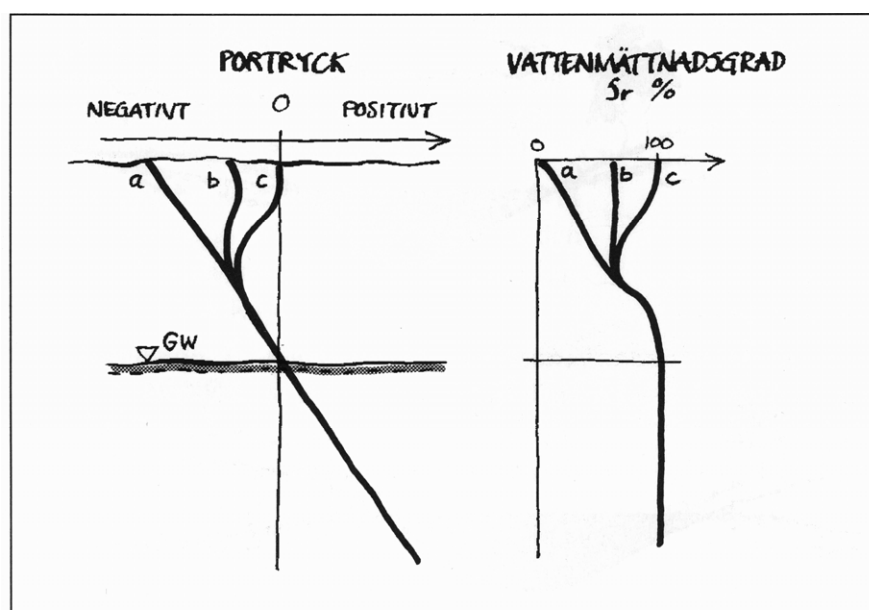
Under täta jordar finns i Sverige ofta jordlager med större genomsläpplighet, så kallade slutna grundvattenakvifärer, och i dessa lager kan artesiskt vattentryck uppstå eller öka jämfört med dagens situation. Artesiskt vattentryck innebär att tryckhöjden hos vattnet ligger högre än markytan. I jordlager med begränsad mäktighet av täta jordar ovan genomsläppliga jordar kan detta bidra till att slänter blir instabila då effektivspänningen i jorden minskar av det ökande vattentrycket och man därmed får en lägre dränerad skjuvhållfasthet. I genomsläppliga jordar, utan tät jord ovanför, avgränsas normalt grundvattnet uppåt av en fri grundvattenyta, så kallad öppen grundvattenakvifär. Även en med tiden ökande grundvattennivå eller ökat portryck i hela jordlagret bidrar till att spänningarna i jorden förändras och slänter kan bli instabila.

Grundvattensituationen ovanför grundvattenytan har sällan ett stationärt tillstånd utan påverkas av yttre faktorer som nederbörd, avdunstning, snösmältning och dränering. Vattenmängden i markvattenzonen, se **Figur 3**, beror främst på infiltration från nederbörd och avdunstning och kan periodvis motsvara vattenmättade förhållanden. I den intermediära zonen transporteras infiltrationsvatten, som passerat markvattenzonen ner till grundvattnet till följd av gravitationskraften. Den zon som finns direkt ovanför grundvattenytan påverkas av kapillära krafter som suger upp vatten från grundvattenytan och fyller jordens porer och kallas därför för den kapillära zonen, se **Figur 3** (Knutsson et al., 1998).



Figur 3. Zonindelning i en jordprofil med avseende på grundvattenförekomst (Knutsson et al., 1998).

I den omättade zonen är jordlagren inte vattenmättade, vilket innebär att jordens porer inte innehåller bara vatten utan även gas. Ytspänningen kring dessa gasbubblor ger upphov till en sammandragande kraft mellan jordpartiklarna som ökar friktionskraften mellan dem, vilket bidrar positivt till jordens hållfasthet. Denna effekt brukar kallas "falsk kohesion" eller "negativa portryck" och är vanligast förekommande i silt- och sandjordar. Portrycksfördelningen är i regel positiv under grundvattentytan och negativ eller noll över grundvattentytan, se **Figur 4**. Vid dimensionering och utförande av geotekniska konstruktioner i siltjord samt tolkning av försöksresultat är det väsentligt att ta hänsyn till de negativa portrycken.



Figur 4. Schematiska portrycksprofiler för silt (a) under torrperiod. (b) normalt tillstånd. (c) under period med kraftig nederbörd (Knutsson et al., 1998).

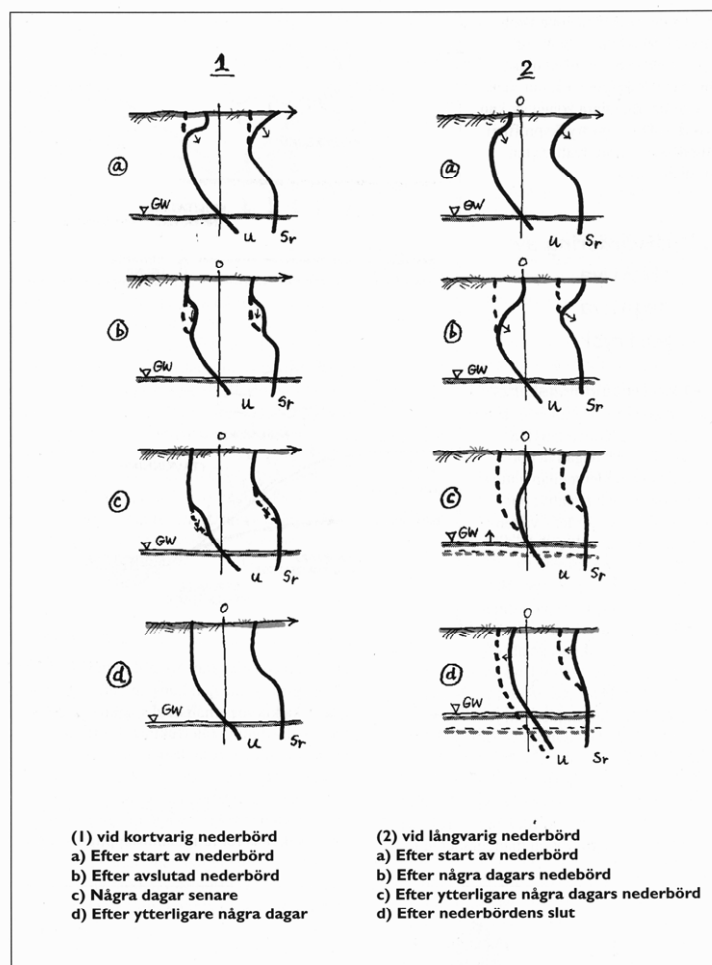
För siltjordar som utsätts för långa torrperioder kan vattnet i markvattenzonen avdunsta och portrycket minska. På motsvarande sätt ökar portrycket i markvattenzonen vid långa eller kraftiga regnperioder. I extrema fall kan markvattenzonen bli vattenmättad vilket medför att svagt positiva värden för portrycken uppstår istället för negativa. Om grundvattennivån höjs vid ökad nederbörd försvinner därmed den "falska kohesionen" och jordens hållfasthet minskar. En slänt i sådan jord kan därför bli instabil när nederbörden ökar. Den "falska kohesionen" kan även

försvinna efter en torrperiod eftersom ytspänningskrafterna försvinner när de omättade jordlagren helt torkat ut.

I områden med siltjordar, där grundvattenytan ligger endast några meter under markytan, sträcker sig den kapillära zonen i jorden ända upp till underkant torrskorpa (övre jordlager som påverkats av uttorkning, tjälning och vittring). I dessa fall är nästan hela jordprofilen vattenmättad och nederbörd kan endast påverka grundvattenförhållandet i torrskorpan. Men det behövs bara måttliga mängder infiltrerat vatten för att grundvattenytan ska stiga till underkant torrskorpa eller högre, vilket drastiskt påverkar markytans bärlighet.

Om grundvattennivån ligger djupt kan en intermediär zon uppstå, se **Figur 3**. Infiltrationsvattnet från nederbörd kommer först att påverka markvattenzonen tills denna är vattenmättad. Detta medför att om nederbörden pågår under kort tid blir inte hela markvattenzonen vattenmättad och infiltrationen kommer med tiden att röra sig sakta neråt och förorsaka en ”bula” i profilen, se **Figur 5** fall 1. Grundvattenytans läge kommer inte att påverkas i någon högre grad av detta.

Om nederbörden istället pågår under en längre tid kommer markvattenzonen att vattenmättas och om nederbörden ytterligare fortsätter kommer den intermediära zonen att infiltreras och börja vattenmättas, se **Figur 5** fall 2. Detta kan medföra, beroende på nederbördens mäktighet och varaktighet, att hela den intermediära zonen portrycksprofil kan påverkas och att grundvattenytan i efterhand kan stiga.

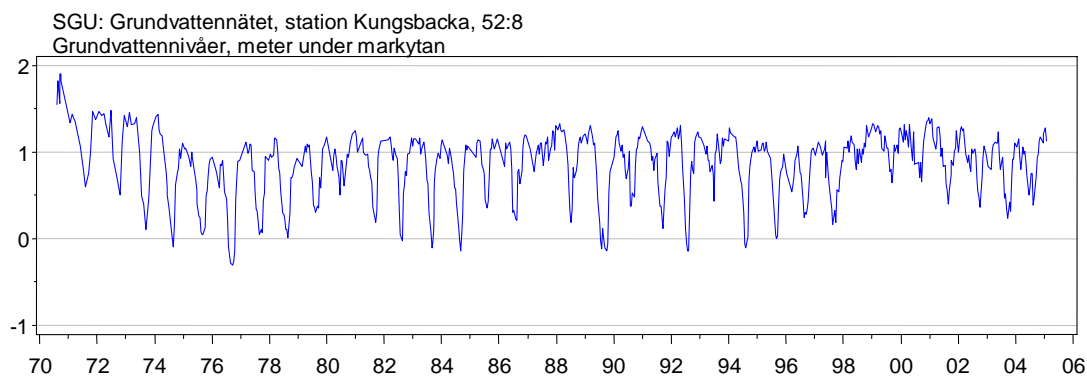


Figur 5. Successiv förändring av portrycks- och vattenmättadssituationen vid infiltration av regnvatten i silt (Knutsson et al., 1998).

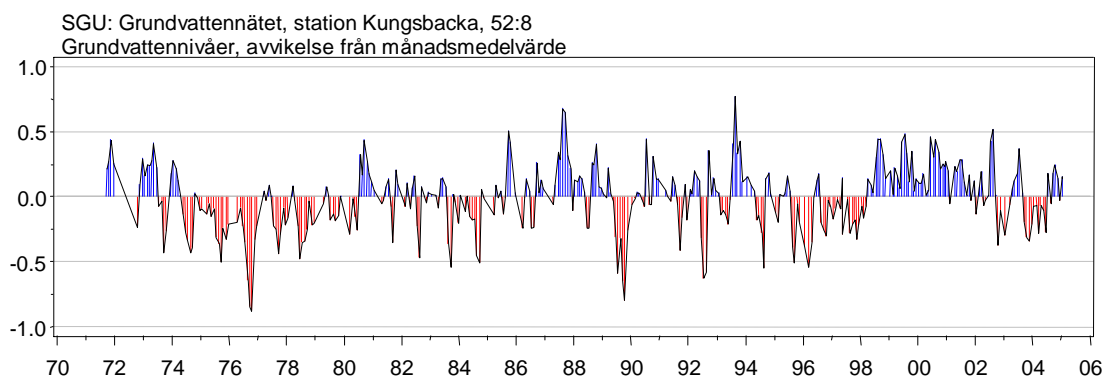
2.4 Samband mellan nederbörd och grundvattennivåer

En jämförelse har utförts av Sveriges Geologiska Undersökning, SGU, (Mats Engdahl et al, 2005) för att studera hur nederbörden påverkar grundvattennivån och hur snabb effekten blir för olika typer av grundvattenakvifärer.

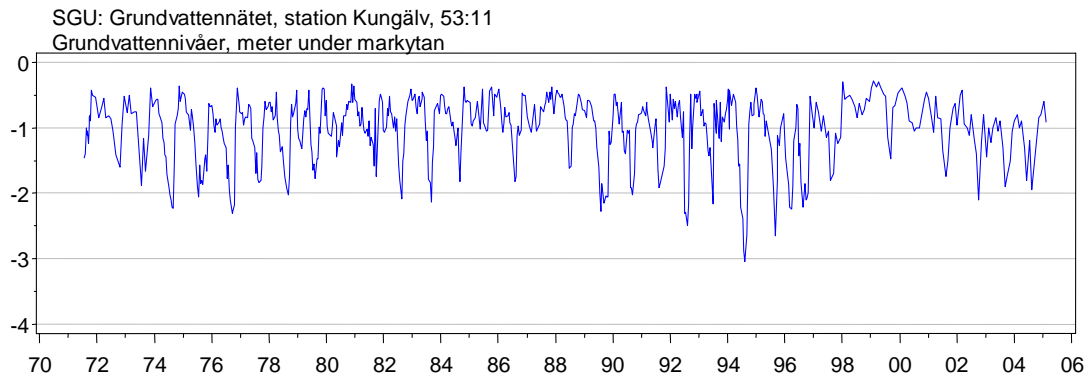
Tre stationer i SGU:s grundvattennät har valts ut för att jämföras med nederbördsdata. Stationerna är Kungsbacka 52:8 (sluten akvifär i morän), Kungälv 53:11 (sluten akvifär i lera) och Lerum 54:10 (öppen akvifär i morän). I de slutna akvifärerna mäts grundvattennivån i den underliggande friktionsjorden. Mätningar av grundvattennivåer finns från 1971 och framåt (**Figur 6 – Figur 11**). Grundvattennivåerna har genom åren varierat och det finns inga tydliga långsiktiga trender i dessa mätningar. Under perioden 1998–2002 finns det däremot ett visst överskott av grundvatten i de tre magasinerna, med högre nivåer som följd (**Figur 7, Figur 9, Figur 11**).



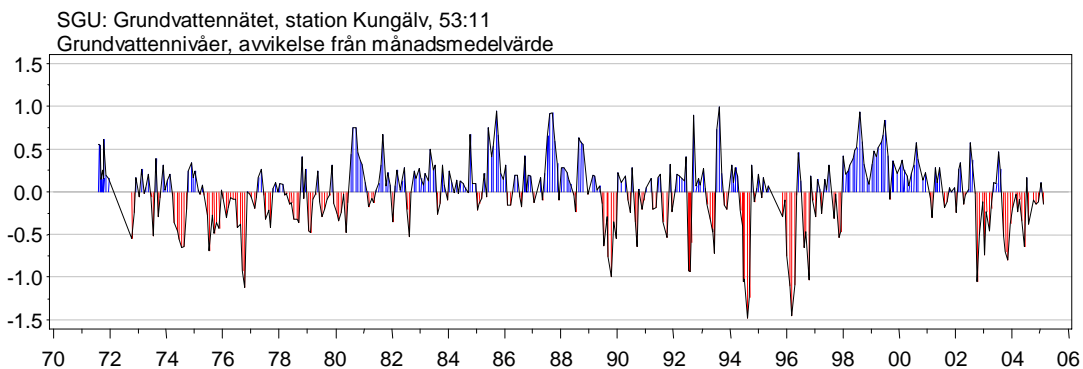
Figur 6. Uppmätt grundvattennivå mellan år 1971–2004, station Kungsbacka 52.8, sluten akvifär i morän (SGU:s grundvattennät). Positiva värden avser grundvattennivåer över markytan (artesisikt vattentryck)



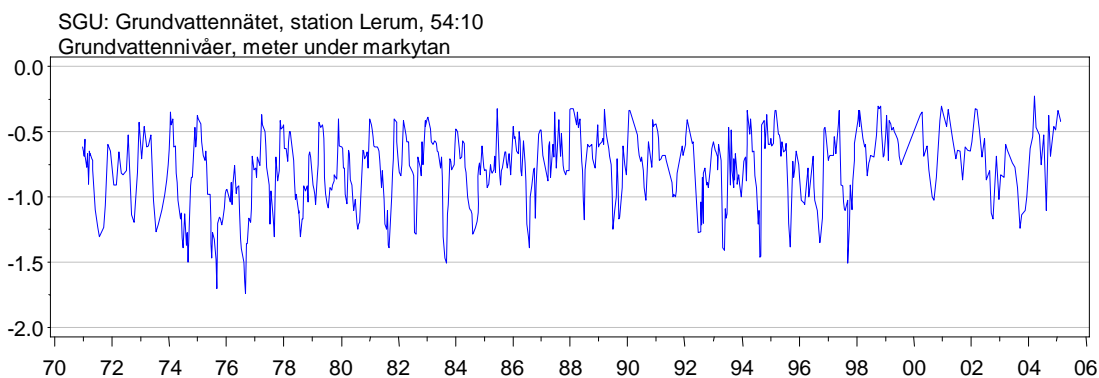
Figur 7. Avvikelse från månadsmedelvärde, station Kungsbacka 52.8, sluten akvifär i morän (SGU:s grundvattennät)



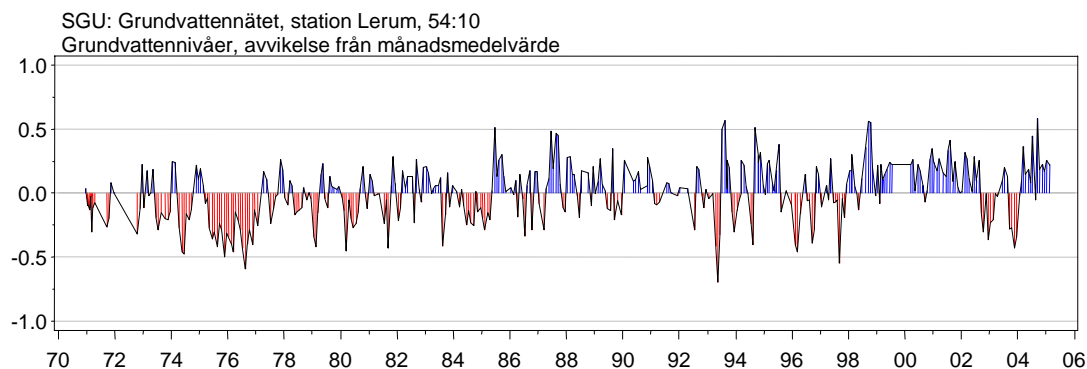
Figur 8. Uppmätt grundvattennivå mellan år 1971–2004, station Kungälv 53:11, sluten akvifär i lera (SGU:s grundvattennät).



