



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---

# **Bergslänters stabilitet i framtida klimat**

Kandidatarbete inom Bygg och Miljöteknik (BMTX01)

STINA BERG, ANDREAS GRAHN, OLLE LOEB & TOMMY PAP

---

Institutionen för Bygg och Miljöteknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2015

## **Abstract**

Climate change and its possible impacts are increasingly noticed in society today. One aspect that has not been studied closely is its impact on rock slope stability. This paper aims to contribute to the Swedish Geotechnical Institute's work about how climate change potentially can increase the risk in rock slope stability. Through the use of conceptual models on rock slope stability and climate models, on climate change, the report reaches the conclusion that the most important factors that impact slope stability in Swedish crystalline bedrock is increased water pressure and weathering in fractures. The parameters in the conceptual models that are of interest include cohesion, water pressure and the friction angle. The report does not; however, reach a general conclusion if the parameters have a positive or negative effect on the slope stability, since some of them seem to increase the stability while others reduce it. The size of the changes is unknown due to model and climate uncertainties; and geographical and natural variations, which also decrease the reliability of the results.

## **Sammandrag**

Framtida klimatförändringar har blivit allt mer uppmärksammat i dagen samhälle. En aspekt som inte har studeras ingående är hur framtida klimat kommer att inverka på bergsläntstabiliteten. Denna rapport syftar till att utveckla SGI:s, Statens Geotekniska Institutets, tankar om hur klimatförändringar i Sverige påverkar släntstabiliteten hos bergslänter. Med hjälp av konceptuella modeller av olika brottfall hos bergslänter och baserat på prognoser på hur klimatet kommer att förändras utförs en klimat- och känslighetsanalys i syfte att värdera hur mycket olika parametrar påverkar släntstabiliteten. Det konstateras att någon generell slutsats av hur stabiliteten kommer att påverkas i framtida klimat inte kan dras. Flera faktorer samverkar och en del förändringar kan minska stabiliteten, andra kan öka den. Klimat- och känslighetsanalysen visar att en framtida minskning av frostsprängning leder till en ökning av säkerhetsfaktorn och att en framtida minskning av kohesionen och friktionsvinkeln leder till en minskning av säkerhetsfaktorn. Det konstateras också att det finns ett flertal osäkerheter i rapporten som är kopplade till modellernas tillämpbarhet, sambanden mellan klimatparametrar och stabilitetsparametrar, samt naturliga variationer av klimatet och bergsmassa. Därför rekommenderas slutligen framtida undersökningar som studerar dessa samband mer utförligt och utvecklar de konceptuella modellerna för att bli bättre lämpade till analys av klimatförändringar.

## Innehållsförteckning

<b>Abstract .....</b>	<b>1</b>
<b>Sammandrag .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Inledning.....</b>	<b>4</b>
1.1 Syfte .....	4
1.2 Problemformulering .....	4
1.3 Avgränsningar .....	5
1.4 Metodbeskrivning .....	5
<b>2. Bergets uppbyggnad.....</b>	<b>6</b>
2.1 Bergmaterialets uppbyggnad .....	6
2.2 Spricksystem i berg.....	8
2.2.1 Sprickartering med stereo-diagram .....	9
<b>3. Instabilitetsprocesser i bergslänter .....</b>	<b>11</b>
3.1 Grundvattenflöde i sprickor .....	11
3.1.1 Vattentryck i sprickor.....	12
3.2 Vittringsprocesser i kristallint berg.....	13
3.2.1 Mekanisk vittring .....	13
3.2.2 Kemisk vittring.....	13
<b>4. Släntstabilitet .....</b>	<b>14</b>
4.1 Brottfall för slänter.....	14
4.1.1 Strukturstyrda brott .....	14
4.1.2 Storskaliga brott .....	15
4.1.3 Toppling och stenfall.....	16
4.2 Bergmassans hållfasthet.....	16
<b>5. Konceptuella modeller av brottfall .....</b>	<b>20</b>
5.1 Konceptuell modell av plant glidbrott .....	20
5.1.1 Plant glidbrott – utan spänningspricka .....	20
5.1.2 Plant glidbrott - med spänningspricka.....	23
5.2 Konceptuell modell av kilbrott .....	24
5.2.1 Förenklad konceptuell modell av kilbrott .....	25

5.3	Konceptuell modell av toppling.....	26
5.4	Praktiska exempel av släntstabilitetsberäkningar .....	27
<b>6.</b>	<b>Beräkningsgång för de konceptuella modellerna .....</b>	<b>28</b>
6.1	Beräkningsgång för plant brott .....	28
6.2	Beräkningsgång för kilbrott.....	29
6.3	Beräkningsgång för toppling .....	30
<b>7.</b>	<b>Klimatförändringar i Sverige.....</b>	<b>31</b>
7.1	Definition av klimat .....	31
7.2	Faktorer som styr klimatet .....	31
7.3	Mänsklighetens inverkan på klimatet .....	32
7.4	Framtida klimatscenarier .....	32
7.5	Förväntad klimatförändring .....	33
<b>8.</b>	<b>Klimatanalys och känslighetsanalys .....</b>	<b>34</b>
8.1	Indata för de konceptuella modellerna.....	34
8.2	Metod för känslighetsanalys .....	35
8.3	Klimatanalys av kohesion.....	35
8.3.1	Känslighetsanalys av kohesion.....	36
8.4	Klimatanalys av friktionsvinkel.....	36
8.4.1	Känslighetsanalys av friktionsvinkel .....	37
8.5	Klimatanalys av vattentryck .....	37
8.5.1	Känslighetsanalys av vattentryck.....	38
8.6	Klimatanalys av frostsprängning .....	39
8.6.1	Känslighetsanalys av frostsprängning.....	39
<b>9.</b>	<b>Resultat och diskussion .....</b>	<b>40</b>
9.1	Osäkerheter och rimlighet av rapportens analys.....	40
9.2	Framtida arbeten .....	41
<b>10.</b>	<b>Slutsats.....</b>	<b>42</b>
	<b>Litteraturförteckning .....</b>	<b>43</b>
	<b>Bilagor .....</b>	<b>46</b>
	Bilaga 1. Sammanställning av klimatförändringar enligt SMHI:s klimatscenarier....	46
	Bilaga 2. Känslighetsanalys av plant brott och kilbrott.....	48

## 1. Inledning

I dagens samhälle har människans påverkan på klimatet blivit allt mer uppmärksammat. FN:s klimatpanel, IPCC, fastställer i sin klimatrapport *Climate Change 2014* att under de följande 100 åren kommer det ske en klimatförändring med fler stormar, mer extrem nederbörd och ökad torka i olika delar av världen (Field, o.a., 2014). Hur mycket klimatet påverkas beror enligt FN framför allt på mängden utsläpp i CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.

I Sverige har de geotekniska konsekvenserna av klimatförändringen börjat diskuteras. Enligt MSB, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (2008) kommer klimatet att påverka geologiska förhållanden genom förändringar i avrinning, vittringsmiljöer och hydrologiska förhållanden. I en rapport från SGI, Statens Geotekniska Institut (2012) undersöktes effekterna av en ökad nederbördsmängd och vattenflöde på jordslänters stabilitet, dvs. slänter av konsoliderade jordmassor. SGI kom till slutsatsen att stabiliteten bör försämrats och att det kommer råda en ökad risk för jordskred. Få tidigare studier av klimatförändringens effekt på bergsläntstabilitet, dvs. stabiliteten av bergskärningar, har dock presenterats i Sverige. MSB (2008) har genomfört en forskningsöversikt som hänvisar till samband mellan berggras och historiska klimatförändringar men däremot inte effekterna av framtida klimatförändringar.

Bergslänter med en låg stabilitet utgör en samhällsrisk, då rasmassor kan ge upphov till materiella skador samt risk för människoliv. Ett exempel är raset i Ålesund som skedde i mars 2008 där delar av en bergslänt bakom ett bostadshus rasade och träffade nedervåningen (Svahn, 2008). Stora delar av huset rasade och fem personer dog. Ifall förändringen av klimatet påverkar bergslänternas stabilitet negativt kan detta leda till en ökad risk för blockutfall och skred i tidigare stabila slänter. Det är därför viktigt att vid underhåll och vid nya projekt kunna säkerhetsställa släntstabiliteten. Flera infrastrukturprojekt är planerade i Sverige vilka byggs för att ha en lång livslängd och det krävs därför en god grund för riskbedömning av bergslänters stabilitet i framtiden. Sveriges storstäder håller även på att förtätas, vilket kan leda till att det bebyggs på alltmer ogynnsamma platser i anslutning till bergslänter (Stadsbyggnadskontoret, 2009) (Regionplanekontoret, 2009).

### 1.1 Syfte

Projektet ska belysa hur framtida klimatförändringar kan påverka bergslänters stabilitet i Sverige. Rapportens syfte är även att studera hur förändringar i klimatet påverkar geologiska parametrar som är kopplade till bergslänters stabilitet, samt bedöma genom beräkningar och analyser hur parametrarna kan komma att förändra bergsläntstabiliteten i Sverige.

### 1.2 Problemformulering

Världen står inför ett förändrat klimat och frågan är hur det kommer att kunna påverka geologiska förutsättningar. Den huvudsakliga frågeställningen som rapporten hanterar är hur det framtida klimatet kommer att påverka bergslänters stabilitet. Mer specifikt behandlas problemet kring hur framtida svenska klimatscenarier kommer att förändra

t.ex. fryscyklar, nederbörds mängder, temperaturer samt hur dessa förändringar påverkar ingångsparametrar i beräkningar av bergslänters säkerhetsfaktor.

Rapporten hantera också frågeställningar kring vilka brottfall som dominerar i Sverige, vilka konceptuella modeller som representerar brottfallen, samt hur geografiskt läge påverkar stabiliteten.

### **1.3 Avgränsningar**

Rapporten avgränsas till att studera tre brottfall och tre klimatscenarier vilka utvärderas för kristallint berg i Sverige. De tre valda brottfallen är plant brott, kilbrott samt toppling. För de konceptuella modellerna av brottfallen görs sedan ytterligare avgränsningar som redovisas i kapitel 5. De tre valda klimatscenarierna av SMHI, Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, representerar ett heltäckande utfall av framtida klimatförändringar. Scenarierna är RCP2.6, RCP4.5 och RCP8.5 och grundas på SMHI:s analys av IPCC:s rapport *Climate Change 2014*. Scenarierna representerar ett tidsperspektiv på 100 år.

Slutligen hanterar rapporten endast hur oförstärkta bergslänter påverkas av klimatförändringen. Studien tar inte hänsyn till och analyserar inte åtgärder för bergslänternas stabilitet.

### **1.4 Metodbeskrivning**

Rapportens huvudsakliga teoridel samlar in fakta från litteratur i form av vetenskapliga artiklar, statliga instituts hemsidor, konferensrapporter, kurslitteratur, avhandlingar och böcker. Men baserar sig även på fakta från samlingsverk, uppslagsverk och nyhetsartiklar. Med stöd från teoridelen och avhandlingar tas konceptuella modeller fram vilka används för att förenkla ett komplicerat system. Teoridelen och de konceptuella modellerna används sedan för att göra en klimat- och känslighetsanalys av hur de olika parametrarna i modellerna kommer att påverkas av en klimatförändring.

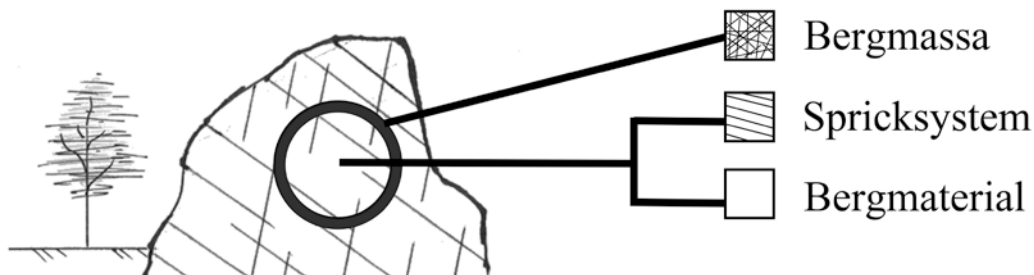
Utgångspunkten för studien är att de finns bergslänter i Sverige där säkerheten mot brott idag är låg men att slänten i nuläget är stabil. Om de förväntade klimatförändringarna tycks ge en försämring av säkerheten mot brott kan detta ge en indikation på att fler bergras kan ske framöver.

## 2. Bergets uppbyggnad

För att förstå de bakomliggande orsakerna till olika bergslänters stabilitet är det viktigt att känna till bergets olika egenskaper, som spricksystem och bergmaterialets uppbyggnad, och vad dessa beror på.

Bergslänter är en del av Sveriges berggrund och kan bestå av flera olika bergarter, dock avgränsas denna studie enbart till den kristallina berggrunden vilken dominerar i Sverige (Andréasson, 2006). Denna geologiska formation är del av den Fennoskandiska urbergskölden som bildades genom avkylning av intruderade magmor långt nere i jordskorpan (Sveriges Geologiska Undersökning, 2015). Olika förhållanden vid bildandet av den kristallina berggrunden i Sverige har lett till variationer i dess struktur och mineraluppsättning (Lindblom, 2010).

Bergmassa är uppbyggd av två komponenter: bergmaterial och spricksystem, se figur 1. Bergslänters egenskaper beror på vilken skala slänter studeras i och påverkar vilka fall av brott som kan förutses. I den minsta skalan utgörs bergslänters egenskaper av intakta bergblock utan större defekter där bergmaterialets egenskaper är den avgörande faktorn för hållfastheten. I mellanskalan avgör istället sprickornas egenskaper mellan blocken hållfastheten. I den största skalan används begreppet bergmassa. Bergmassan är en central term och syftar till en mekanisk helhetssyn av berget, dvs. en samverkan mellan bergmaterialet och spricksystemet.



Figur 1. Illustration av ingående komponenter i en bergmassa.

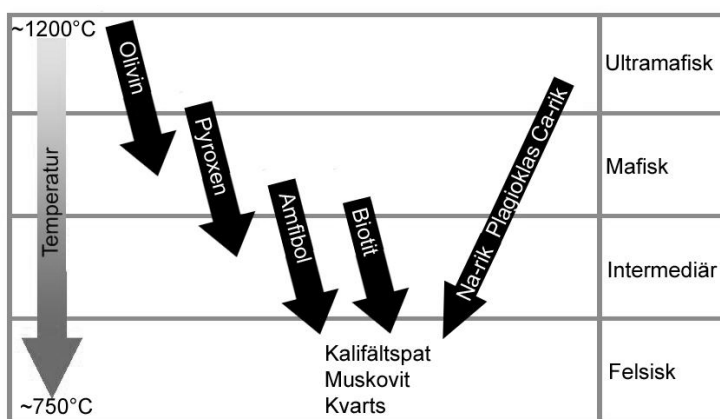
I följande delkapitel förklaras bergets uppbyggnad utifrån bergmassans två komponenter bergmaterial och spricksystem.

