

Den 23 september 2023

Stenungsundsskredet

Geologiska förutsättningar och landskapsutveckling



Christian Öhrling

www.sgu.se

SGU-rapport 2025:07
Diarie-nr: 00-2232/2023

Författare: Christian Öhrling
Granskad av: Cecilia Karlsson, Colby Smith, Gustaf Peterson
och Bo Thunholm (hydrogeologin),
Ansvarig enhetschef: Anna Hedenström
Redaktör: Johan Sporrang

Omslagsbild: Foto över skredområdet, 2023-09-27.
Fotograf: Christian Öhrling

Juni 2025

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

Innehåll

Förord.....	6
Sammanfattning	7
Summary in English.....	9
Inledning.....	10
Jordskred.....	11
Regionalgeologiska förhållanden	12
Berggrund.....	12
Kvartärgeologi	14
Hydrogeologi.....	21
Nederbörd och avrinning.....	22
Vegetation	24
Geologiskt kartunderlag.....	24
Metod.....	27
Fjärranalys	27
Data och material	27
Terränganalys.....	29
Geomorfologi.....	29
Differensanalys.....	29
Geometrier	31
Kinematisk analys	31
Hydrogeologi.....	31
Hydrologi.....	31
InSAR.....	32
Seismisk aktivitet.....	32
Jordlagerföljder	32
Fältarbete	33
Laborationsanalyser av prover.....	33
Kornstorlek	33
Geokemi.....	33
Mineralogi.....	34
Datering	34

Tunnslip och mikroskopering.....	34
Resultat.....	35
Landskapsförändringar i skredområdet.....	35
Höjdmodeller.....	35
Differensanalys.....	36
Uppfyllnaden i öst	39
Geometrier	42
Berggrunden	46
Sprickor och deformationszoner	47
Geomorfologi.....	50
Jordlagerföljder	52
Stratigrafi östra delen.....	52
Stratigrafi västra och norra delarna.....	61
Analyser av jordprover	63
Kornstorlek	63
Mineralogi.....	63
Geokemi, totalhalter	66
Kol-14-datering.....	75
Hydrogeologi	76
Hydrologi.....	77
InSAR	79
Seismiska observationer	82
Kinematik.....	83
Horisontell förskjutning.....	83
Rörelseindikatorer	85
Diskussion	87
Förutsättningar för skred på platsen.....	87
Stratigrafins relevans för markrörelser	87
Lerans sammansättning och distribution.....	88
Mänsklig påverkan.....	90
Hydrologisk förändring och inverkan	90
Skredets morfologi och kinematik.....	92
Skredets händelseutveckling	93
När startar markrörelsen?.....	95

Slutsatser.....	98
Referenser.....	99
Bilaga I – Kartor.....	104
Bilaga II – Petrografi.....	106
Bilaga III – Jordprov.....	113

Förord

Sveriges geologiska undersökning är den statliga myndighet som har till uppgift att tillhandahålla geologisk information för samhällets behov på kort och lång sikt. Den geologiska informationen identifieras och samlas genom omfattande fältarbete och studier av de geologiska processer som formar vårt land.

Ett jordskred av den magnitud som drabbade Stenungsund ger oss en unik möjlighet till att studera och dokumentera de geologiska förutsättningar som ligger till grund för möjligheten att förbättra de underlag som krävs för att minska riskerna för dylika händelser i framtiden.

Författaren av denna rapport vill rikta sin tacksamhet till alla som bidragit på ett eller annat sätt under utredningen. Först och främst:

Cecilia Karlsson från SGU som har ingått i utredningsgruppen och bidragit i diskussioner och fältarbete. Carl-Erik Hjerne från SGU som har bidragit till beskrivningen av den generella grundvattensituationen under 2023 och tagit fram modellerade data på detta. Thomas Eliasson, tidigare SGU, genomförde fältbesök och har beskrivit berggrunden i resultatdelen. Bradley Goodfellow från SGU hjälpte till med metodiken av XRD-analysen. Och Björn Lund från Svenska nationella seismiska nätverket, Uppsala universitet, har bidragit med data och beskrivningar av de seismiska detekteringarna.

Vidare, John Dehls från Norges geologiska undersökning, har tillhandahållit data och bistått i frågeställningar kring InSAR-data. Och Trafikverket, som under det omfattande arbetet med återuppbyggningsprojektet av E6 har gett insyn samt delat data och jordprover (Peab, Cowi, WSP, AFRY, Sweco, Mitta).

Viktiga kommentarer på arbetet har inkommit från SGU-medarbetarna Colby Smith, Gustaf Peterson, Anna Hedenström, och Lovisa Zillén Snowball.

Sammanfattning

Den 23 september 2023, omkring kl. 01:40, inträffade ett jordskred vid Stenungsundsmotet längs E6 i Stenungsund. Händelsen resulterade i förflyttning av jordmassor i ett drygt 13 ha stort område och förstörde vägar, byggnader och infrastruktur. Sveriges geologiska undersökning (SGU) har träffat ett samarbetsavtal med Statens haverikommission (SHK) för att utvärdera de geologiska faktorerna bakom skredet. Denna rapport sammanfattar SGU:s resultat, som kompletterar geotekniska analyser utförda av Statens geotekniska institut (SGI). Syftet med denna rapport är att ge en bred beskrivning av de geologiska förutsättningarna och landskapets utveckling för att förbättra förebyggande åtgärder.

Jordskred förekommer globalt och har stora konsekvenser i samhället. De bakomliggande orsakerna varierar och kan vara naturliga processer, mänskligt skapade situationer, eller en kombination.

Landskapets topografi och markegenskaper har formats under miljontals år. Västsverige, speciellt Bohuslän, består av ett så kallat sprickdalslandskap. Detta landskap kan förenklat delas in i två typer: kalt berg med ställvis tunna jordtäcken som höjer sig, och dalgångar fyllda med lera.

Under Weichselistiden täcktes norra Europa av inlandsis, som vid det sista glaciala maximumet nådde Berlin i Tyskland och Poznan i Polen. Avsmältningen började för drygt 20 000 år sedan och accelererade för 11 600 år sedan. I Stenungsund påverkades deglaciationen av berggrundens struktur och havsnivåförändringar, vilket skapade avlagringar som lera, strandlinjer och deltan. Jordskorpan var nedpressad av inlandsisen vilket har gjort att den högsta kustlinjen ligger på cirka 125 m över dagens havsnivå.

Isen drog sig tillbaka från Västerhavet, in över Stenungsund för cirka 14 000 år sedan. Kortvariga isframstötter har skett, och när isen försvann började landområden höjas ur havet. Skalbänkar i Bohuslän förekommer ofta i forna marina livsmiljöer i smala sund. I Stenungsund ansamlades ställvis mäktiga lager skaljord. Under den relativa havsnivåsänkningen bearbetades tidigare avsatta sediment av vågor, vilket svallade ur och transporterade glaciala sediment för att avsättas på större vattendjup. Efter att området torrlades har landskapet främst formats genom vattenerosion och mänsklig påverkan. Lera som avsatts i marint vatten och lyfts upp av landhöjningen kan under vissa förhållanden utvecklas till kvicklera, en jordtyp som nästan helt kan förlora sin hållfasthet och övergå i flytande form vid en störning. Grundvattennivåer varierar stort beroende på faktorer som jordarter, topografi, nederbörd och mänsklig påverkan. Störst grundvattenhöjningar sker vanligtvis vid kraftig höstnederbörd. Ingrepp i naturen kan påverka avrinningen och grundvatteninfiltration.

Det fanns ett flertal geologiska kartunderlag i skredområdet: SGU:s Jordartskarta, Förutsättningar för skred i finkornig jordart, Fastmark med mera. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) har genomfört Översiktliga stabilitetskarteringar. För att utreda landskapets utveckling har SGU använt Lantmäteriets kartor; olika höjdmodeller, flygfotografier, och historiska kartor. Efter skredet har flera aktörer tagit fram nya foton och höjdmodeller, som har använts i utredningen. Viktig information har inhämtats från geofysiska data i form av detektion av markdeformationer (InSAR) och seismiska signaler (Svenska nationella seismiska nätverket).

Utöver att analysera den stora mängden 'geodata', har fältundersökningar utförts i form av stratigrafisk dokumentation av skärningar i jordlager och borrhningar, samt geotekniska och geokemiska analyser av jordprover. Vidare har SHK inhämtat kritisk information om tidpunkter, som ger ledtrådar till skredförloppet.

Analysen av höjdmodeller och ortofoton visar hur landskapet har utvecklats, främst till följd av olika markarbeten i området. Omkring 1990 byggdes E6 tvärs över skredområdet och på 2010-

talet byggdes Preem, Burger King och Bygghuset. Dessa anläggningar har förändrat dalgångens massbalans och påverkat dalgångens vattenföring. Tack vare fotografier tagna av en lokal journalist två dagar före skredet har en höjdmodell av området vid denna tidpunkt kunnat byggas upp. Detta möjliggör detaljerade studier av de arbeten som utfördes under 2023 och fortfarande pågick i september. I det så kallade 'strykjärnet' var markarbeten av typen grävning, schaktning och pålning i gång. Bland annat grävdes en del av slänten, som ansluter till E6 södergående avfartsramp, bort och ersattes av L-stöd. Uppe i östra slänten hade ett stort område fyllts upp med fyllnadsmassor, ställvis tio meter mäktiga, under vår–sommar 2023. Vid skredhändelsen försvann dessa tio meter tillsammans med ytterligare tio meter av den ursprungliga jorden och skapade den så kallade 'skredgropen'. I Norumsån hävdes jordmassor upp och resulterade i nära tio meters höjdförändringar.

De geologiska undersökningarna visar att den granodioritiska berggrunden är sprickrik, med sprickplan och vittring som bidrar till vattenföring ner i skredsvackan. Jordarterna i området är präglade av närheten till en oscillerande iskant (den rör sig fram och tillbaka på grund av att isen växelsvis växer till och smälter) under deglaciationen och efterföljande vågpåverkan under landhöjningen. Geomorfologin med moränryggar, uppbyggda till stor del av isälvsediment, visar att östra delen av skredområdet ligger i direkt anslutning till ett israndläge. Växellagrade kornstorlekar av isälvsediment med en mäktighet av omkring fem till åtta meter, längst mot berget i öst, har goda vattenförande egenskaper. När sedimenttillförseln från inlandsisen avtog och vattendjupet successivt blev grundare, skapades en ypperlig livsmiljö för bland annat musslor och kräftdjur. Samtidigt avsattes finkorniga sediment som silt och lera på slutningen. Dalgången fylldes upp med silt och lera under hela denna tid, vilket resulterat i mäktigheter av cirka 20 m i södra–sydvästra delen av skredområdet och över 40 m i norra. Generellt har leran ett stort innehåll av gytta i de övre tio metrarna, men ända ner till omkring 30 m i de norra delarna.

Generella grundvattennivåer i opåverkade magasin var inte exceptionella vid tidpunkten för skredet. Dock är det möjligt att gräv- och schaktarbetena i östra området har skapat en situation med höga grundvattentryck och förändrade flödesvägar. Avrinningen har påverkats och dels gjort avrinningsområdet större, dels skapat infiltrationsbassänger på ett par platser, och minskat infiltrationen på andra med snabbare avrinning till följd.

Analys av jordprover och borrhinar visar att det finns rikligt med inslag av tunna silt och sandskikt i leran. De geokemiska resultaten indikerar även att det förekommer lager med tecken på urlakning och berikning av joner.

Svenska nationella seismiska nätet övervakar rörelser i berggrunden och deras registreringar tyder på att skredet inte producerade särskilt mycket seismisk energi, men en svag signal detekterades på Tjörn-stationen mellan 01:39:30 och 01:41:20. Signalen liknar de som har rapporterats för jordskred, men kan inte med säkerhet fastställas komma från skredet. Sprängningar i området, kopplade till bergtäkten i närheten samt anläggningsarbeten, registreras tydligt på flera stationer. De bekräftar att ingen sprängning utfördes i närtid med skredet.

Kartläggning av rörelseindikatorer visar hur markytan förflyttat sig under skredet, med de största horisontella rörelserna (över 150 m) i det östra området. Rörelserna minskar generellt väster- och norrut. Mindre bakåtskridande skred har också skett utmed bakkanten av det huvudsakliga skredäret.

Vattenföring ner i leran skapar förutsättningar för lakning och bildning av kvicklera. Stratigrafin med skiktade isälvsediment i öst infiltrerar och transporterar grundvatten väl och kopplar hydrologiskt till leran i väst via skaljordslager. Leran i dalgången har stor mäktighet och innehåller mycket silt. Flera anläggningar har påverkat området under de senaste decennierna. Tillförandet av fyllnadsmassor i öst skedde snabbt och massorna innehöll mycket vatten, vilket möjligtvis påverkade konsolideringen. Omgrävning och fyllning av Kärrbäcken vid E6-bygget kan ha

påverkat markrörelserna i norr. Väl grundlagda ytor kan ha påverkat skredets rörelser. De markarbeten som pågick har sannolikt påverkat de naturliga grundvattenförhållandena, med högre grundvattentryck som följd av fyllnadsmassorna.

Rapporten föreslår ett scenario där det första brottet i de underliggande jordlagren skedde under fyllningsmassorna i öst. Detta ledde till sättningar i ”vallen” och markhävning längre ner i slänten, vilket kan ha påverkat E6 och avvattningen. När E6 bröts sönder släppte de mothållande krafterna och flaket gled ut, varefter ytterligare markrörelser följde ut i Norumsåns flodplan och norrut.

De geologiska förhållandena i Stenungsund utgör en grundläggande förutsättning för områdets skredbenägenhet. Området har förutsättningar för bildandet av kvicklera, en finkornig jordart som är mycket känslig för störningar. Jordskredet i Stenungsund visar på det komplexa samspelet mellan geologiska, hydrologiska och mänskliga faktorer i släntinstabilitet. Resultaten betonar vikten av fortsatt övervakning och forskning för att minska risken för framtida skred i områden med känsliga leror. Vidare undersökningar kommer att förbättra modeller för att förutsäga och hantera framtida geologiska risker i Sverige.

Summary in English

On September 23, 2023, at approximately 01:40, a landslide occurred at Stenungsundsmotet along the E6 highway, affecting a 13-hectare area and damaging infrastructure. In collaboration with the Swedish Accident Investigation Authority (SHK), the Swedish Geological Survey (SGU) conducted a geological investigation. The report aims to improve the understanding of geological conditions and landscape evolution for better risk mitigation in general, and to understand the Stenungsund landslide specifically.

The region's landscape has been shaped over millions of years, featuring exposed bedrock and clay-filled valleys. During the Weichselian glaciation, ice covered northern Europe, reaching Germany and Poland at its peak. The ice retreated gradually, accelerating 11,600 years ago. In Stenungsund, deglaciation was influenced by bedrock structure and sea level changes, forming marine clay, shorelines, and deltas. Land uplift following ice retreat resulted in clay deposits that, under certain conditions, developed into quick clay, highly sensitive to disturbances.

Groundwater levels fluctuate due to soil composition, precipitation, and human activity, with significant rises occurring after heavy autumn rainfall. The landscape has been mapped using geological surveys, LiDAR images, aerial photography, and geophysical data, including InSAR and seismic recordings. Field investigations included borehole sampling, stratigraphic analysis, and laboratory testing.

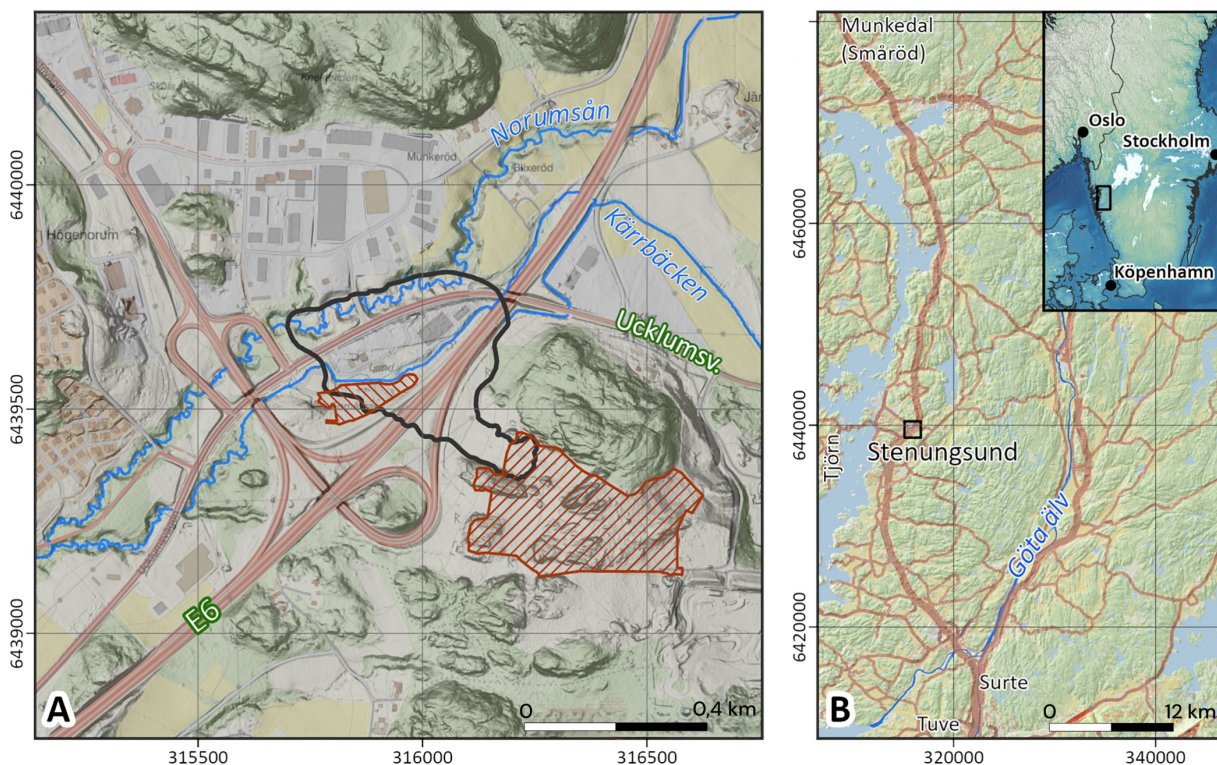
Land use changes, including infrastructure projects such as the construction of E6 and commercial developments, have altered drainage patterns and mass balance in the valley. Excavation and filling work have contributed to instability. The landslide's initial failure likely began in the eastern fill area, leading to progressive movements affecting E6 and surrounding terrain.

The geological conditions in Stenungsund indicate a predisposition to landslides, particularly due to quick clay formation. The event underscores the complex interplay of geological, hydrological, and human factors in slope stability, emphasizing the need for continued monitoring and research to mitigate future risks.

Inledning

Omkring kl. 01:40 den 23 september 2023 ägde ett jordskred rum vid Stenungsundsmotet, Europaväg 6 (E6), i Stenungsund (fig. 1). Cirka 230 000 kubikmeter jord- och byggnadsmassor i markytan flyttade på sig och förstörde E6, den kommunala vägen Ucklumsvägen, och flera byggnader; en bensinstation, bygghandel och snabbmatsrestaurang. Sveriges geologiska undersökning (SGU) har träffat ett samarbetsavtal med Statens haverikommission (SHK) som utreder jordskredet. Enligt avtalet ska SGU fullgöra utredningsarbete för SHK:s räkning genom att bilda en projektgrupp inom SGU som har till uppgift att bistå SHK:s haveriutredning. Utredningsarbetet har skett under ledning av SHK. Den här rapporten är utförd som en del i det arbete som SGU bistått SHK med, och är en del i haveriutredningen. Rapporten utgör, tillsammans med Statens geotekniska instituts (SGI) geotekniska rapport, stöd till SHK:s slutrapport.

Syftet med SGU:s del i utredningen är att brett undersöka och beskriva de geologiska förutsättningarna i området. Redogöra för hur dessa påverkar och samverkar med markrörelser. Visa hur markanvändning och markytan i området har förändrats, och diskutera hur förändringen har påverkat områdets förutsättningar för markrörelser. Syftet är att data även ska användas i fortsatt arbete med att förbättra kunskapen om markrörelser för att förebygga att liknande händelser inträffar i framtiden.



Figur 1. Skredet ägde rum vid Stenungsundsmotet, Europaväg 6 (E6), i sydvästra Sverige. Svart polygon visar området som påverkades av skredets massrörelser (A). Vid tidpunkten pågick entreprenader på västra och östra sidan av E6, områdena är markerade med röd skraffering. (B) Göta älv dalen är ökad för utmaningar med skredrisker. Tre platser där allvarliga skred inträffat är Surte (1950), Tuve (1977) och Munkedal (2006). Bakgrund: Topografi 50, ©Lantmäteriet; infälld karta: ©GEBICO).

För att beskriva områdets förhållanden och de skeenden som har lett fram till tidpunkten för skredet, behövs en tillbakablick både i geologisk och en recent tidsskala.

Under 2023 pågick arbeten på östra sidan av E6 genom anläggandet av en företagspark. Det pågick även arbeten på västra sidan av E6 (fig. 1A). För mer information och analys av de olika entreprenaderna, Stenungsunds kommun, planeringsprocesser med mera, hänvisas läsaren till SHK:s slutrapport (SHK 2025).

Jordskred

Jordskred förekommer runt om hela världen med stora konsekvenser för samhällen, mänskligt liv, och ekonomiska förluster. Engelska ordet *Landslides* inkluderar generellt berggras, blockutfall, ras eller skred i grovkorniga jordar (sand, grus, morän), och skred i finkorniga jordarter (Highland & Bobrowsky 2008). I svenskan, inklusive denna rapport, är det skred i finkornig jord som benämns jordskred (alternativt lerskred), när en sammanhängande jordmassa sätts i rörelse. Vidare benämns berggras och blockutfall för ras, och skred i grovkorniga jordarter kan benämnas både jordras och jordskred beroende på rörelsens egenskaper.

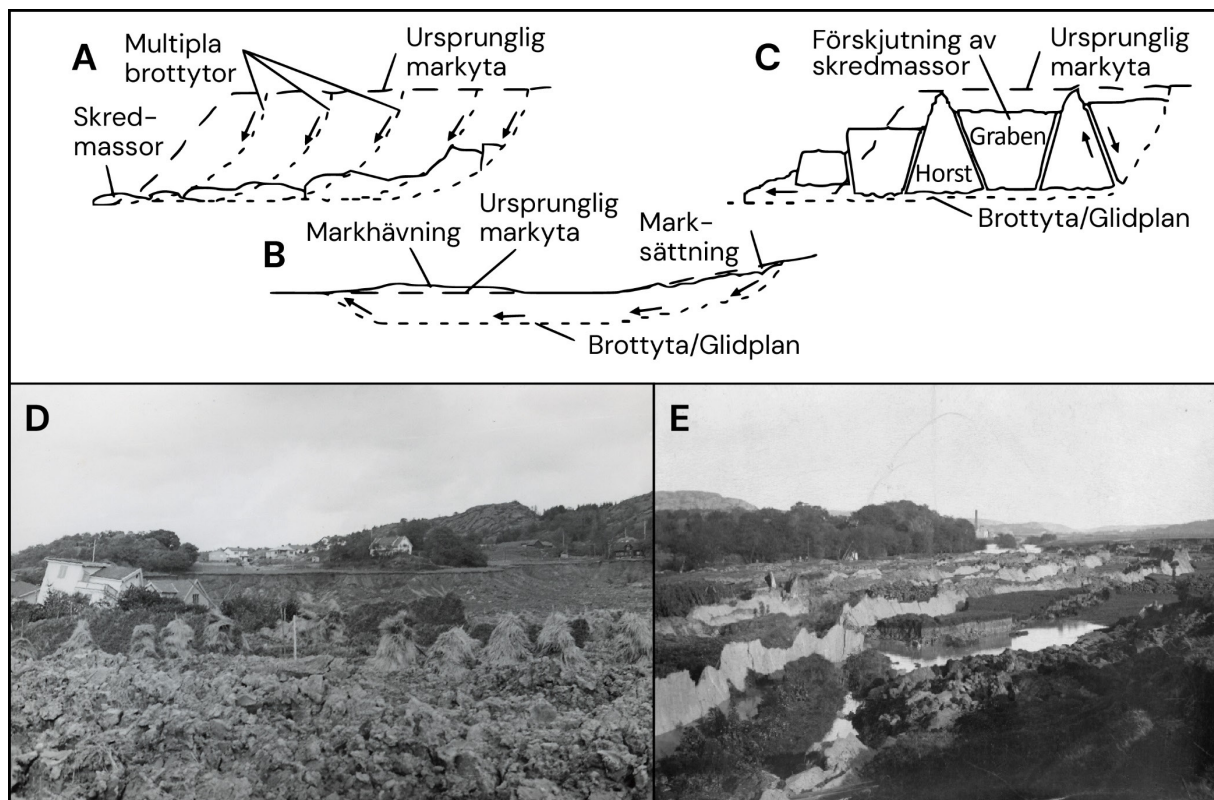
Jordskred kan starta och utvecklas på flera olika sätt, generellt delas de upp i bakåtskridande och framåtskridande. Ett bakåtskridande skred startar vid släntfot och ”äter sig” bakåt, inåt i slänten, medan ett framåtskridande startar högre upp i sluttningen och trycker massorna framåt, nedåt. Båda typerna sker oftast stegvis stycke för stycke, vilket kallas för att skredet är progressivt. För mer information och sammanfattning av klassificering av skred hänvisas läsaren till Hungr m.fl. (2014). Nedan följer en kort beskrivning av fyra typer av massrörelser.

Ett jordskred där brottytan är skålformad (konkav) och rörelsen sker mer eller mindre rotationsmässigt runt en axel som är parallell med sluttningens kontur kallas *rotationsskred* eller *skålskred* (fig. 2A). Den förskjutna massan kan, under vissa omständigheter, röra sig som en relativt sammanhållen enhet längs brottytan med liten intern deformation. Materialets översta del kan röra sig nästan vertikalt nedåt, och dess överyta lutar ofta bakåt mot skredets ärr (bakkant).

Translativt progressiva jordskred (framåtskridande flakskred) inträffar vanligtvis på långa, svagt lutande sluttningar i normalt konsoliderade eller något överkonsoliderade känsliga leror, såsom de som ofta förekommer i Skandinavien. Dessa jordskred initieras ofta av mänskliga aktiviteter uppe i eller ovan en slänt, som exempelvis utfyllnad eller pålning. Dessa störningar kan orsaka instabilitet, vilket i sin tur ökar jordtrycket längre ner på sluttningen och resulterar i en passiv progressiv kollaps nedåt. Dessa skred kännetecknas av en sänkning av det övre området och en upphöjd, passiv zon bortom sluttningens fot, som ofta sträcker sig ut på planare mark (Torrance 2012; fig. 2B).

Ett flakskred kan, enligt en teori av (Bjerrum 1967) och vidareutvecklad av Quinn m.fl. (2011), starta genom ett plötsligt brott eller en serie av små, lokala brott över tid så att hela brottytan för skredet utvecklas innan den första tydligt märkbara rörelsen inträffar. Ett exempel på denna typ av jordskred är Surteskredet 1950 i Sverige (Caldenius m.fl. 1956, Jakobson 1952); fig. 2D), som ledde till att hus förflyttades på grund av passiv upplyftning. Det är noterbart att, även om omfattande utbredning på planmark är vanligt i de känsliga skandinaviska lerorna, leder progressiva skred inte alltid till massiv sönderdelning.

En form av snabb massrörelse där lös jord, sten och ibland organiskt material blandas med vatten och bildar en slurry som flyter nedför sluttningen kallas för *slamström* (eng. *flow*). Ibland kan ett rotations- eller translationsskred, när det får upp fart och den interna massan förlorar



Figur 2. Olika typer av skred. **(A)** rotations-/skålskred, **(B)** Flakscred (translativt progressivt), **(C)** Spreads. Modifierad från (Locat m.fl. 2011). **(D)** Skredet i Surte 1950 (foto: Curt Fredén, SGU). **(E)** Skredet i Kviberg 1892 (foto: A. Jonason).

sammanhållning eller tar upp vatten, utvecklas till en slamström. Dessa flöden kan vara extremt snabba och uppstå utan någon förvarning. Sommaren 2023 inträffade denna typ av händelse i Åre (Peterson 2023).

Lateral spridningar (eng. *spreads*) inträffar vanligtvis på mycket svaga lutningar eller i princip platt terräng, särskilt där ett starkare övre lager av jord utsätts för utsträckning och rör sig ovanpå ett underliggande mjukare, svagare lager (fig. 2C). Sådana brott åtföljs ofta av en generell nedsänkning i det svagare underliggande lagret. Det övre stabila lagret sträcks ut när underliggande lager har börjat flöda till följd av likvifaktion eller plastisk deformation. Om det svagare lagret är relativt tjockt kan de överliggande, spruckna blocken sjunka ner i det och förskjutas, rotera, sönderfalla, och likvifieras. Ett exempel på ett sådant skred är Kvibergsskredet 1892 i Göteborg (fig. 2E).

Regionalgeologiska förhållanden

Landskapet har formats under miljontals år. Västsverige, speciellt Bohuslän, består av ett så kallat sprickdalslandskap. Detta landskap kan förenklat delas in i två typer: kalt berg med ställvis tunna jordtäcken som höjer sig, och dalgångar fyllda med lera.

Berggrund

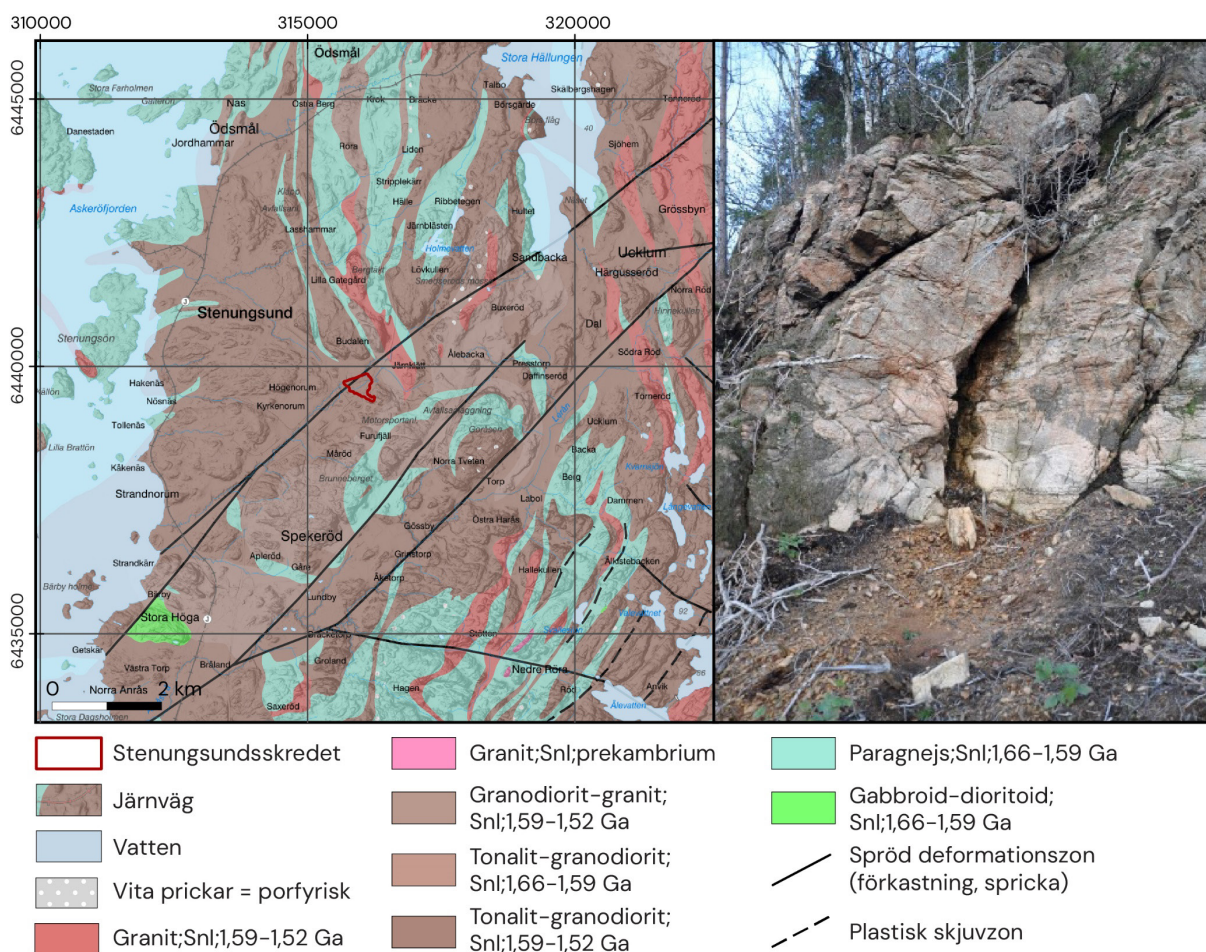
Västsverige visar ett mönster av höjda plataer som är rester av en tidigare sammanhängande yta, så kallade peneplan. Dessa plataer bildades när jordskorpanns övre lager eroderades bort under en lång erosionsperiod. Allt eftersom vittrade sprickor fram, eroderades av vattenflöden och ett sprickdalslandskap började formas. Sprickdalslandskapet formades ytterligare genom glaciärernas

rörelser och smältning under istiden. Bohuslän präglas dessutom av en hög frekvens av sprickbildningar och sänkor i berggrunden.

Berggrunden i regionen är starkt påverkad av tektoniska krafter, vilket har skapat de tidigare nämnda omfattande nätverk av sprickor och förkastningar. Större sprickzoner har spelat en avgörande roll i att forma Göta älvdalen, en sprickdal som bildats längs försvagade linjer i berggrunden. Mindre sprickzoner är också vanliga och påverkar grundvattenflödet samt kan bidra till instabilitet i slänter.

Berggrunden i Stenungsundområdet är en granitoidintrusion i Idefjordenterrängen med en ålder av $1\,522 \pm 10$ miljoner år (fig. 3). De dominerande bergarterna i regionen, gnejs och granit, visar på olika grader av deformation. Denna deformation yttrar sig genom veckning, sprickbildning och närvaro av mylonit, en bergart som bildats genom intensiv skjuvning. Deformationsintensiteten beror på bergartstyp och närheten till större tektoniska zoner, vilket gör vissa områden mer sårbara för förändringar och påverkan. Deformationen är kopplad till den svekonorvegiska orogenesisen, som inträffade mellan 1 150 och 900 miljoner år sedan.

Berggrunden är ställvis vittringsbenägen och berggrundens strukturgeologiska drag har en direkt koppling till områdets skredbenägenhet. Sprickzoner, särskilt de som innehåller vittrat material, kan fungera som potenta ledare för grundvattenflöden. När vattentrycket ökar i dessa zoner, kan styrkan i de överliggande lerlagren påverkas.



Figur 3. Berggrunden i regionen består främst av tonalitisk till granitoid-granitisk gnejs. I skredområdet är berget uppsprucket och ställvis förekommer vittringsgrus (högra bilden). Foto: Christian Öhring.

Kvartärgeologi

De lösa avlagringar som vilar ovanpå berggrunden benämns jordarter, och deras egenskaper beror på både bildningsprocess och typen av geologiskt ursprungsmaterial. Dessa egenskaper varierar både vid markytan och på djupet, vilket i sin tur har stor inverkan på möjligheterna för markanvändning, grundvattentillgång samt planering och utveckling av infrastruktur. Sveriges jordarter presenteras i Jordartskartan (SGU 2024a), vilken illustrerar vilken jordart som dominerar ytligt i landskapet. I regionen runt Stenungsund dominerar kalt, eller nästan kalt berg, i höjdpartierna och lera i dalgångarna (fig. 4). Nedan följer en sammanfattning av kvartär geomorfologi, som följs av en sammanfattning av deglaciationen, och sedan en kortfattad beskrivning av jordarterna i regionen. För mer information om de olika jordarterna, Jordartskartans användningsområden, samt ordlista med mera, hänvisas läsaren till SGU:s handledning för jordartsinformation (Karlsson m.fl. 2021).

Kvartär geomorfologi

Moräner, som är framträdande landformer i Stenungsundsområdet, består av glaciala sediment – morän eller isälvsediment. Avlånga landformer, orienterade parallellt med isens rörelseriktning, kallas generellt 'drumliner'. Drumliner består av morän, men är inte någon framträdande landform i Stenungsundsregionen. Desto vanligare är ändmoräner, som är ryggar orienterade vinkelrätt mot isens rörelseriktning. Dessa avlagringar lämnades kvar under kortare perioder av isframstöt under isavsmältningen, vilket skapade en ansamling av material längs isens randlägen. Ändmoräner kan bestå av morän, isälvsediment, eller en blandning av dessa glaciala sediment.

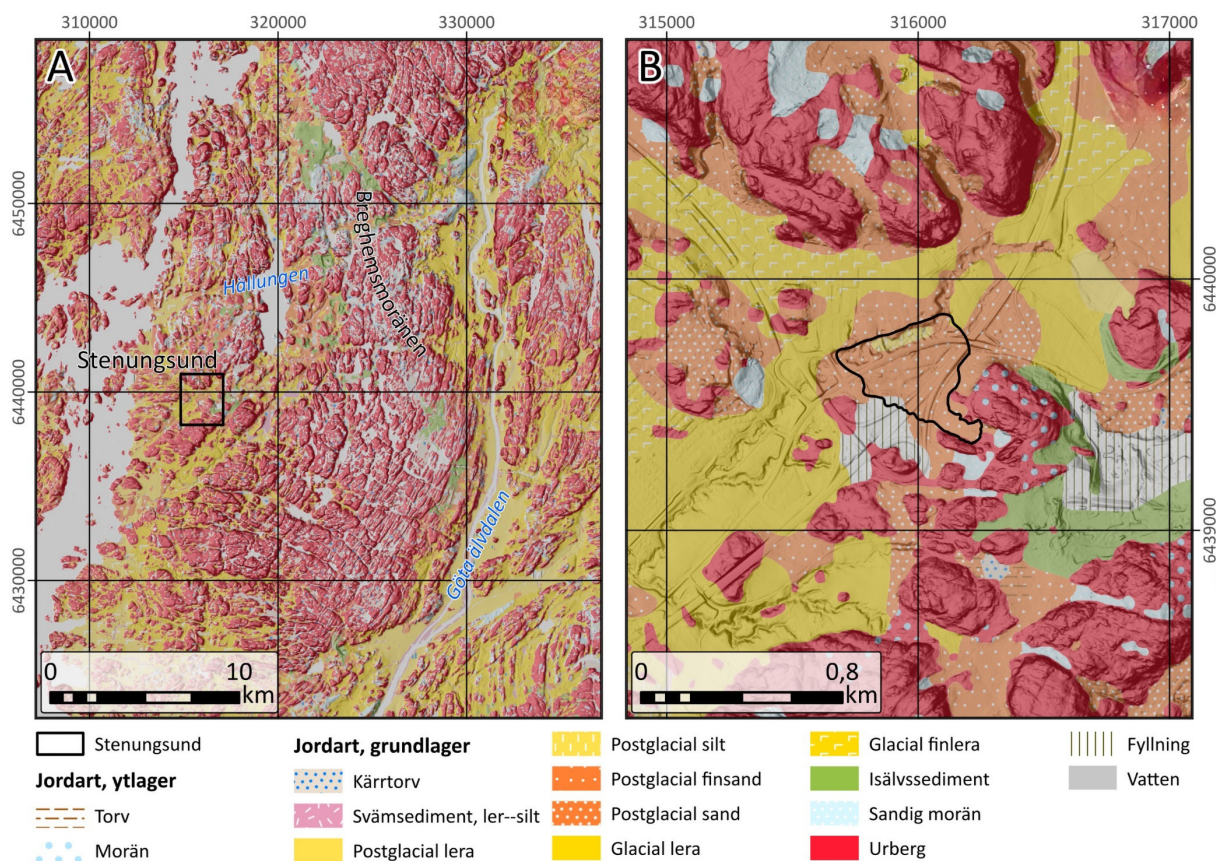
De mest framträdande ändmoränstråken i Västsverige består övervägande av isälvsediment (Björnsjö 1949, Plink-Björklund & Ronnert 1999, Wedel 1971). Ställvis sammanfaller ett randläge, eller ändmorän, med en större glacifluvial avsättning som byggts upp av sand och grus. Dessa kan vara subakvatiska (eng. *subaqueous fan*), eller deltan uppbyggda till havsnivån, vilka i det senare fallet representerar de den högsta kustlinjen (HK). Genom regionens östra delar löper ett av de större randlägena i Västsverige, den så kallade Berghemsmoränen.

Glaciärernas flödesriktningar kan bland annat utläsas i de rispor som inlandsisen orsakat i berg-hällar, så kallade isräfflor. De bildas när i isen infrusen grus och sten ristar in märken i underlaget när isen glider mot berget. De dokumenterade isräfflorna i området visar att isen hade en rörelse från cirka 80 grader öst mot väst och iskanten smälte följaktligen tillbaka österut. Isrörelser från två glaciala episoder sammanfaller med orienteringen av den storskaliga geomorfologin, befintliga berggrundssprickor, som löper nord-syd och nordost-sydväst, vilket underlättat erosion och bildandet av dalar. Detta resulterade i bildandet av områdets karaktäristiska topografi, det så kallade sprickdalslandskapet, bestående av plåtåer och dalar (Fredén 1987).

Deglaciationen och strandförskjutning

Under den senaste nedisningen, kallad Weichsel, var hela norra Europa täckt av en inlandsis. Under det sista glaciala maximumet (LGM, 26 500 till 20 000 år sedan; Clark m.fl. 2009) sträckte sig isens kant söder om Berlin i Tyskland och Poznan i Polen (ex. Stroeve m.fl. 2016). Den slutliga isavsmältningen började för omkring 20 000 år sedan. Isavsmältningen gick långsamt och i etapper fram till för cirka 11 600 år sedan då en markant klimatförändring innebar att landisens front i Sverige snabbt drog sig tillbaka mot Norrlands inland. De sista resterna av landisen försvann för drygt 9 000 år sedan (Regnéll m.fl. 2023, 2019, 2025).