Figur 9. Avvikelse från månadsmedelvärde, station Kungälv 53:11, sluten akvifär i lera (SGU:s grundvattennät).

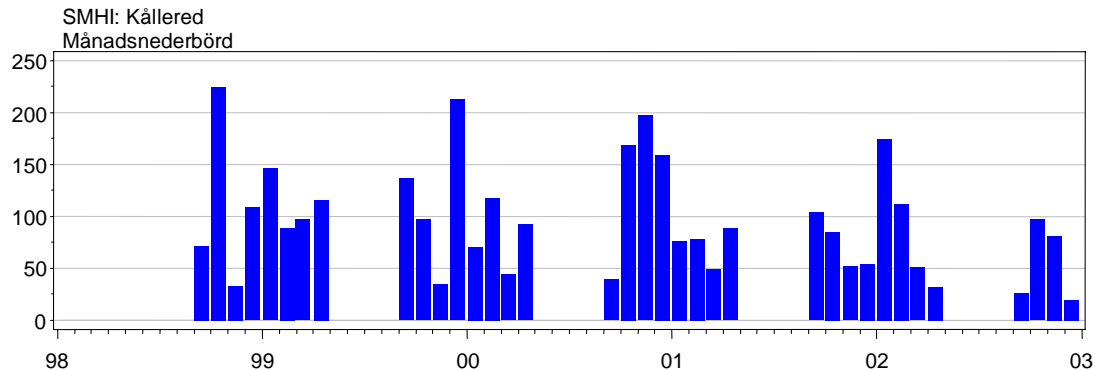


Figur 10. Uppmätt grundvattennivå mellan år 1971–2004, station Lerum 54:10, öppen akvifär i morän (SGU:s grundvattennät).

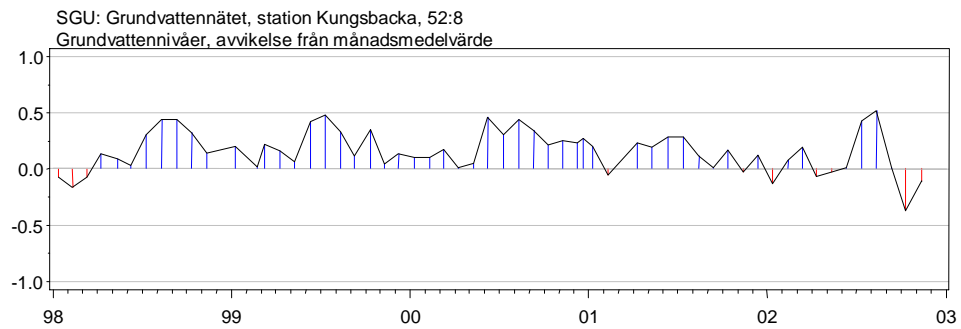


Figur 11. Avvikelse från månadsmedelvärde, station Lerum 54:10, öppen akvifär i morän (SGU:s grundvattennät).

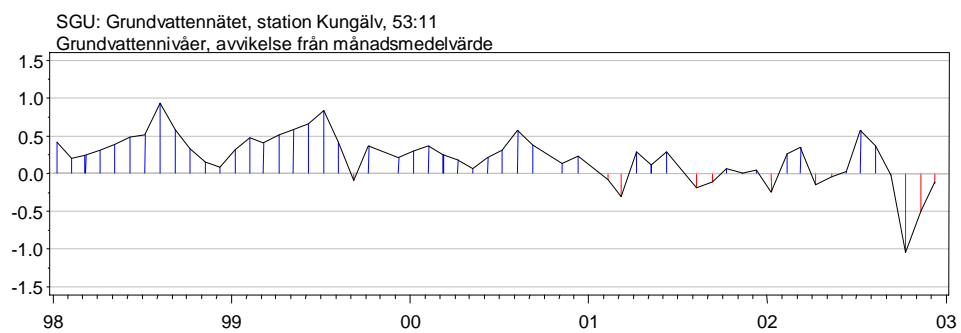
Nederbördsdata för september – april (höst, vinter och vår) för åren 1998–2002 har visat att nederbörden under perioden varit ca 40 % över det normala. Nederbördsdata från SMHI:s station i Källered, se **Figur 12**, har för samma period använts för att jämföras med överskottet i grundvattenmagasinen, eftersom det är framförallt under höst och vår som det sker grundvattenbildning i södra Sverige. Detta överskott i nederbörd har gett 0 – 0,9 m högre grundvattennivå, jämfört med månadsmedelvärden, i de tre olika grundvattenmagasinen under samma perioder, se **Figur 13**. Månadsmedelvärdena är framräknade för perioden mellan år 1971 till 2004. Hösten 2002 var det ett underskott i nederbörd som direkt avspeglar sig på grundvattennivåer under det normala i området, se **Figur 13**.



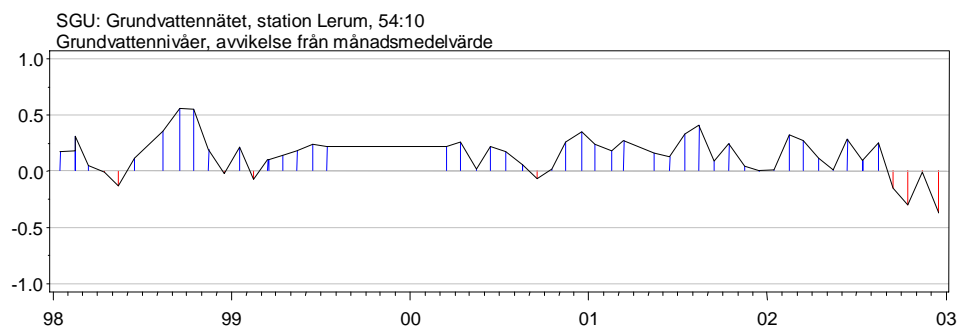
Figur 12. Nederbördsdata 1998-2002 från mätstation Källered. (SMHI).



a) Kungsbacka 52:8, sluten akvifär i morän.



b) Kungälv 53:11, sluten akvifär i lera.



c) Lerum 54:10, öppen akvifär i morän.

Figur 13. Grundvattennivåns avvikelse 1998–2002 från månadsmedelvärde (SGU).

2.5 Samband mellan nederbörd och portryck

Eftersom nederbörden har en direkt påverkan på grundvattennivåer blir även en följd att portrycken i jordprofilen långsiktigt kan påverkas av denna. En svårighet är dock att förutsäga grundvattentryckets genomslagskraft på portrycket i olika geologiska miljöer samt tidsaspekten av denna. Att ökad nederbörd relativt snabbt påverkar material med hög permeabilitet (genomsläpplighet), exempelvis sand, är ett känt faktum. Stor osäkerhet råder dock om hur portryck påverkas och hur lång tid det tar när ett material med hög permeabilitet överlagras av ett mäktigt lager lera, som har låg permeabilitet, samt hur långvariga och kraftiga regn det krävs för att portrycket ska byggas upp till kritiska nivåer.

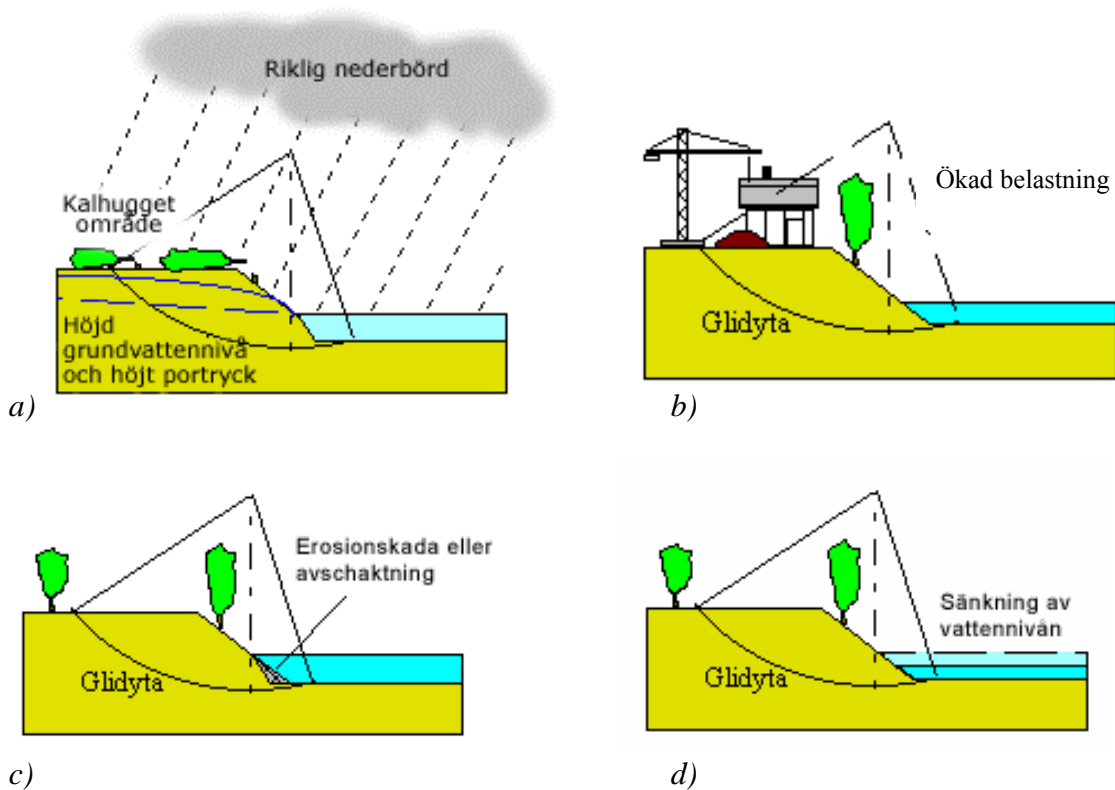
För att analysera hur nederbördsökningar kommer att påverka slänter krävs kunskap om både de hydrauliska egenskaperna och jordens hållfasthet. Processen är komplex eftersom portrycksförändringar påverkar spänningsförhållandena, som i sin tur påverkar de hydrauliska egenskaperna såsom porositet och permeabilitet. Därmed är flödesegenskaperna starkt kopplade till spännings- och deformationsegenskaperna hos jord.

Permeabilitet är en av de egenskaper som har stor betydelse för hur markprofilen reagerar på infiltration från exempelvis nederbörd. Då jorden har en hög permeabilitet och regnet pågår under en lång tid kommer ytavrinningen att vara låg och infiltrationen därmed hög. En stor vattenmängd ska därvid transporteras ner i markprofilen (se kapitel 2.3). Har jorden en lägre permeabilitet, och regnet är kortvarigt, är ytavrinningen större och portrycksökningarna därmed mindre. Regnens karaktär har således stor betydelse för hur marken reagerar och tar upp vatten. Internationell forskning har numeriskt visat på hur olika nederbördsscenarier påverkar omättade markprofiler med olika permeabiliteter. Eftersom studierna är relativt nya och inte anpassade för svenska förhållanden behövs forskning utifrån våra förutsättningar. Studierna visar dock ändå hur olika regnscenarier kan påverka stabiliteten i slänter. Ett exempel är att ju mer långvarig nederbörden är desto större sannolikhet för skred. Samma nederbördsmängd på kort tid innebär inte nödvändigtvis att stabiliteten försämras nämnvärt. Däremot om jorden har en låg permeabilitet kan portryckshöjningar genereras lång tid efter att nederbörden avtagit (Tsaparas et al, 2002).

3 VAD PÅVERKAR SLÄNTERS STABILITET?

3.1 Allmänt

Stabilitetsförhållandena i en slänt styrs av släntens höjd, lutning och jordlagrens hållfasthets-egenskaper och tyngd, men även grundvattennivå och portryck (**Figur 14a**) samt yttre faktorer påverkar. Yttre faktorer är bland andra belastningar i anslutning till slänten (**Figur 14b**), erosion i släntfot (**Figur 14c**) samt vattennivån i ett eventuellt vattendrag nedanför slänten (**Figur 14d**). Vattennivån i vattendraget fungerar som en stabiliserande motvikt i slänten samtidigt som en ökad vattenströmning ökar erosionen i vattendraget, som i sin tur leder till minskad motvikt.



Figur 14. Exempel på orsaksfaktorer till försämrad stabilitet som höjda grundvattennivåer/portryck (a), yttre belastning av t. ex. byggnad, upplag etc. (b), erosion (c) sänkning av vattennivå (d).

Säkerhetsfaktorn, F , som ofta används för att beskriva stabilitetsförhållanden i slänter, definieras som förhållandet mellan skjuvhållfasthetens medelvärde utefter en tänkt glidyta, τ_f , och motsvarande mobiliserade skjuvspänning, τ_{mob} :

$$F = \tau_f / \tau_{mob} \quad (\text{ekv. 3})$$

Ju större F är desto större säkerhet mot brott. När den framräknade säkerhetsfaktorn är 1 eller lägre betraktas slänten som instabil och ett skred eller ras är troligt.

3.2 Nederbörds mängdens betydelse på släntstabilitet – Typfall

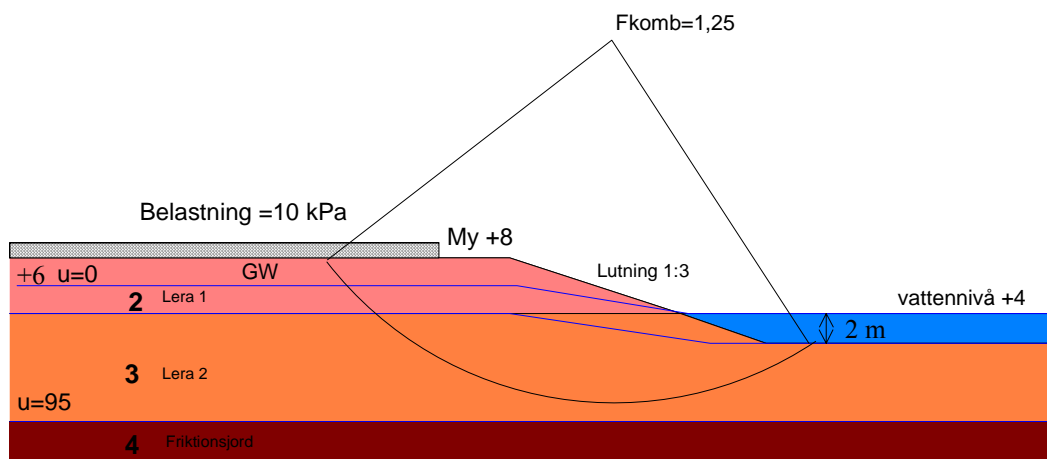
I det följande har speciellt effekten av de faktorer som påverkas av klimatförändringar studerats det vill säga höjda och sänkta vattennivåer i vattendrag, höjd grundvattenyta och ökade portryck samt ökad erosion. Fyra olika exempel med skilda geotekniska förutsättningar redovisas nedan. För beräkningarna har så kallad kombinerad stabilitetsanalys utförts. I en kombinerad analys väljs, för varje del av glidytan, det lägsta alternativet av dränerad och odränerad hållfasthet, se kapitel 2.3. Den beräknade säkerhetsfaktorn anges med beteckningen F_{komb} .

I kapitel 2.4 ovan visades att för en 40 % höjning av nederbörden hade grundvattennivåhöjningar mellan 0 – 0,9 m uppmätts. I nedanstående typfall har därför valts att ansätta en höjning av grundvattennivån med 1 m. Regionalt varierar dock grundvattennivåer och portryck och är beroende av flera faktorer såsom jordart, topografi, till- och ytvavrinningsområden etc.

