

STRANDSONESTABILITET – HVA HAR VI LÆRT AV Å NEDSETTE KOMITEER FOR Å UTREDE SKREDÅRSAK?

Stability of shoreline slopes

– what did we learn from appointing committees to evaluate the cause of sliding?

Steinar Nordal (NTNU), Arnfinn Emdal (NTNU),
Jean-Sébastien L'Heureux (NGI), Stein Are Strand, (NVE)

SAMMENDRAG

Fire skredtilfeller i strandsonen er beskrevet med et forsøk på oppsummering av hva disse lærte oss, Kattmarka 13. mars 2009, Nord-Statland 29. januar 2014, Sørkjosen 10. mai 2015 og Ytre Sokkelvik 7. mai 1959. Kattmarka satte mellom annet fokus på å identifisere bergoverflaten med hensyn på sprengning. Nord-Statland reiset spørsmål rundt vibrasjoner fra komprimering med vibro-vals. I Sørkjosen ble funn av et dypt leirlag sentralt. Sensitiv og dels kvikk leire var involvert i alle tilfellene. Alle skredene, inklusive Sokkelvik, kan knyttes til anleggsvirksomhet, selv om utløsende årsak varierer. Skred er et uønsket fullskalaforsøk. Vi kan og bør lære av disse for å redusere antall skred. Tilbakeregning av skred gir verdifull kalibrering av parameterbestemmelse og beregningsmetodikk. De fire tilfellene bekrefter at norsk geoteknikk har gode prosedyrer for parameterbestemmelse mellom annet fra CPTU samt gode verktøy for stabilitetsvurderinger. Detaljert batymetri har vist seg å være til stor nytte for å finne årsak, initiering og forløp av skred i strandsonen. Denne artikkelen bygger på arbeid i de undersøkelsesgrupper som ble satt ned knyttet til de fire skredtilfellene og på arbeid utført av andre på oppdrag fra undersøkelses-gruppene. Navn på deltagere i undersøkelsesgruppene finnes i referanselisten.

Det understrekes at vi i arbeidet med å finne årsak til skred bør unngå å jakte på syndebukker – vi trenger geoteknikere og konsulenter som tar vanskelige oppdrag.

SUMMARY

Four shoreline slides are presented and lessons learned are suggested and discussed. The cases are Kattmarka 13. March 2009, Nord-Statland 29. January 2014, Sørkjosen 10. May 2015 og Ytre Sokkelvik 7. May 1959. Sensitive and partly quick clays were involved in all cases. A slides is an undesirable and unintended full scale test and we should learn from them to reduce the number of future slides. Backcalculation of slides offers valuable calibration of our procedures for determination of soil strength parameters and for evaluating methods for stability calculations. Backcalculating the initial slides of the four cases suggests that Norwegian geotechnical engineering has good procedures and adequate methods for evaluating slope stability. High resolution bathymetry is found to be of great value in investigating the initiation and development of slides in shoreline slopes.

It is emphasized that in work towards identifying the cause of a slide, we must avoid hunting scapegoats. We need geotechnical engineers and consultants that take on challenging projects.

INNLEDNING

Norge har tallrike fjorder med marin leire og løse delta-avsetninger. Mange av oss bygger, bor og ferdes i denne strandsonen og mange blir berørt når det skjer skred.

Skred kan skyldes naturlige prosesser og/eller menneskelige inngrep. Figur 1 viser kvikkleireskredet på Esp utenfor Trondheim som var initiert av erosjon i en bekk. Mens naturlig erosjon var den dominerende utløsende faktor i tidligere tider, er dessverre menneskelige inngrep den mest vanlige utløsende faktor i dag. Ca. 60 % av kvikkleireskredene større enn 50.000 m³ i perioden 1970 – 2016 var utløst av menneskelige inngrep, L'Heureux (2017). NVE antyder en andel som kan være enda høyere. Dette er for høyt. Vi må som geoteknikere bidra til å redusere antall skred, og i særdeleshet de mange som skjer i tilknytning til menneskelige inngrep i terrenget.

Flere politikere og ledere i Statens Vegvesen har sagt: «Det skal være trygt å bo, også ved et veganlegg.» Vi trenger å lære - og kan lære - av skred for å unngå skred.



Figur 1 Skred ved Esp på Byneset utenfor Trondheim, nyttårsdag 2012, (Foto: Kim Nygård).

Artikkelen tar utgangspunkt i fire skredhendelser, Kattmarka 13. mars 2009, Nord-Statland 29. januar 2014, Sørkjosen 10. mai 2015 og Ytre Sokkelvik 7. mai 1959. I det følgende er hver av skredene kort behandlet fulgt av en oppsummering av noe av det vi kan lære av hendelsen. Deretter er noen tanker av mer generell art samlet i en konklusjon.

Artikkelen bygger på arbeidet utført av undersøkelsesgruppene som ble satt ned etter de fire skredene. Alle medlemmene i disse komiteene har derfor bidratt sterkt til de tanker som formidles herunder. Samtidig er ikke dette manus sendt på høring til alle komitemedlemmene, slik at forfatterne står ansvarlig for de formuleringer som er benyttet og de betraktningene som er presentert om de ikke finnes i de opprinnelige rapportene fra komiteene.

Når et skred oppstår ser en ofte flere mulige årsaker til dette. Som geoteknikere velger vi å

tenke materialteknisk: Belastningen er blitt større eller lik styrken. Altså kan skred skyldes økt belastning på jorda eller redusert styrke i jorda. Typiske eksempler på økt belastning er utlegging av fyllinger og utgravninger i skråningsfot. Styrken kan reduseres ved for eksempel økt poretrykk. Økt poretrykk forekommer ved mye nedbør, snøsmelting eller endring i avrenningsforhold og vannveier i terrenget. Udrenert styrke i leire kan reduseres over tid ved avlastning, ved syklisk belastning og bli forsvinnende liten etter store skjærdeformasjoner, som i kvikkleire.

Etter et skred er skredmassene sterkt forstyrret og de opprinnelige materialeegenskapene kan ikke lenger måles. Dette og den øvrige kompleksiteten gjør at det ikke alltid, hverken innad i en komite eller i det geotekniske miljøet, er full enighet om hva som faktisk var årsaken til en skredhendelse. Ofte er det flere årsaker til et skred, men likevel kanskje en primær utløsende årsak. Igjen er det forfatterens syn som ligger til grunn for vurderingene i dette foredraget.

KATTMARKA 13. mars 2009

Skredet oppsto mens det pågikk sprengningsarbeid i en fjellskjæring knyttet til et mindre vegprosjekt inn til Kattmarka ved Namsos, med oppgradering og utvidelse av veggen for å etablere en gangvei, Figur 2. Den geotekniske konsulenten hadde anbefalt at veggen skulle legges inn på berg fremfor å legge utvidelsen på en fylling på leira mot sjøen. Konsulenten hadde verifisert at stabiliteten var dårlig og en utfylling mot sjøen for breddeutvidelse var ikke tilrådelig. Dette var en helt riktig geoteknisk vurdering.

Undersøkelsesgruppa sitt arbeid

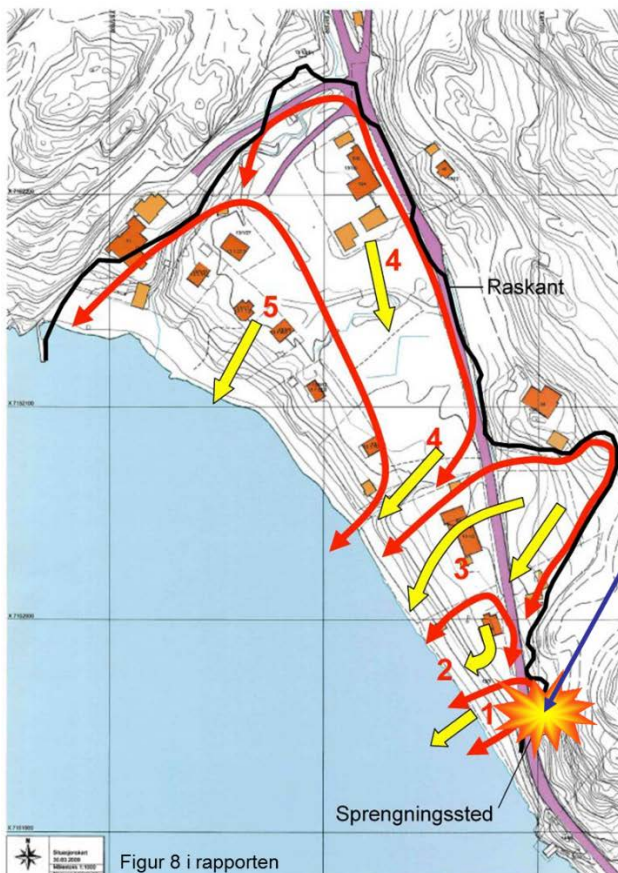
Skredet startet ca. ett og et halvt minutt etter at salve 19 i en serie av salver var satt av. Etter skredet var det antydning fra flere hold at det kunne være de gjentatte rystelsene gjennom berget fra salvene som initierte skredet gjennom syklisk poretrykksoppbygging og styrkereduksjon i leira. Alternativt kunne en tenke seg at mye masse fra sprengningen falt ned på leira og overbelastet skråningen nedenfor og ut mot sjøen.

Undersøkelsesgruppa fant en annen årsak. Ved andre gangs befarings og etter forsiktig utgravning av de bakre rasmassene der skredet ifølge øyevitner startet, fant undersøkelseskomiteen at bergoverflaten der salve 19 ble satt, overhode ikke var som antatt og forutsatt. Bergoverflaten mot leira tok en uventet vending tilbake mot og nesten inn under borehullene. Dermed gikk salve 19 av svært tett på den sensitive leira og skjøv berget med voldsom kraft, som et stempel, ca. 1 meter rett inn i leira, Figur 5. Uheldige sprekkeretninger i berget, Figur 6, bidro til den uventede virkningen. Den bløte og sensitive leira ble fullstendig omrørt, mistet sin styrke og initialscredet gikk, Figur 4, 5 og 7.

Dette initiale skredet åpnet for en påfølgende retrogressiv bruddutvikling siden områdestabiliteten var lav og store deler av Kattmarka raste så ut på kort tid, Figur 3.