Deglaciationsförloppet i Stenungsundsregionen präglades av processer kopplade till iskanten och bildandet av olika glaciala avlagringar, påverkade av topografi, berggrund och närvaron av havet. Områdets berggrundsstruktur spelade en betydande roll för att styra den slutgiltiga avsmältningsprocessen. Avsmältningens interagerade med havsnivåförändringarna har lämnat

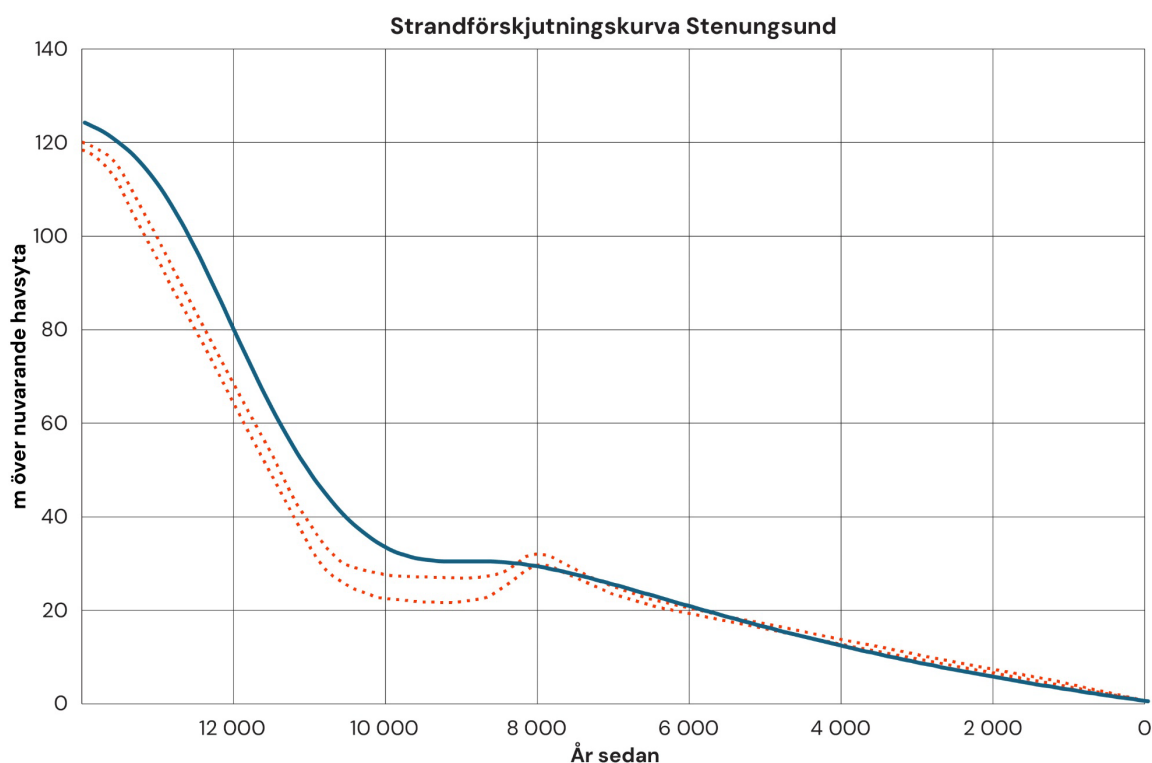


Figur 4. Jordartskartan över regionen domineras av röd färgskala (berg-i-dagen eller tunt jordtäckte), vilket innebär avsaknad av jordtäckten. Sprickdalslandskapets dalgångar är gula (framför allt lera). Notera även de gröna ytorna, som representerar isålvssediment. I Hällungen-området finns ett flertal delataytor utmed ett stråk, vilket tillhör den så kallade Bergghemsmoränen. Utbredningen av (B) markeras med en svart rektangel i (A), och skredområdet visas med svart polygon 'Stenungsund' i (B). Terrängskuggning: Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+, ©Lantmäteriet.

spår i landskapet, som lera, svallade ytor, strandlinjer och deltan. De stora israndzonerna i Västsverige är välkända och framträder tydligt i sprickdalslandskapet, som domineras av berg-i-dagen, eller tunna jordtäckten, och lerfyllda dalgångar. Dessa zoner innehåller ansamlingar av moränryggar, vilka framträder särskilt tydligt (Björnsjö 1949). Genom att använda LiDAR (Light Detection and Ranging) -baserade topografiska bilder kan vi kartlägga dessa moränryggar med ännu större detaljrikedom än tidigare (Johnson m.fl. 2015; se avsnitt *Resultat/Geomorfologi*). Dessa glaciomarina avsättningar är viktiga arkiv av paleogeografi och paleoklimat. Genom kol-14-datering av molluskskal, djurskelett eller organiska jordarter kan en tidslinje för områdets deglaciation och den postglaciala utvecklingen etableras. Dessutom kan vissa sediment dateras med luminiscensmetoder, medan kosmogen exponeringsdatering kan användas för att fastställa ålder på bergytor och block.

Under istiden sänktes den globala havsnivån, på grund av bindningen av vatten i inlandsisarna, till ungefär 120 m under dagens nivå (Kenney 1964) men kontinentalsocklarna pressades ned ännu mer av inlandsisens vikt. När glaciärerna smälte undan, översvämmades de nedtryckta landområdena vid bland annat Skandinavien's kust av havsvatten.

Landhöjning och variationen av havsnivå resulterar i den relativa havsnivåförändringen (fig. 5).



Figur 5. Den relativa havsnivåförändringen är ett resultat av global havsnivåförändring och glacial isostasi. Diagrammet visar summan av variationerna i havsnivån och landhöjningen. Den blå kurvan representerar SGU:s landsomfattande modell och de röda kommer från äldre lokala studier (Fredén 1987, Påsse & Daniels 2015, Persson 1973).

På grund av att jordskorpan var nedtryckt av inlandsisen låg dagens landyta vid deglaciationen alltså under havsnivån, trots att den globala havsnivån låg 120 m under dagens. Samspelet mellan havsnivån och isavsmältningen kan utläsas ur landskapet, exempelvis genom sediment-avsättningar och strandnära landformer. I Stenungsundsregionen ligger den så kallade högsta kustlinjen (HK) på cirka 125 m över dagens havsnivå.

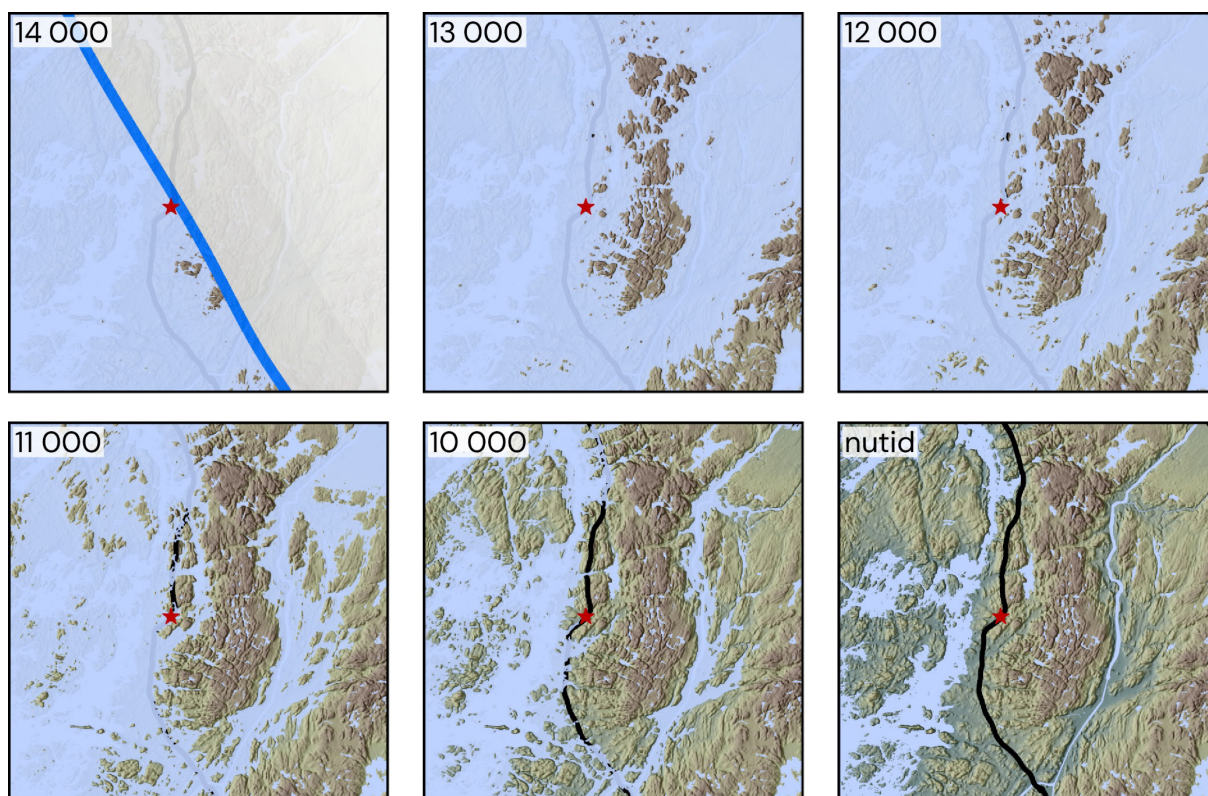
Iskanten smälte tillbaka från Västerhavet och in över skärgården väster om Stenungsund för omkring 16 500 år sedan (Hughes m.fl. 2016, Stroeven m.fl. 2016). Efter ytterligare cirka 2 500 år nådde iskanten Stenungsund. Vattennivån i den västra delen av skredområdet var cirka 90 m över dagens marknivå och cirka 55 m i den östra delen.

Inom dalgången där skredet ägde rum varierar jorddjupet från cirka 20 m i söder till 45 m i norr, och när än större djup norr om skredområdet (Berling 2024, Lindmark & Norder 1987, SGU 2024b).

Det finns flera indikationer på att iskanten inte endast smälte tillbaka österut, utan även avancerade i korta perioder. En är de rikligt förekommande israndlägena vilka kan ha orsakats av flera faktorer: A) Ett kallare klimat kan ha gjort att isen växte tillfälligt. B) När isen smälte sjönk den ihop, vilket kan minska motståndet i isens rörelseriktning med en framstöt som följd. C) Tryckvariationer under isen, mot underlaget, kan också orsaka lokala framstötter.

För omkring 13 000 år sedan började höjderna söder och norr om skredområdet lyftas upp ur havet, och ett sund bildades genom ”Munkerödsdalen”. För cirka 12 000 år sedan smalnade sundet av till cirka 500 m och slöts slutligen, vilket gjorde att skredområdet hamnade vid kanten av en havsvik (fig. 6).

Skredområdet lyftes ur havet för cirka 11 000 år sedan (fig. 6). Den mothållande kraft som havet haft mot slutningarna försvann och vid denna tid utlöstes troligen ett stort jordskred i dalgången strax norr om skredområdet (se avsnitt *Resultat/Geomorfologi*). Den relativa havsnivån fortsatte

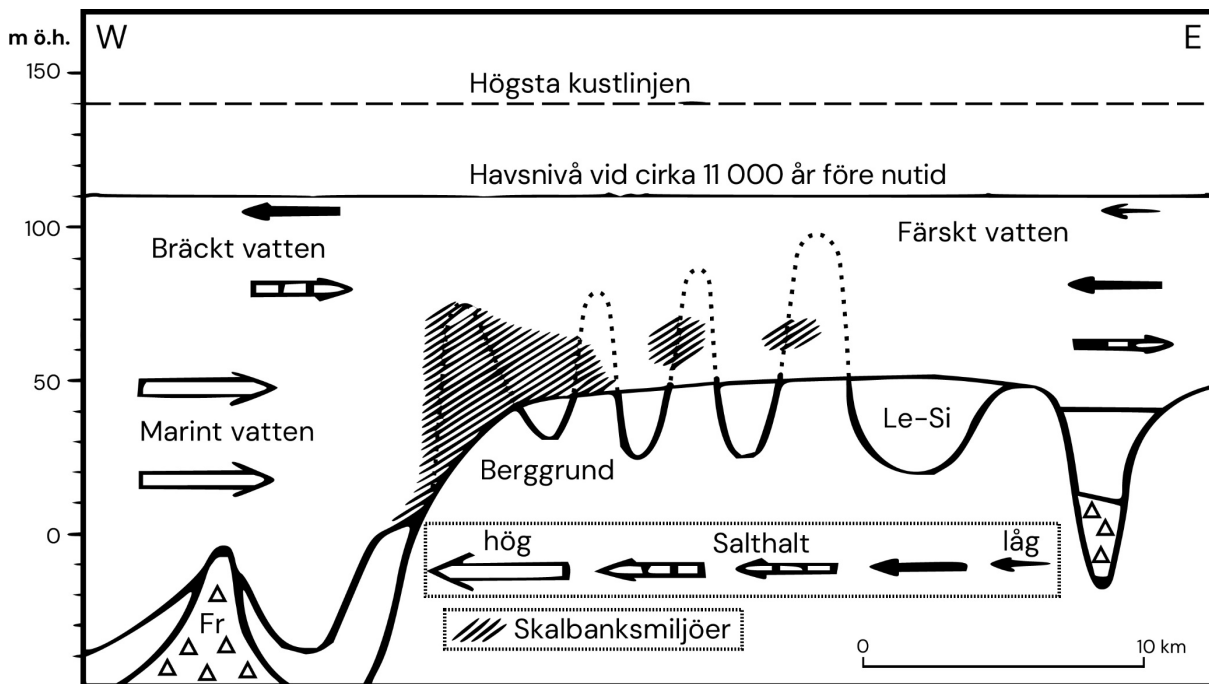


Figur 6. Paleogeografiska kartor visar hur skredområdet lyftes upp ur havet (modifierad från Påsse & Daniels 2015). Blå linje representerar iskanten under deglaciationen (Stroeven m.fl. 2016). Svart linje i nord-sydlig orientering markerar E6, röd stjärna är skredområdet. Terrängskuggning: Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+, ©Lantmäteriet.

sjunka (regression) i ytterligare cirka 1 000 år, varefter den blev stabil eller steg något under de följande 1 500–2 000 åren. Denna inbromsning eller höjning av den relativa havsnivån kallas ibland för Tapes-transgressionen efter musslan *Tapes decussatus*, vars skal är vanliga i strandvallar från denna tid. Detta berodde dels på att landhöjningshastigheten avtagit, dels på stigande havsnivåer från smältande inlandsisar i ett globalt varmare klimat. SGU:s strandförskjutningsmodell visar att havsnivån i Stenungsundsområdet förblev relativt statisk under denna period. En äldre SGU-avhandling visar dock att flera kortvariga havsnivåhöjningar (transgressioner) kan ha förekommit vid Ljungkile, varav den mest betydande höjde vattennivån med cirka 7 m (Persson 1973). Om detta stämmer kan organiska lager finnas i dalgångens botten vid skredområdet, där dessa lager har begravts av finkorniga havssediment, vid transgressionen, innan området slutligen lyftes ur havet.

Skalbänkar är en vanlig förekomst i Bohuslän, särskilt i Uddevallatrakten. De förekommer vanligen på mellan 55 och 65 m över havet. Kol-14-dateringar visar att de oftast är omkring 11 000 till 10 000 år gamla (Fredén 1988, 1986). De äldsta fynden förekommer på 90 till 125 m över havet, det vill säga 20 till 30 m under dåvarande havsyta. Livsmiljöerna för de mollusk- och kräftdjur, som producerat skalerna, är i relativt smala sund med marina förhållanden åt väst och bräckt åt öst. Samtliga skalbänkar i Uddevallas närhet finns på de västra sluttningarna, det vill säga livsmiljöerna har utsatts för havsvatten i lä om de utgående smältvattenströmmarna (fig. 7).

Efter att området blivit torrlagt har landskapet huvudsakligen formats genom vattenerosion, ackumulering av torvlager och senare genom mänsklig påverkan.



Figur 7. Skalbankar är bildningar bestående av skal från blöt- och kräftdjur. Figuren åskådliggör en schematisk bild av var förhållandena för ett rikt djurliv och därmed avsättning av dess kvarlevor var gynnsamma i slutet av istiden. Figuren föreställer sundet mellan Uddevalla och Vänerbassängen, men är schematiskt representativ också för Stenungsundsområdet. Modifierad från Fredén (1988).

Jordarter

Jordarterna i Stenungsund återspeglar en komplex glacial historia samt effekterna av postglaciala processer.

Morän, som är den vanligaste jordarten i Sverige (cirka 75 % av landet) är avsatt under eller i direkt anslutning till glaciärer. Den består av en blandning av osorterade sediment som lera, silt, sand, grus och större stenar, samt block. I Stenungsundsregionen är dock morän inte så utbredd som i resten av landet. Förekomsterna är små och osammanhängande, ofta avsatta på läsidan av topografiska hinder i landskapet, i förhållande till isens flödesriktning.

Glaciärernas smältvatten kanaliseras ofta till så kallade isälvar under isen, och i dessa sorteras primärt sand och grus ut och bildar isälvssediment. Sedimenten avsätts som rullstensåsar eller deltabildningar. I Stenungsundsregionen har isälvssedimenten ansamlats i subakvatiska deltan (eng. *subaqueous fans*) då israndsreträtten haft en lägre hastighet, en tillfällig framstöt, eller ökad sedimenttillgång. Ställvis har uppbyggnaden av deltan fortsatt tills det har nått havsnivån och då kan dessa landformer användas till att bestämma den högsta kustlinjen. Exempelvis återfinns ett flertal 'subaqueous fans' och HK-deltan i Hällungen-området nordöst om Stenungsund (se fig. 4).

Glacial lera, även kallad glaciomarin lera, är utbredd i Göteborgsregionen och Bohuslän, inklusive Stenungsund (Fredén 1987). Denna typ av lera avsattes i en marin miljö i slutet av den senaste istiden, en tid då landet alltså låg lägre och havsnivån högre.

I sötvatten hålls lerpartiklar ($< 2 \mu\text{m}$) i suspension länge, vilket ger långsam sedimentation och kornstorleksvariationen bildar årsvarv. Sedimentationen av glaciärlera i marint vatten påverkas i hög grad av vattnets salthalt; när glaciärerna smälter blandas sötvatten med saltvatten, vilket kan få lerpartiklar att klumpa ihop sig, flockullera, och sjunka mycket hastigare än enstaka lerpartiklar.

Leraggregaten kan sedimentera upp till högsta kustlinjen men i tunna lager, medan de största mäktigheterna återfinns där vattendjupen var större. Hydrografiska faktorer som temperatur och salthalt styr sedimentationsprocessen.

När den relativa havsnivån sjunker till följd av landhöjningen, utsätts de tidigare avsatta jordarterna för kustprocesser. Kraftigast påverkan sker där störst vågenergi kan verka, i Stenungsundsregionen är detta oftast i västliga lägen mot Västerhavet. Detta leder till att tidigare avsatta sediment omlagras och tvättas ur – svallas – så att sand, silt och lera transporteras i vattnet och avsätts på nytt som sorterade postglaciala sediment. I skredområdet finns dessa svallsediment som sand och silt i ytan, ovanpå de tidigare avsatta glaciala sedimenten.

Det ursvallade materialet avsattes nära stränderna med avtagande kornstorlek utåt. Den finaste fraktionen, lera, sedimenterade tillsammans med organiskt material på botten i fjärdar och vikar som postglacialt havssediment. Postglacial lera saknar oftast tydlig skiktning och underlagras vanligtvis av glacial lera. Mäktigheten varierar beroende på terrängläge och tillgång på äldre jordarter.

Fältidentifieringen av postglacial lera kan vara utmanande, då den liknar glacial lera i sin torra skorpa. Förekomst av organiskt material i vissa postglaciala leror tyder också på marina eller landbaserade organiska bidrag till lerans sammansättning.

Alluviala avlagringar, specifikt svämsediment, som oftast består av lera, silt, eller sand med en hög organisk halt förekommer ställvis i låglänta områden längs vattendrag som Norumsån.

Var och en av dessa jordartstyper avspeglar inte bara forntida glaciala processer utan påverkar också modern markanvändning, stabilitet och miljöplanering i regionen.

Sensitiva leror

Lerig jord med en sensitivitet som är större än 50 och en omrörd skjuvhållfasthet som är lägre än 0,4 kPa kallas för **kwicklera** (Isacsson m.fl. 2025, Rankka m.fl. 2004). Detta avslöjar nödvändigtvis inte jordens geologiska historia eller dess innehåll. Kwicklera är känslig för störningar och kan gå från fast till flytande jord. Generellt så syftas det på lera och silt, vilka avsattes i salthaltigt vatten, och som på grund av landhöjningen (den relativa havsnivåsenkningen) lyfts upp på land. När jordpartiklarna sedimenterade i havet, attraherades lermineral till varandra med kemiska bindningar av saltmineral (lerpartiklar flockulerar). Detta resulterar i, som tidigare beskrivits, att lermineralen bildar större, tyngre kluster, vilka sjunker mycket hastigare än enskilda lerpartiklar (Kranck 1975). Den avsatta jordarten får på grund av de kemiska bindningarna och den hastiga sedimentationen en porös, kaotisk struktur (Torrance 1983). Då denna jordart lyfts upp över havsnivån kan förhållanden bildas som gör att färskvatten strömmar (perkulerar) genom leran och påverkar de kemiska bindningarna. Det är nu leran successivt förlorar sin förmåga att hålla emot störningar, i takt med att salter lakas ut, och kan bilda det som benämns kwicklera. Den porösa strukturen ger också förutsättningar för en hög vattenhalt i sedimenten, vilket i sig är en viktig orsak till sensitiva sediment.

Marina förhållanden vid sedimentationen är dock inte nödvändig för att skapa förutsättningar för kwicklera. Den organiska halten är en faktor som kan påverka sedimentets hållfasthet; antingen som dispergeringsmedel, eller som ett cementserande medel (Söderblom 1974). I en syrefattig akvatisk miljö med hög organisk sedimentation kan sulfider bildas genom bakteriella processer. Sulfidhaltiga sediment kan innehålla mycket dålig markstabilitet, och sulfider i grundvattnet skapar ytterligare kemiska processer, som i sin tur kan ge upphov till stabilitetsproblematik (ex. Larsson m.fl. 2007). Sulfiderna kan komma från de bakteriella sulfiderna i leran, men även från oorganiskt material som sulfidhaltigt berg (Frogner-Kockum m.fl. 2015).

Porvattnets jonfördelning, exempelvis Fe, Al, Mg, Ca och K (Løken & Torrance 1971, Moum m.fl. 1971, Rosenqvist 1977, Talme, 1968), samt organiska föreningar (Söderblom 1974), påverkar lerans sensitivitet. Sensitivitet uppstår genom komplexa kolloidkemiska processer där flera faktorer samverkar och ökar de repulsiva krafterna mellan lerpartiklarna. Mekanisk störning av en sådan lera leder till strukturell kollaps och ökat porvattentryck. Närvaron av joner med

högre valens (till exempel Ca, Mg, Fe och Al) kan dock motverka dispersion trots låg salthalt (Rosenqvist 1977).

Förekomst av kvicklera ökar sannolikheten för storskaliga jordskred. En störning kan få kvicklera att övergå från ett relativt stabilt tillstånd till en vätskeliknande massa (läs mer om kvicklerans tekniska egenskaper i Geertsema och Torrance (2005), Rankka m.fl. (2004) och Isacsson m.fl. (2025). På grund av kvicklerans känslighet kan en initial störning leda till en följd av brott som sprider sig snabbt nedåt och utåt genom jordprofilen. Allt eftersom skredet fortskrider störs mer kvicklera som förlorar styrka och kan övergå i flytjord. Den flytande leran kan dessutom minska friktionen genom att fungera som smörjmedel. Dessa egenskaper gör att kvicklereskred kan växa väldigt i storlek.

Släntens geometri, graden av störning eller belastning och dräneringsförhållandena samverkar alla med kvicklerans egenskaper för att påverka sannolikheten för och omfattningen av jordskred. Förekomsten av grövre sedimentlager med hög vattenföring i leravsättningen påverkar grundvattenomsättningen och därmed urlakningshastigheten, vilket påverkar bildandet av kvicklera. Av vikt är därför en nyanserad förståelse för både egenskaperna hos kvicklera och de plats-specifika faktorer som bidrar till dessa händelser.

Skred i kvicklera skiljer sig från andra typer av jordskred genom att de sker plötsligt och utan någon längre förvarning. På detta sätt liknar de jordskred som utlöses av jordbävningar. Först uppstår ett mindre rotationsskred, och inom en kort tidsram – från tiotals minuter till några timmar – följer det större och huvudsakliga jordskredet, som också sker mycket snabbt (Torrance 2012).

Hydrogeologi

Vatten är en central faktor i de flesta jordskred. Koncentrationer av ytvatten från nederbörd, avrinning, källor och våt mark indikerar topografiska förändringar i skredbenägna områden. Ytvatten som infiltrerar sprickor, vilka kan ha uppstått genom markrörelser, bidrar till ökad instabilitet genom minskad effektiv spänning. Grundvatteninfiltration från nederbörd är ofta en orsak till markrörelser, speciellt i branta områden med mindre jorddjup. Kopplingen är inte lika påtaglig vid större jorddjup av relativt homogena sediment. Dock ökar relevansen när jordlagren innehåller lager med grövre, mer permeabla sediment som omsluts av tätare, leravlagringar (Persson 2007).

Källflöden som fungerar som grundvattenutflöden påverkar systemets hydrogeologiska dynamik. Förekomst av ett grundvattenutflöde indikerar på existensen av interna flödesvägar och potentiella tryckgradienter. Sipprande vatten uppströms ett potentiellt skredområde kan infiltrera och ackumuleras inom området, vilket påverkar stabiliteten. Nedströms skredzonen har däremot grundvattenutflöden en tryckavlastande effekt, och instabilitet kan uppstå om dessa utflöden blockeras (ex. Schuster & Krizek 1978).

Ett sätt att skatta grundvattentrycket i marken är att mäta vattennivån i ett grundvattenrör. Vattennivån i grundvattenröret representerar då grundvattentrycket för det djup där grundvattenrörets öppning finns. Ett annat sätt att skatta grundvattentrycket är att använda beräknade nivåer med hjälp av matematiska modeller. Detta förutsätter dock att mätningar används som underlag för beräkningarna.

I så kallade öppna grundvattenmagasin saknas tätare, ytliga jordarter och då motsvarar den uppmätta vattennivån i röret ofta den fria grundvattenytan på platsen. I så kallade slutna magasin finns det tätare jordarter ovanpå grundvattenmagasinet och då saknas ofta en fri grundvattenyta i magasinet, men den uppmätta vattennivån i röret representerar ändå grundvattentrycket på platsen. Det är möjligt för trycket i ett slutet magasin att vara högre än markytan, detta kallas för artesiskt grundvatten. När berghällar sticker upp ur jordtäcket kan vatten finna sin väg utmed

berg-jord-kontakten ner under lager med lera, och skapa förutsättningar för att bygga upp artesiskt grundvattentryck (ex. Torrance 2012). De grundvattenrörelser som skapas av detta är effektiva för att laka ut salter från leran.

Grundvattennivåer mäts i meter i relation till markytan och kan variera stort inom relativt korta avstånd. Exempelvis kan den vara bara någon decimeter under markytan på en plats, medan den kan vara flera meter under markytan på en annan plats i närområdet. Det är många faktorer som avgör hur långt under markytan som grundvattennivån återfinns, till exempel jordarter, topografi, nederbörd, temperatur, växtlighet eller lokal mänsklig påverkan. Det är därför mycket svårt att utifrån uppmätta grundvattennivåer förutsäga hur långt under markytan grundvattennivån återfinns på en specifik plats om det inte finns mätningar i en omedelbar närhet.

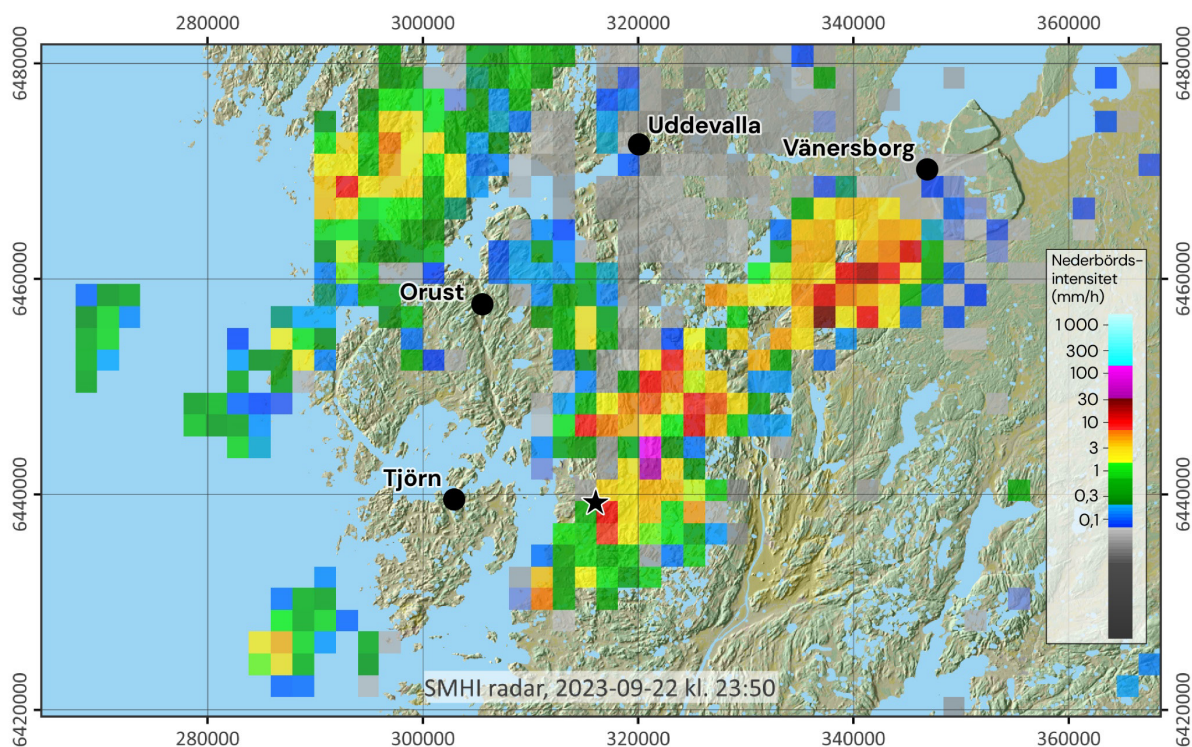
De största sammanhängande grundvattenhöjningarna sker vanligtvis vid kraftig höstnederbörd, då grundvattennivån går från en låg utgångsnivå. Nästan hela årsamplituden kan då uppnås inom en månad. Snabba, men mindre omfattande, förändringar kan även ske vid snösmältning. Sjunkningsförloppen är generellt långsammare. När den omättade zonen i öppna och slutna magasin når fältkapacitet, det vill säga att ytterligare nederbörd leder till omedelbar perkolation, kan grundvattennivån eller -trycket stiga mycket snabbt. De flesta större skred i Sverige, fram till och med 1950, har inträffat under perioder av kraftig nederbörd eller snösmältning, då portrycket i och under leran ökat kraftigt (Wenner 1951).

Nederbörd och avrinning

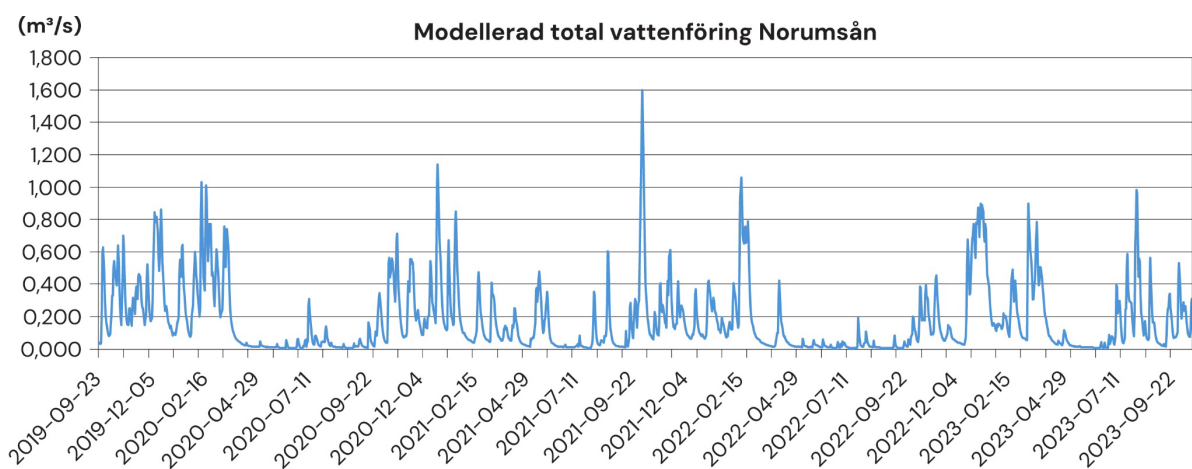
Olika ingrepp i naturen kring skredområdet i Stenungsund har under relativt kort tid påverkat nederbördens avrinning, exempelvis avverkning, schaktning, fyllning, med mera.

Enligt vittnen regnade det kraftigt vid tidpunkten för skredet. Detta bekräftas även från en övervakningsfilm. Tillsammans med mörkret gjorde detta att sikten var extremt dålig (SHK 2025). De närmaste av SMHI:s aktiva väderstationer vid tidpunkten är Kungälv, Tjörn, Orust, och Vänersborg. Utifrån analyserade radarbilder (fig. 8) bedöms stationen på Tjörn (Rörastrand, st.nr, 81040) vara den mest representativa av mätstationerna för tidpunkten. Data visar att det föll knappt 90 mm under september, fram till skredet. Under juni till och med augusti är det kumulativa värdet av nederbörden från stationen på Tjörn 334 mm. Summan av 21 till 23 september är 23 mm. SMHI:s definition av skyfall är att det faller 50 mm på en timme eller 1 mm på en minut.

Det är sannolikt, baserat på vittnesmål och radarbilder, att det regnade mer vid skredområdet den aktuella kvällen/natten än vad som stationen på Tjörn visar. Enligt en meteorolog på SMHI föll det sannolikt mellan 10 och 15 mm lokalt kring midnatt och det bedöms som kraftigt under cirka 1 till 2 timmar (Moran 2023). Vi tolkar radarbilderna från SMHI som att det lokalt kan ha förekommit skyfall (fig. 8), men om detta rörde sig exakt över skredområdet går inte att fastställa.



Figur 8. Radarbild som visar nederbörd över området vid midnatt före skredet (SMHI 2024). Radarbilderna indikerar att det lokalt kan ha förekommit skyfall (> 50 mm/h) mellan 22:00 och midnatt. SMHI:s aktiva väderstationer representeras av svarta punkter och skredområdet av svart stjärna. Terrängskuggning: Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+, ©Lantmäteriet.



Figur 9. Total vattenföring för Norumsån under fyra år (VISS 2024). Flödet varierar och är tydligt korrelerat till årstiderna. Det ökade flödet vid och efter skredet visar inga onormala värden.

Genom att titta på vattenföringen i Norumsån kan en grov uppfattning av nederbörden lokalt bildas. På tjänsten Vatteninformationssystem Sverige (VISS 2024) finns modellerad total vattenföring tillgänglig för Norumsån. I figur 9 presenteras ett utdrag över data från 2019-09-23 fram till 2023-10-01, detta visar inga anmärkningsvärda vattenflöden under tiden i slutet av tidsserien.

Vegetation

Djupa rotsystem stabiliserar jordsluttningar, och träd med pårotssystem kan begränsa omfattande rörelser. Ett tjockt vegetationsskikt minskar ytavrinning och möjliggör en mer jämn infiltration av nederbörd.

Koncentrerad erosion genom bildning av spår och fåror uppstår när ett område exponeras genom schaktning eller när vegetation försvinner.

Geologiskt kartunderlag

Detaljerad jordartskartläggning (SGU-metod A), där Stenungsundsområdet inkluderas, genomfördes mellan 1978 och 1981 (fig. 10C). År 2015 uppgraderades kartan med stöd av topografiska LiDAR-bilder och ett urval fältkontroller (se fig. 4). SGU:s Jordartskarta ligger till grund för alla kartunderlag som tagits fram för att bedöma markstabilitet nedan.

'Förutsättningar för skred i finkornig jordart' (SGU 2024c) publicerades 2015 och bygger på en beräkningsalgoritm (Tryggvason 2014) som utifrån jordartstyp (enligt SGU:s produkt Jordarter 1:25 000–1:100 000), terrängmodell (Lantmäteriets nationella höjdmodell) och kritisk lutning (1:10) definierar markområden med finkornig jordart som har förutsättningar för jordskred. Modellen varierar i kvalitet, framför allt beroende av jordartskartans kvalitet, men i skredområdet vid Stenungsund går det att fastslå att underlaget överensstämde med verkligheten (fig. 10A).

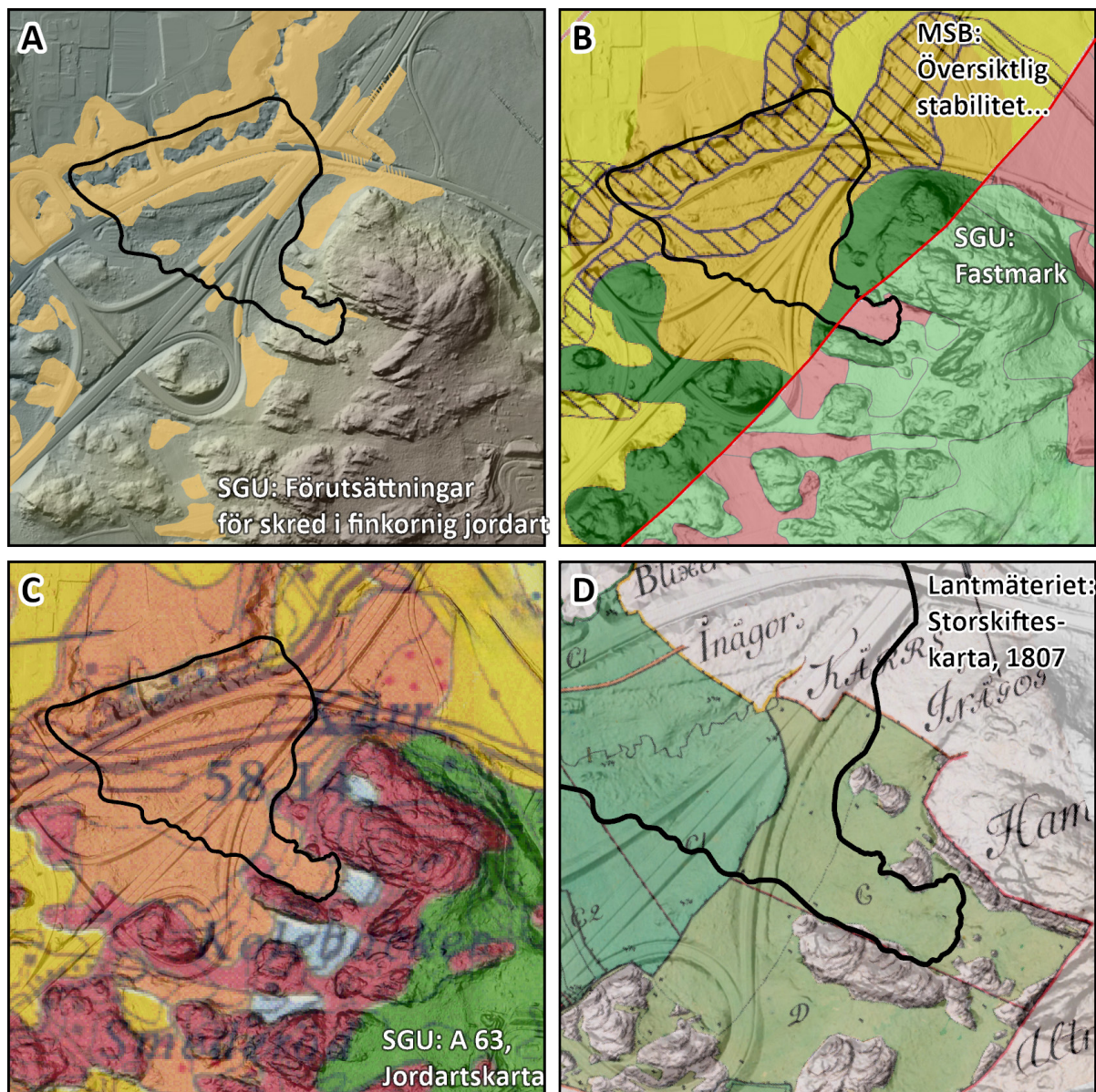
'Fastmark' (fig. 10B) är framtagen genom en omklassning av grundlagret i datamängden Jordarter 1:25 000–1:100 000 till tre stabilitetsklasser: fastmark, ej fastmark och ej bedömd mark. Till klassen fastmark räknas områden med berg, morän, isälvsediment, grus, blockjord och liknande. Till klassen ej fastmark räknas områden med silt, lera, torv, gytta, postglacial sand och andra avlagringar som i många fall underlagras av silt, lera eller fyllning. Hänsyn har inte tagits till marklutning och fuktighetsförhållanden. (SGU 2024d).

Schoning (2016) visar en riksöversikt av var i Sverige det finns geologiska förutsättningar för saltvattenavsatta leror och därmed ökad sannolikhet för kvicklera (fig. 11A).

'Riksöversikt över finkorniga jordars skredbenägenhet' publicerades 2015 och baseras på Jordarter 1:1 miljon, och är följaktligen till för att få en allmän uppfattning om i vilka områden i Sverige det finns större orsak till aktsamhet än andra (fig. 11B; SGU 2024e).

Dataprodukten 'Jordskred och raviner' (SGU 2024f) visar spår som bildats i terrängen efter inträffade jordskred, samt raviner i lösa jordlager. Majoriteten av dessa är förhistoriska och vi vet inte när de inträffade, de spänner under hela tidsperioden efter deglaciationen. Denna information ger en indikation över skredbenägna områden.

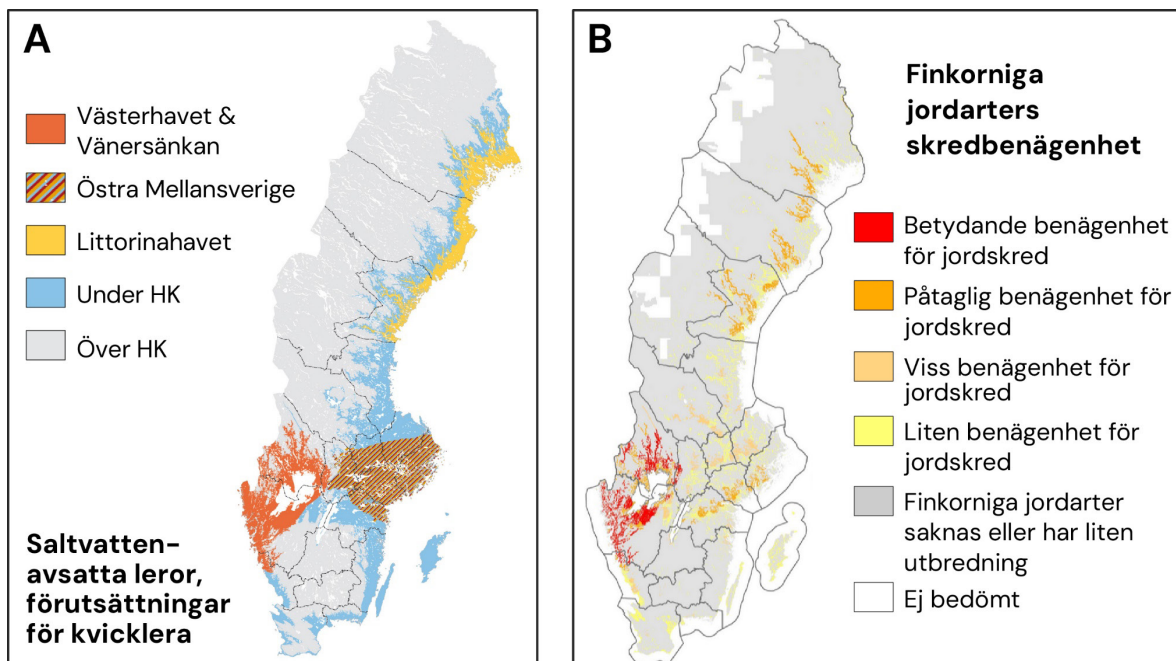
Vägledningen 'Kartunderlag om ras, skred och erosion' samlar information från svenska myndigheter och Statens geotekniska institut leder samordningen (SGI 2024). I vägledningen har myndigheterna samordnat informationen i sina underlag och beskrivit hur de kan användas. Underlagen består av rapporter, kartor och GIS-data, vilka är sammankopplade i en kartvisningstjänst.