### 2.1 Bergmaterialets uppbyggnad

Bergmaterial är sammansatt av små korn av kemiska föreningar; s.k. mineralkorn. Flera sammanfogade mineral i ett bergblock bildar en bergart och klassificeras genom

mineraluppsättning, textur och struktur (Strähle, 2001). Dessa påverkar bergmaterialets mekaniska egenskaper och vittringsbenägenhet (Lindblom, 2010).

Mineralfördelningen dvs. volymandelen av olika mineral bestäms med hjälp av mikroskop genom att studera ett tunnslip, vilket är ett slipat bergprov (Strähle, 2001). Kemiska föreningar av kisel och syre utgör mineralgruppen silikatmineral, vilken är den största beståndsdelen av kristallina bergarter. Den kristallina bergarten bildas när en smälta av magma tränger upp i litosfären, jordskorpan, och kyls ner (Andréasson, 2006). Norman Bowen upptäckte att avkylningen leder till att olika mineral kristalliseras vid olika temperatur och ordningen visas genom Bowens reaktionsserie, se figur 2.



Figur 2. Bowens reaktionsserie.

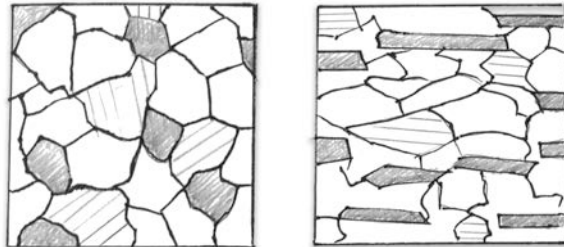
Mörka silikatmineral, även kallade mafiska, som olivin, pyroxen, amfibol och glimmer kristalliseras först vid temperatursänkning. Komplexiteten av mineralstrukturerna ökar med ordningen, den simplaste; olivin, innehåller minst  $\text{SiO}_2$  och kristalliseras först, därefter ökar mängden  $\text{SiO}_2$  gradvis. Kvarts tillsammans med fältspat stelnar sist och bildar ljusa bergmineral, även kallad felsiska. Dessa mineral skapas under lägre energiförhållanden och är därmed mer komplexa och svårare att bryta ner

Bergmaterialets textur styrs av kornstorlek och kornform (Strähle, 2001). Kornstorleken bestäms genom en skala från extremt finkornig (< 0.05 mm) till grovkornig (> 5 mm). Exempel på kornformer är tavelformade kristaller, vilka är avrundade och tunna samt stavformade kristaller, vilka är långa och tunna. Texturen påverkas även av plastiska deformationer i bergmaterialet.

De plastiska deformationerna har bildats under tidsperioder då bergmaterialet varit utsatt för höga tryck och hög temperatur, där kontinentalplattornas rörelse anses vara den huvudsakliga orsaken till att berg deformerar (Lindblom, 2010). Genom deformation uppkommer förändringar av bergmaterialets mineralstruktur, såsom veckning och foliation. Veckning har uppstått genom kompression, extension eller skjuvning av berget. Ett exempel på en veckad struktur är ådergnejsstruktur. Den andra plastiska strukturen, foliation; innebär att skiktmineral bildar skikt vinkelrätt mot högsta tryckriktning (Strähle, 2001).



Deformationer i bergmaterialet ger upphov till olika strukturer. Exempel på mineralstrukturer är massformig struktur och folierad struktur, se figur 3. I massformig struktur är mineralkornen oordnade och ger berget homogena, likformade egenskaper. En folierad struktur, där avlånga mineralkorn riktar sig åt ett håll, ger istället det intakta bergmaterialet anisotropa, olikformade egenskaper. I kristallint berg är gnejsig struktur ett exempel på detta (Andréasson, 2006).

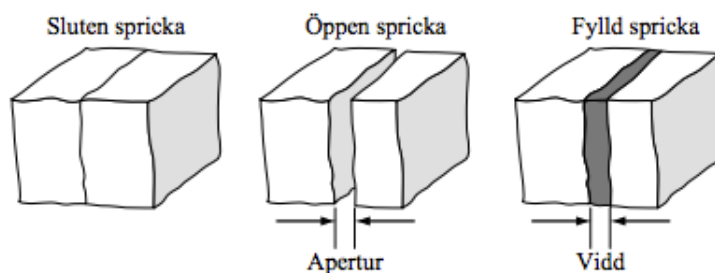


Figur 3. Bilder av tunnslip. Till vänster en massformig struktur och till höger en folierad struktur.

## 2.2 Spricksystem i berg

Kontinentalplattornas rörelse orsakar även spröda strukturer, dvs. sprickor, när det har skett ett mekaniskt brott i bergmassan (Strähle, 2001). Sprickor finns naturligt i alla berg och är direkt avgörande för stabiliteten (Twindale & Vidal Romani, 2005). Dessa kan delas upp i naturliga och artificiella sprickor, där de artificiella har uppkommit genom yttre påverkan, t.ex. vid sprängning av berg medan naturliga sprickor är följden av geologiska processer (Strähle, 2001).

De naturliga sprickorna kan ytterligare delas upp i slutna och öppna sprickor, där vissa av de slutna sprickorna är läkta. De läkta sprickorna har fyllts eller delvis fyllts av urlakade mineral som kvarts, epidot och kalcit, se figur 4. Öppna sprickor innebär att två sprickytor skiljs åt av ett avstånd, apertur. Utrymmet kan vara fyllt av luft, vatten och rester av mineralkorn.



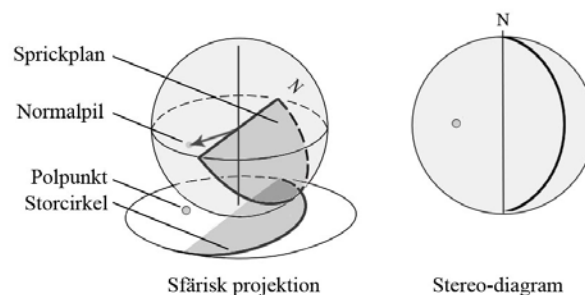
Figur 4. Förenklade bilder av slutna spricka, öppen spricka samt fylld spricka (Strähle, 2001).

Artificiella och naturliga sprickor kan i sin tur delas in i två grupper efter storlekskala, makrosprickor och mikrosprickor. Makrosprickor är sprickor som kan ses med blotta ögat och har en längd på över 1 meter. Mikrosprickor syns enbart under uppförstoring och är sprickor i mineralkornen.

### 2.2.1 Sprickkartering med stereo-diagram

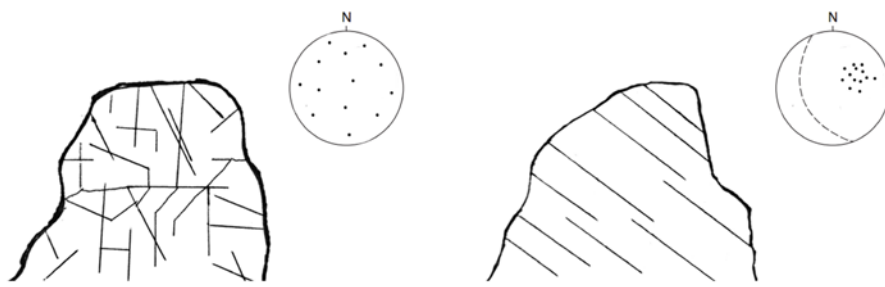
För att underlätta bedömningen av hur stabiliteten påverkas av sprickor krävs en klar bild av sprickornas täthet och orientering i bergslänten. Spricktäthet mäts i sprickfrekvens i enheten sprickor/längdenhet och orientering av sprickplanet representeras genom redovisning av stupning och strykning (Strähle, 2001).

Ett verktyg som används för att underlätta bedömningen av sprickplanens täthet och orientering är ett stereo-diagram. Detta görs genom att presentera ett sprickplans orientering genom sprickriktningarna stupning och strykning. Där stupning anger lutningen i grader från horisontalplan och strykning är vinkeln medurs från norr. Diagrammet gör det möjligt att avläsa sprickplans orientering i 2D genom sfärisk projektion (Lindblom, 2010). Planets normal bildar en pol och redovisas som en prick i rummet som 2D och lutningen bildar en skärningslinje, s.k. storcirkel, som redovisas genom en parabel, se figur 5. Tätheten kan sedan studeras genom att avläsa antalet poler i diagrammet.



Figur 5. Exempel på sfärisk projektion och stereo-diagram.

Bedömning av spricksystemet sker genom att analysera diagrammet och uttyda mönster som polpunkterna bildar. En ansamling av polpunkter tolkas som en sprickgrupp och betyder att slänten har flera sprickor i en dominerande riktning. Sprickgrupper kan vara systematiska eller osystematiska, se figur 6 (Twindale & Vidal Romani, 2005). Homogena bergmassor som har utsatts för likartade spänningstillstånd har systematiska strukturer, dock är det vanligast med en osystematisk fördelning då bergmassans uppbyggnad och dess spänningstillstånd varierar naturligt.



*Figur 6. Bergmassa med systematiska (till höger) och osystematiska (till vänster) sprickgrupper.*

### 3. Instabilitetsprocesser i bergslänter

Bergslänters stabilitet påverkas av naturliga processer som inverkar på bergets hållfasthetsegenskaper. Rapporten avgränsas till att studera hur grundvatten och vittringsprocesser påverkar skärningars stabilitet eftersom dessa anses vara de viktigaste parametrarna för instabilitet som påverkas av klimatförändringar (Larsen, 2007).

#### 3.1 Grundvattenflöde i sprickor

Nederbörd tillför vatten till bergslänterna vilket infiltreras genom marken ner till den befintliga grundvattennivån i jordlagret (Waltham, 2009). En bergslänt får vattentillförsel antingen i form av direkt nederbörd på slänten eller som tillflöde från ovanliggande jordlager.

Bergmassans förmåga att transportera vatten kallas för hydraulisk konduktivitet och kan delas in i primär och sekundär. Den primära hydrauliska konduktiviteten är bergmaterialets förmåga att transportera vatten genom det intakta materialet och den sekundära konduktiviteten är förmågan att transportera vatten genom massans spricksystem (Twindale & Vidal Romani, 2005). Sveriges berggrund består av hårt kristallint berg av låg porositet, vilken vanligen är mindre än 1 procent, detta medför en låg primär hydraulisk konduktivitet. Den totala konduktiviteten beror alltså nästan uteslutande på den sekundära hydrauliska konduktiviteten. Därmed har spricksystemets uppbyggnad en stor signifikans för hela bergmassans förutsättningar för grundvattenvattenflöde.

Enligt Gustafson (2009) är de parametrar som styr förutsättningarna för genomsläpplighet i en bergmassa:

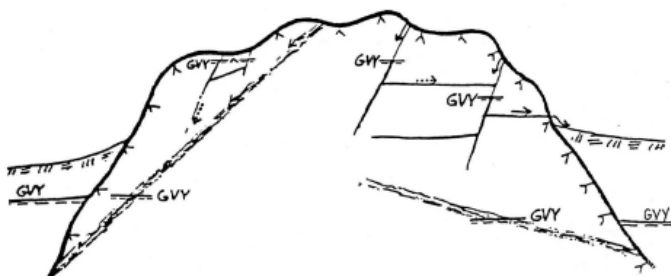
- Den hydrauliska gradienten
- Sprickfrekvensen
- Aperturen (sprickvidden)
- Antalet anslutningar
- Bergarten

Den hydrauliska gradienten, förändringen i vattentryck över längd, spelar roll i flödet, då en hög gradient ger ett ökat potentiellt flöde. Sprickfrekvens har inga direkta empiriska samband att medföra ett högre grundvattenflöde, dock anses parametern öka sannolikheten för att fler sprickor är konduktiva vilket påverkar flödet. Flödet i en spricka anses även bero på aperturens egenskaper såsom dess medelvärde, varians samt andelen slutna sprickare. Antalet anslutningar i spricksystemet anses vara en viktig faktor även enligt Andrén (2006) som påstår att en hög sprickfrekvens ökar sannolikheten för anslutningar. Till sist påverkar bergart genomsläppligheten då ljusa bergarter är generellt mer spröda än mörka och ger i regel fler spricksystem (Gustafson, 2009). Dock krävs det att hänsyn tas till mineralstrukturen vilken påverkar bergets spricksystem. Till exempel ger granit med massformig struktur en blockig uppsprickning med goda möjligheter för anslutningar. Gnejs som däremot har folierad

struktur och parallella sprickplan minskar dessa förutsättningar. Däremot kan den naturliga variationen i samma bergart vara av större betydelse än skillnaden mellan olika bergarter. Därför krävs en noggrann undersökning av bergmassans alla parameterar för att göra en rimlig analys av vattnets påverkan på slänters hållfasthet.

Statistiska beräkningar beror på vilken skala grundvattenflödet studeras i, skalfaktorn är alltså av intresse liksom bergets uppbyggnad och kan delas in i tre skalor. Den minsta skalan representerar läckage i en enskild spricka medan de större skalorna studerar flödet på en större volym eller sträcka.

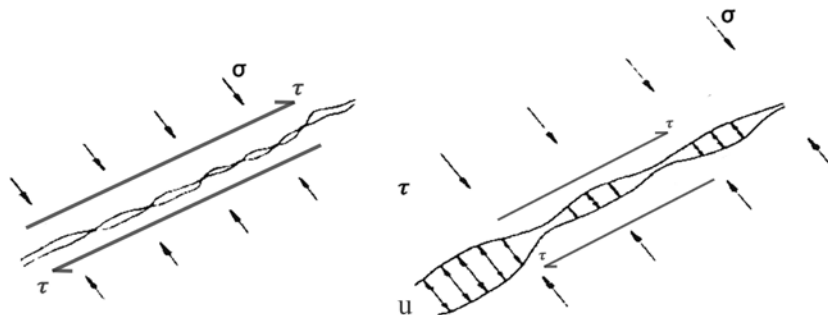
Sammantaget påverkar Gustafsons ovanstående parametrar grundvattenflödet i den minsta skalan. Varje spricka har sin egen grundvattennivå beroende på variation i anslutningsgrad och apertur, se figur 7, utöver detta varierar gradienten över sprickan som i sin tur påverkar flödet vidare till nästa spricka (Andrén, 2006). Med andra ord är förutsättningarna för grundvattenflöde i bergslänter beroende av ett system med flera parametrar som påverkar varandra.



Figur 7. Exempel på hur lokala grundvattennivåer varierar i uppsprucket berg med olika spricksystem (Andrén, 2006).

