



Statens geotekniska institut

Säkra bergslänter

Kunskapsläget och fallstudier



SGI Publikation 44

Linköping 2018

SGI Publikation 44

Hänvisa till detta dokument på följande sätt:

SGI 2018, *Säkra bergslänter*, *Kunskapsläget och fallstudier*, SGI Publikation 44, Statens geotekniska institut, Linköping.

Diariernr: 1701-0065

Uppdragsnr: 17009

Beställning:

Statens geotekniska institut
Informationstjänst
580 93 Linköping
Tel: 013–20 18 04
E-post: info@swedgeo.se

Ladda ner publikationen som
PDF, www.swedgeo.se

Bild på omslaget: Johan Berglund, SGI



Statens geotekniska institut

Säkra bergslänter

Kunskapsläget och fallstudier

SGI Publikation 44

Linköping 2018

Förord

Byggnad och förvaltning av infrastruktur och bebyggelse är ett av samhällets största åtaganden och att uppnå ett hållbart samhällsbyggande är en stor utmaning. Grundläggningskostnader inklusive släntarbeten utgör en väsentlig del av den totala investeringskostnaden i bygg- och anläggningsprojekt och samtidigt visar erfarenheter att de största tekniska riskerna är relaterade till geotekniska frågeställningar såsom markens hållfasthet samt hur olika typer av utförande och konstruktioner kan anpassas till markens beskaffenhet. De geotekniska förhållandena måste därför beaktas i den fysiska planeringen för att åstadkomma en hållbar och säker bebyggd miljö samt en effektiv plan- och byggprocess. Ökade risker och skador som uppkommer på grund av bristfällig kännedom om markförhållanden och felaktig grundläggning är ett omfattande problem både för samhället och för enskilda individer och bedöms generera höga merkostnader.

Statens geotekniska institut (SGI) är en myndighet med övergripande ansvar för markbyggande, för att minska risken för ras, skred och stranderosion samt för effektivisering av efterbehandling av förorenade områden.

Genom forskning, rådgivning och kunskapsförmedling arbetar SGI för ett effektivare markbyggande genom att verka för:

- Ökad säkerhet för att minska risker och skador på människor, miljö och egendom
- Minskad miljö- och klimatpåverkan
- Förbättrad kvalitet inom markbyggande
- Ökad produktivitet och minskade kostnader.

Denna rapport ger kunskapsbidrag till förståelsen för de ras i berg som mer eller mindre kontinuerligt inträffar i Sverige.

Inhämtning av kunskap till rapporten har dels skett genom muntliga kontakter med personer i branschen som varit nyckelpersoner för tillgång till information för de beskrivna fallen. Dels har information också sökts via litteratur, både i rapportformat, regelverk, råd och riktlinjer, samt vetenskaplig litteratur.

Uppdragsledare har varit Johan Berglund. I projektgruppen har också Rebecca Bertilsson ingått.

Arbetet har helt finansierats via interna anslagsmedel för SGI:s arbete med naturolyckor och klimatanpassning.

För intern granskning har Miriam Zetterlund och Anders Salomonsson svarat. Den externa granskningen har genomförts av Peter Danielsson, Bergab, Hans Hargelius, Trafikverket, Marcus Hull, Partille kommun, Peter Lund, Ramböll, Björn Sandström, WSP, Björn Stille, Aecom och Urban Åkesson, Trafikverket, vilka lämnat värdefulla synpunkter till rapportens text.

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

Innehållsförteckning

Sammanfattning	8
Summary.....	8
1. Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Syfte och avgränsningar.....	10
1.3 Tillvägagångssätt	11
2. Bergslänter och ras i Sverige.....	13
2.1 Markrörelser.....	13
2.2 Allmänt om slänter	13
2.3 Brott- och rasmekanik	17
2.4 Planering och byggande, lagar och regelverk.....	18
3. Påverkande faktorer.....	21
3.1 Utformning av slänter	22
3.2 Geologi och hållfasthet.....	23
3.3 Väder- och klimatlaster i berget.....	28
3.4 Faktorer som utlöser ras	29
4. Ras i berg – några fall	32
4.1 Fall 1 - Riskreducering	32
4.2 Fall 2 - Bostadsbebyggelse	36
4.3 Fall 3 – Europaväg/motorväg	39
4.4 Fall 4 – Ras mot järnväg	45
4.5 Fall 5 – Ras mot gång- och cykelväg.....	48
5. Diskussion.....	53
5.1 De beskrivna fallen.....	53
5.2 Samhällsbehov	54
6. Några slutsatser	57
7. Litteraturförteckning	59

Sammanfattning

Ras i berg inträffar årligen runt om i Sverige. Vanligen sker rasen utan personskador eller allvarliga olyckor, varför många av rasen inte kommer till allmän kännedom. Även större ras beskrivs ofta enbart i lokalpress. Hur stora riskerna egentligen är för det svenska samhället har inte studerats eller beskrivits i detalj.

För att exemplifiera de risker som föreligger och för att beskriva hur hanteringen av bergstabilitet idag sker vid byggnation och underhåll beskrivs några inträffade fall av ras i rapporten. Potentialen för allvarliga konsekvenser är tydlig för dessa fall, som alla ägt rum de senaste tio åren.

Flera brister i hanteringen av slänter i nära anslutning till infrastruktur och bebyggelse belyses i rapporten. Det faktum att ras i berg sällan förorsakat allvarliga olyckor har lett till att dessa frågor haft låg prioritet, vilket inte är bra då följderna i enskilda fall kan vara katastrofala.

En kunskapsgenomgång av koppling mellan väder- och klimatfaktorer visar att det finns tydliga samband mellan framförallt vattentryck, isbildning och ras i berg.

Strukturer i berggrunden har stor betydelse för om och hur ett ras sker, men för sprängda slänter är geokonstruktion och utförande av sprängningen minst lika viktiga faktorer. I rapporten ges grundläggande geologisk och mekanisk kunskap för förståelsen för problematiken kring stabilitet i bergslänter.

Summary

Rock fall and landslides in rock slopes occur around Sweden on a yearly basis. Normally they do not lead to any fatalities or serious accidents, and are consequently unknown to the major part of the society. Even larger rock fall events are only reported in local media. No national evaluation regarding risk assessment related to landslides in rock slopes have been presented.

To exemplify the potential risks and describe how rock slope stability is managed today during construction and support, some cases of rock slope landslide are presented in the report. The potential risk of serious consequences become apparent from these cases, all from the last ten years.

Literature strongly indicates a correlation between factors related to weather and climate and the occurrence of landslides in rock slopes.

Geological structure has great influence on rock slope stability, both regarding the occurrence of rock fall or rock avalanche and their subsequent development. However, for blasted slopes the construction technique is equally important. The report gives basic geological and mechanical knowledge to the understanding of factors controlling rock slope stability.

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Naturliga och sprängda slänter i berg, i anslutning till samhällets infrastruktur, planlagda områden och andra platser där människan vistas, är vanligt förekommande över hela landet. De allra flesta av dessa utgör inte någon risk för samhället, antingen för att deras geometri eller läge gör att eventuella ras kan ske utan skada för samhällets funktioner eller dess invånare, eller för att slänterna är naturligt stabila, alternativt har konstruerats att bli stabila, under en förutsägbar framtid. Det sker dock årligen en hel del ras av block, sten och bergmassor från berg- och moränslänter, där omfattningen av konsekvenserna varierar stort.

Det finns ingen samlad dokumentation för ras i berg över landet, eller fasta rutiner hur inträffade ras skall rapporteras. Problemets omfattning är inte känd idag, vilket gör det svårt att belysa samhällsriskerna vad gäller bergras på ett bra sätt. Trafikverket, är den myndighet som hanterar en stor del av rasen. Enligt ansvarig personal på Trafikverket är antalet ras årligen i storleksordningen 5 till 10 stycken, vilka på ett eller annat sätt påverkar väg eller järnvägstrafiken inom deras ansvarsområde (Peter Lund, f.d. Trafikverket, nu Ramböll och Erik Stål, Trafikverket, personlig kommunikation). Ras eller blockutfall där kommuner eller privata fastighetsägare är ansvariga sker förstås också, i mer okänd omfattning.

Att ras sker får SGI och andra myndigheter ganska frekvent vetskap om, men inte sällan indirekt via media, från annan myndighet eller tips från allmänheten. Statens geotekniska institut (SGI) har sedan början av 2000-talet samlat information om en del inträffade ras i en databas som går att nå via en kartvisningstjänst (<http://gis.swedgeo.se/rasskrederos-ion/>). Uppgifterna i databasen bygger till stor del på uppgifter som publicerats i media och om raset alls finns med beror framförallt på den publicitet det fått. Uppmärksamheten i media är i sin tur starkt kopplad till rasets konsekvenser. En hel del ras rapporteras enbart i lokalmedia, medan andra inte alls rapporteras för samhället i stort. Även en majoritet av de ras som inträffar där Trafikverket är anläggningsägare och underhållsansvarig undgår övriga myndigheter och allmänhetens ögon, även om de på ett eller annat sätt vanligen finns med i någon av Trafikverkets databaser. För en del av de ras som inträffar varje år finns det potentiella risker för allvarigare konsekvenser. Bristen på systematisk, rikstäckande dokumentation har gjort det svårt att göra bra riskanalyser för samhället i stort.

Tack vare att berggrunden i Sverige domineras av magmatiska och högmetamorfa bergarter med hög hållfasthet har vi normalt kunnat bygga infrastruktur och byggnader i nära anslutning till branta bergslänter. Historiskt har detta skett utan några centrala riktlinjer eller lagkrav och de riskbedömningar som gjorts har skett inom ramen för enskilda projekt, av entreprenörer och beställare. Idag är lagstiftning och reglering bättre, inte minst tack vare Trafikverkets arbete (och tidigare Ban- och Vägverket). För slänter som ligger utanför Trafikverkets ansvarsområde är det vanligen Plan- och bygglagen (PBL) som är styrande för de åtgärder som genomförs för att minska risker för ras, men texterna i denna

lag är allmänt hållna och lämnar utrymme för tolkning. Här anser SGI att det behövs ett arbete för att ta fram verktyg som kan ge stöd och vägledning så att risker hanteras på ett lämpligt och konsekvent sätt över landet.

2015 publicerade SGI en inventering av kunskapsläget i branschen, baserat på enkätundersökning (SGI 2015), som bland annat resulterade i en del rekommendationer för fortsatt arbete. Några av de punkter som lyftes fram i rapporten var:

- Det finns behov av samlad dokumentation av inträffade ras i landet
- Eventuell tillämpning av Eurocode för projektering av bergslänter behöver utredas
- Branschgemensamma vägledningar för projektering och underhåll av bergslänter efterfrågas
- En klassificering av bergslänter med avseende på risk eller underhållsbehov behöver genomföras där sådan saknas
- Hållbarhetsaspekter vid bergbyggande behöver ges ett större fokus
- Pågående klimatförändringars eventuella påverkan på bergstabilitet behöver utredas.

Enkätundersökningen pekade vidare på att den specifika kunskap och de erfarenheter som finns i branschen och som vanligen nyttjas i undersökningsfasen inte alltid kommer projekten till godo i bygg- och underhållsfasen. Entreprenader upphandlas med generella krav på design och förstärkning, medan de anpassningar till de lokala geologiska förutsättningarna som är lämpliga bestäms löpande i den lokala byggorganisationen, med olika lösningar som följd. I enkätundersökningen lyftes även behovet av tydligare regelverk och vägledningar för projektering, byggnation, förvaltning och underhåll. På förvaltningsidan efterfrågades ett riskbaserat klassificeringssystem för att kunna göra rätt prioriteringar av underhållsinsatser.

1.2 Syfte och avgränsningar

I linje med SGI:s uppdrag att minska risken för ras, skred och erosion, arbetar myndigheten med målet **Säkra bergslänter** i samhället, för att bidra till att minska riskerna specifikt för ras i berg, där risk för skadlig inverkan på människa och samhälle föreligger.

Arbetet med 'Säkra bergslänter' är tänkt att genomföras i tre steg, där denna rapport ingår i det första steget:

- Kunskapsuppbyggnad
- Riskanalys och åtgärdsförslag
- Utbildning, kunskapsspridning och implementering.

Konsekvensen av att block rasar, rullar eller studsar nerför en slänt kan bli densamma oavsett om det lösgjorts direkt från berget eller från en sluttning av morän. Processerna för initiering av raset är dock vanligen inte alls desamma och av den anledningen bör man särskilja ras i berg från block som lösgörs från en morän i detta avseende. I denna rapport fokuseras enbart på ras i berg.

Rapporten är tänkt som kunskapsuppbyggnad och som underlag för fortsatt analys av samhällets risker kopplat till problematiken. En sådan analys bör syfta till att peka på de vanligaste orsakerna till och lokalisering av bergras, samt till att belysa omfattning och potentiella konsekvenser för samhället. I denna rapport redogörs för de processer som påverkar släntstabilitet i berg och bergets bakomliggande geologiska egenskaper. Ett av målen är också att personal hos berörda myndigheter ska finna nyttig information i rapporten. Det kan gälla alla typer av handläggare i ärenden där risker kopplade till bergslänter är en del i det som behöver värderas.

I Avsnitt 2 och 3 beskrivs Sveriges bergslänter generellt och bakgrunden till problematiken. I Avsnitt 4 beskrivs ett urval av inträffade fall av ras i berg i landet de senaste tio åren.

Fallen i Avsnitt 4 beskrivs ur olika perspektiv för att ge en bild av orsak och verkan kring dessa och dess potentiella risker. Urvalet av fall har bland annat skett för att beskriva lite olika lägen i förhållande till infrastruktur och olika påverkan på denna. Även vilka faktorer som utlöser ras, liksom koppling till klimat behandlas. Det finns i dagsläget inte statistiskt underlag för kvantitativa analyser för vårt land, som gäller exempelvis frekvens av ras men detta berörs ändå en del i rapporten med hjälp av internationella jämförelser. Fallen kan beskrivas tack vare välvilligt stöd från berörda anläggningsägare och konsulter. Underlagen varierar dock och är långt ifrån kompletta, men har överlag gett en god bild av händelseförlopp, bakomliggande orsaker och handhavande. Då ett samlat underlag saknas i Sverige kan rapporten inte sägas beskriva problematiken för hela landet. Fallen som har valts ut har alla inträffat i prekambrisk, kristallin berggrund, då vår nuvarande bild är att det är i sådan berggrund som den helt dominerande delen av bergras sker för Sveriges del.

1.3 Tillvägagångssätt

För att allmänt beskriva de geologiska processer som påverkar släntstabilitet i berg och vilka faktorer som kan vara utlösande har en litteraturgenomgång genomförts. I första hand eftersträvades att få beskrivningar av svenska ras och i andra hand från ras från länder där de processer som lett fram till och initierat raset kan liknas vid svenska förhållanden. I realiteten är övervägande delen av befintlig litteratur rörande stabilitet i berg publicerad utanför landet och behandlar fall och geologi från vår omvärld. Den dominerande delen av underlagslitteratur till denna rapport är hämtad från norska, kanadensiska och alpina miljöer. Klimat och nederbördsförhållanden har stora likheter med våra, framförallt med Norges och Kanadas, medan geologi och topografi i många fall kan skilja avsevärt. Framförallt i Norge finns dock en hel del sedimentär berggrund med sämre hållfasthetsegenskaper och där, liksom i alperna, finns en topografi som gör att risker och fall av ras inte alltid är jämförbara med svenska förhållanden.

Rapporten fokuserar på geologiska och bergmekaniska processer och samband, men i mindre utsträckning behandlas även planerings-, design- och förvaltningsprocessen.

Sökning efter litteratur har genomförts i nationella och internationella databaser med hjälp av sökord relaterade till problematiken. Direkt, manuell sökning har också skett i internetbaserade databaser med helt eller delvis ”open access”, som exempelvis:

- www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/bibliotek/ (SGI:s litteraturdatabas SGI-Line)
- scholar.google.se
- trid.trb.org (Transportation Research Information Database)
- www.webofknowledge.com (Web of Science)
- www.natural-hazards-and-earth-system-sciences.net
- www.tandfonline.com/georisk
- www.researchgate.net

Utöver detta har litteratur från författarnas egna referensbibliotek och erhållits via de kontakter som knutits i projektet använts.

De fall som beskrivs har valts ut bland fall som kommit till vår kännedom och efter viss dialog med sakkunniga i branschen, vilket också var nödvändigt för att få tillgänglighet till opublicerat informationsunderlag. Målsättningen var att få med fall som beskriver en riskbild för olika delar av samhället. Underlagsmaterial har i huvudsak erhållits från de som hade det övergripande ansvaret för bergslänter hos respektive myndighet, i de aktuella underhållsprojekten. I vissa fall har information även inhämtats från kontrakterad konsult, entreprenör, eller från publicerad rapport.

2. Bergslänter och ras i Sverige

2.1 Markrörelser

Vid internationell granskning över fenomen kopplade till ras och skred hittar man många artiklar över ämnet 'landslides', vilken är en övergripande term som innefattar det som på svenska skulle kunna översättas med markrörelser. Annars är de gängse benämningarna för markrörelser just ras, respektive skred. De svenska definitionerna för dessa termer, enligt TNC 86 Geologisk ordlista (Tekniska Nomenklaturcentralen 1988), SGI och MSB, betecknas markrörelser där enskilda partiklar (upp till blockstorlek) rör sig oberoende av varandra som ras, medan skred innebär att de ingående komponenterna rör sig som en större enhet utan nämnvärd inre deformation. En mer vagt definierad term för nedfall av, eller ras i berg, är bergutfall, flitigt använd i bland annat gruvbranschen. Blockutfall används också i många rapporter, vanligen för att beteckna ras av enstaka block. Termen skred används i Sverige sällan i samband med markrörelser i berg. I denna rapport använder vi generellt termen ras eller bergras i betydelsen markrörelse som i huvudsak omfattar bergkomponenter.