Figur 10. Förutsättningar för skred i finkornig jordart **(A)** är en modell, baserad på jordartskartan, lutning, med mera. Orange markerade ytor är områden med identifierad aktsamhet. Det finns ingen skredrisk noterat, utifrån geologisk kunskap, i de östra delarna av marklovsområdet för Hammar företagspark. **(B)** MSB:s översiktliga stabilitetskartering (utförd på av Ramböll), fokuserar på tätbebyggt område och vattendrag. Därför tar kartan från MSB slut, utmed den röda linjen **(B)**. På andra sidan av linjen visas SGU:s karta 'Fastmark' **(B)**. I båda figurhalvorna representerar grön färg fastmark, eller mark utan förutsättningar för markrörelser. SGU:s jordartskarta (Fredén 1987), som Ramböll använde som underlag vid den översiktliga stabilitetskarteringen **(C)**. Storskifteskartan från 1807 (Lantmäteriet, Historiska kartor) har en imponerande detaljrikedom och geometrisk korrekthet **(D)**. Terrängskuggning: Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+, ©Lantmäteriet.

I 'Kartunderlag om ras, skred och erosion' finns de flesta av SGU:s nämnda datamängder. Vidare tillhandahålls SGI:s skredriskkarteringar utmed prioriterade vattendrag (SGI 2019) och deras sammanställning, 'Inträffade skred, ras och övriga jordrörelser' (SGI 2021).

Även Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) tillhandahåller sina kartunderlag, 'Översiktlig stabilitetskartering'. I Stenungsund är kartläggningen gjord 1993 av Scandiaconsult (Scandiaconsult 1993), som 2003 inleddes i Ramböll, vilka utförde en uppgradering av



Figur 11. SGU:s riksöversikter syftar till att få en allmän förståelse för vilka områden i Sverige som har större sannolikhet för utvalda förhållanden. Där vattnet hade en viss salthalt när leran avsattes (**A**), är också områden där kvicklera kan bildas. Störst sannolikhet råder i forna Västerhavet och Vänersänkan. Mälardalen har upplevt perioder av brackvatten efter den senaste istiden, likaså områden i norra Sverige. Det blåmarkerade området ligger under HK, men bedöms inte ha saltvattenavsatta leror. Modellen Finkorniga jordars skredbenägenhet (**B**), visar den generella fördelningen av skredrisk i landet.

kartläggningen 2014 (Kristensson 2014). Denna, senaste kartläggning redovisar att skredslänten, upp till kartområdets gräns, ”saknar förutsättningar för skred eller ras eftersom lös jord inte förekommer inom zonen” (fig. 10B). Detta stöds inte av den då aktuella jordartskartan, Ae 63, som användes som underlag vid kartläggningen (fig. 10C).

I ovan nämnda karttjänst, har Skogsstyrelsen kartunderlag för ’Områden där skogsbruk och exploatering kan orsaka erosion, ras och slamströmmar’ (Lundström m.fl. 2016). Detta underlag har inte något markerat riskområde inom skredområdet.

Historiska kartor från Lantmäteriet är en användbar källa till information när landskapets utveckling ska utredas. I denna studie har Ekonomiska kartan från 1936 och Storskifteskartan från 1807 används. Detaljrikedomen och den relativa geometriska noggrannheten i storskifteskartan är slående (fig. 10D).

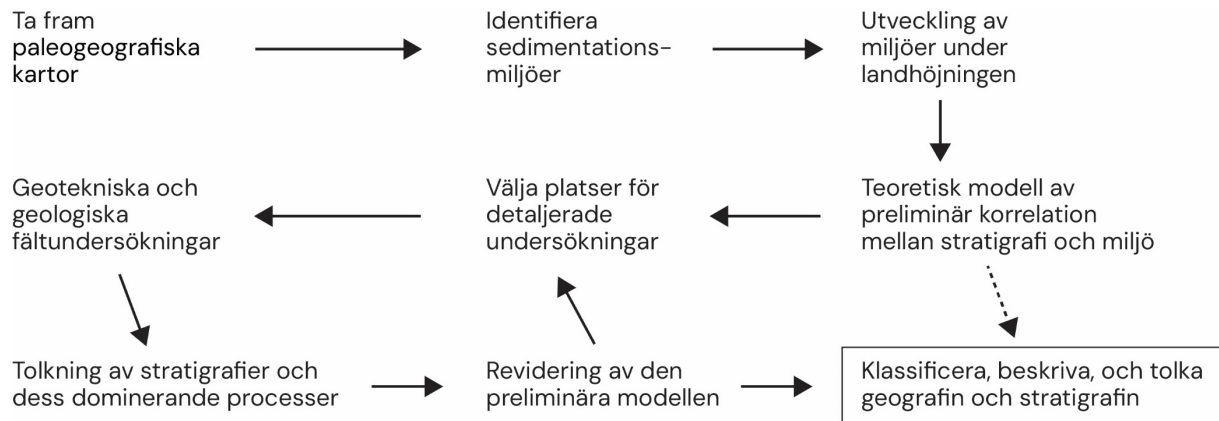
SGI:s geotekniska utredning inför byggandet av E6 innehåller kartor och illustrationer som beskriver dalgången väl (Lindmark & Norder 1987). Delar av dessa utgör viktig information vid tolkning av vissa företeelser vid skredområdet och redovisas i Resultat-avsnittet. I utredningsrapporten lyder det geotekniska bedömningen gällande Ucklumsvägen (väg 664), utmed Norumsån:

Vägen kommer till stor del att ligga parallellt med Norumsån. De befintliga åslänterna har i allmänhet otillräcklig säkerhet mot utglidning.

Vägens profil- och planläge har inpassats i terrängen utifrån kravet att godtagbar stabilitet, lägst 1,5, skall erhållas för såväl partiet mellan vägen och ån som lokalt för vägens skärning. Samma krav har även ställts beträffande totalstabiliteten ned mot ån för de högre belägna markområdena till höger om vägen. Med redovisat läge av väg 664 uppfylles de ställda kraven. Härvid gäller dock att markområdena till höger om vägen i allmänhet ej får uppfyllas eller belastas av större nyttolaster i närheten av vägen för verksamheter måste därför planeras i samråd med geotekniker.

Metod

Generellt har undersökningens disposition varit att använda: fjärranalys för att identifiera intressanta aspekter, fältarbete för att samla in nya data, analys av nya och ärvda data, och sist sammanställning (fig. 12). Arbetet är iterativt; ny data genererar nya frågor, som ofta kräver ny data för att få svar på.



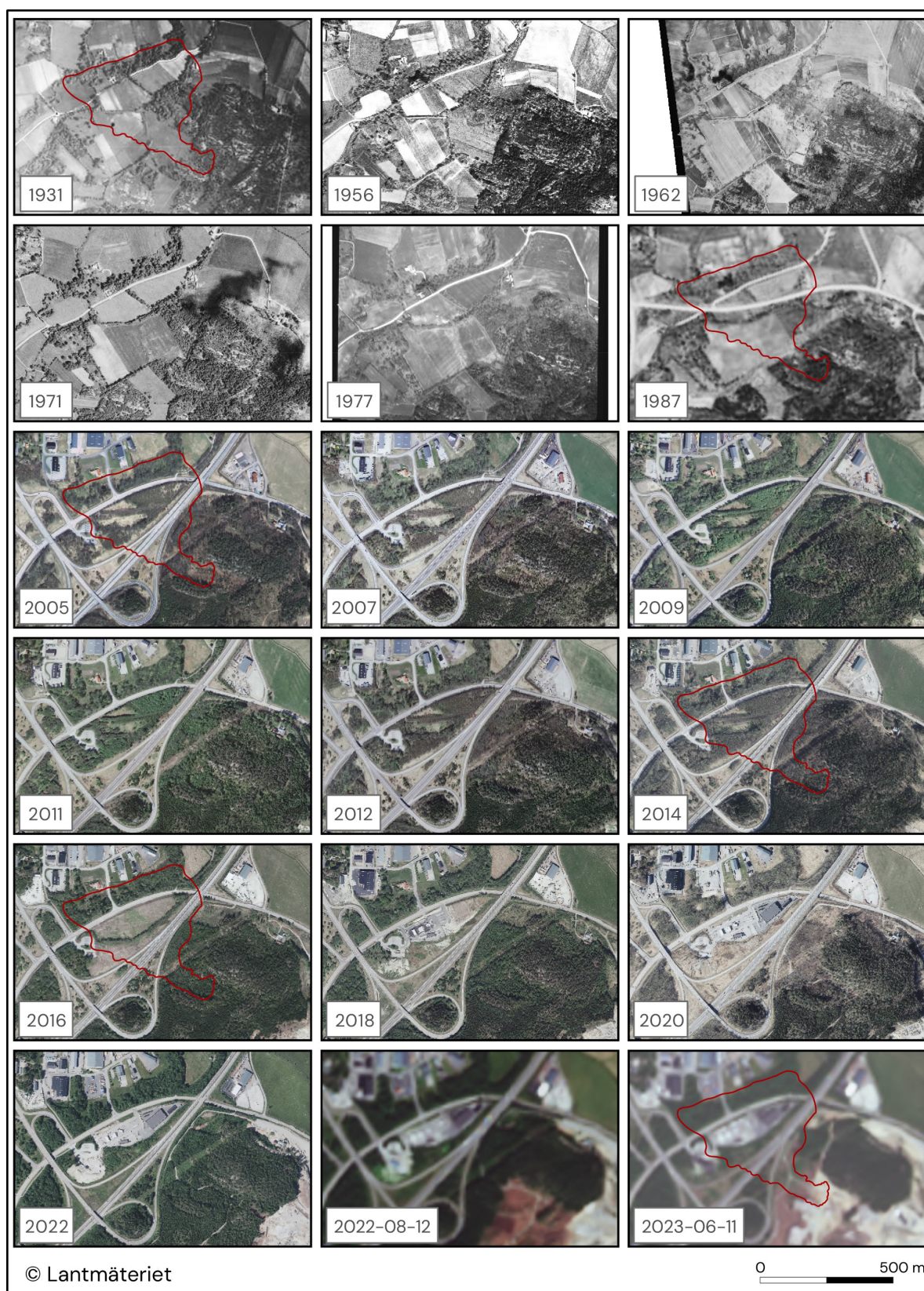
Figur 12. Flödesschemat visar det generella arbetsupplägget under utredningen. Inspirerat av Stevens m.fl. (1984) och anpassat för att utreda ett specifikt skred.

Fjärranalys

Data och material

Ovanligt mycket data finns tillgängligt för att analysera skredets utbredning, djup, volymer, kinematik etcetera.

LiDAR-data finns tillgängligt för att utforska skredområdet före de senaste årens exploatering, under exploateringen, och efter skredet. Det finns även flera flygfotografier, från 1931 till 2024 (fig. 13). Historiska kartor från Lantmäteriet, samt bygghandlingarna då E6 anlades (Lindmark & Norder 1987). E6 förbi Munkeröd invigdes 1991.



Figur 13. Foton visar hur området har utvecklats från 1931, fram till skredet, och efteråt. De svart-vita fotona är flygbilder, de två senaste fotona före skredet är från satellit (Sentinel 2; modifierad Copernicus Sentinel data), och resten ortofoton. I ett foto per rad är skredområdet markerat med en röd polygon. Alla foton har tillhandahållits av Lantmäteriet.

Flertalet digitala terrängmodeller (DTM) har använts vid analys (fig. 14). Lantmäteriets LiDAR-data finns dels i processad version med 1 m upplösning (Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+), dels i form av punktmoln uppdelat i två dataset. Det ena datasetet (som ligger till grund till 'grid 1+') samlades in mellan 2009 och 2019 (2011 i Stenungsund), medan det andra började samlas in 2018 och pågår fortfarande. Det senare benämns 'Laserdata Nedladdning, skog' och över Stenungsundsområdet samlades denna in år 2021. Vi tagit del av resultat från mätningar med drönarburen LiDAR som utförts efter skredet av Sweco Sverige AB (23-09-30 och 23-10-10), SweScan AB (23-11-06), SweDron Sverige AB (23-10-26) och Länsstyrelsen (2023-10-05).

Ytterligare information om markytans förändring kan fås ur digitala ytmodeller (DSM; Digital Surface Model). Lantmäteriet tillhandahåller DSM:er skapade från deras ortorektifierade foton sedan 2006. Figur 14 presenterar de flesta av de terrängmodeller som använts i denna studie.

All geografiska data har processats och presenteras med koordinatsystemet SWEREF99 TM. Den absoluta majoriteten av arbetet har utförts med ESRI ArcGIS Pro 3.4. Dock har även QGIS, med GRASS- och GDAL-tillägg, använts vid exempelvis klippning av data. SAGA GIS användes till de hydrologiska analyserna.

Med hjälp av fotografier innehållande geografiska metadata kan modeller av terrängen skapas. I denna studie användes mjukvaran ShapeMetriX 3D (3GSM GmbH, Austria).

Terränganalys

Raster med en upplösning av 0,1 m skapades från markpunkterna ur punktmolnet Laserdata Nedladdning, skog, vilket representerar skredområdet år 2021. I denna höjdmodell har viss exploatering väster om E6 skett, dock är ej de pågående arbetena med: Rusta-/Jem & fix-marken i väst och företagsparken i öst. LiDAR-bilder finns även från 2011, Laserdata Nedladdning, NH. Till analyserna efter skredet användes primärt den flygning som utfördes av Swescan 2023-11-06, vilken skalades ner från 0,05 till 0,1 m upplösning. Vid denna tidpunkt hade endast mindre arbeten efter skredet påbörjats (geotekniska undersökningar), som ej påverkade terrängen generellt. På de ställen som förändringarna är märkbara, exempelvis arbetsväg över den stora sprickbildningen i södra delen av området, har i stället LiDAR-bilder från 2023-09-30 och 2023-10-10 (utförda av Sweco) använts.

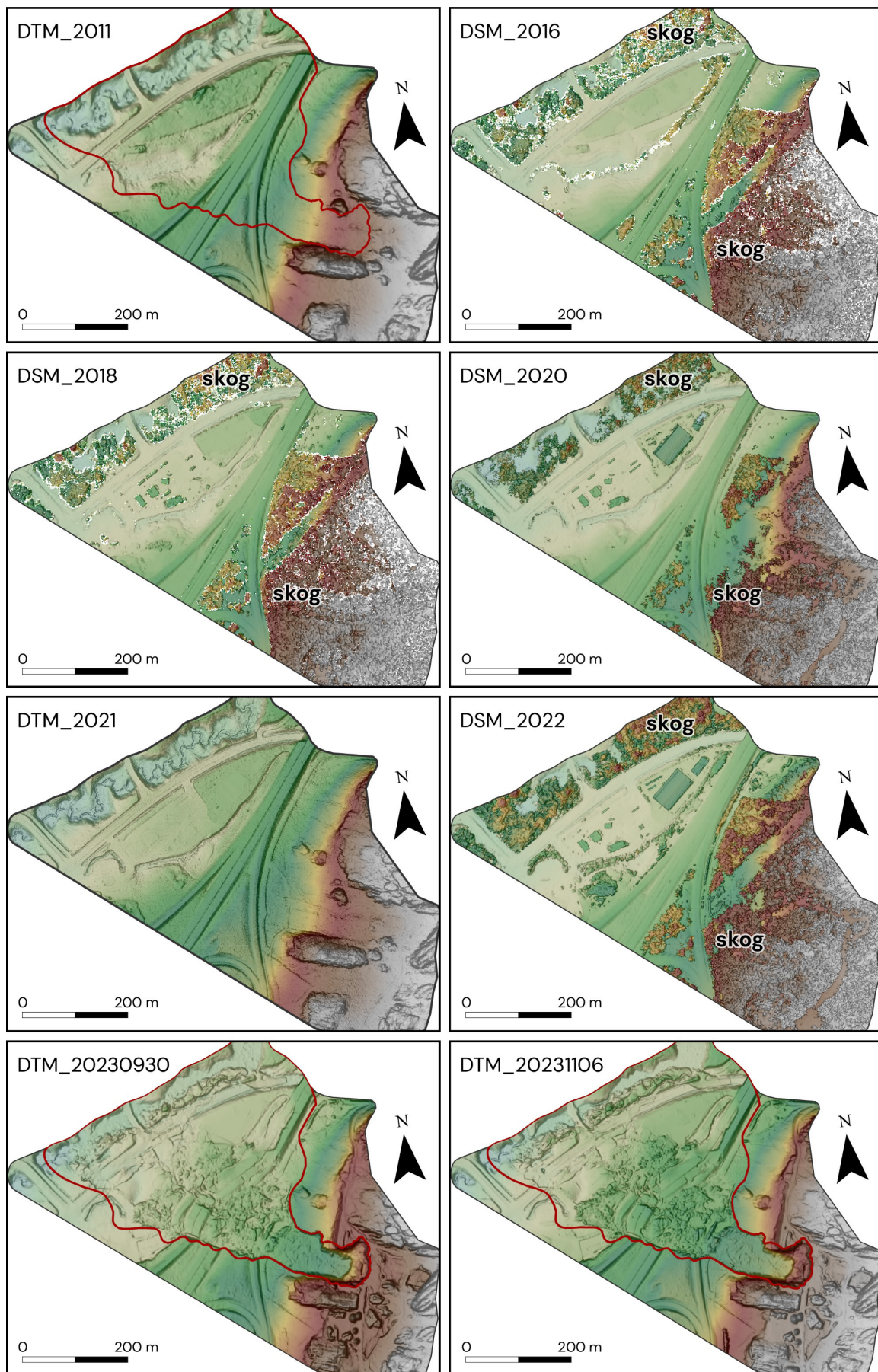
Geomorfologi

Det regionala landskapets landformer tolkades manuellt med Markhöjdmodell Nedladdning, grid 1+ och ortofoton som bas, samt geologiska data från SGU:s databaser (jord, berg, grundvatten, geofysik). Genom att tolka landformer, så som ändmoräner och isälvsavlagringar, kan landskapets utveckling och markbeskaffenhet bedömas. Geologin kring marint bildade israndzoner är särskilt intressant även i skredrisksammanhang, då det ofta skapas gynnsamma förhållanden för skiktad eller varierande stratigrafi med inblandning av mer grovkorniga jordar än lera och silt (ex. Persson 2014).

Differensanalys

För att jämföra markytan mellan olika tillfällen har följande underlag använts: tre LiDAR-baserade DTM:er (2011, 2021, 2023-11-06), fyra DSM:er från Lantmäteriet (2016, 2018, 2020, 2022), och en i denna studie skapad DTM som representerar landskapet 2023-09-20.

Verktyget 'Minus' i ArcGIS 'Spatial Analyst Toolbox' användes för att jämföra elevationsdifferensen mellan två olika höjdmodeller åt gången.



Figur 14. Högupplösta höjdmodeller från olika tidpunkter tillåter grundliga analyser av markytans förändringar.

Geometrier

Mätningar av geometrier har utförts på olika kartunderlag med verktyget 'Measure' i ArcGIS 3.1. För beräkning av volymer användes verktyget 'CutFill' i '3D Analyst Toolbox'.

Kinematisk analys

Genom att jämföra bildmaterial från före och efter skredet kan ledtrådar utläsas om hur marken rörde sig under skredet. Det går att identifiera objekt i fotografierna, vilket gör att avståndet dessa har förflyttats går att mäta. Markytan efter skredet kan också visa hur olika ytor eller objekt rörde sig i förhållande till varandra. Strukturer, exempelvis formen på sprickbildningar och anhopningar av material, ger ytterligare information om markens rörelser.

Markytan kartlades med hjälp av alla av Lantmäteriet tillhandahållna, ortorektifierade-foton och LiDAR-baserade-höjdmodeller, samt Google StreetView i ArcGIS 3.1. Dessa underlag jämfördes i sin tur med fotografier, fotogrammetriska ortofoton, och höjdmodeller, tagna efter skredet.

Hydrogeologi

SGU har sedan slutet av 1960-talet mätt grundvattennivåer på många platser i Sverige. Sedan 2020 beräknar också SGU den relativa förändringen av grundvattennivån för områden där mätningar inte sker. För ytterligare information om hur det görs hänvisas till (Hjerne m.fl. 2024).

På den aktuella platsen pågick det, enligt befintlig information, inga grundvattennivåmätningar vid tiden före skredet. Det är därmed inte möjligt att fastslå hur grundvattentrycket var på platsen vid det aktuella tillfället. Även om SGU:s grundvattennivåmätningar inte kan användas direkt för att bedöma den faktiska grundvattennivån på platsen för skredet kan de användas för att bedöma den relativa förändringen av grundvattennivån, det vill säga om den till exempel varit ovanligt hög eller förändrats snabbt vid det aktuella tillfället. Den allra största delen av SGU:s mätningar sker vid platser som inte är lokalt påverkade av mänsklig aktivitet, som pumpning, dränering eller förändrade markförhållanden. Slutsatser från SGU:s grundvattennivåmätningar gäller därför som regel endast opåverkad mark.

SGU har grundvattennivåstationer på olika platser i Bohuslän som skulle kunna analyseras och användas som underlag för bedömning av förändring av grundvattenförhållanden i opåverkad mark för den aktuella platsen. Dock är dessa inte i närheten av platsen för skredet varför de stationerna kan ha påverkats av andra väderförhållanden. I stället använder SGU beräknade nivåer för så kallade små magasin baserade på SMHI:s beräknade väderdata för den aktuella platsen. SGU:s beräknade nivåer för små magasin bedöms representera en generaliserad morän i permanent inströmningsområde i opåverkat område. De beräknade nivåerna presenteras i termer av *fyllnadsgrad*. Det är en enhetslös representation av grundvattennivåer och noll indikerar att grundvattennivån är lika låg som den lägsta nivån och 100 att den är lika med den högsta nivån för den aktuella platsen sedan 1961, oavsett årstid. För att beräkna fyllnadsgrad används kumulativ relativ frekvens, vilket innebär att grundvattennivåerna normeras för den specifika platsen. Normeringen görs så att det blir en likformig sannolikhetsfördelning, även kallad rektangulär fördelning, från 0 till 100. I praktiken visar detta hur många procent av observationerna som ligger under värdet i fråga. Till exempel innebär det att 10 procent av observationerna är lägre än fyllnadsgrad 10. Följaktligen är 90 procent av observationerna högre än fyllnadsgrad 10. Den beräknade fyllnadsgraden finns att ladda ner från SGU:s webbplats; vid Stenungsund gäller område nr 42111 (SGU 2024g).

Hydrologi

SAGA GIS hydrologiverktygslåda (SinkRemoval, FlowAccumulation) användes för att ur de olika höjdmodellerna modellera ytvattenflödet, och hur detta har förändrats med de förändringar som områdets markyta genomgått. Vid beräkning av flödesackumulation valdes metoden 'MultipleFlowDirection' (Freeman 1991, Quinn m.fl. 1991)

InSAR

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) är en teknik för att kartlägga markdeformationer med hjälp av radarbilder av jordens yta som samlas in från satelliter i omloppsbana. InSAR kan upptäcka små skillnader när markytan rör sig – oavsett om det är uppåt, nedåt eller i sidled.

Copernicus markövervakningstjänst (eng. *Ground Monitoring Service*) är en del av Europeiska unionens rymdprogram (eng. *EU:s Space Programme*) och tillhandahåller geografisk information om markanvändning och dess förändringar, markanvändning, markrörelser, vegetationsstatus, vattencykeln och energivariabler på jordens yta ("European Ground Motion Service"). InSAR-data samlas in med tvillingsatelliterna Sentinel-1A och -1B, vilka ger täckning över stora områden och en kort återbesöksperiod på sex dagar över Europa. Den första satelliten lanserades 2014 och den andra 2016. I kombination med regionala data från Radarsat-2, som i delar av Skandinavien överlappar omloppsbana för Sentinel-1A-1B, registreras data än oftare (upp till tre gånger i veckan i norra Skandinavien) (NGU 2024).

Norges geologiska undersökning (NGU) tillhandahåller InSAR i Norge. Efter skredet 23 september 2023, kontaktades SGU av NGU med senaste data över skredområdet. Denna spände då från hösten 2014 till sommaren 2023. Sedan dess har nya data publicerats och tillsammans med Copernicus markövervakningstjänst har vi analyserat data fram till och med oktober 2023.

Seismisk aktivitet

Efter skredet kontaktades det svenska nationella seismiska nätet (SNSN), för att undersöka om nätet hade detekterat några seismiska rörelser i området. SNSN driver 67 seismiska mätstationer i Sverige, från Veberöd i söder till norr om Torneträsk. Stationerna närmast Stenungsund finns i närheten av Strömstad, norr om Uddevalla, utanför Borås, i Onsala samt på Tjörn. Den senare mätstationen är belägen cirka 15 km från skredområdet.

Jordbävningar och sprängningar är hastiga processer med krafter som direkt påverkar bergmassan på platsen där de sker, vilket genererar seismiska vågor som SNSN registrerar. Även ras i berg kan producera stora mängder seismisk energi. Skred i jord har däremot ofta ett långsammare förlopp och är inte alltid väl förankrade i fast berg, beroende på var i lagerföljden rörelsen sker, om stenblock är inblandade och hur skredet inleds och avslutas. Vid jordskred produceras därför ofta mindre energi som strålar ut som seismiska vågor (Hibert m.fl. 2017, Yfantis m.fl. 2020). Vågformerna liknar i allmänhet inte de som skapas av jordskalv eller sprängningar. Dessutom är våglängden på de utstrålade vågorna ofta större än för jordskalv med motsvarande energinivå, och frekvensområdet är ofta mer begränsat.

Jordlagerföljder

Geotekniska data från området är riklig och innehåller undersökningar från projektering av: E6 (1980-tal), Preem, Burger King, Byggmax, Aqualine Pipesystems, Lastbilstvätt, Hammar företagspark, Rusta, Jem & fix. Efter skredet har ytterligare ett stort antal geotekniska borrhningar utförts för arbetet med återuppbyggandet av E6, Ucklumsvägen, samt för denna utredning. De geotekniska undersökningarna har Trafikverket låtit sammanställa i en markundersökningsrapport (Berling 2024). Dessutom har vi haft tillgång till området under arbetets fortskridande vilket gett värdefull information om ej tidigare undersökta områden (se nästa avsnitt).

Fältarbete

Under hösten 2023 pågick flera schaktarbeten för att avlasta och säkra det östra området mot fler skred. Under detta arbete blottades stratigrafin av fyllnadsmassor och de övre metrarna av de ursprungliga jordlagren. Detta undersöktes, dokumenterades, och jordprover samlades in för vidare analyser; kornstorlek, geokemi, mineralogi, datering. Västra området med Preem-stationen och Norumsån i fokus dokumenterades under arbetets gång med fotografier, anteckningar och jordprover.

Undersökningen av berggrunden i skredområdet genomfördes vid två tillfällen, dels en kort rekognosering i området den 10 oktober dels en heldags kartläggning den 13 oktober 2024. Den geologiska kartläggningen kompletterades med mätningar av halterna av kalium, uran och torium med en gammaspektrometer på nio platser i skredområdet. Syftet med dessa var att undersöka variationerna i kaliumhalten i den granodioritiska till tonalitiska gnejsen. Detta ger information om mängden kalifältspat och glimmer i bergarten samt eventuell variation i berggrundens sammansättning. Ett representativt bergprov samlades in och preparerades för mikroskopanalys av mineralsammansättning.

Laborationsanalyser av prover

En stor mängd jordprover har samlats in under utredningen. Av SGU:s insamlade prover har cirka 50 bedömts relevanta nog att bokföra. Omfattande geotekniska borrhningar i samband med återuppbyggnaden av E6 har genererat sedimentprover genom framför allt skruvprovtagning och kolvprovtagning. När de olika geotekniska konsulterna låtit utföra de analyser som erfordrades, fick SGU ta del av resterande jordprover. Proverna har besiktats okulärt och tillsammans med geografisk position, samt djup så prioriterades ett antal prover för vidare analyser. Utvalda prover delades, paketerades i påsar, och skickades till det kommersiella laboratoriet ALS Scandinavia.

Syftet med jordproverna var att testa om det finns trender i de olika parametrarna som korrelerar med stratigrafin, ge information om eventuellt störda zoner, samt ge en mer komplett geologisk förståelse.

Kornstorlek

Kornstorleksvariationer i stratigrafiska profiler inverkar på olika processer, till exempel grundvattentransport och portryck. Kornstorlek och geokemiska egenskaper korrelerar ofta på grund av bland annat reaktionsytor. Kornstorleksfördelningen av finsediment mättes genom sedimentationsanalys med hydrometer-metoden. Detta utfördes av ALS Scandinavia AB, Aurorum 10 Luleå Sverige 977 75 (Ackrediterad av: SWEDAC, ackrediteringsnummer: 2030, ISO/IEC 17025).

Geokemi

Kalkhalten i lerprov bestämdes med Passons apparat. Organisk halt mättes genom glödningsförlust vid 950 °C, vilket ger ett grovt mått på jordens organiska halt. Förutom det organiska materialet bidrar förlusten av kristallvatten från lermineral (1–1,5 %) till den totala glödningsförlusten. Totalhalter av 32 grundämnen mättes med masspektrometer med induktivt kopplad plasma som jonkälla och magnetsektor för mätning av massa (ICP-SFMS) uppslutning med smälta/HNO₃, HCl och HF. Analyserna utfördes av ALS Scandinavia AB, Aurorum 10 Luleå Sverige 977 75 (Ackrediterad av: SWEDAC, ackrediteringsnummer: 2030, ISO/IEC 17025).

För att jämföra de geokemiska resultaten med referensdata, konverterades oxider från totalhalt-geokemi-resultaten med 'OxidesToElements' from Pangealoss Foundation (<http://www.marscigrp.org/oxtoel.html>). Motsatt beräkning (omräkning med molmassor) användes för att presentera de uppmätta värdena som oxider, vid uppskattningen av vittring.

Mineralogi

Den mineralogiska sammansättningen kan tillsammans med kornstorlek ge förklaringar till de geokemiska resultaten. Mineralidentifiering med röntgendiffraktometrisk analys (XRD) utfördes av Röntgenlabor Dr Ermrich, Am Kandelborn 7 Reinheim Tyskland 64354 (Ackrediterad av: DAkkS, ackrediteringsnummer: D-PL-18075-01-00ALS Scandinavia).

Mineralogin i proverna undersöktes med röntgendiffraktometer (theta-theta) med kopparstrålning ($\text{CuK}\alpha$). Proverna preparerades genom torkning och krossning. XRD av det krossade provmaterialet resulterar i diffraktometerdiagram som ger '2Theta-värden', vilket är vinkeln mellan den infallande och den diffrakterade strålen. Genom tillämpning av Braggs reflektionslag beräknas så kallade 'd-avstånd':

$$\text{Braggs reflektionslag: } n\lambda = 2d \sin \theta$$

Theta (θ) är infallsvinkeln för reflektionen eller hälften av vinkeln mellan den infallande och diffrakterade strålen, lamda (λ) är strålningens våglängd, och n är reflektionsordningen.

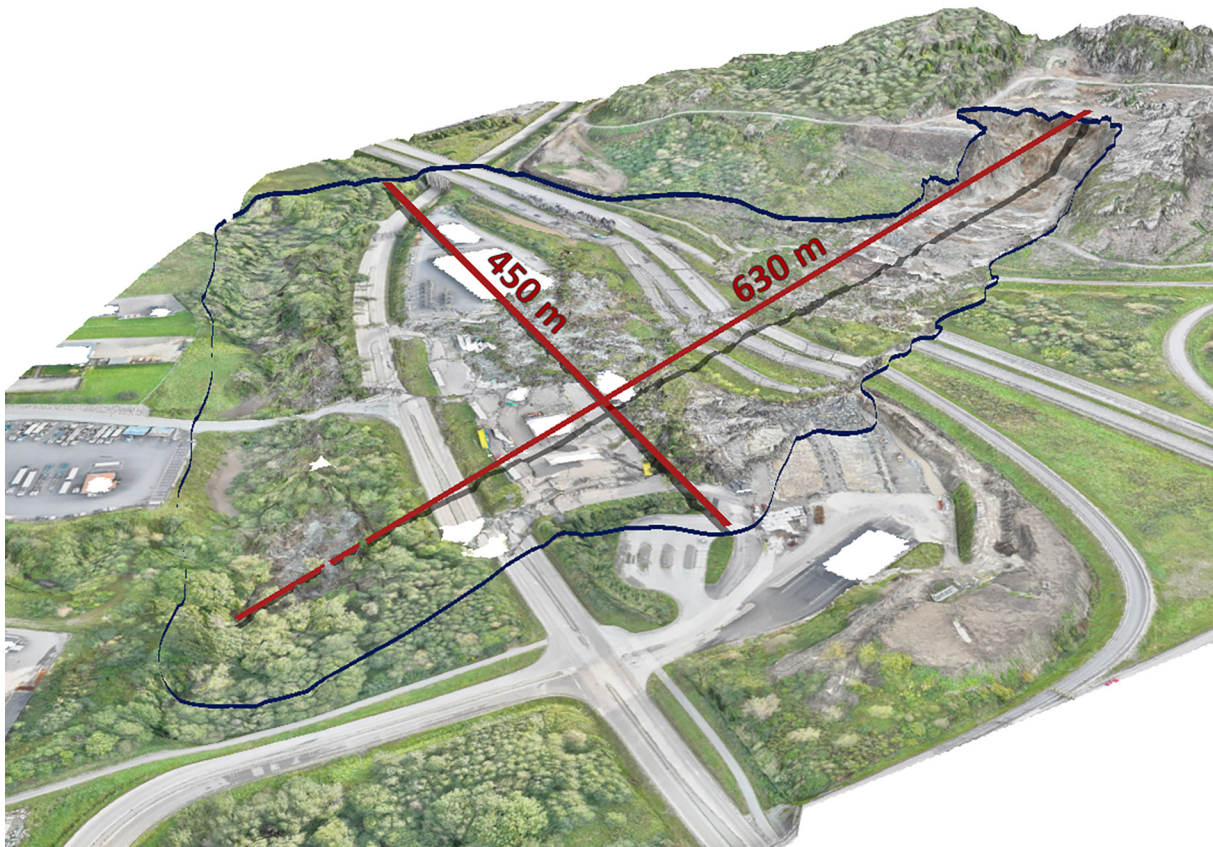
D-avståndet är en grundläggande egenskap hos kristallina material och anger avståndet mellan parallella atomplan i ett kristallgitter. Identifiering av lermineral har gjorts med hjälp av referenslista av 'd-avstånd' i Brown och Brindley (1980), samt från en studie av Snäll m.fl. (1979).

Datering

Att datera avlagringar är en nyckel till att förstå de geologiska processerna, som klimatförändringar, deglaciationsmönster, och sedimentationshastigheter. Skal tvättades ut från lerprover med hjälp av en sikt med maskor på 0,063 mm (gränsen mellan silt och finsand). Radiometrisk datering med kol-14-metoden (C14 -datering) på skal från blötdjur (Mollusca), primärt musslor (Bivalvia) och snäckor (Gastropoda), och havstulpaner (Balanoidea). Tandemlaboratoriet (tidigare Ångström) vid Uppsala universitet utförde C14 -dateringarna.

Tunnslip och mikroskopering

Mikroskopering av bergarter ger information om dess sammansättning, vilket potentiellt kan kopplas till lerans egenskaper, och korreleras med geokemin. Thin section lab i Toul, Frankrike preparerade tunnslipsämnen av ett representativt bergprov från skredområdet. Mineralogisk sammansättning bestämdes genom punkträkning av en 28 x 22 mm stor yta med ett Lecia DM RX polarisationsmikroskop. En räknare från Prior med ett kopplat stegbord från James Swift användes vid analysen. Vid analysen räknades 1 149 punkter. Opaka mineral (malmmineral) identifierades därefter i reflekterat ljus. Undersökt material har dokumenterats med makro- och mikrofoton.



Figur 15. 3D-LiDAR-bild efter skredet. Skredets utbredning är 630 m i längdriktningen och 450 m tvärs över, röda linjer. Ortofoto och terrängskuggning: LiDAR, Swescan (2023-11-06).

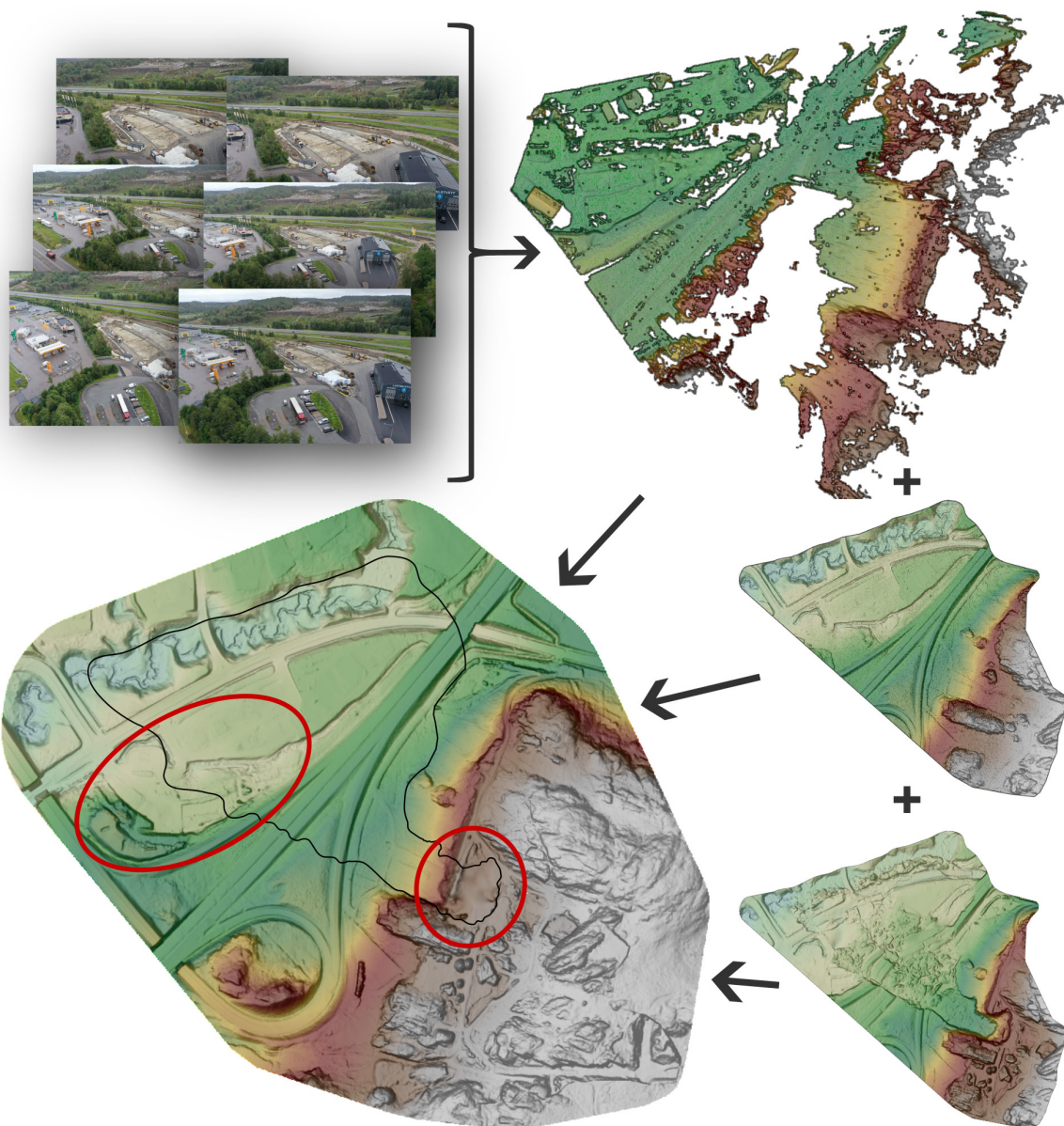
Resultat

Området som visar spår efter jordskredet mäter i ostsydost mot västnordvästlig riktning, från skredärrets bakkant till och med skredmassorna i Norumsån, 630 m och 450 m i sydväst–nordöstlig riktning (fig. 15), och inkluderar en yta av cirka 13 ha.

Landskapsförändringar i skredområdet

Höjdmodeller

Höjddata från ett flertal källor har använts för att visa och analysera markytans förändring före, under, och efter skredet. Med hjälp av drönarfotografier tagna 2023-09-20 av frilansjournalisten Mikael Berglund, var det möjligt att, med hjälp av programvaran ShapeMetriX 3D (3GSM GmbH, Austria), återskapa en modell av hur en stor del av området såg ut två dagar före skredet (fig. 16). Främre delen av fyllningen uppe i östra delen av skredet (vallen) och markytan vid Rustatomten kunde återskapas. Genom att passa in dessa med höjdmodellerna från före skredet med Lantmäteriets 2021-LiDAR innanför skredområdet, Swescans och Swecos LiDAR i en zon runt om så skapades en modell av områdets topografi som det såg ut två dagar före skredet (DTM_20230920; fig. 16).

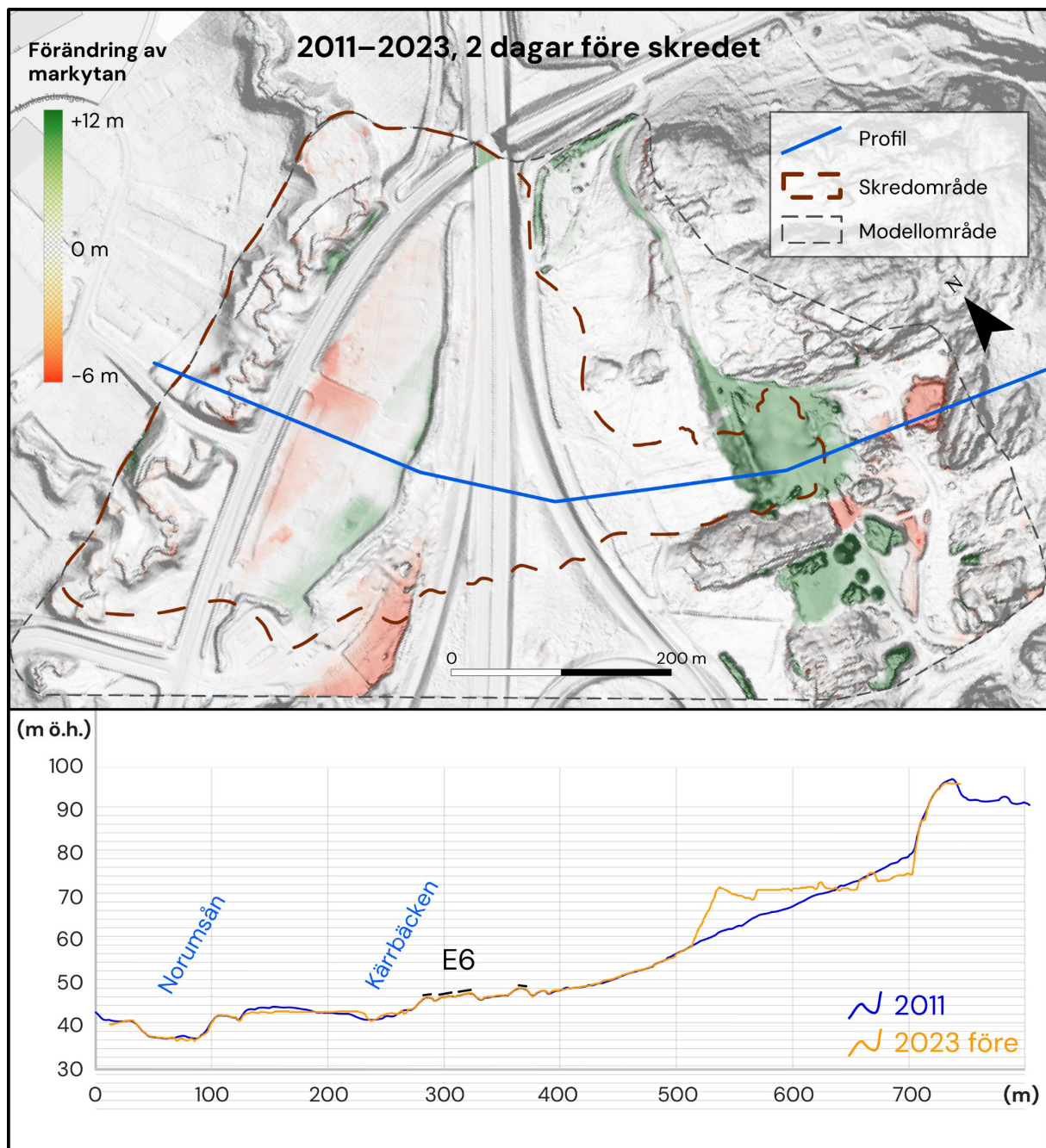


Figur 16. Modell av markytan två dagar före skredet (nere till vänster). Extraherad höjdinformation från fotografier skapade en fragmenterad höjdmodell (övre halvan av figuren; foto: M. Berglund). Genom att sammanfoga den skapade höjdmodellen från fotografier med Lantmäteriets höjdmodell från 2011 och ett par modeller (Swescan och Sweco) från drönarflygningar efter skredet, kunde en modell skapas, som representerar området 2023-09-20. Röda markeringar visar de pågående entreprenaderna som åter-skapats från fotografierna.