### 3.1.1 Vattentryck i sprickor

Vatten i en spricka skapar en lyftande kraft, vattentryck, som är en avgörande parameter för bergsläntstabilitet. Trycket motverkar normalspänningen över sprickplanet, den kraft som orsakas av bergets egentygnd. Vattentrycket påverkar även sprickytans skjuvhållfasthet genom att minska den effektiva arean, dvs. mängden kontaktpunkter mellan planen (Larsen, 2007). En del av normalspänningen avlastas av vattentrycket, vilket kan ses i figur 8. Utöver den direkta roll grundvatten har på bergslänter tillkommer även en indirekt verkan genom att tillgången på vatten styr olika typer av vittring (Twindale & Vidal Romani, 2005).



*Figur 8. Förenkling av sprickor med (till höger) och utan (till vänster) vattentryck, där skjuvspänningen minskar vid överförd normalspänning när vattentrycket är stort.*

### **3.2 Vittringsprocesser i kristallint berg**

Den naturliga nedbrytningsprocessen av berg sker genom vittring (Waltham, 2009). Dessa processer delas in i mekanisk och kemisk vittring. Mekanisk vittring inkluderar bland annat frostsprängning och biologisk aktivitet. Kemisk vittring å andra sidan sker genom processerna oxidation, hydrolys och upplösning. Rapporten behandlar inte oxidation eller biologisk vittring, då deras inverkan på stabilitet är oklar. Dessutom påverkar oxidation endast metallrika bergarter som generellt är ovanliga i Sverige, förutom plats specifika undantag.

#### **3.2.1 Mekanisk vittring**

Enligt Twidale & Vidal Romani (2005) sägs frostsprängning vara den mest förekommande typen av mekanisk vittring i de nordiska breddgraderna. Andréasson (2006) drar samma slutsats genom att säga att det är den vanligaste mekaniska nerbrytande processen i Sverige.

Frostsprängning orsakas av att vatten i porerna fryser (Andrén, 2006). Trycket skapas genom att vattenvolymen ökar med 9 procent vid fasövergång och i ett instängt utrymme skapas då ett tryck som spränger upp berget. Med andra ord är förutsättningarna för att frostsprängning ska ske: tillgång på vatten, ett klimat som tillåter frysning, samt ett slutet utrymme för frysning. Frostsprängning har studerats genom flera olika metoder. Däribland genom frysning av vattenmättade porösa bergprover, där E-modulens sänkning i avseende på antalet frostcyklar studerats. Mindre poröst berg, såsom granit, har även testats men osäkerheterna har varit för stora för att dra några slutsatser då vattenmängden som sugits upp varit för små och den naturliga variationen på befintliga defekter för stor.

#### **3.2.2 Kemisk vittring**

Hydrolys sker då mineral är exponerat för syror (Andréasson, 2006). Vatten som är en svag syra vittrar därmed kristallint berg genom att silikatbergarterna bryts ner i flera steg till olika lermineral.

De viktigaste faktorerna som påskyndar den kemiska vittringen är tillgång till vatten, temperatur samt den mekaniska vittringen vilken ökar mängden exponerad yta. Twidale och Vidal Romani (2005) påvisar även att hastigheten beror av mineralinnehåll och sprickfrekvens.

Olika mineral är olika känsliga för kemisk vittring, nedbrytningen sker främst i mineral med störst skillnad i energinivå i förhållande till det som råder på markytan (Andréasson, 2006). Med andra ord bryts mörka mineral ner före ljusa, i ordning enligt Bowens reaktionsserie, se figur 2. Bergartens vittringsbenägenhet beror på mineralinnehåll eftersom vittringsbenägna mineralkorn, t.ex. glimmer, utgör en svag länk i bergmaterial. När dessa korn vittrar frigörs även de mer beständiga kornen, vilka då faller ut.

Sprickfrekvensen anses vara en viktigare faktor för vittringen av bergmassan än mineralkomposition av bergmaterialet, då en hög sprickfrekvens ökar sannolikheten för mineral att ha kontakt med vatten (Twindale & Vidal Romani, 2005).

## **4. Släntstabilitet**

En bergslänts stabilitet beror på mothållande och pådrivande krafter (Waltham, 2009). Mothållande krafter är huvudsakligen på friktion och kohesion, medan den huvudsakliga pådrivande kraften är blockets egenvikt och vattentryck. Kvoten mellan mothållande- och pådrivande krafter kallas säkerhetsfaktor(F), och anger säkerheten mot brott. Om säkerhetsfaktorn understiger 1, dvs. att de mothållande krafterna är mindre än de pådrivande, går slänten teoretiskt i brott.

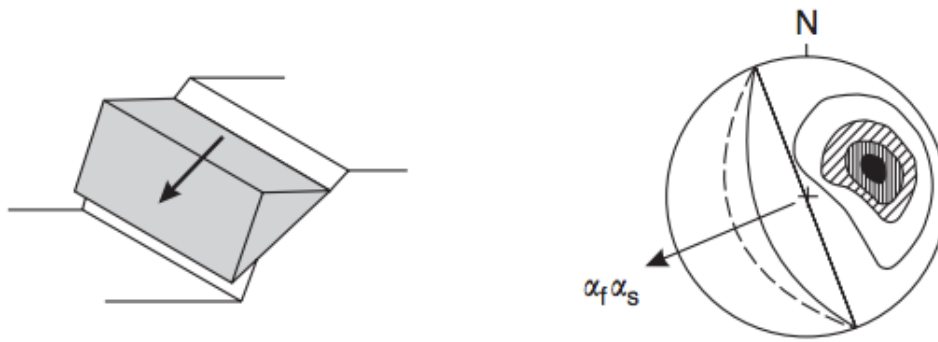
Olika fall av brott delas in i strukturstyrda och storskaliga brott (Lindblom, 2010). I detta kapitel studeras dessa fallen närmare för att bestämma vilken som dominerar i Sverige, därefter studeras vilka hållfasthetsparametrar som är styrande för kategorins stabilitet.

### **4.1 Brottfall för slänter**

Berg har olika egenskaper och beroende på den skala i vilken bergslänten betraktas kan olika fall av brott förutses. Dessa kan delas in i strukturstyrda och storskaliga brott. Strukturstyrda brott dominerar i hårt och uppsprucket berg där brott sker längs med ett svaghetsplan, såsom sprickor. Storskaliga brott sker främst i mjukt och mer uppsprucket berg där brott inte sker längst ett tydligt spricksystem. Slutligen beror brottfallen toppling och stenfall på statiska krafter av intilliggande block, vilket inte tillhör de ovanstående två grupperna.

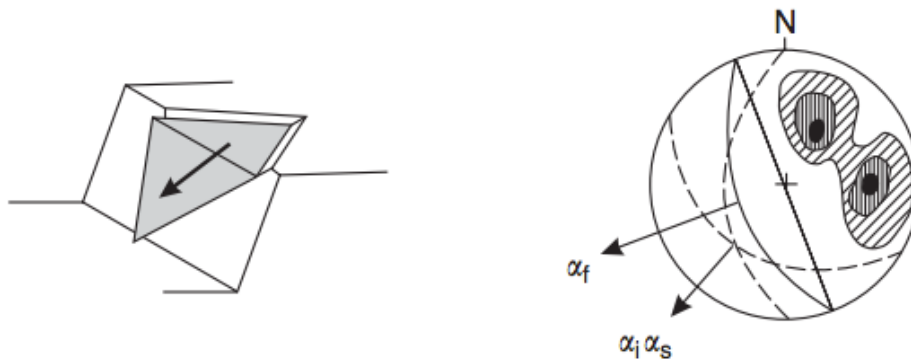
#### **4.1.1 Strukturstyrda brott**

Strukturstyrda brott i bergslänter kan ske på olika sätt beroende på hur sprickorna är orienterade, samt deras frekvens. Den första typen, plant brott, är ett brott där berget glider i ett plan, se figur 9. Detta uppkommer i hård berggrund med en tydlig sprickgrupp med stupningsvinkel flackare än slänten. Planet som skapas måste ha en strykning parallellt med slänten och måste skära slänten ovanför släntfoten. För att slänten sedan ska glida måste sprickstupningen vara högre än friktionsvinkeln, vinkeln som friktionen klarar av att hålla emot.



Figur 9. Exempel på plant brott med tillhörande stereo-diagram (Wyllie & Mah, 2004).

En annan typ av strukturbrott som förekommer i kristallin berggrund är kilbrott. Detta brottfall liknar plant brott men istället för att ha en tydlig sprickgrupp har denna två eller fler korsande sprickgrupper. Kilblock kan därmed glida ut längs en skärningslinje mellan sprickorna, se figur 10. Även dessa sprickor behöver vara flackare än släntens lutning för att brottfallet skall kunna ske. Tillsammans med plant brott utgör kilbrott de farligaste typerna av skred i hårt berg.

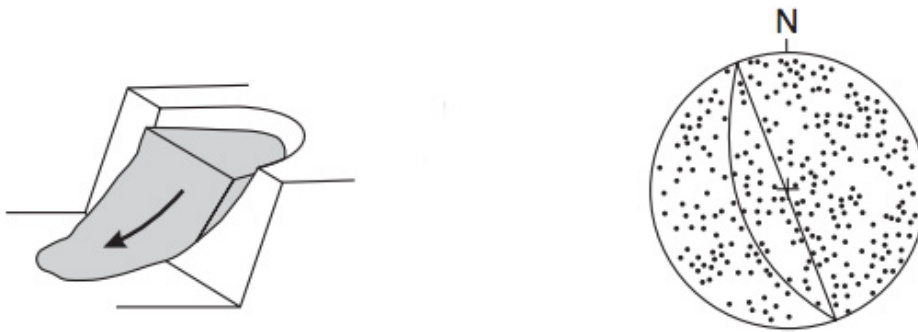


Figur 10. Exempel på kilbrott med tillhörande stereo-diagram (Wyllie & Mah, 2004).

#### 4.1.2 Storskaliga brott

I mjukt eller vittrat berg samt söndersprucket hårt berg förekommer storskaliga brott. På grund av flera sprickgrupper och hög sprickfrekvens agerar bergmassan likt en jordmassa, se figur 11. Beräkningar för detta brottfall ser därför mycket likt ut de cirkulärcylindriska skred som uppkommer i jordslänter.

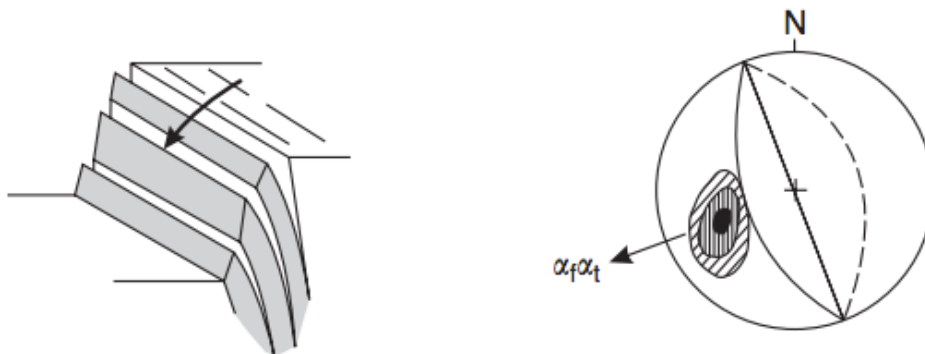




Figur 11. Exempel på storskaligt brott med tillhörande stereo-diagram (Wyllie & Mah, 2004).

#### 4.1.3 Toppling och stenfall

Även med ett spricksystem som lutar in mot slänten kan det förekomma brott. Toppling är ett exempel på när en dominant sprickgrupp lutar in mot slänten och tvingar ett bergblock att "tippa över", se figur 12. Med kraften från egenvikten samt från tilliggande block pressas det yttersta blocket ut från bergets framkant. Stabilitetskontroll av denna typ bygger på statisk analys av krafter som påverkar de instabila blocken.



Figur 12. Exempel på toppling med tillhörande stereo-diagram (Wyllie & Mah, 2004).

Stenfall är ett brottfall som bland annat kan bero på oförsiktig sprängning i bergslänten, vilket ger uppsprickning, och är som det låter stenar som faller ut från slänten. Detta är oftast inte detalj-studerat utan åtgärdas genom förstärkning i form av ett bergnät.

#### 4.2 Bergmassans hållfasthet

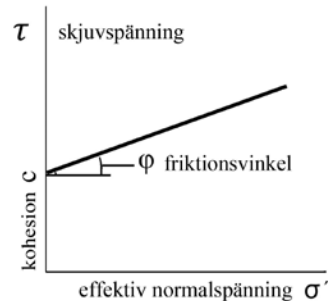
I Sveriges berggrund som främst består av hårt kristallint berg med varierande uppsprickningsgrad sker vanligtvis strukturstyrda brott längst svaghetsplan i bergmassans befintliga sprickor. Därmed blir sprickans hållfasthet avgörande för konceptuella modeller av de brottfall som studerats i rapporten.

Sprickornas skjuvhållfasthet kan beskrivas med hjälp av Mohr-Coulombs brottkriterium och beror på faktorerna kohesion, inre friktionsvinkel och normalspänning (Lindblom, 2010). Brottkriteriet beskrivs enligt ekvationen nedan och redovisas i figur 13.

$c$  = kohesion [Pa]

$\phi$  = friktionsvinkel [°]

$\sigma$  = normalspänning [Pa]

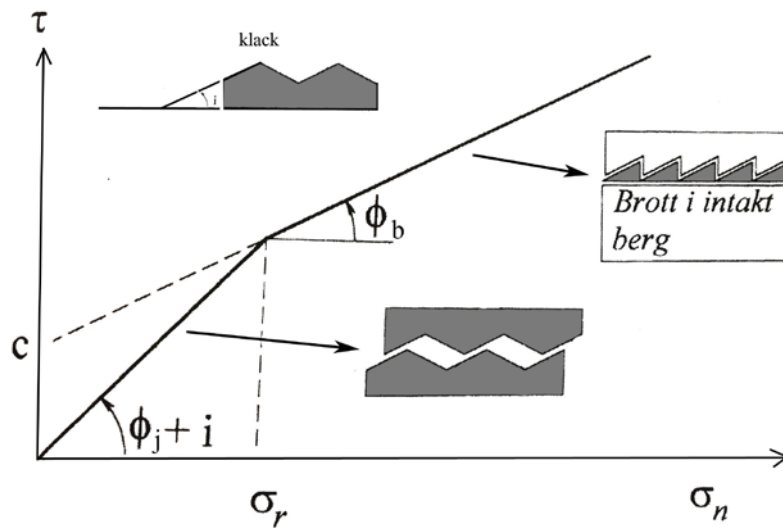


Figur 13. Mohr Columbs brottkriterium

Inre friktionsvinkel representeras av kurvans lutning i Mohr-Coulomb diagrammet och är en enhet som beror på ojämnheter i sprickytan, dvs. råheten. Skilt från kohesionen är denna parameter beroende av spänningsförhållandena i berget. Friktionsvinkeln mellan två helt plana sprickytor kan generellt sägas bero på kornstorleken av bergmaterialet, där grovkorniga bergarter ger en högre friktionsvinkel än finkorniga. Friktionsvinkeln varierar naturligt mellan och inom olika bergarter och bör testas i praktiska fall. Vinkeln bestäms genom skjuvförsök eller med tilt-test, ett test där ett block med genomgående spricka lutar tills övre delen av blocket glider ut.