I norsk terminologi (Norges Geotekniske Institutt) skiljer sig bergras ('steinsprang') från bergskred beroende på storleken av markrörelsen. 'Steinsprang' betecknar ras < 100 m³, varefter det istället blir 'steinskred'. Större skred (> 10 000 m³) kallas 'fjellskred'. I engelsk litteratur används begreppet 'rock slope failure' för generell, gravitativ kollaps av bergsluttning, utan kvantifiering. Rockfall (även rock fall) används ungefär synonymt med bergras, omfattande ras < 100 000 m³, och avser då vanligen rörelser som till någon del involverar fritt fall, det vill säga ren gravitation, men inkluderar även rotation, studs och rullande rörelser. Man använder även termerna 'rock slide' och 'rock flow', vilka också helt är kopplade till definitionerna av 'slide', respektive 'flow'. Vid 'slide' är det frågan om ett, eller flera brott längs diskreta plan under skjuvning, medan 'flow' syftar på att massorna beter sig på ett sätt som kan liknas vid en flytande vätska

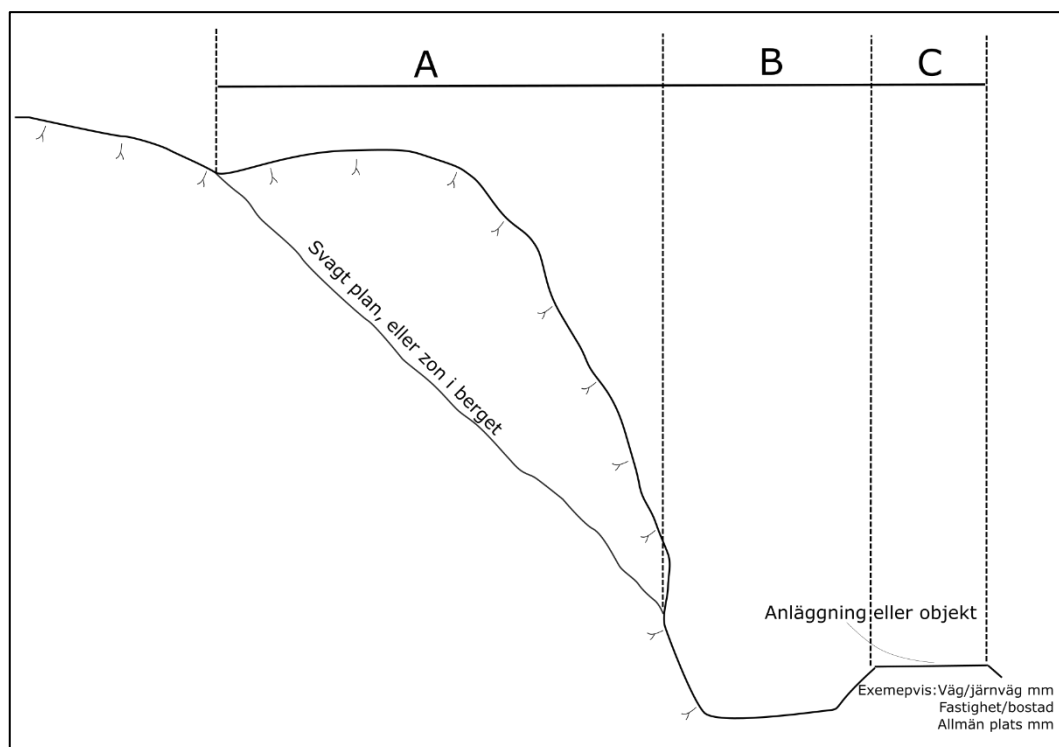
2.2 Allmänt om slänter

Man kan dela in slänter i berg i olika kategorier med tanke på deras stabilitet och förekomst. Här har vi valt tre kategorier enligt följande:

- naturliga slänter skapade utan mänsklig inverkan
- gamla, sprängda slänter
- nyligen anlagda slänter.

Sprängda, eller på annat sätt bergschaktade slänter kallas även "bergskärningar", eller "skärningsslänter" men här har vi valt att använda begreppet *bergslänt* för alla typer av bergdominerade sluttningar och branter. Med *Geokonstruktion* (*bergkonstruktion* inkluderat) avses sådan konstruktion som antingen helt utgörs av jord eller berg, eller vars funktion är beroende av jords och bergs egenskaper. Naturliga slänter brukar inte betraktas

som en geokonstruktion, men kan under vissa omständigheter vara del av sådan. Sprängda slänter är dock alltid en bergkonstruktion.



Figur 1. Schematisk bild över en slänt och en förenklad struktur i berget som utgör ett svaghetsplan. Beteckningarna A-C beskrivs i texten.

Figur 1 kan sägas vara giltig för alla tre kategorier av slänter. Det som behöver beaktas ur samhällets perspektiv avseende risker kan beskrivas med utgångspunkt från figuren. A är ett möjligt hot – en risk för ras. B är bufferten mellan det som utgör rasrisken och det som riskeras att skadas, och C är då objektet som riskerar att påverkas. I en riskanalys behöver alla delar finnas med. Hur sannolikt är det att det sker ett ras av en viss omfattning (A). Kommer rasmassorna i så fall att hamna i B eller nå C? Och om raset, eller delar av raset når C, vilka kan då konsekvenserna bli och med vilken sannolikhet?

Geologiska egenskaper, såsom hållfastegenskaper för intakt berg och för strukturer i berget, samt nedbrytande processer i form av *vittring* och *erosion*, verkar på alla typer av bergslänter oberoende av kategoriindelningen ovan. När det gäller den första kategorin så ser många naturliga slänter i det närmaste identiska ut idag som de gjorde efter senaste deglaciationen för 10 000 till 15 000 år sedan. Undantagen är de platser där det skett ras eller där människan gjort någon förändring i naturen. En del naturliga slänter kan också vara täckta med postglaciala sediment och vegetation. Effekten av nedbrytande processer på släntens stabilitet varierar dock stort, beroende både på de naturliga geologiska strukturernas egenskaper och på de lokala förutsättningarna i övrigt (naturliga och skapade). Tidsaspekten är också alltid viktig för stabilitets- och hållfasthetsfrågor – ju längre tid nedbrytande processer fått verka, desto större sannolikhet att hållfastheten i enskilda strukturer närmar sig en kritisk gräns.

De **naturliga bergslänterna** i Sverige har normalt samma geometriska form nu som då de blottades efter senaste deglaciationen. Ismassan var inte helt immobil utan flöt snarare långsamt över landskapet och formade berget i böljande, slipade former genom mekanisk erosion. Tydliga 'stöt-' och 'läsidor' bildades, där instabila bergblock med sämre vidhäftning mot övriga bergmassan bröts loss av isen och skapade kantiga former på läsidan av berghällar och höjdområden, medan stötsidan fick mer välvda former. Även sidor som ligger tvärs isens rörelseriktning har vanligen slipats till sådana välvda former. På grund av denna process är kvarstående bergslänter vanligen naturligt stabila, även om den långa tid som nedbrytande processer verkat sedan isen försvann lokalt gjort att vissa block successivt har blivit instabila.

Nedanför naturliga bergslänter är det vanligt att rasmaterial har ansamlats, åtminstone sedan den senaste glaciationen (se exempelvis i Figur 2). Sådana rasmaterial brukar benämnas talus.



Figur 2. Senaste glaciationen lämnade på många håll en slipad, rundad bergyta där instabila block redan lossnat och ansamlats i lågpunkter Foto: Johan Berglund.

En negativ effekt för bergstabiliteten från nedisningarna under tidsepoken pleistocen är den uppspräckning som skedde till följd av den dynamiska på- och avlastning av berggrunden under varierande istjocklekar och mellanistider. Detta skapade en typ av öppna sprickor i de översta delarna av berggrunden, vilka brukar gå under benämningen *bankningsplan*. Även avlastning i samband med isostatisk återhämtning, från geologiska tidsepoker då nuvarande berg varit täckt och nedtryckt av nu bortroderad berggrund eller sediment, har troligen genererat bankningsplan. Planen bildades som spröda brott i det intakta berget och normalt följer de någorlunda överytans topografi, men i de bergarter som redan innehöll strukturer med försvagad draghållfasthet och lämplig orientering, så bildades brotten (sprickorna) istället längs dessa strukturer, exempelvis redan befintliga bankningsplan eller förskiffringsplan i berget. *Exfoliation* kan sägas vara en småskalig form av bankningsplan, där berget närmast överytan spruckit upp och kan lossna i tunna skivor parallellt bergytan. En bidragande orsak till exfoliation har hänförs till kemisk vittring, vilken ökar porositeten något närmast ytan, dit vatten kan söka sig in och förorsaka bland annat leromvandling. Under dygnets och årets temperatur- och nederbördsvariationer sker då en dynamisk expansion och relaxering, liksom det också sker en omväxlande vätning och uttorkning av de ytligaste delarna av blottlagt berg. Även omväxlande dynamiska pålastningar och tryckavlastningar från istäcken tros kunna bidra till exfoliation. Exfoliation bedöms inte påverka släntstabilitet i någon större utsträckning annat än mycket lokalt.

Sammantaget innebär fenomenet med bankningsplan att berggrunden där bergschakt för i stort sett all infrastruktur och övrig byggnation sker, ofta har genomgående flacka sprickor som är öppna, vattenförande och helt kan sakna kohesion mellan sprickytorna.

För **gamla, sprängda bergslänter** måste man vid bedömning av stabiliteten, utöver de faktorer som beskrivs ovan för naturliga slänter, även ta hänsyn till några ytterligare faktorer. I Sverige har vi sprängt i berg med hjälp av bormaskin och sprängämnen sen andra halvan av 1800-talet. Även en del mycket gamla sprängda slänter finns lokalt kvar i anslutning till planlagt område, vid vägar och annan infrastruktur. Under årens lopp har metoder förändrats och vanligen förbättrats, både avseende principer för design och borrh- och sprängteknik (se Trafikverket, 2014). Bland annat har förfinad teknik tagits fram för slätsprängning som gett en slätare och mindre skadad kvarstående slänt. Även när det gäller förstärkningsdesign har det skett en utveckling som generellt lett till ökad inbyggd säkerhet i skapade geokonstruktioner även om det ytterst sällan görs specifika beräkningar för design av enskilda slänter. I äldre sprängda slänter är det ofta oklart om och hur förstärkning skett, då dokumentation vanligen saknas, samt i vilken omfattning eventuell förstärkning degenererats, det vill säga i vilken utsträckning den idag fyller sin funktion. Detta leder till stora osäkerheter vid riskvärdering. I många fall kan äldre slänter vara uppenbart skadade av den ursprungliga sprängningen, med en eskalerande degradering av **släntens** stabilitet som följd.

Det förekommer även ras i **nyanlagda bergslänter**, även om det här finns krav som ska tillse att inga okontrollerade bergutfall sker under entreprenaden, samt att avslutad entreprenad ska efterlämna säkra bergslänter och föreskrivna besiktningsintervall. Under en entreprenad görs stora ingrepp på kort tid i det ursprungliga berget och dess naturliga slänter. Dels schaktas massor bort, eller omfördelas, vilket medför att berget får helt nya lastsituationer. Dels bildas skador på berget i samband med entreprenaden, främst från sprängning, men i viss mån även från entreprenadmaskiner i övrigt.

2.3 Brott- och rasmekanik

Förenklat kan man dela in initieringen av de rena bergras som förekommer i tre typer:

- Fall genom ren gravitation
- Stjälpling (*engelska toppling*)
- Glidning.

Ett ras innefattar ofta en kombination av två eller alla tre typerna ovan. Vilken typ av ras som utvecklas i enskilda fall styrs helt av topografi och geologi. Ras som sker genom ren gravitation förutsätter i princip vertikala slänter eller överhäng. Vanligen är det då draghållfastheten i sprickplan eller förskiffringsplan som successivt försämrats vilket till slut leder till brott. Vid de övriga två typerna är det i högre grad även skjuvhållfastheten i brottplanen som behöver överskridas för att ras ska inträffa, utöver den rena draghållfastheten i det intakta berget men framförallt i dess svaghetsplan. Vid stjälpling välter, eller tippar block ut i rasområdet genom gravitation, vilket kräver brantstående brottplan (svaghetsplan) där viss skjuvning sker mot kvarstående berg, samt att dragbrott sker eller skett i underkant på de block som rasar. Ras genom glidning illustreras mer utförligt i Avsnitt 3 (Figur 3). För mycket kraftigt uppsprucket berg eller slänter i berg med sämre egenskaper än normalt kristallint urberg, exempelvis starkt omvandlat eller vittrat berg, kan ras bli mer lika de som sker i moränsluttningar, vilka inte behandlas i denna rapport.

När ett ras väl initierats sker den fortsatta rörelsen nerför sluttningen genom att enskilda block och stenar rullar, studsar och glider.

Vid analys av stabilitet i en bergslänt brukar man skilja på yt- respektive storstabilitet (även: lokal respektive global stabilitet). Det som avses är stabiliteten för enstaka block och stenar, respektive stabiliteten för hela eller en större del av en slänt. För att säkra lokal stabilitet kan det räcka med enstaka bult eller liknande som sätts av den lokala byggorganisationen, medan storstabiliteten vanligen kräver en mer djupgående släntanalys och mer omfattande förstärkning.

För en grundlig, teoretisk beskrivning av släntstabilitet i berg rekommenderas exempelvis Wyllie och Mah's omarbetade upplaga av Hoek's Rock slope engineering (2005).

2.4 Planering och byggande, lagar och regelverk

Bebyggelse och infrastruktur lokaliseras inte sällan i nära anslutning till naturliga slänter, särskilt i delar av landet där berg i dagen är ett stort inslag i landskapsbilden. I äldre planläggning fanns få lagstadgade krav kopplat till geotekniska säkerhetsaspekter kring bergslänter. Kommunerna har nu möjlighet att med stöd av Plan- och bygglagen (PBL) ställa krav i planbestämmelser på säkerhetshöjande åtgärder innan lov ges. I regeringens klimatanpassningsutredning (SOU, 2017:42) föreslås också tydligare och ökade krav avseende att redan tidigt i planprocessen ta geotekniska risker i större beaktande för en bättre strategisk planering avseende nybyggnation. För befintlig bebyggelse och infrastruktur vilar dock ansvaret för detaljreglering av underhåll och säkerhet vanligen på den eller de som är anläggningsägare.

I PBL (SOU, 2010:900) och tillhörande förordning (SOU, 2011:338) regleras byggande inom kommunal planläggning. I PBL klargörs bland annat kommunens ansvar, samt övergripande bestämmelser för planläggning och bygglov. I Plan- och byggförordningen beskrivs egenskapskrav för byggnadsverk (se textruta).

Väglagen och Lagen om byggande av järnväg, samt tillhörande förordningar för dessa lagar, reglerar i nuvarande skick övergripande krav från samhället när det gäller byggande och drift av järnvägar och allmänna vägar. I dessa regler finns dock inga krav om specifik utformning av väg, järnväg, eller väg- och järnvägsområde.

Boverket har gett ut konstruktionsregler, (Boverket 2016), som motsvarar Europeiska konstruktionsstandards. I textrutan på nästa sida finns aktuella utdrag ur denna.

Utöver det ansvar Trafikverket och kommuner har för reglering av vad som får byggas och hur, samt även för fortsatt drift och underhåll, så finns det andra myndigheter som är tillsynsmyndigheter eller på annat sätt på regeringens uppdrag verkar för att stötta, förbättra och förenkla, exempelvis genom forskning, rådgivning och vägledning. Både Myndigheten för säkerhet och beredskap (MSB), SGI och Länsstyrelser har viktiga ansvarsroller här.

Plan- och byggförordningen 3 kap Krav på byggnadsverk

7 § Egenskapskrav avseende bärförmåga, stadga och beständighet

För att uppfylla det krav på bärförmåga, stadga och beständighet som anges i 8 kap. 4 § första stycket 1 plan- och bygglagen (2010:900) ska ett byggnadsverk vara projekterat och utfört på ett sådant sätt att den påverkan som byggnadsverket sannolikt utsätts för när det byggs eller används inte leder till:

- 1 att byggnadsverket helt eller delvis rasar,*
- 2 oacceptabla större deformationer,*
- 3 skada på andra delar av byggnadsverket, dess installationer eller fasta utrustning till följd av större deformationer i den bärande konstruktionen, eller*
- 4 skada som inte står i proportion till den händelse som orsakat skadan.*

Utdrag ur Boverkets författningssamling 2015:6 EKS 10 Avdelning A - Övergripande bestämmelser

Föreskrifterna

2 §...Föreskrifterna gäller även på motsvarande sätt i tillämpliga delar vid uppförande och ändring av andra byggnadsverk än byggnader, där brister i byggnadsverkens bärförmåga, stadga och beständighet kan förorsaka risk för oproportionerligt stora skador. Föreskrifterna gäller inte bergtunnlar och bergrum. (BFS 2015:6).

Allmänt råd

Exempel på risk för oproportionerligt stora skador är risk för allvarlig personskada eller risk för all-varlig skada på samhällsviktiga funktioner. (BFS 2015:6).

Material

17 § Material till bärande konstruktioner, inklusive jord och berg, ska ha kända, lämpliga och dokumenterade egenskaper i de avseenden som har betydelse för deras användning.