3.2.1 Typfall 1

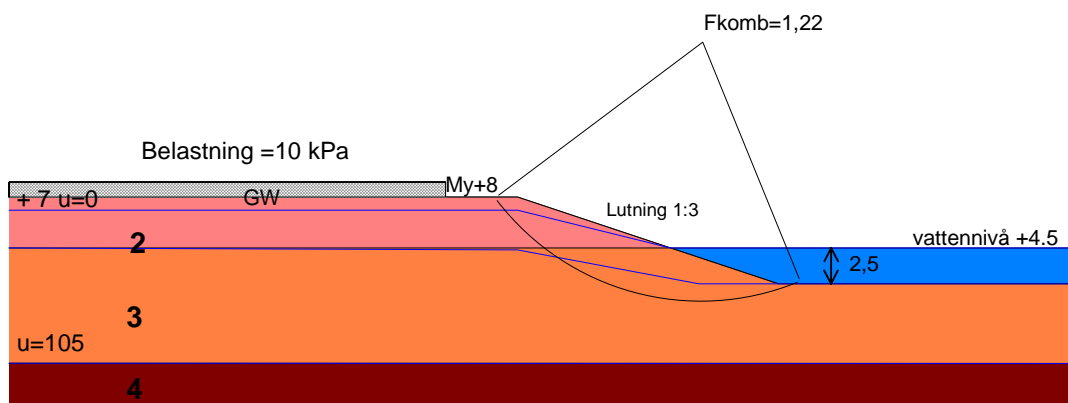
Det första typfallet (*Figur 15*) utgörs av en lerslänt mot ett vattendrag. Jorden består av lös lera med relativt stor mäktighet som underlagras av friktionsjord. Denna typ av slänt är vanligt förekommande i västra och mellersta Sverige bland annat i Göta älvs dalgång samt i Bohuslän.

Säkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott är i detta fallet 1,25 för rådande förutsättningar avseende geometri, portryck, tunghet, skjuvhållfasthet, markbelastning och ytvattennivå.



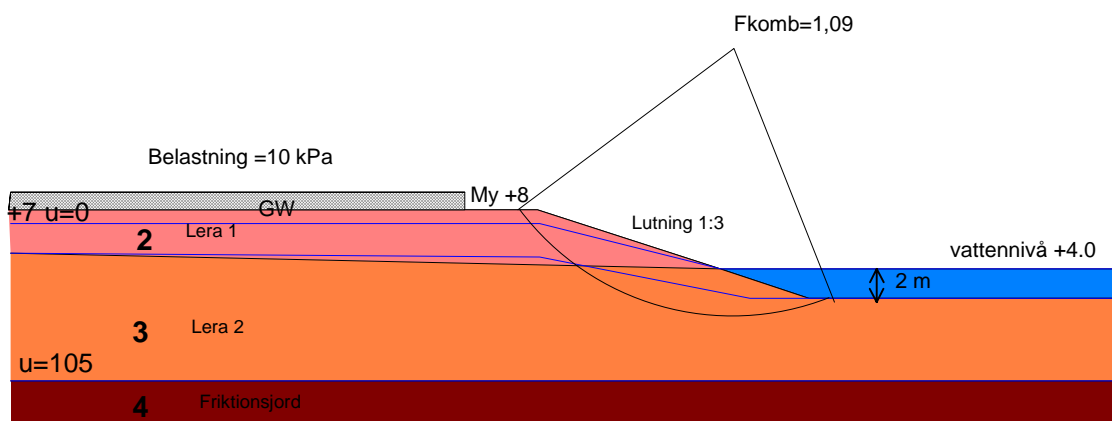
Figur 15. Lerslänt, typfall 1, visande nuvarande förhållanden med antagen hydrostatisk portrycksfördelning.

Vid en klimatförändring med ökad årsnederbörd eller ökad frekvens av kraftiga regn kan grundvattennivån komma att höjas. I detta fallet har ansatts en höjning av 1 m, samtidigt som vattenståndet i vattendraget höjts 0,5 m. Portrycket har ansatts hydrostatiskt från den höjda nivån. Effekten blir då att säkerhetsfaktorn i detta fallet sänks marginellt med 2 – 3 % till en säkerhetsfaktor av 1,22, se *Figur 16*.



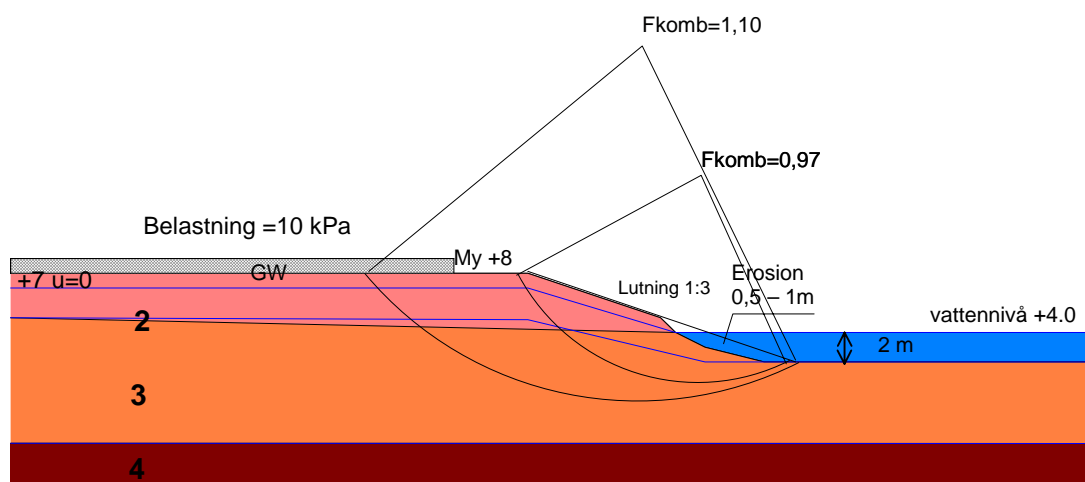
Figur 16. Lerslänt, typfall 1, visande säkerhetsfaktor vid höjd grundvatten- och portrycksnivå med 1 m och en förhöjd vattennivå med 0,5 m.

Om enbart grundvattennivån och portrycket ökar till exempel vid ett kort häftigt regn, eller att vattnet i ett vattendrag sjunkit undan men grundvattennivån i jorden fortfarande är hög, minskar säkerheten markant med 13 % i strandbrinken. Säkerhetsfaktorn blir då strax över 1, det vill säga risken för skred i strandkanten blir stor, se **Figur 17**.



Figur 17. Lerslänt, typfall 1, visande säkerhetsfaktor vid höjd grundvattennivå och portryck med 1 m men bibehållen vattennivå.

Vid häftiga regn eller ökad strömning ökar också risken för erosion i släntfoten, se **Figur 18**. Därmed kan säkerheten komma att minska så pass mycket att slänten blir instabil och säkerhetsfaktorn blir lägre än 1, det vill säga risken för skred i strandkanten ökar på samma sätt som i fallet med enbart ökad grundvatten- och portrycksnivå, se **Figur 17**. I det aktuella fallet med ökad erosion minskar säkerheten med 19 % jämfört med ursprungsfallet.

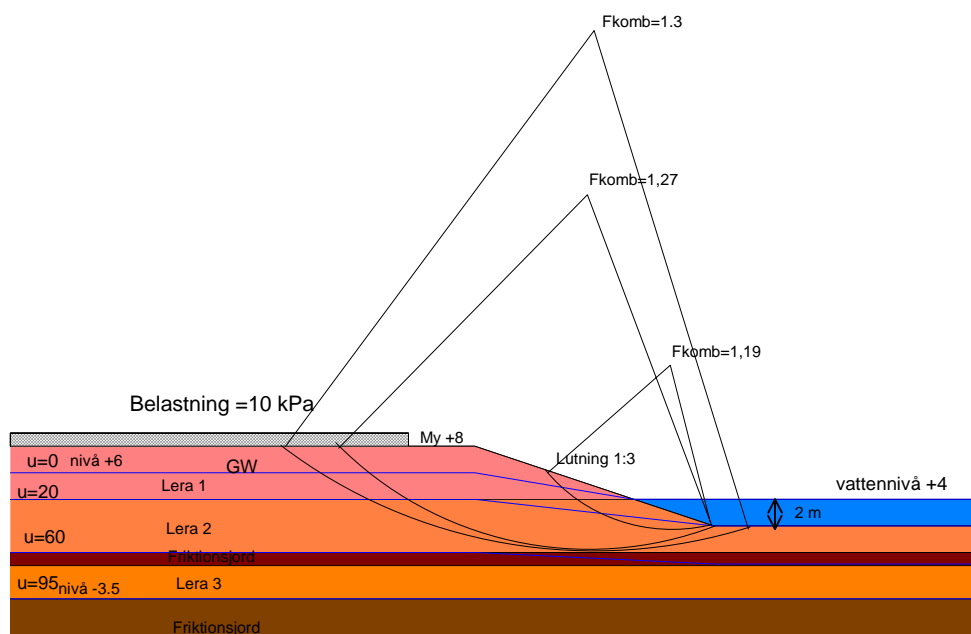


Figur 18. Lerslânt, typfall 1, visande säkerhetsfaktor vid höjd grundvatten- och portrycksnivå samt erosionsangrepp.

3.2.2 Typfall 2

I Typfall 2 har en slânt med samma geometri som i typfall 1. Här finns dock ett genomsläppligt skikt av friktionsjord inlagrat i leran. Fallet kan också representera en slânt med mindre lermäkthet. Denna typ av slânt är vanligt förekommande inom lerområden i västra och mellersta Sverige.

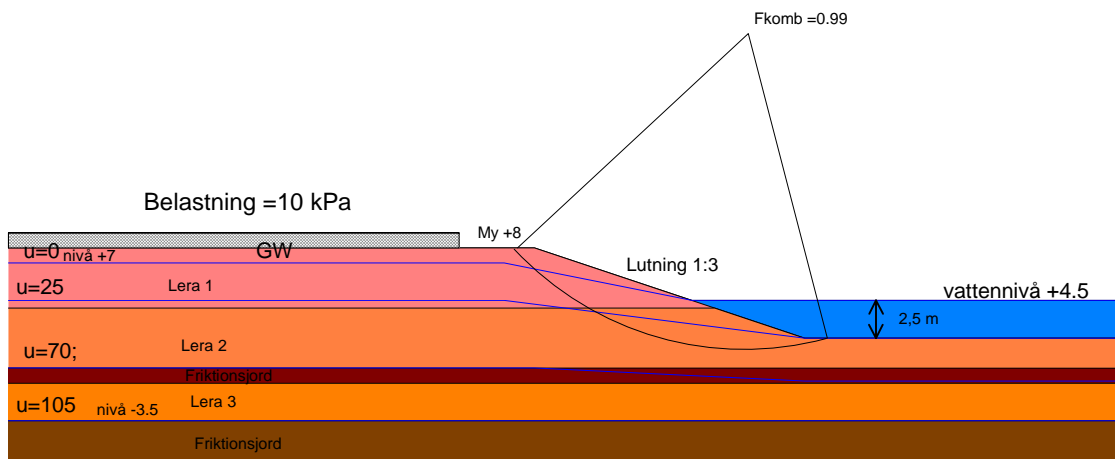
Säkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott är 1,2 – 1,3 för de rådande förutsättningarna med högre säkerhetsfaktor ovan slântkrön, se **Figur 19**.



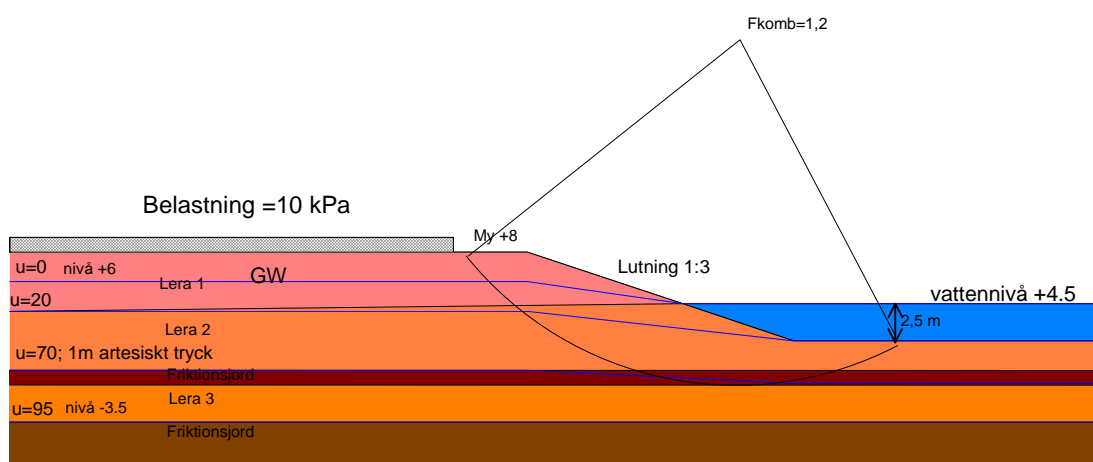
Figur 19. Lerslânt, typfall 2, visande nuvarande förhållanden med antagen hydrostatisk portrycksfördelning.

Vid ökad nederbörd eller kraftigt regn har ansatts dels en höjning av portrycks- och grundvattennivån med 1 m i hela jordlagret, samtidigt som vattennivån i vattendraget höjs 0,5 m, **Figur 20**, dels att det i det genomsläppliga skiktet byggs upp ett artesiskt tryck som initie

sprids upp genom hela lerlagret, **Figur 21**, utan hydrostatisk portrycksfördelning gäller i det övre lerlagret. Effekten blir att säkerhetsfaktorn i det första fallet sänks med 20 % till ca 1. Med ett artesiskt tryck i friktionsskiktet minskar säkerhetsfaktorn med 8 % till 1,2 för glidytor som når bakom slänkrönet. Det senare fallet kan normalt gälla initieellt innan ökningen av grundvattentrycket och portrycket jämnats ut i hela jordprofilen. Vid ökad nederbörd kan även de övre uppspruckna lagren i jordprofilen få ett ökat portryck, som kan innebära att stabilitetsförhållandena ytterligare försämras. Hänsyn till detta har inte tagits i typfallsberäkningarna.

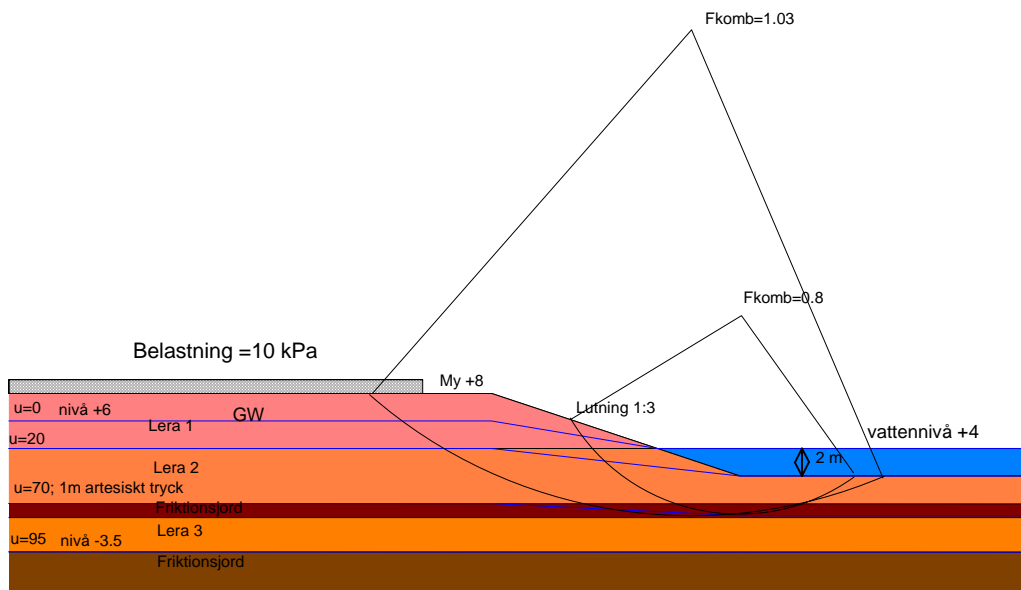


Figur 20. Lerslänthet, typfall 2, visande säkerhetsfaktor vid höjd grundvatten- och vattennivå. Portrycket har ansatts hydrostatiskt från den höjda nivån.



Figur 21. Lerslänthet, typfall 2, visande säkerhetsfaktor vid artesiskt tryck i friktionssjordskiktet samt höjd vattennivå, oförändrad grundvattenyta och hydrostatiskt portryck i det övre lerlagret.

Om enbart grundvattentrycket i friktionssjordslagret ökar, till exempel vid ett kort häftigt regn inom avrinningsområdet som påverkar friktionsslagret, se **Figur 22**, eller att vattnet i ett vattendrag sjunker undan men grundvatten- och portrycksnivån i jorden fortfarande är hög minskar säkerhetsfaktorn ytterligare till under eller omkring 1, det vill säga sannolikheten för ett skred är stor. Den procentuella minskningen av säkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott jämfört med den ursprungliga situationen är 30 % i fallet med artesiskt tryck enligt **Figur 22**. Vid mindre lermäktigheter ovan ett friktionssjordslager än i typfallet ökar med höjda artesiska vattentryck sannolikheten för att man kan få en instabilitet i släntheten genom att vattentrycket blir så högt att det trycker upp leran och slänten därmed blir instabil.