Kohesion är en term som tagits från jordmekaniken och applicerats till bergmekaniken (Hoek, 1974). Inom jordmekaniken är kohesion en term som förklarar en ökad hållfasthet pga. adhesion, vattnets "sugverkan" på jordmaterialet genom kapillärkrafter, vilket gör att slänten kan stå i större vinkel än sin inre friktionsvinkel. I bergmekaniken motsvarar kohesionen ett motstånd vid skjuvning av klackarna dvs. topparna på kontaktytorna. En brottyta med grovkorning struktur medför många klackar och därmed en högre kohesion.

Mohr-Coulombs brottkriterium är en linjär modell för sprickors hållfasthet. I verkliga fall uppträder dock sprickornas hållfasthet ickelinjärt. Patton (1966) ansåg att råheten påverkade hur brottkurvorna uppträdde och utvecklade den så kallade sågtandmetoden. En modell som likt jordmekanikläran tar hänsyn till en initialt ökad hållfasthet på grund av den samlåsning som uppstår mellan partiklar. I bergmekaniken är det "klackarna" som orsakar den initialt ökade hållfastheten, se figur 14.



Figur 14. Det bilinjära brottkriteriet enligt Patton (1966).

$$\tan(\phi_j + i)$$

$$\phi_j + i$$

$$\tan \phi_b$$

$$\phi_b$$

Innan brott beror skjuvhållfastheten på normalspänning, sprickytans friktionsvinkel, och dilatationsvinkel. Dilatationsvinkeln är vinkeln mellan skjuvspänningen och glidningsriktningen, dvs. hur mycket klackarna lutar mot planet. Dessa parametrar ger sprickans maximala hållfasthet. Efter brott då klackarna är avskjuvade har sprickan istället en residual hållfasthet som beror på kohesion, normalspänning, och basfriktionsvinkel. Där basfriktionsvinkel är friktionsvinkeln för en helt plan brottyta. Den residuala hållfastheten är lägre än den maximala hållfastheten.

Då dilatationsvinkeln är normalfördelad över slänten krävs noggranna mätningar för att få ett representativt värde för en slänt. Barton (1973) föreslog en metod utifrån fältmätningar vilken var att använda JCS, Joint Compression Strength och JRC, Joint Roughness Coefficient och normalspänning för att bestämma dilatationsvinkeln,  $i$ .

Termen JCS är tryckhållfastheten av klackarna och ligger i intervallet (1-100) och erhålls med en schmidthammare enligt anvisningar av ISRM, International Society of Rock Mechanics (Lindblom, 2010). JRC är ett fältprov där råhet och sprickform utvärderas och ges ett värde mellan 0-20, där 0 är en helt slät yta och 20 mycket rå yta (Strähle, 2001). Fältproven tas på stor, 10m, och liten, 10cm, skala.

## **5. Konceptuella modeller av brottfall**

I det här kapitlet introduceras konceptuella modeller för olika brottfall. En konceptuell modell illustrerar och förenklar ett komplicerat system. För de olika brottfallen används konceptuella modeller för att få en överblick över vilka parametrar som påverkar släntens stabilitet samt för att kunna genomföra en känslighetsanalys av parametrarna.

De tre typer av brottfall som studeras är plant glidbrott, kilbrott och toppling. Dessa väljs för att de bedöms dominera i Sveriges berggrund. Brottfalet stenfall väljs bort eftersom det bland annat beror på oförsiktig sprängning, och storskaliga brott faller bort eftersom det oftast sker i mjukt, vittrat eller söndersprucket berg, vilket inte är vanligt i den svenska berggrunden.

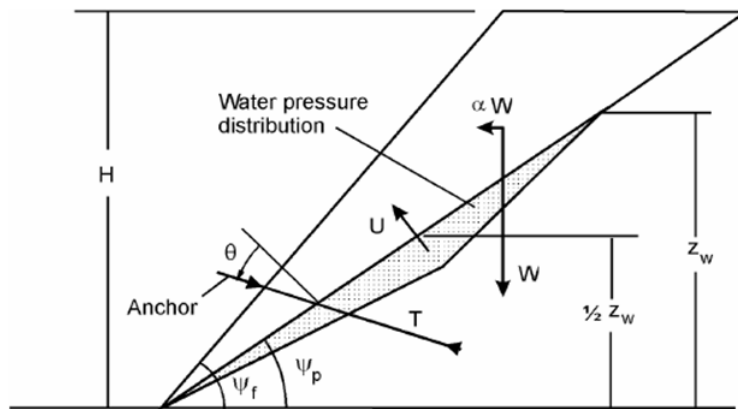
I rapporten används befintliga konceptuella modeller, vilka representerar brottfallen plant glidbrott, kilbrott och toppling. De konceptuella modellerna illustrerar endast hur bergsläntstabiliteten påverkas och inkluderar ingen konsekvensbedömning eller förslag till åtgärder.

### **5.1 Konceptuell modell av plant glidbrott**

Vid ett plant brott glider ett block längs ett plan. Säkerheten mot brott kan beräknas genom en analytisk modell som tar fram säkerhetsfaktorn genom att dividera mothållande kraft med pådrivande kraft (Hoek, 1974). I slänter med säkerhetsfaktor lägre än 1,2 uppkommer det frekvent spänningssprickor, vertikala sprickor genom bergmassan, där det kan ansamlas vatten. Vid beräkningar används därför två olika konceptuella modeller, en som tar och en som inte tar hänsyn till spänningssprickor. Det som skiljer modellerna åt är en ytterligare pådrivande kraft vilken uppkommer vid förekommandet av dessa spänningssprickor.

#### **5.1.1 Plant glidbrott – utan spänningspricka**

Plant glidbrott utan spänningspricka illustreras av en konceptuell modell i figur 15. Ekvation och modell för plant glidbrott utan spänningspricka visas nedan.



Figur 15. Konceptuell modell av plant brott utan spänningspricka (Hoek, 1974).

F	Säkerhetsfaktor mot glidning
H	Slänt höjd [m]
$\psi_f$	Släntens sluttning [°]
$\psi_p$	Glidplanets stupning [°]
z	Djup av spänningspricka [m]
z <sub>w</sub>	Vattendjup i vertikal spricka [m]
$\alpha$	Jordbävningsfaktor [g]
b	Horisontella avståndet från släntkrönet till dragsprickan [m]
$\gamma_r$	Densitet berg [MN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	Densitet vatten [MN/m <sup>3</sup> ]
W	Vikt av kil lutande på spricka [MN]
A	Arean av glidplanet [m <sup>2</sup> ]
U	Lyftkraft pga. Vattentrycket [MN]
c	Glidplanets kohesion [MN/m <sup>2</sup> ]
$\phi$	Glidplanets friktionsvinkel [°]
T	Förankring [MN]

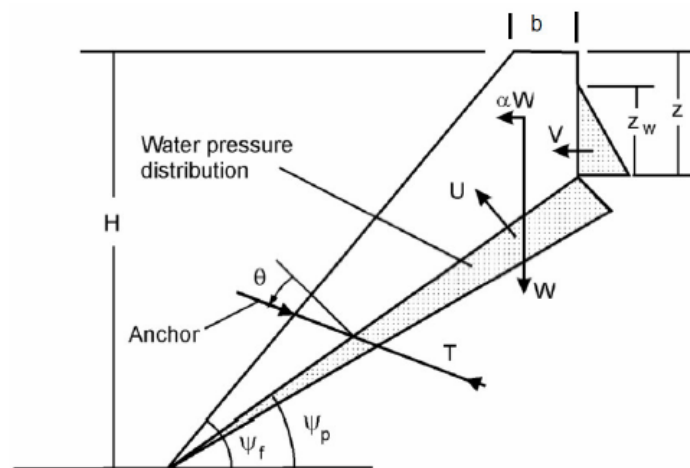
#### 5.1.1.1 Förenklad modell av plant glidbrott utan spänningspricka

Modellen förenklas genom att ansätta  $T=0$ , då slänten antas vara oförankrad. Eftersom typslänten analyseras i svenska klimat antas också krafter från jordbävning vara

försumbara,  $\alpha=0$ . Förenkling av modellen ger följande och motsvarar den konceptuella modellen av plant glidbrott utan spänningsspricka.

### 5.1.2 Plant glidbrott - med spänningspricka

Modellen av plant glidbrott med en spänningspricka illustreras av en konceptuell modell i figur 16. Ekvationen för säkerhetsfaktorn  $F$  visas nedan. På grund av spänningsprickor uppkommer en ytterligare kraft på grund av horisontellt vattentryck,  $V$ .



Figur 16. Konceptuell modell av plant brott med spänningsspricka (Hoek, 1974).

$F$	Säkerhetsfaktor mot glidning
$H$	Slänt höjd [m]
$\psi_f$	Släntens sluttning [°]
$\psi_p$	Glidplanets stupning [°]
$z$	Djup av spänningspricka [m]
$z_w$	Vattendjup i vertikal spricka [m]
$\alpha$	Jordbävningsfaktor [g]
$T$	Förankring [MN]
$b$	Horisontella avståndet från släntkrönet till dragsprickan [m]
$\gamma_r$	Densitet berg [ $\text{MN}/\text{m}^3$ ]
$\gamma_w$	Densitet vatten [ $\text{MN}/\text{m}^3$ ]
$W$	Vikt av kil lutande på spricka [MN]
$A$	Arean av glidplanet [ $\text{m}^2$ ]
$U$	Lyftkraft pga. vattentrycket [MN]
$c$	Glidplanets kohesion [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ]
$\phi$	Glidplanets friktionsvinkel [°]

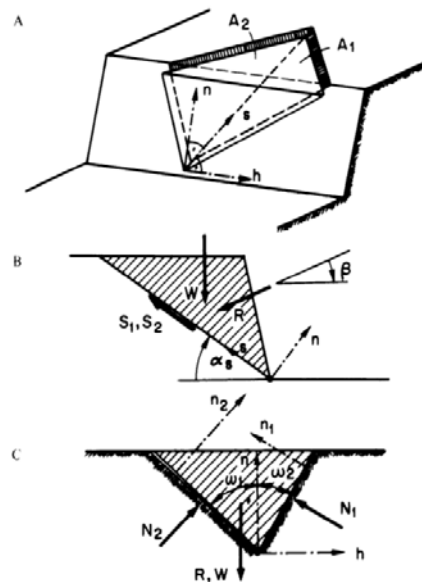


### 5.1.2.1 Förenklad modell av plant glidbrott med spänningsspricka

Modellen förenklas genom att ansätta  $T=0$ , då slänten antas vara oförankrad. Eftersom typslänten analyseras i svenska klimat antas också krafter från jordbävning vara försumbara,  $\alpha=0$ . Förenkling av modellen ger följande och motsvarar den konceptuella modellen av plant glidbrott med spänningsspricka.

## 5.2 Konceptuell modell av kilbrott

Om en bergslänt är utsatt för flera korsande sprickor finns det en möjlighet att en kil kan glida ut längs en skärningslinje mellan sprickorna, se figur 16 (Lindblom, 2010). Denna kil antas vara en stel kropp som kan analyseras med hjälp av en jämviktsanalys (Kovari & Fritz, 1975). Precis som för plant brott beräknas säkerhetsfaktorn mot brott genom att dividera motållande och pådrivande krafter. Beräkningar utgår från en jämviktsanalys som är genomförd av Kovari & Fritz. Deras beräkningsgång av volymer, areor och sträckor redovisas i beräkningsgångssavsnittet, kapitel 8.



Figur 17. Konceptuell modell av kilbrott (Kovari & Fritz, 1975).

F	Säkerhetsfaktorn mot kilbrott
$\phi$	Friktionsvinkeln för brottytan
$c_1$ & $c_2$	Kohesion
$A_1$ & $A_2$	Arean av brottytan
$\alpha$	Lutningen på skärningslinjen
$\beta$	Infallsvinkeln av resultanten
$\omega_1$ & $\omega_2$	Lutning
W	Egentyngden av kilen
$N_1$ & $N_2$	Normalkrafter som verkar på brottytan
R	Resultant av andra krafter som verkar på kilen (ankare, vattenkrafter och jordbävningskrafter)

### 5.2.1 Förenklad konceptuell modell av kilbrott

Kovari & Fritz modell förenklas genom att slänten ansätts att vara oförankrad, dvs. inga reaktionskrafter från ankare förekommer i kilen. Eftersom brottfallet analyseras i svenska förhållanden antas krafter från jordbävning vara försumbara. Modellen förenklas även genom att ersätta resultantkraften  $R \cdot \sin(\alpha + \beta)$  med en lyftkraft pga. vattentryck, U, och pådrivande kraften  $R \cdot \cos(\alpha + \beta)$  försummas. Berget antas bestå av homogent bergmaterial vilket ger  $c = c_1 = c_2$ . Resultatet av förenklingarna leder till att säkerhetsfaktorn för kilbrott blir:



F	Säkerhetsfaktor mot glidning
t	Tjocklek på kolumn [m]
H	Slänt höjd [m]
$\theta$	Släntens sluttning [°]
$\Psi$	Längd av berg kolumnerna [m]
$\sigma$	Enaxiell draghållfasthet av berg kolumnerna [MPa]
$\gamma$	Tunghet berg [MN/m <sup>3</sup> ]
A	Tvärsnitts area av kolumnerna [m <sup>2</sup> ]
$\delta$	Vinkel mellan siktningen och horisontal planet [°]
$\phi$	Vinkel mellan glidplanet och normalen till kolumnerna [°]

#### 5.4 Praktiska exempel av släntstabilitetsberäkningar

De konceptuella modellerna som presenteras i denna rapport används inte alltid vid släntstabilitetsberäkningar. Vid kontroll av släntstabiliteten för en bergslänt i Ulvsunda genomfördes både numerisk och empirisk kontroll (Bagheri, 2013). Vid utförandet gjordes en sprickkartering av sprickornas uthållighet, riktning och intensitet där det konstaterades att det fanns risk för utglidning av block. För att beräkna hur stor risken var användes datorprogrammet UDEC och de parametrar som beaktades var friktionsvinkel, kohesion, densitet, normal- och skjuvstyvhet och E-modul för bergmaterialet. Flera av dessa parametrar används vid beräkning av säkerhetsfaktorn i ovanstående konceptuella modeller.