Differensanalys

Markytans förändring presenteras som skillnaden i meter mellan två olika höjdmodeller. För att åskådliggöra de senaste årens förändringar i skredområdet har jämförelser utförts mellan 2011, 2016, 2018, 2021, och 2023 före, respektive efter skredet. Läsaren uppmanas att jämföra tidpunkterna för analyserna nedan med fotografierna i figur 13.

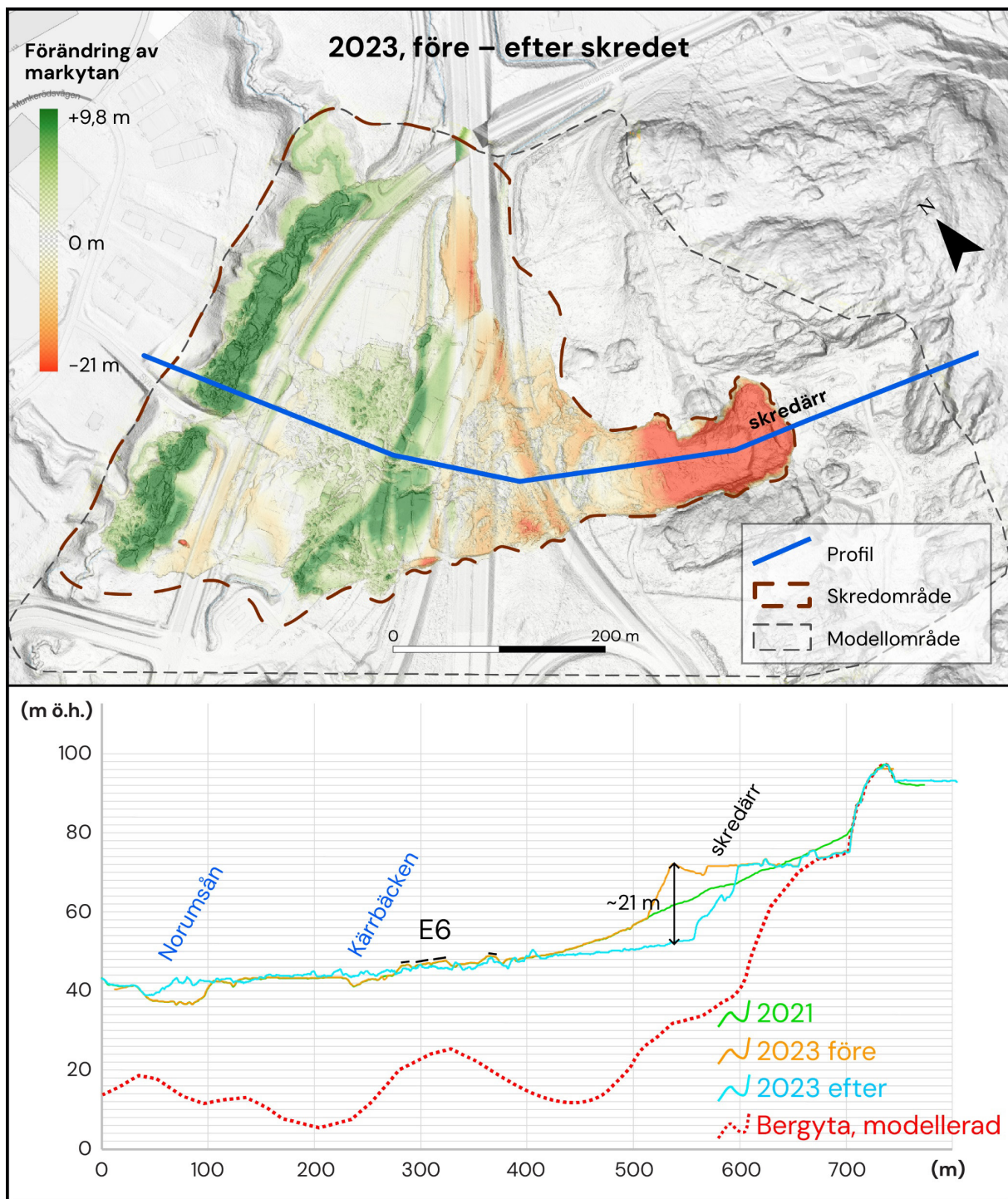
Den kumulativa förändringen mellan 2011 och 2023 dagarna före skredet visar de markarbeten som utförts i det så kallade 'strykjärnet', mellan E6 och Norumsån, och företagsparken öst om E6 (fig. 17). Förändringarna i de västra och norra delarna av strykjärnet syns mellan 2016 och 2018 (Preem) och 2018 till 2021 (Byggmax). Schakt- och grävarbetena i den södra delen och



Figur 17. Skillnaden mellan markytan 2011 (DTM_2011) och modellerad markyta 2023-09-20 (DTM_20230920) visar var material har schaktats undan (röd) och var massor har tillkommit (grön). Diagrammet visar skillnaden i profil utmed den blå linjen. Terrängskuggning: DTM_20230920.

arbetena vid företagsparken i öst, syns mellan 2021 och 2023 före skredet. Denna schaktning har bland annat tagit bort massor från slänten mot E6 södergående avfartsramp (bilaga I).

Massrörelserna vid skredet visas i jämförelsen mellan höjdmodellerna från två dagar före skredet och höjdmodeller skapade efter skredet, här från 6 november 2023 (fig. 18). Skillnaden mellan fyllnadsmassornas övre yta och skredgropens yta på samma punkt är som mest över tjugo meter. I Norumsån syns de kraftigaste hävningarna, ställvis nära tio meter, där skredets rörelseenergi har avtagit. Det syns att markytan sjunkit där E6 låg innan förskjutningen och att den hävts väster därom, i E6 nya läge. Utöver dessa stora markförflyttningar finns det två intressanta iakttagelser. Den första är norra delen av E6 södergående körfält, där marken i princip endast har en vertikal



Figur 18. Markytans förändring som ett resultat av skredet. Skapad från DTM_20230920 och DTM_20231106. Terrängskuggning: LiDAR, Swescan (DTM_20231106) och 'Laserdata Nedladdning, skog' ©Lantmäteriet.

rörelse. Körbanan och slänten intill har sjunkit upp till 3,8 m. Den andra intressanta företeelsen är vid Ucklumsvägens norra del, där ett brott i vägbanan avgränsar dess sydsydvästra del med närmast obefintlig horisontal rörelse från den nordöstra delen som hävts vertikalt 3,1 m i västra halvan och 1,7 m. Det hävda blocket av vägen lutar alltså bakåt mot sydost.

Ytterligare visualisering av området före och efter presenteras som 3d-bilder i Bilaga I – Kartor.

Uppfyllnaden i öst

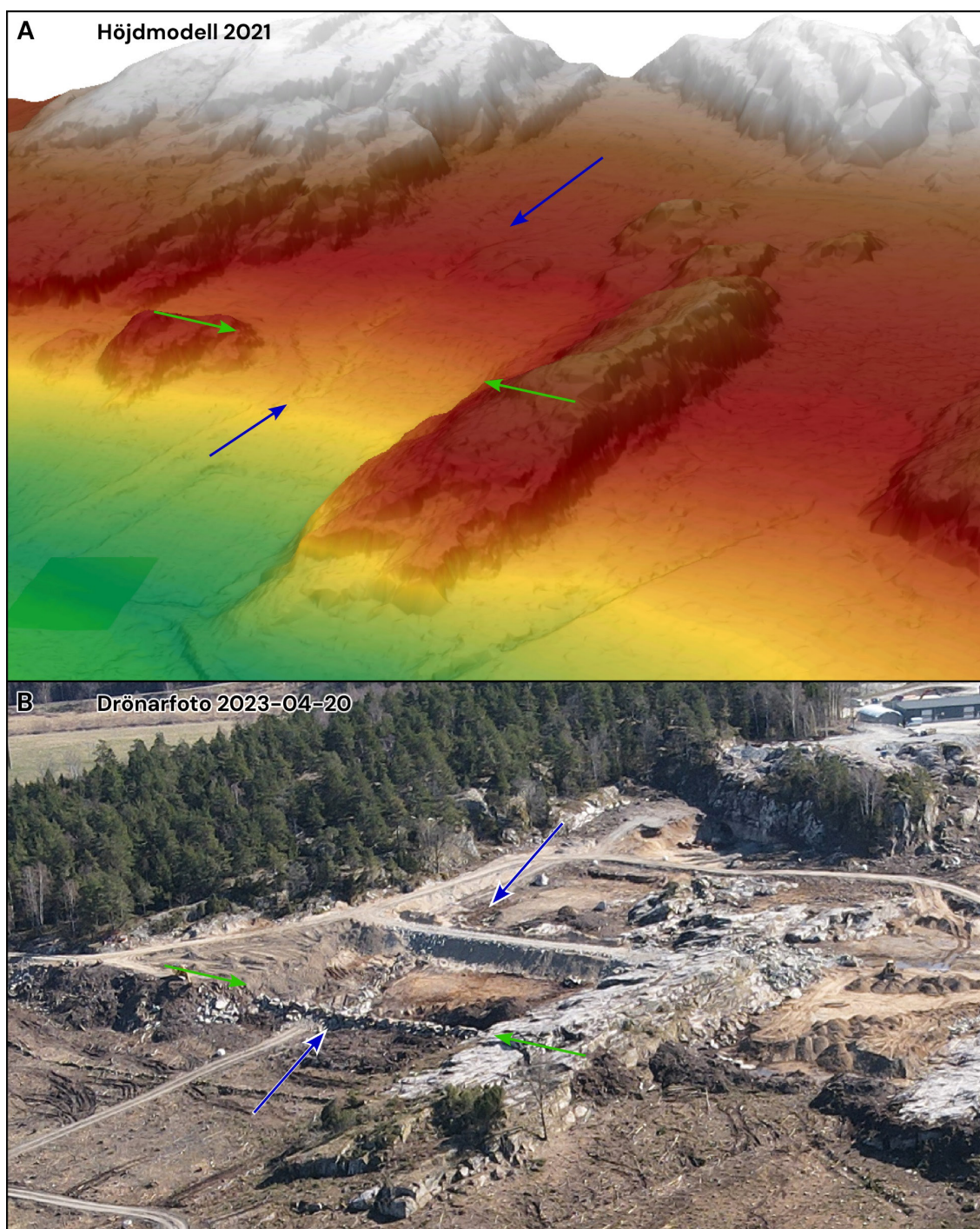
Under april 2023 startar arbetet med att fylla sänkan mellan bergsklackarna vid företagsparken i öst. Detta efter att området avverkades hösten 2022 och berget frilades (avlägsnande av jordlager) under vårvinter 2023. Det förekommer två liknande utjämningsarbeten, ett mindre i syd och ett större i norr (fig. 16), varav den senare är den uppfyllnad som sedan följde med vid skredet. Analys av tillgängliga fotografier från uppbyggnaden visar bland annat att vattenföringen i området till synes beaktades när det skulle fyllas igen. I Lantmäteriets höjdmodeller från både 2011 och 2021 noteras ett källflöde som skurit ut en mindre bäckfåra i sluttningen. Fotografier från april 2023 visar att denna bäckfåra fylldes med sten och block (fig. 19, 20 och 21). Liknande storlek av sten och block användes också till att skapa basen till den så kallade 'vallen', vilket också syns i figurerna.

Vid avschaktningen av matjorden (organiskt material i markytan) skapades ett dike från berget i sydost diagonalt över sluttningen till skärningspunkten för raderna med block (fig. 20 och 21). Om även detta dike fylldes med block är okänt, likaså om någon annan typ av dränering användes här.

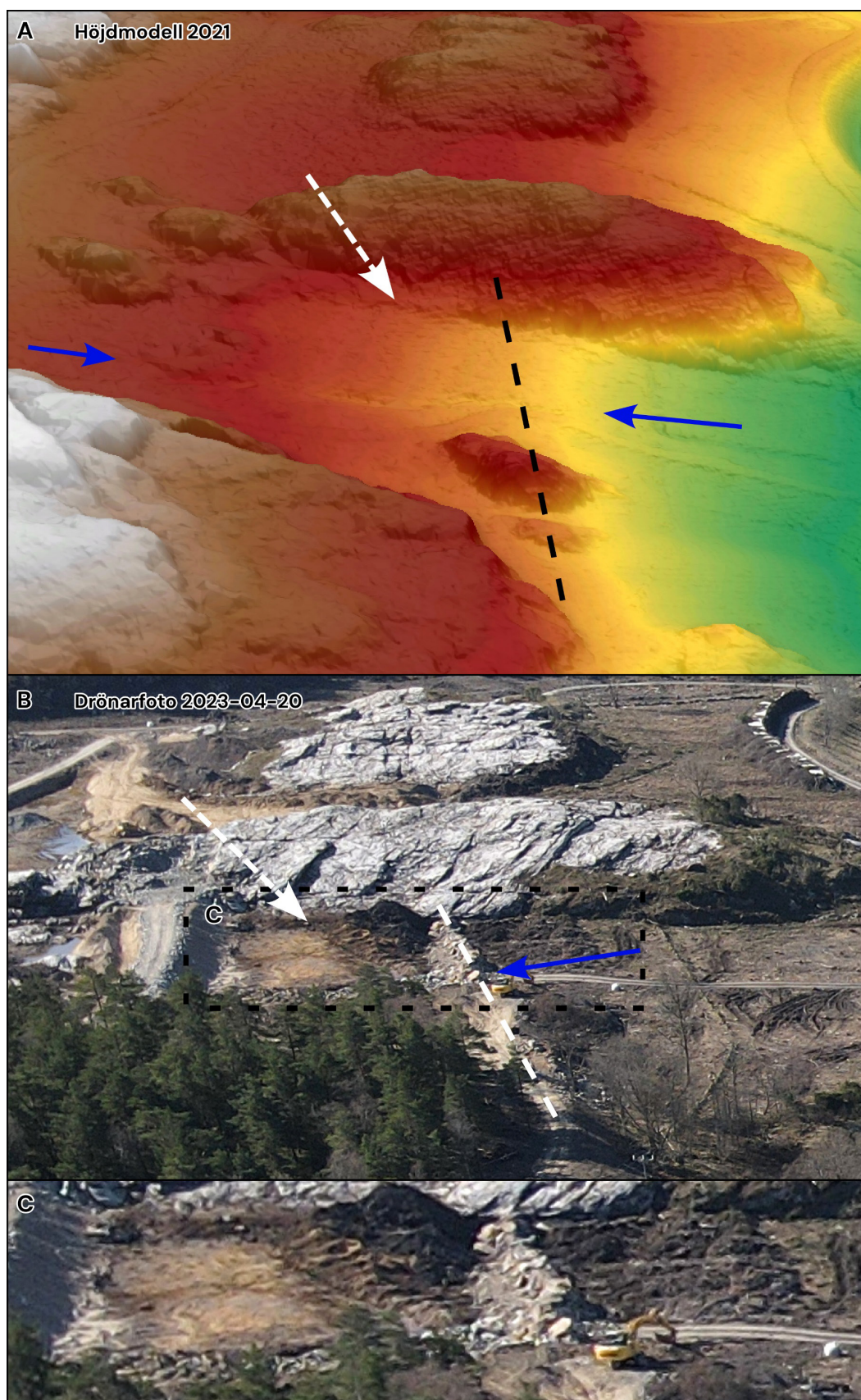
Efter skredet noterades ett järnrör, som stack ut ett par meter ner i skredärret. Ur detta flödade vatten rikligt under cirka en vecka efter skredet, sedan sinade flödet. Under fältarbetet hittades flera rörsektioner (5 m) av samma typ, och en eller två lokaliserades också i skredmassorna med hjälp av fotografier. I figur 21 syns ett rör på den plats och med samma riktning som det observerade i skredärret; vi antar att detta är samma rör. Röret ligger i linje med det tidigare nämnda källflödet, som fylldes med krosstensblock. När röret grävdes upp under skredsäkringsarbetet var det sammanlänkat med ett par ytterligare sektioner. I samma område grävdes ytterligare en sektion upp. Dessa observationer tyder på att rören lagts ner för att avvattna den övre bassängen som bildades när den första vallen, mitt i området med en väg på, byggdes. Hur långt röret fortsatte ner i blocken utmed sluttningen, är okänt.

Arbetena fortsatte vidare under 2023, genom att krosstensvallen byggdes på med mer fyllnadsmassor (fig. 22) och ytan bakom fylldes upp med jordmassor.

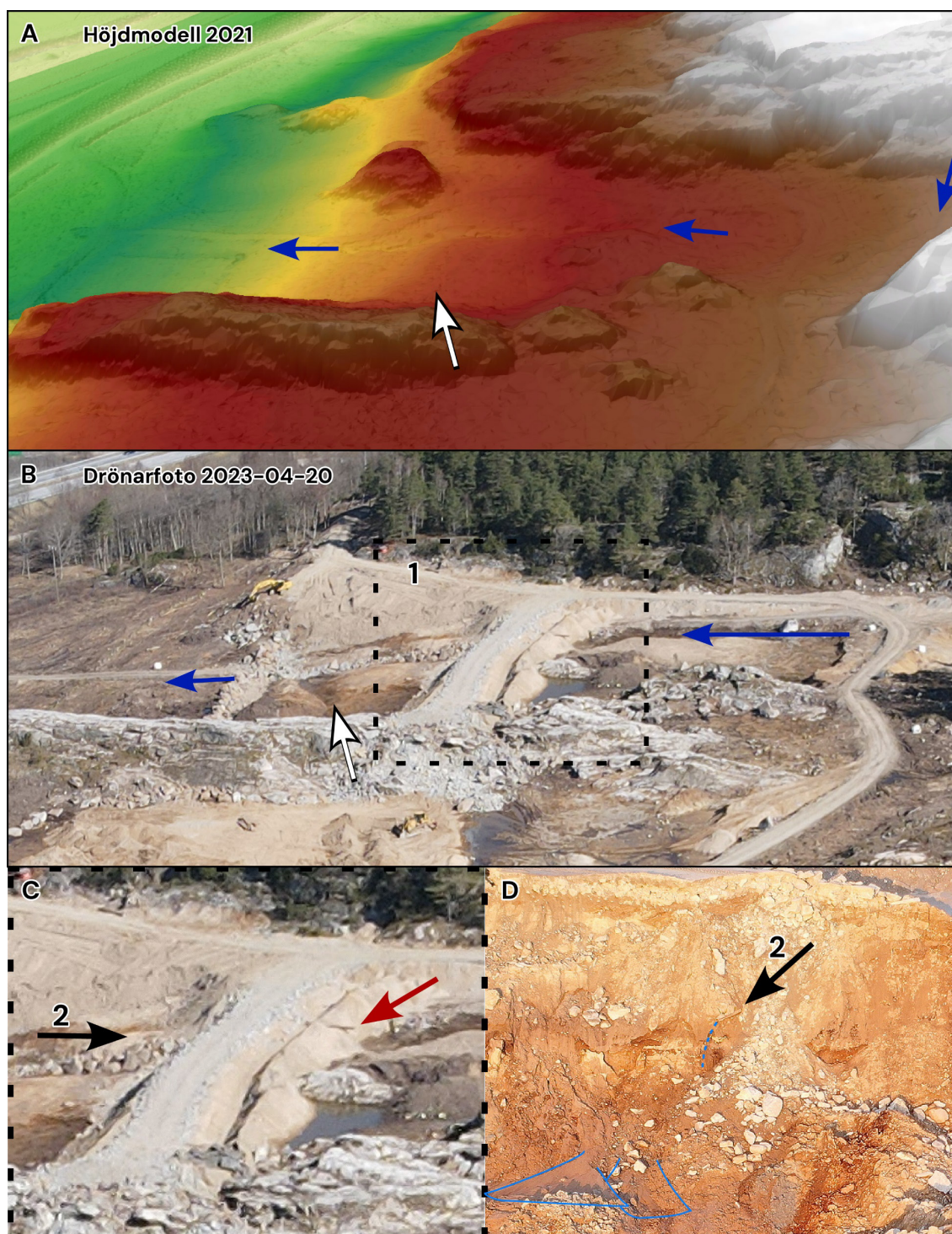
Skärningen rakt genom vallen, som bildades av skredet, visar vallens uppbyggnad (fig. 23). Det är tydligt att arbetsvägen ovanpå vallen låg utanför (väster om) basen som utgjordes av blocken.



Figur 19. I Lantmäteriets höjdmodell från 2021 syns en bäckfåra i sluttningen (blå pilar) **(A)**. Drönarfoto från 2023-04-20 visar att denna fåra fylls upp med block **(B)**. Gröna pilar markerar var vällen byggs upp, i fotografiet syns de block som utgör bas i vällen. Höjdmodell: ©Lantmäteriet. Foto: Hammar företagspark.



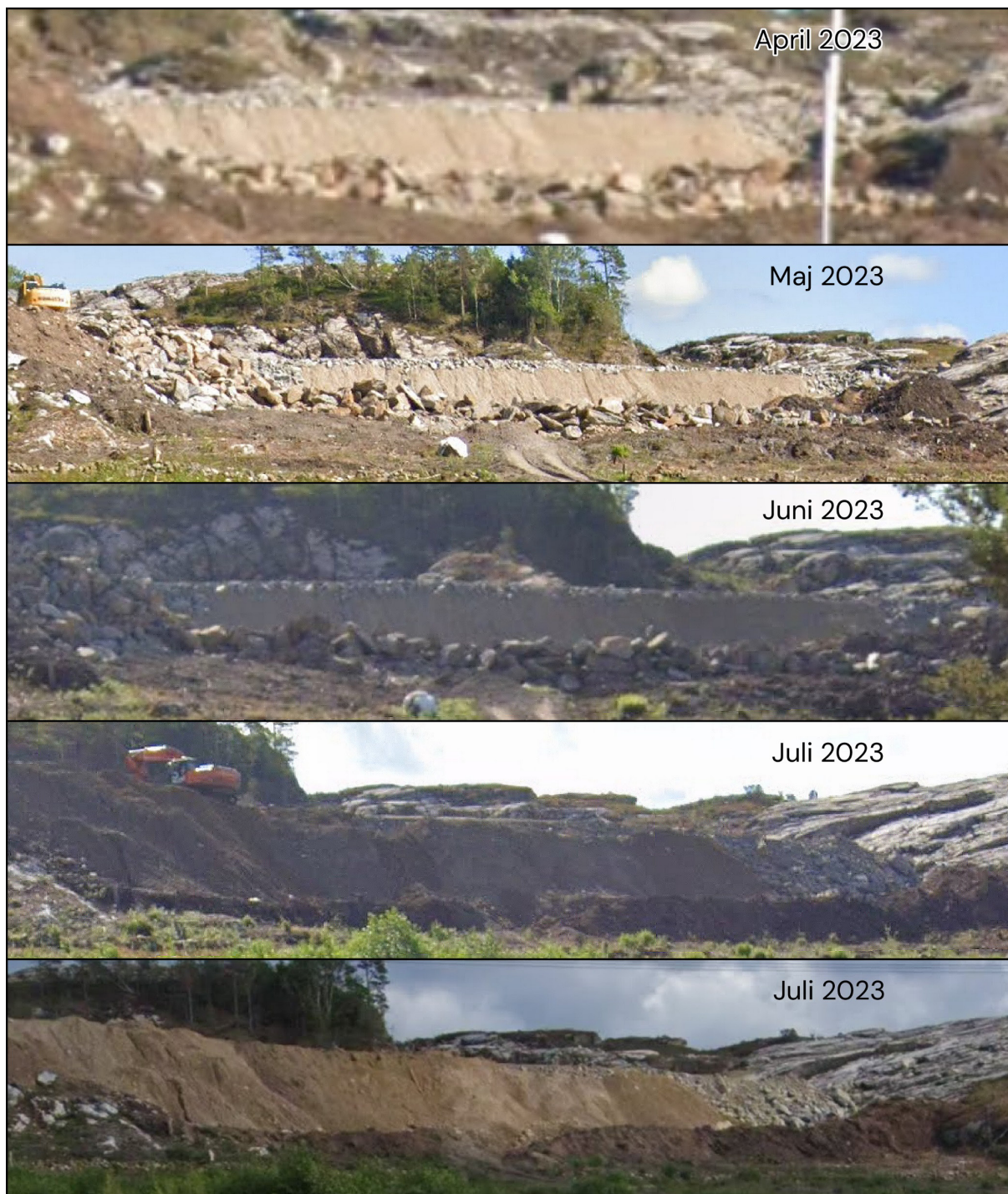
Figur 20. Vy från norr visar utöver vällen och den igenfyllda bäckfåran med blå pilar (**A, B**), att ett dike anlades sluttande från sydost (vit pil) ner till den punkt som förenar blocken i bäckfåran och blocken i vällen (**B, C**). Höjdmodell: ©Lantmäteriet. Foto: Hammar företagspark.



Figur 21. Vy från söder visar samma observationer som i figur 19 och 20. Men här syns även det rör som observerades sticka ut i skredärret efter katastrofen (1). Röret är placerat under den arbetsväg som anlades ovanpå den östra, mindre vällen. Efter skredet observerades rikligt flödande vatten i detta rör (2). Vit pil (A, B) pekar på det dike som skapats innan fyllnadsmassorna tillfördes. Röd pil (C) pekar på röret. Höjdmodell: ©Lantmäteriet. Foto B, C: Hammar företagspark. Foto D: Christian Öhrling.

Geometrier

Utifrån de olika höjdmodellerna kan ytterligare ytor, volymer, och lutningar med mera beräknas. Jämförelse mellan olika markytor från höjdmodellerna ger skillnaden i volym. Figur 24 redovisar höjdprofiler parallellt med 'vallen' och de ytor som modellerades fram från fotografier (fig. 16)



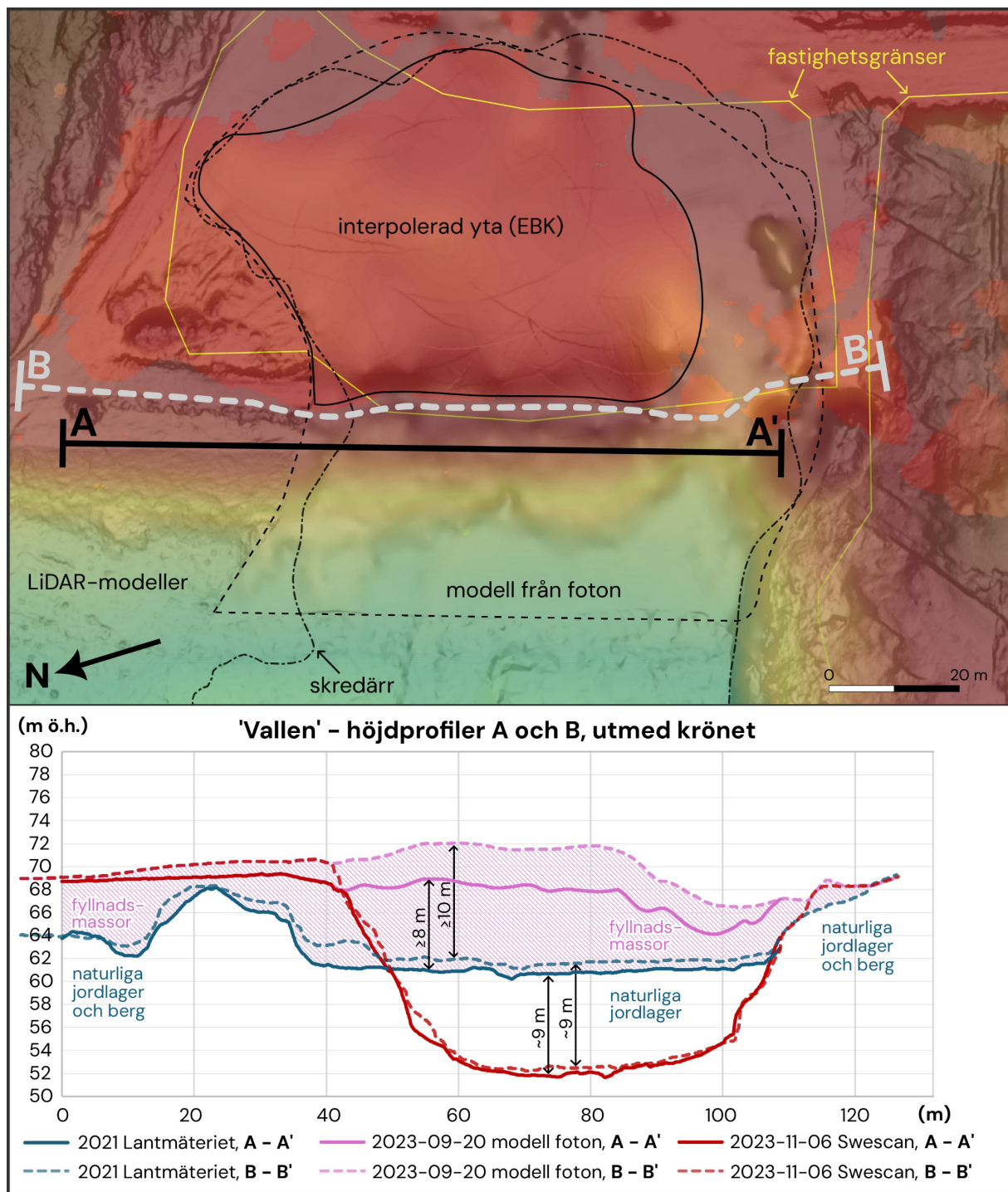
Figur 22. Vallen byggdes upp under vår och sommar 2023 (Google StreetView). Under april, maj och juni syns den bakre vallen med arbetsvägen tvärs över området, och i framkant de stora blocken som bildade grunden till den stora vallen. Blocken täcks över och vallen byggs upp under juli och framåt. Framför (nedanför) vallen syns en jordvall som placerades där för att skydda den fornminnesskyddade stengärdesgården för nedfallande föremål under arbetet.

och interpolering inom skredgropen. Vallens överyta låg mellan åtta och drygt 10 m över den ursprungliga marknivån, beroende på om mätning görs till ovan slänkrönet eller till vägen och blocken som var placerade ovanpå (ljusgrå grafer i figuren). Notera att injusteringen av höjdnivån för den modellerade delen av vallen (området med oskarpare kontrast och något ljusare färg) gjordes lågt i förhållande till de nivåmessigt säkra markytorna, för att undvika för höga antaganden. Likaså ligger den interpolerade ytan bakom vallen lägre än kringliggande nivå.



Figur 23. Skärningen genom vallen som skapades vid skredet visar hur vägkroppen ligger i förhållande till blocken i grunden. Svart linje från vänster till höger visar ungefärlig ursprunglig markyta, och streckad röd linje är berg. Blocken som utgjorde basen framträder tydligt och de något finkornigare massorna ovanpå och vägkroppen i ytan. Streckade svarta pilar visar material som flyttat på sig, men inte skredat iväg. **(A)** är fotat 2023-09-27, och **(B)(C)** är från 2023-12-21. I de nedre, senare fotona har jord spolats bort på grund av nederbörd, vilket gör avgränsningen till blocken än tydligare. Foto: Christian Öhrling.

Tabell 1 redovisar skredområdet, och relevanta närliggande områdens, geometrier. Antaganden vid beräkningarna är konservativt selekterade. Enligt dessa beräkningar hade fyllnadsmassorna i öst, som följde med i skredet, en volym över 32 000 kubikmeter. Om fyllningen söder och norr om skredområdet räknas in blir det över 52 000 kubikmeter fyllnadsmassor. Den totala volymen massor som försvann från områden (erosion) var cirka 95 000 kubikmeter och massorna som



Figur 24. Höjdprofiler utmed 'vallen'. Kartan visar den del som skapades utifrån fotografier (streckad polygon; se figur 16) och den del bakom vallen som interpolerades från höjdvärden runt om skredärr (svart inramning). Dessa fogades samman i 'DTM_230920' (modell justerad). De färgade graferna visar höjdprofiler parallellt med krönet på vallen (svart linje) och i bakgrunden finns ljusgrå grafer som följer vägen ovanpå vallen (ljusgrå linje). Streckade graferna representerar höjdmodellen från fotografierna, före höjdjustering. Höjdsuggning runt om det modellerade området: Swescan 2023-11-06, samt ©Lantmäteriet 2011. Gula linjer = fastighetsgränser, hämtad 2025-01-14 ©Lantmäteriet.

avsattes (deposition) hade en volym på 135 000 kubikmeter. Beräkningarna utfördes med ArcGIS-verktyget 'CutFill' med hjälp av de olika höjdmodellerna. Volymerna representerar med andra ord de massor som har omformats/förflyttats på ytan. Det är noterbart att summorna (erosion/deposition) skiljer sig från varandra. Summan av erosion och deposition ger cirka

230 000 kubikmeter. För att uppskatta den totala volymen massor som har rört på sig, behövs djupvärden till ett antaget glidplan. Detta djup varierar uppskattningsvis från 5 m till över 20 (kanske 30) m. Genom att dela in det 122 555 kvadratmeter stora, tydligt påverkade skredområdet i fem delområden och anta ett djup till glidplanet i varje del så uppskattas volymen förflyttade massor till cirka 1 150 000 kubikmeter.

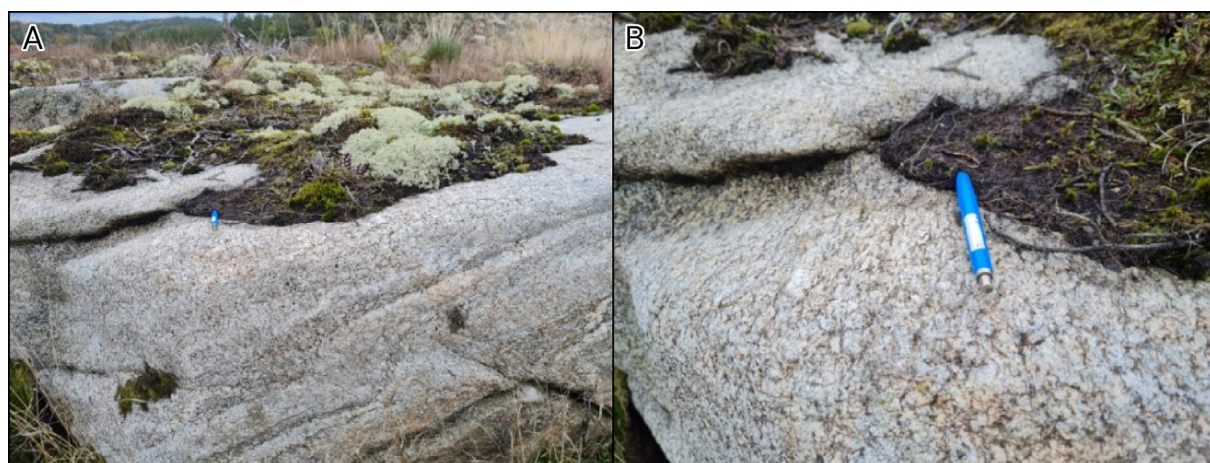
Tabell 1. Beräkningar över massförflyttningar under skredet, samt dimensioner av fyllnadsmassorna. 'Området' och 'Skredområdet' motsvarar de områden som visas i exempelvis figur 17 och 18. Antagen densitet för uppskattning av fyllnadsmassornas vikt är 1 800 kg/m³. Volymen beräknades med hjälp av ArcGIS-verktyget 'CutFill'

	Området			Skredområdet		
	Area (m ²)	Volym (m ³)	Vikt (ton)	Area (m ²)	Volym (m ³)	Vikt (ton)
Erosion	242 570	-137 575	-247 635	67 275	-94 564	-170 216
Deposition	125 309	125 309	225 557	79 039	135 088	243 158
Fyllnaden, öst	15 265	52 215	93 988	6 398	32 571	58 627
Fyll, öst södra	7 589	16 796	30 233	-	-	-
Fyll, öst norra	1 941	2 096	3 772	-	-	-

Berggrunden

Berggrunden i och i anslutning till skredområdet består av en förhållandevis homogen fint medelkornig granodioritisk till tonalitisk gnejs (fig. 25; tabell i bilaga II), vilket harmoniserar med SGU:s berggrundsdata över skredområdet (SGU 2024h). Gnejsen har en förhållandevis hög halt av glimmermineralen biotit och muskovit. Körtlar och ådror med glimmerfattig, grå till rödgrå pegmatit förekommer ställvis i den granodioritiska till tonalitiska i gnejsen.

Ytskiktet på berghällar har vanligen en två till fem millimeter gråvit vittrad zon. Färska brottytor i berghällarna och krossat bergmaterial (makadam) av gnejsen i skredområdet har däremot en blågrå färg.



Figur 25. Grå gnejs med enstaka ljusa glimmerfattiga oregelbundet formade ådror som är orienterade parallellt med gnejsstrukturen (A). Närbild på den grå gnejsen där linjärstrukturen i den granodioritiska till tonalitiska gnejsen framträder på foliationsplanen. Penna indikerar lineationens orientering (B). Foto: Thomas Eliasson.

Öster och norr om skredområdet finns enligt SGU:s berggrundsdatabas långsträckta områden som utgörs av en grå, ådrad, relativt glimmerrik ytbergartsgnejs ursprungligen bildad av sandiga till leriga sediment av marint ursprung. I denna typ av gnejs kan förhöjda halter av olika sulfid-mineral förekomma. Sulfider, till exempel pyrit och pyrrhotit (magnetkis), som kommer i kontakt med vatten och syre oxideras, varvid pH-värdet i avrinnande vattnet sänks. I de undersökta berghällarna har inga makroskopiskt identifierbara sulfidmineral påträffats. Den petrografiska undersökningen visar att innehållet av opaka mineral (malmineral) är lågt och att de främst består av magnetit.

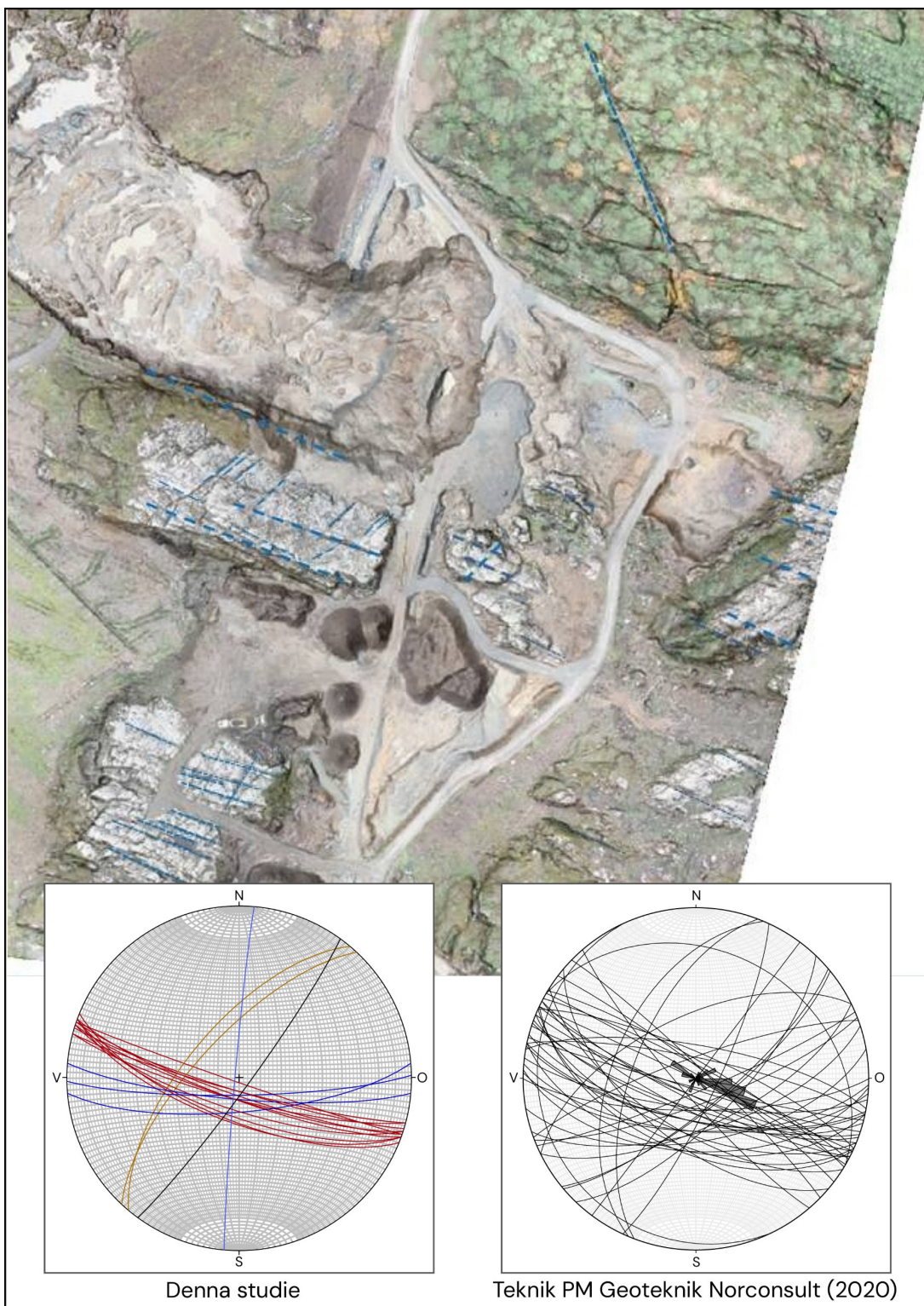
Sprickor och deformationszoner

Inom skredområdets östra delar är berggrunden sprickrik och grusvittring förekommer. Två sprickgrupper med långsträckta sprickor löper genom berghällarna i skredområdet, dels en ostsydostlig sprickgrupp, dels en nordostlig sprickgrupp (fig. 26).

Den ostsydostligt orienterade sprickgruppen har en förhållandevis brant stupning, vanligen 75 till 85 grader åt söder, och långa spårlängder (upp till 60 och 90 m långa). Den nordostliga sprickgruppen består av vertikala sprickor med iakttagbara spårlängder upp till 40 m längd. Även en flackt liggande sprickgrupp, som till viss del följer gnejsstrukturen i berghällarna (fig. 27A, B och C) är förhållandevis väl utvecklad.

Längs bergsryggen, som begränsade skredmassornas utbredning åt söder, löper en 0,1 till 0,3 m bred sprickzon. Denna är orienterad i ostsydostlig riktning och med en brant stupning åt söder (cirka 75 grader). I sprickzonen finns en vit kvartsgång (fig. 27D).