Figur 2 Foto av skredområdet i Kattmarka. Foto: Leif Arne Holme.

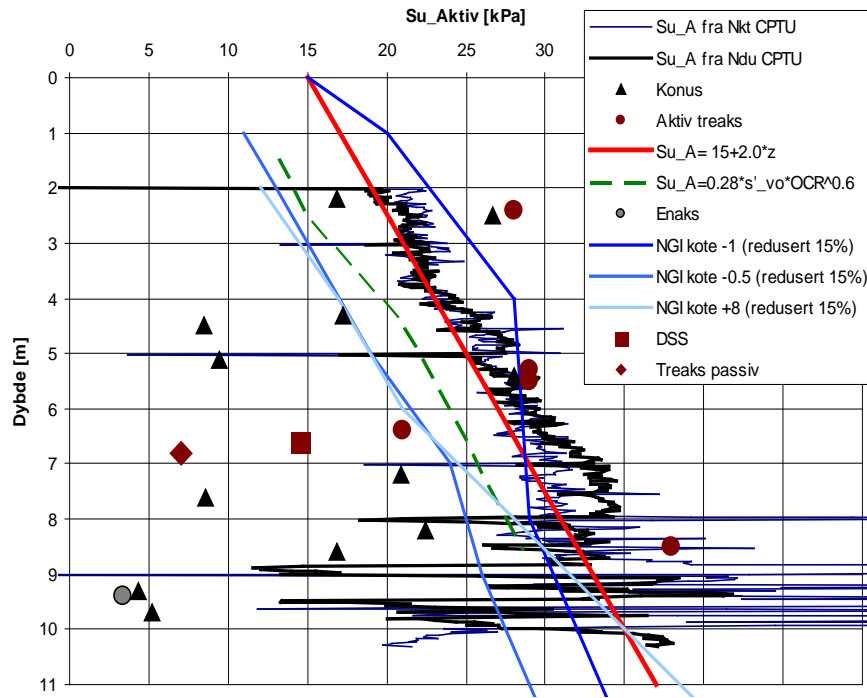


Hva skjedde?

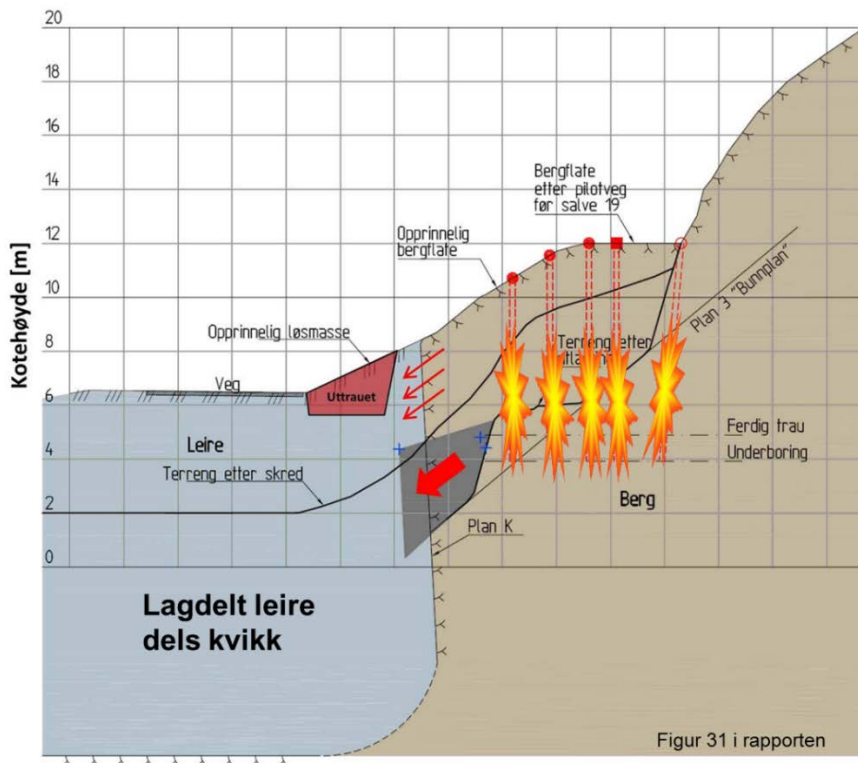
Skredet startet ca. et halvt minutt etter at salve nr. 19 ble avfyrt kl. 11.39 under sprengning for fjellskjæring sør i skredet fredag 13. mars 2009

- Utviklet seg bakover fra initialscredet som vist i figuren.
- Volum: 300 000 - 500 000 m³
Ødela 4 boligenheter og 6 fritidseiendommer.
- Ingen mennesker omkom eller ble alvorlig fysisk skadet.

Figur 3 Illustrasjon av den retrogressive skredutviklingen i Kattmarka.



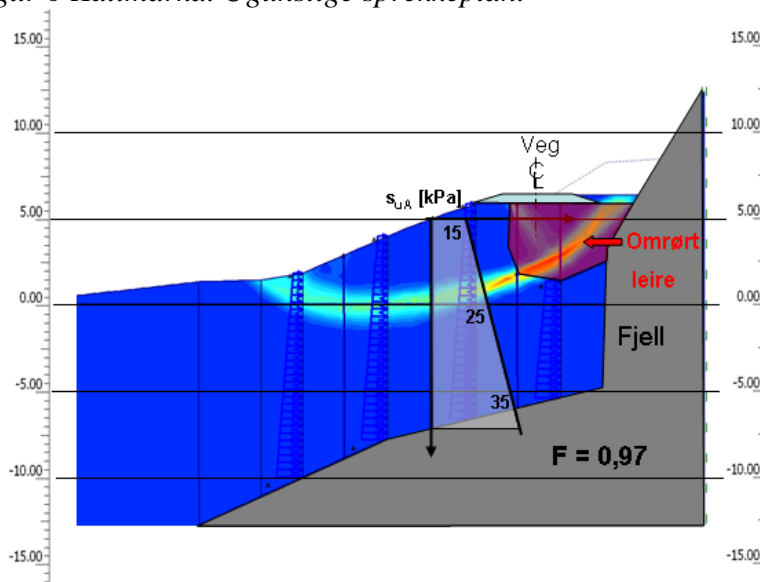
Figur 4 Udrenert aktiv styrke anslått ut fra CPT i Hull S5-B i Kattmarka supplert med NGI sine verdier fra Fiolveien (utenfor skredet) og med valgt midlere styrke for skredområdet angitt med rød linje.



Figur 5 Kattmarka. Salve 19 skjøt fjellveggen som et stempel ca. 1 meter ut mot leira.



Figur 6 Kattmarka. Ugunstige sprekkeplan.



Figur 7 Kattmarka, snitt mot sjøen ved salve 19. Plan ADP analyse med sidestøtte for å ta inn effekt av oppstøttende nabosoner (3D effekt), men svekket av omrøring rundt sprengnings-punktet, viser sikkerhet $F \approx 1,0$.

Hva lærte vi av skredet i Kattmarka?

Konsulentene visste at både den lokale stabiliteten og områdestabiliteten var dårlig til moderat og hadde fokus på dette. Forslaget om å flytte veglinja var godt. Forfatterne mener konsulentene gjorde en god jobb. Og vi trenger konsulenter som tør å ta på seg også små oppdrag med krevende grunnforhold.

(1) Bergoverflaten må identifiseres.

Hovedbudskapet fra Kattmarka må knyttes direkte til den utløsende skredårsaken. Vi må vite hvor bergoverflaten går når vi sprenger i områder med sensitiv leire. Ingeniørgeologisk kompetanse i kombinasjon med tilstrekkelige grunnundersøkelser i tidlig prosjektfase må bidra til dette. Sett i ettertid er forløpet av bergoverflaten ved salve 19, Figur 6, ikke overraskende om en ser på hvordan bergoverflaten er lenger oppe i åsen, Figur 2.

(2) Områdestabilitet

Etter skredet ble det fokus på områdestabilitet og krav til å sikre denne. Det er viktig for alle involverte å være seg bevisst at en opererer i et område med sensitiv leire, der det kan være fare for at en lokal ustabilitet utløser en progressiv skredhendelse.

(3) Det er initalskredet vi må unngå

I Kattmarka var initalskredet forårsaket av sprengning altfor tett på leira. Da er ikke høyere sikkerhetsfaktorer (materialfaktorer) i geotekniske stabilitetsanalyser et egnet virkemiddel for å unngå at dette skjer igjen.

(4) Kontroll under utførelse og kommunikasjon mellom aktører kan hindre skred

I Kattmarka ble faresignaler under utførelsen oversett. Det ble noen dager før skredet funnet sensitiv leire på innsiden av veglinja nær salve 19. Hvis dette hadde blitt undersøkt nærmere, kunne en blitt klar over forløpet av bergoverflaten. Tettere kommunikasjon mellom utførende, prosjektleder, konsulent og byggherre kunne trolig avverget skredet?

(5) Hvor farlig er rystelser fra sprengning?

Selv om skredet i Kattmarka ikke ble utløst av ordinære rystelser gjennom berg og inn i sensitiv leire, satte hendelsen denne saken på dagsorden. Det ble gjort målinger av geodynamiske parametere på leira og problemstillingen førte til en økt forskningsinnsats, primært på NGI, for å sette tall på hvor store rystelsene må være for å gi en signifikant reduksjon i udrenert skjærstyrke (Johansson mfl., 2013). Studier i ettertid har vist at rystelser fra sprengning har utløst flere skred i sensitiv leire. Bouchard mfl. (2016) konkluderer med at 13 kvikkleireskred trolig er utløst av sprengning i Norge, Sverige og Canada siden 1910.

(6) Tilbakeregning ga sikkerhetsfaktor $F = 1,0$

Det er undersøkelsesgruppa sin oppfatning at tilbakeregning av skredet med lamellemetoden og elementmetoden er med på å bekrefte at dagens prosedyrer for å bestemme udrenert ADP - skjærstyrke fra CPTU er gode og videre at våre stabilitetsanalyser fungerer godt. I tilfellet Kattmarka er det ingen tvil om at det er korrekt å anta udrenerte forhold siden det er snakk om dramatiske spenningsendringer over kort tid.