Kontroll

Dimensioneringskontroll

25 § Med dimensioneringskontroll avses i denna författning kontroll av dimensioneringsföresättningar, bygghandlingar och beräkningar. (BFS 2015:6).

Allmänt råd

Dimensioneringskontroll syftar till att eliminera grova fel. Kontrollen bör utföras av person som inte tidigare deltagit i projektet. Graden av organisatorisk och ekonomisk direkt eller indirekt själv-ständighet för den som utför dimensioneringskontroll bör ökas vid projekt av mer komplicerad natur.

Dimensioneringskontroll bör normalt omfatta kontroll av att

- a) de antaganden som dimensioneringen baseras på överensstämmer med de krav som ställs för ifrågavarande byggnad,
- b) antaganden om egenskaper hos byggmaterial samt jord och berg är tillämpliga,
- c) antaganden om laster och materialpåverkan är tillämpliga,
- d) valda beräkningsmodeller är lämpliga,
- e) valda beräkningsmetoder är lämpliga,
- f) grafiska eller numeriska beräkningar är korrekt genomförda,
- g) valda provningsmetoder är lämpliga,
- h) beräkningsresultaten är korrekt överförda till bygghandlingar

Utförandekontroll

27 § Med utförandekontroll avses i denna författning byggherrens kontroll av att

1. tidigare inte verifierbara projekteringsföresättningar som är av betydelse försäkerheten är uppfyllda, och att
2. arbetet utförs enligt gällande beskrivningar, ritningar och andra handlingar. (BFS 2015:6).

Allmänt råd

...För geokonstruktioner är utförandekontrollen beroende av geoteknisk kategori. SS-EN 1997-1 bör tillämpas. (BFS 2015:6).

Kapitel 11 i Eurocode 7 (SIS, 2005) ger generella regler för geokonstruktioner (geotechnical design), inklusive bergslänter. Regelverket genomgår när denna rapport skrivs en revidering för att i större utsträckning anpassas till design av bergkonstruktioner, ovan som under mark.

För att mer i detalj reglera vad som ingår i en anläggningsentreprenad och hur arbetena ska utföras brukar AMA åberopa (Svensk Byggtjänst 2017), med stöd av tillhörande råd och anvisningar. Det pågår kontinuerligt översyn av AMA bergschakt, i syfte att göra krav och råd tydligare, för ovan- och underjordsarbeten, vid väg och järnväg, samt göra dem mer användbara och applicerbara i praktiken. Hur man projekterar, förstärker eller gör andra insatser för att minska risken för ras i anläggningsskedet går inte närmare in på i denna rapport.

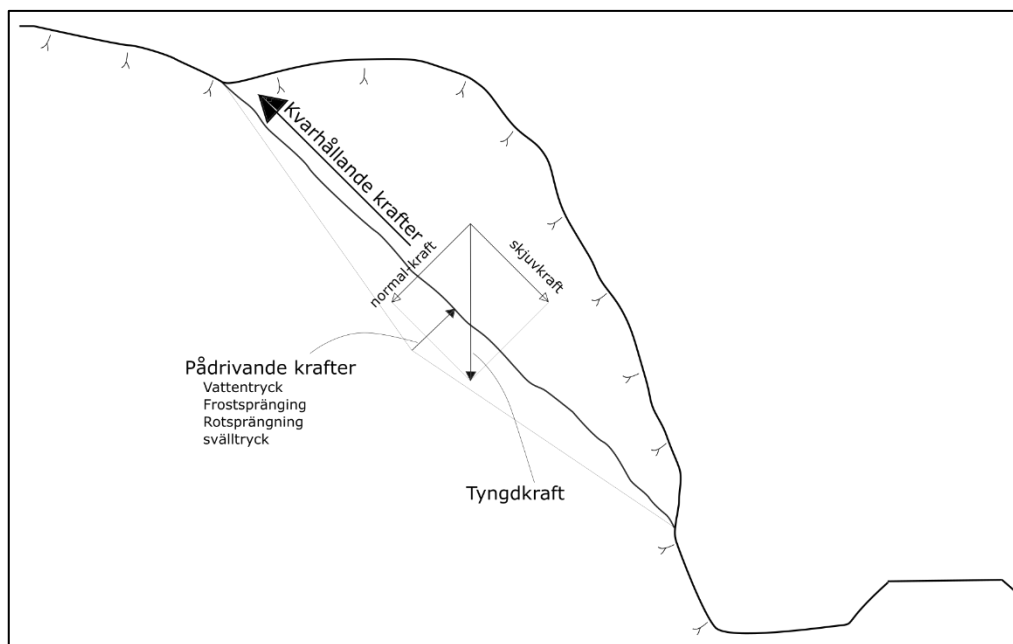
3. Påverkande faktorer

Stabiliteten i bergslänter påverkas av en rad faktorer som är kopplade både till de geologiska förutsättningarna och till de yttre förhållandena runt slänten. De inre geologiska faktorerna omfattar allt från residualspänningar och alla de egenskaper som är ärvda från geologiska processer till spricksystemens mekaniska egenskaper. Till övriga faktorer kan man räkna kemisk och mekanisk vittring, nederbörd och vattenflöde, vattentryck, temperaturvariationer, frostsprängning, rotsprängning och erosion (se exempelvis Peckover and Kerr, 1977, och Sandersen et. al., 1996).

Generell släntgeometri och topografi har också stor betydelse för frekvens och risk för ras. Vilka faktorer som är avgörande för släntstabiliteten kan variera från plats till plats. Det finns mycket forskning i ämnet, men man måste beakta att den är koncentrerad till länder med stora problem med bergras och ofta mer storskaliga markrörelser i bergdominerade sluttningar än vad som är vanligt i Sverige. Länder med stora topografiska skillnader har förhållanden som inte är helt överförbara till Sveriges. Inte heller de kontrollerande faktorerna eller mekaniken i markrörelserna är troligen helt överförbara, men om man bortser från det som är direkt eller indirekt kopplat till storskaliga topografiska effekter bör man i övrigt kunna dra slutsatser som är giltiga även här.

En storskalig analys baserad på statistik för inträffade markrörelser i branta sluttningar och deras koppling till parametrar för bergartstyp, tektonostratigrafi, metamorf grad, kvartärgeologi, lineamentdensitet, topografi, landhöjning, jordskalvsaktivitet och släntlutning presenterades av Böhme et al. (2014). Dessa parametrar befanns i olika grad påverka känsligheten för bergras i västra delarna av Norge och målet var just att producera kartor som pekar ut områden med större sannolikhet för ras. Underlaget utgjordes av data från inventeringar av vägar med registrerade bergras och resultatet användes för att i kartform redovisa känslighet för ras i olika områden. Liknande analyser skulle kunna vara framgångsrika för att peka ut områden med förhöjd risk för bergras även i Sverige.

En slänt i bra berg med god hållfasthet kan vara brant, men ändå stabil. Vanligen förekommer dock enskilda block eller hela bergpartier vars kontakt med övriga berget följer strukturer med mindre bra hållfasthetsegenskaper. I dessa fall styrs stabiliteten av de påverkande krafterna enligt Figur 3; pådrivande, respektive kvarhållande krafter. Tyngdkraften som verkar på ett block kan delas upp i en kraft som vill driva blocket ner för slänten (skjuvkraft) och en kraft som trycker det mot berget (normalkraft), där den senare utgör kvarhållande kraft. De kvarhållande krafterna styrs också av de bindningar som mineralen i den geologiska strukturen har mot underlaget, samt kohesion och rena friktionskrafter i strukturen.



Figur 3. Skiss som illustrerar ett tänkbart svaghetsplan i en bergslänt, och påverkande krafter. I detta exempel är slänten oregelbunden och följer inte helt Trafikverkets krav för släntlutning ($\leq 5:1$).

De pådrivande krafterna i sprickan utöver skjuvkraften beskrivs mer nedan, men domine-
ras av vattentryck, frostsprängning, rotsprängning och svälltryck från mineral.

3.1 Utformning av slänter

I Trafikverket och SKL:s (Sveriges kommuner och landsting) krav (Trafikverket, 2015b) föreskrivs normalt en lutning på konstruerade slänter på $\leq 5:1$, det vill säga högst knappt 80 grader, en brant lutning som går att spränga till en stabil slänt i många fall. För järnväg har släntlutningen sen många år normalt varit 5:1 använts (även 10:1 längre tillbaks i tiden), men på senare år används nu vanligen 3:1 och vidgade planområden vid höga slänter för att minimera konsekvenser vid ras. Gällande regelverk här är "Typsektioner för banan" (Trafikverket, 2015a). I denna står lutningen 4:1, vilket dock inte används i praktiken (Hans Hargelius, personlig kommunikation). Brantare lösningar kräver konstruktioner med avsatser i slänten, eller större avstånd mellan räl och släntfot, vilket i sin tur kräver större planområde. Vid bra berg är det ekonomiskt optimalt med branta slänter, men i andra fall krävs platsanpassade lösningar.

Utöver rent ekonomiska och säkerhetsmässiga värderingar av bergschakt vid utformning av slänter är också landskapsarkitektoniska aspekter viktiga vid projektering av nya anläggningar. I projektens gestaltungsprogram uttrycks detta i termer av att "bergskärningar i möjligaste mån ska utföras naturlikt" (se exempelvis Trafikverket, 2014). Metoden för detta kan vara att med nödvändig kraft, mekaniskt bryta loss block som bedöms instabila, och i en del fall kanske spränga bort partier som bedöms potentiellt instabila utan kraftig förstärkning, så att slutlig slänt till en stor del begränsas av naturliga strukturer i berget, snarare än sprängda ytor.

Fördelen med att utnyttja naturliga strukturer vid design av sprängda slänter i berg är något som anläggningsbranschen har varit medveten om och något som påtalats sedan länge. Till exempel framhöll Peckover and Kerr (1977) att en betydande orsak till instabila slänter är användandet av standardiserade släntskärningar/profiler som inte tar hänsyn till strukturerna i berget. Författarna påpekar att en stor ekonomisk vinst ligger i att designa slänten så att ras undviks eftersom kostnaden för att röja upp efter ett ras i studien bedömdes kosta 10 gånger så mycket per volymenhet som kostnaden för den ursprungliga sprängningen.

Ett problem med att naturanpassa och följa bergets strukturer är de ibland kraftigt utökade områdesanspråk som kan krävas för planområden (detaljplan, järnvägsplan eller vägplan). Detta blir inte bara en ekonomisk och juridisk fråga, utan också en fråga om hur stora ingrepp i naturen som ska accepteras.

3.2 Geologi och hållfasthet

3.2.1 Berggrundsgeologiska förutsättningar

Berggrundens mineralogiska sammansättning, dess textur och struktur, vilket tillsammans utgör berggrundens *litologi*, har ett visst samband med spröda brottmekanismer i berget. Vanligen har dock tektoniska och andra händelser skapat mer uppenbara svagheter och brott i berget, vilka helt styr bergets nuvarande hållfasthet. I vissa regioner kan dessa händelser påverkat alla bergarter på ett liknande sätt, men bergets varierande elastiska egenskaper och mineralkorns inbördes bindning har ibland medfört att spröda strukturer utvecklats på olika sätt i olika bergarter i regionen. *Spricksystem* som annars kan vara ganska likartat utbildade i en region, kan därför lokalt variera mellan olika bergartslager, också inom samma berghäll. Ett spricksystem brukar bestå av ett eller flera *sprickset*, där varje set har någorlunda enhetlig orientering, samt därutöver även en del mer slumpmässigt orienterade sprickor. Sprickdensiteten (sprickarea per volym berg) varierar stort mellan olika bergarter, liksom porositeten längs sprickplanen.

När sprickor och porositet väl skapats har vatten och andra lösningar kunnat cirkulera i den porositet som skapats. Beroende på dessa lösningars kemiska sammansättning och fysikaliska egenskaper, samt den lokala fysiska och kemiska miljön har grundämnena kunnat gå i lösning eller avsatts längs porositeten. Detta kan i sin tur ha lett till nykristallisation av mineral (*sprickmineral*), samt omvandling av berggrunden i sig och av redan bildade sprickmineral. I nuvarande förhållanden i bergslänter har vi en blandning av helt öppna sprickor, delvis öppna sprickor och sprickor läkta med olika sprickmineral. Bland de allra vanligast förekommande sprickmineralen som normalt har sämre hållfasthet än det intakta berget finns kalcit (CaCO_3), klorit och andra fyllosilikat (glimrar), samt olika typer av lermineral, varav flera med svällande egenskaper.

Omvandlingar sker långsamt i samband med vittring vid atmosfäriska och låga tryck och temperaturer, men mer omfattande omvandlingar har lokalt skett i så kallade *hydrotermala* system i den geologiska historien, under förhöjda tryck och temperaturer. En ursprungligen hård, kristallin bergart kan vid sådana omvandlingar bli mjuk (leromvandlad)

och porös. Framförallt har detta skett i anslutning till enskilda sprickor och spricksystem, medan det i större skala förekommer mer sällan.

I en stor del av landet är berggrunden *förskiffrad* i olika grad. Detta innebär att den innehåller plan längs vilka hållfastheten är något sämre. Hur mycket sämre beror på hur starkt utbildad förskiffringen är och vilken mineralogi som bildar förskiffringen.

De svagaste delarna i Sveriges annars mycket hållfasta berggrund, vilka beskrivits förenklat ovan, utgör de grundläggande geologiska förutsättningarna för de brottmekanismer som förorsakar bergras. Även vid relativt unga geologiska processer, som exempelvis dynamisk på- och avlastning under nedisningar och jordskalv, samt vid laster från mänsklig påverkan (exempelvis sprängning), utgör dessa svaga länkar anvisningar där berget lättare går i brott.

3.2.2 Strukturgeologi

Strukturgeologin är den gren av geologin som specifikt behandlar heterogeniteter i berget i form av makro- eller mikroskopiska strukturer. Utöver litologiska variationer är de viktigaste strukturerna ur hållfasthetssynvinkel förskiffring, sprickbildning och omvandlingszoner av olika slag. Nedan följer en genomgång av hur sådana strukturer kan påverka den lokala hållfastheten.

Svensk berggrund domineras av berg med god, eller mycket god hållfasthet. Det intakta kristallina urberget har vanligen en tryckhållfasthet som överstiger 150 MPa (ofta > 200 MPa) och en draghållfasthet som sällan understiger cirka 10 MPa i bergarter utan stark förskiffring. Det finns inte några kompletta tabellverk över dessa värden för just svenska bergarter, men många bergmekaniska tester har utförts i anläggningsprojekt av olika slag och i internationell litteratur finns generella värden sammanställda för vanliga bergarter, och även databaser med sådana (se exempelvis Evaluation of rock property variability Aladejare and Wang, 2017). Det finns undantag där berget exempelvis kan vara sedimentärt ursprung och då kan ha sämre hållfasthetsegenskaper, eller lokaler där det skett en mer omfattande djupvittring av berggrunden, eller avvikande och varierande mineralogi av annat slag. Vid design av bergkonstruktioner är lokalt framtagna deformationsegenskaper för berget därför alltid att föredra.

Det som gör att det normalt starka urberget benäget att rasa är nästan alltid svagare strukturer i berget. Berggrunden kan lokalt vara helt isotrop (samma egenskaper i alla riktningar), massformig, och sprickfri, men detta är ovanligt. Det vanligaste är att berget inte bara har en förskiffring som kan vara svag eller stark, utan ofta också någon form av bandning eller lagring, och nästan överallt förekommer även sprickor i berget, i olika omfattning och med varierande egenskaper. Detta skapar en heterogen berggrund som är starkt anisotrop med avseende på deformationsegenskaper och hållfasthet.

Gnejser av olika slag hör till den vanligaste metamorfa bergartstypen i landet. Samlings termen gnejs brukar användas om enskilda bergarter, men är egentligen ett strukturellt begrepp som innebär att bergarten har en 'gnejsighet', det vill säga en heterogenitet i form av bandning eller lagring, där lagren har varierande mineralogiska och mekaniska egenskaper. Benämningen gnejs säger därför inte något om bergartens mineralogiska eller kemiska sammansättning, men däremot om dess struktur som alltså är gnejsig. En gnejs kan

i bästa fall ha mycket goda hållfasthetsegenskaper, trots dess heterogenitet, i de fall då alla lager har starka bindningar mellan de interna mineralkorn som bygger upp bergartslagren. Det är dock vanligt att vissa lager har en starkare förskiffring och att bindningar mellan mineralkorn har varierande hållfasthet. Det är inte ovanligt att det även finns en varierande grad av omvandling längs de olika lagren, vilket också påverkar hållfastheten.

Förekomst och grad av förskiffringen är av stor betydelse för hur anisotropa bergets egenskaper är, bland annat dess hållfasthet i olika riktningar. En gnejs som i sig har starkt anisotropa egenskaper kan i vissa fall helt sakna förskiffring, men vanligen åtföljs gnejsigheten av en parallell förskiffring, som brukar variera i styrka mellan de olika lagren och även inom lagren. Detta gör i sin tur att lager med starkare utvecklad förskiffring har en generellt sämre drag- och skjuvhållfasthet. Här spelar även mineralogin och bindningar mellan mineralkorn stor roll. Mineralogin för enskilda lager i gnejsen kan variera stort mellan lagren, vilket innebär att också deformationsegenskaperna varierar, såväl avseende elastiska egenskaper och brotthållfasthet. Man finner ofta att sprickintensitet och sprickorienteringar varierar mellan lager i en gnejs och deformation av olika slag lokaliseras gärna till gränsen mellan två lager/bergarter, vilket kan förklaras med skillnader i deformationsegenskaper mellan olika bergarter.