Utifrån informationen om sprickgeometrin (orientering och spårlängder) i de blottade berghällarna i undersökningsområdet kan man förvänta sig att en stor del av de nordostligt och ostsydostligt orienterade sprickorna (fig. 26) på höjdområdena fortsätter under jordtäckte och fyllnadsmassor i svackorna mellan hållområden. Inmätningar av sprickor visar två huvudsakliga sprickplan; 96–104 (brant stupning, nära vertikal, mot S) och 170–175 (stupning mot öst).



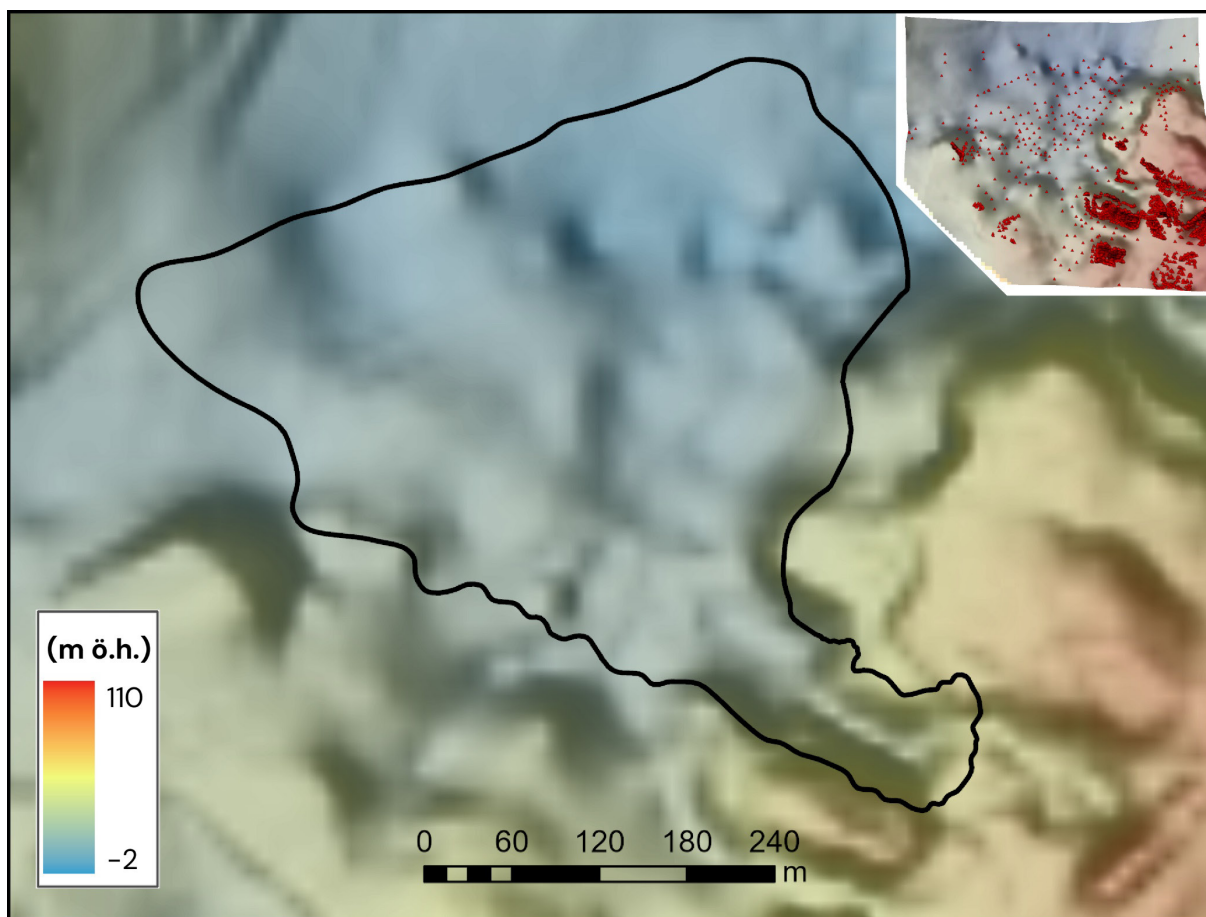
Figur 26. Tolkning av längre (> 5 m) sprickor och sprickzoner på de avbanade hållområdena i anslutning till skredområdet. På de kala bergsområdena kan två dominerande sprickgrupper identifieras. Tolkade sprickor är markerade med blå linjer. De ostsydostligt orienterade sprickorna är generellt uthålliga med spårlängder uppåt 70 m. Sprickorna i den nordöstligt orienterade sprickgruppen har identifierbara spårlängder upp till 50 m. Nere till höger visas resultatet från sprickkartläggning som utfördes under utredningen i detaljplan-arbetet (Norconsult 2020). Höjdsuggning och ortofoto: Swescan, 2023-11-06.



Figur 27. Fotografier av berggrundsblottningar omkring skredgropen i öst. **(A)** Vy åt nordnordväst där vertikala rostfärgade sprickytor blottlagts vid sprängningsarbeten. Rostfärgningen orsakas av järnoxid-hydroxider (FeOOH) som fällt ut i de nu blottlagda sprickorna. Tre sprickor i den västsydvästligt-ostsydostligt orienterade sprickgruppen, med brant stupning åt söder, skär de rostfärgade sprickyterna. **(B)** Vy åt ostsydost strax öster om kanten av skredområdet. Bergknallen genomsöks av de ostsydostligt och nordostligt orienterade sprickgrupperna. **(C)** Vy åt nordnordost över bergsryggen som begränsar skredområdet åt söder. Notera hur den västsydvästligt-ostsydostligt orienterade sprickgruppen och den flackt liggande gnejsigheten styr bergytans lutning och morfologi. Även de nordostligt orienterade sprickorna påverkar ytformen på bergsryggen. **(D)** Vy åt ostsydost strax öster om skredområdet. Till höger finns den västsydvästligt-ostsydostligt orienterade kvartsförande sprickzonen som stupar brant åt söder. Denna 0,2 till 0,4 m breda vattenförande sprickzon kan följas längs hela den södra bergskanten där skredmassorna förflyttades. Foto: Thomas Eliasson.

Endast en begränsad del av nederbörden som faller på hållområden infiltreras i sprickor i berggrunden. Lokalt sker dock en ökad infiltration beroende på berghällarnas sprickighet och morfologi. Ställvis förekommer depressioner i bergytan i anslutning till sprickor där vatten kan tillföras bergssprickorna (fig. 27C). En viss infiltration av grundvatten är även förväntad i de två sprickgrupperna under jordtäckta områden med permeabel jord (sand och grus), fyllnadsmassor eller sprängstensmassor.

Det förekommer troligtvis hydraulisk förbindelse mellan olika sprickzoner. Sprickgrupper kring största huvudspänningsriktningen i berggrunden uppvisar ofta förhållandevis höga vattenförande egenskaper. Den ostsydostliga sprickgruppen ligger relativt parallellt med största huvudspänningsriktningen (nordväst-sydostligt) i södra Sverige. Förhållandevis hög permeabilitet i den västnordväst-ostsydostliga sprickgruppen är därmed förväntad.



Figur 28. Modellerad bergyta baserad på geotekniska undersökningar och observerad håll. Kvaliteten av modellen och dess precision är högre i de centrala och västra delarna av skredområdet, där ett stort antal djupuppgifter ingått. Likaså är de ytor med berg-i-dagen av hög kvalitet då modellen använt en stor mängd pseudopunkter, alltså punkter som placerats ut där berget är synligt i fjärranalysdata. Infälld karta visar de använda punkterna.

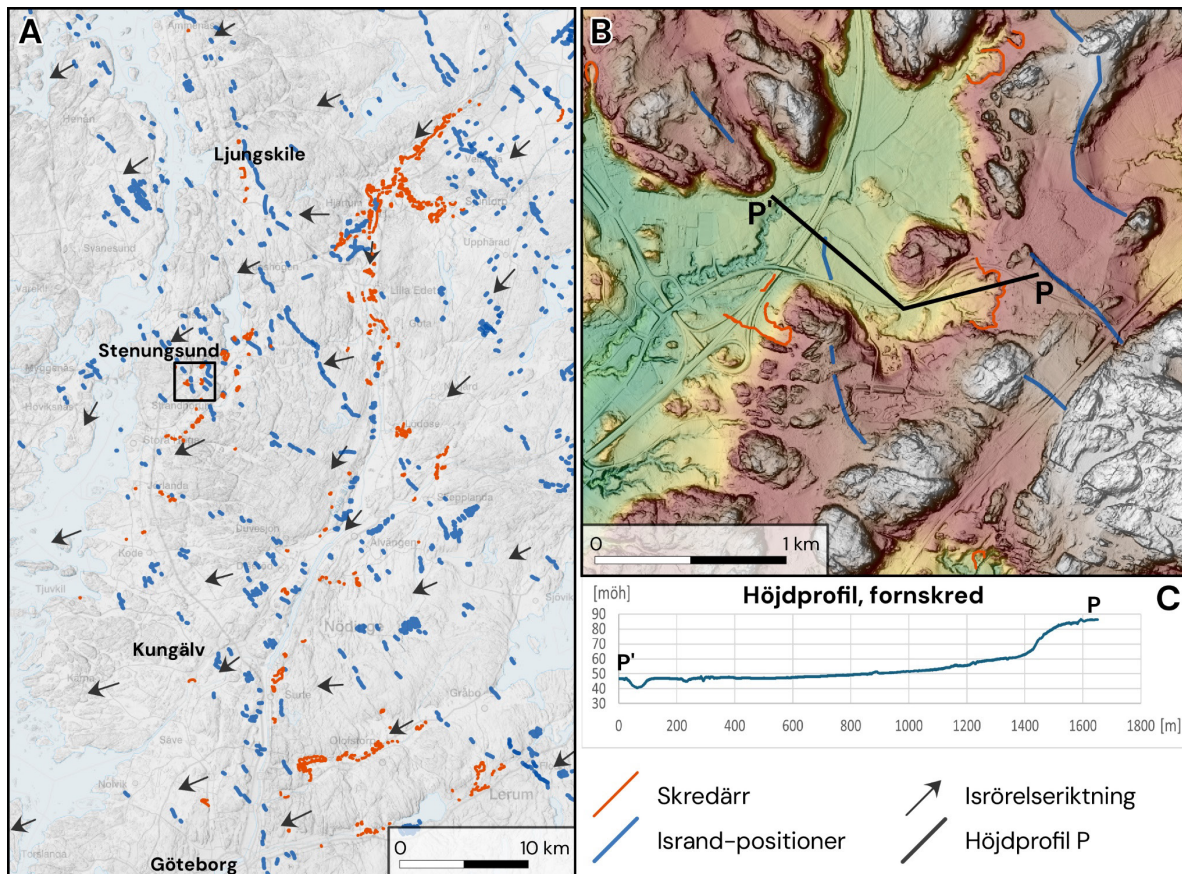
Figur 28 visar en modell av bergytan baserad på 133 geotekniska borrhningar, 430 hållobservationer från utredningar, och ytterligare omkring 5 000 genererade (pseudo-)punkter inom områden med bekräftat berg-i-dagen, totalt 5 619 punkter (infälld figur). Modellen är skapad med Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction (EBKRP) i ArcGIS 3.1. De geotekniska borrhningarna når sällan berg, varför många valts bort, och de som använts representerar i många fall en högsta möjlig nivå för bergets överyta.

En petrografisk undersökning av bergprover har utförts och dessa resultat presenteras i Bilaga II – Petrografi.

Geomorfologi

Mycket information om deglaciationsförloppet kan fås genom att analysera landskapet och landformer som bildades under och framför inlandsisen.

Två nya inmätningar av isräfflor har gjorts i området, dessa är från N80°E respektive N83°E. Detta bekräftar tidigare data där närmaste observation är N80°E och den generella riktningen i



Figur 29. (A) Landformer som indikerar forna israndlägen förekommer rikligt i regionen (blå linjer). Svarta pilar visar ett urval av isräffleriktningar från SGU:s databas 'Isräfflor'. Röda linjer representerar skredärr i landskapet, vilka kartlagts med hjälp av LiDAR-bilder. Tre är kartlagda inom denna studie och resten är hämtade från SGU:s databas 'Ras och skred'. **(B)** Nordost om skredområdet upptäcktes ett fornskredsärr. En sammanvägning av stratigrafi, lutning, längd och läge leder till slutsatsen att detta inträffat i samband med att landhöjningen torrlade området för cirka 11 000 år sedan. Höjddata: ©Lantmäteriet.

området är N60°E till N70°E (fig. 29; SGU 2024h). Variationen är ett resultat av den topografiska styrningen, vilken ökat erosionen i nordost-sydvästliga och ost-västliga sprickzoner, vid deglaciationens slutskede.

Gamla skredärr finns i SGU:s databaser, men i denna studie har dessa kartlagts med högre upplösning i området närmast skredet. Vid den initiala fjärranalysen av skredet upptäcktes ett ej tidigare dokumenterat jordskredsärr, direkt nordost om Stenungsundsskredet (fig. 29). Detta skred, är flackt och långsträckt, och tolkas primärt påverkat ett område av 50 ha. Ett flertal stora skred i södra Sverige har bevisats vara utlösta i samband med områdenas torrläggning orsakade av landhöjningen (Smith m.fl. 2017, 2014). Fornskredet, här kallat Blixeröds-skredet, har flera likheter med dessa. Skredärrret är bildat i isälvs-sand med underliggande silt och lera. Distansen från bakkant av skredärrret till loben av skredmassor är cirka 1,4 km och har en medellutning av 1:50, vilket indikerar ett flytande beteende i massrörelsen. Tolkningen av stratigrafi, geometri och läge leder därför till förslaget att skredmassorna har, åtminstone delvis, transporterats och avsatts i vatten. Förhållandena då detta inträffat är förslagsvis när området lyftes ur havet – mothållande krafter minskar och portrycksförändringar – för omkring 11 000 år före nutid (Pässe & Daniels 2015, Persson 1973).

Landformer som representerar israndpositioner är här kartlagda i högre detalj än tidigare. De markeras med linjer utmed ryggar och tolkade iskontakter, för att åskådliggöra var i landskapet iskanten gjorde mindre framstötningar under en allmän reträtt/avsmältning (fig. 29). I stort är dessa landformer alltså kartlagda tidigare, framför allt av Björsjö (1949), men här tillkommer ytterligare ett antal och alla är mer precist placerade i och med detaljerade höjddata.

Jordlagerföljder

Under utredningsarbetet har Haverikommissionens projektgrupp granskat och analyserat omfattande stratigrafiska data från området. För att reda ut vissa frågor som uppstått vid granskningen har SGU genomfört kompletterande fältundersökningar.

Stratigrafin beskrivs här i två delområden. Den första delen täcker den östra sektionen, från bergsområdet i öster till cirka 220 m västerut in i skredområdet, till foten av vallen. Den andra delen börjar där den första slutar och inkluderar hela den västra delen, ner till och med Norumsån. Nedan följer beskrivningar av stratigrafin i utvalda dokumenterade skärningar och borrhningar i området.

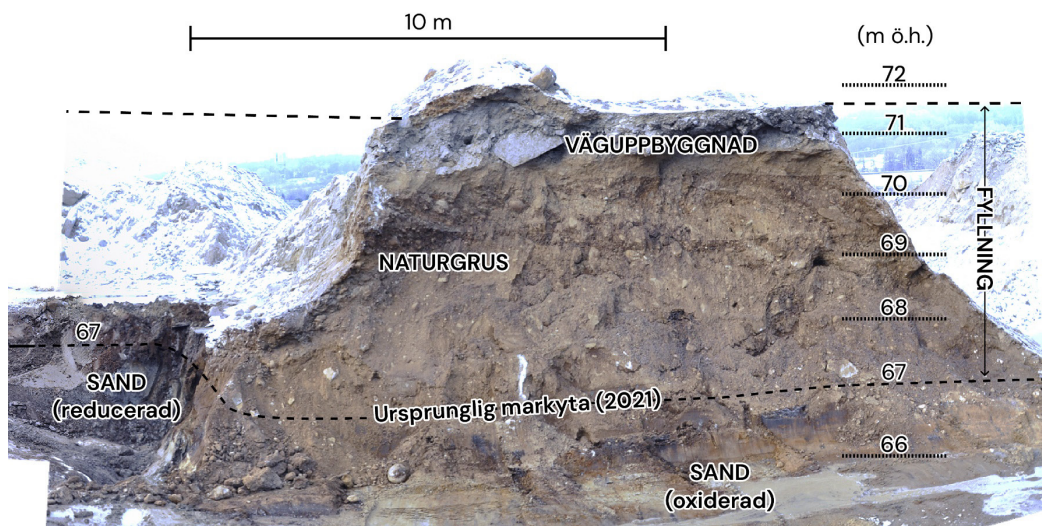
Stratigrafi östra delen

Vid utredningens början fanns ingen dokumenterad information om jorddjup eller lagerföljd i den allra östligaste delen av skredområdet. Under arbetet med den så kallade skredsäkringen blottades dock jordlagren längs stora delar av området direkt öster om skredärret. Vid skredsäkringen avlägsnades de kvarvarande jordmassorna bort 'bakifrån', successivt ut mot skredkanten. SGU beställde även en maskingrävd provgrop inom det redan urschaktade området längst i öst (Foto i bilaga III – Jordprov). Platsen för några av de dokumenterade observationerna presenteras i figur 30; provgropen markeras av punkten söder om punkt 38.

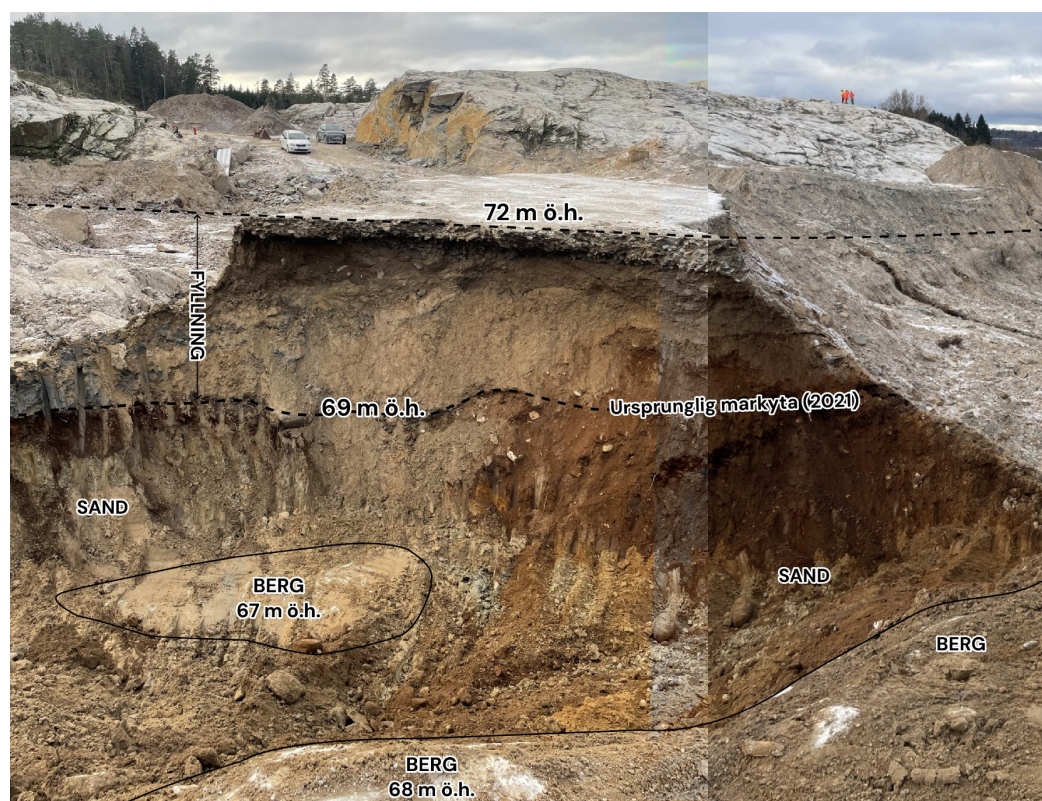


Figur 30. Några av de dokumenterade lagerföljderna i östra området. De markerade figurnumren visar platsen för dessa. Ortofoto: Länsstyrelsen 2023-10-05.

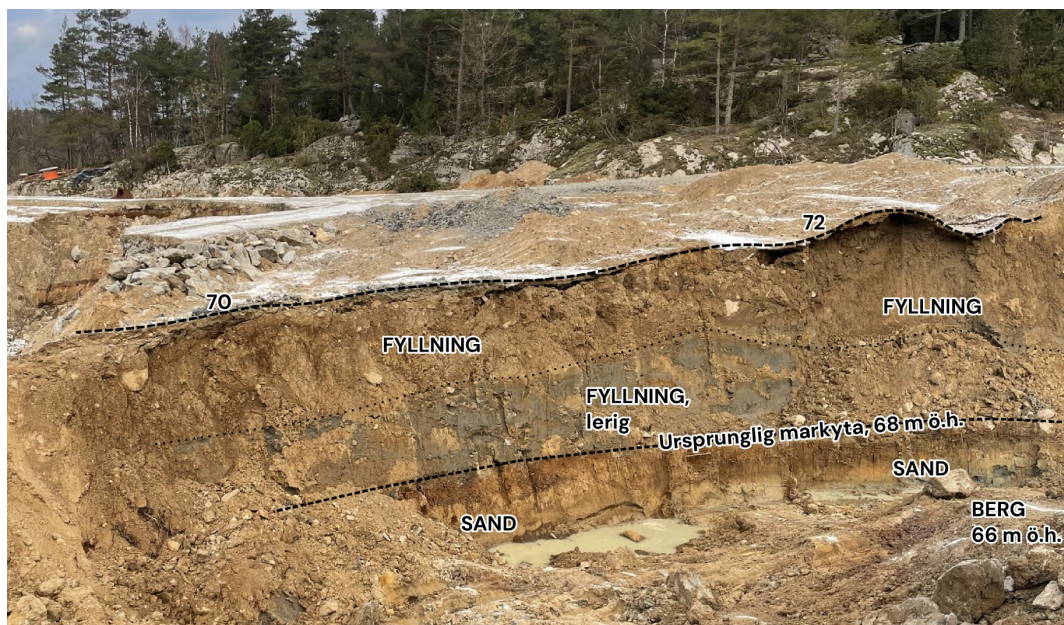
I de dokumenterade jordlagerföljderna syns den naturliga markytan tydligt (fig. 31, 32 och 33). Exploatören har schaktat bort det översta jordlagret, dock observerades en horisont med organiskt innehåll ställvis kvar i ytan. Jämförelse mellan inmätta nivåer av denna horisont och markytan från 2021 års höjdmodell visar marginella skillnader, dock är mätosäkerheten flera decimeter. Figuren visar att fyllnadsmassorna har en mäktighet på tre till fem meter i observationerna som är gjorda några meter öst om skredärret.



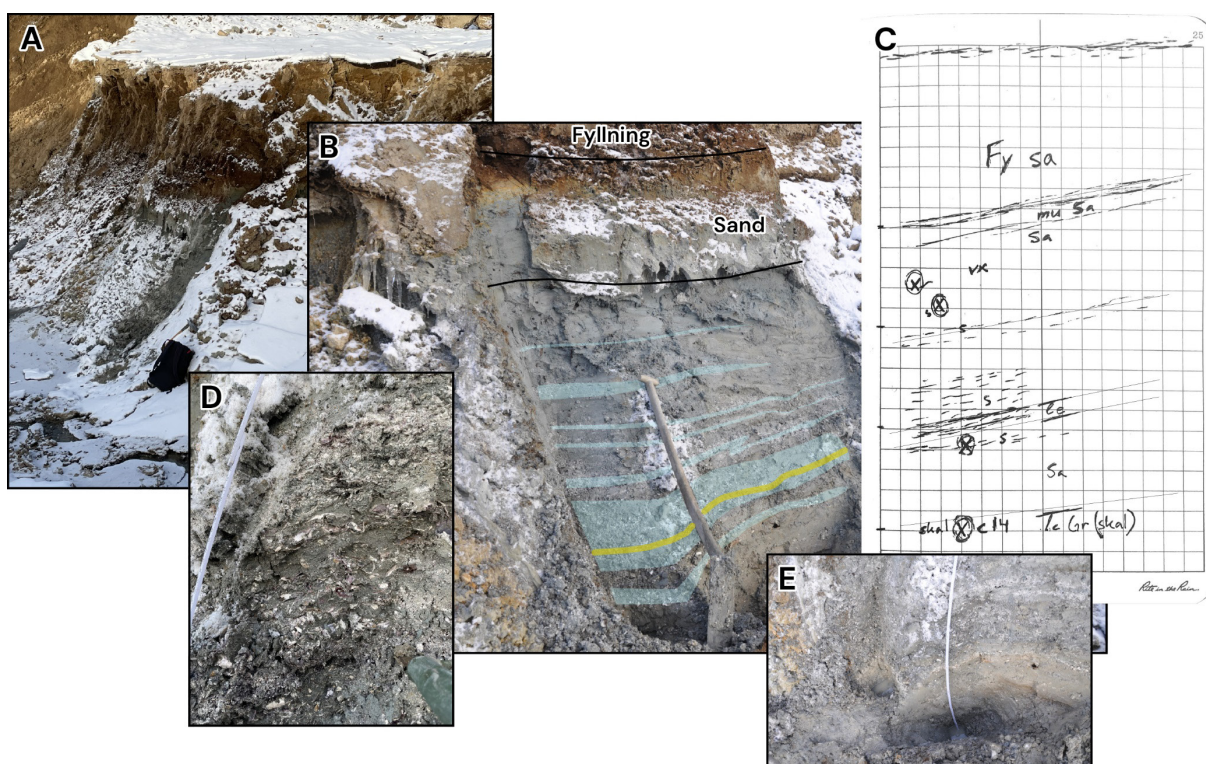
Figur 31. En plint av mestadels fyllnadsmassor, som vilar på naturlig postglacial finsand. Delar av fyllningen består av naturgrus, andra delar av blandade jordmassor. Fotot är taget i västlig riktning, ner mot skredgropen. Foto: Christian Öhrling.



Figur 32. Foto i riktning söderut med skredgropen till höger. Fyllnadsmassor ovanpå den ursprungliga postglaciala sanden och glacial sand med skalrester därunder. I bakgrunden syns vägen som sprängts fram i berget, vilket haft en påverkan på avrinningen (se avsnitt *Resultat/Hydrologi*, figur 53). Foto: Christian Öhrling.



Figur 33. Bakom (öst om) skredärret har cirka 3–5 m fyllnadsmassor mätts in. Det går att urskilja gränser mellan olika fyllningsmassor. Fyllnadsmassorna vilar på svallsand ovanpå glacial (isälvs-) sand. Foto: Christian Öhrling.



Figur 34. Jordlagerföljd med sandig fyllning överst (A, B, C). Postglacial sand under fyllningen är oxiderad med organiskakt innehåll i den översta biten. Flertalet skallager förekommer i sanden därunder, varav ett är cirka 30 cm mäktigt lager av skaljord (B, D). I botten av lagerföljden finns ytterligare skal i ett något grusigt sediment (E). Gul linje representerar ett cirka 4 cm lerigt skikt i det mäktigare skaljordslagret. Foto: Christian Öhrling.

Olika typer av fyllnadsmassor kan urskiljas, delvis naturgrus (kan vara från området), delvis leriga massor med ställvis rikligt innehåll av skalrester (marina leror), delvis krossberg, och delvis sandiga massor av okänt ursprung.



Figur 35. Skalförande lager förekommer rikligt i östra delen av området, ställvis så kallad skaljord **(A)**. **(B)** *Neptunea antiqua*, Neptunussnäcka (foto: Per Jakobsson). **(C)** *Chirona hameri*, havstulpan, in situ på berghäll. **(D)** Ett urval av den fauna som dokumenterats under fältarbete: *Mya tr.*, *Chlamys is.*, *Macoma c./b.*, *Hiatella ar.*, *Arctica is.*, *Chirona ha.*, *Mytilus ed.*, *Ostrea ed.*, *Trophon tr.*, *Neptunea de./an.*
Foto A, C och D: Christian Öhrling.

Skaljord

Det förekommer rikligt med skalrester i sedimenten. Och dessa är ställvis ackumulerade i mer eller mindre mäktiga skallager, från någon centimeter till flera decimeter. Lagren uppvisar en stor biodiversitet av skalbyggande djur, här följer några av de mest förekommande arterna (fig. 35):

Mya truncata, *Hiatella arctica*, *Mytilus edulis*, *Chirona hameri*, *Ostrea edulis*, *Trophon truncatus*, *Neptunea antiqua/despecta*, *Arctica islandica*, *Chlamys islandica*, *Macoma baltica*, *Macoma calcarea*.

Chirona hameri observerades in situ på berghällar som grävdes fram, så som skalen var fästa och växte när kräftdjuret inuti levde för minst 11 000 år sedan (fig. 35C).

Sand och grus

En av de första observationerna, under fältbesök, i den östra delen av skredområdet var att två ytor, som på jordartskartan kartlagts som moränjord, i själva verket utgörs av isälvsediment.

Tidigare kartläggningar har tolkat ytan som morän, troligen på grund av de rikliga blockutfallen från berggrunden (gjort markytan blockig, typiskt för morän) och avsaknad av öppna skärningar. På några ställen öster om skredområdet har dock observationer av en tunn moränkappa ovanpå deformerade isälvsediment gjorts (fig. 36A och D). Detta lager är dock så tunt och/eller osammanhängande att markens egenskaper generellt ej överensstämmer med morän. Lagerföljden visar att isen oscillerade under avsmältningen, med periodvisa framstötter västerut.

Isälvsedimenten från de högsta partierna öst om skredet, ner till skredärret består delvis av så kallade turbiditer. Detta är växellagrade skikt av silt, sand och grus vilka är ett resultat av gravitationsflöden (eng. *gravity flows*) i en glaciomarin miljö (fig. 36A, B och C). Vid iskanten byggs en sedimentpacke successivt upp i havet från subglacial sediment-tillförsel. Under denna process blir den distala (västra) sluttningen brantare och brantare, vilket resulterar i att gravitationsflöden av sediment uppstår i den distala sluttningen (kan också uppstå på grund av havsströmmar). Det är dessa gravitationsflöden som bildar turbiditer när rörelsen tappar sin energi och stannar. Den här typen av cyklisk sedimentation kan skapa jordlager med goda vattenförande egenskaper (ex. Plink-Björklund & Ronnert 1999).

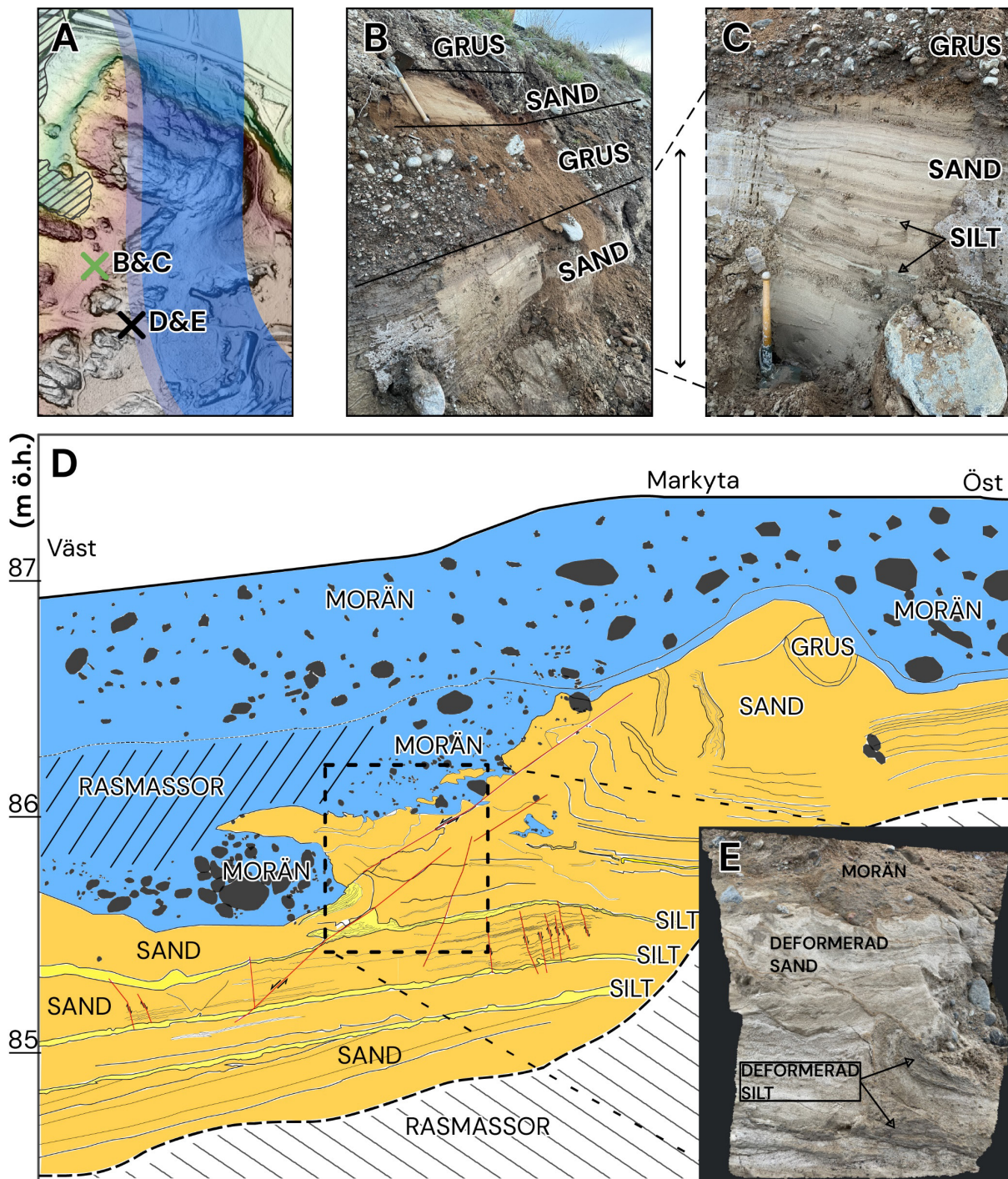
Lerhyllan

När massorna avlägsnades, avlastades instabila områden, vilket gjorde det möjligt att även undersöka jordlagren inom skredärret på den så kallade 'lerhyllan' (fig. 37).

Sonderingar och borrhningar (för hand) på lerhyllan visar att mäktigheten lera, som inte följt med i skredet, är minst 5 m. Det finns flera sand- och skalskikt i lerpacken. Vid undersökning och rensning av den västvända skärningen i lerhyllan bröts leran isär i block. Sprickbildningen är primärt vertikal och de millimetertunna sprickorna är sandfyllda med fluviala sedimentstrukturer (fig. 37B och C). När leravsättningar torkar och krymper kan vertikala sprickor bildas. Här utesluts dock denna typ av 'torrsprickor' eftersom läget är cirka 6 m under den naturliga markytan där det inte är troligt att det har varit torrt efter lerans avsättning. Vidare, strukturerna i sandfyllnaden är inte kompatibel med den förklaringen då dessa lager skulle ha haft en allmänt horisontell laminering. Eftersom leran torkar från markytan och ner, bildas killiknande, vertikala sprickor, som sedan kan fyllas med vattentransporterad sand ner i dessa. Här syns inga tecken på att sprickorna vidgas uppåt i jordprofilen. Leravsättningar kan även få sprickbildning genom hastiga tryck eller skakningar, och det kan ske även om leran är vattenmättad (Brodzikowski 1981). Trycket ovanifrån kan möjligtvis skapas från gravitationsflöden från överlagrande sediment, eller en inlandsis.

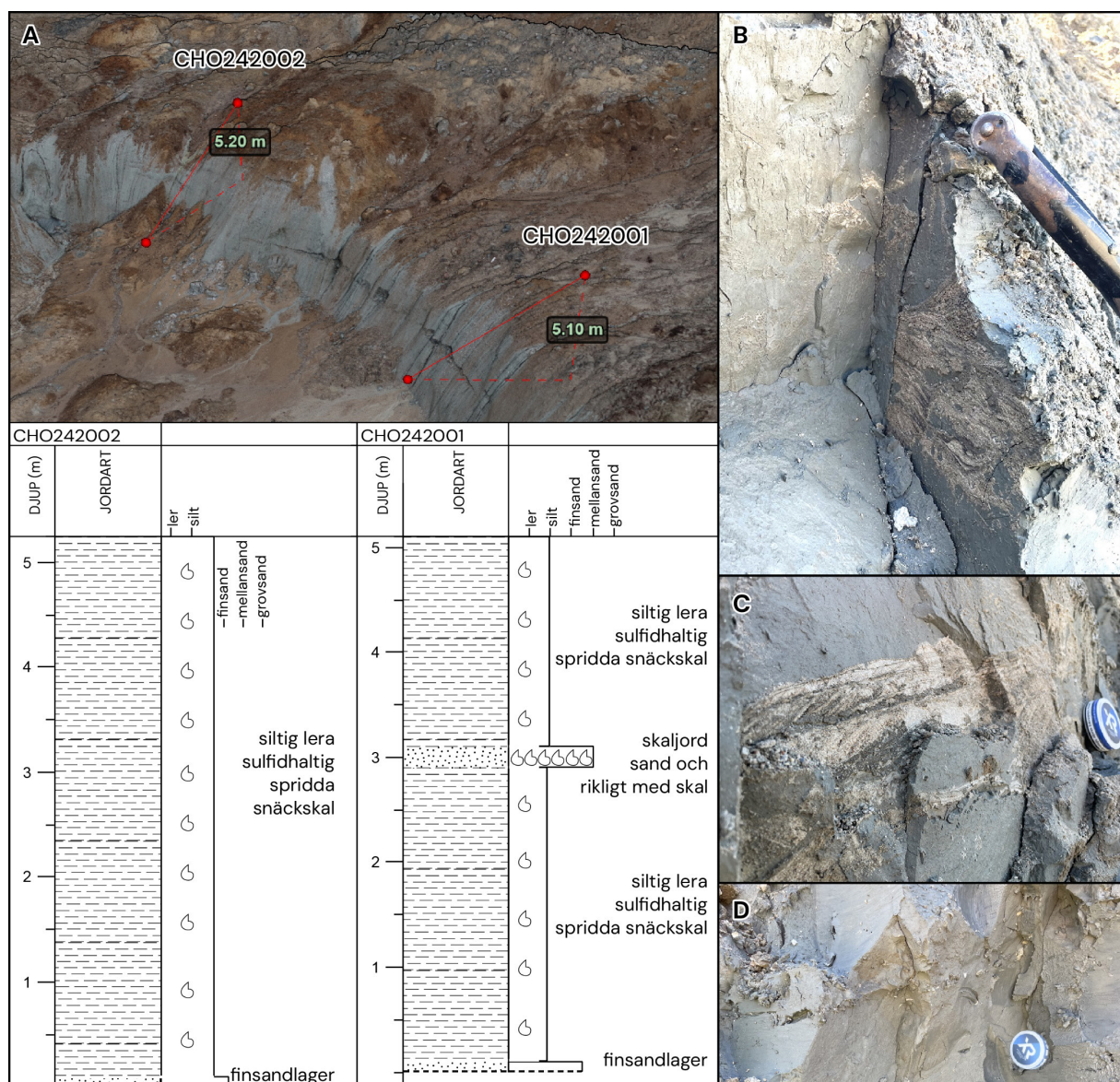
Här tolkas företeelsen av sprickor indikera på kompaktering av leran, vilket också kan ge en rimlig förklaring till sandstrukturerna som observeras. Sprickbildningen är relevant för att förstå den geologiska historien och förutsättningarna för skred. Sprickorna ökar genomsläppligheten i leravsättningen, och bör därmed räknas in i tolkningen av sannolika områden med förutsättningar för kvicklerebildning och relativt högre grundvattenföring.

Generellt innehåller leran en del sulfid, mest i form av fläckar.



Figur 36. Österut från skredområdet observerades cykliskt avsatt sand och silt med graderade lager, samt gruslager (B, C). Ytterligare cirka 100 m sydost förekommer ställvis ett tunt lager morän ovanpå isälvssediment (D, E). Deformation i sedimenten tyder på en isframstöt, som avlagrat moränen ovanpå de tidigare avsatta isälvssedimenten. Siltskikten innehåller även lera i varierande grad. Röda streck representerar förkastningsplan och små svarta pilar den relativa rörelsen. Foto: Christian Öhring.

Den dokumenterade stratigrafien från berggrunden i öster ner till centrum av skredgropen presenteras översiktligt i figur 38. Markytorna i figuren är extraherade från LiDAR-bilder, medan bergprofilen är modellerad från geotekniska borrhningar och observerat berg-i-dagen. Den lila linjen representerar den modellerade markytan från den 20 september 2023, två dagar

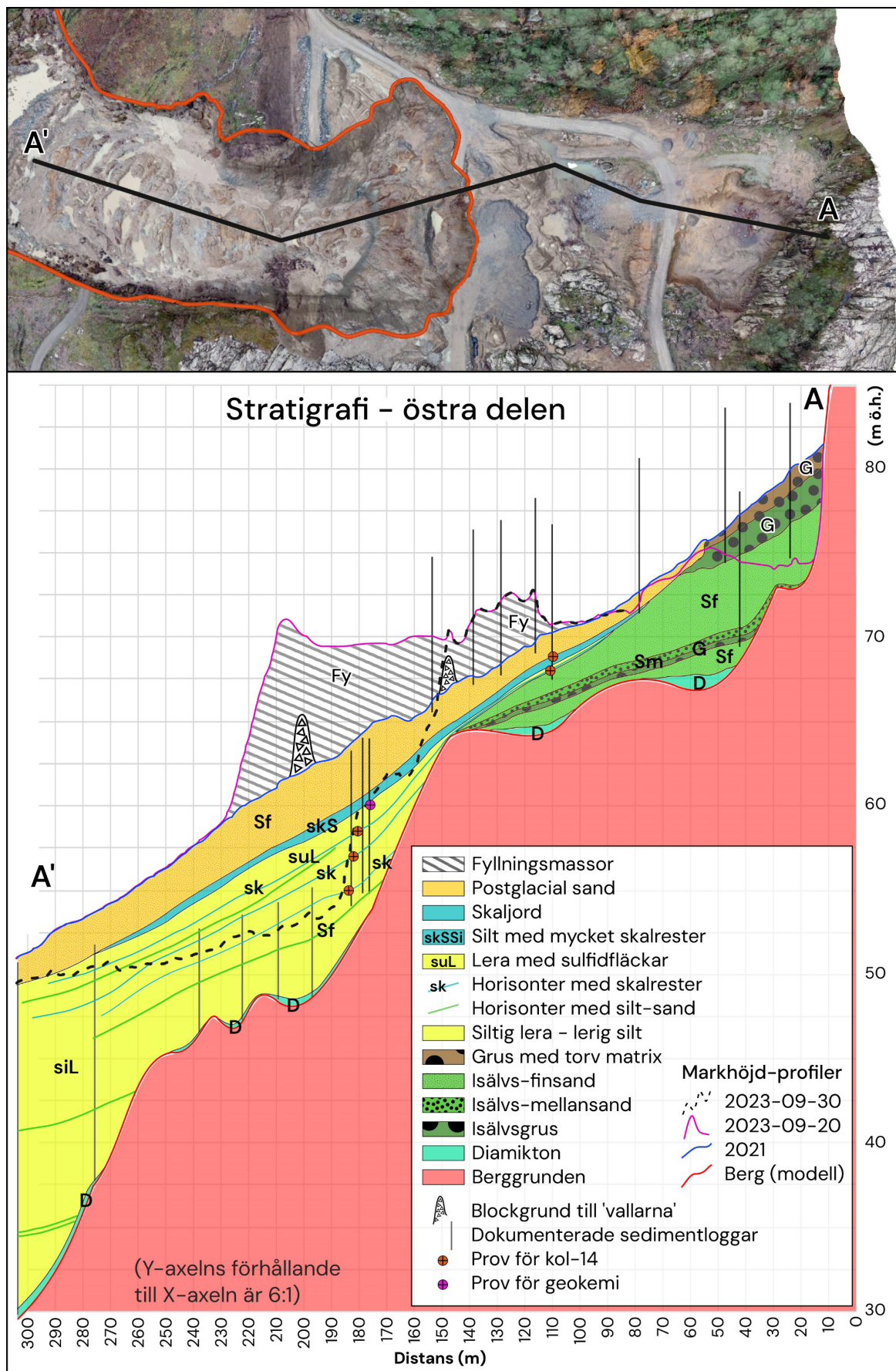


Figur 37. I den så kallade lerhyllan syns tydliga subhorisontella lager (**A**: 3d-modell från Swescan). sonderingar i lerhyllan avslöjar dessa lager på överensstämmande djup. Utgrävning i hyllans front visar att lagren till stor del består av skalrester (**D**). Vid utgrävningen släpper leran i block, som avgränsas av tunna, vertikala sandfyllda sprickor (**B**, **C**). Foto: Christian Öhrling.