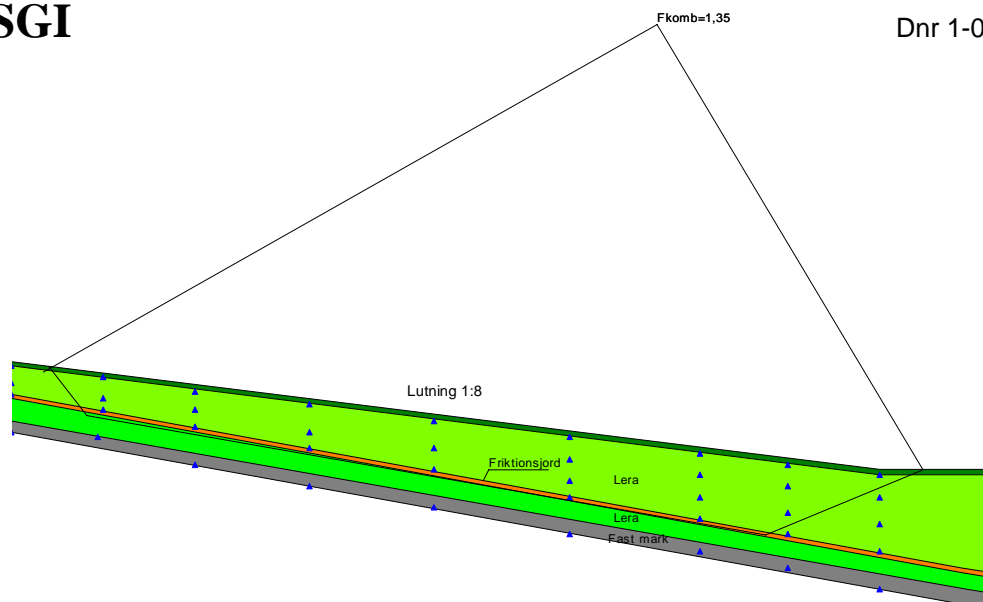
Figur 22. Lerslät, typfall 2, visande säkerhetsfaktor vid artesiskt tryck i friktionsjordsskikt utan höjd vattennivå samt oförändrad grundvattenyta och hydrostatiskt portryck i det övre lerlagret.

Om dessutom erosionen ökar, på grund av ökad strömning i vattendraget, kommer säkerhetsfaktorn att ytterligare minska på motsvarande sätt som redovisats för typfall 1 och sannolikheten att slänten blir instabil eller att bakåtgripande skred kan inträffa ökar.

3.2.3 Typfall 3

I detta typfall utgörs sektionen av en långsträckt lerslät som innehåller ett lager av genomsläpplig friktionsjord, **Figur 23**. Leran ovan friktionsjordslagret har en varierande mäktighet mellan 4 och 12 m. Leran under lagret har en mäktighet mellan 2 och 4 m. Denna typ av slät är vanlig i områden med lerjordar i närheten av fastmark eller sluttande terräng, med olika lokala förutsättningar på jordmäktigheter och hållfasthetsegenskaper.

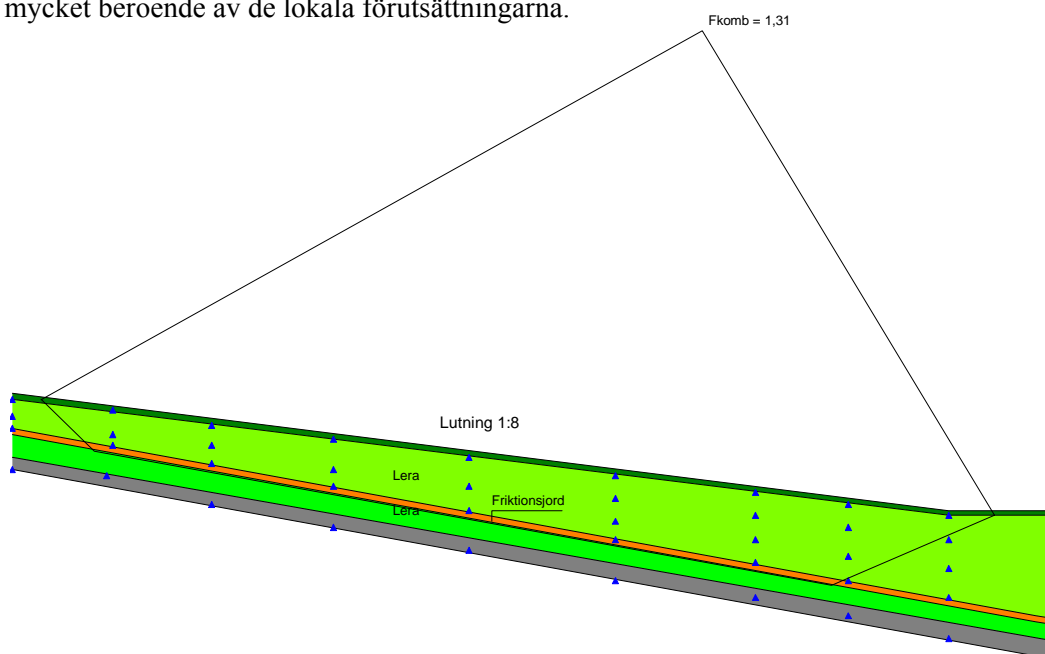
För de rådande förutsättningarna är i detta typfall säkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott 1,35 när glidytan berör friktionsjordslagret.



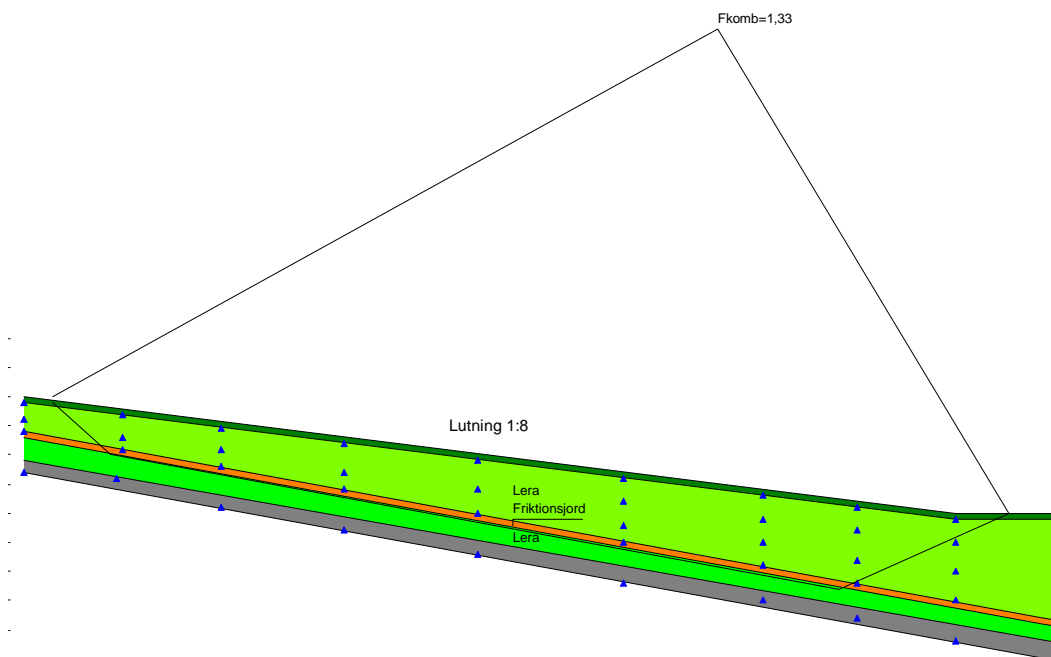
Figur 23. Lerslänt, typfall 3, visande säkerhetsfaktor vid nuvarande förhållande.

Vid ökad nederbörd eller kraftigt regn har ansatts dels en höjning av portrycksnivån av 1 m som är genomgående för hela jordprofilen, dels en förhöjning av vattentrycket i friktionsjordlagret motsvarande 1 m. I båda fallen blir inverkan på säkerhetsfaktorn liten, 2 – 3 %, se **Figur 24** och **Figur 25**. Effekten av klimatförändring med höjd portrycknivå eller artesiskt tryck i skiktet blir således liten i detta fallet. En känslighetsanalys visar att det artesiska trycket i skiktet skulle behöva ökas motsvarande 5 m vattenpelare för att slänten ska bli instabil.

Säkerheten mot stabilitetsbrott är dock avhängig av mäktigheten av lerjorden ovan friktionsjorden. Vid ett ökat portryck minskar säkerhetsfaktorn om djupet till friktionsjorden är litet. Består jorden över friktionsjordlagret av lera med låg hållfasthet kommer den farligaste glidyten i stället att uppkomma i leran. Effekterna av portrycksförändringarna i en långsträckt slänt är därför mycket beroende av de lokala förutsättningarna.



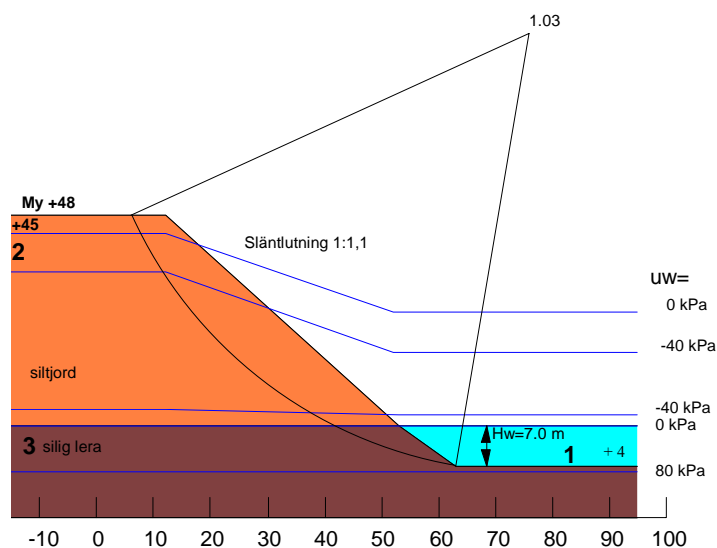
Figur 24. Lerslänt, typfall 3, visande säkerhetsfaktor vid höjd portrycksnivå 1m.



Figur 25. Lerslännt, typfall 3, visande säkerhetsfaktor vid artesiskt vattentryck 1 m i friktionsjordslager.

3.2.4 Typfall 4

I norra Sverige finns höga och branta så kallade nipslänter som karakteriseras av sandiga och siltiga jordar, ofta skiktade med täta jordar av lera. Typfall 4, se **Figur 26**, exemplifierar en hög slänt som består av siltig jord och som för befintliga förhållanden har en säkerhetsfaktor något över 1. Orsaken till att nipslänter inte rasar kan bero på ”falsk kohesion” eller ”negativa portryck”, vilket beskrivs i kapitel 2.3.

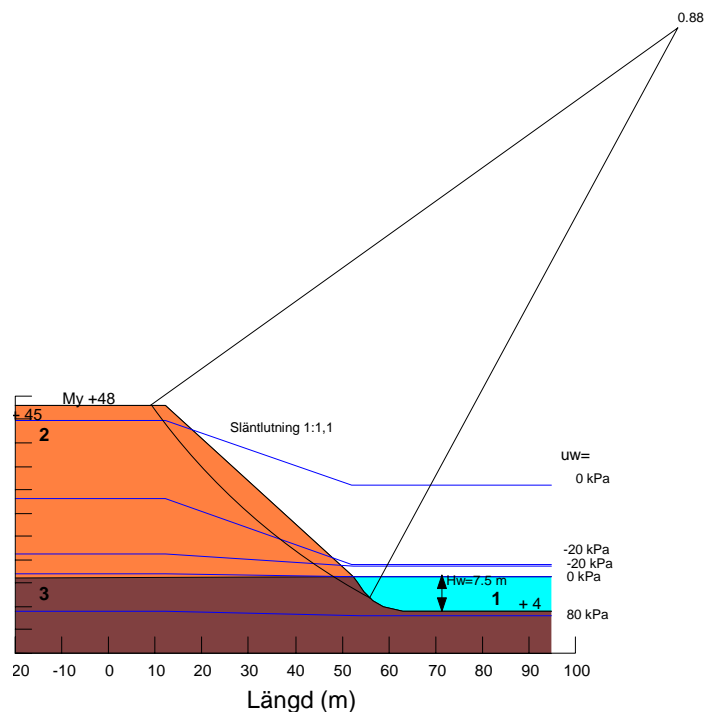


Figur 26. Nipslännt, typfall 4, visande säkerhetsfaktor vid befintliga förhållanden.

Vid ökad nederbörd eller höjd portrycksnivå blir jorden vattenmättad och den ”falska kohesionen” minskar, se kapitel 2.3, vilket leder till att risken för skred ökar. I **Figur 27** visas ett exempel på hur säkerhetsfaktorn minskar till mindre än 1, det vill säga slänten blir instabil. I exemplet höjs portrycksnivån med 1 m vilket innebär att jorden blir mer vattenmättad och att den ”falska kohesionen” minskar. I exemplet är det ansatt att vattennivån i vattendraget även höjs

med 0,5 m. Den procentuella minskningen av säkerhetsfaktorn mot stabilitetsbrott är i detta fallet 15 %.

Den ökade strömningen i vattendraget kommer troligtvis, liksom i typfall 1, även att medföra att erosionen ökar vilket ytterligare kommer att medverka till att stabiliteten försämras.



Figur 27. Nipslänt, typfall 4, visande säkerhetsfaktor vid höjd portrycksnivå 1 m och minskad "falsk kohesion".

3.2.5 Sammanfattning av analysen från typfallen

Sammanfattningsvis visar dessa typfall att de förändringar av portryck och grundvattennivåer som en klimatförändring kan innebära ger en försämring av stabiliteten jämfört med dagens situation. Speciellt tydligt är detta vid snabba kortvariga förändringar till exempel häftiga regn som tillsammans med ökad erosion i vattendragen kvantitativt leder till stor försämring av stabilitetsförhållandena. Detta kan speciellt komma att påverka områden som ligger i anslutning till vattendrag och särskilt i erosionskänslig jord. I slänter med små djup till vattenförande skikt med snabbare påverkan av grundvattentrycket försämras stabilitetsförhållandena också mer än vid stora lerdjup.

I områden där inverkan av "falsk kohesion" idag bidrar till att branta slänter inte rasar innebär en klimatförändring tillsammans med erosion att stabilitetsförhållandena försämras. Detta kan leda till ökad frekvens av ytliga ras i denna typ av slänter.

Påverkan blir mindre om nivån i vattendragen stiger samtidigt som höjningen av portryck och grundvattennivån i jorden går långsamt, till exempel vid områden med mäktiga lager av tät, lågpermeabel, jord som lera.

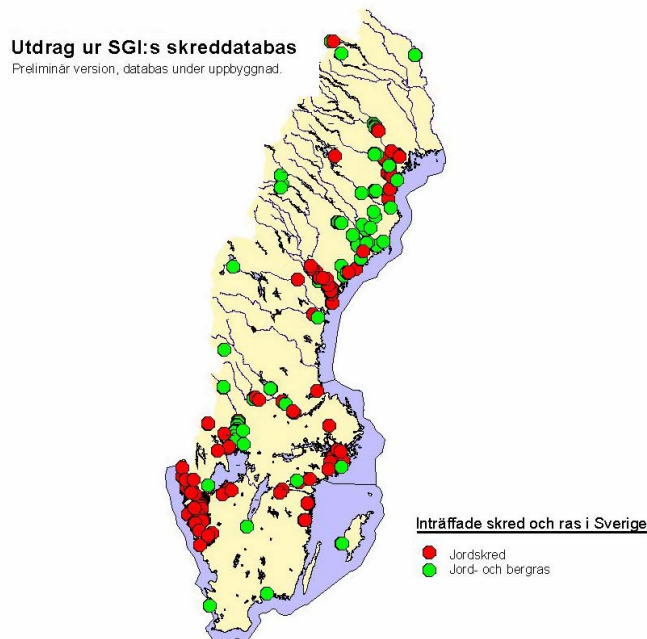
Slänter som är på gränsen till att vara instabila för nuvarande portrycksförhållanden kan, med ökad nederbörd och ökad erosion, bli instabila redan vid små förändringar. Sådana naturliga slänter har genom naturliga processer ofta "ställt in sig" så att stabilitetsförhållandena nätt och jämnt motsvarar en säkerhetsfaktor 1,0. Vid försämringar genom till exempel förhöjda portrycksnivåer eller erosion finns därför inga marginaler utan sannolikheten för skred och ras kommer att öka.

Skredkommissionens rapport 3:95 ”Anvisningar för släntstabilitetsutredningar” ger rekommendationer på erforderliga säkerhetsfaktorer. Dessa säkerhetsfaktorer varierar med avseende på typ av markanvändning och utredningsskede. För befintlig bebyggelse rekommenderas idag för en s.k. detaljerad utredning att säkerhetsfaktorn för kombinerad analys bör ligga på minst 1,35–1,45. I de olika typfallen erhöles försämringar på grund av ökad portrycks- och grundvattennivå samt erosion på mellan 5 och 30 %. Detta innebär att för en slänt som idag precis uppfyller den rekommenderade säkerhetsfaktorn kommer säkerhetsmarginalen att minska. En slänt som idag har en säkerhetsfaktor av 1,35 och som får en minskad säkerhet med 30 % kommer att bli instabil, det vill säga säkerhetsfaktorn minskar till mindre än 1. Vid 10 % minskning av säkerheten fås en säkerhetsfaktor av 1,2 och vid en 20 % minskning en säkerhetsfaktor på 1,1. Redan små procentuella minskningar inverkar alltså snabbt på säkerhetsmarginalen till att skred eller ras skall uppstå.

4 INVERKAN AV KLIMATFÖRÄNDRING FÖR OLIKA TOPOGRAFISKA OCH GEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN

4.1 Allmänt

I Sverige är skred och ras vanligast förekommande i västra och mellersta Sverige samt utmed älv- och kuststräckor i Norrland, se *Figur 28*.