Vid beräkningen av en jordmassas säkerhetsfaktor används även likartade parametrar som för de konceptuella modellerna för berg. Parametrar som används är tunghet, stabilitetstal och medelskjuvhållfasthet, vilka tillsammans beräknar mothållande krafter och pådrivande tryck (Statens Geotekniska Institut, 2012). Denna rapport beräknar säkerhetsfaktorn på liknande sätt för plant glidbrott och kilbrott genom att ta mothållande kraft genom pådrivande kraft. Vid Ulvsunda kompletterades analysen med att göra en bedömning för sannolikhet för skred. Bedömningen tar hänsyn till osäkerheten som finns i de ingående parametrarna som bestäms utifrån liknande områden och med statistiska undersökningar och mätningar. Liknande undersökning krävs inte i denna rapport eftersom de konceptuella modellerna endast används för att belysa vilka parametrar som påverkas av ett förändrat klimat och inte hur slänterna ska förstärkas.

## 6. Beräkningsgång för de konceptuella modellerna

Utifrån de konceptuella modellerna som är framtagna för de tre olika brottfallen, plant glidbrott, kilbrott och toppling beräknas en säkerhetsfaktor baserat på valda egenskaper. För att få fram de olika parametrarna i de konceptuella modellerna tillkommer nya ekvationer vilka presenteras i detta kapitel.

### 6.1 Beräkningsgång för plant brott

Säkerhetsfaktorn för plant brott beräknas genom att analysera släntens tvärsnitt. Det antas att släntens geometri är konstant och att problemet kan studeras per breddmeter slänt. Den mothållande kraften pga. kohesion tas fram genom att multiplicera arean(A) av brottytan med kohesionen. Eftersom uträkningen beräknas per breddmeter motsvarar arean längden av brottytans tvärsnitt. För att kunna beräkna fallet med en spänningspricka behöver djupet av sprickan (z) också bestämmas.

$$\frac{c}{\sin \alpha}$$

*Utan spänningspricka*

$$\frac{c}{\sin \alpha} - z$$

*Med spänningspricka*

Komponenter av pådrivande och mothållande kraft beräknas genom att ta fram blockets egentynngd(W). Detta beräknas genom att räkna ut blockets volym och multiplicera med bergets tunghet( $\gamma$ ). Eftersom tvärsnittet beräknas per breddmeter motsvarar tyngden blockets densitet multiplicerat med blockets tvärsnittsarea.

$$\frac{1}{2} \cot^2 \alpha - \cot \alpha$$

*Utan spänningspricka*

$$\frac{1}{2} (1 - \cot^2 \alpha - \cot \alpha)$$

*Med spänningspricka*

Ytterligare pådrivande kraft uppkommer pga. lyftkraften orsakat av vattentrycket(U). Kraften beräknas enligt nedanstående ekvationer:

$$\frac{1}{2} \gamma U \sin \alpha$$

*Utan spänningspricka*

$$\frac{1}{2} \gamma U$$

*Med spänningspricka*

I fallet att det uppkommer en spänningspricka i slänten skapas ytterligare en pådrivande kraft pga. horisontellt vattentryck (V). Storleken på kraften beror på hur stor del av sprickan som är fylld med vatten.

6.2.2

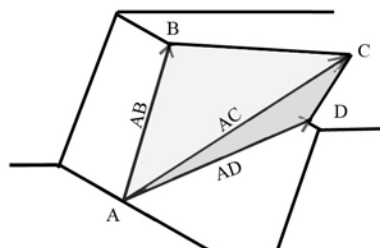
Med spänningspricka

### 6.2 Beräkningsgång för kilbrott

Säkerhetsfaktorn för kilbrott beräknas genom att studera brottkilens tvärsnitt. Den mothållande kraften pga. kohesion tas fram genom att multiplicera kohesionen med arean av brottytan. För att beräkna arean fastställs först vektorer som utgör brottytorna, se figur 19. Arean tas sedan fram genom att beräkna normen av vektorernas kryssprodukt.

$$\vec{AB} = -\sin(\alpha) \tan(\omega) \vec{AC}$$

$$\vec{AD} = \cos(\alpha) \vec{AC}$$



Figur 19. Vektorer för kilbrott.

Blockets tyngd utgör både komponenter för en pådrivande och en mothållande kraft, vilket beräknas genom att multiplicera blockets volym med bergets densitet. Eftersom tvärsnittet inte kan ses i två dimensioner måste volymen av kilen beräknas vilket gör det mer komplicerat än föregående ekvation för plant brott. Kilens vinkel förenklas i denna jämförelse därför till 45 grader så att volymen kan beräknas som en kluven pyramid i två lika delar, där bredden är en komponent av avståndet mellan B och D; och höjden är halva avståndet mellan A och C.

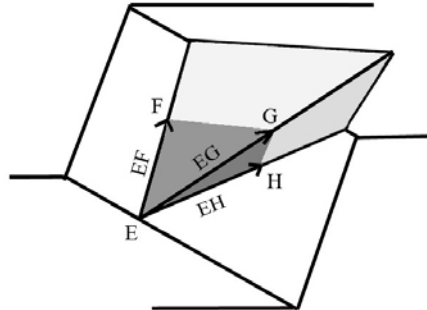
$$V = 2 \sin(\alpha) \tan(\omega) \vec{AC}$$

6.2.2

6.2.3

Ytterligare pådrivande kraft pga. vattentrycket beräknas genom att ställa upp vektorer för delen av kilen som utsätts för vattentryck, se figur 20, och beräkna arean. Vattentrycket beräknas sedan enligt följande ekvation.

$$F = -\gamma_w \sin \alpha \tan \left( \frac{2}{3} \frac{H}{\cos \alpha} \right) \frac{H}{3}$$



### 6.3 Beräkningsgång för toppling

För att bestämma kraften och angreppspunkt parallellt med brottplanet som skapar två trianglar,  $\triangle EFG$  och  $\triangle EGH$ , vars areor alltid blir lika stora. Med detta antagande kan läget för linjen AD beräknas. En parameter  $\Psi$  definieras som det vinkelräta avståndet mellan linjen AD och brottplanet. Med hjälp geometriska och trigonometriska samband kan alla längder beräknas enligt formlerna:

Linjen AD delar upp slänten i tre olika zoner: en passiv zon, en aktiv zon och en trög zon. Den passiva zonen har positiva inre kolumnkrafter, den aktiva negativa och den tröga har inga krafter. Vikten av den knäckta kolumnen är lika stor som de inre kolumnkrafter som agerar på kolumnen. Med detta samband kan säkerhetsfaktorn beräknas för lägsta kolumnen.

## **7. Klimatförändringar i Sverige**

En definition av klimatet samt hur och varför klimatet kommer att förändras i Sverige beskrivs i följande kapitel. Vidare presenteras de klimatförändringar som väntas i Sverige enligt SMHI:s tre beräknade klimatscenarier, vilka skapar en förutsättning för bedömning av hur bergslänters stabilitet kommer påverkas i framtiden.

### **7.1 Definition av klimat**

Klimat definieras som långsiktig statistik över hur vädret varierar på en viss plats under ett specifikt tidsintervall (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Klimat omfattar mer än väder, 2009). Väder kan variera mellan och under olika tidsperioder vilket innebär att mätningar av klimatvärden, t.ex. temperatur, nederbörd och vind, under en tidsperiod av något enstaka år ger resultat som inte kan betraktas som trovärdiga. Klimatstudier samlar därför in väderdata under långa tidsperioder, en typisk klimatlängd som används i meteorologin är 30 år. Under långa mätperioder jämnas variationerna ut, istället kan mer långsiktiga och ihållande mönster uttydas. Med hjälp av dessa är det möjligt att se trender vilka är till hjälp i prognoser om hur klimatet kommer att förändras framöver.

### **7.2 Faktorer som styr klimatet**

Det finns flera faktorer som påverkar klimatet i ett område (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Faktorer som påverkar klimat, 2014). Den främsta faktorn är den mängd värmeenergi från solstrålningen som absorberas av havs- eller jordytan, moln eller atmosfären. Absorptionen medför i sin tur att värmeenergin transporteras med hjälp av havsströmmar och vindar. Ytterligare faktorer som påverkar klimatet är områdets geografiska läge dvs. avstånd till havet eller höjd över havet.

Hur mycket energi som absorberas från solstrålningen beror på områdets latitud, mängden växthusgaser och aerosoler i atmosfären. Områdets latitud beaktas eftersom områden nära ekvatorn får en högre mängd solenergi än områden närmare polerna. Växthusgaserna påverkar genom att de absorberar en del av den värmeenergi som annars transporteras ut i rymden via långvågig strålning från marken och haven. De vanligaste växthusgaserna är vattenånga, koldioxid, metan och dikväveoxid. Aerosoler är däremot inte gaser utan partiklar i luften som påverkar strålningsbalansen. Vissa aerosoler reflekterar solljuset tillbaka ut i rymden och har därför en avkylande effekt. Andra absorberar däremot värmeenergi från solstrålningen och har en uppvärmande effekt.

Vind och havsströmmar fungerar som utjämnande faktorer genom att transportera energi. I stort sett råder det ett överskott av värmeenergi runt ekvatorn och ett underskott vid polerna. Värmeenergi i områden nära ekvatorn omvandlas till rörelseenergi genom att luften och vattnet i området expanderar när de värms upp. Detta innebär att vindarna och strömmarna generellt leder värmeenergi till polerna som följd av värmskillnaden. Utan vindar och strömmar hade det varit varmare närmare ekvatorn och kallare närmare polerna än vad det är idag.



Lufttemperatur över hav ändras långsammare än över landytor. Havet jämnar således ut luftens temperaturskillnader i landområden som ligger nära havet. I inlandet är det däremot större temperaturvariation, till exempel kallare vintrar och varmare somrar. Temperaturen i atmosfären avtar med höjden och av den orsaken har områden som ligger högt över havet generellt kallare klimat än de som ligger lägre på samma breddgrad.

### 7.3 Människlighetens inverkan på klimatet

Den förändring av klimatet som sker idag är mer omfattande än vad som bedöms vara naturligt enligt SMHI (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Klimatförändringar orsakade av människan, 2009). Klimatets variation påverkas av naturliga faktorer men också av människans utsläpp av växthusgaser och aerosoler. Ytterligare en mänsklig faktor är den förändring av jordytan som sker när skogar ersätts av åkermark och städer breder ut sig. Ökade mängd växthusgaser leder som tidigare nämnts till att temperaturen i atmosfären ökar. För aerosolerna visar däremot beräkningar vid Rosby Centre, SMHI:s klimatmodelleringsenhet, att utsläppen av partiklar kan ha orsakat en sänkning av 0,5-1,2 grader över Europa och norra Atlanten på grund av reflektion av solstrålning. Att skog ersätts av åkermark och städer kan också ha en avkylande effekt eftersom de typerna effektivare reflekterar solens kortvågiga strålning. Samtidigt ska det tas i beaktande att avverkning av skog leder till att mer koldioxid frigörs i atmosfären genom förbränning samt att mindre växtlighet binder mindre koldioxid.

### 7.4 Framtida klimatscenarier

FN:s klimatpanel IPCC presenterade år 2013 rapporten *Climate Change 2014* (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Vad är RCP?, 2014). Rapporten är IPCC:s femte utvärderingsrapport och är en sammanställning av forskning om klimatets förändring i framtiden och konstaterar att storleken på förändringen inte är helt bestämd. Omfattningen av förändringen varierar beroende på utsläppen av koldioxidekvivalenter, såsom växthusgaser och aerosoler (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Faktorer som påverkar klimat, 2014). Således beskrivs det framtida klimatet med hjälp av olika scenarier.

I rapporten finns det fyra utarbetade klimatscenarier: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 och RCP2.6 (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Vad är RCP?, 2014). Det första, RCP8.5 beskriver vad som händer om inget görs för att minska utsläpp och öka energieffektiviteten. Enligt detta blir koldioxidutsläppen tre gånger så stora som dagens vid år 2100 och det då även finns ett fortsatt beroende av fossila bränslen. Medeltemperaturen ökar till följd av detta mellan 2.6 - 4.8°C.

RCP6.0 och RCP4.5 är istället stabiliseringsscenarion. Enligt dessa ökar utsläppen av koldioxid, men tack vare politiska åtgärder planar de ut eller minskar runt ett visst år. För RCP6.0 kulminerar utsläppen kring år 2060 och därmed blir medeltemperaturhöjningen mellan 1.4 - 3.1°C. För RCP4.5 kulminerar de kring år 2040 och höjningen blir mellan 1,1 - 2,6°C.

Det sista klimatscenariot, RCP2.6 är det mest optimistiska och förutsätter en kraftfull klimatpolitik. Koldioxidutsläppen når sitt maximum år 2020 och minskar därefter tills

utsläppen blir negativa år 2100. Med dessa åtgärder beräknas medeltemperaturen öka mellan 0.3 - 1.7°C.

IPCC:s klimatscenarier beräknas över hela jordens yta och täcker alla världens områdens klimatförändringar. Storskaliga modeller kräver väldigt mycket datorkraft att beräkna, vilket kompenseras genom att förändringarna beräknas för väldigt stora delområden (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Hur fungerar en klimatmodell?, 2009). Därför blir detaljrikedomen på regional eller lokal skala låg. Krävs det mer detaljer på regional eller lokal nivå får istället en regional modell användas. Då beräkningar på regional nivå sker över ett betydligt mindre område är det möjligt att minska storleken på delområdena i uträkningen drastiskt. På detta sätt uppnås en mycket större detaljrikedom. Klimatförändringar som sker utanför området som täcks av den regionala modellen bestäms av resultatet från en global modell. På detta sätt tar även de regionala modellerna hänsyn till förändringar som sker globalt.

SMHI:s klimatmodelleringsenhet Rossby Centre har genom regionala klimatmodeller och resultaten från IPCC:s klimatscenarier RCP8.5, RCP4.5 och RCP2.6 tagit fram tre klimatscenarier för Sverige.

## 7.5 Förväntad klimatförändring

Det är inte alla klimatfaktorer som påverkar vittringshastigheten eller stabiliteten hos bergslänter vilket gör det nödvändigt att avgränsa vilka klimatförändringar rapporten tar hänsyn till. Nedan presenteras klimatfaktorer som kan påverka bergsläntestabiliteten i framtiden enligt SMHI:s tre klimatscenarier, vilka alla refererar till värden över ett år (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Klimatscenarier, 2015).