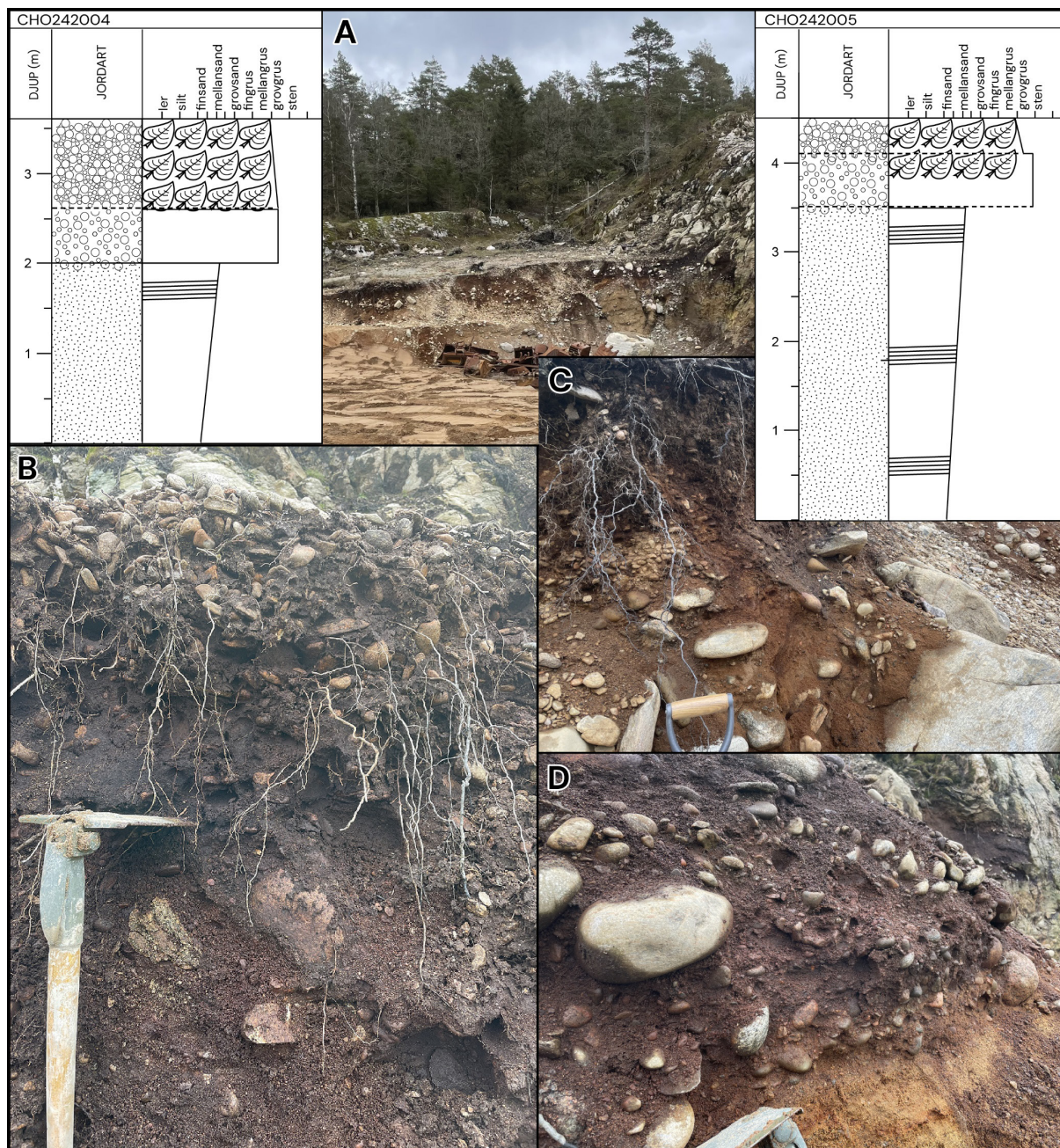
före skredet. Denna linje sammanfaller med den svartstreckade (efter skredet) utanför, öster om, skredärret. Orange representerar svallad sand och silt, gult siltiga leriga sediment, och grön isälvs-sand och grus. I leran förekommer linjer som representerar silt-sandskikt och lager dominerade av skal.

Avsättningarna visar alltså tydliga spår från iskantens närhet, och ytlagren präglas av strandprocesser. Översta jordlagret närmast berget i öst består av isälvssand med inslag av gruslager, och i ytan ett väl rundat grus blandat med organiskt material (fig. 39A och B). Materialet är svallat och hålrummen fyllda med organisk jord, vilket indikerar en skyddad tidvattenpåverkad strandmiljö innan ytan torrlades.

Flera geotekniska borrhningar genomfördes i svackan söder om 'skredgropen', där en uppfyllnad också gjorts (se den högra delen i ex. figur 19).



Figur 38. Höjdprofiler från tre olika tidpunkter: 2021 före exploatering, 2023 efter uppfyllnad, 2023 efter skred. Tolkning av de naturliga jordlagren, baserat på fältobservationer och sonderingar.



Figur 39. Mot berget i öst har exploatören grävt ur isälvsediment, vilket blottat en cirka 20 m lång skärning (A). Det allra översta lagret består av ett välrundat strandgrus med ett matrix av torv (B). Här under övergår det i isälvsgrus, men med ställvis ett stort innehåll vittringsjord, och sedan isälvsand (C, D).
Foto: Christian Öhrling.

Stratigrafi västra och norra delarna

I områdets dalgång har omfattande geotekniska undersökningar utförts, både före och efter skredet. SGU genomförde också en maskinborrning norr om skredområdet för att dokumentera hela lagerföljden utanför skredet, samt vidare förstå om det forna skredet kan ha påverkat stratigrafien som observerats inom norra delen av skredområdet.

På skreddagen gjordes dokumentation och observationer omkring Preem-området. När man gick utmed den nyligen uppressade leran kändes en stark doft av sulfid. Leran som återfanns i ytan

6 till 20 m. Vid 26 och 28 m är inslagen av sandskikt påtaglig. På 28 och 30 m djup är bedömningen gyttjig siltig sand, och vid 32 och 34 m gyttjig silt.

Norr om skredområdet visar SGU:s borrhning (CHO242020) att lerdjupet är över 43 m. Cirka 70 m norr om borrhlokalen finns en jorddjupsuppgift om 46 m från en brunnsborrning. Jordlagerföljden är relativt homogen och det förekommer skalrester i varierande mängd utmed hela borrhprofilen. Översta metern består av svallsand (något siltig finsand), sedan följer lös lera hela vägen ner med undantag för några tunna silt-sand-skikt. Två tydliga, cirka 5 cm mäktiga lager av grövre sediment förekommer på cirka 37 och 42 m djup.

Analys av jordprover

Porvattenkemi var tyvärr inte möjligt att analysera under utredningen. Detta beror främst på osäkerheten att analysera porvatten som har exponerats för syre när exempelvis den organiska halten i lerproverna är relativt hög. Utvalda prover från tre borrhål analyserades, varav det första är borrhål 23CW127, vilket är beläget söder om skredområdet, mellan E6 södergående körbana och avfart (fig. 40). Det andra är 23CW020, som är i norra delen av skredområdet vid Byggmax område. Det tredje är CHO242020, som borrades 130 m norr om E6 bro över Ucklumsvägen utanför skredområdet, dock inom de förmodade skredmassorna från fornskredet (avsnitt *Geomorfologi* ovan). Utöver dessa analyserades ett lerprov (CHO245003) från handborrningen (CHO242001) på den så kallade lerhyllan inom skredgropen (bilaga III).

Kornstorlek

De analyserade lerproverna innehåller generellt 35–45 procent lera, och 40–70 procent silt, vilket visas som kornstorleks-fördelningskurvor i figur 41, 42 och 43. I allmänhet syns ingen tydlig skillnad i kornstorlek mellan de olika platserna. Avvikelse förekommer med de största i 23CW020.

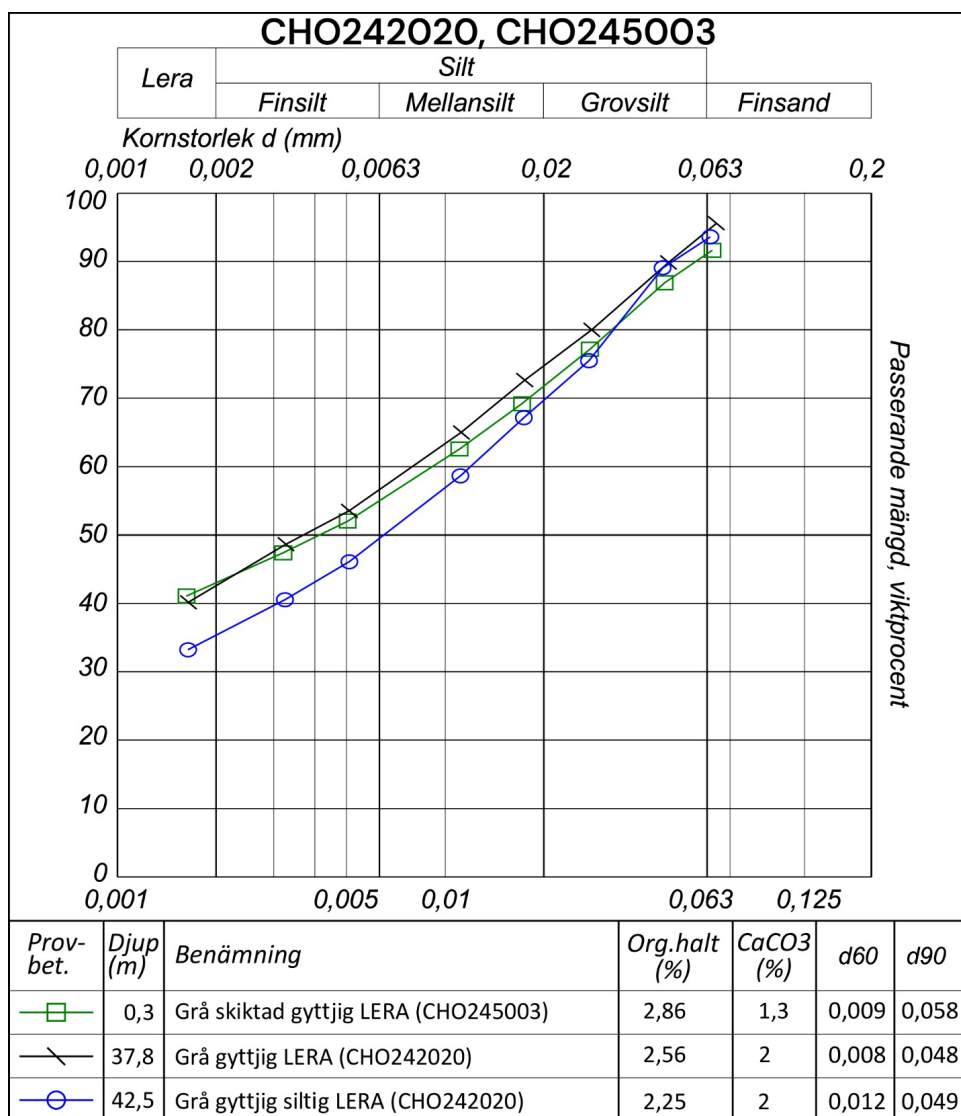
Dessa avvikelser syns i proven från 26 och 30 m djup och de har en lägre lerhalt samt en betydande andel sand. På 26 m är lerhalten 21 procent, silthalten 56 procent och andelen sand 23 procent. På 30 m är respektive andelar, 11, 34, och hela 55 procent sand. Enstaka gruspartiklar förekommer, men är ovanligt varför de inte räknas in här. I 23CW127 finns en avvikelse i provet från 11 m djup, där förhållandet mellan ler och silt förskjuts åt mer silt (fig. 42).

I CHO242020 har provet från 42,5 m djup norr om skredområdet lägre lerhalt än det från 37,8 m (fig. 41). Provet från lerhyllan (CHO245003) är från 58,5 m ö.h., cirka 6 m under den naturliga markytan (2011 höjdmodell). Kornstorleksfördelningen härifrån liknar den från 37,8 m i CHO242020, 34 m i 23CW020, och 13 m i 23CW127.

Den organiska halten är betydande ($> 2\%$) i majoriteten av proverna. Även här sticker 23CW020 ut med 4 procent på 28 m djup och 3,2 på 32 m.

Mineralogi

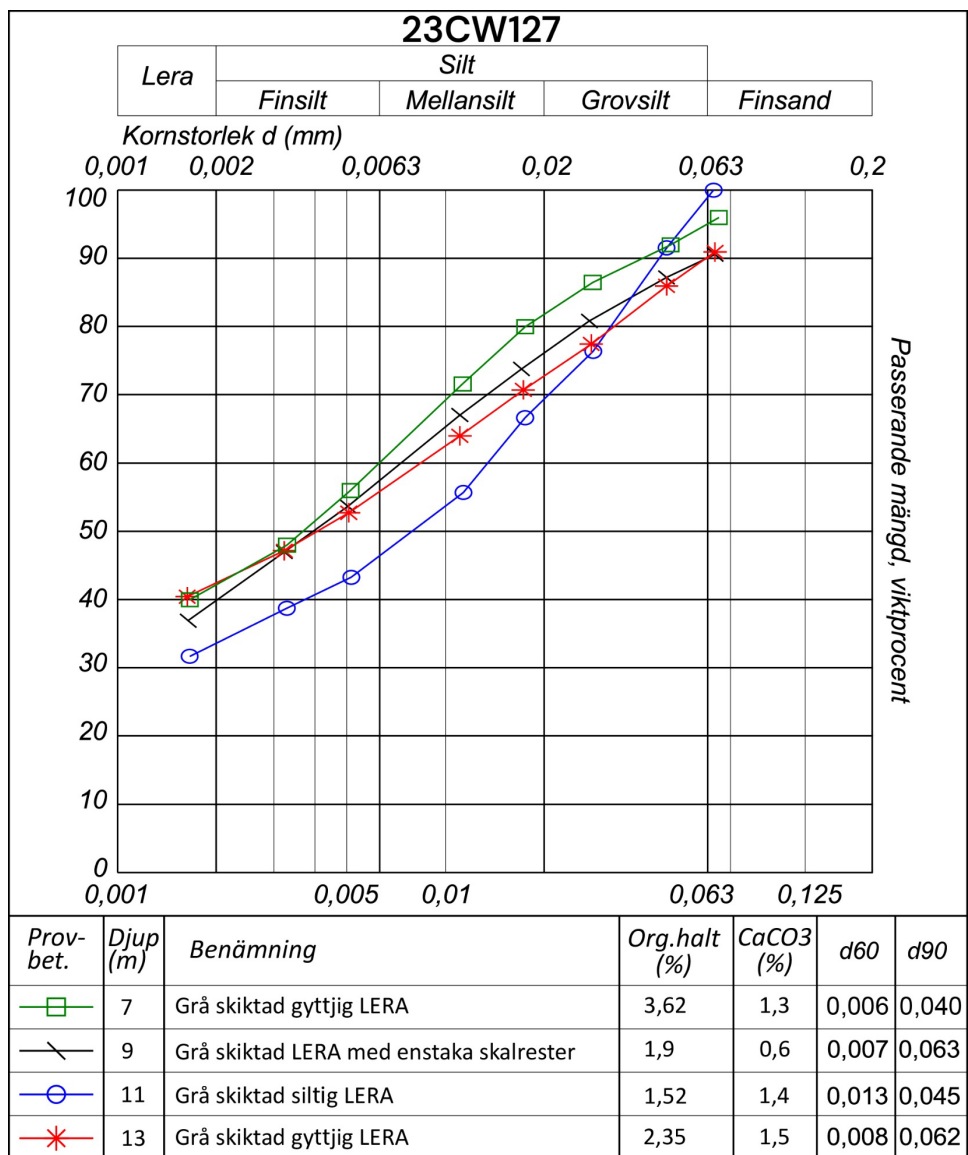
Diffraktogram från XRD-analysen presenteras i figur 44. Alla prover har en liknande mineral-sammansättning där kvarts och plagioklas (albit) är de dominerande mineralen, därefter förekommer mindre delar kalifältspat (mikroklin). Proverna innehåller också amfiboler och en mycket liten andel kalcit (bilaga III – Jordprov).



Figur 41. Kornstorlekskurvor från sedimentationsanalys med hydrometer-metoden. Handsönderingen på lerhyllan (CHO242001), varifrån prov CHO245003 analyserades. Borrhål CHO242020 är lokaliserat norr om skredområdet och två prover analyserades.

Lerminarlogin är svårtolkad eftersom ingen etylglykol- eller värmebehandling utfördes vid provpreparering. Resultaten indikerar att proverna består av illit och klorit, samt en liten del kaolinit. Inga svällande mineral har identifierats med säkerhet.

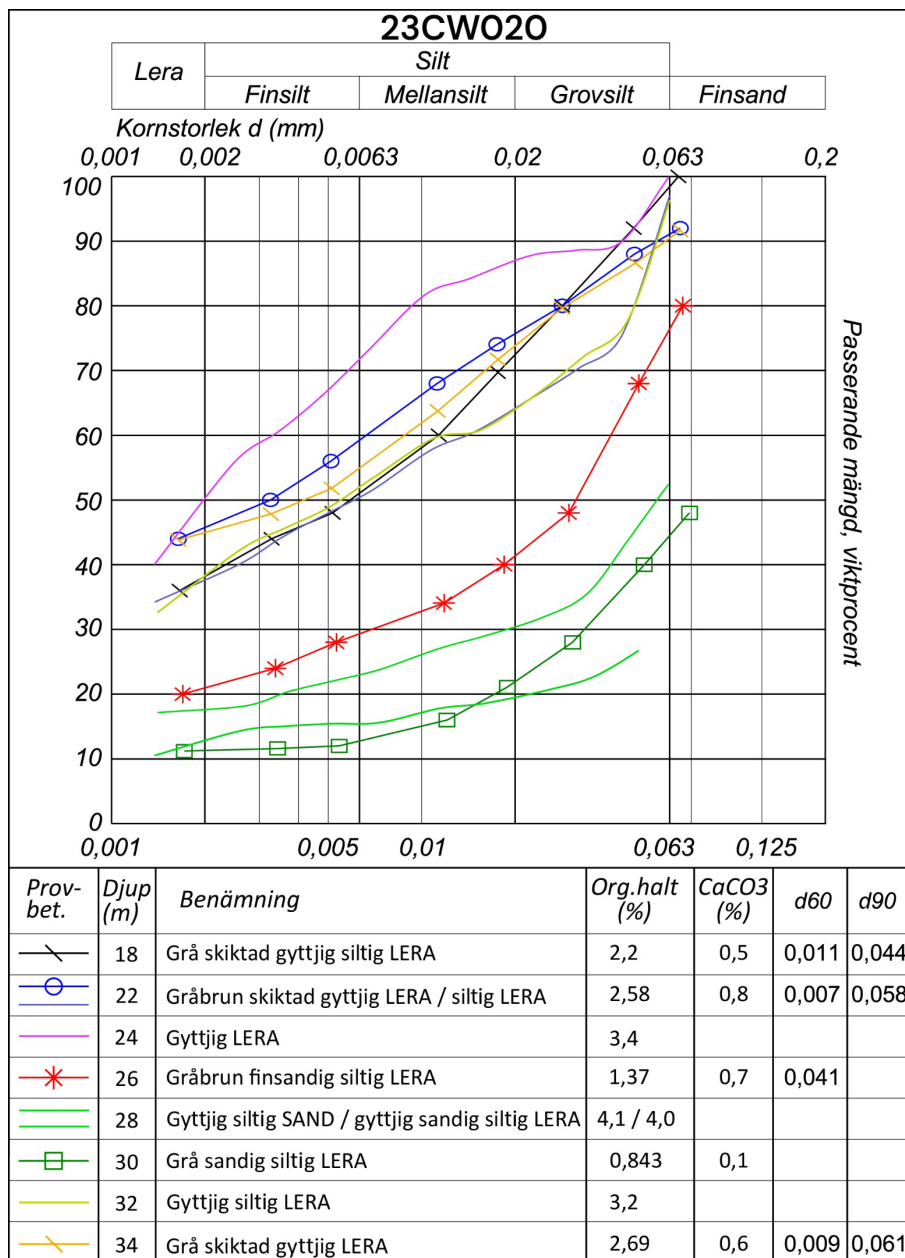
Kvoten mellan illitens 001-topp och 002-topp i diffraktogrammen ger ett mått på dess kemiska sammansättning (tabell 2). Förändringar i en lagerföljd kan tyda på olika grad av vittring. I 23CW127 syns lägre värde i det översta provet (7 m) och i provet från 11 m djup, vilket kan tyda på viss omvandling. Borrhål 23CW020 ger lägst värde på 30 m djup. Kvoten är låg i provet från lerhyllan (CHO245003).



Figur 42. Kornstorlekskurvor från borrhål 23CW127.

Tabell 2. Kvoten mellan illit toppen 001 och 002. Jämförelse mellan proverna i en lagerföljd kan ge en indikation av relativ vittringsgrad.

Prov	Illit(001) / Illit(002)	Prov	Illit(001) / Illit(002)
CHO242020: 37,8 m	6,90	CHO245003	5,20
CHO242020: 42,5 m	8,27	23CW020: 18 m	7,77
23CW127: 7 m	4,69	23CW020: 22 m	6,77
23CW127: 9 m	7,13	23CW020: 26 m	8,33
23CW127: 11 m	6,49	23CW020:30 m	6,33
23CW127: 13 m	5,71	23CW020: 34 m	7,19

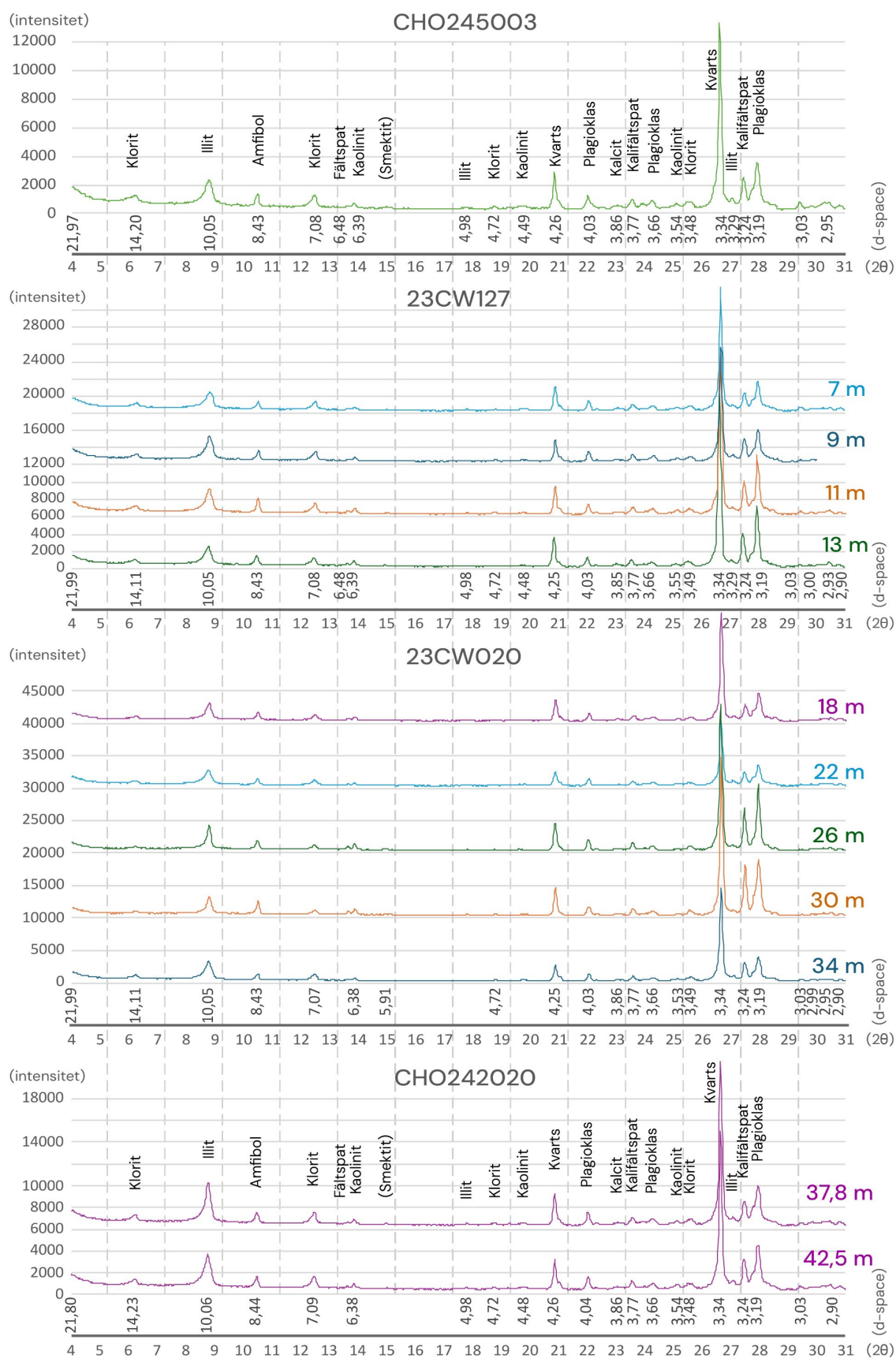


Figur 43. Kornstorlekskurvor från borrhning 23CW020, skapad från resultat av sedimentationsanalys med hydrometer-metoden.

Geokemi, totalhalter

En uppskattning av provernas vattenhalt gjordes genom att anta att hela viktandelen som försvann efter torkning vid 105 °C, bestod av vatten (ex. Hillel 2003). Vattenhalten är lägst i prover med en större andel sand.

Glödningsförlust (eng. *Loss of ignition; LOI*) har uppmätts efter bränning vid 1 000 C°. Glödförlusten ger ett grovt mått på jordens organiska halt. Förutom det organiska materialet bidrar förlusten av kristallvatten från lermineral (1–1,5 %) till den totala glödningsförlusten. Totalt analyserades 32 grundämnen, där halterna av kvicksilver (Hg) ligger under kvantifieringsgränsen för analysmetoden. Resultaten presenteras i sin helhet i bilaga III tillsammans med referensdata från resultaten av utredningen från skredet i Småröd, Munkedal (Engdahl m.fl. 2007), referensdata på glaciallera (Enghag 1999), nutida havssediment (Cato 1997), SGU:s databas



Figur 44. Diffraktogram från mineralanalys. Notera att skalan för intensitet på Y-axeln skiftar. X-axeln visar 2-Theta skalan, och för topparna presenteras även d-avståndet.

Marina sedimentprov (SGU 2024j), och Naturvårdsverkets generella riktvärden för förorenad mark (Naturvårdsverket 2024).

För att jämföra trender mellan olika grundämnen i proverna så normaliserades totalhalts-värdena så att alla värden hamnar mellan noll och ett, där lägsta värdet i borrhålet sätts till 0 och det högsta värdet 1 (bilaga III).

Borrhål 23CW127

Det finns en korrelation mellan silthalt, kisel och natrium, där alla dessa ökar på 11 m djup (fig. 45). Kisel är huvudbeståndsdel i kvarts, vilket är ett hårt motståndskraftigt mineral. Vålbearbetad och väl sorterad sand och silt består ofta primärt av kvarts. Kvartsinnehållet ökar på 11 m djup i XRD-resultaten (fig. 44). Ökad natriumhalt kan tyda på att lermineralen på dessa nivåer har bundit natrium som transporterats med grundvattnet. Detta kan i sin tur bero på utlakning av salter från andra nivåer i jordprofilen.

Zirkonium och yttrium följer samma trend som natrium, och strontium följer kisel. I samma trendgrupp, men med avvikande högre halter på 7 m djup, ingår strontium och skandium.

Kadmium, nickel, kobolt, bly, zink, koppar och magnesium bildar en trendgrupp där halterna sjunker från de högsta värdena på 7 m till 9 m och från 9 till de lägsta värdena på 11 m, för att sedan stiga på 13 m djup (fig. 46). Glödningsförlusten (LOI) följer samma mönster. Denna trend korrelerar negativt med natrium, kisel, zirkonium, och yttrium. Liknande trend, men utan lika tydlig ökning på 13 m, har järn, krom och tenn.

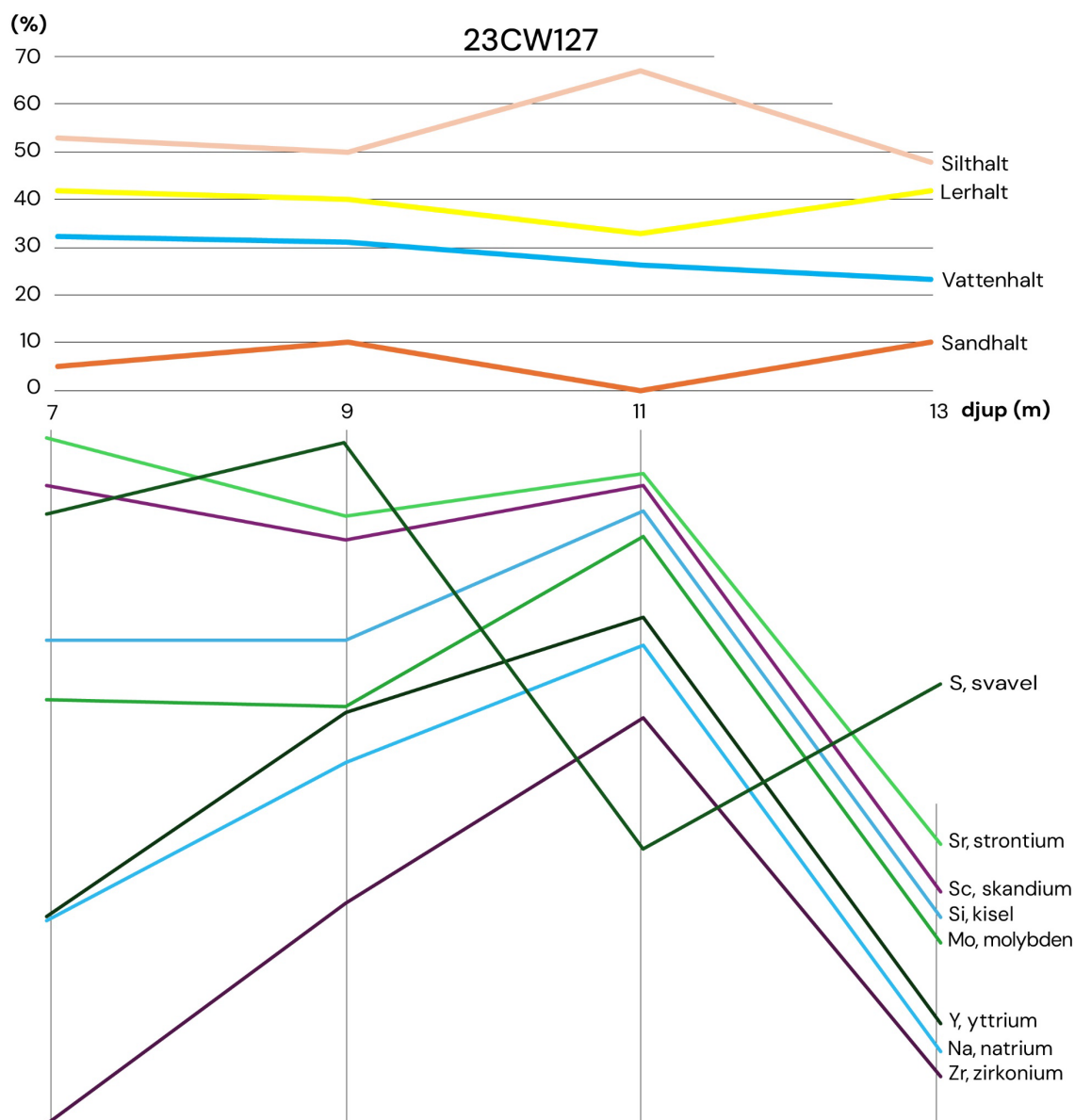
Aluminium, barium, fosfor, volfram och mangan minskar allmänt med djupet, men har en avvikande ökning på 11 m. Ökningen av mangan är knapp, medan volfram sticker ut.

Kalcium avtar i sjunkande hastighet med djupet. Svavel visar ett avvikande mönster med maxvärdet på 9 m, lägsta på 11 m, och en ökning på 13 m djup.

Borrhål 23CW020

I borrhål 23CW020 återkommer liknande korrelation mellan silt, sand, kisel, natrium, strontium, zirkonium och yttrium (fig. 47).

Koppar, bly och zink bildar en trendgrupp, vidare visar kadmium, beryllium, tenn och antimon ett liknande mönster. Gruppens halter minskar från 18 m till ett minvärde på 30, för att sedan tydligt öka på 34 m djup. Fosfor och skandium har en liknande trend med skillnaden att minvärdet är på 26 m djup.



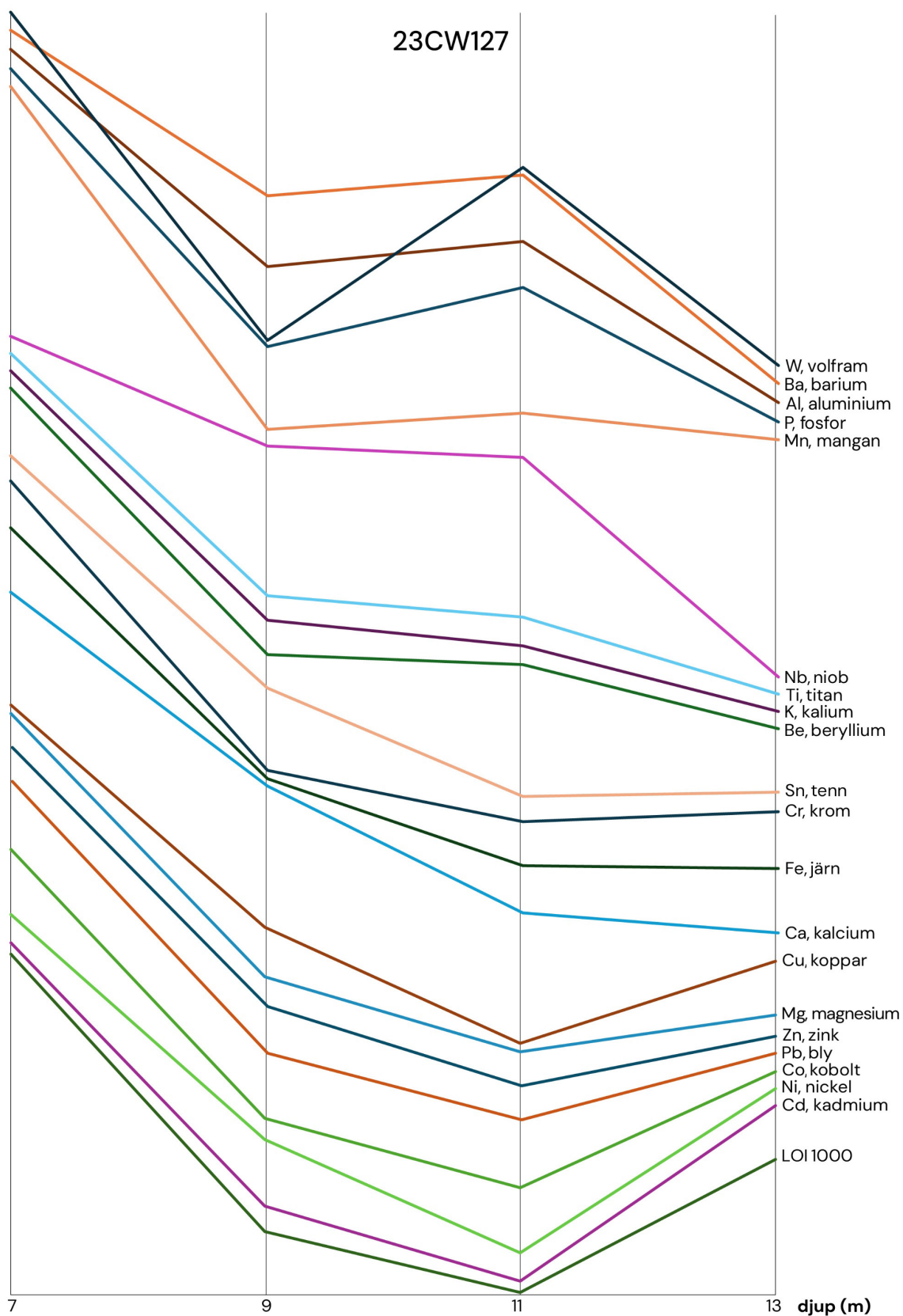
Figur 45. Kornstorlek och vattenhalt tillsammans med geokemiska trender i borrhål 23CW127.

Kornstorlek och vattenhalt presenteras i procentandelar, medan de geokemiska värdena är normaliserade så att maxvärdet utmed varje graf är 1 och minvärdet 0. Se tabell i bilaga III för de uppmätta halterna.

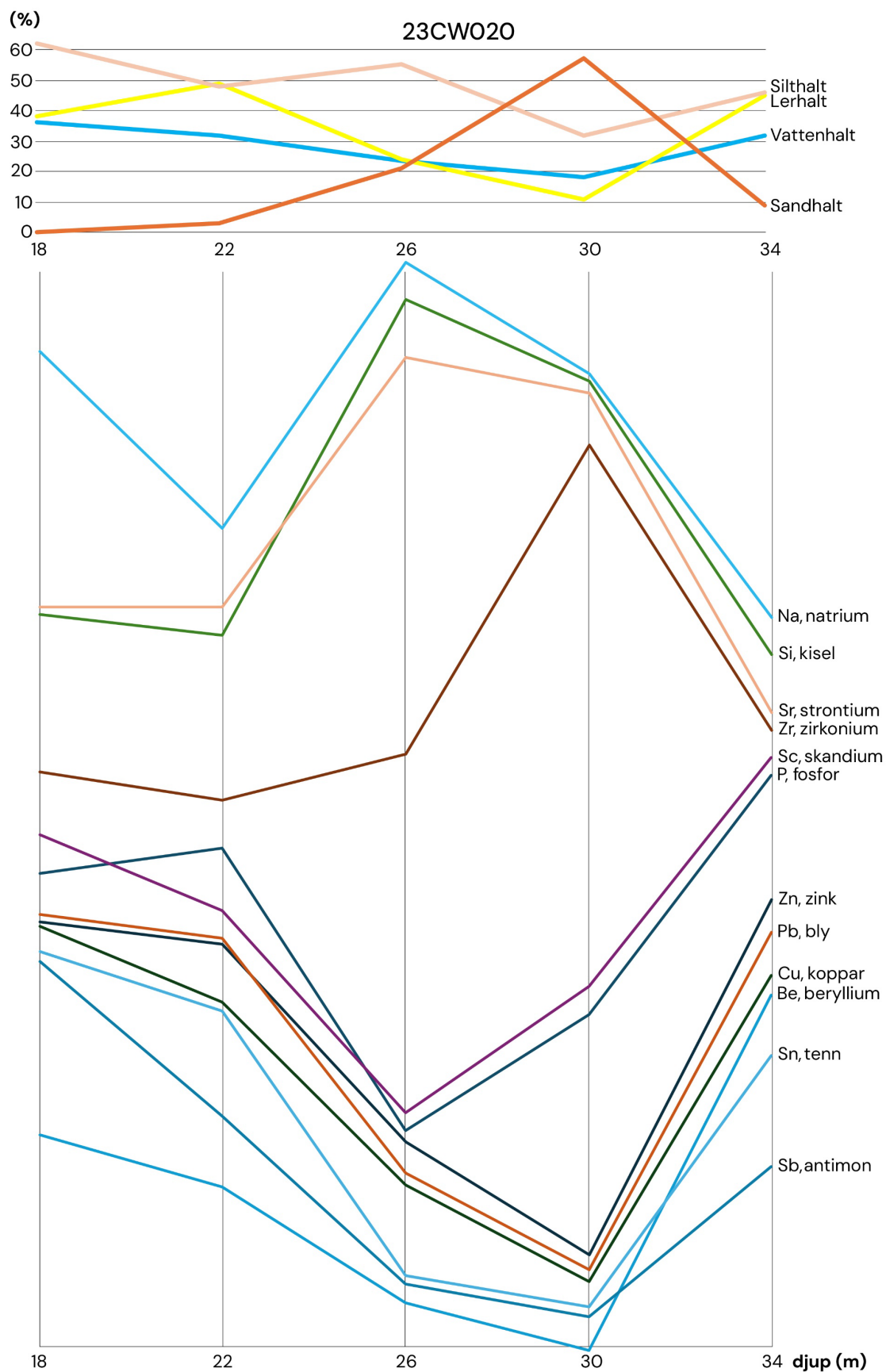
Kalciumhalten skiljer sig inte mycket mellan 18, 22, 30, och 34 m, men har en tydlig avvikelse till minvärdet på 26 m. Svavelhalten är låg på 18, 26, 30, och 34 m, men avviker kraftigt till maxvärdet (sett till samtliga prover) på 22 m djup (fig. 48).

Aluminium, barium, kalium och mangan bildar en gruppering där alla når sitt minvärde på 30 m djup och ökar sedan till i paritet med sina högsta halter på 34 m.