Figur 28. Utdrag ur SGI:s skreddatabas över inträffade skred och ras i Sverige.

Inom dessa områden kan det förväntas att klimatförändringarnas påverkan på stabiliteten kommer att bli störst. I följande kapitel beskrivs områden med olika topografiska och geologiska förhållanden, där förutsättningar för skred och ras finns och hur dessa kan komma att påverkas av förändringar av grundvattennivåer och portryck.

Vid prognostisering av grundvattenförändring i jord är dagens metoder inte tillräckliga. De referensrör som SGU tillhandahåller sitter i akvifärer på relativt stora avstånd. Lokalt kan därför stora skillnader finnas. De vid SMHI Rossby Centre utförda väderprognostiseringarna går lokalt maximalt ned till områden på ca 50 x 50 km med dagens metoder, vilket ger stor osäkerhet i lokala prognoser.

Skredkommissionens rapport 3:95 ”Anvisningar för släntstabilitetsutredningar” ger rekommendationer på utförande, beräkningar och erforderliga säkerhetsfaktorer för olika stabilitetsutredningskedjen. I rapporten redovisas även nedanstående formel för prognostisering av maximalt vattentryck som baseras på referensrör i SGU:s grundvattennät. (Svensson, Sällfors et al 1985)

$$p_{\max}^{200} = p_{\max} - S_R^{200} \cdot (r_p/r_R) \quad (\text{ekv 4})$$

där

p_{\max}^{200} = prognosticerad maximinivå i observationspunkten med återkomsttiden 200 år
 p_{\max} = maximinivå i observationspunkten under observationstiden
 r_p = variationsbredden hos grundvattennivån i observationspunkten under observationstiden

$$S_R^{200} = y_{max} - y_{max}^{200}$$

y_{max} = maximinivån för referensröret under observationstiden
 y_{max}^{200} = maximinivån för referensröret med återkomsttiden 200 år

Denna prognosticering har dock begränsningar bland annat bör observationsrör och referensrör inte ligga längre från varandra än 50 km samt att de bör ha likartade terränglägen och geologiska förutsättningar. Begränsningarna innebär att det är svårt att göra lokala tillförlitliga prognoser med denna modell.

Två befintliga slänter från områden med olika geologiska och topografiska förhållanden har studerats för att se hur dessa kan påverkas av en grundvatten- och portrycksförändring. Det ena området är beläget utmed Indalsälven i norra Sverige och det andra området i Göta älvdalen i Västsverige. En prognos av hur grundvatten- och portryck kan komma att påverkas av en klimatförändring samt beskrivning av de geologiska förutsättningarna har för dessa två områden utförts av SGU (M. Engdahl et al, 2005).

4.2 Indalsälven (Nipslänt)

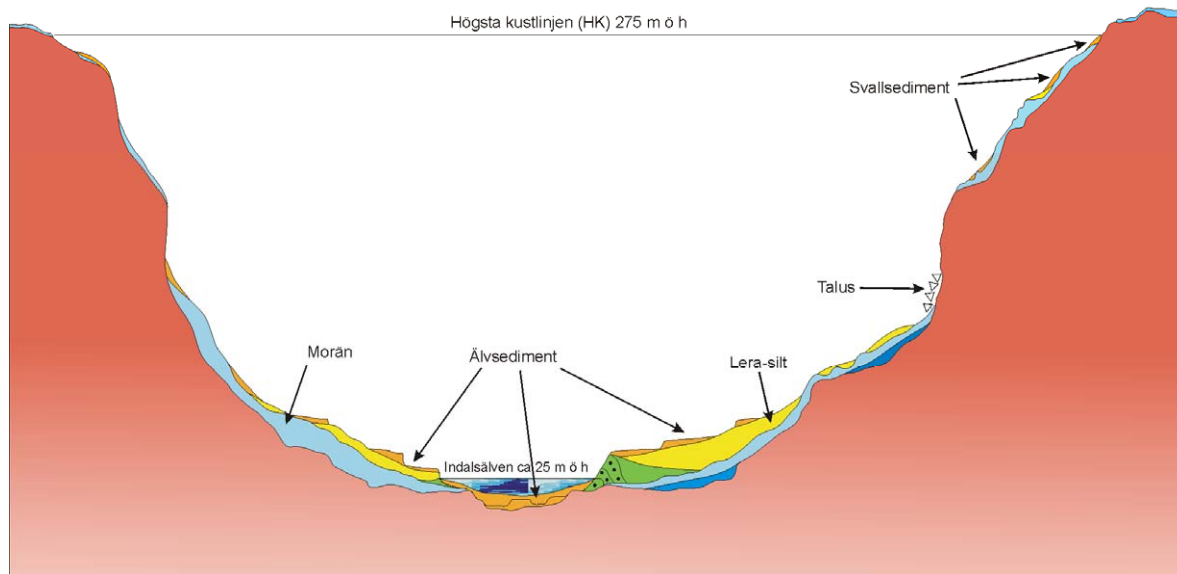
I Indalsälvens dalgång har ett område beläget i Krok våg ca 8 mil nordväst om Hammarstrand vid väg Z87 studerats med avseende på bedömning av eventuella klimatförändringars påverkan i den valda beräkningssektionen. Det aktuella området har tidigare undersökts av SGI (Fallsvik 1994) och stabilitetsutredningar visade att förstärkningsåtgärder var nödvändiga och dessa har även genomförts. De topografiska och geologiska förutsättningarna för området är typiska för Norrlands djupa älvdalgångar.

4.2.1 Topografiska och geologiska förutsättningar

I **Figur 29** redovisas en schematisk profil över Indalsälvens dalgång. Jordlagerföljden i Indalsälvens dalgång beror till stor del av att en älv flyter genom dalen. Dräneringen under isavsmältningen och under postglacial tid har följt dalgången. Högsta kustlinjen (HK) är belägen ca 240 m över havet (ö.h.) i området (Lundqvist 1969). Krok våg är beläget ca 150 m ö.h. Lagerföljden i dalgångens mitt är från botten och uppåt; berg, morän, grus och sand (isälvssediment), varvig lera (senglaciala älv sediment), lera och silt (postglaciala älv sediment), sand och silt med lerskikt (postglaciala älv sediment) och överst grus och sand (postglaciala älv sediment). Lagerföljden är inte alltid fullständigt utbildad på grund av erosion i de övre lagren eller varierande avsättningsbetingelser i de undre lagren.

Jordarterna i ytan längs en tvärprofil från älven till fjällsluttningen norr om vägen vid Krok våg är (Lundqvist, 1969) silt i nipan (älvsluttning), sand på planet ovanför nipan, silt och lera på planet närmast fjällsluttningen. Sluttningen består av berg och morän, men även isälvssediment förekommer i området.

Principskiss över Indalsälvens dalgång



Figur 29. Schematisk profil över Indalsälvens dalgång. Upprättad av Jan-Olov Svedlund, 2000. (Obs. Höjd- och längdskala är ej lika)

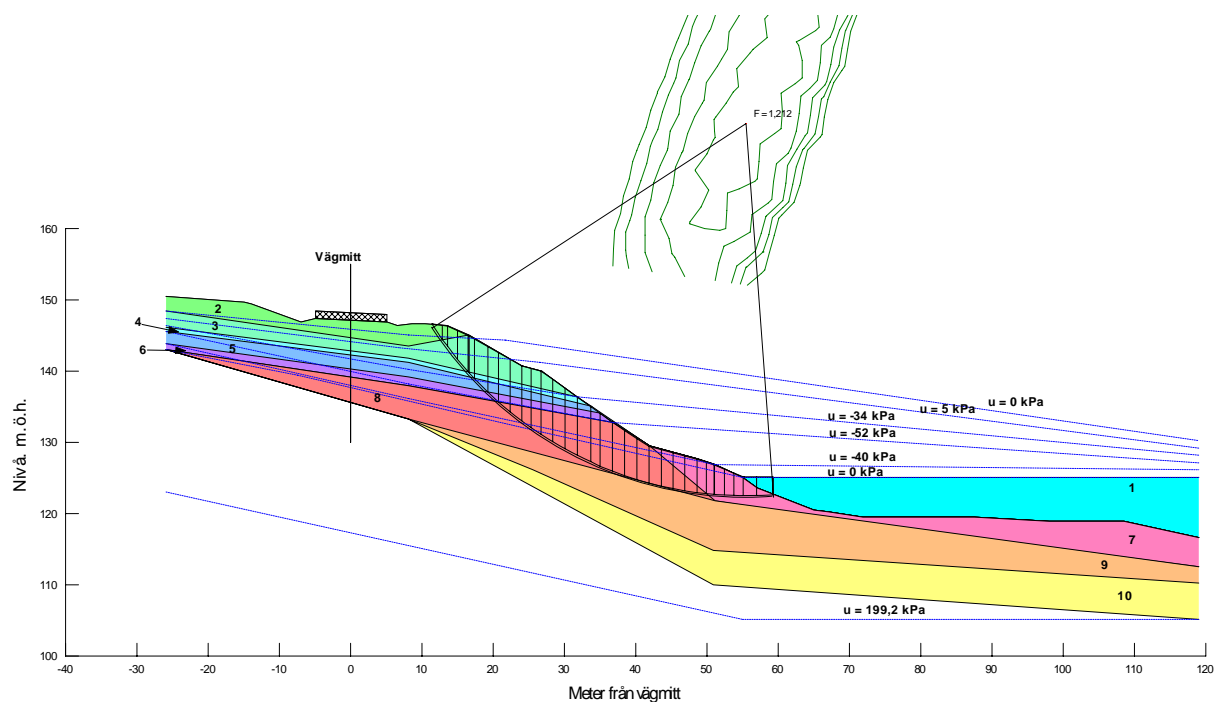
Enligt geotekniska undersökningar på platsen består jordlagerföljden av framförallt silt, men även sand och lera förekommer (Fallsvik 1994). Jorddjupet är som mest ca 25 m. Ett friktionsjordlager förekommer under sedimenten. En generell tolkning av älvsedimenten i den geotekniska sektionen (Fallsvik 1994) visar överst siltig sand, därunder silt och lera och underst sand och silt. Lagerföljden stämmer överens med en för älvdalarna typisk lagerföljd.

Grundvattenytan var i oktober 1993 belägen ca 2 m under markytan på planet ovanför nipan (Fallsvik 1994). Undersökningsröret sitter i ett övre grundvattenmagasin. Mellan oktober 1993 och februari 1994 sjönk grundvattenytan med ca 3 m, vilket är en stor sänkning under så kort tid. Under samma period har SGUs grundvattenstationer i södra Norrland haft samma trend även om inte sänkningen har varit så stor som i Krokvåg (SGU, Grundvattennätet 1993, 1994).

Enligt klimatscenarier från SMHI Rosaby Centre kan medelnederbörden öka med ca 30 % i området under åren 1961–2100 (SMHI 2005). En ökad nederbörd i området kommer med stor sannolikhet innebära att grundvattenytan i det övre grundvattenmagasinet kommer att ligga nära markytan under delar av året. Ytavrinningen kommer också att öka och kombinerat med grundvattenläckage i nipan så kommer erosionen i slutningen bli mer påtaglig (Engdahl, M. et al, 2005).

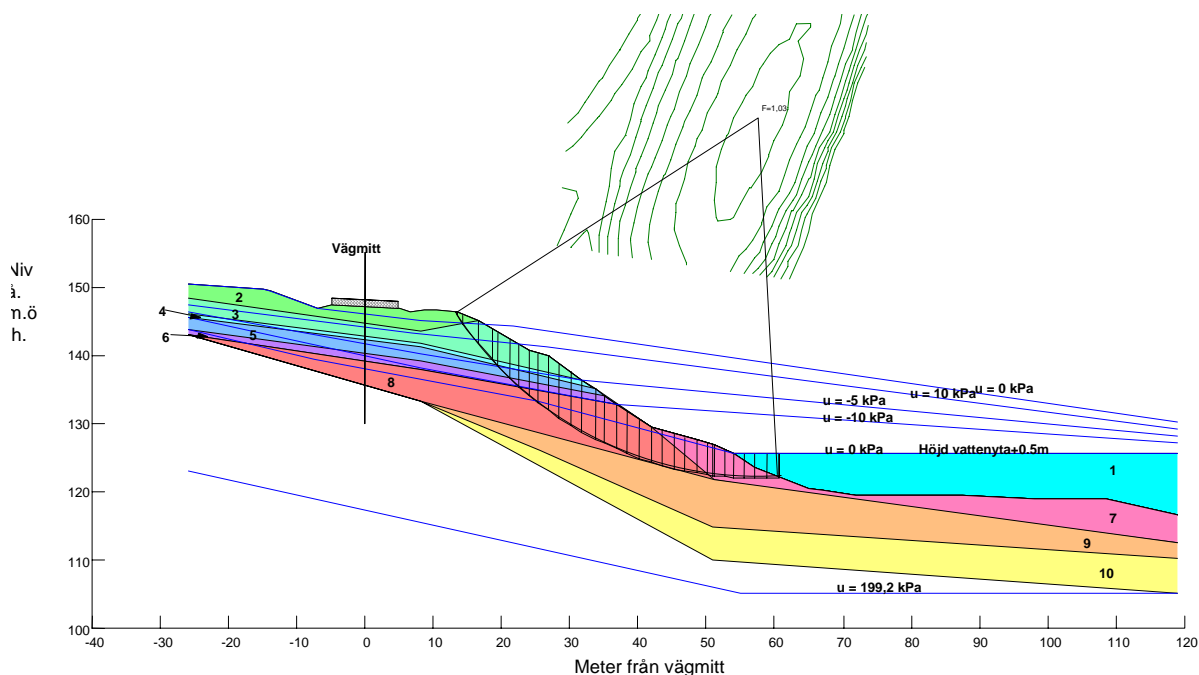
4.2.2 Påverkan på stabilitet

I det aktuella området genomfördes 1994 av SGI portrycksmätningar i jorden varvid negativa tryck uppmättes i de övre jordlagren. (Fallsvik, 1994) För den aktuella slänten erhålls, med de från 1994 topografiska förutsättningarna och uppmätta portrycken, beräkningsmässigt en säkerhetsfaktor på 1,2, se **Figur 30**.

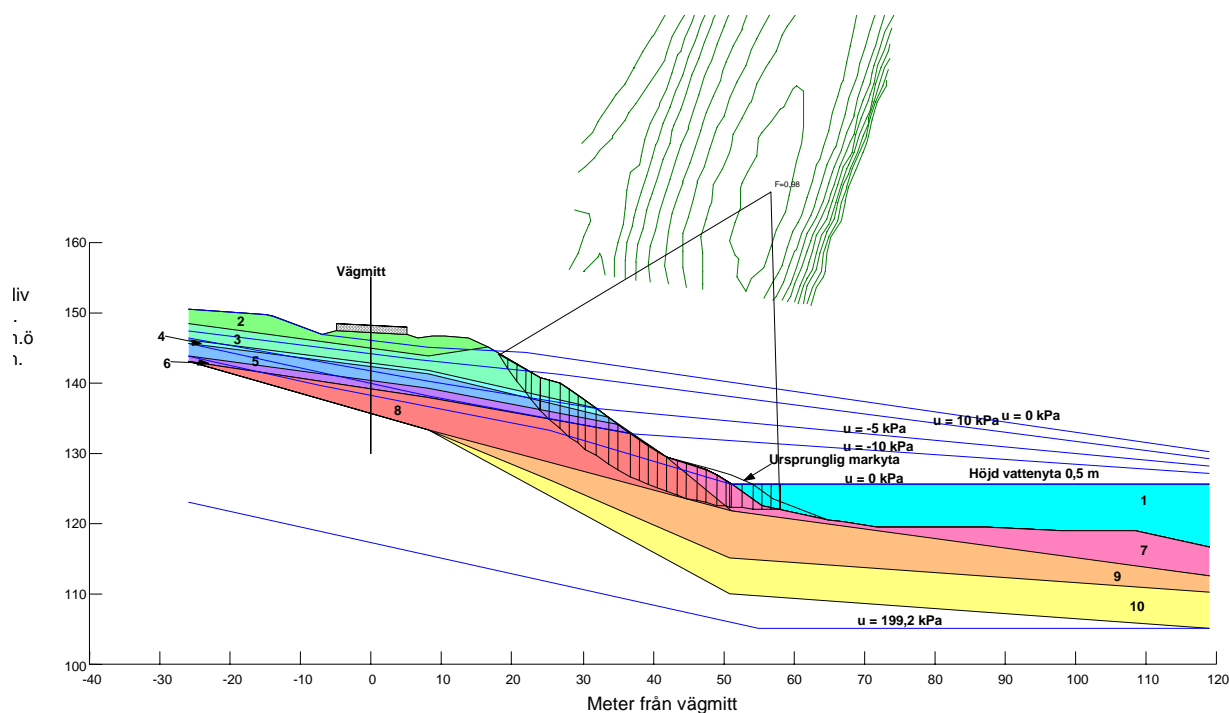


Figur 30. Resultat av stabilitetsberäkning för befintlig slänt.