- Medeltemperatur
- Antalet dygn med nollgenomgångar
- Total nederbörd
- Största sjudygnsnederbörd
- Totala nederbörden under vintern

Förändringarna av dessa klimatfaktorer beräknas för åren 2071-2100 och jämförs med klimatdata som är insamlad under referensperioden för åren 1971-2000. Förändringarna är skillnaden i medelvärdet mellan båda klimatperioderna. De beräknade konsekvenserna för valda faktorer av de tre klimatscenarierna, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.0 redovisas i bilaga 1.

Sammanfattningsvis kan följande generella mönster ur samtliga klimatscenarier utläsas:

- Storlek på förväntad klimatförändring är korrelerad med mängden koldioxidutsläpp, där en stor mängd utsläpp motsvarar en stor förändring.
- Storleken på förväntad klimatförändring är korrelerad till latitud, där störst förändring sker i norr och minst i söder.

Slutligen kan följande generella värden utläsas ur klimatscenarierna:

- Medeltemperaturen ökar 1 - 8°C.
- Antalet dygn med nollgenomgångar minskar med 0 - 40 dagar.
- Total nederbörd ökar med 0 - 35 %.

- Största sjudygnsnederbörd ökar med 0 - 30%.
- Total nederbörden under vintern ökar med 5 - 35%.

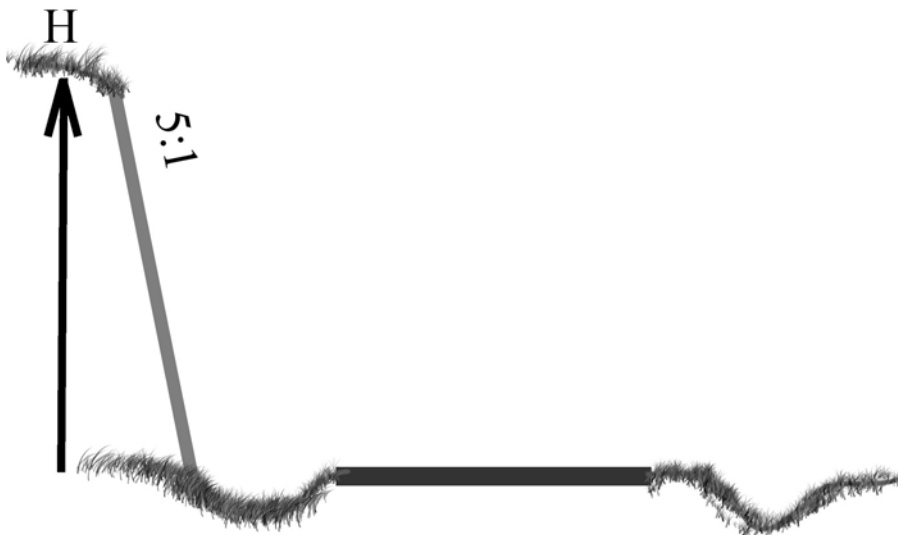
## 8. Klimatanalys och känslighetsanalys

Utifrån tidigare framtagna konceptuella modeller och SMHI:s klimatscenarier analyseras i detta kapitel hur framtida klimat kommer att påverka bergslänters stabilitet. Detta görs genom en klimatanalys där varje parameter i modellerna studeras utifrån SMHI:s klimatscenarier för att bedöma hur de påverkas av ett framtida förändrat klimat. Därefter görs en känslighetsanalys för att ge ett värde på hur stor förändring av varje parameter som krävs för att få en förändring av säkerhetsfaktorn. Slutligen vägs den förväntade förändringen av varje parameter mot resultatet av känslighetsanalysen för att kunna bedöma om klimatförändringarna kommer påverka säkerhetsfaktorn nämnvärt. För att göra denna analys krävs det även att indata för de konceptuella modellerna ansätts.

Utifrån de konceptuella modellerna kan det konstateras att de parametrar som är centrala för stabiliteten är kohesion, vattentryck och friktionsvinkel. Det är därför av intresse att se vilka av dessa parametrar som påverkar bergslänters stabilitet mest, och hur de kan komma att ändras utifrån framtida klimatscenarier.

### 8.1 Indata för de konceptuella modellerna

För att kunna utvärdera känslighetsanalysen ansätts indata för varje konceptuell modell. Gemensamt för de konceptuella modellerna är att tungheten hos berget är  $27 \text{ kN/m}^3$ , vilket är rimligt värde för kristallint berg (Emmaboda Granit, 2015). Släntens höjd väljs till 20 meter med en släntlutning på 5:1, vilket motsvarar vägverkets rekommendationer vid vägöverbyggnad (Trafikverket, 2002).



Figur 21. Släntlutning enligt trafikverkets rekommendationer

Grundvattennivå ansätts till 12m och sprickplanets stupning till 60 grader. Slänterna antas ha en kohesion på  $200 \text{ kN/m}^2$ , vilket baseras på figurvärden från Hoek (1974). Värdena är rimliga för en slänt med hög sprickfrekvens med viss lerfyllnad. Det finns dock osäkerheter i detta antagande då kohesion är en svår parameter att anta. En SKB rapport där 157 tilttest utfördes i Svenskt berg anger att kohesionen bestämdes till  $490 \text{ kN/m}^2$ , vilket är betydligt högre än Hoeks antagande på  $200 \text{ kN/m}^2$  (Lanaro, Öhman, & Fredriksson, 2006). Hoeks antagande väljs ändå eftersom det representerar mer utsatta slänter, vilket är mer relevant att studera ur säkerhetsynpunkt. Friktionsvinkeln ansätts till 30 grader vilket dels grundas på SKB rapporten där den residuala friktionsvinkeln bestämdes till 28.0 - 29.3 grader, samt enligt ett kvalitativt bedömningsindex för Q-systemet. Där sprickor fyllda med små mängder hårda mineralkorn motsvarar en residual friktionsvinkel på ca 25-30 grader (Bandis, Lumsden, & Barton, 1983).

## 8.2 Metod för känslighetsanalys

För att genomföra känslighetsanalysen studeras varje parameter var för sig genom att ansätta en konstant mellan 0-1, dvs. 0-100 %, som multipliceras med parametern. Genom att studera förändringen av säkerhetsfaktorn beroende på konstanten kan procentuellt utslag på säkerhetsfaktorn gentemot egen procentuell förändring av parameterna bestämmas. Därefter beräknas hur många procent förändring av parametern som behövs för att nå en förändring av 0.1 i säkerhetsfaktor. Denna procentuella mängd multipliceras sedan med parameterns storlek och ger den storhet som krävs för att uppnå 0.1 enheter förändring på säkerhetsfaktor. Resultaten redovisas i en tabell för varje parameter i respektive delkapitel. För vattentrycket beräknas ytterligare ett värde, vilket är ökningen i grundvattenhöjd i varje typfall för att åstadkomma en förändring.

I den konceptuella modellen för toppling beaktas inte kohesion, friktionsvinkel eller vattentryck. Denna typslänts faktorer analyseras därför inte i detta kapitel, dock diskuteras möjlig inverkan pga. vattentryck även om det inte finns med i den konceptuella modellen.

## 8.3 Klimatanalys av kohesion

Eftersom kohesionen beror på sprickytans råhet i form av klackar, kommer kohesionen minska vid utslätning av dessa på grund av vittring. Kohesionen beror även på partikelfyllnader mellan sprickytor, en ökning av dessa sänker vidhäftningen och ökar ytans benägenhet för att glida.

Vittringsprocesser orsakade av vatten påverkar kohesionen både mekaniskt och kemiskt. Enligt klimatscenarierna kommer den totala nederbörden att öka vilket leder till att den mekaniska vittringen kommer att öka. Den kemiska vittringen beror däremot på exponerad yta och tillgång på flödande vatten vilken även kommer att bli större enligt klimatscenarierna. En ökning av den mekaniska- och den kemiska vittringen leder därmed till en sänkning av kohesionen i framtida klimat.

Partiklaransamlingar tillkommer genom vittring samt transport av partiklar via vattenflöden. En ökad vittring samt låg flödes hastighet bidrar till en ökad mängd ansamlingar. Däremot kan nederbörd spola ut partiklarna. Utspolning sker vid höga nederbörds mängder och då klimatscenerierna bedömer att mängden intensiva regn kommer öka kan således även utspolningarna öka. Därmed är det svårt att dra slutsatser huruvida eller hur urspolningen av sprickfyllnaden kommer att påverka stabiliteten eftersom de är oklart om partikelansamlingarna kommer att öka eller minska.

Det geografiska läget är av intresse då ökningen av nederbörd varierar över olika områden enligt klimatscenerierna. Trenden för alla klimatscenerier är att nederbörden ökar över hela landet, men mest i norr. Enligt sambandet mellan nederbörd och vittring dras slutsatsen att kohesionen kommer minska över hela landet med störst minskning regionalt i norr.

### 8.3.1 Känslighetsanalys av kohesion

Efter att en känslighetsanalys genomförts kan det konstateras att kohesion har en positiv effekt på säkerhetsfaktorn, se tabell 1. En minskning av kohesionen skulle leda till en instabilare slänt. Det kan också konstateras att en procentuell förändring av kohesionen har en stor effekt på säkerhetsfaktorn. Det krävs en förändring på ca 7,6 kN/m<sup>2</sup> för att ändra säkerhetsfaktorn med 0.1. För beräkningar se bilaga 2 och 3.

Tabell 1. Känslighetsanalys av kohesion

Kohesion	Förändring av F per procent skillnad	Värdesändring i kohesion [kN/m <sup>2</sup> ] som ger 0.1 skillnad i F
Plant glidbrott utan spänningspricka	0,026	7,645
Plant glidbrott med spänningspricka	0,026	7,646
Kilbrott utan spänningspricka	0.026	7,569

### 8.4 Klimatanalys av friktionsvinkel

Friktionsvinkeln beror på råheten vilken i sin tur beror på vittring samt sprickfyllnad. Klimateffekterna på friktionsvinkeln blir därmed likartade med de för kohesion.

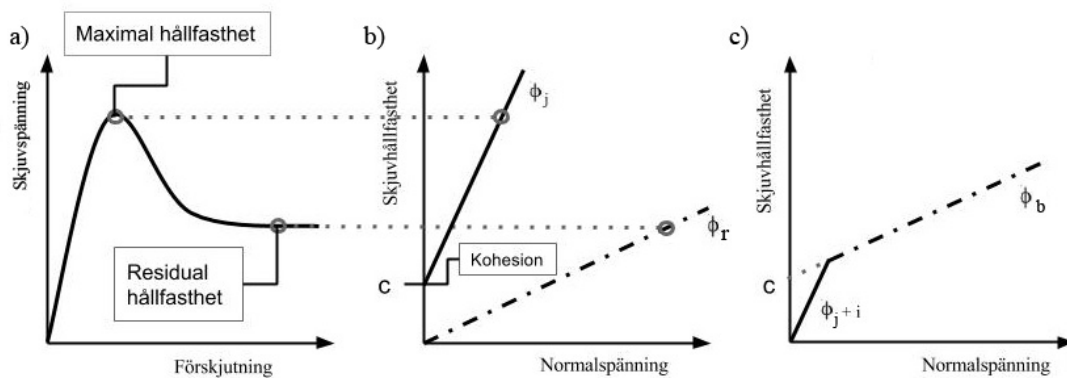
Vittring minskar friktionsvinkeln genom att bryta ner klackarna vilket leder till att ytan blir mindre sträv. Vid brott är klackarna helt nedbrutna och representeras av basfriktionsvinkeln, vilket inte förändras märkvärt av klimatet. I gengäld kommer däremot friktionsvinkeln innan brott att minska vilket kan leda till att tidigare stabila slänter blir instabila.

Partiklaransamlingar sänker råheten och ökar släntens benägenhet till att glida. Det är svårt att dra några slutsatser av hur fyllningarna kommer påverkas i framtiden, då klimatets påverkan av utspolning samt nyansamlingar ännu är oklara.

Eftersom den totala nederbörden ökar över hela Sverige kommer vittringen öka och därmed friktionsvinkeln minska över hela landet, framför allt i norr där nederbörden ökar mest.

#### 8.4.1 Känslighetsanalys av friktionsvinkel

De konceptuella modellerna för strukturstyrda brott använder basfriktionsvinkeln, den minsta möjliga friktionsvinkel, och förutsätter att slänten redan gått i brott. Eftersom de inte tar hänsyn till den maximala initiala friktionsvinkel som uppstår innan brott, se figur 22, kan inte en relevant känslighetsanalys göras. Detta eftersom beräkningar redan studerar värsta fallet. Dock belyser sambandet mellan den totala nederbördsmängden och vittringen, att en ökning av nederbörd medför en ökad vittring att friktionsvinkeln innan brott kommer minska i framtida klimat.



Figur 22. Samband mellan friktionsvinkel och Pattons brottmodell.

a) Samband mellan skjuvspänning och förskjutning.

b) Skjuvhållfasthet i en bergspricka (för maximal  $\phi_j$  och residual  $\phi_r$ ).

c) Bilinjära brottkriteriet av Patton

$$\tau = c + \sigma \tan(\phi_j + i)$$

Bartons empiriska modell använder istället en initial friktionsvinkel som tillgodoräknar en viss ökad hållfasthet till följd av klackarnas dilatationsvinkel. Formeln för vinkeln är en funktion av JCS och JRC vilka också påverkas av klimatet på grund av vittring. Som tidigare konstaterats kommer vittringen antas öka i det framtida klimatet vilket kommer minska slänters säkerhetsfaktor. Storleken på denna förändring är dock oviss pga. osäkerheter i effekterna av vittring på dilatationsvinkeln.

#### 8.5 Klimatanalys av vattentryck

Vattentryckets storlek beror på grundvattennivån och vattennivån i sprickorna. Enligt SMHI:s klimatanalys kommer nederbörden att öka under hela året, framförallt under vinter och vår. En ökad medeltemperatur leder till att nederbörden under vintern i större

utsträckning sker i form av regn istället för snö (Sundén & Maxe, 2010). Den ökade mängden regn under vintern och saknad av avsmältning av snö på våren leder till att grundvattennivån kommer att nå sitt maxvärde för året tidigare. Tidigare har maxnivån uppnåtts i mars eller april, men i framtiden kommer den förskjutas närmre februari, maxnivån kommer dock vara ungefär lika stor. En artikel som diskuterar storskaliga effekter av klimatförändring på vattenresurser i Sverige och Europa påvisar att grundvattennivåns högsta nivå kommer att öka eller minska med 10 cm för olika ställen för Sverige (Arheimer, Donnelly, & Strömquist, 2013). Att den högsta nivån inte ökar mer, utan rentav minskar på vissa håll trots ökad nederbörd, förklaras av en ökad avdunstning till följd av höjd medeltemperatur. Grundvattnets lägsta nivå under året väntas sjunka vilket påvisas i en rapporten från SGU, även detta som följd av ökad avdunstning (Sundén & Maxe, 2010). En tidigare topp har egentligen ingen påverkan på vattentrycket. En lägre minsta nivå och en högre maxnivå kan däremot antas påverka trycket.