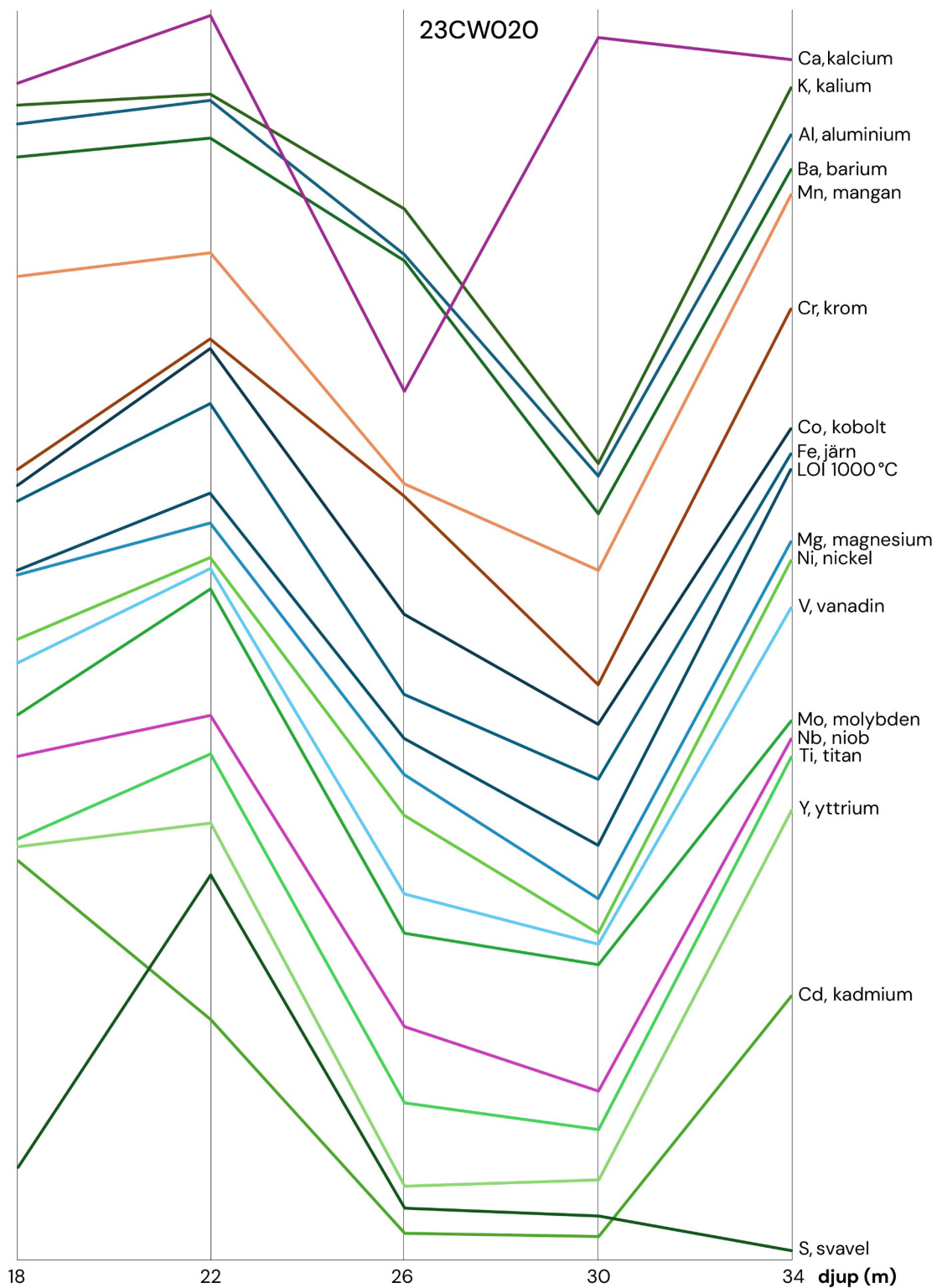
En gruppering med krom, kobolt, järn, magnesium, nickel och vanadin har stora likheter med trenden hos molybden, niob, titan och yttrium. Dessa grupperingar korrelerar med glödningsförlusten (LOI).



Figur 46. Geokemiska trender i borrhål 23CW127, fortsättning från figur 44. Värdena är normaliserade så att maxvärdet utmed varje graf är 1 och minvärdet 0. Se tabell i bilaga III för de uppmätta halterna.



Figur 47. Kornstorlek och vattenhalt tillsammans med geokemiska trender i borrhål 23CW020. Kornstorlek och vattenhalt presenteras i procentandelar, medan de geokemiska värdena är normaliserade så att maxvärdet utmed varje graf är 1 och minvärdet 0. Se tabell i bilaga III för de uppmätta halterna.



Figur 48. Geokemiska trender i borrhål 23CW020, fortsättning från figur 47. Värdena är normaliserade så att maxvärdet utmed varje graf är 1 och minvärdet 0. Se tabell i bilaga III för de uppmätta halterna.

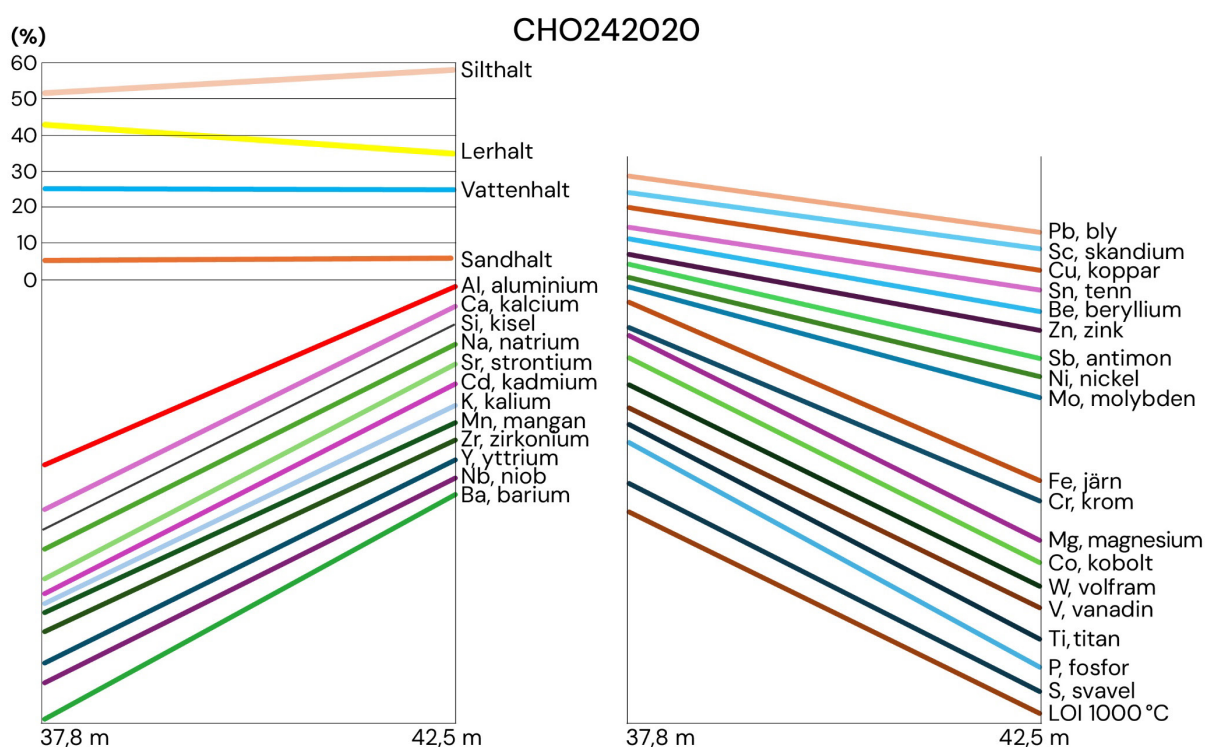
Borrhål CHO24020

Borrningen utfördes med SGU:s borrhandsvagn norr om skredområdet. Lagerföljden består av cirka 1 m siltig-finsandig svallsand i ytan, sedan omväxlande siltig lera, lerig silt, och inslag av enstaka gruskorn, skalrester och sulfidfläckar. Silt och sandskikt observerades på djupen: 1,8; 4,7; 5,7; 6,7; 8; 19; 36; och 42 m. Prover från 37,8 m och 42,5 m skickades på analys.

Silthalten är högre, och lerhalten lägre, i det djupare provet (fig. 49). De geokemiska resultaten mellan de två djupen kan delas in i tre grupperingar. Aluminium, kalcium, kisel, natrium, strontium, kadmium, kalium, mangan, zirkonium, yttrium, niob, och barium bildar tillsammans en grupp, där halterna ökar vid 42,5 m. Gruppering nummer två består av bly, skandium, koppar, tenn, beryllium, zink, antimon, nickel, och molybden. Dessa ämnen minskar något med djupet. Gruppering nummer tre minskar mer betydande och korrelerar även med glödningsförlusten (LOI). I gruppen ingår järn, krom, magnesium, kobolt, volfram, vanadin, titan, fosfor, och svavel.

Prov CHO245003

Ett gytjt lerprov togs i överkant av lerhyllan i skredgropen, på 58 m ö.h., cirka 6 m under ursprunglig markyta (foto i bilaga III). Den organiska halten är 2,86 procent och vattenhalten drygt 30 procent. Andelarna lera, silt och sand är 43, 49, och 8 procent respektive. Vid jämförelse med de andra proven är resultatet mest likt 23CW127 vid 9 m djup.



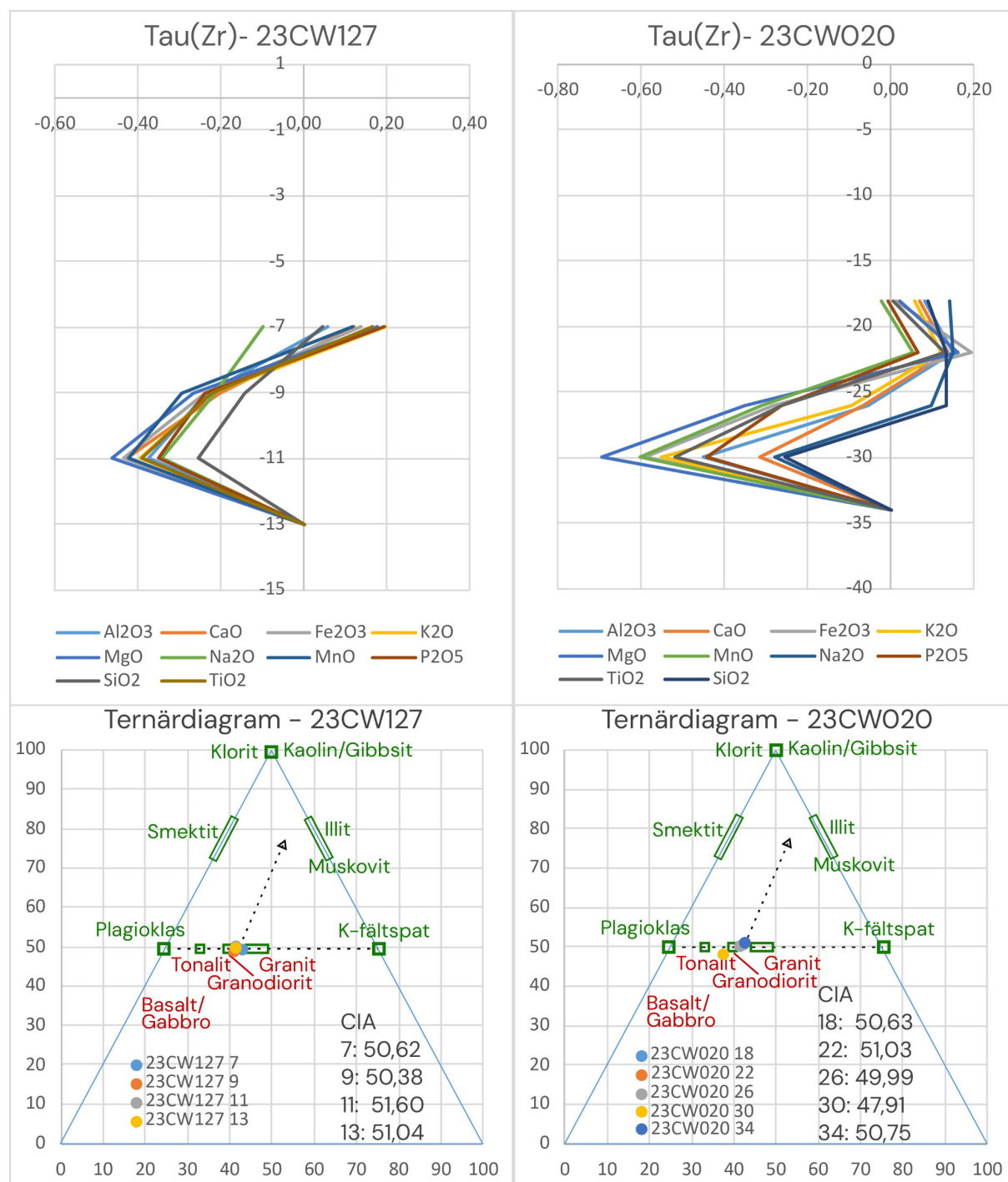
Figur 49. Kornstorlek och vattenhalt tillsammans med geokemiska trender i borrhål CHO24020. Kornstorlek och vattenhalt presenteras i procentandelar, medan de geokemiska värdena halternas respektive trend.

Vittringsgrad

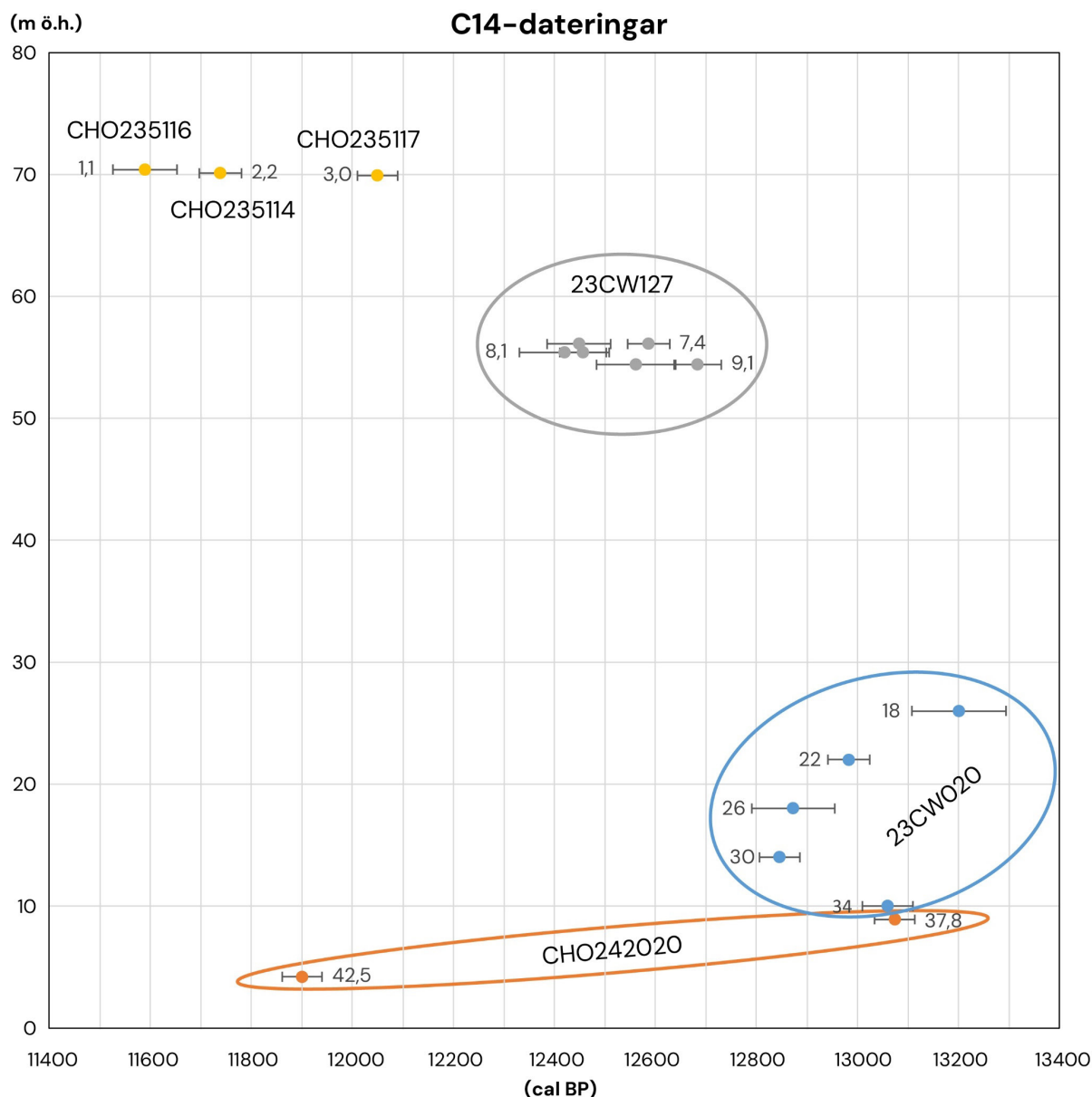
Graden av vittring kan uppskattas genom att använda oxidernas viktprocent (Algeo m.fl. 2025). Tau-diagram utvärderar förluster och vinster av ämnen under vittring eller förändring av bergarter (fig. 50). De kemiska förändringarna kvantifieras i förhållande till ett ämne som antas vara immobilt. Här testades zirkonium (Zr), niob (Nb), och titanium (Ti), varav zirkonium visade sig fungera bäst. Värdena normaliseras sedan mot bottenprovet (djupast i profilen) för att se hur

jordprofilen ovanför skiljer sig relativt botten. Ett annat vis att uppskatta vittringen är att räkna ut index för kemisk omvandling (Chemical Index of Alteration, CIA) och plotta det mot de molära proportionerna av Al_2O_3 (A), $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ (CN) och K_2O (K) i ett så kallat ACNK-ternärdiagram (fig. 50).

Resultaten från Tau-diagrammen indikerar att minimal vittring förekommer i de övre proverna jämfört med det nedersta provet från varje borrhål. Inte heller ternärdiagrammen visar någon



Figur 50. Inga tydliga tecken på kemisk vittring i de övre proverna jämfört med det nedersta provet från vardera borrhål, och ursprungsbergart anges vara granodiorit.



Figur 51. Kol-14-dateringar där x-axeln representerar ålder och y-axeln vilken höjd över nuvarande havsyta som provet inskaffats.

tydlig vittring, dock noteras en anomali på 11 m djup i 23CW127 och på 30 m i 23CW020. Ursprungsbergart anges vara granodiorit. Detta stämmer väl överens med den lokala berggrundens sammansättning (bilaga II).

Kol-14-datering

Femton kol-14-dateringar på olika skal har genomförts (fig. 51). Åldersbestämning av skal från lerhyllan (fig. 37) visar att den två och en halv meter mäktiga leran som undersöktes avsattes under 100 till 200 år för cirka 12 500 år sedan ($12\,457 \pm 46$, $12\,587 \pm 46$, $12\,684 \pm 47$). Det ger en sedimentationshastighet av 8 till 19 mm per år, vilket indikerar att lerpartiklarna sedimenterade i flockulerat tillstånd (ex. Elverhøi m.fl. 1983). Dateringarna bekräftar också att det var hav här – isen hade smält bort – för 12 500 år sedan.

Skal från skärningen i figur 34 daterar till $11\,590\pm63$ vid 1,1 m, $11\,739\pm42$ vid 2,2 m, och $12\,050\pm40$ vid 3 m (fig. 34E). Provet från 3 m representerar övre delen av ett mäktigt skaljordslager, som går att följa, från den östra grusvägen ner till de övre lagren i lerhyllan.

Artidentifikation och mäktigheten av ansamlingen skal tyder på att vattendjupet var cirka 10 till 30 m när lagret bildades. Över lagret består stratigrafen av silt, finsand, och överst svallsand. Under skallagret blir sedimenten lerigare.

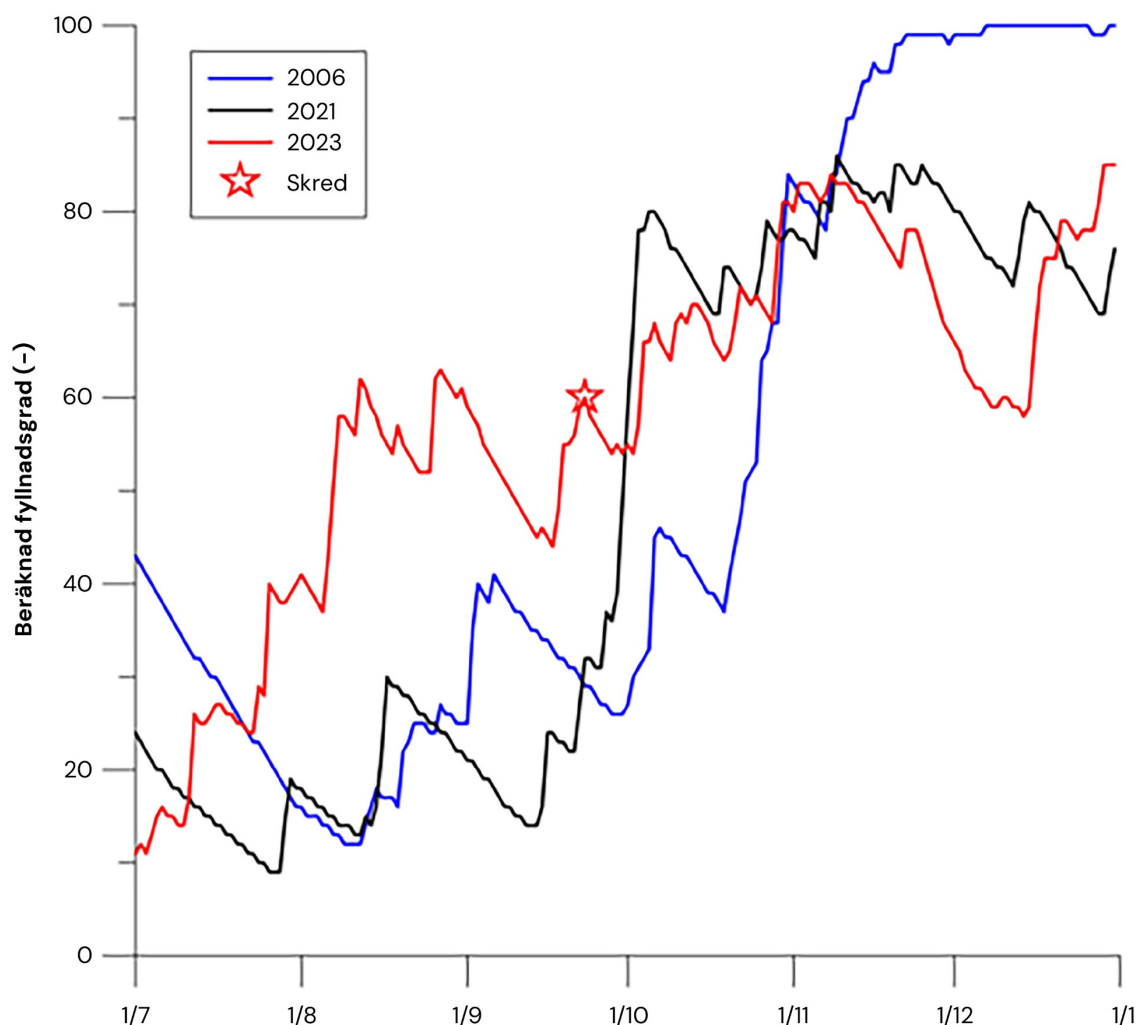
Skal från proverna på 18, 22, 26, 30, och 34 m djup i borrhål 23CW020 gav åldrarna $13\,201\pm93$, $12\,983\pm41$, $12\,873\pm82$, $12\,846\pm40$, och $13\,060\pm50$. Dessa resultat följer inte den förväntade trenden att djupare sediment är äldre än de grundare (fig. 51).

Dateringar från borrhål CHO242020 gav $13\,074\pm40$ år före nutid på 37,8 m djup och $11\,901\pm39$ på 42,5 m. Även dessa resultat är överraskande.

Hydrogeologi

Vid tidpunkten för skredet (23 september 2023) var den beräknade fyllnadsgraden (enhetslöst värde, 0–100) i modellerade grundvattenmagasin i opåverkade områden 60, och hade stigit från 44 (17 september 2023) på grund av nederbörd under perioden före skredet. Det innebär att den naturliga, opåverkade grundvattennivån varit lika hög eller högre under 40 procent av tiden sedan 1961. Den föregående ökningen av fyllnadsgraden var inte heller särskilt anmärkningsvärd. Det finns flera andra perioder då fyllnadsgraden ökat lika mycket eller mer som beräknade fyllnadsgraden under hösten 2023. I figur 52 visas även 2006 och 2021 som exempel på år då nivån varit minst lika hög och steg minst lika snabbt som tiden för skredet.

Topografen och geologin vid skredområdet är gynnsam för att bilda artesiskt grundvattentryck i dalgången. Detta är också dokumenterat i SGI:s utredning vid anläggandet av E6 (Lindmark & Norder 1987). Detta är sannolikt en av orsakerna till att det förekommer kvicklera i området. Liknande förhållanden har dokumenterats från flera utredningar av skred (ex. Blomqvist & Gustafson 1981, Caldenius m.fl. 1956, Fredén m.fl. 1981, Jakobson 1952).

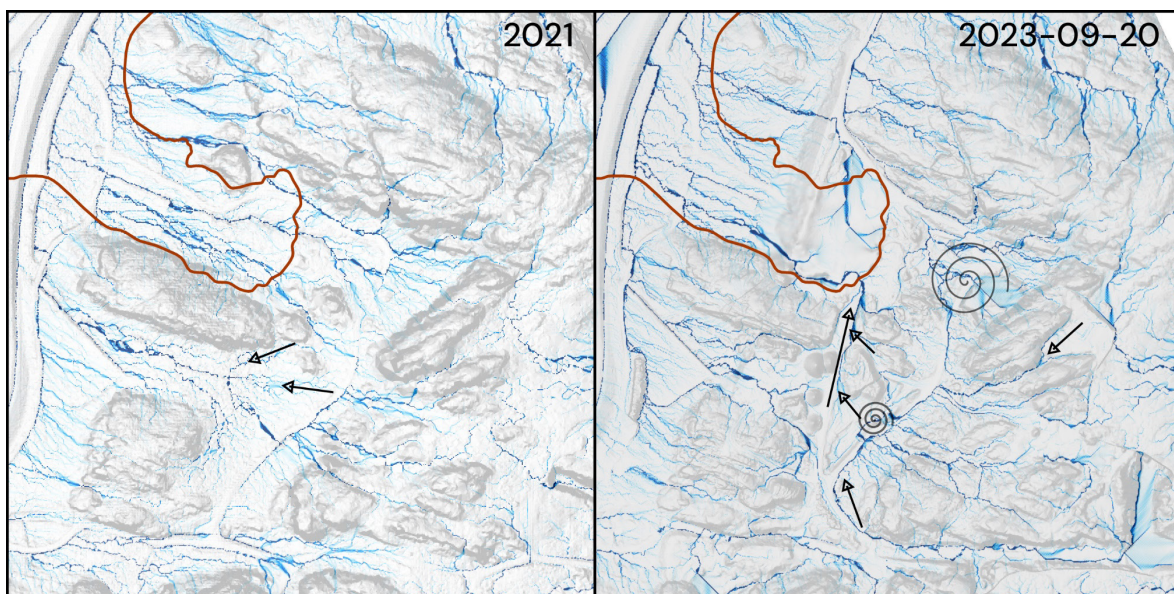


Figur 52. Modellerad fyllnadsgrad i grundvattenmagasin, juli till januari under tre olika år.

Hydrologi

Olika markarbeten i östra området har påverkat avrinningens vägar (fig. 53). Naturligt kanaliserades redan mycket vatten ner i 'skredsvackan'. En stor förändring följde av framför allt tre arbeten: berg sprängdes bort, fyllnadsmassorna i den södra svackan, samt väg, bortschaktning och resulterande bassäng (lilla spiralen i figur 53). Resultatet blev att avrinningsområdet till svackan utökades; en större del av nederbörden valde vägar hit.

Uppe på berget i öst, hade exploatören nyligen grävt ur en torvmark och anlagt en parkerings- och uppställningsplats. Detta har också förändrat avrinningen, vilket gör att vattnet nu rinner



Figur 53. Jämförelse mellan avrinningens vägar före och efter exploatering. Spiralerna markerar de 'nya infiltrationsbassängerna.



Figur 54. Vallen som byggdes upp vid uppfyllandet i den östra delen av skredområdet visar spår av erosion. Svartstreckade linjer i **(A)** markerar var skredärret utbildades. Linjer i **(B)** representerar en tolkning av små skred (orange), sprickbildningar (röd), skredavsättning (blå), sättning (gul). Svart linje föreslår en tänkt horisontell yta, utifrån vilken massorna förefallit sjunkit. Foto: M. Berglund, 2023-09-20.

snabbare, genom och från denna yta. Även en större andel av nederbörden som faller på denna yta, rinner ner mot skredområdet.

Täktverksamheten (utbrutet naturgrus) nedanför, intill berget, har skapat en uppsamlingsbassäng som leder till ökad grundvatteninfiltration (stora spiralen). Det verkar även som att arbetsvägen,

vilken kommer in i området från sydöstra hörnet och svänger norrut i kartornas centrum (fig. 53), lett till att vatten som tidigare rann västerut nu rinner norrut in mot skredområdet.

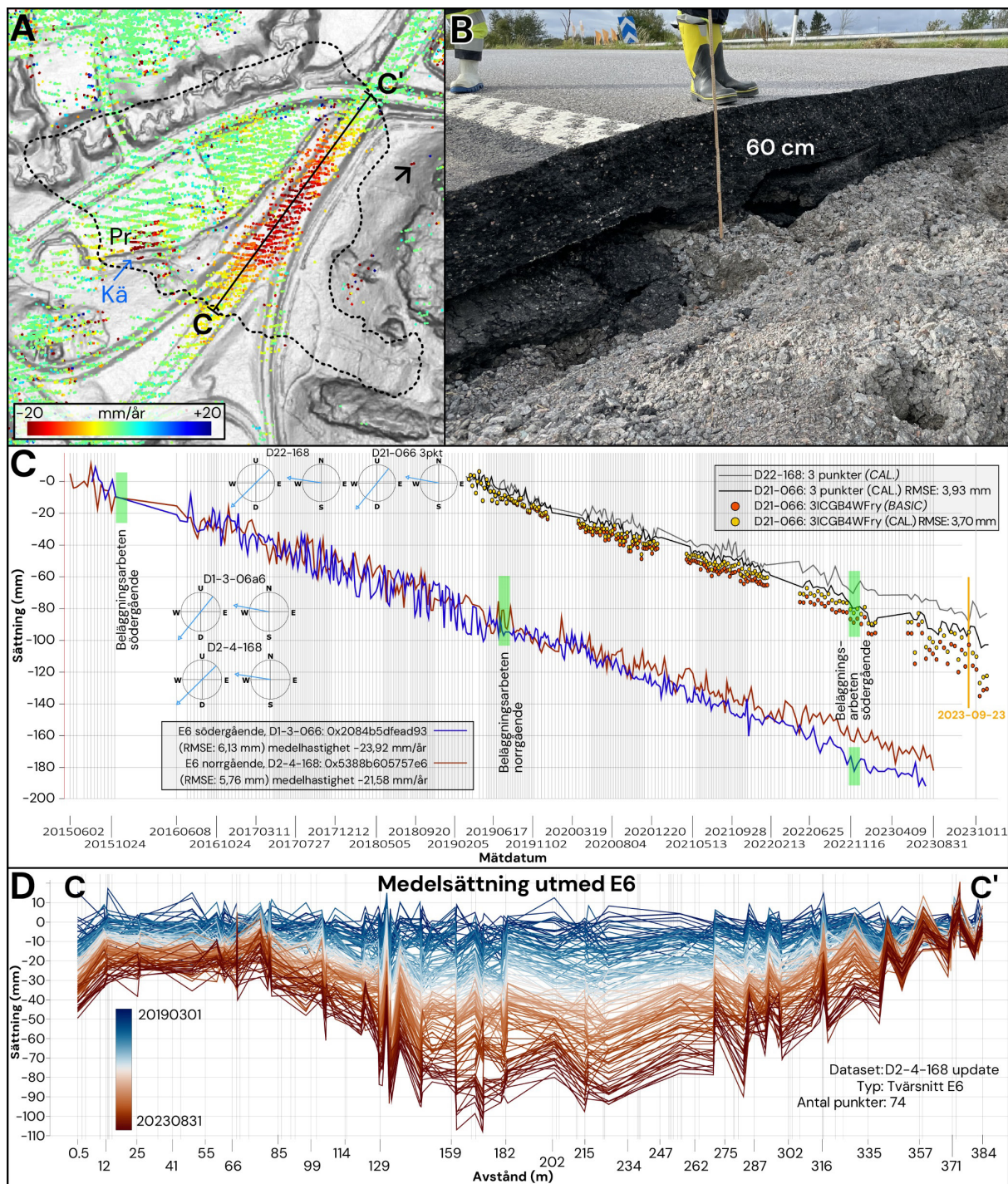
Höga vattennivåer i Kärrbäcken observerades två dagar före skredet. På fredagseftermiddagen, bara timmar före skredet, observerades ”ett pulserande” vattenflöde vid östra sidan av trumman under E6 i nordligaste delen av skredområdet. Det observerades också att vatten rann ut ur den västra slänten av ’vallen’. Fotografier från två dagar före skredet visar att erosion förekom på flera ställen i vallen (fig. 54).

InSAR

InSAR-mätningar har varit tillgängliga i området sedan slutet av 2014. Det är tydliga avvikelser utmed E6 (fig. 55A). Sedan mätningarnas början har den 370 m skredpåverkade sträckningen av E6 satt sig med drygt 5 mm per år (medel inom en korridor, från bron över Ucklumsvägen i norr till skredärret i söder; figur 55C). De centrala delarna med de mörkast röda mätpunkterna i figur 55A visar ställvis sättningar mellan 21 och 24 mm per år under mätperioden juni 2015 till augusti 2023 (fig. 55D). I mätserier som sträcker sig över tidpunkten för skredet kan rörelser urskiljas (fig. 55C).

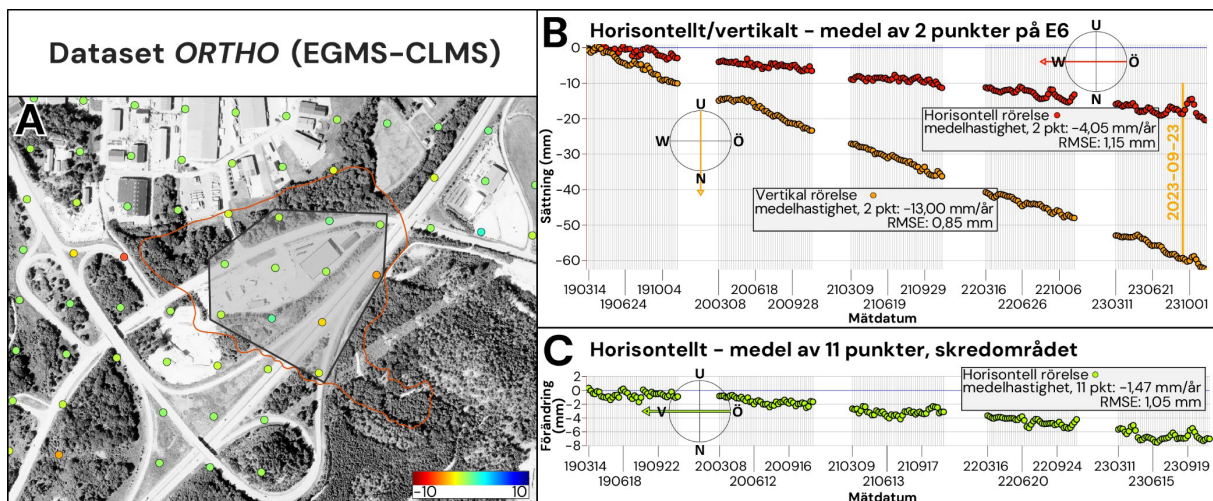
Datasetet ’ORTHO’ från CLMS innehåller analyserade, bekräftade och generaliserade mätpunkter, som visar horisontell (EGMS 2024a) respektive vertikal (EGMS 2024b) rörelse. Det är viktigt att notera att ’Ortho’ data är nerskalat till 100 m upplösning så det går inte att utvärdera förskjutningen i detalj. Dessutom bortser man helt från nord-sydliga rörelser, vilket sannolikt förstärker den presenterade ost-västliga rörelsen. Följaktligen är det vanskligt att göra tolkningar av horisontella rörelser ur denna datamängd. Det finns elva sådana mätvärden i dalgången inom skredområdet, varav två är utmed E6 (fig. 56A). Dessa två punkter visar cirka 4 mm per år åt öst mellan mars 2019 och oktober 2023 (rörelser vid skredet är med andra ord inkluderade), och den vertikala sättningen under samma tid ger 13 mm per år (fig. 56B). Standardavvikelse av 1,15 mm för de horisontella rörelserna på 4 mm visar att det är högst osäkra resultat. Om punkterna ändå representerar verkliga rörelser så noteras att resten av mätpunkterna i området visar obetydliga värden, vilket skulle innebära att det inte fanns några utbredda jordkrypningar i området (fig. 56A och C).

Ett medel av 10 mätpunkter från området med de största sättningarna fram till några veckor före skredet ger cirka 17 mm per år. Om sättningshastigheten antas ha varit konstant sedan E6 invigdes 1992 innebär det en total sättning av en dryg halv meter (17 mm x 31 år). Detta antagande är naturligtvis ett räkneexempel och kan inte antas representera verkligheten, vilken är att sättningar normalt följer en exponentiell kurva (ex. Waltham 2009). Efter skredet observerades att flera lager asfalt har lagts till under åren för att underhålla vägen och kompensera för sättningar (fig. 55B). Trafikverket har tillhandahållit data från deras vägövervakning som bland annat visar vägens långsamma deformation, och när beläggningsarbeten utförts.



Figur 55. Markrörelser som detekteras med InSAR ger potentiellt detaljerad information om rörelser i både vertikal och horisontell riktning. Röda punkter i (A) visar att marken påverkas av sättningar, medan de gröna punkterna innebär att marken är stabil. Pr = Preem, Kä = Kärrbäcken. Tjocka lager av asfalt bekräftar att underhåll med ny beläggning har krävts utmed sträckan för att undvika vägsador (B). Medelberäkningar av de punkterna på E6 med kraftigast sättning (C). Baserat på 74 mätpunkter utmed en korridor längs C-C' i (A) visualiseras hur sättningssvackan längs E6 har utvecklats mellan 2019 och 2023 (D). Bearbetad från EU:s Copernicus Land Monitoring Service information. Foto: Christian Öhring.

Figur 57 åskådliggör sättningssvackan i E6 vid 2013 och 2018. Det går att urskilja störningar i sättningsdiagrammen vid de tidpunkter som beläggningsarbeten pågått (fig. 55C). Vi har inte kunnat beräkna den totala sättningen i detalj eftersom man både tar av och lägger på material vid arbetena. Ett antagande, baserat på räkneexemplet ovan och vetskapen om beläggningsarbeten, är



Figur 56. InSAR-dataset, 'ortho east-west' visar mätdata i både vertikal och horisontell riktning, som generaliserats till en punkt per 100 x 100 m ruta (A). Det bör noteras att de horisontella beräkningarna helt bortser från nord-sydlig rörelse och de är statistiskt osäkra, vilket innebär att datamängden ska tolkas med stor försiktighet. Beräknade värden från de två punkterna som ligger utmed E6 inom skredområdet (orange) där diagrammets röda punkter (B) visar cirka 4 mm östlig rörelse. Medel av de elva punkter som finns inom skredområdet (skuggad polygon med svart kant i A) visar cirka 1,5 mm östlig rörelse (C). Standardavvikelsen (RMSE) i de olika mätresultaten visar att osäkerheten är hög. Det noteras att inga utbredda jordkrypningar kan utläsas. Ortofoto: ©Lantmäteriet, Punktdata bearbetad från EU:s Copernicus Land Monitoring Service information.



Figur 57. Foton från Trafikverkets övervakningsprogram åskådliggör sättningssvackan år 2013 och 2018. Pilar markerar höjdpunkterna var emellan de största sättningarna inträffat. Foto 2013 visar södergående körbana, med 'strykjärnet' på höger sida, och foto 2018 är i norrgående riktning. Foto: Trafikverket.

dock att vi kan lägga till en halv meter till sättningssvackorna i de centrala delarna, vilket då ger att E6 har sjunkit över en meter sedan anläggandet. Jämfört med bygghandlingarna för E6 är dessa sättningar i paritet med de beräknade 0,9 m på 20 år (Lindmark & Norder 1987). De skriver också att: *Lättfyllningen är dimensionerad för att åstadkomma en mjuk sättningssvacka...* Figur 55D åskådliggör hur denna sättningssvacka har utvecklats mellan mars 2019 och augusti 2023.

Seismiska observationer

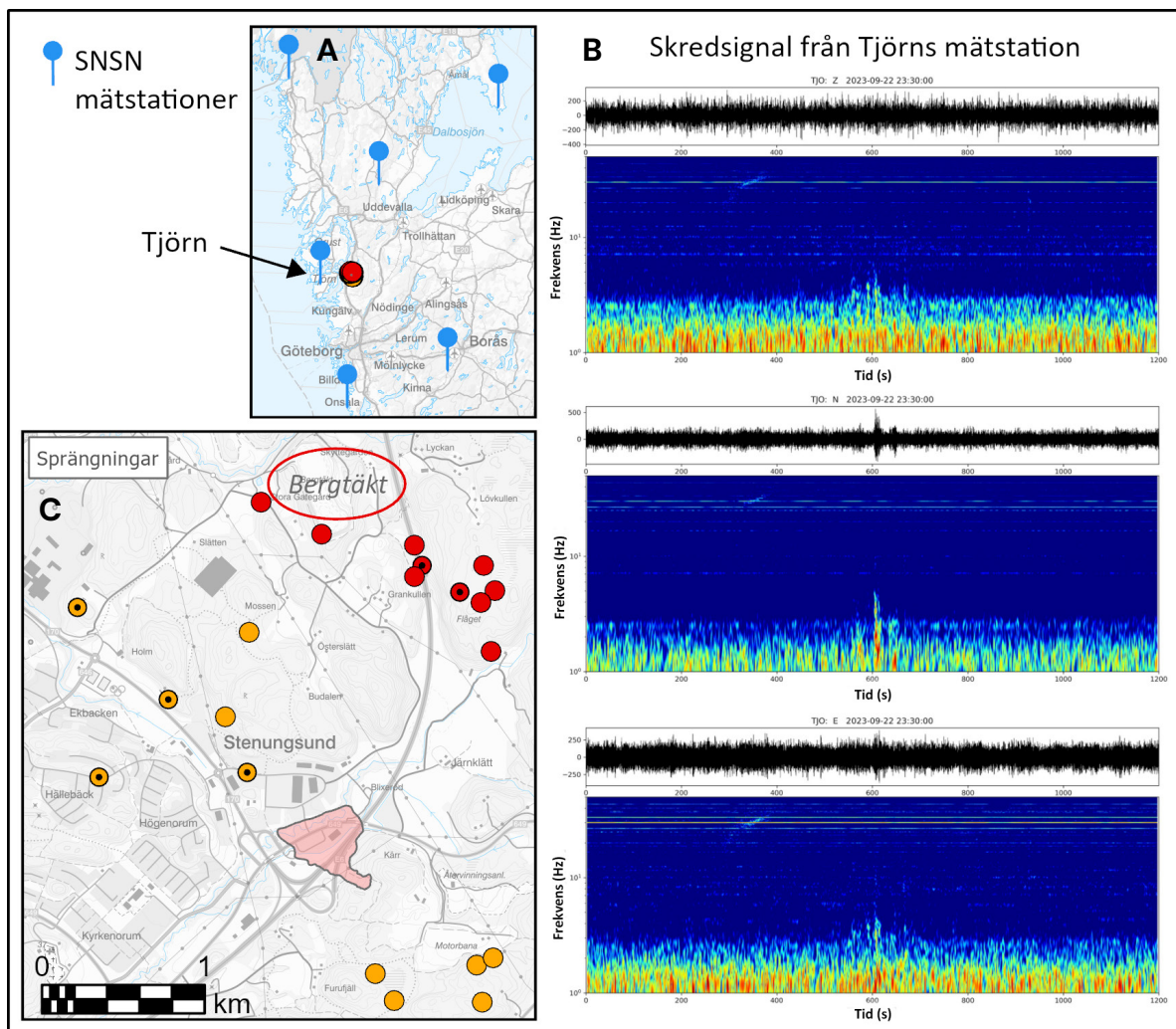
Vid kontakt med SNSN:s norska motsvarighet på NORSAR angående de seismiska signalerna från skredet i norska Gjerdrum i december 2020 framkom att de inte med säkerhet kunde identifiera några signaler från skredet. Däremot fanns det signaler som potentiellt skulle kunna härröra från skredet (C. Bruland, NORSAR).