Med ökad nederbörd i området är bedömningen att grundvattenytan i det övre grundvattenmagasinet kommer att ligga nära markytan under delar av året. Ytavrinningen kommer att öka och kombinerat med grundvattenläckage i genomsläppliga skikt och ökad strömning kommer erosionen i sluttningen bli mer påtaglig. För dessa scenarier har beräkningar utförts dels för att grundvattenytan och portrycksnivån höjs med 1 m. Den förhöjda portrycksnivån innebär att jorden i de övre jordlagren får högre vattenmättnadsgrad och de negativa portrycken minskar dels för fallet att även erosionen ökar med 0,5 – 1 m vid släntfot, se **Figur 31** respektive **Figur 32**. Vattennivån i älven har ansatts att höjas med 0,5 m.



Figur 31. Resultat av stabilitetsberäkning för slänt vid minskade negativa portryck på grund av högre vattenmättnadsgrad i jordlagren orsakad av ökad nederbörd.



Figur 32. Resultat av stabilitetsberäkning för slänt vid minskade portryck på grund av högre vattenmättnadsgrad i jordlagren orsakad av ökad nederbörd samt ökad erosion.

I den aktuella slänten minskar säkerhetsfaktorn till omkring 1, dvs slänten är på gränsen till instabil, om enbart de negativa portrycken försvinner. Om erosion dessutom uppkommer i släntfoten blir säkerhetsfaktorn mindre än 1 och sannolikheten för ett ras är stor. I dessa typer av slänter finns ofta skikt med genomsläppligt material. Ökad grundvattenströmning kan innebära att finkornigare material följer med grundvattnet som rinner ut i slänten vilket ytterligare ökar erosionen. Det finns erfarenhet av att detta kan innebära bildandet av stora hålrum i jorden

Denna typ av slänt är vanlig i Norrland och riskerna för skred i dessa områden ökar vid ökad nederbörd. Befintlig infrastruktur och byggnader i nära anslutning till slänterna påverkas. Vid samhällsplanering krävs ökad förståelse och större hänsyn till problematiken kring klimatförändringarna.

4.3 Göta älv (lösa lerområden)

I Göta älvs dalgång har ett område strax söder om Lilla Edets samhälle studerats med avseende på klimatförändringars påverkan på grundvattennivåförändring och stabilitet. Lilla Edet ligger ca 6 mil norr om Göteborg. Det aktuella området har tidigare ingått i "Skredriskanalys för nordöstra Göta älvdalen inom Lilla Edets kommun" som utförts av SGI (Schälin, 1997). I anslutning till området finns en mätstation installerad för kontinuerlig mätning av portryck och rörelser. Denna har varit i funktion sedan sommaren 2004.

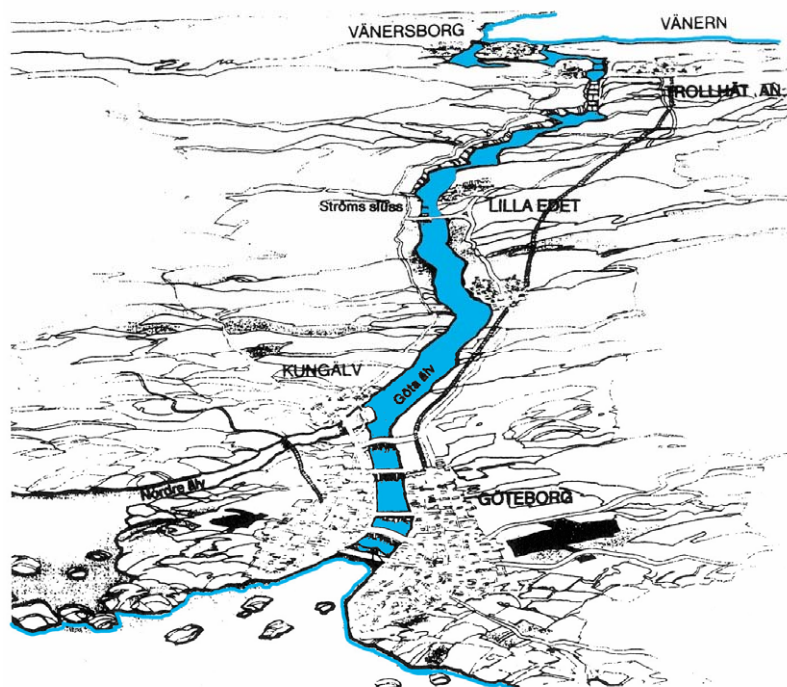
De topografiska och geologiska förutsättningarna för Göta älvdalen varierar och den valda beräkningssektionen kan anses mest typisk för Göta älvdalens mellersta delar.

4.3.1 Topografiska och geologiska förutsättningar

Göta älvdalen från Väneren till utloppet i Göteborg har varierande geologi och topografi. I den norra delen är jorddjupen ofta måttliga. Berg- och fastjordsområden finns inom stora delar, blandat med mindre områden med sediment. Slänterna ner mot älven är ofta branta och nivå-

skillnaderna är relativt stora. Förekommande lera är i regel fast och innehåller ofta också mer vattengenomsläppliga skikt, vilket betyder att nederbördsbetingade portrycksvariationer är större än i homogen lera och därmed får större betydelse för stabiliteten (Ahlberg, P. et al 1994; Schälin, J. et al 1997).

Mot söder blir dalgången flackare och leran lösare och mer homogen samtidigt som mäktigheten av både lera och andra jordlager ökar. I den södra delen finns ofta en ”strandhylla” mellan strandlinjen och djupfåran i älven. Stabilitetsförhållanden för de älvnära partierna i den södra delen styrs till stor del av undervattensläntens och strandhyllans topografi. Älvstränderna har på stora delar skyddats mot erosion genom utläggning av stenfyllning (Alén, C. et al 2000).



Figur 33. Vy över Göta älv dalen mellan Göteborg och Vänersborg.

Det studerade området ligger i södra delen av Lilla Edets samhälle. Områdets centrala del består av en lerplatå. Platån har i väster en sluttning mot Göta älv, i norr och öster sluttningar mot en ravin och mot söder påträffas berg i dagen (Fredén 1984, 1986). Större delen av området består av hårdgjorda ytor och inrymmer flera fabriksbyggnader. Området är troligtvis väl-dränerat och ytvattnet leds bort till en kulvert i en ravin, som dräneras till Göta älv. Norr och öster om ravinen bildar lermarken ett flackt plan på ungefär samma nivå som platån (Engdahl, M et al 2005).

Under den hårdgjorda markytan på platån förekommer sand, silt och lera med växtdelar (äldre svämsediment), som underlagras av siltig lera med växtdelar (postglacial lera) och grå lera (glacial lera). Den totala lermäktigheten är ca 20 m (Schälin 1997). Leran underlagras av friktionsjord. Grundvattenytan bedöms ligga 2 – 5 m under markytan i området.

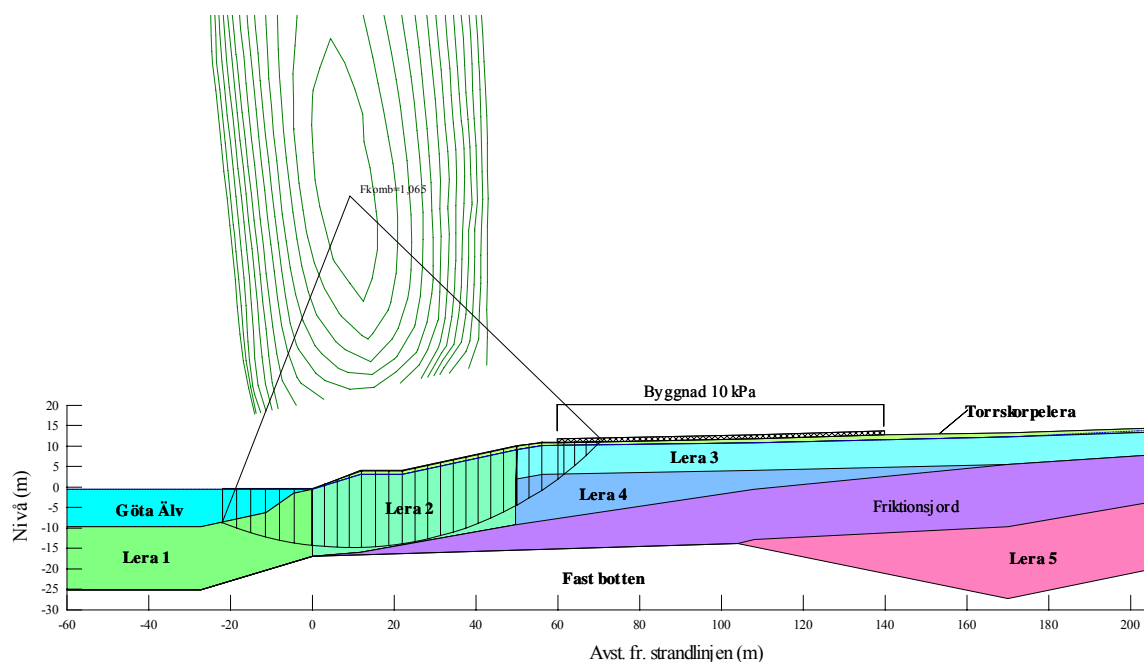
I botten av ravinen, norr om platån, förekommer ställvis silt med växtdelar (yngre svämsediment). Ca 1 km öster om området finns fastmark, som består av berg i dagen, morän eller isälvsediment. Större delen av grundvattenbildningen i området bedöms ske lokalt och endast en mindre del på annat håll.

Enligt klimatscenarioer från SMHI Rosaby Centre kan medelnederbörden öka med ca 30 % i området under åren 1961–2100 (SMHI 2005). En ökad nederbörd i området kommer med stor sannolikhet att endast marginellt (< 1 m) höja grundvattenytan och portrycksnivån. Anledningen

till detta beror på att området bedöms vara väl-dränerat och att vattnet leds bort genom ledningar och kulvertar till Göta älv. Den ökade ytavrinningen i den aktuella sektionen bedöms inte orsaka någon nämnvärd ökad erosion i området (Engdahl, M. et al 2005).

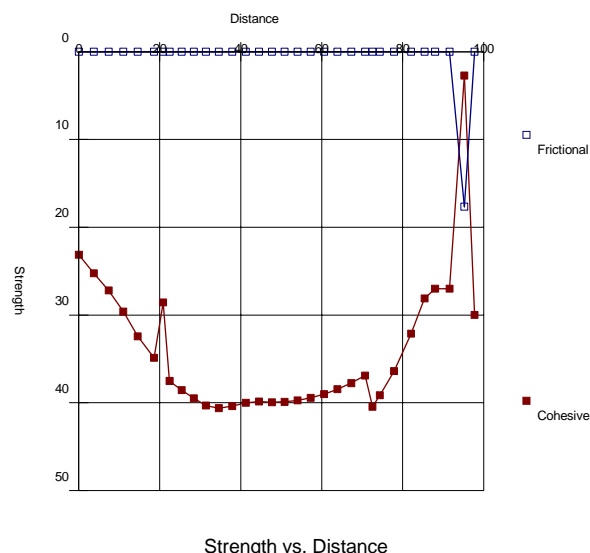
4.3.2 Påverkan på stabilitet

Det aktuella området har ingått i en skredriskanalys som genomförts för nordöstra Göta älv-dalen inom Lilla Edets kommun (Schälin 1997). I närheten av den valda sektionen pågår kontinuerliga mätningar av portryck sedan sommaren 2004 (mätstation "Lepas") och i samband med skredriskanalysen har bedömningar av grundvattennivå och portryck genomförts. För den aktuella slänten erhålls, med de i skredriskanalysen angivna portrycken, beräkningsmässigt en säkerhetsfaktor på 1,07, se *Figur 34*.



Figur 34. Lilla Edet, resultat av stabilitetsberäkning för befintliga förhållanden.

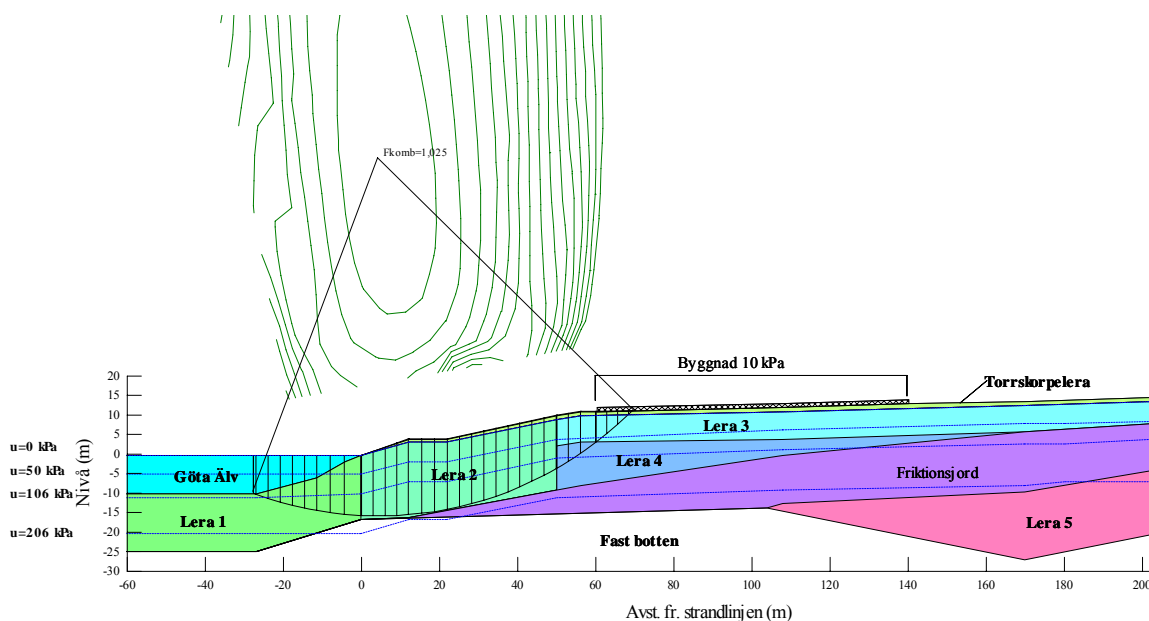
Jordlagren i det aktuella området består av relativt lös lera. Jordens odränerade hållfasthetsegenskaper är därför i denna typ av jord mer styrande än de dränerade, vilket visas i *Figur 35*. I denna graf representeras de hållfasthetsegenskaper som är dimensionerande med ett värde större än 0. Den odränerade hållfastheten (cohesive) är till största delen dimensionerande för glidytan och den dränerade andelen (frictional) är noll utmed nästan hela glidytan. Portrycket påverkar enbart den dränerade hållfastheten, vilket i detta fallet innebär att inverkan är liten.



Figur 35. Jämförelse mellan dränerad och odränerad hållfasthet i beräknad glidyta för befintlig slänt.

En kvantitativ bedömning av portrycksökningen av en förhöjd nederbörd av ca 30 % har utförts utifrån den under kapitel 5.1 beskrivna formeln för prognostisering av vattentryck som finns redovisad i Skredkommissionens rapport 3:95 ”Anvisningar för släntstabilitetsutredningar”. Vid jämförelsen har grundvattennivåerna för det i kapitel 2.4 angivna referensröret Kungälv 53.11 använts för tiden 1998–2004. Under den aktuella perioden låg grundvattennivåerna ca 40 % över dagens årsmedelvärden. Dessa värden har jämförts med den närliggande mätstationen ”Lepas” värden under perioden september 2004 till april 2005. En 40 % högre nivå jämfört med dagens värden skulle för denna prognos innebära en ökning av portrycket i de nedre jordlagren med 6 kPa, vilket motsvarar 0,6 m vattenpelare.

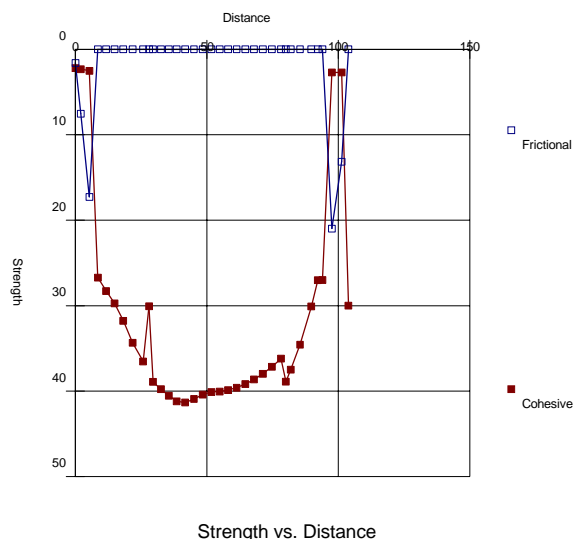
Ansätts denna ökning i de undre jordlagren sänks säkerhetsfaktorn till 1,02, en minskning med 4 % från ursprungsfallet, se **Figur 36**.



Figur 36. Lilla Edet, resultat av stabilitetsberäkning för ett ökat portryck i de djupare jordlagren.

Jämförs hur stor andel av de dränerade hållfasthetsegenskaperna som påverkar stabiliteten är denna fortfarande liten, se **Figur 37**. Endast en något större andel i glydytans yttre partier har fått en ökad del där den dränerande hållfastheten är dimensionerande.

Den aktuella slänten har en låg säkerhetsfaktor för befintliga förhållanden. Detta gäller på många partier utmed Göta älv. Med en måttlig portrycksökning minskar säkerhetsfaktorn något, och kan vara avgörande om slänten ligger nära gränsen till att ett skred kan utlösas.