Magmatiska bergarter som inte är gnejsomvandlade är också vanligt förekommande. Även dessa är normalt sett förskiffrade i viss grad, men generellt är ändå magmatiska bergarter mer homogena, mindre anisotropa och har bättre hållfasthetsegenskaper än gnejser i det intakta berget. Det beror främst på de magmatiska bergarternas mer homogena geologiska egenskaper, vilket bland annat medför att spröd deformation som sprickbildning och annat är mer jämnt fördelat, men ändå kan vara minst lika omfattande som i mer heterogena bergarter. Ljusa bergarter rika på mineralen kvarts och fältspat (exempelvis graniter) är relativt spröda, medan mörkare bergarter generellt brukar vara mindre spröda och mer elastiska. En viktig erfarenhet från byggnation i homogena, granitiska bergarter runt om i landet är att sprickorna i dessa ofta har låg hållfasthet och kan vara mer plana och ihållande än i mer heterogen berggrund. Detta kan skapa allvarliga byggnadstekniska problem trots det intakta bergets goda egenskaper. Det finns även vulkaniska bergarter i den svenska berggrunden, de flesta dock högmetamorfa, vilket skapat låg porositet och starka bindningar som gör att de vanligen kan liknas vid övriga gnejser i urberget med hänsyn till mekaniska egenskaper.

Sedimentära bergarter dominerar bara i vissa delar av vårt land, framförallt i Skåne, i begränsade delar av Östergötland, Närke och Västergötland, samt i fjälltrakterna. Dessa bergarter har ofta helt andra deformationsegenskaper och högre porositet i det intakta berget än vårt magmatiska och metamorfa urberg. Generellt har bergarterna sämre hållfasthet och är mer lättvittrade. Högmetamorfa bergarter med sedimentärt ursprung är ganska vanliga och har då vanligen i stort samma egenskaper som gnejser av annat ursprung, även om detta varierar lokalt. Sedimentära bergarter har normalt påverkats på liknande sätt som övrig berggrund av spröd deformation som skapat sprickor, men den del som ligger på urberget är yngre (< 570 miljoner år) och har därför undgått äldre deformation, både deformation som skett under höga tryck och temperaturer och eventuell spröd deformation.

Spröd deformation som skapat sprickor i berggrunden har till övervägande del skett senare i den geologiska historien än de deformationer som skapat strukturer som gnejsighet

och förskiffring. Anisotropin som dessa strukturer innebär haft en stark inverkan på geometrin för den efterföljande spröda deformationen i berget, då de svagaste länkarna i första hand brister när berg går i sprött brott. Den lokala spänningsbildens storlek och riktning då berg belastas till brott har också stor betydelse för brottets (sprickans) geometri och orientering. Även spänningsbilden är ofta anisotrop, till exempel på grund av topografiska effekter nära markytan, eller runt hålrum. Bergets elastiska egenskaper är ofta också anisotropa, både beroende på bergets mineralogi och dess texturella uppbyggnad, men framförallt beroende på bergets strukturer i form av litologiska heterogeniteter, bandning och lagring, omvandling, sprickbildning och andra deformationsstrukturer.

Bergets lokala deformations- och lastegenskaper brukar analyseras vid byggnation i berg under mark inför design av bland annat förstärkningssystem. De deformationsegenskaper som används är då vanligen baserade på hela bergmassan, där svaga strukturer som sprickor ingår som en faktor som sänker det intakta bergets hållfasthet. Faktorn baseras på fältanalyser av spricksystemens egenskaper. Lokalt förekommer även enskilda, mycket svaga strukturer som kan vara helt avgörande för de stabilitetsbrott som inträffar i berg, kanske framförallt beroende på att strukturerna inte är tillräckligt kända geometriskt eller avseende dess egenskaper. Dessa strukturer kräver särskild hänsyn vid förstärkningsdesign. I slänter är det ofta en begränsad inspänning av berget, varför enklare mekaniska analyser går att använda med framgång vid dimensionering av förstärkning. Där har man också bättre förutsättningar för att mer precist karaktärisera svaga strukturers egenskaper.

Det som är kritiskt och kan vara svårbedömt är hållfastheten i de svaga strukturerna eftersom de bara kan betraktas där de finns blottade i en slänt eller berghäll, eller väldigt lokalt i ett undersökningsborrhål – vilken friktion, kohesion och bindning mellan mineral-korn kan man egentligen räkna med för hela brottytan? Svaghetsplanen utgörs konsekvent av strukturer som sprickplan eller förskiffringsplan, och mer sällan också av mineralfria sprickor som bildats i det intakta berget, sent i den geologiska historien. Till exempel orsakar sprängskador viss sprickbildning också i det intakta berget. Hållfasthetsegenskaperna degenereras dessutom med tiden genom vittring och erosion, processer som beskrivs mer i nedanstående avsnitt.



Figur 4. Exempel på komplex strukturgeologi, där svaghetsplan ibland följer den litologiska bandningen (röd linje), som här är veckad, ibland utvecklats helt oberoende av denna.
Foto: Johan Berglund.

Geometrier på geologiska svaghetsplan i detaljskala kan också ha väldigt stor betydelse för deras friktion. Vid geometrisk modellering av svaghetsplan i berget antas vanligen plana ytor, men detta är alltid en förenkling. Strukturer i berg är aldrig helt plana, utan ondulerar (böljar i centimeter- till meterskala) och har en viss "råhet", det vill säga en ojämnheter i millimeterskala. I de system som används för att klassificera bergs kvalitet ur bygghälsoperspektiv brukar parametrar för detta ingå. Man måste dock beakta att det blir en viss subjektivitet vid bedömning för kvantifiering av parametern, samt att det generellt brukar vara få och små observationspunkter per spricka/struktur vilket kan skapa osäkerheter om hur representativt det ansatta värdet blir.

Ibland är strukturgeologin ganska komplex där bergkonstruktioner ska byggas. Komplexiteten kan bestå både av en heterogen blandning av bergarter, deformationsstrukturer som veckat och skjuvat berget och spröda deformationsstrukturer av varierad komplexitet och intensitet, se exempel i Figur 4. Detta kan leda till att de brott som uppstår vid ras inte alltid styrs av enstaka strukturer med enkla geometrier, vare sig beträffande själva brottmekaniken eller den fortsatta rasutvecklingen i slänten.

3.3 Väder- och klimatlast i berget

Stort fokus finns idag på risker knutna till den pågående klimatförändringen, inte minst där denna har effekt på risker för ras, skred och erosion. De flesta prognoser pekar på ett varmare klimat, mer vatten i världshaven och mer vatten i kretslopp. Enligt de prognoser som finns på exempelvis <http://www.smhi.se/klimat> så kan det för Sveriges del komma att innebära en rad olika förändringar – delar av landet kan få ett torrare klimat, medan större delen av landet bedöms få ökad nederbörd. Tillfällen med extrema väderförhållanden, liksom frekvensen av skyfall bedöms öka. Ett varmare klimat kan leda till att delar av landet kommer att få färre noll-genomgångar och färre tillfällen med långvariga köldperioder, medan det för norra delen av landet kan leda till att de normalt långa stabila vintrarna avbryts av perioder med blidväder. Även köldmängden (summan av antal negativa dygnsmedeltemperaturer) per köldperiod förändras på olika sätt över landet. Detta har betydelse för hur långt in i bergets sprickor frosten tränger, vid olika köldmängd. Hur detta eventuellt påverkar risker för ras i Sverige kan vi med nuvarande kunskap inte säkert uttala oss om.

I höglänta regioner i alperna har ett successivt varmare klimat gjort att områden ändras från att ha varit i permafrost till en situation med upprepade frost/töcykler ner i berggrunden (se exempelvis D'Amato et al., 2016), vilket ökat frekvensen av ras. De topografiska skillnaderna ger i sig olika sannolikhet för ras, liksom de berggrundsgeologiska förutsättningarna kan göra det. Skillnader i geologin påverkar bland annat porositeten och vitteringsbenägenheten. Fischer et al. (2012) pekar dock på att tiden sedan senaste glaciationen lämnade området har stor betydelse för rasfrekvensen. Det är en tydligt högre frekvens strax efter en glaciation än senare. Översatt till svenska förhållanden innebär det att rasfrekvensen generellt bör ha minskat sedan strax efter senaste glaciationen.

Extrema väderhändelser som inträffar då och då har visats ha effekter på bergets stabilitet, redan i dagens klimat. Macciotta et al. (2017) genomförde en analys av eventuella samband mellan ras i berg och frost/töcykler samt nederbörd, utmed en järnvägssträcka på den kanadensiska västkusten, baserat på inträffade ras mellan åren 1985 till 2011. Resultaten pekade på högre sannolikhet för ras under månader med mer nederbörd. Klimatet liknar södra Sveriges. Liknande resultat fick D'Amato et al. (2016), som också fann samband till frost/tö-perioder, främst under vårens upptining. En analys genomförd med hjälp av ett par centrala norska databaser för insamling av händelser och störningar längs Norges vägnät har också visat en tydligt ökad frekvens av ras på vinterhalvåret (Statens vegvesen 2011).

Sandersen et al. (1996) undersökte vilken betydelse meteorologiska faktorer haft på 30 slamströmmar, 27 blockutfall och 4 bergras i Norge. De meteorologiska faktorer som studerades var nederbörd, lufttemperatur, vindstyrka och luftfuktighet. Författarna summerade att i det kontinentala klimatet som råder i östra Norge sker de flesta blockutfallen under snösmältningsperioden i april och maj medan i det marina klimatet som råder i västra Norge relateras de flesta blockutfallen till höstregnen i september till december. Likaså konstaterade författarna att "svarstiden" (tid efter aktuell väderlek) för bergras kunde vara månader. Även om bergras ofta sammanfaller med väderrelaterade händelser så gick många blockutfall och bergras inte att korrelera till väderrelaterade faktorer. Detta tolkades som att andra faktorer också måste påverka, såsom långsamt verkande mekanisk och kemisk vittring, som är mer klimatberoende snarare än väderberoende. Författarna visade

dock att blockrörelser stödjer antagandet att det inte finns en viss korrelation mellan meteorologiska faktorer och blockrörelser på årsbasis. En slutsats som får stöd i många senare studier runt om i världen, även om korrelationen i vissa miljöer tycks svagare.

Vatten i porutrymmen längs spricksystem och i omvandlingar i berget är det enda tillgängliga vatten som finns i berggrunden, vilket också har avgörande betydelse för bergmassans hållfasthet (se exempelvis Noorian Bidgoli and Jing, 2015). För kristallint berg har den intakta bergmassan mellan sprickorna vanligen en försumbar porositet och antas vanligtvis vara helt tät. Vattentrycket i sprickorna utgör en last, som kan vara både dynamisk och statisk vid regn- och torrperioder. Förekomsten av vatten påverkar i sig också skjuvhållfastheten längs porösa strukturer i berget (se exempelvis Crawford et al., 2008).

Tillgången på vatten och förutsättningarna för infiltration av regn i bergets spricksystem skapar ett varierande vattentryck mellan uttorkande perioder och en situation med fyllda sprickor. För en bergslänt likt den i Figur 3 kan det vara ganska avgörande för vattentrycket i den kritiska strukturen hur effektivt den tillförs, respektive dräneras på vatten. I höga slänter och vid tjocka jordlager kan det vara svårt att få en bra bild över detta för varje enskild struktur. I torrperioder ser man inte alltid vilka strukturer som för vatten i en slänt, medan man i regniga perioder eller med ett kontinuerligt grundvattentillflöde ovanför slänten tydligt kan se var vatten dräneras, även om porositeten längs vattenvägarna utmed öppna sprickor i slänten inte alltid är helt logiskt fördelad. För slänter kan dock inte vattentrycket bli högre än vad som motsvarar höjden där en struktur mynnar ovanför slänten, oavsett hur mycket det regnar, förutsatt att den inte är täckt med jordlager eller vattensamlingar. Detta är det så kallade hydrostatiska trycket, vilket motsvarar höjden till högsta grundvattennivån i området, eller en fri vattenyta. I ett förändrat klimat är det däremot troligt att mer nederbörd kommer att leda till fler sprickor är vattenmättade under längre tid, och en ökad erosionstakt längs öppen sprickporositet kan ske, vilket i sin tur påskyndar degraderingen av strukturernas hållfasthet.

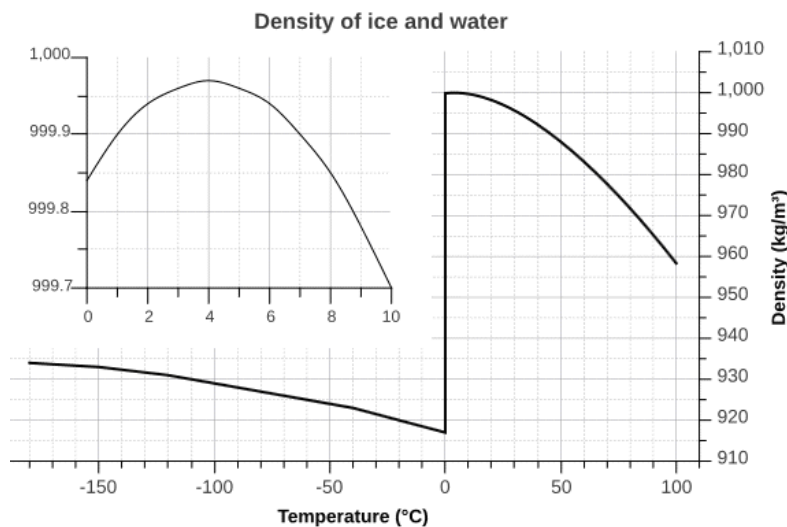
Likt övriga naturliga material så utvidgas berggrundens mineral i samband med temperaturvariationer under året och under varierande klimat. Olika mineral har olika egenskaper och varierande, temperaturberoende utvidgningskoefficienter. Generellt expanderar dock berget ganska lite vid normala temperaturväxlingar i vårt klimat (expansionskoefficient på $1\text{--}4 \times 10^{-5}$ per °C), där kvartsrika bergarter påverkas mest. Där berget är inspänt och inte har möjlighet att fritt expandera kan denna lilla volymförändring ändå påverka och ge stora förändringar i bergspänning, vilket kan förorsaka så kallad termisk spjälkning. I bergslänter har denna effekt troligen liten effekt på stabiliteten.

3.4 Faktorer som utlöser ras

En faktor som kan vara utlösande är starka vibrationer i berget, från exempelvis närliggande sprängningar eller starka jordskalv (= seismiska händelser). För Sveriges del är jordskalv mer sällan orsak till själva raset, då skalven generellt är små, (jämför exempelvis Macciotta et al., 2015). Många små skalv som skett under en lång tidsrymd kan dock ha bidragit till degenerering av släntstabiliteten. I det riskreducerande fallet som beskrivs i Avsnitt 4.1 skedde dock ett större ras i början av 1900-talet som tycks ha direkt samband med det största skalv som inträffat i, eller nära Sverige på flera hundra år.

Vattentryck ensamt, eller i kombination med frost och frostsprängning är viktiga utlösande faktorer för ras i berg. I fall med en helt ”torr” slänt, det vill säga med 100 % ytavrinning, kan få ras förväntas. Vattnets erosion i sprickor skapar förutsättningar för ett hydrostatiskt tryck allt djupare ner i en slänt, där också den pådrivande kraften blir som störst. I situationer när hållfastheten degraderas och börjar närma sig ett gränstillstånd där de gravitativa krafterna inte längre kan hållas emot, kan vattentryck ensamt eller i kombination med isbildning utlösa plötsliga ras. Samverkan med isbildning sker på ett negativt sätt, då ”isproppar” förhindrar dränering och kan medföra att vattentryck byggs upp inne i slänten. Även den tillkommande islasten från svallis i slänter kan bidra till att ras initieras, liksom svälltrycket i lermineral i vattenmättade sprickor.

Frostsprängning bedöms ibland också vara en av de mest betydande orsakerna till att utlösa ras i berg, vid sidan av vattentrycket. Vattnets volym ökar cirka 9 % i övergången till fast form, det vill säga is, vilket illustreras av Figur 5. Många ras sker dock först vid övergången till tö, troligen delvis beroende på att isbildningen under frostperioden haft en bindande kraft i den något vidgade strukturen, för att under töperioden samverka med de vattentryck som då byggs upp. Isen är i sig också som mest plastisk precis innan den smälter. För att själva frostsprängningen skall vara den utlösande faktorn krävs bland annat att den utvidgning som sker av isen ska vara större än de ojämnheter som finns längs sprickans porositet, i form av att råhet och ondulering mellan sprickytorna på ömse sidor av sprickplanet.



Figur 5. Vattens densitet vid övergång till isbildning (från 'Properties of water', Wikipedia)

Såväl släntens och brottplanens stupning, deras friktionsegenskaper som den initierande händelsen kan påverka rasets händelseförlopp. Kvarvarande hållfasthet i potentiella brottytor består vanligen av summan av hållfastheten i den mineralogi och mineralbindningar som finns i den kritiska strukturen, alla med olika deformationsegenskaper. Vid exempelvis frostsprängning kan detta innebära att viss mineralogi och dess bindningar kan befinna sig inom sitt elastiska område, medan annan har passerat den elastiska gränsen och plastiskt deformerats eller gått i brott. Spänningar kan då byggas upp och utlösas genom plötsliga spröda brott, med en mer explosiv utveckling som följd.