(7) Tredjepartskontroll

Skredet i Kattmarka skjerpet kravet til tredjepartskontroll også i små i prosjekter der kvikkleire er involvert, siden selv små inngrep da kan føre til skred med store konsekvenser.

NORD-STATLAND, 29. januar 2014

Skredet i Nord-Statland i Namdalseid kommune var et omfattende undersjøisk skred på rundt 400.000 m³, som tok med seg ca. 200 meter av strandlinja syd for Sagvika, Figur 8. Skredet førte til en flodbølge som ødela bygninger, båter og brygger nord for skredet. Ingen mennesker ble alvorlig skadet. I strandlinja syd for skredområdet pågikk det anleggsarbeid med masseutskifting inklusive komprimering med en 11 tonns vibrovals knyttet til utbygging av ferieboliger fra Sagvika og rundt neset i øst mot Langvika. Anleggsarbeidet pågikk samme dag som skredet gikk. Den geotekniske konsulenten for prosjektet hadde identifisert en bratt marbakke, som begynte ca. 50 meter ut for det relativt langgrunne området der anleggsarbeidet foregikk. Den dårlige stabiliteten i marbakken ble senere bekreftet av beregninger i regi av undersøkelsesgruppa, Figur 9.

Grunnundersøkelser før skredet viste løsmasser av sand og silt avsatt i et mektig, undersjøisk delta ut for elvemunningen i Sagvika. Det var identifisert leire i dypere lag, med påvist kvikkleire i ett punkt. Det var fra tidligere grunnundersøkelser lenger nord/nordvest for Sagvika også påvist kvikkleire. Med dårlig stabilitet i marbakken ble det fra den geotekniske konsulentens side satt strenge krav i prosjektet til å ikke fylle ut mot marbakken, men derimot å holde anleggsarbeidet tett inntil land. Videre ble det tillatt kun en moderat tilleggsbelastning i området og størstedelen av fyllingen skulle etableres ved å bytte ut eksisterende blandede masser inklusive sagflis og bakhon med kvalitetsmasser.

Undersøkelsesgruppa sitt arbeid

Arbeidet med i etterkant å vurdere årsaken til skredet ble ledet av Stein Are Strand ved NVE. Hendelsen og situasjonen ble kartlagt og dokumentert i detalj. Vitner til hendelsen ble intervjuet. Mellom annet ble oppskyllingshøyder fra flodbølgene nøye registrert av NGI.

En rekke mulige skredårsaker ble vurdert av undersøkelsesgruppa. Det var lite nedbør og moderat vannføring i elva forut for skredet. Vannlekkasjer fra ulike rør i området, inklusive to større PVC- vannrør gjennom skredområdet til et settefiskanlegg i Langvika ble satt i fokus, men dette ble etter hvert funnet å ikke være av betydning for skredet. Videre var det tidligere foretatt fjellsprenning i området men den var neppe av betydning siden den var avsluttet et halvt år før skredet. Anleggsarbeidet pågikk da skredhendelsen skjedde med komprimering av fyllingen med vibrovals samme dag, kort tid før hendelsen (omtrent en time). Sammenfall i tid innebar at dette måtte vurderes som en mulig utløsende årsak til skredet.

Det ble etter skredet foretatt detaljert batymetrisk kartlegging av sjøbunnen samt refleksjonsseismiske undersøkelser. Ved sammenligning med tidligere kartlegging av sjøbunnen, kunne rasmassene vurderes og sannsynlige glideflater identifiseres. En modellering av flodbølger basert på ulike scenarier for hvor skredet startet og hvordan massene skled ut, ga samsvar med observerte oppskyllingshøyder dersom skredet startet rett utenfor området som ble komprimert. Vurdering av skredmassenes beliggenhet på bunnen i kombinasjon med observerte oppskyllingshøyder sammenholdt med flodbølgesimuleringene pekte videre entydig på at skredet faktisk startet rett utenfor det stedet der komprimering foregikk.

Nye grunnundersøkelser etter skredet bekreftet tidligere grunnundersøkelser vedrørende løs lagret sand og silt i deltaavsetningene og identifiserte kvikkleire under avsetningene innerst i Sagvika, Figur 10.

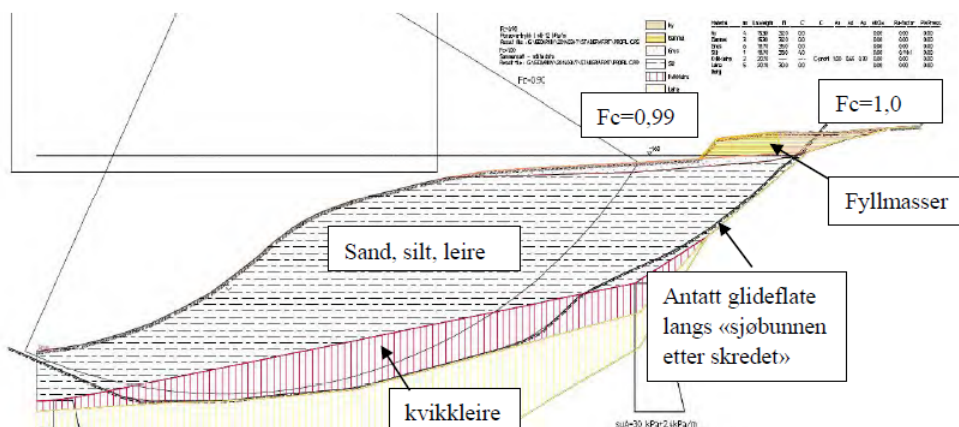
Det ble innledet et arbeid for å vurdere virkningen av komprimeringen med vibrovals på styrken i de løst lagrede sand og siltmassene i elvedeltaet. Det er rimelig å forvente at disse massene også inneholdt tynne sjikt med siltig leire. Det ble verifisert at avsetningen var svært

løs og at den falt i kategorien «liquefiable», en vurdering som ofte gjøres internasjonalt i relasjon til om en avsetning kan bli ustabil ved et jordskjelv. Avanserte dynamiske simuleringer ble foretatt med realistiske verdier for vibrovalsen. Disse viste at vibrasjonene i jorda ble forsterket ved resonans i jorda over fjellet, Figur 11, til høyre.

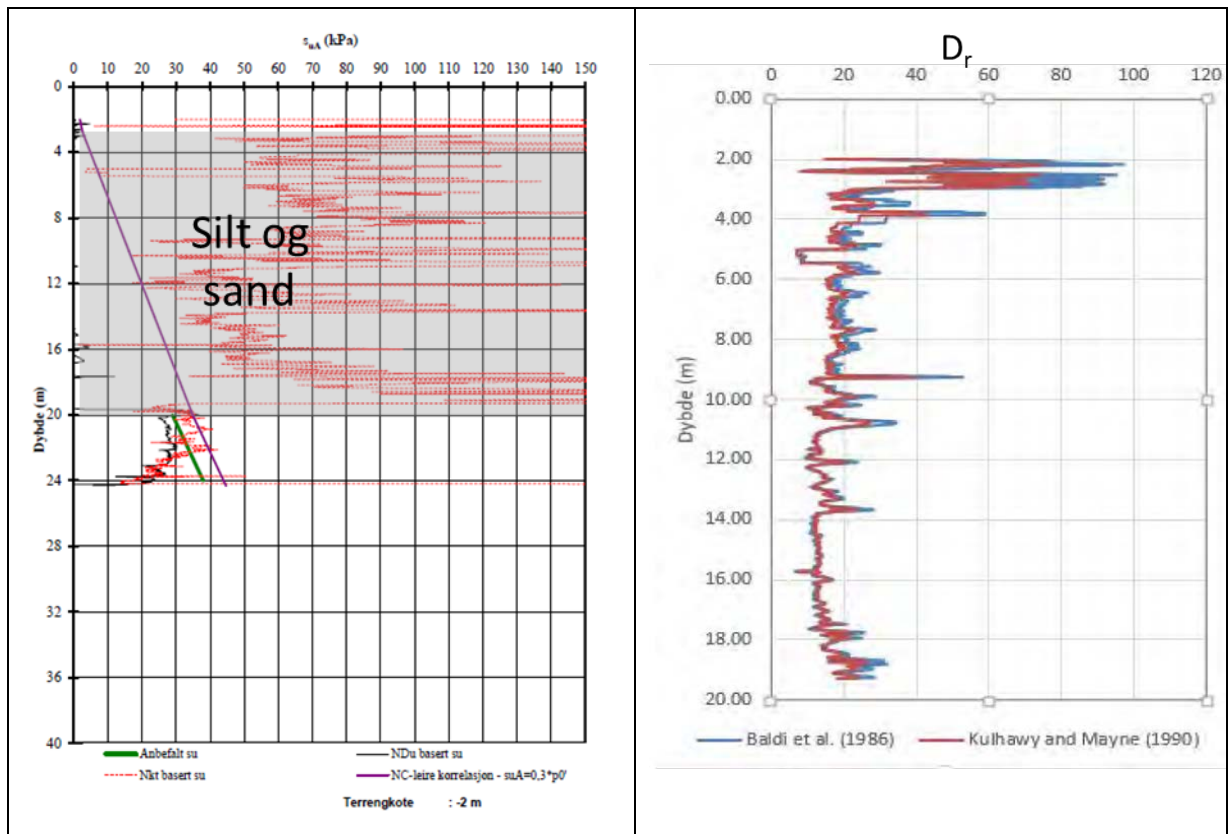
På basis av dette ble undersøkelsesgruppa sin konklusjon at en fikk en betydelig lokal poretrykksoppbygging og styrkereduksjon under fyllingen ved land og at skredet startet ved at denne kollapset lokalt, Figur 11, til venstre. Skredmassene fra det lokale skredet raste utover mot marbakken og ga en hurtig tilleggsbelastning på toppen av den mye større og bratte skråningen inklusive marbakken. Denne hadde i utgangspunktet helt marginal stabilitet og raste så ut nordover og åpnet for neste trinn i skredutviklingen. Dette skredet tok med seg massene helt inn i søndre del av Sagvika og gikk i hovedsak østover.



Figur 8 Sagvika, Nord-Statland 2013, med skredkontur fra 2014 inntegnet, (flyfoto fra finn.no).