Förutom nederbördens inverkan på grundvattennivån påverkas även nivån i sprickor anslutna till grundvattennivån. Enligt SMHI kommer årets största sjudygnsnederbörd att öka (Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Klimatscenarier, 2015). På grund av tröghet i avrinning i olika spricksystem kan extremfall leda till en tillfällig ökning av vattennivån. Sprickor med goda förutsättningar att fyllas upp med vatten och som inte är anslutna till grundvattennivån kan även antas påverkas av en ökad sjudygnsnederbörd. Eftersom den totala nederbörden kommer att öka enligt SMHI kan även den lokala grundvattennivån öka.

Utifrån SMHIs klimatanalys ökar årets största sjudygnsnederbörd och mängden nederbörd i allmänhet mest i norr. Det är även tydligt att dessa parametrar ökar med ökad mängd utsläpp av växthusgaser. Nederbördsmängden ökar mest för scenariot RCP 8.5 och minst för RCP 2.6. Andelen ökad nederbördsmängd är även störst i norr.

### 8.5.1 Känslighetsanalys av vattentryck

Efter genomförd känslighetsanalys kan det konstateras att vattentrycket har en negativ effekt på säkerhetsfaktorn, dvs. en ökning av vattentrycket leder till en mer instabil slänt. Det kan dock konstateras att en procentuell förändring av vattentrycket inte har en stor effekt på säkerhetsfaktorn. Det krävs en förändring på ca 300kN/m för att ändra säkerhetsfaktorn med 0,1 enheter, vilket motsvarar en grundvattenhöjning på ca tre meter. Detta kan anses vara en stor skillnad eftersom forskning endast påvisar en ökning på 10 cm i framtiden (Arheimer, Donnelly, & Strömquist, 2013). För beräkningar se bilaga 2 och 3.

Tabell 2. Känslighetsanalys av vattentryck

Vattentryck	Förändring av F per procentskillnad	Värdesändring i vattentryck [kN/m] som ger 0.1 skillnad i F	Nivåskillnad i Hw[m] som ger 0.1 skillnad i F
Plant glidbrott utan spänningspricka	-0,001359	-305,8	3,8
Plant glidbrott med spänningspricka	-0,009307	-290,3	2,5

Kilbrott utan spänningspricka	-0,001165	-9170	2,7
----------------------------------	-----------	-------	-----

Enligt ovanstående klimatanalys kommer den lägsta nivån för grundvattenytan per år att minska vilket leder till att lyftkraften från vattentrycket minskar. Det i sin tur ökar den mothållande kraften och därmed ökar säkerhetsfaktorn enligt de konceptuella modellerna för strukturstyrda brott. Den högsta grundvattennivån för året ökar eller minskar beroende på geografiskt läge, vilket gör att ingen generell slutsats kan dras om säkerhetsfaktorn för hela landet. I olika delar av landet kommer därför säkerhetsfaktorn öka och i andra delar att minska till följd av förändringen av grundvattennivån.

Klimatanalysen påvisar att årets största sjudygnsnederbörd kommer att öka vilket leder till en tillfällig ökning av vattennivån i sprickor och lokala grundvattennivåer. Båda fallen leder till att den mothållande kraften kommer att minska och därmed kommer även säkerhetsfaktorn att minska för plant glidbrott och kilbrott.

Ökningen av årets största sjudygnsnederbörd kan leda till att sprickorna mellan blocken i brottfallet toppling kan ansamlas vatten vilket likt de strukturstyrda brotten borde ge en ökad pådrivande kraft och därmed en minskad säkerhetsfaktor. Dock krävs det att det regnar extremt mycket och under en längre period för att det ska utgöra en märkbar skillnad och det har därför inte tagits med i den konceptuella modellen för toppling (Bucek, 1995).

## **8.6 Klimatanalys av frostsprängning**

Frostsprängningen är den vanligaste faktorn för mekanisk vittring på svenska breddgrader (Andréasson, 2006). Under antagandet att antalet nollgenomgångar är avgörande för frostsprängning i berg kommer frostsprängningen att minska enligt alla tre klimatscenarierna över hela Sverige då antalet nollgenomgångar kommer att minska. Antagandet tar dock inte hänsyn till sprickans yttemperatur utan endast luftens temperatur. Andra parametrar som vind, isoleringseffekter samt vattenförhållanden tas inte heller med i antagandet. Följaktligen leder det till osäkerheter hur frostsprängningen kommer att påverkas av ett varmare klimat.

### **8.6.1 Känslighetsanalys av frostsprängning**

Om frostsprängningen minskar i framtiden kommer detta leda till mindre pådrivande krafter på bergslänter. I de konceptuella modellerna ingår inte frostsprängning som en parameter. Dock kan denna tolkas som en pådrivande faktor.



## 9. Resultat och diskussion

Rapporten syftar till att undersöka om och hur klimatet kommer att ha någon påverkan på bergslänters stabilitet i Sverige. Litteraturstudien påvisar att de huvudsakliga processerna i bergslänter som påverkas av klimat är vittring och vattentryck i sprickor. Litteraturstudien visar också att strukturstyrda brott är den huvudsakliga orsaken till bergskred i Sverige. Utifrån de konceptuella modellerna för strukturstyrda brott kan det konstateras att de parametrar som har konsekvens på stabiliteten och som påverkas av förändrat klimat är vattentryck, kohesion och friktionsvinkel. I modellen för toppling ingår å andra sidan inte parametrar som enkelt kan kopplas till klimat.

Klimatanalysen påvisar att klimatscenerierna påverkar vattentryck, kohesion, friktionsvinkel och frostsprängning. Analysen visar också att varje enskild parameter påverkas av olika typer av förändringar i klimatet. Genom antagandet om sambandet mellan vattentryck och grundvatten bedöms trycket öka eller minska beroende på geografiskt läge och årstid. Kohesionen och friktionsvinkeln beror på sprickytans egenskaper, vilka huvudsakligen påverkas av vittring. Detta leder till att kohesionen och friktionsvinkeln bedöms minska eftersom de dominerande faktorerna för vittring, tillgång på vatten samt temperatur, kommer att öka genom en ökad total nederbördsmängd och förhöjd medeltemperatur. Slutligen bedöms frostsprängning minska i hela landet, utifrån antagandet att antalet nollgenomgångar påverkar mängden frostsprängning.

Med klimatanalysen och känslighetsanalysen av strukturstyrda brott kan inte en slutsats dras om hur stabiliteten påverkas i framtiden då parametrarna påverkar den både positivt och negativt i olika storhetsgrader. En trolig framtida minskning av frostsprängning tros öka säkerhetsfaktorn medan en minskning av kohesionen och friktionsvinkeln troligen kommer minska säkerhetsfaktorn. Ingen generell ökning eller minskning av vattentrycket går att uttyda vilket gör det omöjligt att koppla parametern till en förändring av säkerhetsfaktorn. För brottfallet toppling konstateras enligt modellen ingen förändring av säkerhetsfaktorn, detta eftersom den inte har någon koppling till klimatparametrar och endast är en mekanisk modell. Känslighetsanalysen och de konceptuella modellerna visar att stabiliteten är ett komplext system, och att det är svårt att bedöma hur mycket kohesion, friktionsvinkel, vattentryck och frostsprängning påverkar stabiliteten.

### 9.1 Osäkerheter och rimlighet av rapportens analys

Rapportens konceptuella modeller är uppbyggda på ett flertal antaganden vilka leder till osäkerheter. Modellernas tillämpbarhet och giltighet kan därför ifrågasättas då det i verkliga fall inte finns brottfall som uppträder helt enligt modellerna. Därutöver är det inte möjligt att välja ett antal typslänter som representerar alla bergslänter och skärningar i Sverige eftersom det finns enormt många skärningar med olika egenskaper på grund av den naturliga variationen.

Klimatanalysen bygger på analys gjord av SMHI på IPCC:s klimatscenarier och medför därmed osäkerheter från deras prognoser. Dessutom finns det även osäkerheter i sambanden mellan klimatparametrarna och stabilitetsparametrarna. Sambanden är antaganden och baseras inte på någon uppmätt korrelation mellan parametrarna. Dessutom granskar rapporten endast ett tidsperspektiv på 100 år, vilket kan ses som kort ur ett geologiskt perspektiv. Dock är detta nödvändigt för rapporten för att kunna se konsekvenserna ur ett infrastrukturs- och samhällsperspektiv.

Känslighetsanalysen studerar endast hur enskilda faktorer påverkar släntstabiliteten och tar inte hänsyn till samverkan mellan flera parametrar, vilket skulle kunna ha ytterligare inverkan på den totala känsligheten för brott. Analysen studerar även endast en given typslänt med bestämd geometri och randvillkor. Därmed kommer inte analysen vara helt representativt för de valda typslänterna. Slutligen hanterar inte heller känslighetsanalysen modellen för brottfallet toppling, eftersom dess ingångsparametrar inte kan direkt kopplas till parametrar som är beroende av klimat. Modellosäkerheten ligger i att brottfallet trots allt kan påverkas av klimatet, t.ex. genom frostsprängning, då det kan komma vatten mellan bergkolumnerna som kan frysa till is.

Trots ovanstående osäkerheter i framtagning av de konceptuella modellerna kan modellen ändå ses som användbar för att se vilka parametrar som påverkar släntstabiliteten. Resultatet av känslighetsanalysen kan även ses som relevant för att kunna se hur mycket eventuell förändring av parametrarna kan påverka släntstabiliteten i ett förändrat klimat. För att utveckla de konceptuella modellerna och känslighetsanalysen krävs ytterligare arbeten inom området.

## **9.2 Framtida arbeten**

Eftersom det finns många osäkerheter i sambanden mellan klimatpåverkan och stabilitetsparametrar föreslås ytterligare undersökningar för att mer exakt utvärdera dessa samband. Förslag på samband som behöver stärkas med mera undersökningar är:

- Vattentryckets förändring i sprickor i avseende på nederbörd. Detta för att bestämma klimatets påverkan av utspolning och ansamling av partiklar.
- Befästning av sambandet mellan frostsprängning i bergmassor och antal dygn med nollgenomgångar.

De konceptuella modellernas osäkerheter beror på att klimatet påverkar bergslänter och skärningar dels genom vittring och frostsprängning på liten skala och att de inte tar hänsyn till belastning över lång tid. Därmed är det svårt att översätta dessa förändringar till modellernas stabilitetsparametrar. Det vore därför av intresse att utveckla modeller som tar hänsyn till småskalig vittring och långsiktig belastning, så kallad krypning.

Rapporten har även uteslutit vissa typer av vittring, biologisk vittring och oxidation från klimatanalysen. Det finns därför anledning att undersöka dessa vittringstypers påverkan av klimatförändringarna.

## 10. Slutsats

Rapportens syfte är att klargöra och belysa hur framtida klimatförändringar påverkar geologiska faktorer som är kopplade till bergsläntstabilitet. Det konstateras att de avgörande brottfallen för kristallint berg som dominerar i Sverige är de strukturstyrda brotten, dvs. att sprickornas hållfasthet är avgörande för släntstabiliteten. De klimatberoende processer som påverkar stabiliteten är vittring och vattentillförsel. Utifrån de konceptuella modellerna av strukturstyrda brott kan det även konstateras att stabilitetsparametrarna som påverkas av förändrat klimat huvudsakligen är vattentryck, kohesion och friktionsvinkel.

Eftersom klimatscenerierna förutser förändringar i grundvattennivåer, bedöms vattentrycket variera beroende på geografiskt läge och årstid. Kohesionen samt friktionsvinkeln bedöms vara korrelerade till vittring som kommer att öka över hela landet pga. ökad nederbörd samt ökad medeltemperatur i luften. Detta anses leda till en minskning av kohesionen och friktionsvinkeln. Slutligen bedöms mängden frostsprängning minska i hela landet, pga. mindre nollgenomgångar.

Med klimatanalysen och känslighetsanalysen av strukturstyrda brott kan inte en slutsats dras om hur stabiliteten påverkas i framtiden då parametrarna påverkar den både positivt och negativt i olika storhetsgrader. En trolig framtida minskning av frostsprängning tros öka säkerhetsfaktorn medan en minskning av kohesionen och friktionsvinkeln troligen kommer minska säkerhetsfaktorn. Ingen generell ökning eller minskning av vattentrycket går att uttyda vilket gör det omöjligt att koppla parametern till en förändring av säkerhetsfaktorn. För brottfallet toppling konstateras enligt modellen ingen förändring av säkerhetsfaktorn, detta eftersom den inte har någon koppling till klimatparametrar och endast är en mekanisk modell. Känslighetsanalysen och de konceptuella modellerna visar på att stabiliteten är ett komplext system, och att det är svårt att bedöma hur mycket kohesion, friktionsvinkel, vattentryck och frostsprängning påverkar stabiliteten. Sammanfattningsvis leder det till att rapporten inte kan ge en tydlig korrelation till klimatet till skillnad från SGI:s rapport om jordslänter.

Rapporten har ett flertal osäkerheter som är kopplade till modellernas tillämpbarhet, sambanden mellan klimatparametrar och stabilitetsparametrar, samt naturliga variationer i klimat och bergsmassa. Därför rekommenderas framtida undersökningar som studerar dessa samband mer utförligt och utvecklar de konceptuella modellerna till att bli bättre lämpade för analys av klimatförändringar.