Den situation som kanske är mest kritisk för en bergslänts stabilitet och som blir den initierande händelsen då plötsliga, spröda brott sker, är när snabba förändringar i lastförutsättningarna inträffar. I samband med all typ av schakt, liksom vid tömning av dammar och kanaler, sker en nästan momentan förändring då lasten på kritiska strukturer i berget närmar sig brottgränsen. Det är vanligt med bergras i dessa situationer och i samband med byggnation är det därför inte ovanligt att ras inträffar. I byggorganisationen vet man normalt om dessa risker, som hanteras med driftförstärkning, skrotning och skyddsåtgärder av olika slag.

4. Ras i berg – några fall

De fall som valts ut att studera är av olika karaktär, både geologiskt, läge i förhållande till infrastruktur, vem som är anläggningsägare med mera. Fallen beskrivs delvis anonymt, där plats och utförande entreprenörer inte anges, men typ av anläggningsägare anges. Beskrivningarna fokuserar på bakgrund, geologi, gjorda förstärkningar, rasorsak, raskonsekvens och åtgärd, allt baserat på de underlag SGI tagit del av. Underlagen kan se helt olika ut för de olika fallen och täcker olika väl in hela kedjan av underlag och beslut.

Syftet med genomgångarna av fallen är att försöka beskriva de orsaker som normalt ligger bakom de bergras som skapar problem av olika slag i landet. Rapporten går inte in på skuldförfrågor i de fall sådana eventuellt förekommer, utan fokuserar helt på de geologiska och bergtekniska faktorer som ligger bakom raset.

För ett par av fallen har ras inträffat vid fler än ett tillfälle i anslutning till den aktuella platsen, men det senaste raset på platsen har i alla fyra fallen skett under de senaste 5-10 åren.

De ras (Fall 2-5) som valts att beskrivas inträffade alla i driftskedet, efter avslutad entreprenad.

1. Fall riskreducering.
2. Ålesund, Norge. Bostadshus inom planlagt område.
3. Ras på/vid europaväg/motorväg. Årsmedeldygnstrafik (ÅDT): 8000-12000.
4. Ras mot järnväg – Mindre ras med speciella förutsättningar.
5. Ras på cykelväg i anslutning till huvudväg i tätbebyggt område – hela cykelbanan blockerad. Kommun.

4.1 Fall 1 - Riskreducering

Detta fall gäller en cirka 60 meter hög bergslänt i närheten av en landsväg där åtgärder för att minska risker för ras, samt för att förbättra vägen har utförts. De underlag som SGI tagit del av via Trafikverket är:

- Vägplan – Samrådsunderlag (Trafikverket, 2013)
- Projekterings-PM Bergteknik (WSP 2016a)
- PM Beslutsunderlag Bergteknik (WSP 2016b)
- Personlig kommunikation (Urban Åkesson, Trafikverket)

4.1.1 Bakgrund

Det aktuella området ligger utmed en smal länsväg (70 km/h, delvis 50 km/h), trafikerad med cirka 2500 fordon/dygn under sommaren (Trafikverket, 2013). Ett projekt med syfte att reducera riskerna för ras har genomförts, vilket även innefattade åtgärder för förbättrad vägstatus.



Figur 6. Foto taget ifrån vägen upp mot överhängen ("Näsan" i Figur 7). Foto: Johan Berglund.

Den cirka 60 meter höga och branta bergslänten ligger inom cirka 20 meter från vägbanan och har delvis överhäng (Figur 6). Även partier i slänten till vänster om Figur 6 har bedömts instabila. Bergslänten har en rashistorik som delvis är dokumenterad varifrån detaljer i denna beskrivning är hämtad, (WSP, 2016b). Redan 1904 skedde ett stort ras då överhängen på bilden bildades. De brunaktiga ytorna nedanför överhänget tros utgöra den gamla brottytan. Raset hade enligt äldre tidningsuppgifter ett direkt orsakssamband med det stora jordskalv som samtidigt inträffade utanför Kosteröarna, vilket troligen är det kraftigaste skalvet som drabbat vårt land de senaste hundra åren (har bedömts till magnitud $\geq 5,4$ på Richterskalan).

Enligt PM Beslutsunderlag bergteknik (WSP, 2016b) har det inte skett några rörelser i det överhängande berget sedan 1994, då rörelsemätningar påbörjades. Detta gäller dock endast de partier där mät-dubbar finns installerade. Ras finns dokumenterat under vintern

2001/2002 och man kan förmoda att åtminstone enstaka stenar eller mindre block rasat vid flera tillfällen sedan skallet 1904.

Vid flera tidigare tillfällen har undersökningar och vissa åtgärder genomförts och ytterligare åtgärder föreslagits. Troligen skedde skrotning (nedtagning av lösa stenar och block) redan på 40-talet och 1984 genomförde VTI en undersökning som rekommenderade nedsprängning av de kritiska bergpartierna, alternativt en flytt av vägen. Ytterligare ett alternativt förslag var att förankra området med kabelbult. Av olika, men inte helt klarlagda, anledningar fullföljdes inte något av de alternativa åtgärdsförslagen vid detta tillfälle.

De rörelsemätningar som gjorts på mätdubbar i berget pågick årligen under en knapp tioårsperiod utan att några rörelser indikeras. Efter att ras inträffade 2001/2002 installerades det nätskydd som ses i Figur 6 ovanför vägen. Händelsen föranledde också nya utredningar under 2002–2003. År 2004 tar dåvarande Vägverket beslut om att åtgärda bergsområdet i enlighet med ett konsultföretags förslag, med hjälp av linstag borrade från ovasidan bergslänten ner genom överhänget. Arbetet initierades dock inte och 2006 avbröts projektet åter, av ekonomiska skäl.

4.1.2 Pågående arbete

Nuvarande insatser som påbörjats hösten 2017 är, förutom ovanstående historik, baserade på en förstudie under 2013 samt besiktningsarbeten och efterföljande analys av sannolikheten för att ras ska inträffa i det aktuella släntområdet. Den tidshorisont som låg till grund för analysen var en teknisk livslängd på 120 år, som motsvarar kravet TLK 120 i exempelvis Trafikverkets TRVK Tunnel 11 (Trafikverket 2011). Trots att risken för ras bedömdes som låg för överhänget i Figur 6, gjorde de stora osäkerheter som förelåg i denna bedömning att man ändå rekommenderade förstärkning med linstag för två större bergpartier, samt en kombination av bergrensning, bultning och nätning för resterande delen av område D i Figur 6.

De underlag som använts för att göra beräkningar av blockstabilitet i slänten redovisas i ett Projekterings-PM (WSP, 2016a). Under den besiktning i slänten som genomfördes under 2013 med replättringsteknik, samt under 2016, så bedömdes bland annat egenskaper för de sprickplan som begränsar äldre ras under överhänget och som fortsätter upp under överhänget. Även stabiliteten för övriga delar av område D bedömdes. Det kritiska sprickplanet bakom överhänget bedömdes ha goda hållfastheter och inte vara helt genomgående bakom överhänget, medan strukturerna bakom delar av övriga område D bedömdes ha sämre hållfasthet.



Figur 7. Planbild över det aktuella området, med bergslanter i anslutning till vägen markerade. Område D är det som behandlas här (WSP, 2016b).

I övrigt fördes ett pragmatiskt resonemang för att beskriva osäkerheterna i bedömningar och sannolikheten för händelser som skapar pådrivande krafter, såsom exempelvis ett liknande jordskalv som det som utlöste raset 1904. För att dimensionera förspända linstag, ansattes värden i analytiska beräkningar för tänkta plan bakom de block som avsågs att förstärkas. Genom förspänning skulle man kunna tillgodoräkna sig den bedömda friktionen i sprickplanen. I slutändan landade man ändå i att använda sig av slaka stag utan förspänning, för att på så vis undvika de kostsamma, återkommande kontroller som krävs av stag med förspänning. Utöver brott i sprickplanen beräknades också fall där brott sker mellan borrhål (för linstagen) och ingjutningsbetong, samt ingjutning och lin-stag, för att avgöra vad som är dimensionerande. En säkerhetsfaktor på 1,5 användes (WSP, 2016a).

SGI har inte tagit del av de bedömningar av den riskkonsekvens som Trafikverket genomfört, utöver den sannolikhetsbedömning, beskriven ovan, som varit underlag för investeringsbeslut för de aktuella riskreducerande åtgärderna.

4.1.3 Sammanfattande slutsatser

- Sannolikhet för ras i ett 120-årsperspektiv behöver bedömas med tanke på degenerering av hållfasthetsegenskaper (geologi och förstärkning), samt med tanke på de besiktning- och underhållskrav som ställs.
- Dolda sprickkytor måste bedömas konservativt med utgångspunkt från de observationer som görs, eftersom det finns begränsade möjligheter att verifiera parametervärden.
- Svåra bergtekniska bedömningar med stora osäkerheter ger troligen konservativa beräkningar.
- Även stabilitetsproblem i vägen åtgärdas i samband med arbetena.
- I underliggande rapporter kring riskbedömning analyserades även indirekta händelser för inducerade lerskred i havsviken nedanför, med eventuell följdverkan på vägens stabilitet och även risken för bildandet av tsunamiliknande vågor.

4.2 Fall 2 - Bostadsbebyggelse

4.2.1 Bakgrund

Fall 2 beskriver omständigheterna kring ett allvarligt ras som inträffade i Norge 2008 (5 omkomna), med utgångspunkt från en utredningsrapport (Befring et al., 2008). Raset är betecknat som ett skred i den norska rapporten baserat främst på rasets storlek, (se Avsnitt 2.1 avseende norsk terminologi - $> 100 \text{ m}^3 = \text{skred}$), men även i svensk terminologi rör det sig troligen om ett bergskred, då hela bergspartiet initialt tycks ha rört sig som en enhet utmed en huvudsaklig glidyta. Det aktuella skredet uppskattades till cirka $2\,500 \text{ m}^3$. Det som gjorde att olyckan blev så allvarlig, utöver dess storlek, var att det mer eller mindre momentant drabbade ett flerbostadshus, samt att det skedde under natten då många låg och sov.

Bygglov för fastigheten, inklusive för den bergschakt som planerades, söktes och beviljades 2002, och påföljande sprängningsarbeten, schakt och byggnation skedde 2002-2004. Den nya byggnaden ligger tätt inpå redan befintliga, bebyggda fastigheter (se Figur 8). Sprängning, loss hållning och förstärkningsarbeten skedde för att medge byggnation av aktuellt bostadshus i nära anslutning till berget.

Bergarten där raset skedde var en högmetamorf gnejs, liknande många av de gnejser som är vanligt förekommande i Sverige. Även vad gäller sprickighet och strukturer i övrigt skulle det lika gärna kunnat vara i Sverige.

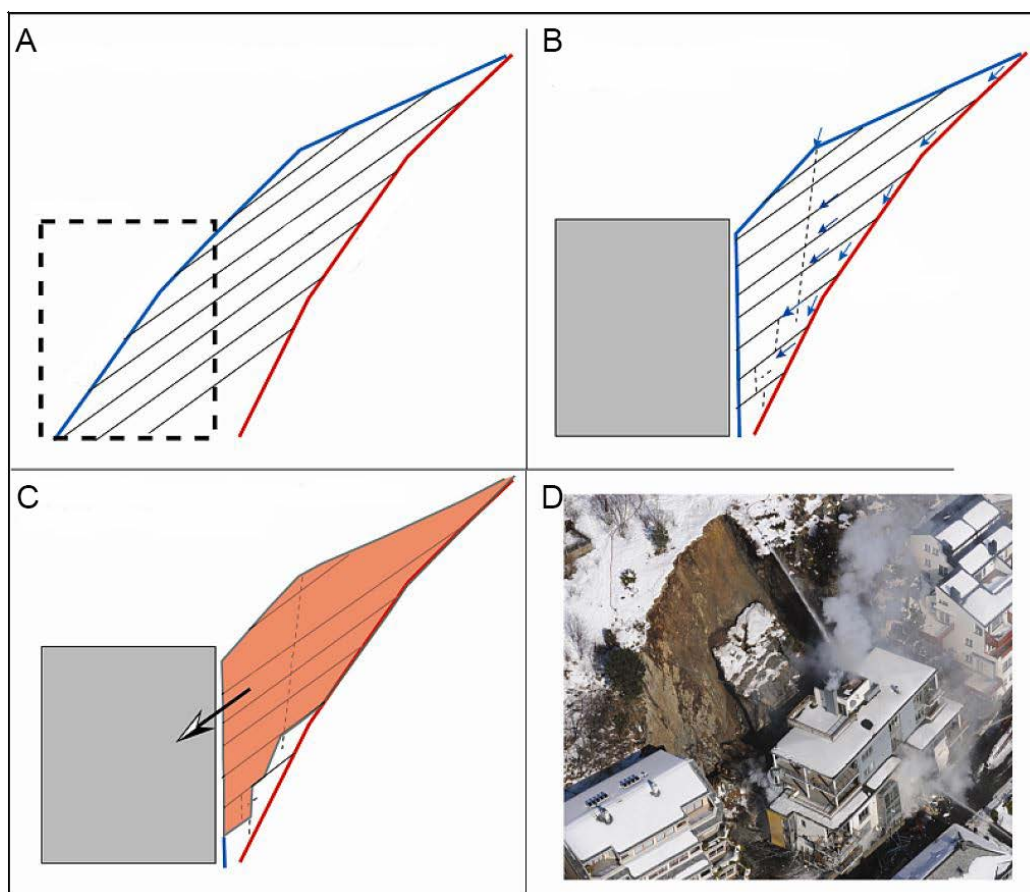


Figur 8. Området som det såg ut innan byggnation. Foto: Steinar Trygstad

4.2.2 Rasanalys

Strukturgeologin i rasområdet är inte extremt komplex eller ovanlig, men kritiska strukturer visade sig ha en mycket ogynnsam orientering (Figur 9) och dåliga hållfasthetsegenskaper, som successivt försämrades från byggnationstiden fram till då raset skedde. Mest avgörande var det bakre glidplanet, lokaliserat i en spricka som bedömdes av vissa som ett befintligt, geologiskt förkastningsplan. Planet fanns delvis blottlagt intill västra grannbyggnaden redan innan nybyggnationen inleddes. Vid tidigare byggnation av grannbyggnaden (till vänster i Figur 8) hade man bergschaktat in till svaghetsplanet, men på den aktuella tomten ligger planet längre in i berget och hade därför krävt mer omfattande bergschakt för att nås. Några kompletterande sprängningar genomfördes för att nå glidytor ("slepp") djupare in i berget, men bara i begränsad utsträckning.

Glidplanets egenskaper beskrivs som delvis uppkrossat och innehållande lermineral. Längre ner följde raset istället den geologiska lagringen, som åtföljs av en förskiffring, och övriga sprickset. Mineralogin i förskiffringen innehöll bland annat lermineral, varav en del med svällande egenskaper. Utöver dessa strukturer fanns två tydliga sprickset i berget, ett vertikalt ungefär vinkelrätt mot släntens riktning (i plan Figur 8). En större spricka i detta set begränsade raset i sidled mot öster (åt höger i Figur 8).



Figur 9. Illustration som visar hur utredningen bedömde att raset gått till. Se text för utförligare beskrivning. A: Blå linje = ursprunglig bergyta. Röd linje = glidplan. Streckad linje = kommande byggnad. Tunna svarta linjer = förskiffringssplan. B: Blå linje = schaktad bergyta. Streckade linjer = delvis öppna sprickor, nybildade sprickor i samband med eller påverkade av sprängning. Blå pilar = vattenvägar genom berggrunden. C: Färgat block = rasmassan. D: Flygbild efter raset. Figureerna hämtade ur Befring et al. (2008). Foto: Norsk polis helikoptertjänst.

Ett andra set stupar in i berget, ungefär vinkelrätt mot det större glidplanet. De två sprickseten skapade en blockighet i berget, som påverkade utfall vid sprängning och sönderdelning av rasmassan i delkomponenter.

Under schaktningsarbetena sprängdes och bortforslades cirka 8 000 m³ berg. De vibrationer och den sprängkraft som genereras i samband med sprängning genererar ofta en skadezon i det kvarstående berget, där porositeten längs svagare strukturer ökar och vissa nya sprickor bildas. En del av detta berg rensades bort genom skrotning. Hur omfattande skadezon och vattenflödet var i det aktuella fallet kan inte sägas vara visat. Bergschakten skapade också en förändrad spänningsbild i berget då det naturliga stödet för det högre liggande berget togs bort. De två processerna antogs ha skapat ett ökat vattenflöde genom berget (Figur 9B). Vattenflödet genom berget ger en degenerering av hållfastheten, framförallt genom erosion, genom svällande processer i lermineral längs sprickorna, samt genom återkommande frys/töcykler som skapar pådrivande krafter för brott längs sprickplanen, inte minst genom att ge förutsättningar för ett hydrostatiskt vattentryck motsvarande hela slänthöjden.



Figur 10. Sammansatta bilder tagna från grannfastigheten strax efter raset, med den drabbade byggnaden. Den blå pilen pekar på rasets överkant och även den blottlagda delen av glidytan är markerad. Figuren hämtad ur Befring et al. (2008), men blå markeringar är vårt tillägg.

För att förbättra stabiliteten i den färdigsprängda slänten utfördes bultförstärkning. Vid förstärkningen installerades 133 bultar (Ø25), med 3 och 4 meters längd, som gjöts in med cementbruk. Syftet med bultningen var framförallt att säkra potentiellt lokalt instabila block förorsakade av den sprickighet som beskrivits ovan. I den undre delen av slän-

ten bedömdes att bultarna fyllde sin funktion och man konstaterade att merparten av bultarna här inte är belastade till sin flytgräns. I den övre delen av slänten konstaterades att bultarna var för korta för att säkra slänten mot glidning i det bakre glidplanet, de gick helt enkelt inte igenom detta. Bultningen fyllde sin funktion för lokala stabilitetsproblem, men inte för den globala stabiliteten i slänten.