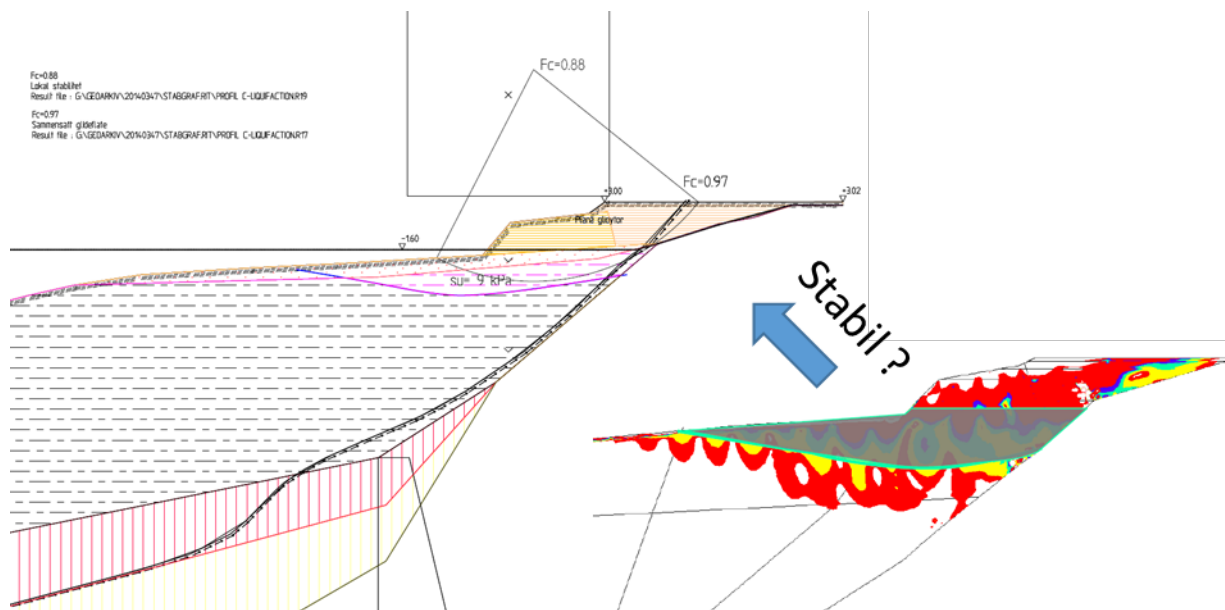


Figur 9 Nord-Statland, snitt C-C. Stabiliteten av marbakken var i utgangspunktet svært lav.



Figur 10 Nord-Statland.

(a) Figur til venstre: Leirlag under siltige sandige masser på 20 meter var kvikt og med lav s_u .
 (b) Figur til høyre: Lagringstetthet i sand og silt mot dybde. $D_r < 20\%$ viser svært løs lagring.



Figur 11 Nord-Statland, snitt CC øvre del. Utsnittet til høyre viser områder som mister styrke som følge av vibrokomprimeringen. Figuren til venstre viser at dette trolig ga et lokalt brudd. Undersøkelsergruppen konkluderte med at dette utløste hovedskredene.

Hva lærte vi av skredet på Nord-Statland?

Prosjekteringen av anleggsvirksomheten i området hadde identifisert en svært bratt marbakke med dårlig stabilitet. Konsulentene visste at området besto av løse sedimenter og også sensitiv leire, dels kvikk leire. Konsulentene anga «rød linje» for å begrense inngrep som kunne true/påvirke stabiliteten av denne marbakken. Dette var gode og riktige vurderinger. Fyllingen langs land forverret i utgangspunktet ikke stabiliteten av marbakken.

(1) Komprimering med vibrovals utløste skred.

Undersøkelsergruppen vurderte flere potensielle årsaker til skredet, men konkluderte med at vibrasjon fra komprimering av en fylling i strandkanten var utløsende årsak. Dette ga et initialt skred som så førte til en tilleggsbelastning på marbakken utenfor. Samtidig ville ikke skredet ha skjedd om ikke marbakken i utgangspunktet hadde hatt dårlig stabilitet. Uansett bør dette sette oppmerksomhet på bruken av tungt komprimeringsutstyr i slike områder. Entreprenørene har de siste årene fått stadig bedre og tyngre utstyr. I stedet for en hoppetusse ble eksempelvis en 11 tonnsvibrovals, med dynamisk masse 3,6 tonn, og fri amplitude 1,9 mm brukt i Nord-Statland. Nytt og bedre utstyr bør brukes, men vi har kanskje ikke god nok erfaring med bruken. Noe forsiktighet synes å være på sin plass inntil mer forskning kan avklare saken.

Studier gjort i senere tid i regi av Etatssattningsprosjektet Naturfare, Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS) og NGI har hatt som mål å tilgjengeliggjøre kunnskap og erfaringer, samt identifisere og synliggjøre de egenskaper/forhold som bør vurderes i forbindelse med vibrokomprimering på/ved løs avsetninger (NIFS 2016). Numeriske analyser ble også gjennomført for å bedre forstå hvordan effekten av vibrasjoner varierer med jordstivhet, fjelldybde, geometri og tilstedeværelse av tynne, bløtte lag (Johansson mfl. 2017). Det er foreslått å benytte en foreløpig vibrasjonsgrense på 10 mm/s i områder med sensitive leire og løs-lagrede avsetninger.

(2) Det er ikke bare leire og kvikkleire som trenger fokus.

Sensitiv leire og kvikkleire bidro til omfanget av Statlandskredet, men løse silt og sandavsetninger kan også kollapse som følge av rystelser eller forstyrrelser. «Liquefaction» trenger ikke bare være et fenomen knyttet til jordskjelv. Og en «farlig» lagpakke med sjikt av løse siltige og sandige masser i kombinasjon med tynne leirlag, som hindrer overtrykk i å dissipere, er ikke uvanlige i strandsonen. Områdestabilitet i typiske deltaavsetninger må vurderes, og regelverk, veiledere mv. bør sette mer fokus på problemstillingen.

(3) Batymetri og god sjøbunnskartlegging etter undersjøisk skred er svært nyttig.

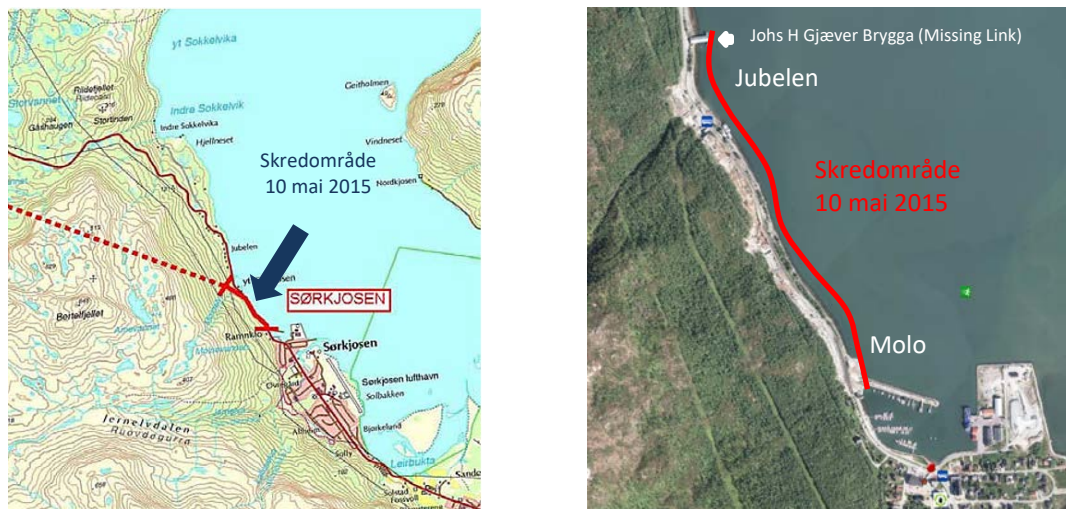
Dette er avgjørende for å se hva som skjedde under vann. Batymetri og fremvisning i 3D (3D digitalt kart over sjøbunnen etter skred) viste at skredet først gikk ut fra stedet som ble komprimert ved vibrovals. Deretter gikk skredet retrogressivt inn i bukta. Konklusjonen støttes av flodbølgeberegninger sammenholdt med observert oppskylling.

(4) Tilbakeregning ga sikkerhetsfaktor $F = 1,0$.

Det er undersøkelsergruppen sin oppfatning at tilbakeregningen av de første fasene i skredet med lamellemetoden (ref. Figur 9 og 11), er med på å bekrefte at dagens prosedyrer for å bestemme styrkeparametre er gode og videre at våre stabilitetsanalyser fungerer rimelig godt. I tilfelle Nord-Statland er det korrekt å anta udrenerte forhold i leira siden det er snakk om dramatiske spenningsendringer over kort tid. Effektivspenningsparametre er benyttet i siltige og sandige avsetninger.

SØRKJOSEN 10 mai 2015

Skredet i Sørkjosen skjedde natten mellom den 9. og den 10. mai trolig klokken 02.40. Skredet omfattet i størrelsesorden 1,1 til 1,4 millioner m³. Skredet var dominert av masser med løs til middels fast lagret sand og silt, men gikk i deler av området ned i dypere lag av leire og siltig leire som til dels var kvikk. Skredet tok med seg ca. 100 meter av en molo og en fylling for nytt vegkryss og parkering der moloen nådde land. Skredet tok videre med seg deler av strandlinja over 1000 meters lengde langs E6 fra moloen og ut til Jubelen, se Figur 12. E6 ble stengt i to døgn etter skredet før den igjen ble åpnet for trafikk ved at trafikken ble ført inn på den indre delen av traseen som i hovedsak lå på fjell.