## Litteraturförteckning

- Amini, M., Majdi, A., & Aydan, Ö. (2008). Stability analysis and the stabilisation of flexural toppling failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Volym 42(5), 751-782.
- Andréasson, P. (2006). *Geobiosfären*. Inowroclaw: Pozkal.
- Andrén, A. (2006). *Degradation of Rock and Shotcrete Due to Ice Pressure and Frost Shattering*. Luleå: Luleå tekniska universitet, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser, Gruv- och berganläggningsteknik.
- Arheimer, B., Donnelly, C., & Strömqvist, J. (2013). Large-scale effects of climate change on water resources in Sweden and Europe: Storskaliga effekter av klimatförändring på vattenresurser i Sverige och Europa. *Journal of Water Management and Research* 69, 201-207.
- Bagheri, M. (2013). Empirisk och numerisk analys av bergslänt vid ulvsunda. *Bergsmekanikdag 2013* (ss. 43-55). Stockholm: BeFo.
- Bandis, S., Lumsden, A., & Barton, N. (1983). Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol.20, no.6, 249-268.
- Barton, N. (1973). Review of new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, vol.7, Issue 4, 287-332.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics* vol. 6, Issue 4, 189-236.
- Bucek, R. (1995). *Toppling failure in Rock Slopes*. Edmonton: University of Alberta, Department of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering.
- Emmaboda Granit. (2015). *Tekniska egenskaper- faktablad*. Hämtat från Emmaboda Granit:  
[http://www.emmabodagranit.se/website1/sd\\_page/10/Faktablad%20B%C3%A5rarp.pdf](http://www.emmabodagranit.se/website1/sd_page/10/Faktablad%20B%C3%A5rarp.pdf) den 16 Maj 2015
- Field, C., Barros, V., Dokken, D., Mach, K., Mastrandrea, M., Bilir, T., o.a. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. *Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- Gustafson, G. (2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Värnamo: Fälth & Hässler.
- Hoek, E. (1974). *Practical Rock Engineering: A slope stability problem in Hong Kong*. Hämtat från Rocscience, Hoeks Corner:  
[https://www.rocsience.com/hoek/corner/7\\_A\\_slope\\_stability\\_problem\\_in\\_Hong\\_Kong.pdf](https://www.rocsience.com/hoek/corner/7_A_slope_stability_problem_in_Hong_Kong.pdf)

- Kovari, K., & Fritz, P. (1975). Stability analysis of rock slopes for plane and wedge failure with the aid of a programmable pocket calculator. *The 16th U.S Symposium on Rock Mechanics* (ss. 25-34). Minneapolis: American Rock Mechanics Association.
- Kvartsberg, S., Ericsson, L., & Thörn, J. (2012). Literature Compendium for Engineering Geology VGE022. Göteborg: Division of Geoengineering at Chalmers University of Technology.
- Lanaro, F., Öhman, J., & Fredriksson, A. (2006). *Rock mechanics modelling of rock mass properties - summary of primary data. Preliminary site description Laxemar subarea - version 1.2*. Oskarshamn: SKB.
- Larsen, L. (2007). *Tillståndsbedömning av bergslänter- metodbeskrivning och praktikfall*. Luleå: Luleå tekniska universitet, Institutionen för samhällsbyggnad, Geoteknologi.
- Lindblom, U. (2010). *Bergbyggnad*. Kina: Printing Malmö AB.
- Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap;. (2008). *Klimatförändringar i skred och ras - En forskningsöversikt*. Karlstad: Statens Geotekniska Institut.
- Patton, F. (1966). Multiple modes of shear in rock. *1st Congress of International Society of Rock Mechanics, I* (ss. 509-513). Ann Arbor: UMI Dissertation Publishing.
- Regionplanekontoret. (2009). *Tätare Stockholm: Analyser av förtätningspotentialen i den inre storstadsregionens kärnor och tyngdpunkter*. Kalmar: Lenanders Grafiska.
- Stadsbyggnadskontoret. (2009). *Översiktsplan för Göteborg: DEL 1 utgångspunkter och strategier*. Göteborg: Stadsbyggnadskontoret.
- Statens Geotekniska Institut. (2012). *Landslide risks in the Göta River Valley in a changing climate : Part 1 - Societal consequences*. Linköping: SGI.
- Stråhle, A. (2001). *Definition och beskrivning av parametrar för geologisk, geofysisk och bergmekanisk kartering av berg*. Stockholm: Geosigma AB.
- Svahn, C. (den 26 03 2008). *Bostadshus kollapsade i Norge*. Hämtat från Dagens nyheter: <http://www.dn.se/nyheter/varlden/bostadshus-kollapsade-i-norge/> den 8 Maj 2015
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2015). *Sveriges berggrund*. Hämtat från Sveriges geologiska undersökning: <http://www.sgu.se/om-geologi/berg/sveriges-berggrund/> den 14 Mars 2015
- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut. (2009). *Hur fungerar en klimatmodell?* Hämtat från SMHI: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/hur-fungerar-en-klimatmodell-1.470>

- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut. (2009). *Klimat omfattar mer än väder*. Hämtat från SMHI: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/klimat-omfattar-mer-an-vader-1.639>
- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut. (2009). *Klimatförändringar orsakade av människan*. Hämtat från SMHI: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimatforandringar-orsakade-av-manniskan-1.3833>
- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut. (2014). *Faktorer som påverkar klimat*. Hämtat från SMHI: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/faktorer-som-paverkar-klimatet-1.3831>
- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut. (2014). *Vad är RCP?* Hämtat från SMHI: <http://www.smhi.se/klimatdata/framtidens-klimat/vagledning-klimatscenarier/vad-ar-rcp-1.80271>
- Trafikverket. (2002). *5.8 Detaljutformning sidoområde, Vägars utformning version 94 S-2*. Borlänge: VV Publikation.
- Twindale, C., & Vidal Romani, J. (2005). *Landforms and geology of Granite Terrains*. Leidens: A.A Balkema.
- Waltham, T. (2009). *Foundations of engineering geology 3rd edition*. London: Taylor & Francis.
- Wyllie, C. (1992). *Foundations on Rock*. London: Spon Press: Taylor & Francis Group.
- Wyllie, C., & Mah, W. (2004). *Rock Slope Engineering 4th edition*. London & New York: Spon Press: Taylor and Francis Group.

## Bilagor

### Bilaga 1. Sammanställning av klimatförändringar enligt SMHI:s klimatscenarioer

Tabell 2. RCP 2.6 (låg medeltemperaturhöjning):

	Hela Sverige	Nordligaste tredjedelen	Mellersta tredjedelen	Sydligaste Tredjedelen	Extremfall	Kommentar
Medeltemperatur:	1-3°C ökning.	2-3°C ökning.	1-2°C ökning.	1-2°C ökning.		
Dygn med nollgenomgångar:	Minus 0-20 dagar.	Minus 0-10 dagar.	Minus 0-20 dagar.	Minus 10-20 dagar.		
Årets totalnederbörd:	0-10 % ökning.	5-10 % ökning.	0-10 % ökning.	0-5 % ökning.	10-15 % ökning. Längst norrut.	
Årets största sjudygnsnederbörd	0-15 % ökning.	0-15 % ökning.	0-15 % ökning.	0-15 % ökning.		Störst ökning i norra Sverige.
<i>nederbörd under vintern:</i>	5-15 % ökning.	5-15 % ökning.	5-15 % ökning.	5-15 % ökning.	0-5 % ökning.	Störst ökning i mellersta Sverige.

Tabell 3. RCP 4.5 (mellanstor medeltemperaturhöjning):

	Hela Sverige	Nordligaste tredjedelen	Mellersta tredjedelen	Sydligaste Tredjedelen	Extremfall	Kommentar
Medeltemperatur:	2-4°C ökning.	3-4°C ökning.	2-4°C ökning.	2-3°C ökning.		
Dygn med nollgenomgångar:	minus 0-30 dagar.	minus 0-20 dagar.	minus 10-20 dagar.	minus 10-30 dagar.		Minskar mest i söder. Mindre i norr.
Årets Totalnederbörd:	5-20 % ökning.	15-20 % ökning.	10-20 % ökning.	5-15 % ökning.		
Årets största sjudygnsnederbörd	10-20 % ökning.	10-20 % ökning.	10-20 % ökning.	10-15 % ökning.	5-10 %.	Störst ökning i mittersta och norra Sverige.
Nederbörd under vintern:	10-15 % ökning.	15-20 % ökning.	10-20 % ökning.		20-25 % ökning.	

					Mellersta Sverige.	
--	--	--	--	--	--------------------	--

Tabell 4. RCP 8.5 (hög medeltemperaturhöjning):

	Hela Sverige	Nordligaste tredjedelen	Mellersta tredjedelen	Sydligaste Tredjedelen	Extremfall	Kommentar
Medeltemperatur:	3-8°C ökning.	5-8°C ökning.	3-6°C ökning.	3-5°C ökning.		
Dygn med nollgenomgångar:	Minus 10-40 dagar.	Minus 10-20 dagar.	Minus 10-30 dagar.	Minus 20-40 dagar.		
Årets Totalnederbörd:	10-35 % ökning.	25-35 % ökning.	15-30 % ökning.	10-20 % ökning.		
Årets största sjudygnsnederbörd	15-30 % ökning.	20-30 % ökning.	15-25 % ökning.	15-20 % ökning.	10-15 % ökning. Södra Sverige.	
<i>nederbörd under vintern:</i>	20-35 % ökning.	25-35 % ökning.	25-35 % ökning.	20-25 % ökning.		



## Bilaga 2. Känslighetsanalys av plant brott och kilbrott

### Invärden

$$\begin{aligned}\gamma_r &:= 0.027 \frac{\text{MN}}{\text{m}^3} & \psi_p &:= 60 \cdot \frac{\pi}{180} & H &:= 20\text{m} \\ \gamma_w &:= 0.01 \frac{\text{MN}}{\text{m}^3} & \psi_f &:= 78.7 \cdot \frac{\pi}{180} & z_w &:= 12\text{m} \\ c_w &:= 200 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} & \phi &:= 30 \cdot \frac{\pi}{180}\end{aligned}$$

### Plant brott- utan spänningspricka

$$\begin{aligned}A_w &:= \frac{H}{\sin(\psi_p)} = 23.094 \text{ m} \\ W_w &:= \frac{\gamma_r \cdot H^2}{2} (\cot(\psi_p) - \cot(\psi_f)) = 2.039 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\ U &:= \frac{\gamma_w \cdot z_w^2}{4 \sin(\psi_p)} = 415.692 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}\end{aligned}$$

### Kohesion

$$F1a(x) := \frac{x \cdot c \cdot A + (W \cdot \cos(\psi_p) - U) \tan(\phi)}{W \cdot \sin(\psi_p)}$$

$$df1a := \frac{F1a(1) - F1a(0)}{100} = 0.026$$

$$y1a := \frac{0.1}{df1a \cdot 100} = 0.038$$

$$\Delta c := y1a \cdot c = 7.645 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### Porvattentryck

$$F2a(x) := \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos(\psi_p) - x \cdot U) \tan(\phi)}{W \cdot \sin(\psi_p)}$$

$$df2a := \frac{F2a(1) - F2a(0)}{100} = -1.359 \times 10^{-3}$$

$$y2a := \frac{0.1}{df2a \cdot 100} = -0.736$$

$$\Delta U := y2a \cdot U = -305.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad +$$

### Plant brott- med spänningspricka

$$z := H \cdot (1 - \sqrt{\cot(\psi_f) \cdot \tan(\psi_p)}) = 8.234 \text{ m}$$

$$z_w := \max[0, z_w - (H - z)] = 0.234 \text{ m}$$

$$b := H \cdot (\sqrt{\cot(\psi_f) \cdot \cot(\psi_p)} - \cot(\psi_f)) = 2.797 \text{ m}$$

$$A_2 := \frac{H - z}{\sin(\psi_p)} = 13.586 \text{ m}$$

$$W_2 := \frac{\gamma_r \cdot H^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right] \cdot \cot(\psi_p) - \cot(\psi_f) = 1.51 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$U_w := \frac{\gamma_w \cdot z_w \cdot A}{2} = 27.018 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_w := \frac{\gamma_w \cdot z_w^2}{2} = 0.274 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### Kohesion

$$F1b(x) := \frac{x \cdot c \cdot A + (W \cdot \cos(\psi_p) - U - V \cdot \sin(\psi_p)) \tan(\phi)}{W \cdot \sin(\psi_p) + V \cdot \sin(\psi_p)}$$

$$df1b := \frac{F1b(1) - F1b(0)}{100} = 0.026$$

$$y1b := \frac{0.1}{df1b \cdot 100} = 0.038$$

$$\Delta c_w := y1b \cdot c = 7.646 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### Porvattentryck

$$F2b(x) := \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos(\psi_p) - x \cdot U - x \cdot V \cdot \sin(\psi_p)) \tan(\phi)}{W \cdot \sin(\psi_p) + x \cdot V \cdot \sin(\psi_p)}$$

$$df2b := \frac{F2b(1) - F2b(0)}{100} = -9.307 \times 10^{-5}$$

$$y2b := \frac{0.1}{df2b \cdot 100} = -10.744$$

$$\Delta U_w := y2b \cdot U = -290.282 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## Invärden

$$\gamma_r := 0.027 \frac{\text{MN}}{\text{m}^3}$$

$$\psi_p := 60 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$H_w := 20 \text{ m}$$

$$\gamma_w := 0.01 \frac{\text{MN}}{\text{m}^3}$$

$$\psi_f := 78.7 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$\omega := 45 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.785$$

$$c_w := 200 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\phi := 30 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$H_w := 12 \cdot \text{m}$$

## Vektorer

$$AB := \begin{pmatrix} \frac{-H}{\sin(\psi_f)} \cdot \tan(\omega) \\ H \cdot \cot(\psi_f) \\ H \end{pmatrix}$$

$$AC := \begin{pmatrix} 0 \\ H \cdot \cot(\psi_p) \\ H \end{pmatrix}$$

$$bd := \left( 2 \cdot \frac{H}{\sin(\psi_f)} \cdot \tan(\omega) \right)$$

$$ABC := AB \times AC = \begin{pmatrix} -151.012 \\ 407.907 \\ -235.505 \end{pmatrix} \text{ m}^2$$

$$h := 0.5 \cdot \sqrt{AC^T \cdot AC} = 11.547 \text{ m}$$

$$A1 := \sqrt{ABC^T \cdot ABC} = 494.627 \text{ m}^2$$

$$A2 := A1 = 494.627 \text{ m}^2$$

$$b := \sqrt{\frac{bd^2}{2}} = 28.843 \text{ m}$$

### Vektorer för grundvattennivå

$$ABw := \begin{pmatrix} \frac{-Hw}{\sin(\psi f)} \cdot \tan(\omega) \\ Hw \cdot \cot(\psi f) \\ Hw \end{pmatrix}$$

$$ACw := \begin{pmatrix} 0 \\ Hw \cdot \cot(\psi p) \\ Hw \end{pmatrix}$$

$$bdw := \left( 2 \cdot \frac{Hw}{\sin(\psi f)} \cdot \tan(\omega) \right)$$

$$ABCw := ABw \times ACw = \begin{pmatrix} -54.364 \\ 146.847 \\ -84.782 \end{pmatrix} m^2$$

$$hw := 0.5 \cdot \sqrt{ACw^T \cdot ACw} = 6.928 \text{ m}$$

$$A1w := \sqrt{ABCw^T \cdot ABCw} = 178.066 \text{ m}^2$$

$$A2w := A1w = 178.066 \text{ m}^2$$

$$bw := \sqrt{\frac{bdw^2}{2}} = 17.306 \text{ m}$$

$$Aw := A1w + A2w$$

$$V := \frac{b \cdot b \cdot h}{3} = 3.202 \times 10^3 \cdot m^3$$

$$W := V \cdot \gamma r = 8.646 \times 10^4 \cdot kN$$

+

$$U := Aw \cdot \frac{Hw \cdot \gamma w}{4} = 1.068 \times 10^4 \cdot kN$$