Raset skedde i mars månad, som tidigt hade haft en längre töperiod, men veckan innan raset hade en frostperiod, samt cirka 0,4 meter snö. Om och hur detta påverkat raset blev inte fastlagt.

4.2.3 Sammanfattande slutsatser

- I samband med bergschakt innan byggnation försämrades släntens stabilitet genom att det mothållande berget där huset skulle stå togs bort.
- Degenerering av hållfastheten i geologiska strukturer under 4 år ledde till raset.
- Skador från sprängningsarbetet tros ha påskyndat degenereringen.
- Förstärkningsinsatserna fyllde bara delvis sin funktion.
- De geologiska förutsättningarna var ogynnsamma, men inte ovanliga.
- Den mest kritiska strukturen (huvudsakligt glidplan) var delvis dolt för identifikation inne i berget.
- Det saknades en analys av släntstabiliteten för att dimensioner förstärkning med hänsyn till släntens storstabilitet.

4.3 Fall 3 – Europaväg/motorväg

Även detta fall omfattar en bergskärning intill en väg, där flera ras inträffat, både under byggskedet, efter att entreprenaden avslutats och under kompletterande förstärkningsarbeten. De underlag SGI tagit del av:

- Tekniskt PM Bergteknik, baserad på geologisk och bergteknisk utredning och som bland annat redovisar en förväntningsmodell för de lokala bergförhållandena (Bergab 2002).
- Objektspecifik teknisk beskrivning, Bergteknik, tillhörande förfrågningsunderlaget för entreprenaden där den aktuella bergschakten ingick (Vägverket 2003).
- Slutrapport för kompletterande bergarbeten (Trafikverket 2012)
- Optimering av berguttag (Sandström et al., 2013).

4.3.1 Bakgrund



Figur 11. Slänten är sprängd med lutning 5:1, men här ses i övre delen en flackare lutning där ras under byggentreprenaden skedde utmed förskiffringsplan. Foto: Johan Berglund.

Fallet beskriver flera ras som inträffade efter avslutad byggentreprenad. De mindre av dessa är i sammanhanget små och hade inte varit aktuella att ensamma ingå i denna rapport. Det inträffade dock ett större ras i samband med bergschaktarbeten vid arbeten för riskreducering, vilka genomfördes relativt kort tid efter avslutad entreprenad för byggnationen av vägsträckan. I och med att detta större ras inträffade under en entreprenad ligger fallet egentligen utanför omfattningen för denna rapport, men då det ger ett illustrativt exempel på potentialen i de latent risker som finns har vi valt att ändå inkludera det.

Entreprenaden utmed den aktuella, 200 meter långa bergslänten avslutades och trafiken släpptes på 2008. Den aktuella slänten är upp till 30 meter hög och sprängdes i avsikt att ge en lutning 5:1, vilket är den normala lutningen Trafikverket använder vid bra berg. Under själva entreprenaden inträffade ett större ras längs en spricka, parallell med förskiffringen, vilket ses i Figur 11. Efter byggentreprenaden skedde sedan 2011 ett mindre ras på cirka 4 m³ (Figur 12), vilket föranledde en besiktning och stabilitetsbedömning, med efterföljande förslag på åtgärder. Raset i sig var begränsat till diket utanför vägräcke och påverkade inte trafiken. Besiktningen visade att det fanns stora stabilitetsproblem i slänten. Ytterligare ett mindre ras inträffade strax innan byggstart för kompletterande arbeten 2011. Här konstaterades att raset skett utmed en vattenförande klorit- och lerfylld spricka och att den utlösande faktorn troligen var det intensiva regnandet tiden innan raset, som bidragit till erosion av sprickan.



Figur 12. Mindre ras som initierade besiktning och efterföljande, omfattande entreprenad. Foto: Trafikverket.

Vid förundersökningarna genomfördes en normal undersökningsinsats som bland annat rapporterades i Tekniskt PM. Följande är utdrag ur detta PM (fet text är redigering gjord för denna rapport):

Den planerade vägsträckningen har huvudsakligen ungefär NNW-SSE-lig riktning. I den södra delen .../vår redigering/..... har vägen dock en nära E-W-lig sträckning. Vägen skär berggrundens huvudförskiffringsriktning i varierande vinkel. Förskiffringen har vanligtvis en flack – medelbrant nordvästlig till nordostlig stupning. De generella problem som kan förväntas under dessa förhållanden innebär risk för utglidning i bergskärningarna på vänster sida om vägen samtidigt som lokal risk för blockutfall föreligger i bergskärningarna på den högra sidan av vägen vid överhäng eller ogynnsam sprickgeometri. Problemet i den vänstra sidan är utan tvekan det största och kommer att kräva mest åtgärder.

För att uppnå full stabilitet i de planerade bergskärningarna gäller i princip att skärningarna i den vänstra sidan av vägen redan från början bör anpassas till förskiffringsplanens stupning - inom de avsnitt där förskiffringsriktningen är parallell eller nära parallell med vägens riktning. Härigenom minimeras behovet av förstärkning och framtida underhåll. Skärningarna i den högra sidan kan däremot utföras brantare. I denna sida kan selektiv bultning av enskilda block eventuellt krävas vid ogynnsam sprickgeometri för att uppnå stabila slänter.

För att orsaka minsta möjliga skada i kvarstående berg måste bergskärningarna sprängas ut på ett skonsamt sätt. Genom att anpassa försättning, hållavstånd och laddningskoncentration kan ett begränsat skadezonsdjup uppnås. I bygghandlingen bör därför bl. a. ingå krav på en maximalt tillåten skadezon.

Det påtalas således tydligt i tekniska PM att det var väsentligt att ur stabilitetssynpunkt anpassa bergschakten efter de geologiska förhållandena, idealiskt med en lutning på cirka

1:1.5. I annat fall var prognosen en ”starkt nedsatt storstabilitet med risk för ras och utglidningar”. Alternativen till denna typ av schaktning bedömdes vara omfattande förstärkningsinsatser.

I bygghandlingen utgjorde en släntlutning 5:1 normalläget, vilket ofta fungerar i svensk berggrund med begränsat behov av förstärkning. För aktuell entreprenad innehöll den tekniska beskrivning avseende berg följande texter, som kan kopplas till de starka rekommendationer som fanns i tekniskt PM från förundersökningen:

Beställarens bergsakkunnige avgör, vid besiktning av bergskärningen, och i samråd med entreprenören, fortsatt sprängningsutförande och eventuella förstärkningsåtgärders omfattning och utförande.

samt:

Beställarens bergsakkunnige avgör, vid löpande besiktning av bergskärningen och i samråd med entreprenören, behov av kompletterande sprängning.

och angående förstärkning:

Skivigt berg, där det föreligger riks för bl a utglidning eller utfall av bergskivor och block, skall vid behov bergförstärkas.

Behov av bultning avgörs, vid besiktning av slänten, av beställarens sakkunnige och i samråd med entreprenören.

Bultarnas läge, riktning och längd bestäms i samråd med beställaren på platsen från fall till fall.

I utförandet byggdes hela den aktuella skärningen med 5:1, med så kallad slätsprängning, en metod för att minska skadepåverkan i det kvarstående berget (Trafikverket 2014a). Metoden brukar innebära bland annat att konturhålen (de som ska skapa slutlig kontur i slänten) ofta borrar tätare, samt att dessa hål detoneras med en liten fördröjning i tid från övriga salvan, i avsikt att få energin i detonationen att i huvudsak gå mot den fria ytan. Det senare tycks dock inte ha skett i detta fall.

I hela den aktuella slänten sattes efter beställarens anvisning ursprungligen 36 bultar, med 2 och 4 meters längder, vilket var de längder som fanns med i bygghandlingens mängdförteckning. Även viss driftförstärkning utfördes. All bultning genomfördes för att säkra lokal stabilitet, men däremot genomfördes inte någon förstärkning med tanke på storstabiliteten.

Det beslöts mot bakgrund av händelserna 2011 och efterföljande besiktning att genomföra en omfattande entreprenad för att stabilisera bergslänten långsiktigt. Bygghandlingen omfattade både bergschakt genom sprängning, bergrensning och bultning. Den strategi som valdes för de kompletterande åtgärderna 2011 för de mest instabila och riskabla partierna i berget var att låta färdig bergslänt i större utsträckning följa naturliga strukturer i berget, vilket redan ursprungligt tekniska PM hade förordat snarare än en specifik sprängd skärningsvinkel. Arbetena startades med omfattande jordschakt och blottläggning av berget ovanför slänten. Detta var nödvändigt för att kunna lokalisera de strukturer som utgjorde naturliga svaghetsplan i berget och för att kunna placera borrhål för sprängning på ett optimalt sätt i förhållande till dessa. Man ville också undvika att jordmassor följde med sprängstensmassorna ner mot vägen.

I samband med sprängningsarbeten under denna entreprenad inträffade ett större oplanerat ras, utöver det som föll ut i själva sprängsalvan som detonerat strax innan (Figur 13), vilket beskrivs under rasanalysen nedan. Efterföljande arbeten i entreprenaden fullföljdes som planerat med den färdigskrotade slänten, nu förstärkt med 228 bultar med längder upp till 6 meter långa bult med tanke på storstabiliteten.



Figur 13. Vid det oplanerade raset under arbetet med kompletterande förstärkning 2011, var körfältet närmast berget avstängt, men däremot inte det andra körfältet. Rasmassorna på bilden innefattar både det som föll ut i samband med sprängning och det som rasade strax efter. Foto: Trafikverket.

4.3.2 Rasanalys

Det finns en ganska tydlig analys genomförd kring bedömningen att slänten konstruerades med otillräcklig stabilitet som beskrivs av Sandström et al. (2013). Nedan följer en sammanfattning från den rapporten, samt Trafikverkets rapport kring händelserna kring det större ras som inträffade under åtgärdsentreprenaden, vilket belyser stabilitetsproblemen väl.

2011 observerade driftentreprenören för vägen att det skett ett ras i nedre delen av slänten med en total volym om cirka 4 m³. Det konstaterades efter en besiktning att de befintliga

bultar som monterats i byggskedet inte var tillräckliga för att hålla slänten stabil. Flera större bergpartier vilade på sprickplan med leromvandlad klorit, som stupade 50 grader ner mot vägbanan, utan mothållande stöd eller ändamålsenlig bultförstärkning.

Sprängningsarbetena började i bergsläntens norra del, som ett första steg borrades fyra rader med tre hål i varje rad upp och laddades med en liten laddning. Syftet med den första laddningen var att spränga bort ett mindre parti på cirka 190 m³ och se hur berget reagerade på sprängningarna samt få en bättre förståelse av bergets strukturer i tre dimensioner. Vid sprängningen föll mycket mer berg ut än vad som planerats för laddningen (cirka 600 m³). Ungefär 15 minuter efter denna sprängningen lossnade dessutom ytterligare ett mindre block från bergslänten, och i samband med detta rasade den kvarvarande bergskiva som låg kvar ovanpå den kritiska sprickytan ner. Sammanlagt föll ytterligare cirka 700 m³ ut i samband med detta efterföljande ras, totalt alltså cirka 1300 m³. Enligt planeringen skulle E6:an endast vara helt avstängd under 10 minuter i samband med sprängning, medan södergående körfält skulle vara avstängt under hela tiden då arbetet pågick. Efter raset stängdes hela E6:an av förbi det aktuella området.

Den direkta anledningen till raset efter sprängningen var att det vid sprängningen gick ut spränggaser framför salvan som lyfte delar av berget längs med sprickplanet. Stödjande delar av bergpartiet hamnade då ur sitt ursprungliga läge vilket ledde till en reducerad friktionsvinkel.

Efter raset blev det tydligt att existerande bultar som satt i skärningen för att låsa mindre block inte gick igenom det sprickplan som berget rasade ut efter. Bergets stabilitet visade sig vara sämre än den bedömning som gjordes innan sprängningen. I efterhand kan konstateras att det hade varit mer lämpligt att spränga ner hela bergskivan i en salva istället för att spränga ner den i partier.

4.3.3 Sammanfattande slutsatser

- Det saknades en analys av släntstabiliteten för att dimensioner förstärkning för släntens storstabilitet och för släntutformning.
- En tydlig problembeskrivning, prognos med rekommenderade lösningar fanns redovisade vid upphandling och då kontrakt skrevs.
- Byggorganisationen bedömde inte att det fanns utrymme eller behov att åstadkomma flackare slänter, med hjälp av naturliga svaghetsplan. Beslutsunderlag är inte känt för oss.
- Det begränsade utbudet av bultlängder som fanns i mängdbeskrivning användes konsekvent, vilket medförde att bergslänten byggdes med otillräcklig stabilitet, där större bergpartier inte var ordentligt förankrade i berggrunden innanför svaghetsplanen.
- Raset som inträffade under åtgärdsentreprenaden bedöms även kunnat ha inträffat innan entreprenaden, med full trafik i båda riktningarna. Det första, varnande lilla raset kunde ha varit utlösande faktor för ett stort ras av den dimension som syns i Figur 13.

4.4 Fall 4 – Ras mot järnväg

Detta fall är ett mindre ras från en naturlig slänt som drabbade en järnväg under sommaren 2014. Det förorsakade en urspårning, som kunde fått betydligt allvarligare konsekvenser än vad som nu var fallet.

SGI har tagit del av

- Bergbesiktningsdokument (Bergab 2014a)
- Rasriskinventering (Bergab 2014b)
- Tjänsteanteckning och personlig kommunikation (Hans Hargelius, Trafikverket)

4.4.1 Bakgrund

Slänten ligger utmed järnvägen, vilken trafikeras av person- och godstrafik. Slänten är flera hundra meter lång och där raset skedde är det cirka 15 meter jordslänt mellan räl och foten på bergslänten, med en ganska kraftig skogsridd i jordslänten. Raset bestod i att ett, eller möjligen flera block (bergskivor) rasade (gled) nerför bergslänten och fortsatte ner genom skogen upp på spåret, med urspårat persontåg och skador på slippers, räl som följd. Trafiken släpptes på cirka 3 dygn efter att olyckan skett, då skadorna på banan reparerats och tåget forslats bort.

Bergslänten är totalt cirka 65 meter hög ovanför banan vid raset, men det skedde från en höjd drygt 40 meter, vilken motsvarar cirka 50 meter i plan från banan. Till följd av raset togs det beslut att besiktiga inte enbart rasområdet utan hela slänten, utmed cirka 300 meters längd och varierande höjd, med släntfot 5-25 meter från räl. Avsikten var att bedöma behovet av insatser för att reducera risker för ytterligare ras.

4.4.2 Rasanalys

Som ofta är fallet för den analys som kan göras med hjälp av vid rasbesiktning och arbeten efter att raset inträffat, så har denna tydliga begränsningar. Det fanns ingen kartläggning eller dokumentation av bergslänten innan raset inträffade och då fastigheten där huvuddelen av slänten ligger är utanför banområdet, hör den formellt inte till Trafikverkets ansvar. Trafikverket har å andra sidan ett ansvar att skydda och se till att anläggningen är säker. I detta fall handlar det om en risk som inte fullt ut identifierats. Behovet av besiktning av den naturliga slänten hade tidigare påtalats vid några tillfällen i samband med bergbesiktning av sprängda slänter längs järnvägen, men inte genomförts då slänten dels låg utanför banområdet och dels av fanns det även rent ekonomiska skäl. Troligen har förvaltaren inte heller insett riskomfattningen.

För att analysera vad som inträffat behöver man förstå flera omständigheter kring händelsen. Det blir ett slags detektivarbete. Följande moment kan exempelvis behövas:

- Raskällan behöver lokaliseras.
- Rasade block och stenbitar behöver identifieras och ”pusslas ihop” och med någorlunda säkerhet kunna härledas till raskällan.

- Uppskattning av rasvolym, initial form på block med mera, samt hur fragmentering skedde är avhängigt föregående punkt.
- Block kan ha flyttats ur sin position efter raset – var landade de? I det aktuella fallet körde tåget på block som släpades med och hamnade i ett sekundärt läge.
- Om man kan lokalisera en brottyta i slänten har man en viss förutsättning att få en uppfattning om hur brottet gått till.

I det aktuella fallet lyckades man så vitt det går att bedöma ganska bra med detta arbete. En högst trolig brottyta var enligt besiktningsdokumentet lätt att identifiera. Brottytan såg färsk ut, det vill säga saknade påväxt från lav och andra växtdelar man finner på markytan och hade i övrigt spår som brukar ses i nyss frilagda sprickytor. Brottytan låg dessutom rakt ovanför det område där blocken hamnade, så det fanns egentligen inget tvivel om att det inte skulle vara rätt lokalisering för brottet. Ingen extrem väderlek föregick händelsen, enligt tillgänglig väderhistorik på SMHI, då det var normala sommartemperaturer och bara måttlig nederbörd de närmaste tio dagarna före raset.

Blocket hade en anläggningsyta mot underlaget på uppskattningsvis 8-10 m², och kanske ytterligare en kontaktyta mot sidoberget på uppemot 1 m². Nedanför ursprungsläget syns skrapmärken utmed slänten, fortsatt ner mot skogsdungen. Ungefär halvvägs ner mot denna dunge finns en bevuxen avsats där mindre delar av rasmassorna hamnade. I skogsdungen, där det är relativt tätt mellan träden, hade något träd fått barken avskalad ganska högt upp. Detta var en stark indikation på att blocket hade en skivig form, vilket också indikeras utav utseendet på intilliggande bergpartier vid brottytan. Blocket uppskattades till en tjocklek under 0,5 meter, och en uppskattad total volym på 3-4 m³. Ytterligare cirka 0,3 m³ skrotades i efterhand bort i direkt anslutning till rasytan.