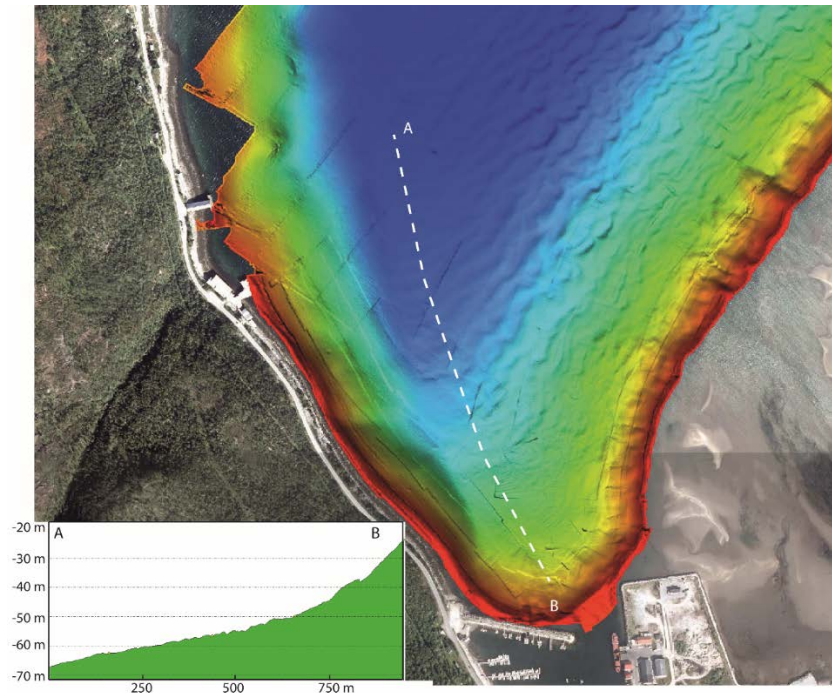
Figur 12 Skredet i Sørkjosen. Skredområdet var mellom tunnelpåhugget ved Jubelen og en molo nord for Sørkjosen sentrum. (Kart er hentet fra reguleringsplan av 2012 for E6 Sørkjosenfjellet og fra finn.no/kart).

Undersøkelingsgruppa sitt arbeid

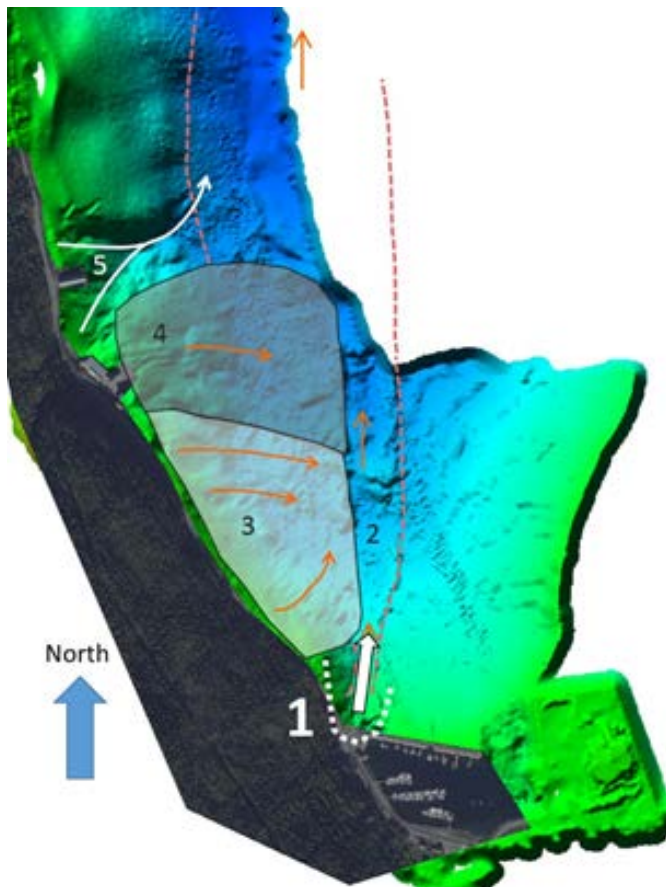
Det pågikk anleggsarbeid i området da skredet skjedde og det hadde året før vært gjennomført tiltak knyttet til beregningsmessig dårlig stabilitet etter funn av sensitiv leire ved Jubelen. Det hadde også vært utfyllingsarbeider i sjøen ved moloen, men dette var sluttført i slutten av 2014. Det regnet mye dagen før skredet og det var betydelig snøsmelting. Sørkjosen ligger på enden av et enormt delta for elva Reisa, som hvert år deponerer store mengder løsmasser i fjorden. Undersøkelingsgruppa vurderte også mulige brudd i vannledninger, drens- eller kloakkrør. Påvirkning/ettervirkning av sprengningsaktiviteter i tunnelen nord for Jubelen og spylereisk av fjellskjæringen mellom Jubelen og moloen ble også vurdert.

Største delen av skredet den 10. mai foregikk under vann. Undersøkelingsgruppa fikk tilgang til batymetridata fra 2006 og 2011, samt batymetridata innhentet etter skredet i 2015. Batymetridata fra 2006 viser en relativt jevn sjøbunn uten spor av tidligere skredaktivitet, Figur 13. Batymetri etter skredet er vist i Figur 14. Den digitale sjøbunns-modellen med høy oppløselighet gjorde det mulig å fastslå at skredet startet ved moloen og deretter umiddelbart forplantet seg nordover.

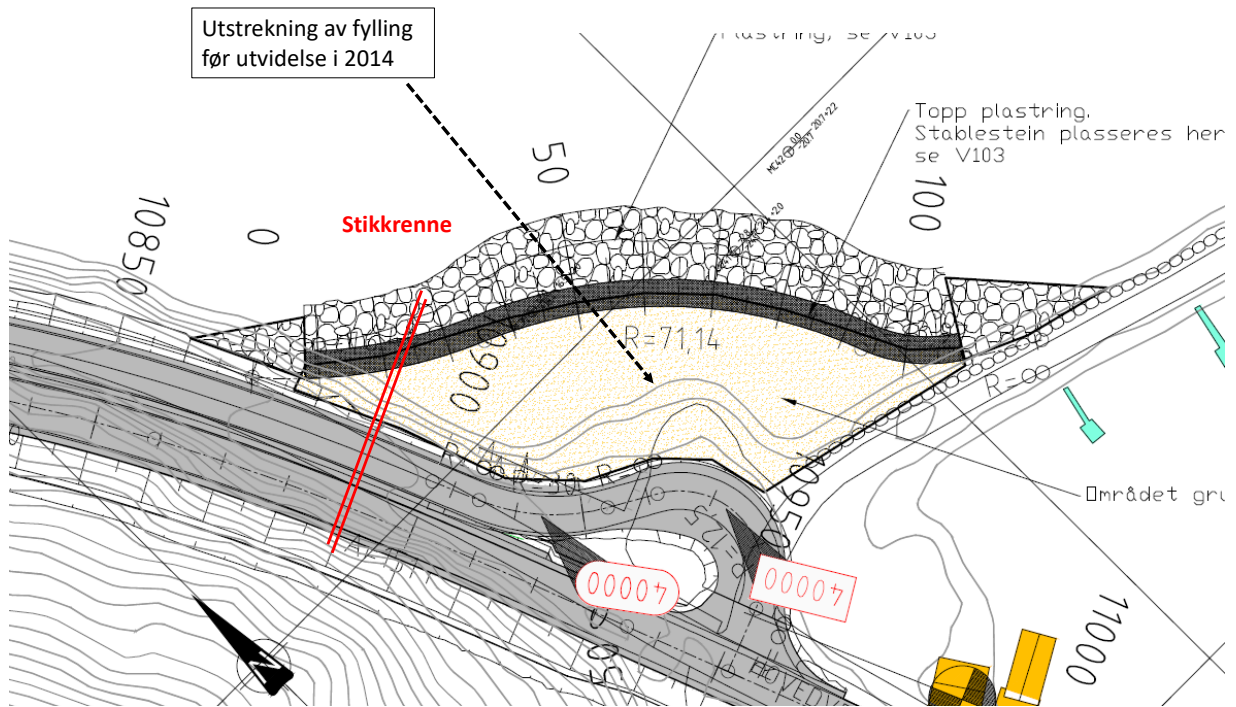
Undersøkelingsgruppa konkluderte med at årsaken til skredet var utfyllingen i sjøen ved moloen, Figur 15 og 16. Utfyllingen førte til så lav stabilitet at området ikke tålte den ekstra belastningen det ble utsatt for knyttet til stor nedbør og mye snøsmelting den 10. mai 2015. Undersøkelingsgruppa bygget sine konklusjoner ikke bare på studier av batymetri (sjøbunnskart), men også i stor grad på foto og videoer tatt av hendelsen, vitneobservasjoner, hydrometeorologiske data, tolkning av grunnundersøkelser, ortofoto og egne beregninger av stabilitet i utvalgte snitt i skredområdet.



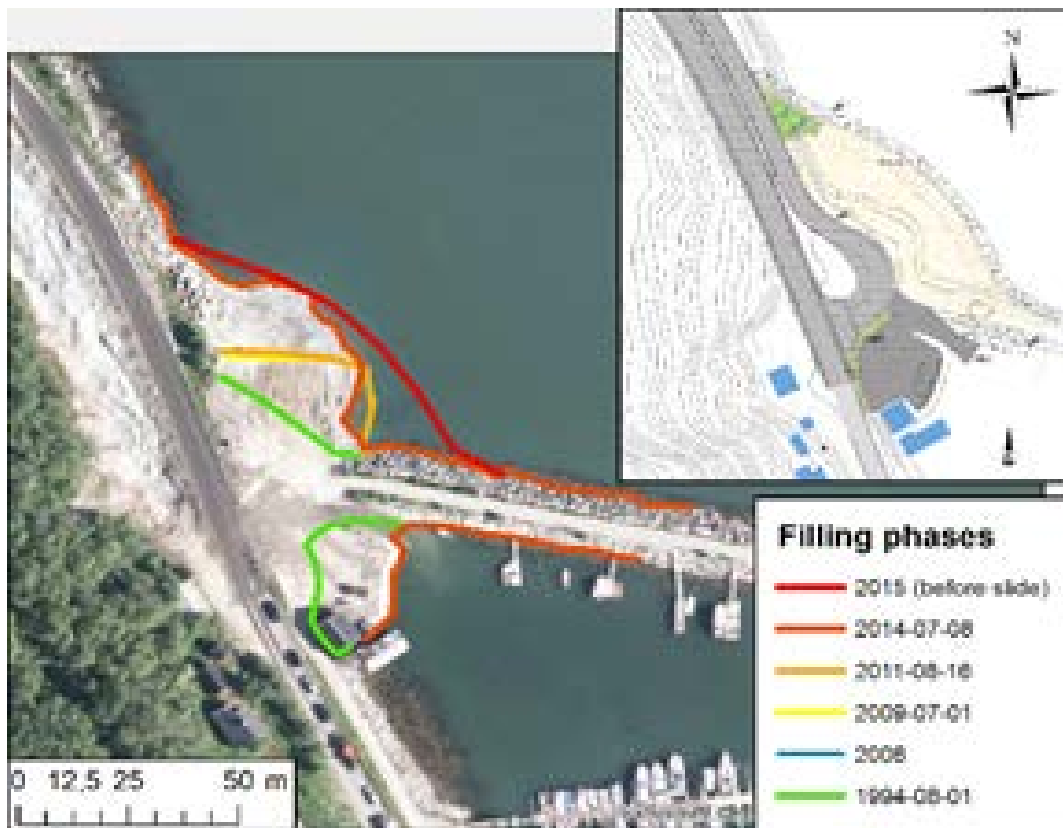
Figur 13 Batymetri fra 2006 viser sjøbunnen i Sørkjosen før skredet, framstillingen er basert på data fra NGU.