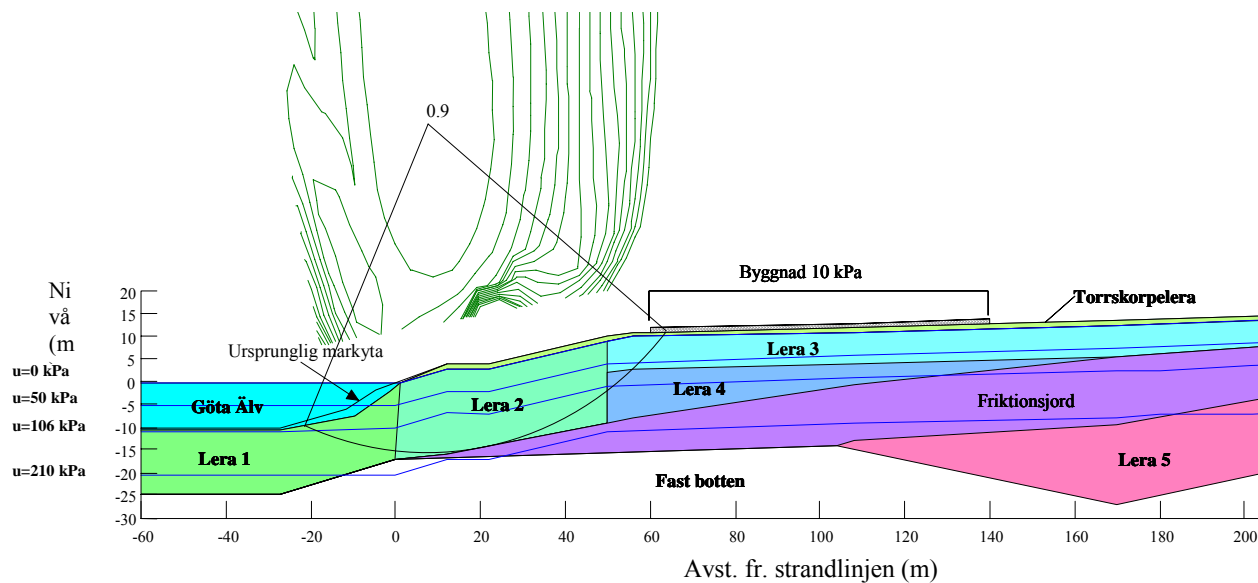


Figur 37. Jämförelse dränerad och odränerad hållfasthet i beräknad glydyta för ökat portryck i slänten.

Med ökad nederbörd kan även förväntas att vattenmassorna och strömningen i älven blir större, vilket påverkar erosionen i vattendraget. I **Figur 38** visas hur säkerhetsfaktorn förändras vid ett höjt portryck samtidigt med kraftigt ökad erosion i älven. I exemplet har älvbotten sänkts med 0,5 m och strandkanten har eroderats ner 1 m.

Vid jämförelse med befintlig slänt fås här en sänkning av säkerhetsfaktorn med drygt 15 %, från 1,07 till 0,9. Vid en ökad nederbörd med kraftiga och långvariga regn kan ökade flöden medföra en ökad erosion. Detta innebär att många slänter med inget eller dåligt erosionskydd som idag har en säkerhetsfaktor strax över 1 kan bli instabila. Den ökade erosionen innebär även för övriga slänter att stabilitetsförhållandena försämras och att säkerhetsmarginalen till att skred eller ras ska inträffa minskar.

Lermäktigheten ovan friktionsjorden kan variera i områden med lösa leror. Stor lermäktighet innebär normalt att den odränerade hållfastheten styr stabiliteten. Vid små lermäktigheter eller om det finns skikt eller lager av friktionsjord inlagrat i leran kan de dränerade förhållandena få större genomslagskraft. Erosionskyddande åtgärder kan i större utsträckning än idag vara nödvändiga för att minska risker för initialscred, speciellt i områden med kvicklera.



Figur 38. Lilla Edet, resultat av stabilitetsberäkning för ett ökad portryck i de djupa jordlagren samt erosion i älvbotten och strandkanten.

I västra och mellersta Sverige där denna typ av geologiska och topografiska förhållanden är vanliga finns ofta även bebyggelse och infrastruktur i nära anslutning till åar och älvar. I samband med samhällsplanering men även för befintlig bebyggelse och infrastruktur krävs att man för de lokala förutsättningarna beaktar en framtida förändring av nederbörd och erosion.

4.4 Fasta lerområden

Lerjordar som är avsatta under den senaste nedisningen, glacialleror, är normalt fastare än leror avsatta efter denna, så kallade postglaciala leror. Inom områden med fastare leror, till exempel Halland och Värmland, påträffas ofta höga och branta slänter i lera.

Till skillnad från områden med lös lera påverkas dessa områden mer av dränerade förhållanden och por- och grundvattentrycksförändringar får en större genomslagskraft på stabilitetsförhållandena. Vid en klimatförändring med kraftig nederbörd kan därför stabilitetsförhållandena lokalt påverkas snabbare om slänten för befintliga förhållanden har en låg säkerhet mot stabilitetsbrott eller påverkas av yttre belastningar.

I dessa typer av jordar kan portrycken efter ett kraftigt skyfall ligga kvar i jorden samtidigt som vattnet i till exempel ett vattendrag har sjunkit undan vilket bidrar till en lägre säkerhet mot skred. I princip kan det scenario som redovisades under typfall 1 i kapitel 3 uppstå och kommer att bli mer vanligt vid en klimatförändring med fler och kraftigare skyfall än idag i kombination med erosion. I Viskans och Ätrands dalgång i Västergötland och Halland är redan idag ras och skred orsakade av kraftiga skyfall vanliga.

4.5 Slamströmmar

4.5.1 Allmänt

Vid kraftig nederbörd över brant terräng eller över områden där vattnet kan gå längs en koncentrerad fåra, exempelvis i en ravin, kan så kallade slamströmmar inträffa. Slamströmmar är snabba jordrörelser, i vilka en stor volym av en blandning av vatten och jord flyter nerför en sluttning. Jordmassorna är tunga och slamströmmens stora rörelseenergi och den intensiva erosionen gör att slamströmmen blir mycket destruktiv. Ytterligare jordmassor innehållande sten och block och även träd dras ofta med, och därmed kan slamströmmens volym successivt öka nedför slänten.

Oftast följer slamströmmar tidigare bildade strömfåror men de kan även strömma nerför en slänt och ta nya vägar. Vid ställen längs strömfåran där lutningen minskar ansamlas jordmassor och träd och buskar från mindre skred och slamströmmar längs bäckraviner. Vid stora vattenflöden i bäcken kan de ansamlade jordmassorna åter komma i rörelse och fortsätta som en ny slamström längs bäckravinen ned till den nedanförliggande dalen. Återkommande slamströmmar längs bäckraviner är vanliga i slänter med många moränskred.

Sannolikheten för slamströmmar påverkas huvudsakligen av mängden och flödet på det vatten som kan strömma längs ravinen vid ett och samma nederbördstillfälle samt mängden jordmaterial som är tillgängligt och transporterbart av flödet. Dessa faktorer beror i sin tur på:

- storlek, form och topografi i avrinningsområdet
- avrinningsförhållanden (vegetationstyp och dess täckningsgrad, lutning, jord- och berggrund etc)
- nederbörd (mängd, varaktighet, intensitet och återkomsttid)
- mängd, typ och erosionsbenägenhet för jordmaterial

Slamströmmar inträffar i samband med intensiva regn, ofta i samband med snösmältning. De flesta spåren efter slamströmmar i Sverige finns i fjälltrakterna, exempelvis i Åre och Kittelfjäll, se **Figur 39** och **Figur 40**. Men även utanför fjälltrakterna finns många områden utsatta för slamströmmar, exempelvis längs raviner, förkastningsbranter och branta moränslänter.



Figur 39. Spår av slamströmmar i Åre.



Figur 40. Spår av slamströmmar i Kittelfjäll.

4.5.2 Klimatförändringarnas inverkan på slamströmmar

I de framtagna klimatscenarierna visas för fjälltrakterna en ökad årsnederbördsmängd med omkring 30 %. Dessutom väntas de intensiva nederbördstillfällena bli fler och intensivare i framtiden. Det innebär att dagens hundraårsregn statistisk kan komma att inträffa med betydligt kortare återkomsttid. Därmed är risken stor att förekomsten av slamströmmar i de redan tidigare drabbade områdena ökar och att nya områden kan komma att drabbas.

Mörviksravinen

SGI utförde år 2003, på uppdrag av Åre kommun, en utredning av stabilitets- och avrinningsförhållanden i Mörviksravinen avrinningsområde (Rankka & Fallsvik, 2004). I utredningen beräknades bland annat det högsta flöde och den mängd jordmaterial som kan nå Åre by med en statistisk återkomsttid på 100 respektive 150 år. Det dimensionerande regnets intensitet bestämdes till 46 mm/h och det dimensionerande regnets varaktighet, vilket baseras på avrinningsförhållanden i området, bestämdes till 1 timma. Bestämningarna byggde på SMHI:s nederbördsstatistik från närliggande områden och återspeglar således dagens klimatförhållanden.

För att exemplifiera inverkan på slamströmmar av den ökande nederbördsintensiteten har basdata från beräkningarna för Mörviksravinen använts men med ny nederbördsintensitet. I klimatscenarierna finns dock inte framtaget hur mycket de intensiva regnens intensitet kan komma att öka, bara att de kommer att öka. Som exempel har använts en 30-procentig ökning vilket innebär en nederbörd på 60 mm/h för en återkomsttid på 150 år. Beräkningar av högsta flöde och mängden transporterbart jordmaterial för dagens klimatsituation och med en antagen framtida ökad nederbörd redovisas i **Tabell 1**. De här framräknade värdena avser den situation som kan uppstå cirka 1300 m uppströms Mörviksåns utflöde i Åresjön.

Tabell 1. Volym transporterbart jordmaterial för Mörviksån, Åre kommun, vid förändringar i högvattenflöde.

	Dimensionerande nederbörd [mm/h]	Högvattenflöde, Q [m ³ /s]	Volym transporterbart material [m ³]
Dagens klimatsituation	46	19	6000
Ett framtida klimat med en höjning av den dimensionerande nederbörden med 30 %	60	25	8700

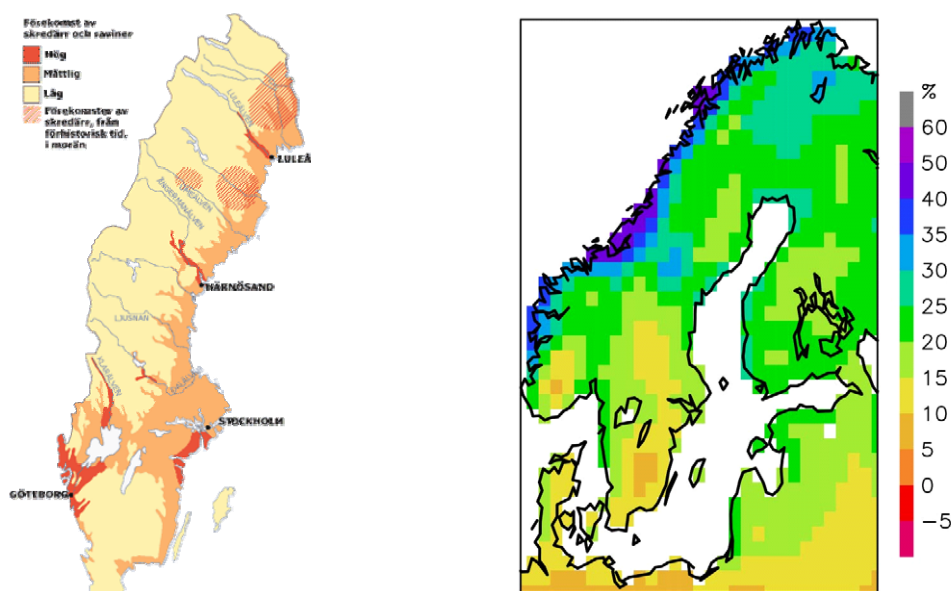
De genomförda beräkningarna visar att med en antagen ökad nederbördsmängd av 30 % ökar högvattenflödet med 6 m³/s. De visar även att den mängd jordmaterial som kan transporteras av högvattenflödet ökar med 2700 m³, eller 45 %.

Slamströmmar i Mörviksån har inträffat flera gånger redan tidigare, senast 2003. Flera av dessa har lett till översvämningar, erosion, skred och förstörelse av infrastruktur och bebyggelse. Under de senaste åren har en stor utbyggnad gjorts i centrala Åre med nya hus, vägar och skidområden. De beräknade värdena visar att än större problem kan uppstå i framtiden och att stora investeringar kommer att krävas för att skydda människor och egendom.

5 OMFATTNING, KONSEKVENSER OCH OSÄKERHETER

5.1 Omfattning och konsekvenser

En klimatförändring som medför ökad nederbörd och fler skyfall kommer att bidra till att risken för slamströmmar, skred och ras blir större och att erosionen kommer att öka. Skred, ras och slamströmmar sker redan idag men kan komma att öka i samband med klimatförändringarna, eftersom det kan bli fler nederbördsdagar och häftigare regn. De områden som kommer att påverkas är främst de som redan för dagens förhållanden är kända skred- och rasområden, se **Figur 41a**. De flesta av de områden som har hög eller måttlig frekvens av skredärr och raviner kommer även att få en stor nederbördsförändring enligt SMHI Rosby Centre klimatscenario, se **Figur 41b**. Speciellt tydligt är detta för västra och norra Sverige, där prognoser på upp till 30 % ökning av nederbörds mängden sammanfaller med områden där frekvensen av skredärr och raviner är hög. Att kunna identifiera kritiska områden ger förutsättningar att kunna agera i tid och förebygga skred och ras för att minska konsekvenserna för samhället. Vägverket har i en utredning konstaterat att en kartering av skredrisker i områden, känsliga för höga portryck, bör genomföras för att kunna möta såväl dagens som framtidens behov (Vägverket, 2002).



a) Frekvens av skredärr och raviner i Sverige (Sveriges geologiska undersökning, 2005)

b) Prognosticerad nederbördsförändring år 2100 jämfört med år 196--1990 (SMHI Rosby Centre, 2005)

Figur 41 Kartor över Sverige visande a) frekvensen av skredärr och raviner (www.sgu.se, 2005) b) prognosticerad nederbördsförändring år 2100 (www.smhi.se, 2005).

De ökade nederbörds mängderna ger upphov till större ytavrinning och därmed högre vattenföring och vattenstånd i vattendragen. Detta kan leda till ökad erosion samt att större områden än idag kan komma att översvämmas. Grundvattenbildningen kommer att öka med höjning av grundvattenytan och ökade portryck som följd i stora delar av Norden. Ökningen kan ge problem för bebyggelse med skred, ras, erosion, vatteninträning i grundkonstruktioner och källare, upptryck mot vattentäta konstruktioner, minskad bärformåga i jorden samt dräneringssystem som överbelastas m.m. Den ökade nederbörden kan leda till försämrad släntstabilitet och bärlighet för vägar, järnvägar och tekniska system såsom vatten- gas- och kraftledningar samt kraftverksdammar, men även strandnära områden och förorenad mark kan komma att påverkas av erosion och utlakning av föroreningar (Rydell et al., 2001).

Speciellt utsatta är höga slänter i lättroderad jord invid vattendrag och älvar som kommer att påverkas av kraftigare strömningar och förhöjda portryck. Slänter med skikt eller lager av permeabel jord kommer snabbare att påverkas av förhöjda grund- och porvattentryck som, speciellt i samband med ökad erosion, kommer att medföra lägre säkerheter på stabiliteten.

I områden med mäktiga lösa lerlager kommer effekterna att bli mindre eftersom förändringen av portrycket kommer att ta längre tid.

För bebyggda områden kring vattendrag kan förändringar, som en klimatförändring innebär, ge en försämring av stabilitetssituationen jämfört med dagens situation. Områden som idag betraktas som stabila utifrån gällande rekommendationer på säkerhetsfaktorer, kan komma att behöva åtgärdas om samma säkerhetsnivå skall gälla.

Många områden är idag förstärkta mot skred för dagens situation. Vid en förhöjning av grundvatten- och portrycksnivåer eller ökad erosion kommer dessa områden att få en lägre säkerhet än vad man idag normalt rekommenderar. Detta kan innebära att en utökad förstärkning kan komma att krävas utifrån dagens rekommendationer på säkerhetsfaktorer.

I naturen är skred och ras en naturlig process och slänter kan ha sådan geometri att de i dagens situation nätt och jämnt är stabila. Vid en klimatförändring kan, speciellt inom finjordsområden i anslutning till vattendrag, skredrisken komma att öka. I anslutning till bebyggda områden kan dessa skred innebära skadlig omgivningspåverkan genom igentäppning av vattendrag, ökad grumling av vattendragen som kan påverka dricksvattenuttag, sjöfart med mera.

Försämrad stabilitet inom kvicklereområden, till exempel vid ökad erosion i samband med ökad vattenströmning, kan innebära att ett litet initieellt skred kan spridas både framåt och bakåt med fler och större skred som följd. Dessa skred kan påverka stora områden. Konsekvenserna av ett sådant skred kan bli mycket omfattande för samhälle, infrastruktur, sjöfart m. m.