Blocket/en har troligen defragmenterats på vägen ner i raset och sen slutligen ytterligare vid rälen, där det rullade/studsade ner i och delvis över diket mot järnvägsbanken, varvid delar av blockfragmenten hamnade på rälen. Inget larm hade kommit in när första tåg (persontåg) kom till platsen. Sträckan hade som tur var nedsatt hastighet. Efter att loket kolliderat och släpat med sig blocket/en ett hundratal meter skedde en urspårning, men utan att tågsetet välte (Figur 14). Ingen skadades vid händelsen, troligen delvis beroende på den låga hastigheten vid kollisionen.

För att nå fram till järnvägen i det aktuella läget fanns det klara tecken på att blocket ställt sig på högkant när det nådde skogsridån. Både trädet med avskalad bark, det generella avståndet mellan träd i området och den bedömda formen och storleken tyder på att blocket i den nedre delen av slänten ställt sig på högkant och rullat genom skogsdungen vidare mot rälen.



Figur 14. På bilden syns blocket där det slutligen hamnade efter att tåget släpat det med sig och fått stopp. Foto: Hans Hargelius.

Den cirka 300 meter långa, ganska höga bergslänten har delvis en omfattande talusslänt nedanför, och det mesta tyder på att slänten varit en aktiv rasbrant sedan den senaste glaciationen. Hela den synliga delen av talusslänten ligger ovanför järnvägen, men ytterligare gammalt rasmaterial kan finnas under jord, vegetation och fyllnadsmaterial.

Efter olyckan genomfördes en bergbesiktning och en rasriskinventering på en längre sträcka varvid flera bergskivor och block skrotades ned, och flera bergskivor bultades fast. Ett större block cirka 15 m³ stort identifierades med rasrisk men bedömdes inte kunna tas ned utan att riskera att skada banvallen. Blocket säkrades med ett stort antal ingjutna bergbultar.

4.4.3 Sammanfattande slutsatser

- Slumpen verkar ha styrt att raset skedde just vid det aktuella tillfället.
- Det kan även sägas något slumpmässigt att blocket ställde sig på högkant och lyckades passera skogsdungen, som annars skulle skyddat järnvägen.
- Slänten kan betraktas som att ha varit en dold, mer eller mindre okänd risk fram tills händelsen, även om behovet av besiktning hade påtalats.

- En låg hastighet på tåget bidrog till att olyckan fick så lindriga konsekvenser.
- Vid byggande av ny väg och järnväg med sprängda slänter bör en riskbedömning även inkludera den del av bergslänten som fortsätter brant utanför planområdet.

4.5 Fall 5 – Ras mot gång- och cykelväg

Det sista fallet som beskrivs här rör sig om två ras som skett i samma bergslänt utmed en gång- och cykelväg (GC-väg). Kommunen har ansvaret för drift och under håll av vägen.

SGI har tagit del av:

- Bergbesiktningar i kommun (Bergab 2012a)
- Besiktning efter åtgärd som påföljd av ras (Bergab 2012b)
- Besiktningsdokument (NCC 2015)
- Fotodokumentation och personlig kommunikation (Jan Thyselius, Opticon)
- Personlig kommunikation (Marcus Hull, Partille kommun)

4.5.1 Bakgrund

Den aktuella GC-vägen anlades i samband med att intilliggande väg (ÅDT cirka 16 000) byggdes för cirka 40 år sedan. För att ge utrymme för GC-vägen krävdes bergschakt, men samtidigt minimerades intrånget på omgivande mark. Dokumentation kring den ursprungliga bergschakten har inte påträffats, varför information kring ursprungliga överväganden inte är kända.

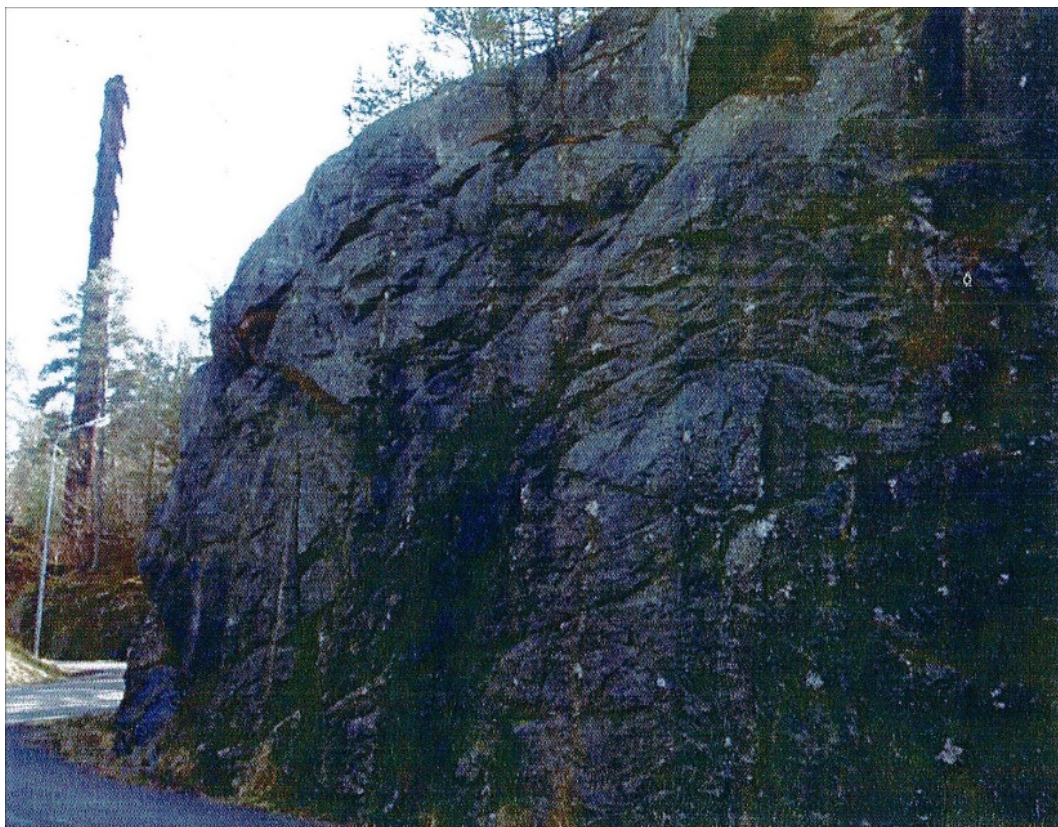
Det mesta tyder på att förstärkningsåtgärder i stort sett saknades efter den initiala bergschakten (enligt Bergab, 2012a), utöver några vertikala förankringsstag satta från överkant på slänten (se Figur 15). Underlag för design och riskbedömning har inte påträffats, men utformningen bör betyda att slänten bedömts stabil i det skick den konstruerades. kommer från de arbeten och den dokumentation som följde efter de inträffade rasen. Avståndet mellan bilväg och GC-väg är flera meter, vilket tillsammans med GC-vägens bredd gör att risker för biltrafik från den aktuella slänten kan bortses från. Däremot ligger slänten i direkt anslutning till GC-vägen och är sprängd i en lutning på 10:1, som motsvarar drygt 80 grader. Berget fortsätter att luta uppåt från toppen på den schaktade delen, in i den bakomliggande skogen där tjockare jordlager successivt överlagrar berget. Bergrensning har enbart skett 0,5-1 meter ovan slänt (Figur 15). Slänten är i detta läge som högst, cirka 12 meter.



Figur 15. Ovansidan på slänten efter slutlig förstärkning 2016. Tre rostfärgade förankringsstag ses centralt i bilden. Foto: Johan Berglund.



Figur 16. Första raset, 2012. Åt vänster i bild går en mindre infart till parkeringsplats och panncentral. De övre delarna (gulmarkerat) rasade 2015. Foto: Partille kommun.



Figur 17. Äldre bild på del av slänten där rasen senare inträffade. Foto: Bergab.

I juni 2012 inträffade ett ras då cirka 30 m³ rasade ner och hamnade på GC-vägen (Figur 16), varav ett av blocken uppskattades till cirka 25 m³. Det genomfördes då en besiktning och ett åtgärdsförslag togs fram som sedan blev underlag för efterföljande förstärkningsarbete och övriga riskreducerande åtgärder. Efter rensning av rasmassor genomfördes viss sprängning och efterföljande handskrotning. Total förstärktes sedan det kvarvarande berget med 35 bultar, upp till 4 meter långa. SGI har inte tagit del av slutbesiktningen av genomförda arbeten.

Trots dessa insatser inträffade 2015 ytterligare ett ras, ungefär i motsvarande läge på slänten, varvid delar av GC-vägen åter blockerades. Efter rensning av själva GC-vägen beslutade ansvarig handläggare i Partille kommun att stänga av vägen för gång och cykeltrafik tills slänten var besiktigad och åtgärdad, för att säkerställa en långsiktigt trygg trafikmiljö på platsen.

Ny besiktning genomfördes i form av uppdragsbesiktning i september 2015, vilket ledde fram till två alternativa, ganska omfattande åtgärdsförslag. Båda bedömdes av kommunen vara för kostsamma, varför det fortsatta arbetet överläts som en totalentreprenad åt mindre entreprenör som fick hela ansvaret för både åtgärdsförslag och genomförande.



Figur 18. Bild på hörnet i slänten, efter utförd förstärkning 2015. Foto: Johan Berglund.

De åtgärder som genomfördes var först en ganska omfattande skrotning i hela slänten, där en del partier som bedömdes instabila också schaktades ner. Dels nätades och bultades hela den branta delen av slänten, inklusive hörnet där rasen ägt rum (Figur 18). I överkant slänt sattes även nätskydd med öglebult för att hindra nedfall av olika slag från den ovanliggande, fortsatta slänten (Figur 15). Totalt sattes nu 47 bultar med upp till 6 meters längd. Slänten med utförd förstärkning slutbesiktigades 2016 med bara mindre anmärkningar.

4.5.2 Rasanalys

Initial schakt genomfördes med minimal förstärkning och väldigt liten avtäckning ovan slänt. Vid goda förhållanden brukar detta fungera också med branta bergschakter som denna. I detta fall identifierades inte de kritiska, svaga geologiska strukturer som senare ledde till rasen. Bedömningsgrunderna för att utföra schakten så brant, i så nära anslutning till GC-vägen och utan förstärkning har vi inte tagit del av, men uppenbarligen har inte de geologiska strukturerna bedömts vara svaga vid tillfället för entreprenaden, alternativt inte lokaliserats över huvud taget. Man kan konstatera att den schakt som genomfördes var minsta möjliga för att kunna få plats med planerad GC-väg. Likaså var utförd förstärkning och bergavtäckning ovan slänt, minsta möjliga. Det hörn där rasen skett (Figur 17) hade flera strukturer som kunde samverka till ras. Dels förskiffringsplan som stupar cirka 40 grader ut mot vägen, med lokal uppsprickning längs förskiffringen och dels brantstående sprickor som bryter upp slänten i en storblockig massa. Hörnet i slänter gjorde i sig att de plan utefter vilket blocken i raset gled ut var helt genomgående, så att det var fria ytor på ömse sidor om rasvolymerna. Det fanns därför inget stöd i hållfasthet åt dessa håll. Huvuddelen av de blottlagda ytorna i rasmassorna utgörs av brunaktiga sprickytor (Figur 16), som tyder på att det funnits genomgående, öppna och vattenförande sprickor runt om de block som föll ut. Slänten hade besiktigats bara någon månad innan

raset, då skrotning av lösa block, vegetationsrensning och bultförstärkning (säkring) av övriga, potentiella riskblock föreslogs. Även nedsprängning av hörnet (där ras skedde) diskuterades, men ansågs inte nödvändigt.

Det andra raset skedde alltså även det under sommaren, nu 2015. Det var delen högre upp i samma hörn som föll ut denna gång och det var liknande strukturer som begränsade rassmassorna i bakkant, det vill säga dels sprickplan lutande ut mot GC-vägen och dels brantstående plan ungefär parallella med GC-vägen.

Två tänkbara scenarier kan vara aktuella. Antingen var de block som rasade denna gång inte säkrade med den bultning som genomförts, alternativt klarade inte bultförstärkningen att bära den last de utsattes för vid raset.

Det är en väldigt begränsad avtäckning av berget ovan slänten, där jord och mossor på flera håll ligger inom en halvmeter från bergschaktkanten. Den nuvarande avtäckningen bedöms vara densamma som skedde ursprungligen. Detta gör det generellt svårare att bedöma kritiska strukturer, men i detta fall, då slänten är så vinklad i planvy, så kan man ändå identifiera ett par större strukturer som troligen är helt genomgående inne i berget. Denna struktur kunde potentiellt ha bidragit till ett större ras än vad som nu blev fallet. Riskerna för att så skulle ske har inte värderats, vare sig i denna rapport eller i de besiktningensdokument som vi tagit del av. Nuvarande bergförstärkning, tillsammans med den omfattande nätningen har bedömts ha åtgärdat akuta risker. Utdrag från slutbesiktning efter de senaste åtgärderna:

Föreliggande entreprenad har utförts under begränsande premisser. Åtgärder har eliminerat den akuta risken. Två bergpartier i objektet identifieras emellertid som kvarstående riskområden på sikt. Utförda arbeten inom denna entreprenad bedöms inte ha eliminerat dessa risker permanent. Fortsatt utredning rekommenderas för att permanent stabilisera berget.

4.5.3 Sammanfattande slutsatser

- Den enda rimliga bedömningen är att riskerna för ras underskattats och att geologiskt svaga strukturer helt missats i byggskedet.
- Vi ser det också som troligt att avståndet till bilväg, snarare än till GC-väg, har varit avgörande för val av släntdesignen och förstärkning i byggskedet.
- De förstärkningar och övriga riskreducerande åtgärder som genomfördes efter första raset var inte tillräckliga för att säkra släntens stabilitet, troligen beroende på otillräcklig eller underdimensionerad förstärkning.
- Nuvarande förstärkningar och riskreducerande åtgärder är dimensionerade och genomförda av erfaren entreprenör, delvis under arbetets gång. Eventuella dimensioneringsunderlag har vi inte haft tillgång till, vilket inte heller tycks ha funnits som underlag vid slutbesiktning. Denna är enbart baserad på okulär besiktning på plats (utan skylift) och med besiktningshandling från kompletterande besiktning efter andra raset som enda underlag.

5. Diskussion

5.1 De beskrivna fallen

Gemensamt för alla beskrivna fall är att geologiska strukturer spelat stor roll, deras geometri och deras egenskaper är avgörande både för slänternas förutsättning att gå i brott, och styrande för rasens utveckling. I något av fallen är det mindre glidkomponenter än andra och det norska exemplet bör nog formellt klassificeras som skred, enligt gällande synsätt. Det rör sig dock i huvudsak om glidning (skjuvning) av bergmassa eller block på ett eller flera svaghetsplan som sluttar neråt, ut mot rasområdet. Däremot varierar övriga bakomliggande och utlösande faktorerna, liksom konsekvenserna.

Att fallen liknar varandra geologiskt bedöms inte vara någon slump. Även om rena fall eller stjälpbrott också existerar, så är det generellt ganska vanligt att det antingen finns svaga sprickyor eller förskiffringsplan (ibland både och) med en ofördelaktig stupning ut mot anläggningen/fastigheten. Då krävs en förstärkning som varaktigt motstår de laster slänten och de kritiska strukturerna i den utsätts för. I alla de aktuella fallen (fall 2-5) har sådan strukturer funnits, men tillräcklig förstärkning har inte funnits på plats. Vår bedömning är att det är denna typ av ras som dominerar i Sverige, oavsett vilken slänttyp det handlar om.

Endast i det norska fallet ledde rasen till att människor förolyckades, främst beroende på att det rörde sig om ett bostadshus och att raset skedde nattetid. Övriga fall visar dock tydligt vilka risker som oförutsedda ras innebär. Övriga fall behöver analyseras djupare för att klargöra hur stora sannolikheterna var för allvarigare konsekvenser, och även när sannolikheten för allvarliga konsekvens ska anses vara så låg att riskerna är acceptabla.

Många av de risker som förverkligades i form av ras i de beskrivna fallen hade påpekats redan innan rasen inträffade, antingen i förundersökningen innan byggnation, eller vid underhållsbesiktning. De rekommendationer som fanns i undersökningsrapporterna genomfördes aldrig, vilket det kan finnas flera anledningar till. Den allra vanligaste situationen i landet är trots allt att enskilda bergslänter består av bra berg där inga ras inträffar under dess hela livscykel. Besvärliga slänter där ras kan riskera att förorsaka olycka hör trots allt till undantagen. Ras i berg får betraktas som en "sällanhändelse", framförallt på varje enskild plats och ännu mer så om man beaktar de förekommande olyckstillbudet i samband med rasen. Av denna anledning är det lätt att vaggas in i en slags falsk säkerhet, vilket i värsta fall leder till underskattning av risker, underdimensionering av förstärkning med ett icke ändamålsenligt förstärkningsutbud i bygghandlingarnas mängdförteckning.