Figur 14 Batymetri etter skredet i Sørkjosen med tolkning av initialscred (1) og sekundærscred (2-5).



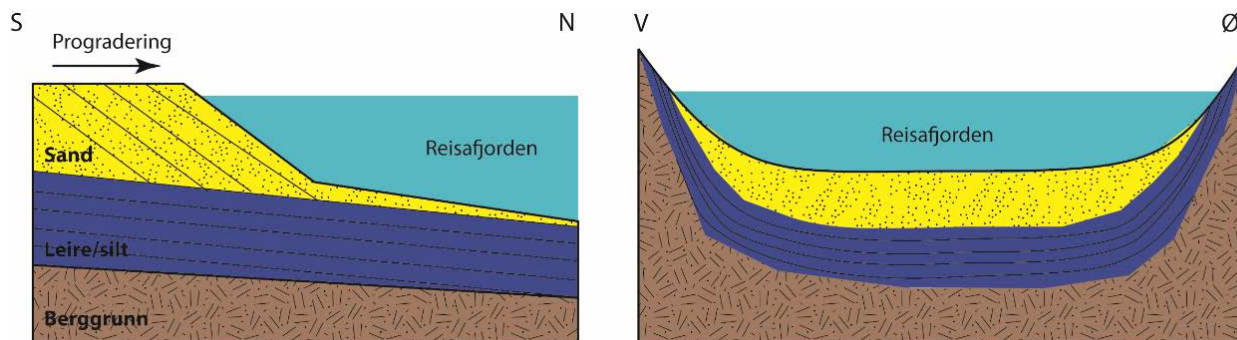
Figur 15 Fylling ved molo i Sørkjosen som bygget i November 2014.



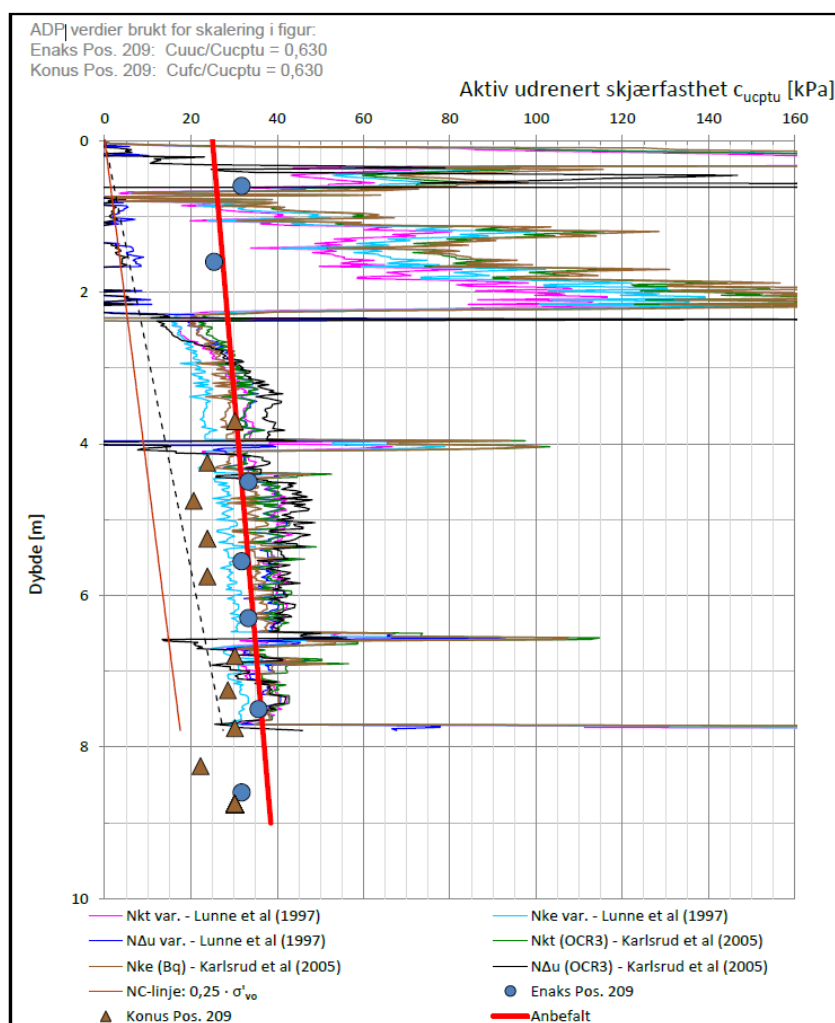
Figur 16 Kart som viser utfylling ved molo i Sørkjosen i flere faser siden 1994.

Vitner observerte store mengder vann i fjellskjæringen og i stikkrennene gjennom fyllingen om kvelden før skredet. Det var første gang det regnet så mye etter at fyllingen var lagt ut og anleggsarbeidet hadde endret avrenningsforhold og vannveier. Effekten av regnet ble forsterket ved snøsmelting. Det er grunn til å tro at fyllingen ved moloen ble fylt med vann. Fyllingen ble tynge og poretrykket i massene under og i front mot marbakken økte.

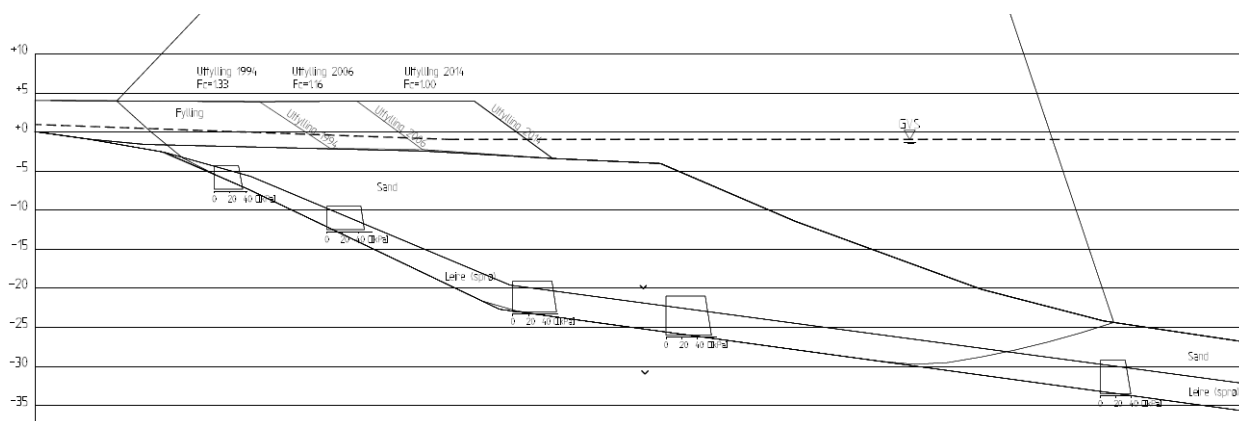
Sjøbunnen ved moloen var i øvre lag dominert av løs til middels fast sand og silt, dels med porøsitet over 45 %. Under sand og siltlaget finnes et lag med leire. Leirlagetets tilstedeværelse, mektighet og utstrekning varierer i skredområdet og er beheftet med noe usikkerhet. Det er etter skredet tatt opp prøver som viser sensitiv og kvikk leire i ett borpunkt innenfor moloen, Figur 18. Ut fra sonderingene samt forventet geologisk avsetningshistorie i området, Figur 17, mener undersøkelsesgruppen at det er overveiende sannsynlig at leirlaget er gjennomgående i det aktuelle området ved moloen. Leirlagetets dybde og utbredelse er avgjørende for stabiliteten ved moloen, Figur 19.



Figur 17: Skjematisk illustrasjon av Reisadelta ved Sørkjosen i to vertikale snitt, ett fra sør til nord (venstre) og ett fra vest til øst (høyre). N.B: Ikke i målestokk.



Figur 18 Eksempel på tolking av styrkedata i leire. Sørkjosen CPT 209 på innsiden av moloen viser leire fra dybde 2,5 meter. Anbefalt aktiv fasthet i leira er: $s_{uA} = c_{uA} = c_{uC} = 25 \text{ kPa} + 1,5 \cdot z$



Figur 19 Kritisk skjærflate beregnet i profil 31 med GeoSuite Stabilitet. Stabiliteten ble gradvis forverret gjennom utfylling over flere år.

Skredutviklingen må ha skjedd progressivt og raskt. De største massebevegelsene kan derfor ha vært over i løpet av et par minutter. Bevegelsene førte til en flodbølge som er observert midtveis på veg over fjorden mot Nordkjosen. Et vitne antyder at flodbølgen han så kan ha vært 2-3 meter høy. En slik flodbølge forutsetter at et betydelig volum av sjøbunnen er flyttet nesten simultant.

Hva lærte vi av skredet i Sørkjosen?

Unesrøkelsergruppen konkluderte med at skredet startet ved moloen. Prosjekteringen av utfyllingen i området var basert på at det ikke var funnet gjennomgående lag av leire under fyllingen. Dette kan ha vært feil. Utfyllingen var regnemessig på $F=1.0$ dersom et gjennomgående leirlag var tilstede, Figur 19. Batymetrien, Figur 14, pekte entydig mot at skredet startet ved moloen.