Ökade nederbördsmängder kommer att öka högvattenflöden. Detta kan leda till slamströmmar som består av en stor mängd jordmaterial som transporteras av högvattenflödet. Dessa slamströmmar kan leda till översvämningar, erosion, skred och förstörelse av infrastruktur och bebyggelse.

För vissa delar av sydöstra Sverige visar klimatscenerierna att den ökade medeltemperaturen kan ge en ökad avdunstning från mark och vatten och effekten kan bli att man istället inom dessa områden kan få ett vattenunderskott. Detta innebär att vattennivån i vattendragen kommer att minska och därmed får en mindre mothållande effekt. Idag är inte skred och ras vanligt förekommande inom dessa områden och eftersom grundvatten och portrycksnivån troligen inte kommer att öka bedöms inte dessa områden få en markant ökad skredsannolikhet jämfört med dagens situation.

5.2 Prognostisering av portryck samt förändring av jordegenskaper

I dagens metoder att analysera indata till de beräkningsmodeller som används för att kvantifiera säkerheten mot stabilitetsbrott finns många osäkerheter avseende por- och grundvattentryck. De prognosmetoder som normalt används är osäkra avseende portryck, speciellt hur grundvatten och portryck lokalt förändras kvantitativt.

Den metod som finns beskriven i kapitel 4.1, och som normalt används idag, innehåller en rad osäkerheter och utgör därmed ett ganska grovt instrument för portrycksprognostisering.

Från det att metoden utvecklades på 1980-talet har utvecklingen av numeriska beräkningsverktyg gått framåt och idag ges möjlighet till analyser som tidigare inte var möjliga. Forskare världen över arbetar med att med hydrogeologiska modeller hitta verktyg för prognostisering av

grundvattenförhållanden och portrycksförändringar. Traditionellt sett har liknande analyser inte använts inom klassisk geoteknik, men ju mer komplicerade våra frågeställningar blir desto större krav ställer det på våra verktyg. Det är av vikt att svenska modellverktyg tas fram. I detta arbete är det viktigt med en nära samverkan med SMHI Rossby Centre för att följa regionala klimatscenarier.

För att analysera hur nederbördsökningar kommer att påverka olika typer av jordar krävs ökad kunskap om både de hydrauliska egenskaperna och jordens hållfasthetsegenskaper. Processen är invecklad eftersom portrycksförändringar påverkar spänningsförhållandena i slänten, som i sin tur påverkar de hydrauliska jordegenskaperna såsom porositet och permeabilitet. Därför är flödesegenskaperna starkt kopplade till spännings- och deformationsegenskaperna hos jord. Kunskapen om dessa processer kommer att vara nödvändig att utveckla för att kunna förbättra prognostiseringsmetoder och beräkningsmodeller. En annan viktig aspekt är att ta hänsyn till säkerhetsfaktorns eller skredsannolikhetens beroende av egenskapers variationer och hur dessa påverkas under till exempel ett infiltrationsförlopp.

Sammanfattningsvis kan påpekas att det idag inte finns tillräcklig kunskap kring hur nederbörd påverkar slänter, både naturliga och de som kommit till i samband med bebyggelse. Forskningen kommer att kräva ett nära samarbete mellan bland annat geologer, geotekniker, hydrologer och hydrogeologer för att vi ska kunna lära oss mer om denna komplexa frågeställning. Med dagens numeriska beräkningsverktyg finns dock möjligheter att koppla samman olika delar av såväl ny som redan utförd forskning på ett sätt som tidigare varit svårt.

5.3 Geotekniska fältmetoder och portrycksmätningar

De referensrör som används idag för portrycksprognostisering är de grundvattenrör som ingår i SGU:s grundvattennät. Dessa referensrör är normalt placerade i permeabel jord i akvifärer som antingen är öppna eller slutna. Inga långtidsuppföljningar finns av portryck i lerjordar, som är mer lågpermeabla. Idag utförs normalt portrycksmätningar i stabilitetsutredningar under en kort period, ca 3 månader. Ett fåtal kommuner samt Vägverk och Banverk har inom vissa områden utfört längre mätperioder men någon enhetlig sammanställning finns inte. För att få större säkerhet i prognostiseringsmodeller och öka kunskapen kring påverkan på jordens egenskaper av ökad nederbörd skulle portrycksstationer för långtidsmätningar behöva installeras på ett flertal platser i Sverige. Speciellt viktigt är att följa upp hur den ”falska kohesionen” kan komma att påverkas av förändrat portryck och hur jordars hållfasthetsegenskaper, där detta fenomen uppträder, kan förändras med ändrad vattenmättnadsgrad. Viktigt är även att utföra mer mätningar under långa tidsperioder för olika typer av slänter.

I skredkänsliga områden med så kallad kvicklera kan ett skred snabbt få stora konsekvenser. Var dessa områden finns och hur stor utbredningen är av kvickleran vet man inte. Idag utförs normalt provtagning i enstaka punkter som analyseras vid geotekniska laboratorier och grova ingenjörsmässiga bedömningar av utbredningsområdet av kvickleran utförs utifrån enstaka provtagningar. Forskning pågår kring effektivare fältundersökningsmetoder för kartering av kvicklera.

5.4 Krav på säkerhetsfaktorer och åtgärder

I kapitel 5.1 nämns att med de rekommendationer på säkerhetsfaktorer som finns idag kommer bebyggda områden att behöva åtgärdas. Det finns även många områden som är förstärkta utifrån dagens portrycks- och grundvattensituation och som kan komma att anses otillfredställande stabila enligt dagens rekommenderade säkerhetsfaktorer.

Detta kommer att ställa stora krav på samhällets resurser. Idag har Statens räddningsverk ansvar för fördelning av stadsbidrag till förebyggande åtgärder mot naturolyckor i bebyggda områden. Behovet av bidragsmedel överstiger dock klart tillgängliga medel för åtgärder.

De rekommendationer som finns idag avseende utförande av stabilitetsutredningar är Skredkommissionens rapport 3:95 "Anvisningar för släntstabilitetsutredningar" samt Vägverkets och Banverkets tekniska anvisningar. Dessa grundar sig främst på specifika rekommenderade säkerhetsfaktorer som en slänt skall ha. Utveckling och anpassning av dessa rekommendationer bör utföras med avseende på hur portryck, vattenstånd, erosion med mera påverkar slänters stabilitet, vilka marginaler som kan finnas, hur stor sannolikheten för skred är samt lämpliga tillvägagångssätt och modeller för att rätt värdera effekterna av klimatförändringen.

Kunskapen om hur jorden påverkas av nederbörden samt hur de vanligast förekommande förstärkningsåtgärderna fungerar i samband med ökad nederbörd behöver utvecklas genom utökad forskning. Det är också av stort intresse att närmare studera i vilken utsträckning specifika förstärkningsåtgärder är lämpliga för olika typer av stabilitetsproblem. Kostnaderna för att förstärka områden, som redan är åtgärdade utifrån dagens förhållanden, kan härigenom begränsas.

Erosionen i samband med ökande nederbörd och kraftigare skyfall är en viktig faktor som påverkar säkerheten för skred. Justering av befintliga erosionsskydd samt utökade erosionsskyddande åtgärder kommer att behövas. Utveckling av olika typer av erosionsskydd som kan anpassas till olika miljöer behöver utvecklas. Det finns idag ett antal olika system för erosionsskydd av slänter, men erfarenheten är än så länge liten för hur många av dem fungerar långsiktigt.

5.5 Samhällsplanering

Räddningsverket ansvarar för framtagning av översiktliga stabilitetskarteringar inom ler- och siltområden för bebyggda områden samt framtagning av översiktlig översvämningsskartering längs delar av de större vattendragen. Dessa karteringar överlämnas till de karterade kommunerna och utgör en riskinventering att använda som underlag för utredningar av känsliga bebyggda områden. Detta arbete pågår kontinuerligt och stora delar av de mest skredkänsliga områdena är karterade utifrån dagens förhållanden. Det kommer att vara speciellt viktigt för de kommuner som är karterade att se över markerade känsliga områden och hur dessa kan påverkas av ökad nederbörd utifrån SMHI Rossby Centre:s regionala klimatscenarier.

De översiktliga karteringarna av stabilitetsförhållanden begränsas till redan bebyggda områden. Exploateringsområden och framtida utbyggnads- och planeringsområden omfattas inte. En total nationell kartering av områden med förutsättningar för ras och skred saknas. På uppdrag av regeringen, enligt regleringsbrevet för SGI år 2000, har institutet utvecklat ett förslag på nationell översiktlig kartdatabas över skredförutsättningar i ler- och siltjordar. Databasen är främst avsedd att utgöra underlag för översiktlig planering och riskplanering. Genom sådant underlag kan släntstabilitet tidigt uppmärksammas i planeringsprocessen och därigenom hanteras på ett metodiskt sätt genom plan- och byggprocessen. Utredningen överlämnades till regeringen i mars 2001, men har ännu inte realiserats.

Det finns idag planlagda områden som precis klarar dagens rekommendationer på säkerhet gällande skred och ras. Det ställer högre krav på kommunerna att beakta den ökade nederbördens påverkan på stabilitetsförhållandena samt att eventuellt omarbeta detaljplaner för vissa områden. Detta kommer även att gälla slamströmmar och översvämningssrisker. I samband med planläggning bör det ställas högre krav på geundersökningarnas omfattning samt prognoser för vattennivåförändringar och portryck.

I samhällsplaneringsarbetet vid kommuner, för infrastrukturprojekt etc. krävs att hänsyn till den framtida klimatförändringen måste tas. Detta innebär att högre krav måste ställas på geotekniska undersökningar och utredningar med hänsyn till dimensionerande portryck och grundvattennivåer som tar hänsyn till de prognostiserade nederbördsökningarna.

6 SLUTSATSER

De klimatscenarier som framtagits av SMHI Rosaby Centre tyder på att nederbörden och vattentillgångens årsmedelvärden kommer att öka. Ökningen kan orsakas av fler nederbördsdagar och håftigare regn. Grundvattennivåer och portryck i jorden kommer att påverkas av den ökade nederbörden och erosion i vattendrag och sjöar kommer att öka.

Ökade portryck och grundvattennivåer samt erosion påverkar säkerheten för ras och skred negativt. Detta kan speciellt komma att påverka områden som ligger i anslutning till vattendrag och särskilt i erosionskänslig jord. I slänter med små djup till vattenförande skikt, som snabbare påverkar grundvattentrycket, försämras stabilitetsförhållandena mer än vid stora lerdjup. I områden med jordar där inverkan av ”falsk kohesion” idag bidrar till att höga och branta slänter inte rasar innebär en klimatförändring tillsammans med erosion att stabilitetsförhållandena snabbt försämras.

De prognosmetoder som idag normalt används vid stabilitetsbedömningar är osäkra och utveckling av nya metoder krävs för att kostnadseffektivt kunna utföra rätt förstärkningsåtgärder. För att värdera hur olika nederbördsökningar, till exempel kraftiga skyfall eller långvarig nederbörd, kommer att påverka olika typer av jordar krävs det ökad kunskap.

Bebyggelse, industrier och infrastruktur är till stor del historiskt lokaliserade invid vattendrag och kommer att påverkas av de ökade nederbördsmängderna. Många områden som idag anses stabila kommer att få lägre säkerhet mot ras och skred och kan behöva åtgärdas med stabilitetsförbättrande åtgärder.

Översiktliga stabilitetskarteringar inom bebyggda områden har utförts inom stora delar av Sverige och överlämnats till de karterade kommunerna. Uppföljning av karterade skredkänsliga områden med avseende på portryck och grundvattennivåer är viktiga för kommunerna att påbörja.

Planlagda områden som precis klarar dagens rekommenderade säkerhet för skred och ras kan komma att behöva omarbetas eftersom även små procentuella försämringar av stabilitetsförhållandena påverkar säkerhetsmarginalerna. Behovet av bättre planeringsunderlag avseende skred och ras kommer att öka. Nationell kartering av stabilitetsförhållanden som underlag för planeringsarbetet saknas idag.

De anvisningar och rekommendationer som idag används vid stabilitetsutredningar och som utgör underlag för planarbete, infrastrukturprojekt med mera behöver utvecklas och förändras med avseende på prognostisering av portryck och vattenstånd och deras påverkan på släntstabiliteten.

Försämrad stabilitet inom kvicklereområden, till exempel vid ökad erosion i samband med ökad vattenströmning, kan innebära att ett litet initieellt skred kan spridas framåt och bakåt med fler och större skred som följd. Detta kan påverka stora områden. Metoder för yttäckande kartering av kvicklereområden behöver utvecklas.

Erosionförbättrande åtgärder kommer att behövas i utökad omfattning för att motverka initialskred och försämring av säkerheten för stabiliteten. Ur teknisk, miljömässig och samhällsekonomisk synvinkel behövs en vidareutveckling av olika typer av erosionssskydd.

REFERENSER OCH LITTERATUR

- Alén, C., Bengtsson, P-E., Bergren B., Johansson L., Johansson Å. (2000).** Skredriskanalys i Göta älvdalen – Metodbeskrivning. Statens geotekniska institut. Rapport 58.
- Carlsson, L., Gustafson, G. (1997).** Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. CTH, Geologiska institutionen Publ C62.
- EEA (2004).** Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe. Environmental issue report No 35, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- Fallsvik, J. (1994).** Riksväg Z87 vid Krovåg, Ragunda kommun, Jämtlands län. Delrapport 2. Geotekniska förhållanden, stabilitetsanalyser och förstärkningsförslag. Statens geotekniska institut. Dnr: 2-9309-439.
- Fredén, C. (1984).** Beskrivning till Jordartskartan Vänersborg SO. Sveriges geologiska undersökning, Ae 48.
- Fredén, C. (1986).** Beskrivning till Jordartskartan Göteborg NO. Sveriges geologiska undersökning, Ae 40.
- Hadley Centre (2005).** Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, UK, www.met-office.gov.uk/index.html
- IPCC (2001).** Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. IPCC WGII report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Knutsson, S., Larsson, R., Tremblay, M., Öberg- Högsta, A-L. (1998).** Siltjordars egenskaper. Statens geotekniska institut. Information 16.
- Lundqvist, J. (1969).** Beskrivning till Jordartskarta över Jämtlands län. Sveriges geologiska undersökning, Ca 45.
- Nilsson G., Rosqvist H., Starzek P., Andersson – Sköld Y., Norrman J, (2005).** Föroreningsspridning – konsekvenser av ett förändrat klimat. Delrapport inom uppdraget Jordskred och ras i klimatförändringens spår. Statens geotekniska institut. Varia 560-3.
- Rankka, K., Rydell, B. (2005).** Stranderosion och översvämningar – konsekvenser av ett förändrat klimat. Delrapport inom uppdraget Jordskred och ras i klimatförändringens spår. Statens geotekniska institut. Varia 560-2.
- Rankka, K., Fallsvik, J. (2004).** Detaljerad utredning av stabilitets- och avrinningsförhållanden i Mörviksravinens avrinningsområde, Åre. Åre kommun. Statens geotekniska institut.
- Rankka, K. (2003).** Kwicklera – bildning och egenskaper – Litteraturstudie. Statens geotekniska institut. Varia 526.
- Rydell, B. Fallsvik; J. Lind, B. Ottosson, E. (2001).** Geotekniska konsekvenser av klimatförändringar. Statens geotekniska institut. Varia 507.
- Rydell, B. Fallsvik, J. (SGI). Saarelainen, S. (VTT), (2004).** Klimatförändringar ger en ny geoteknisk värld? NGM 2004.
- Schälin, J. (1997).** Skredriskanalys för nordöstra Göta älvdalen inom Lilla Edets kommun, sektion 5. Statens geotekniska institut. Dnr: 5-9411-555.
- Rydell, B., Fallsvik, J., Johansson, L., Lind, B., Ottosson, E., Rankka, K., Andersson-Sköld, Y. (2003).** Förslag till geotekniska FoU-program inom klimatområdet. Statens geotekniska institut. Varia 530.
- SGU (1993, 1994).** Grundvattensituationen oktober 1993–mars 1994. Sveriges geologiska undersökning. Grundvattennätet.

- Skredkommissionen (1995).** Rapport 3:95. Anvisningar för släntstabilitetsutredningar.
- SMHI (2005a).** Klimatscenarier från 2005, R&D, Rossby Centre, SMHI, www.smhi.se/sgn0106/lf/rc/clmscen05.htm
- SMHI (2005b).** Klimatscenarier från 2005, R&D, Rossby Centre, SMHI, www.smhi.se/sgn0106/klimat/klimscen.htm
- Svensson, C. och Sällfors, G. (1985).** ”Beräkning av dimensionerande grundvattentryck”
Chalmers Tekniska högskola Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande No 78.
- Sällfors, G. (1995).** Geoteknik, Jordmateriallära – Jordmekanik. Chalmers Tekniska högskola.
- Tsagaras, I., Rahardjo, H., Toll, D.G. och Leong, E.C. (2002).** Controlling parameters for rainfall-induced landslides. Computers and Geotechnics, Vol. 29, s. 1-27.
- Vägverket (2002).** Ökade vattenflöden – behov av åtgärder inom väghållningen. Publikation 2002:16, Borlänge.
- WHO (2002).** Floods: Climate change and adaptation strategies for human health. Report on a WHO meeting, London, UK, 30 june-2 july 2002. EUR/02/5036813.

www.srv.se, 2005. Räddningsverket, Naturolyckor, skred och ras.

www.sgu.se, 2005. SGU, Skred och ras.



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se