Det finns ett tydligt behov av att det sker en oberoende verifiering av slutlig förstärkning, med hänsyn tagen till de svaga geologiska strukturer som kan finnas och som måste få en adekvat och genomtänkt hantering i slutlig släntdesign. Detta kan anses ingå i de fall anläggningen har klassats till geoteknisk kategori GK3, men inte i övrigt (Trafikverket 2014b). En oberoende bedömning kan dock behövas oavsett geoteknisk kategori, liksom löpande riskbedömningar och arbete enligt exempelvis observationsmetoden i utförandeskedet för att säkerställa att alla krav på anläggningen uppfylls (Trafikverket 2015b).

I byggskedet behöver det förstås finnas ett ändamålsenligt upphandlat förstärkningsutbud, som täcker in de förstärkningsfall som kan bli aktuella. Finns inte det krävs det en flexibilitet och erfarenhet hos byggorganisationen för att handha de oförutsedda situationer som kan uppstå vid entreprenader som omfattar bergslänter, samt en acceptans hos beställaren att vid behov kunna ta ökade kostnader för att nå en säker anläggning och hållbar livslängd. En underhållsplan för anläggningen bör finnas framme och ingå i livscykelprognosen redan i detta skede.

I drift och underhållsskedet bör det vid behov ske riskreducering, antingen med avsikt att:

- minska sannolikheten för ras (frekvensreducerande), eller att
- skydda vid ras (konsekvensreducerande)

alternativt förstås kombinationer av detta, vilket är vanligt. De flesta insatser som görs för att reducera risker i driftskedet för en anläggning (bergslänt) innebär att man gör en riskanalys i detaljskala för den aktuella slänten med efterföljande åtgärdsförslag, vilket kan innebära skrotning av lösa block och stenar med handhållna spett, rensning av vegetation, bult- och nätförstärkning och montering av skyddsnät med mera. Vad som faktiskt utförs styrs dock ofta av ekonomiska förutsättningar. Fall 1 illustrerar detta, där en väldigt utdragen process nu slutligen lett till riskreducering, både med hjälp av montering av skydd mellan slänt och väg, samt skrotning och förankring i själva bergslänten.

5.2 Samhällsbehov

Vid värdering av olycksrisker behöver normalt en avvägning ske mellan insatser som görs för riskreducering och dess kostnader å ena sidan och sannolikheten för att det inträffar en olycka, samt dess konsekvenser å andra; en kostnads-nyttanalys. Man har flera avväganden att göra som inte är helt självklara. Exempelvis kan nyttdelen av gjorda insatser för att reducera risk för ras i berg vara svår att värdera, då man förstås inte med säkerhet kan veta om och när eventuella ras skulle ha inträffat om insatserna inte genomförts, liksom vilka konsekvenserna skulle blivit.

Riskvärderingar av bergslänter är inte alltid lätta att göra ens för experter på området. Vid analys av inträffade ras saknas det vanligen detaljinformation kring de påverkande parametervärdena, speciellt för ras i äldre sprängda slänter. Det saknas även en kunskapsbas vad gäller bland annat olycksfrekvens och analyser kring en händelses tidsmässiga förutsägbarhet. För risker som bergras är det därför viktigt med konsekventa bedömningsgrunder och en systematisk hantering och dokumentation, vilket kräver tydliga instruktioner och riktlinjer.

När det gäller bergslänter i nära anslutning till infrastruktur och fastigheter, alltså nära platser där människor normalt vistas i samhället och nära samhällsekonomiska värden som kan vara hotade, så är ras i berg en av de risker som behöver värderas och vid behov reduceras. Då ras i berg som ger allvarliga konsekvenser (personskador och dödsfall), eller förorsakar stora ekonomiska skador är händelser som sker sällan, både i ett lokalt och nationellt perspektiv, hamnar risk för ras i berg vanligen ganska långt ner på prioriteringslistan. Inte desto mindre så är de potentiella riskerna lokalt stora, vilket illustrerats i de

beskrivna fallen i denna rapport. Många ansvarsägare har redan en ganska god uppfattning om sina rasrisker och arbetar systematiskt med underhåll och riskreducering, men för landet som helhet finns det ett behov av en övergripande inventering för att lokalisera och åtgärda risker som kan vara akuta.

Det finns system för riskhantering på flera håll i världen. I flera delstater i Kanada och USA har man sedan länge jobbat med systematiska riskhanteringssystem, både för spår-bunden trafik och större vägar. Systemen har utvecklats lite olika, men ett av dem; Ontario Rockfall Hazard System (RHRON) har även testats och utvecklats vidare med tanke på svenska behov av dåvarande Banverket och Vägverket, med hjälp av konsult (Bergab). Här blev namnet Rasriskrankningsystemet (Bergab 2008). RRRS syftade till att inventera, grov- och detaljklassa, samt analysera bergskärningar för att kunna göra rätt prioriteringar av underhållsinsatser.

Flera av dessa system, bland annat RRRS baseras till stor del på liknande faktorer som ska bedömas, F1-F4. Underliggande parametrar ser dock i detalj lite olika ut, men respektive faktor avser att ge en värdering som avspeglar: 1) Storlek på potentiellt ras, 2) Sannolikhet för att det inträffar (hur instabil potentiella rasmassor är), 3) Sannolikhet att rasmassor når det som hotas (väg, järnväg, bostad eller annat utsatt objekt), samt 4) sannolikhet för olycka och konsekvensen av denna.

Från RRRS pågår det när denna rapport skrivs ytterligare utveckling och förenklingar inom Trafikverket, i syfte att inom en snar framtid ha genomfört inventering och grov-klassning av en stor del av det bestånd av slänter utmed verkets vägar. Att skapa en enkel metodik för helt objektiv och enhetlig riskvärdering är dock svårt. Värdering av de olika faktorerna baseras på underliggande parametrar där vissa är ganska enkelt mätbara, medan några kritiska parametrar många gånger är mer svårbedömda och subjektiva. Bland annat handlar det om geologiska egenskaper på svaga strukturer i berget, som ofta bara är observerbara i begränsad utsträckning. Även med stor erfarenhet kan dessa vara svårbedömda. Alternativet att göra konsekvent konservativa bedömningar leder till kostsamma åtgärdsförslag som inte alltid är motiverade att genomföra. Omvänt kan en överskattning av hållfastheten i en viss struktur få allvarliga konsekvenser om ingen åtgärd bedömts nödvändig.

I de system som allmänt används för att bedöma och kvantifiera bergets kvalitet vid förundersökning och byggnation i berg i Sverige, främst Q-systemet (Barton et al., 1974), RMR (Bienawski 1989), GSI (Hoek and Brown, 1997) och RMi (Palmström 1995), finns inte någon direkt koppling till sannolikhet för brott som leder till ras, eller för enstaka blockutfall. Det gör det inte heller i de vidareutvecklingar från dessa system som skett, avsedda specifikt för bergslänter (exempelvis SMR, Q-slope och SSR). Däremot är de mer anpassade för att bedöma även lokal stabilitet och involvera enskilda, svaga strukturer i en slänt vid klassning. Troligen är en utveckling av någon av dessa system en lämplig väg för att skapa ett system som kan användas för att systematiskt och noggrunda enhetligt bedöma sannolikheten för att ras ska inträffa i en specifik slänt.

För Sverige har vi inte funnit några statistiska sammanställningar över ras i berg, vare sig i vetenskaplig eller annan litteratur. Trafikverket har ett flertal databaser för olika ändamål och i några av dessa finns information om inträffade bergras. Troligen skulle en dju-

pare analys av dessa kunna ge underlag till en begränsad kvantitativ analys. En vanlig situation är dock att mindre ras och blockutfall för väg och järnväg som inte förorsakar olyckor, rapporteras internt och undanröjs inom loppet av ett dygn, varefter de inte går att spåra i historiken utanför organisationen. Totalt handlar det om ett 10-tal fall av ras per år Sverige som når ut på väg/järnväg, det vill säga fall då det krävs maskinella insatser för att röja undan. För att kunna värdera riskernas omfattning över hela landet för ras i berg ser vi ett behov av en central databas för inträffade ras. För att den ska bli användbar för kvantitativa analyser behövs det dock någon form av system för inrapportering. För stora delar av landet är riskerna för ras i berg små, men lokalt kan dom vara väsentliga. Utan ett statistiskt underlag är det svårt att kommunicera dessa risker för beslutsfattare och myndigheter.

6. Några slutsatser

Här följer en kort sammanfattning av de slutsatser vi dragit i denna studie. Vi lyfter också några frågor vi bedömer behöver prioriteras för att se över riskerna kopplade till ras i berg i landet.

De fall som beskrivits i denna rapport domineras av ras utmed svaga geologiska strukturer i berget. Detta är en vanlig situation, men för äldre skärningar är det också vanligt att slänter lämnats med stora sprängskador efter bergschakt, vilket idag är en stor orsak till enstaka blockutfall längs järnväg och vägar, en bedömning som delats med externa granskare av rapporten.

Det är flera tydliga generella orsaker till de problem som skapar risk för ras i berg. Några av dessa är:

- Aktuell status för äldre sprängda slänter kan saknas på grund av att de inte besiktigats.
- Naturliga slänter ligger ofta utanför planområden och risker därifrån har inte beaktats.
- Undersökningar av geologin inför byggnation kan sällan bli så omfattande att alla svaga strukturer beaktats.
- Prognos och rekommendationer från geologiska undersökningar tas inte alltid om hand i byggskedet.
- Ekonomin inom ett ansvarsområde eller i ett projekt är styrande, vilket kan leda till att design av bergslänter inte prioriteras i tillräcklig utsträckning.
- Planområdets storlek kan också sätta rumsliga begränsningar för att kunna genomföra optimala, hållbara lösningar för slänters utformning genom att låta dem följa bergets naturliga strukturer.

Vid nybyggnation och bergschakt är det viktigt att:

- lokalisera och karaktärisera kritiska strukturer vid förundersökning,
- den ingenjörsgelogiska prognosen verifieras och eventuellt kompletteras i byggskedet för en träffsäker, långsiktig prognos för släntens beteende,
- ha ett tillgängligt förstärkningsutbud i bygghandlingar som klarar att säkra de lastsituationer som kan förväntas,
- det finns en flexibilitet i handlingar och i byggorganisation så att beslut om nödvändiga kompletteringar och extraordinära insatser kan fattas vid uppkommande behov,
- rätt avvägning görs mellan å ena sidan planområdets omfattning med tanke på den bergschakt som kan behövas om slänterna ska anpassas efter geologiska strukturer, och å andra sidan möjlighet och behov att med förstärkningsinsatser skapa säkra slänter vid mer begränsad, brantare schakt,
- tillräcklig bergavtäckning görs även ovan slänt för att upptäcka riskabla geologiska strukturer som kan påverka släntens stabilitet, samt för att undvika rotsprängning och förhindra onödig grundvattentillförsel.

När bergschakt för exempelvis exploatering är nödvändig finns det stora ekonomiska vinster att göra ur ett livscykelperspektiv genom att genomföra rätt insatser från början med en optimerad layout och förstärkningsdesign. Kan man hitta rätt nivå i anläggnings-skedet skapas förutsättningar för driftsäkra anläggningar med låga underhållskostnader, vilket också skulle kunna försvara förhöjda anläggningskostnader. Att grundlägga på berg är nästan alltid ett bra val, men exploatering som skapar permanenta sprängda slänter i höjdparter, skapar ett underhållsbehov som normalt undviks om naturliga hållområden lämnas intakta.

Det finns i övrigt främst två typer av slänter där rasrisker bedöms som störst, även om de lokala förutsättningarna varierar stort. Dels gäller det äldre sprängda slänter där de ursprungliga sprängskadorna kan ha påskyndat degenerering av hållfasthet och därmed stabiliteten i slänten. Det brukar i dessa fall också vara svårt att reda ut hur sprängningen gick till, hur skrotning och förstärkning utfördes och hur eventuell förstärkning degenererats. Dels gäller det också naturliga slänter som i många fall aldrig bedömts ur den här typen av riskperspektiv, trots närhet till bebyggelse och infrastruktur.

7. Litteraturförteckning

- Aladejare, A. E. and Wang, Y. (2017) 'Evaluation of rock property variability', *Georisk*, 11(1), pp. 22–41.
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974) 'Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support', *Rock Mechanics*, 6(4), pp 189-236.
- Befring, O. *et al.* (2008) *Skredulykka i Ålesund*, Rapport frå utvalet som har gjennomgått skredulykka i Ålesund 26 mars 2008.
- Bergab (2002) *Teknisk PM Bergteknik*, Internrapport, Vägverket region väst.
- Bergab (2008) *Rasriskrankningssystemet RRRS Detaljklassning enligt RRRS Beskrivning av systemet*. Internrapport, Vägverket/Bergab.
- Bergab (2012a) *Bergbesiktning Partille kommun*, Internrapport, Partille kommun.
- Bergab (2012b) *Syn efter åtgärd*, Internrapport, Partille kommun.
- Bergab (2014a) *Bergbesiktning*, Internrapport, Trafikverket.
- Bergab (2014b) *Rasriskinventering*, Internrapport, Trafikverket.
- Bienawski, Z. (1989) *Engineering rock mass classifications*, Wiley and Sons, New York.
- Boverket (2016) *Boverkets konstruktionsregler, EKS 10*, Boverket, Karlskrona.
- Böhme, M., Derron, M.-H. and Jaboyedoff, M. (2014) 'Quantitative spatial analysis of rockfalls from road inventories: A combined statistical and physical susceptibility model', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (2), pp. 81–121.
- Crawford, B. R., Faulkner, D. R. and Rutter, E. H. (2008) 'Strength, porosity, and permeability development during hydrostatic and shear loading of synthetic quartz-clay fault gouge', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(3).
- D'Amato, J. *et al.* (2016) 'Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), pp. 719–735.
- Fischer, L. *et al.* (2012) 'On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas', *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(1), pp. 241–254.
- Hoek, E. and Brown, E. T. (1997) 'Practical estimates of rock mass strength', *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34(8), pp. 1165–1186.
- Macciotta, R. *et al.* (2015) 'Quantifying weather conditions for rock fall hazard management', *Georisk*, 9(3), pp. 171–186.
- Macciotta, R. *et al.* (2017) 'Quantifying rock fall probabilities and their temporal distribution associated with weather seasonality', *Landslides*, 14(6).
- NCC (2015) *Uppdragsbesiktning*, Internrapport, Partille kommun.

Noorian Bidgoli, M. and Jing, L. (2015) 'Water Pressure Effects on Strength and Deformability of Fractured Rocks Under Low Confining Pressures', *Rock Mech Rock Eng*, 48(3), pp. 971–985.

Palmström, A. (1995) 'Characterizing Rock Burst and Squeezing by the Rock Mass Index', *Design and Construction of underground Structures*, New Delhi, 23-25 February, 1995.

Peckover, F. L. and Kerr, J. W. G. (1977) 'Treatment and maintenance of rock slopes on transportation routes', *Canadian Geotechnical Journal*, (14), pp. 487–507.

Sandersen, F. *et al.* (1996) 'The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability', in *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides*. Trondheim, Norge, pp. 97–114.

Sandström, B. H., Öhr, J. and Åkesson, U. (2013) 'Optimering av berguttag i bergslänter för att minimera kostnaderna för förstärkning och underhåll', in *Bergsprängningskommitténs 58:e diskussionsmöte 2013*, Älvsjö, 12 mars, 2013.

SGI (2015) *Slänter i berg – Inventering av kunskapsläge och behov*, SGI Publikation 22, Statens geotekniska institut, Linköping.

SIS (2005) *Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner, Del 1: Allmänna regler*, SS-EN 1997-1:2005, SIS, Swedish Standard Institute, Stockholm.

SOU (2010) *Plan och bygglag*, Svensk författningssamling, SFS 2010:900.

SOU (2011) *Plan och byggförordning*, Svensk författningssamling, SFS 2011:338.

SOU (2017) *Betänkande av klimatanpassningsutredningen*, SOU 2017:42, Statens Offentliga Utredningar.

Statens vegvesen (2011) *Registrerte skredhendelser langs E136*, Vegdirektoratet, Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen, Geoteknikk og skred, Oslo.

Svensk Byggtjänst (2017) *AMA Anläggning 17, Allmän material och arbetsbeskrivning för anläggningsarbete*, Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Tekniska Nomenklaturcentralen (1988) *Geologisk ordlista*, TNC 86, Tekniska nomenklaturcentralen, Stockholm.

Trafikverket (2011) *TRVK Tunnel 11*, Publikation 2011:087, Trafikverket, Borlänge

Trafikverket (2012) *Rödberget – Kompletterande bergarbeten*, Internrapport, Trafikverket.

Trafikverket (2013) *Vägplan Väg 675 Ulvesund, Samrådsunderlag*, Internrapport, Trafikverket.

Trafikverket (2014) *Trafikverkets handbok för ovanjordssprängning*, Publikation 2014:44, Trafikverket, Borlänge.

Trafikverket (2015a) *BVS 1585.005 Typsektioner för banan*, TDOK 2015:086, Trafikverket.

Trafikverket (2015b) *TRVK Vägars och gators utformning*, Publikation 2015:086.

Vägverket (2003) *Objektspecifik teknisk beskrivning, bergteknik*, Internrapport, Vägverket region väst.

WSP (2016a) *PM Beslutsunderlag, Bergteknik*, Internrapport, Trafikverket.

WSP (2016b) *Projekterings-PM Bergteknik*, Internrapport, Trafikverket.

Wyllie, D. and Mah, C. (2005) *Rock Slope Engineering, Civil and Mining*, 4th edition. Spon Press.



Statens geotekniska institut
Postadress: 581 93 Linköping
Tel: 013-20 18 00
E-post: sgi@swedgeo.se

www.swedgeo.se