(1) Gode grunnundersøkelser

Ut fra undersøkelsesgruppa sin konklusjon understrekes et velkjent faktum: Vi må ha gode grunnundersøkelser og de må gå dypt nok.

(2) Skredet gikk et halvt år etter utfylling

Erfaring er at sikkerheten til en fylling bedres med tiden. Ut fra dette skulle skredet ved moloen skjedd i november 2014 og ikke i mai 2015 om udrenert styrke i leira var avgjørende for stabiliteten. Den udrenerte styrken i leira burde øke noe etter et halvt år med konsolidering for ny last. Undersøkelsesgruppa mener at denne økningen ble mer enn oppveid av virkningen av regn og snøsmelting som førte til økt vekt på fyllingen og en poretrykksøkning i øvre silt og sandlag. Videre er det et faktum at selv bløt leire oftest er noe overkonsolidert på grunn av kryp og da er økningen i udrenert styrke moderat også etter konsolidering så lenge en ikke øker spenningene forbi prekonsolideringstrykket.

(3) Batymetri og god sjøbunnskartlegging etter undersjøisk skred er svært nyttig

Batymetrien viste at skredet startet ved moloen. Dette første skredet tok fotfeste for skråningene videre langs strandlinja mot Jubelen slik at disse raste ut som sekundærskred. God batymetri bidrar til avklaring mht skredårsak, initering og rekkefølge.

(4) Tilbakeregning ga sikkerhetsfaktor $F = 1,0$

Tilbakeregningen av skredet ved moloen ga $F=1,0$ forutsatt at leirlaget var gjennomgående. Gitt at skredet startet ved moloen, begrunnet i studiene av batymetrien, må leirlaget ha vært gjennomgående. I så fall gir stabilitetsberegninger $F = 1,0$ ut fra dagens norske praksis, mellom annet via tolkning av CPTU. Plaxis beregninger og GeoSuite beregninger gir samme resultat.

SOKKELVIK 7. mai 1959

I forbindelse med vurdering av årsak til skredet i Sørkjosen valgte undersøkelsesgruppen for skredet i Sørkjosen også å se tilbake på skredet i Sokkelvik, Figur 20. Sokkelvik ligger kun 3 til 4 kilometer lenger ut i Reisafjorden enn Sørkjosen. Sokkelvik skredet krevde 9 menneskeliv og stedet ble i ettertid fraflyttet. Grunnen besto av lag med sand, silt og grus samt sensitiv leire, Figur 21. Det ble aldri trukket en konklusjon om årsakene til skredet i Sokkelvik, slik at dette skredet ofte i ettertid ble referert til som et av de som skjedde av naturlige årsaker, uten at noen kunne forklare hvilken naturlig årsak det kunne være. Den type konklusjoner gir en utrygghet med tanke på om skred kan skje uten påviselig årsak.

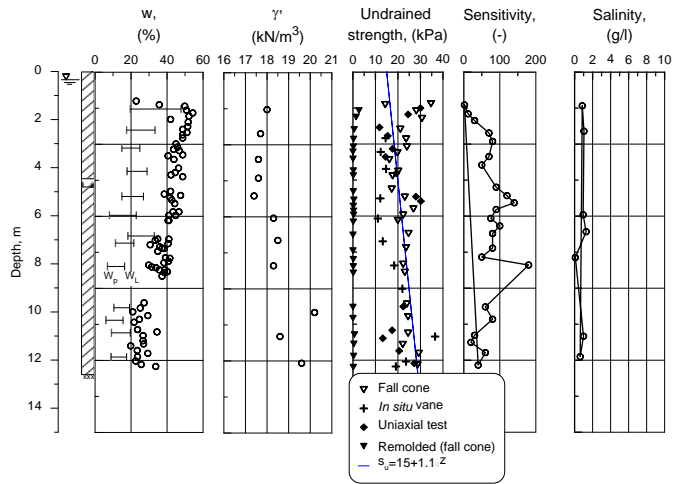
Elva Reisa deponerer betydelige mengder løsmasser i et mektig delta. Det har vært reist en hypotese om at skredene i Sokkelvik og Sørkjosen kanskje begge kunne knyttes til uidentifiserte, lange, undersjøiske flyteskred som ble initiert i løse masser i den ytre kanten på Reisdeltaet, nær utløpet av Reisa, og beveget seg kilometervis nordover i fjorden. Skredhendelsene både i 1959 og 2015 kunne, etter denne hypotesen, være initiert nesten midtjords og så utviklet seg bakover inn mot land. Undersøkelsesgruppens studier i 2015/2016 av batymetrien viser ingen skredhendelser av en slik art og gir derfor ikke holdepunkter for en slik teori, men viser derimot at de to skredene er avgrensede hendelser, det ene initiert i Sokkelvik og det andre i Sørkjosen.

Sokkelvikskredet skjedde om våren, etter rekordartet regn og snøsmelting, slik at det finnes likhetstrekk med skredet i Sørkjosen. Indre Sokkelvik hadde betydelige forekomster av kvikkleire. Tre til fire år før Sokkelvik-skredet i 1959 registrerte en fisker et undersjøisk skred ute i bukta. Dette indikerer at det nordlige Indre Sokkelvik-området var ustabil og det er fortalt at flomålet (strandlinja) hadde flyttet seg bakover mange meter i løpet av få år. Det var i rapporter fra skredhendelsen i 1959 nedtegnet at det ble bygget en vei i strandkanten i Sokkelvik noen år før skredet.

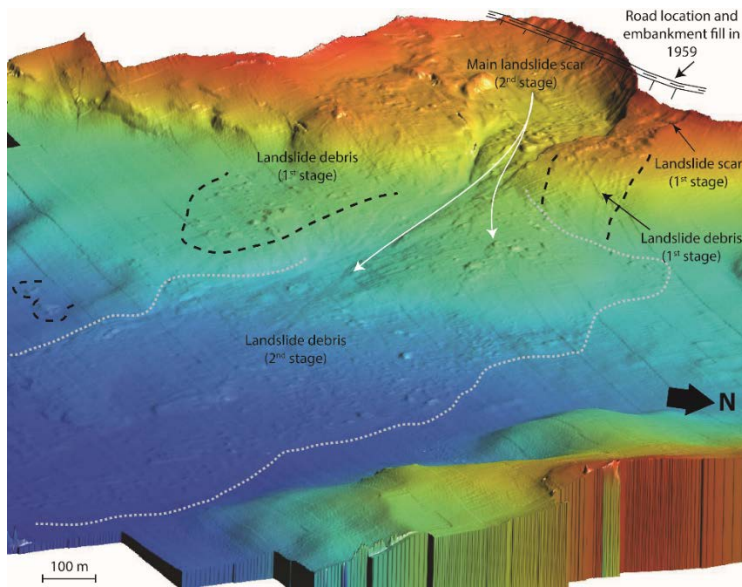
Arbeidet i undersøkelsesgruppa for Sørkjosen fant på basis av informasjon fra lokalbefolkningen ut at forholdene rundt vegbyggingen var sterkt underkommunisert og at det foregikk vegbygging nord i Sokkelvik også i ukene før skredet. Tegninger for vegprosjektet ble funnet i arkiver i Tromsø og de viste en opptil 7,5 meter høy vegfylling på leira inn mot neset i nord, der veien ble lagt på fjell. Det var også fjell-sprengning i tilknytning til dette. Rester av veganlegget og litt av fyllingen ligger urørt også i dag, Figur 23. Dette satte Sokkelvikskredet inn i en ny ramme. Tilbakeregning av stabiliteten av den fyllingen som må ha vært der, viser at denne har bidratt til svært lav sikkerhet i området, $F \approx 1$, Figur 24. Se hovedoppgave av Synnøve Wiger Austefjord (NTNU 2016). Studier av batymetri viser også i dag skredmassene på sjøbunnen og støtter vitners utsagn om at skredet startet i nord i nærheten av vegfyllingen, Figur 22. Ekstremt mye nedbør den 7. mai 1959, Figur 23, i tillegg til snøsmelting, kan ha vært nok til å øke poretrykket i de grove massene i strandsonen og i grovere lag i leira slik at stabiliteten ble ytterligere redusert og skredet utløst.



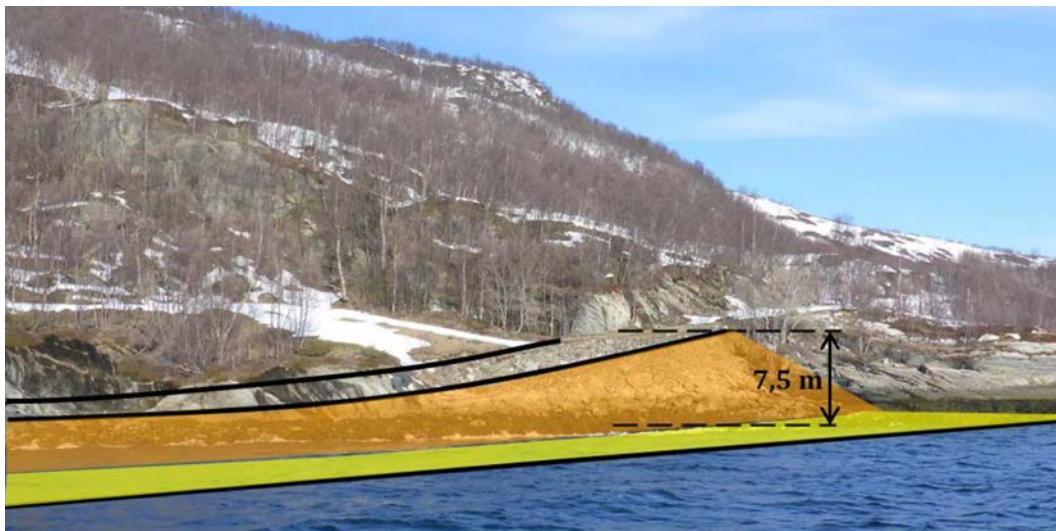
Figur 20 Skredet i Sokkelvik. Foto: NGI, 1959.



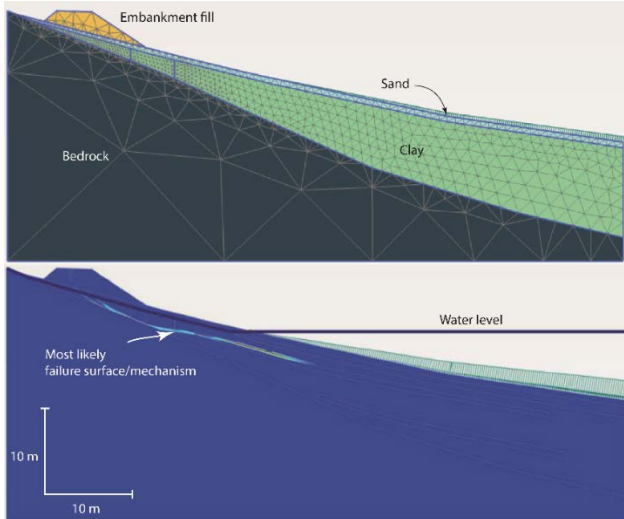
Figur 21 Grunnforhold i Ytre Sokkelvik, NGI 1960 og L'Heureux mfl. (2017).



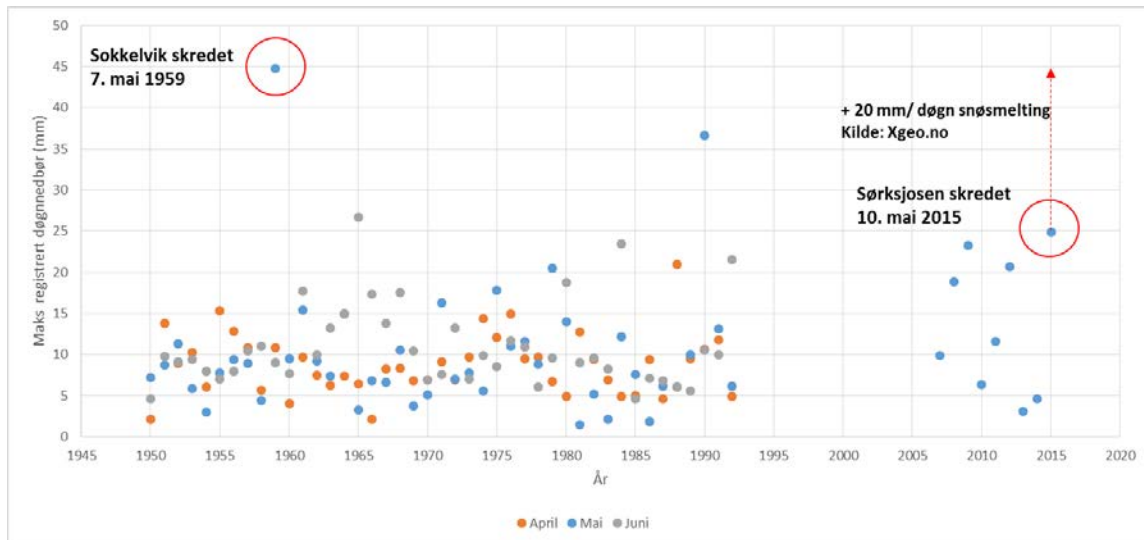
Figur 22 Sjøbunn utenfor Sokkelvik, fra batymetri NGU 2006, L'Heureux (2017).



Figur 23 Anslått veifylling Nord i Sokkelvik i dagene før skredet basert på bildearkiv og tegninger for vegprosjektet ble funnet i arkiver i Tromsø (fra Austeffjord 2015).



Figur 24 Sokkelvik, snitt gjennom vegfylling fra beregning av stabilitet med Plaxis, $F \approx 1$, (fra Austefjord 2015).



Figur 25 Største registrert nedbør pr døgn for vår-månedene i perioden 1950-2015 i Sokkelvik og Sørksjosen (fra eklima.no). De to ringene viser verdiene for de to skredhendelsene.

Hva lærte vi av å se tilbake på skredet i Sokkelvik?

Dette skredet var en katastrofe med tap av 9 menneskeliv og en hel bygd ble fraflyttet. Årsaken til skredet var ikke hovedtema da NGI så på skredet og rapporterte om dette rundt 1960, hovedtema var om det var fare for nye skred og om en kunne flytte tilbake. Tilbakeflytting ble ikke anbefalt på bakgrunn av hendelsen og de dårlige grunnforholdene.

(1) Vegbygging forverret stabiliteten.

Stabiliteten i Sokkelvik ble forverret av vegbygging i strandkanten med høy fylling på sensitive masser. Skredet ble initiert av rekordartet nedbør i kombinasjon med snøsmelting.

(2) Batymetri gir informasjon lang tid etter hendelsen

På batymetri i fra 2006 synes skredmassene fortsatt svært tydelig og det er fortsatt mulig å se hvordan skredmassene har beveget seg i 1959 og dels i hvilken rekkefølge.

KONKLUSJON

Skredhendelser er uønskede fullskalaforsøk som bør utnyttes til læring gjennom å bruke ressurser på å klarlegge hva som skjedde og hvorfor det skjedde. Det å vurdere potensielle årsaker til skred og spesielt det å identifisere de mest sannsynlige årsakene, setter fokus der det bør være i senere prosjekter.

Forfatterens erfaring er at tilbakeregningen av sikkerhetsfaktor $F = 1$ gjerne blir resultatet om veletablerte metoder og prosedyrer for grunnundersøkelser og tolking av styrkeparametere benyttes. Mellom annet styrker arbeidet tiltroen til tolkning av udrenert styrke fra CPT. Dette er betryggende for norsk geoteknikk. Ødometerforsøk for å bestemme p_c er også svært nyttige for å vurdere udrenert skjærstyrke via Shansep.

Grunnforholdene i strandsonene er ofte komplekse ofte med «uryddige» lag med løse friksjonsmasser og kvikkleire og «kvikksilt». Dette gjør at gode grunnundersøkelser og parametertolkning er avgjørende. Det er også avgjørende med grunnundersøkelser i sjøen og at grunnundersøkelsene er dype nok. Kartlegging av bergoverflaten er viktig, jfr Kattmarka.

Detaljert batymetri er til svært stor nytte for å finne årsak, initiering og forløp av skred i strandsonen.

Arbeidet med skredene har satt fokus på vibrasjoner ved sprengning og komprimering. Nytt og bedre komprimeringsutstyr bør brukes, men vi har kanskje ikke nok erfaring med dette. Noe forsiktighet synes å være på sin plass inntil mer forskning kan avklare saken. Johansson et al. (2017) foreslår å benytte en foreløpig vibrasjonsgrense på 10 mm/s i områder med sensitive leire og løs-lagrede avsetninger.

I de tilfellene som her er vurdert, er beregnet sikkerhetsfaktor for et «lokalt» initialskred svært nær $F = 1$ om en vurderer alle potensielle skjærflater. En progressiv analyse kan forklare hvorfor skredet forplanter seg og også estimere endelig omfang, men skredet starter ikke om det ikke finnes en potensiell skjærflate med en svært lav sikkerhetsfaktor, beregnet etter konvensjonelle metoder (GeoSuite eller ordinær «safety» analyse i Plaxis).

Områdestabilitet i strandsoner må vurderes, og regelverk, veiledere mv. bør sette mer fokus på problemstillingen.

Gjennom arbeidet i undersøkelseskomiteene har academia arbeidet tett på utførende konsulenter. Dette er nyttig, mellom annet ved at kunnskap kan utveksles og erfaringer deles og spres i bransjen og tas inn i undervisning på universitetet.

Vedrørende rapporter fra undersøkelseskomiteer er det to «grøfter» med hensyn til valg av formuleringer. En kan på den ene siden være for skråsikker vedrørende årsak, uten at påstandene underbygges godt nok. Eller en kan på den andre siden være alt for forsiktig, med vage antydninger om mulig skredårsak samtidig som en egentlig har grunnlag for sterkere uttalelser. Begge grønne bør unngås.

Det understrekes avslutningsvis at vi bør unngå å jakte på syndebukker – vi trenger geoteknikere og konsulenter som tar vanskelige oppdrag.

REFERANSER

- Nordal, S., Alén, C., Emdal, A., Jendeby, L., Lyche, E., Madshus, C., (2009):*
Skredet i Kattmarkveien i Namsos 13. mars 2009. NTNU, ISBN 978-82-92506-72-1
- Nordal, S., L'Heureux, JS., Skotheim, A., Emdal, A., Lyche, E., Christensen, S., (2016):*
Skredet i Sørkjosen 10. mai 2015, SINTEF rapport SBF20160043, ISBN 978-82-14-05814-7
- Strand, SA., Lyche, E., Moholdt, R., Nordal, S., Thakur, V., Oset, F., Viklund, M., (2014):*
Skredet ved Nord – Statland, NVE rapport nr. 93 – 2014
- Austeffjord, SW (2016):* Skred i strandsonen: Studie av skredet i Indre Sokkelvik 1959.
MSc. Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NNTU). pp. 91
- L'Heureux, JS, Nordal, S., Austeffjord, S.W. (2017):* Revisiting the 1959 Quick Clay
Landslide at Sokkelvik, Norway, IWLSC Trondheim, NTNU.
- Nordal, S., L'Heureux, JS., Skotheim, A., Emdal, A., Lyche, E., Christensen, S., Hellum, Ø.S.
(2017):* Lessons learned from the 2015 Soerkjosen shoreline landslide in Norway.
pp 2183 – 2186, 19th. ICSMGE 2017, Seoul.
- Bouchard, S., L'Heureux, J.-S., Johansson, J., Leroueil, S. & LeBoeuf, D. (2016) :*
Blasting induced landslides in sensitive clays. In Landslides and Engineered Slopes.
Experience, Theory and Practice, Proceedings of the 12th International Symposium on
Landslides (Napoli, Italy, 12-19 June 2016), Chapter 42, pp. 497–504, DOI:10.1201/b21520-
52
- Johansson, J., Lovolt, F., Andersen, K. H., Madshus, C., & Aabøe, R. (2013):*
Impact of blast vibrations on the release of quick clay slides. In Proceedings of 18th
international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, ICSMGE, Paris.
- Johansson, J., Bouchard, S., & L'Heureux, J. S. (2017) :*
Vibratory Roller Influence Zone Near Slopes with Vibration Susceptible Soils. In Landslides
in Sensitive Clays (pp. 191-201). Springer International Publishing.
- NIFS (2016) –*Dynamiske påkjenninger og skredfare. NIFS Rapport 16/2016.