Under den tidsperiod då jordskredet i Stenungsund antas ha inträffat tyder SNSN:s registreringar på att inte heller detta skred producerade särskilt mycket seismisk energi. Det finns dock en registrering på Tjörn-stationen som skulle kunna härledas till skredet (fig. 58B). Mellan 01:39:30 och 01:41:20 syns en triangulär signal i spektrogrammen för de tre komponenterna, med maximal amplitud 01:40:06. Signalen är svag, men liknar de signaler som har rapporterats för jordskred (ex. Suriñach m.fl. 2005). Med signaler från endast en mätstation, som inte uppvisar samma karaktäristik som signaler från sprängningar eller jordskalv, kan man inte fastställa signalens exakta ursprung och därmed inte med säkerhet säga att den kommer från skredet.

Om signalen härrör från skredet skulle den antyda att den del av skredrörelsen som påverkade berggrunden mest startade 01:39:30 och nådde sitt maximum knappt 40 sekunder senare, för att sedan avta under drygt en minut. Vilken del av skredrörelsen som orsakade signalerna är dock inte fastställd och är sannolikt svår att utreda. Möjligen uppstod signalerna när E6 slets isär, eller när eventuella stenblock slog i eller skrapade mot den underliggande berggrunden.

De sprängningar som SNSN observerat i skredområdet registreras tydligt på alla de närliggande mätstationerna (fig. 58A; Strömstad, Uddevalla, Borås, Onsala, och Tjörn), och som regel på ytterligare stationer ut till drygt 150 km avstånd.

SNSN har under de senaste åren detekterat och analyserat sprängningar i tre områden kring Stenungsund: nordost om staden vid bergtäkten Gategård, öster om staden och närmare centrala Stenungsund (fig. 58C). Även om SNSN inte fått bekräftelser från de ansvariga för sprängningarna, tyder data tydligt på att det rör sig om sprängningar. Sprängningarna nordost om staden, som sannolikt kommer från bergtäkten, sker ofta vid exakta klockslag, som 14:00, 15:00 och 16:00, och SNSN:s lokalisering av dessa hamnar 0,5–1,5 km öster om de faktiska platserna. Detta tyder på att sprängningar i centrala Stenungsund och öster om E6 också bör vara 0,5–1,5 km längre västerut än vad cirklarna på kartan visar. Inga sprängningar har registrerats av SNSN öster om E6 sedan maj 2023. Vid kontroll av de 27 sprängningar som finns loggade av exploatören öster om E6 så har fem detekterats. Därmed går det att konstatera att laddningarna har behövt vara på 150 kg eller mer för att registreras av SNSN. De resterande 22 är betydligt mindre, varav en på 125 kg och de andra under 100 kg. För att en sprängning ska registreras av SNSN måste den alltså vara tillräckligt stor eller väl kopplad till berget. Sprängningarna vid bergtäkten är något kraftigare än andra i området. Figur 57C visar de sprängningar som SNSN har registrerat och manuellt analyserat under 2023. Fler sprängningar kan ha förekommit, eftersom inte alla analyseras manuellt, men data från september 2023 har granskats för att identifiera alla sprängningar registrerade på fler än en station.

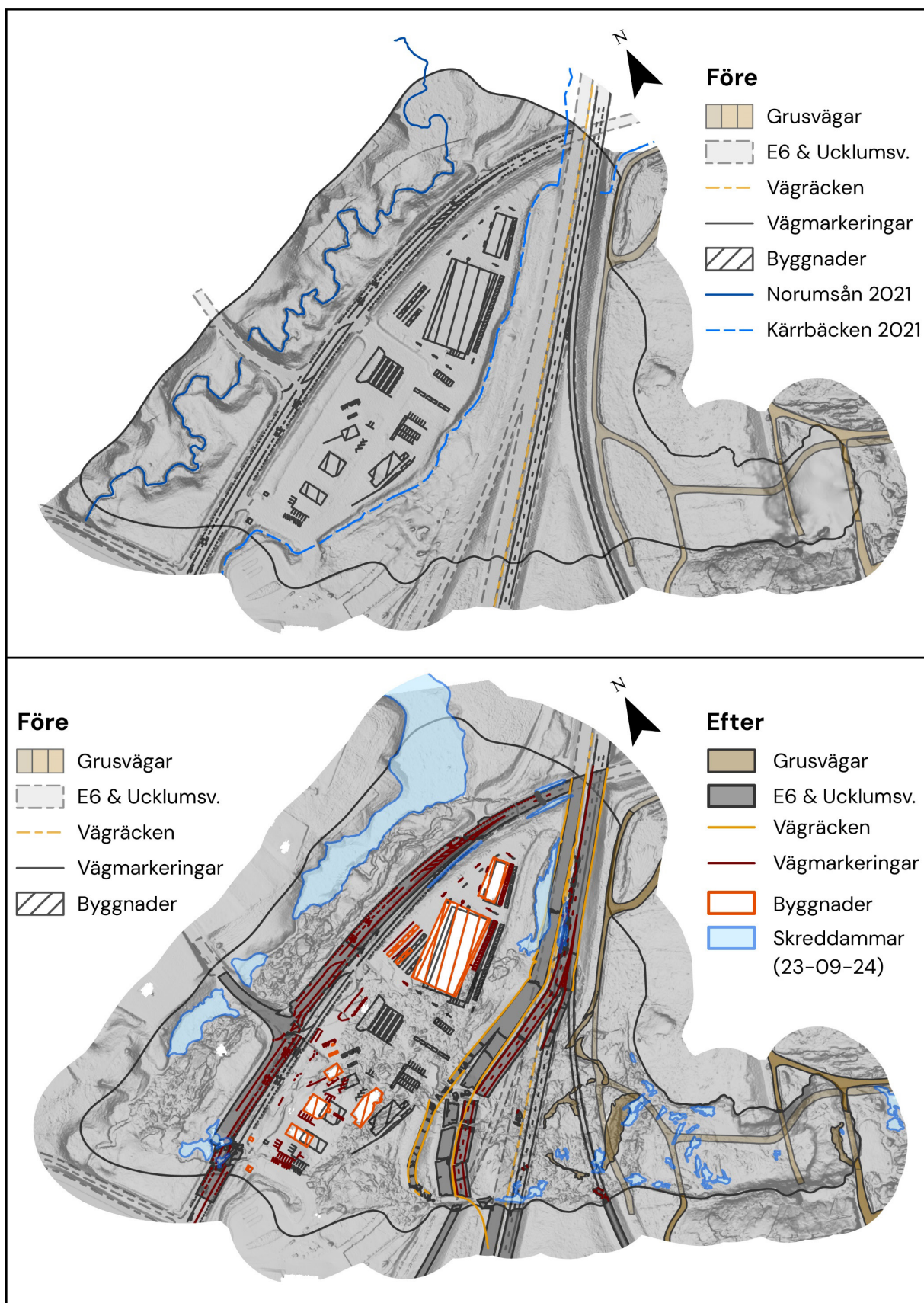


Figur 58. SNSN:s mätstationer i området runt Stenungsund, blå nålar (A). Vågformer och spektrogram från stationen på Tjörn, 1 200 sekunders data från kl. 01:30 den 23/9 2023 (B). Vertikala rörelser (överst), horisontella rörelser i nord-syd (mitten) och horisontella rörelser i öst-väst (längst ner). Frekvenser mellan 1–50 Hz. Tiden i figuren är i UTC, därmed två timmar efter svensk sommartid. Detekterade sprängningar från bergtäktsverksamhet representeras av röda cirklar och entreprenadsprängningar av orange cirklar (C).

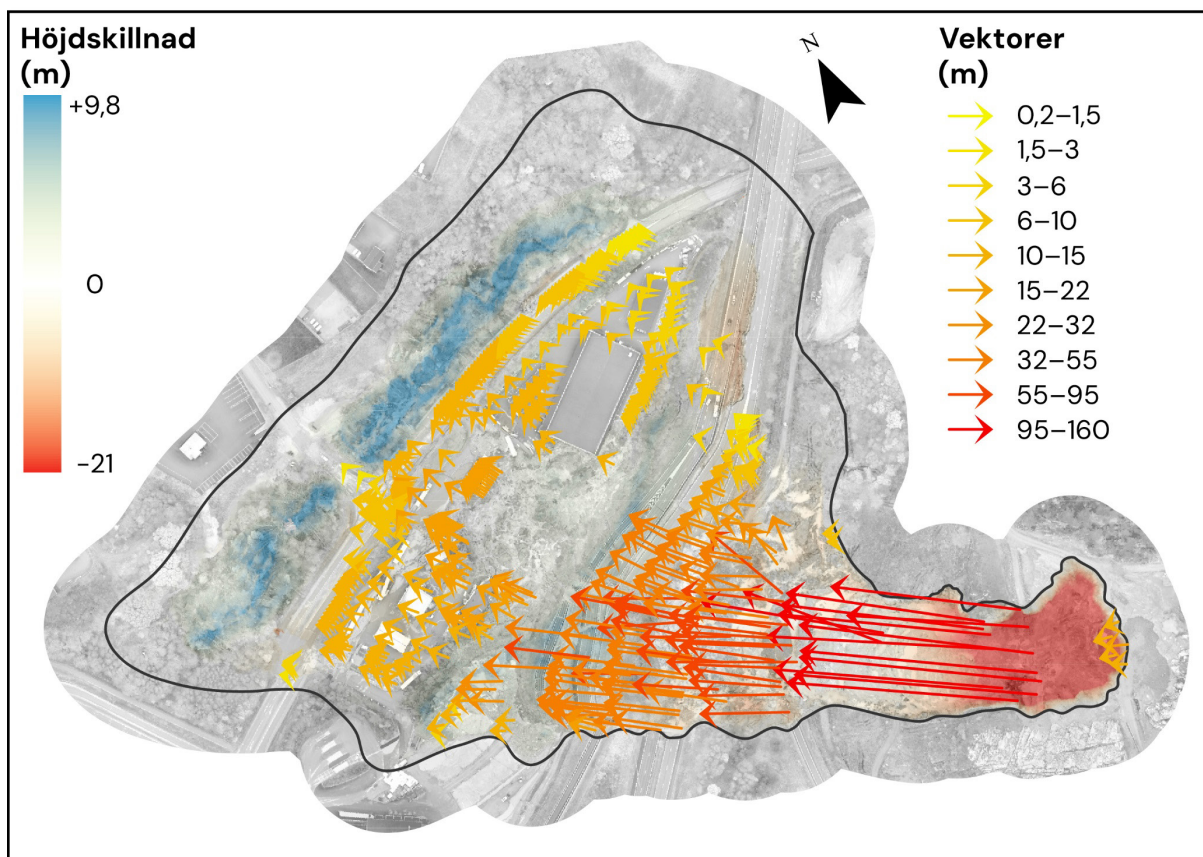
Kinematik

Horisontell förskjutning

Vektorer som visar förskjutningar i horisontell riktning har kartlagts från identifierade objekt före och efter skredet. Flertalet vägar (grusvägar, E6, Ucklumsvägen), vägräcken, stängsel, lyktstolpar, brunnar, byggnader, prominenta träd, med mera har använts vid analysen. Även vägmarkeringar på de vägar som inte har målats om mellan de senaste ortofotona och de nya efter skredet har gett information (fig. 59). Dessa vektorer illustrerar tydligt hur långt markytan har förflyttat sig (fig. 60). Material från vallen har identifierats i skredmassorna över 150 m väster om dess ursprungliga plats, vilket representerar de största horisontella rörelserna i området. Generellt minskar längden på de horisontella rörelserna med avståndet från östra området till västra och norra. Sedan har mindre bakåtskridande 'efterskred' gett upphov till kortare rörelser utmed det primära skredärret. Exempelvis har delar av arbetsvägen i bakkant skredat ut omkring 15 m.



Figur 59. Olika fysiska objekt användes för att kartlägga hur området rörde sig under skredet. Efter skredet har även de fördämningar som bildades kartlagts. Höjds-kuggning, före: ©Lantmäteriet 2021; efter: Swescan 2023-11-06.

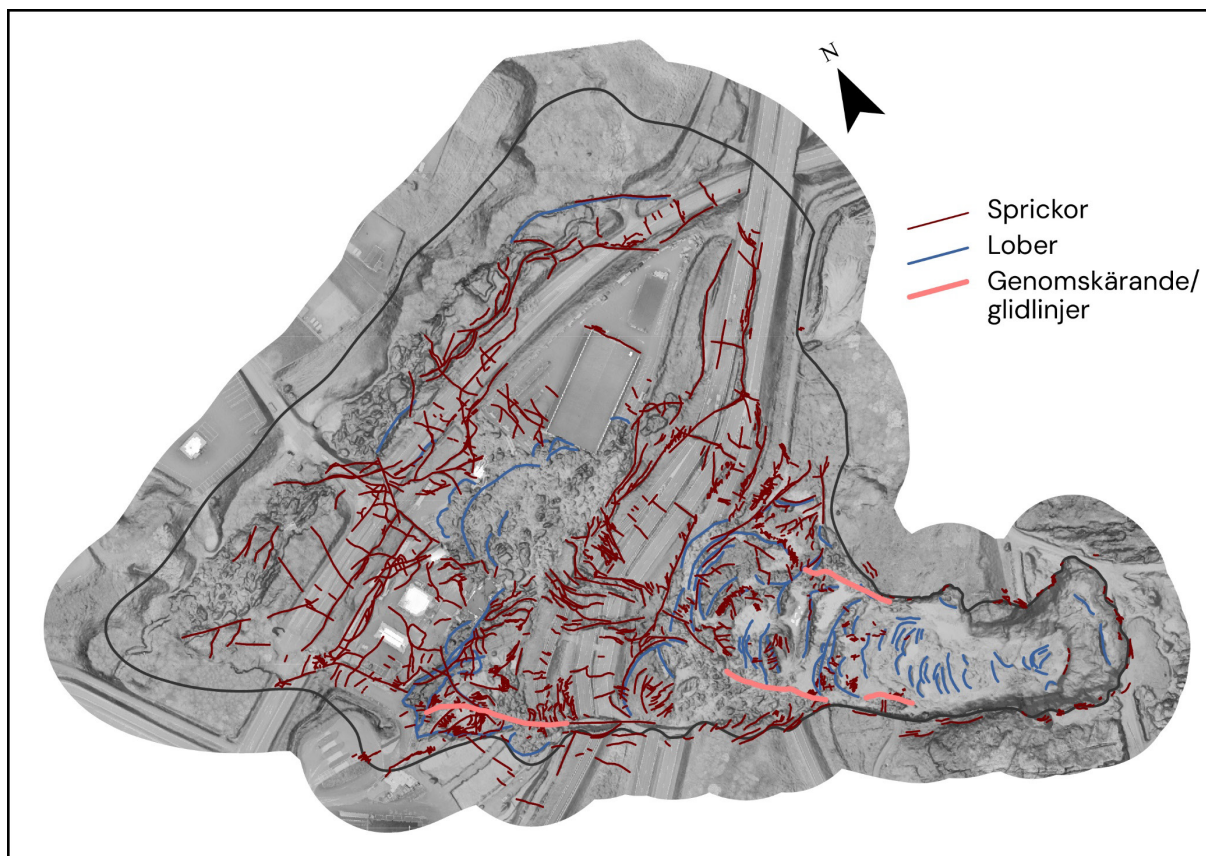


Figur 60. Vektorer visar horisontell rörelse av olika identifierade objekt. Röd till blå färgskala i bakgrunden representerar differensanalysen i figur 18. Höjdsuggning: Swescan 2023-11-06.

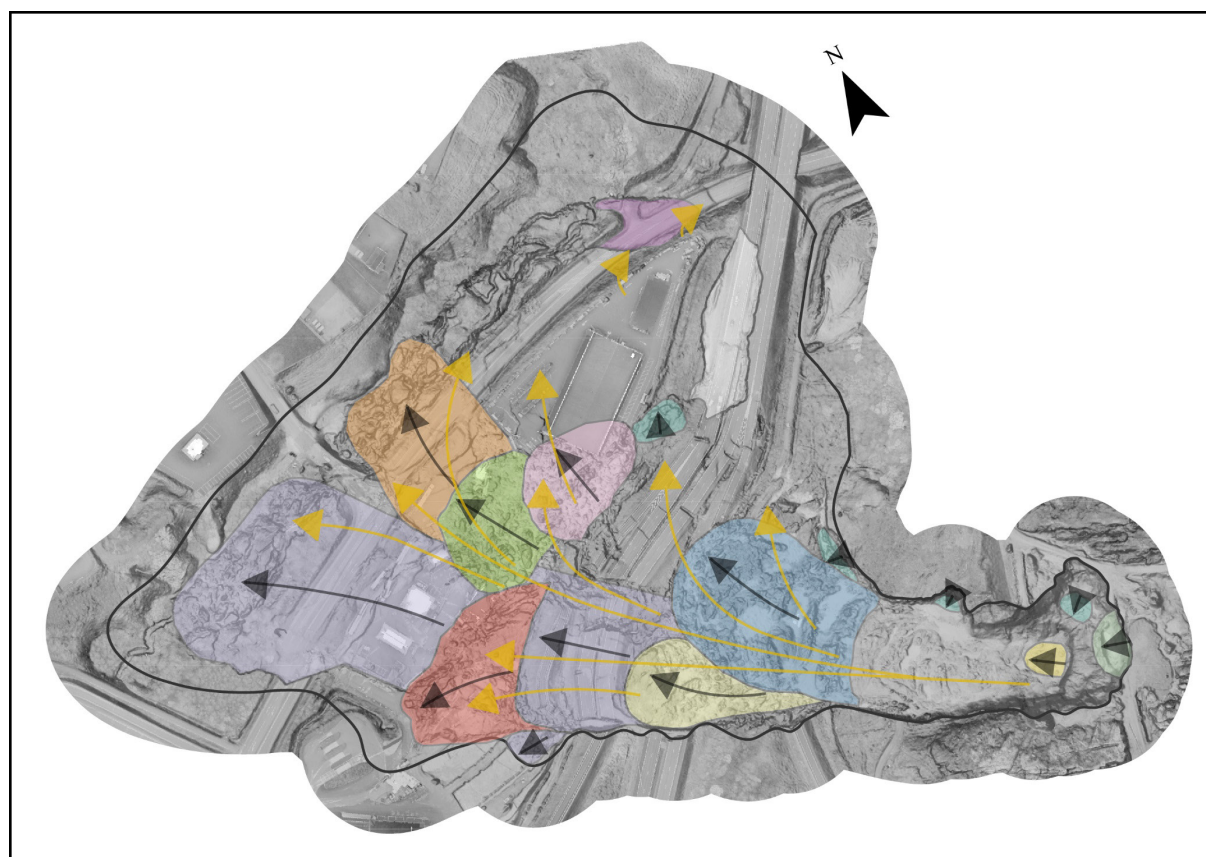
Rörelseindikatorer

Genom att kartlägga hur marken spruckit isär vid rörelserna och hur skredmassorna har formerats går det att skapa en ytterligare uppfattning om hur marken har deformerats (fig. 61). Ur dessa strukturer observeras skärande relationer (eng. *cross-cutting relations*), varav några av de stora är markerade i figuren. De kartlagda sprickorna och loberna säger någonting om rörelserna. Loberna visar en generell, mot dessa, vinkelrät rörelse. Sprickor uppstår parallellt med, perpendikulärt med, eller i en sned vinkel mot rörelsen. Därför kan sprickorna användas till att lägga ett slags pussel över rörelsemönstret. I ortofoton samt vid fältarbete har noteringar tagits om isärdragna (tension) och hoptryckta (kompression) strukturer, samt horisontala sidoförskjutningar (eng. *strike slip*).

Flertalet ytor med enhetligt utseende är markerade tillsammans med en svart riktningsvektor i figur 62 i syfte att förstå rörelseprocessen. De gula pilarna representerar en mer generell rörelse, baserad på en sammanvägning av ytorna och tolkningar av sprickor och lobar.



Figur 61. Strukturkartläggning av markytans morfologi efter skredet. Höjdsuggning: Swescan 2023-11-06.



Figur 62. Förenklade, generella rörelser visas med gula pilar. De olidfärgade ytorna med svarta riktningspilar representerar ytor som är tolkade till samma rörelse.

Diskussion

I denna studie undersöktes de geologiska och naturgeografiska förutsättningarna i och runt om jordskredet i Stenungsund, den 23 september 2023. Resultaten visar att de geologiska förutsättningarna för skred i området är gynnsamma. I tillägg har områdets markanvändning kraftigt påverkats, vilket ökat risken för att skred ska inträffa. Genom den unika möjligheten att detaljstudera ett skred av den här magnituden kan den sammanställda informationen, förutom att beskriva den geologiska bakgrunden och geologiska processer som ligger till grund för skredet, även användas för preventiva insatser, exempelvis för att förbättra riskmodeller och handledningar.

Förutsättningar för skred på platsen

Den geologiska historien medför gynnsamma förhållanden för att kvicklera ska bildas i området.

- Israndläge producerade en varierad stratigrafi med god hydrologisk koppling till dalgångens mäktiga lersediment
- Berg-i-dagen ovanför de vattenförande sedimenten skapar än större förutsättningar för infiltration utmed den vittrade och sprickrika berggrundens yta
- Grundvattenflödet som följer dessa vägar ner i sediment med överlagrande lera, kan skapa höga porvattentryck, som artesiskt grundvatten, nere i dalgången
- Vattenföringen ner i leran skapar förutsättningar för lakningsprocesser och bildning av kvicklera

Stratigrafins relevans för markrörelser

Jordlagren från berget i öster och fram till skredärret består till största delen av skiktade isälvs-sediment med lutning åt väst. Denna stratigrafi infiltrerar och transporterar grundvatten väl. De skaljordslager som förekommer har även de goda vattenförande egenskaper. I figur 38 framgår inte tydligt hur de östra isälvssedimenten kopplar hydrologiskt till leran västerut. Utseendet på höjdprofilerna förändras beroende på var i området profillinjerna placeras och detta påverkar hur stratigrafen illustreras. Det finns inga borrhningar eller dokumenterade skärningar som avslöjar den kompletta jordlagerföljden på denna plats (det vill säga ner till berg). Det är dock fastställt att isälvssedimenten är mer än fem meter mäktiga närmast berget i öst och att dess överyta lutar subparallellt med den naturliga markytan. Det är också fastställt att skaljordslager går att följa genom detta område och kopplar därmed hydrologiskt ihop isälvssanden i öst med den övre leran i väst. I området nära skredärret, på flankerna till uppstickande berg observeras ställvis leriga, skalrika sediment vilandes direkt på berggrunden. Det finns dock sannolikt grövre jordavsättningar i lågpunkterna, sprickzonerna. Det innebär att den nederbörd som faller i höjd-områdena kan infiltrera jordlagren ner in i, och in under leran.

I dalgången (de västra och norra delarna av skredområdet) karaktäriseras stratigrafen av stora lermäktigheter. Leran innehåller en stor andel silt (35–60 %). Den flockullerade leran och siltens vattenhalt på cirka 30 procent är i paritet med rapporterade värden från konsoliderad glacial lera (ex. Rankka m.fl. 2004). Kvicklera kan ha betydligt högre vattenhalt, men det är möjligt att vatten har gått förlorat under provhanteringen. Att så är fallet indikerar de naturliga vattenkvoterna på cirka 50–70 procent, som uppmättes i samband med de geotekniska laborationsförsöken (Berling 2024).

Lerans sammansättning och distribution

Områden med mindre sensitivitet kan förutom varierande förhållanden för lakning, också vara äldre subaeriala områden. När en kvicklera bildats så kan nya joner från vittring och transport till porvattnet med tiden ersätta de utlakade jonerna, vilket leder till att leran åter stabiliseras (Moum m.fl. 1971). I Moums studie konstaterades att när natriumhalten ökade i porvattnet så minskade lerans sensitivitet. Engdahl m.fl. (2007) visade på en negativ korrelation mellan natriumhalten i porvattnet kontra jorden. I den här utredningen gjordes inga analyser på porvattnet, men om vi antar att relationerna som påvisats ovan gäller även vid Stenungsund så kan vissa spekulativa tolkningar göras.

I borrhål 23CW127, som är tänkt att representera den ostörda lagerföljden söder om skredet, återfinns en anomali i de geokemiska resultaten på 11 m djup. Natriumhalten ökar tydligt, samtidigt som halten magnesium och kalcium är låg (fig. 63). Mineralogianalysen av vittring uppvisar en anomali på 11 m (fig. 50), liksom omvandlingsgraden av illit. Dessa resultat tyder möjligtvis på ett mer känsligt lager i stratigrafin vid 11 m djup. De geotekniska testerna visar på kvicklera från 4 till 14 m där 8–9 m är känsligast, och mindre känslig silt på 15 m djup. SGI har under utredningen tolkat att skredets underryta, norr om borrhål 23CW127, är på cirka 10–11 m, vilket överensstämmer med analysen.

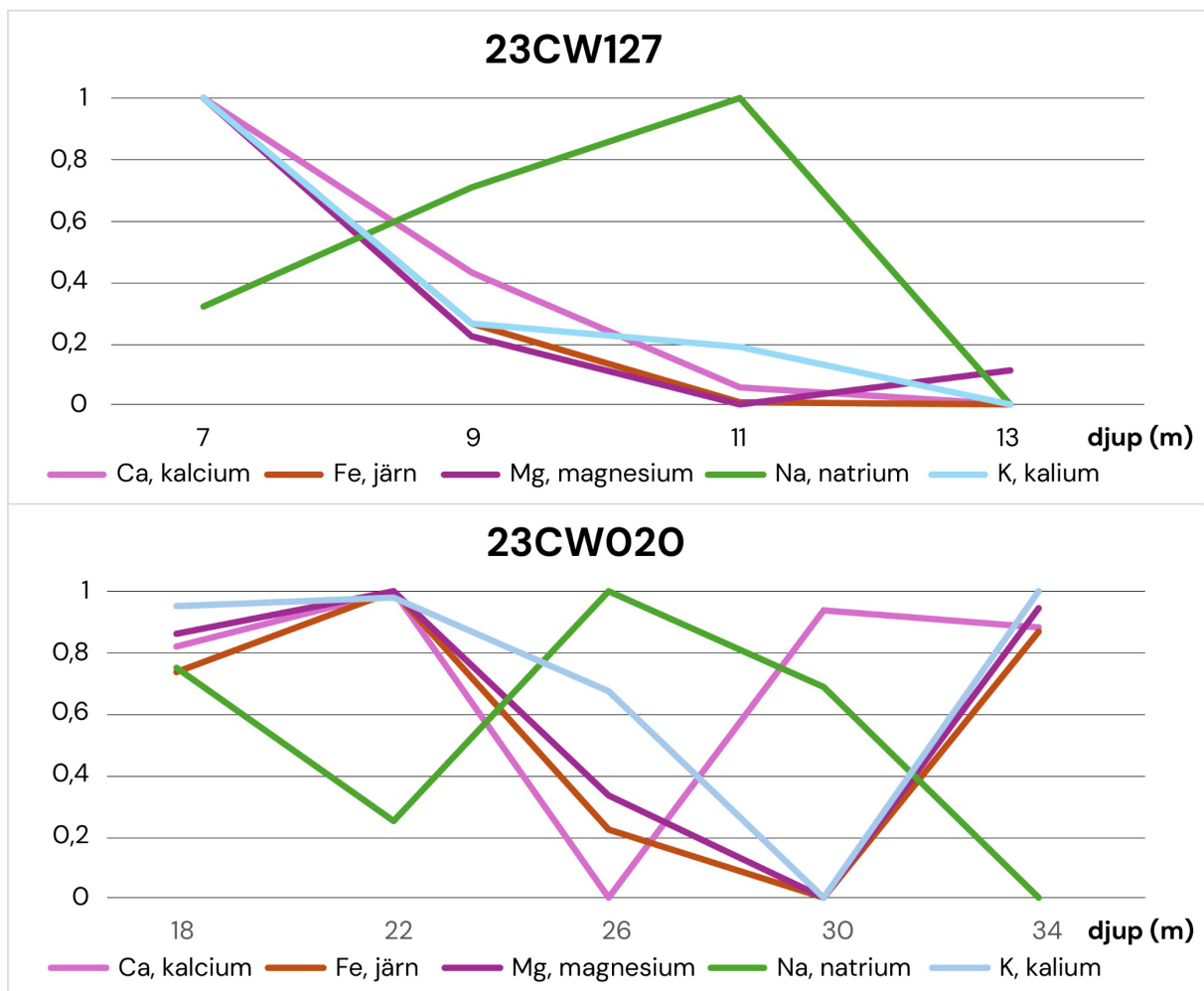
I borrhål 23CW020 som ligger inom skredområdets norra del har prover från 18, 22, 26, 30, och 34 m djup analyserats. Relationen mellan natrium, kalcium, magnesium, järn och kalium är snarlik den i borrhål 23CW127 (fig. 63). Dessa ämnen ger till exempel ledtrådar om leran urlakats på salter eller bundit joner från porvattnet. På djupen 26, 28 och 30 m är stratigrafin mycket varierad med flera sand- och siltskikt, samt avvikelser i de geokemiska resultaten. Det kan indikera att vattenförande lager har gynnat de geokemiska processerna, som orsakat försvagning i stratigrafin. Alternativt, eller dessutom, tyder det möjligtvis på att dessa jordlager har utsatts för störningar. Den heterogena sammansättningen blir tydlig i figur 43 där resultat från AFRY:s geolaboratoriums analys är inkluderad. De geotekniska testerna visar på kvicklera på 22 m, inte kvick på 24, men resterande från 26 till 34 m djup är kvick.

I norra delen av området är den organiska halten relativt hög på stora djup. Borrhål 23CW020 är ett av flera i denna del som har gyttjiga sediment ner till omkring 30 m djup. I de södra och västra delarna når dessa jordarter ställvis 10 m. Nivåskillnaden mellan dessa är i paritet med andra stratigrafiska uppgifter. Dagen efter skredet så luktade det starkt av sulfid vid leran som trängt upp vid Preem och Byggmax. Sulfiddoft indikerar generellt hög halt av organiskt material.

Skillnader i resultat från samma prov, exempelvis kornstorlek (fig. 43), kalcium från XRD och kalciumkarbonat från Passons apparat, visar på provens heterogena, skiktade karaktär. Ett sätt att få mer jämförbara provresultat är att homogenisera proven före uppdelning till olika analyser. Dock kan viktig information då gå förlorad, exempelvis dess heterogena karaktär. Geotekniska försök på ostörda (kolv) prover av denna karaktär varierar därför naturligt beroende på vilken del av provet som väljs ut.

Felmarginalerna i kol-14-dateringarna från 22 och 30 m i borrhål 23CW020 överlappar varandra, vilket gör det vanskligt att dra några slutsatser om eventuellt störd zon. Provet från 42,5 m djup i borrhål CHO242020 ger en kol-14-ålder av $11\,902 \pm 38$ år, medan det på 34 m i borrhål 23CW020, 230 m sydväst, ger $13\,039 \pm 48$ år. Inget av dessa borrhål når till berget, men jorddjupsuppgifter och bergmodellen (fig. 28) visar att det blir djupare vid CHO242020 än vid 23CW020.

Dateringarna är gjorda på skal från musslor, vilka kan gräva ner sig upp till en halv meter när de lever (SLU 2025). Variationerna i ålder och provdjup är dock av den karaktär att bioturbation anses vara en osannolik förklaring. Tolkat tillsammans med de geokemiska analysresultaten tyder åldrarna troligare på störningar i stratigrafin.



Figur 63. Natrium korrelerar negativt med bland annat kalcium, magnesium, kalium, och järn. Alla värden är normaliserade så att maxvärdet är 1 och minvärdet 0, för respektive parameter.

I utredningen av skredet har SGI identifierat ett antal trender över jordlagrens geotekniska egenskaper inom skredområdet (Isacsson m.fl. 2025). Den geologiska historien tillsammans med de geokemiska och geotekniska resultaten indikerar möjligtvis att leran i det sydvästra området har haft en lägre utlakning av salter till följd av lägre omsättning av grundvatten. Vittringen av bergartsfragment i leran bedöms vara låg varför inte denna geokemiska process anses vara orsak. Flödet i det sydöstra området (västsluttning) gynnas av mer och fler inslag av grovkorniga, permeabla sediment och därmed större grundvattentransport. Regionalt förekommer ansamlingar av sand och grus generellt i väst- eller östlägen av bergspartier, men är mer sällsynta i syd- och norrlägen (Fredén 1987). De glaciala processerna under avsmältningen (iskantens dynamik) är den primära faktorn bakom detta mönster, och svallningsprocesser under landhöjningen (strandförskjutningen) därefter. Iskantens periodvisa avsmältning i området under deglaciationen resulterade i god tillgång på grovkorniga sediment. Vidare, när isen flödar från öst mot väst tenderar glaciala sediment att tryckas/"smöras" på vid stötsidan av ett hinder och/eller avsätta sediment på läsidan ("tryckskugga"). Vid landhöjningen bearbetas sedimenten i större omfattning i de lägen som blir utsatta för kraftig vågverkan, vilket allmänt är västvända sluttningar. Därför kan även fördelningen av vattenförande jordlager vara en del av förklaringen till en eventuell varierande urlakning.

Vidare, artesiskt grundvattentryck är relativt effektivt för att laka ur leran och detta förekommer mer vanligt vid större jorddjup, varför det sydvästra området som har mindre mäktiga jorddjup, kan förväntas vara mindre påverkat av lakning.

Likheten i leran som finns på 11 m djup i 23CW127 och leran uppe på lerhyllan, CHO245003, kan betyda att det stratigrafiskt är avsatt under samma tidsspann. Provmaterialet på lerhyllan kommer från någon tiondels meter under skredets underkant (glidplan) och leran i borrhål 23CW127 tolkas vara det lager som agerat glidplan inom skredområdet drygt 30 m nordost.

Mänsklig påverkan

Under de senaste 35 åren har flertalet anläggningar påverkat området; primärt E6, Ucklumsvägen, Preem, Burger King, och Byggmax. Det sista halvåret, innan skredet, exploaterades området för anläggandet av Rusta, Jem & fix, och Hammar företagspark. Vid förändring av markens massbalans kan jordlagren anpassa sig till exempelvis ökad belastning, genom konsolidering. Tillförandet av massor till det östra området sker förhållandevis snabbt, vilket sannolikt medfört att underliggande jordlager inte konsoliderats i samma hastighet. Det har dessutom konstaterats att mycket vatten fanns i massorna, vilket också påverkar konsolideringsprocessen negativt.

Omgrävning och fyllning av Kärrbäcken, tillsammans med diken utmed gamla Ucklumsvägen när E6 byggdes, kan vara en förklaring till de märkliga markrörelserna i norra skredområdet. Dessa rörelser uppstod när massbalansen i andra delar av skredområdet ändrades; det finns ingenting som tyder på att skredet initierades här.

Flera väl grundlagda objekt inom andra delar av skredområdet har sannolikt påverkat hur marken rörde sig under skredet (fig. 64). Figuren åskådliggör även några av de skärande relationer mellan olika massrörelser (se avsnittet *Skredets morfologi och kinematik*).

Även om markanvändning och massbalansförändringar i dalgången har påverkat markens stabilitet negativt visar utredningsresultaten att det är tyngden från fyllnadsarbetena i öst som haft störst påverkan.

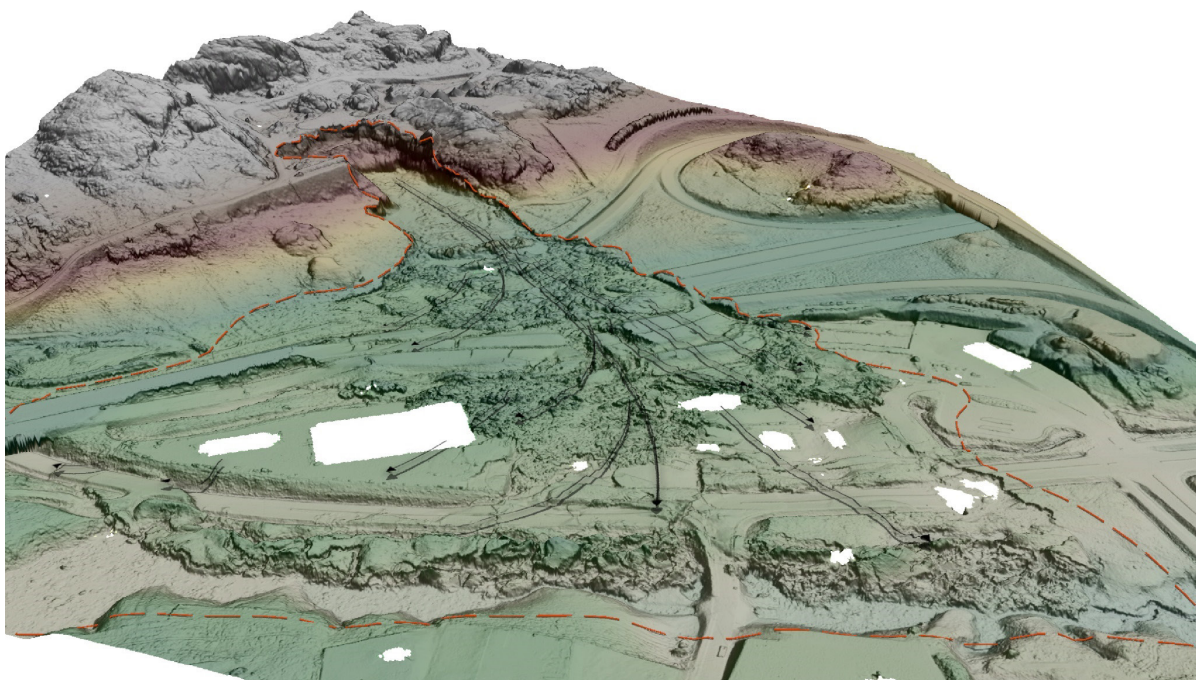
Hydrologisk förändring och inverkan

Det finns inget i de beräknade grundvattennivåerna för opåverkade små magasin i regionen som tyder på att det generellt skulle ha varit onormala förhållanden vad det gäller grundvattentryck för opåverkad mark vid tidpunkten för skredet. Däremot kan förändringar av den naturliga markytan förändra de lokala förhållandena. De markarbeten som pågick har sannolikt påverkat de naturliga grundvattenförhållandena. Signifikant är den höjda marknivån på grund av upplagda fyllnads-massor, vilket kan ha skapat högre grundvattentryck än det någonsin tidigare varit på platsen. Markarbetena har dessutom utökat arean för avrinningsområdet som leder mot skredsvackan.

Den östra delen av skredslänten hade troligtvis snabb grundvattenrespons på grund av det exponerade och uppspruckna berget samt anslutande jordlager med hög permeabilitet, såsom isälvsgrus och sand, med sandig siltig skaljord. Här var också material utbrutet med en infiltrations-bassäng till följd. Fyllnadsmassorna kan ha orsakat en ovanligt hög grundvattennivå, långt över naturlig marknivå och den normala grundvattensituationen.

När vallen anlades användes stora sprängblock i basen, och för att fylla upp en bäckfåra eroderad av ett källflöde i slutningen (fig. 19–21). Det återstår dock obesvarade frågor kring denna lösning; kunde vatten flöda ut vid vallens nedre del, hur länge kunde i så fall en sådan lösning vara hållbar, eller om utflödet täpptes igen och grundvattentrycket i stället byggdes upp under fyllnadsmassorna.

En annan intressant aspekt är det långa järnröret som observerades vid fyllnadsmassornas undre gräns (fig. 21). Möjligtvis var dess funktion vattenavledning, men det är oklart hur långt röret var, och om röret var intakt före skredet. Beroende på om röret användes till avledning, och var vattnet i så fall släpptes ut, kan detta antingen haft en positiv och fördröjande effekt, eller eventuellt förvärrat situationen.



Figur 64. 3d-vy från nordväst över skredområdet. Höjdmodellens vertikala skala är överdriven (1,5:1) för att tydligare åskådliggöra deformationerna. Till vänster syns var E6 södergående körbana kollapsade, samt där Ucklumsvägen hävts upp. Hävningen skapar tillsammans med massorna i Norumsån, formen av en hävningslob. Närmast i bild, de blockiga skredmassorna som hävts upp i Norums ån. Notera att de inte har likvifierats. Observera även Sylvägen, som kommer in i området nerifrån i bild, där å-överfarten är intakt. Höjdmodell: Swescan 2023-11-06.

Tyngden från fyllnadsmassor ökade sannolikt porvattentrycket i de vattenförande sand- och skallagren i leran under dessa. Denna situation kan leda till så kallad hydraulisk upplyftning (eng. *hydraulic jacking*) vilket exempelvis kan skapa ett glidplan.

Det är också möjligt att tyngden från fyllnadsmassor kompakterade de vattenmättade, lösa, sandiga och siltiga skallagren, vilket kan ha bidragit till en förhöjd grundvattennivå uppströms genom att vattnets utflöde hindrades. Detta kan också ha påverkat sprickbildningen i leran under fyllnadsmassorna (fig. 37), som sannolikt redan fanns och har tillfört färskvatten till leran.

Sommaren 2022 utfördes avverkning av östra området, sedan borttagning av jordlager från berget, samt schaktning och pålastning med fyllnadsmassor under sommaren 2023, vilket har haft en betydande inverkan på det hydrologiska beteendet.

Både egna och andras observationer visar att stora mängder vatten kvarstod i massorna öster om skredet. Vatten strömmade kraftigt under en veckas tid efter skredet, och fortsatt stora vattenmängder har fortsatt att flöda i samma riktning. Detta, samt vattenflödet i det tidigare omtalade röret efter skredet tyder på att grundvattennivån var hög vid skredets tidpunkt, sannolikt över naturlig markyta – kanske den högsta nivån sedan landhöjningen lyfte området ur havet för omkring 11 000 år sedan.

Den östra delen av skredområdet, skredgropen, är en naturlig väg för vatten att kanaliseras, och jordlagrens beskaffenhet leder till både avrinning och infiltration i underliggande lera. De schakt- och grävarbeten som förändrat områdets topografi har lett till en utökning av avrinningsområdet. Arbetena har skapat konstgjorda infiltrationsbassänger, och det är möjligt att de naturliga utflödena har hindrats. Sammantaget tyder det på att vattnet spelat en viktig roll, dock visar de geotekniska beräkningarna att belastningen från fyllnadsmassorna var tillräcklig för att marken skulle ge vika, även utan inkludering av en onormal hydrologisk situation. Sannolikt samspelade markdeformationen med de hydrologiska parametrarna för att avgöra tidpunkten då marken gav efter.

Skredets morfologi och kinematik

Kartläggningen av rörelseindikatorer, som vektorer och morfologiska strukturer, ger en bild av hur skredets ytliga massor har rört sig. Förklaringen till mönstret är troligtvis mångfacetterad och kan delas upp i naturliga faktorer som styr rörelsen, samt mänskliga faktorer.

Viss förklaring kan fås genom att lägga rörelseindikatorerna ovanpå andra kartunderlag. Den modellerade bergytans topografi ser exempelvis ut att stämma med den generella rörelsen; rörelsen riktar sig mot större djup. Samma modelleringsmetodik, men applicerad på höjdvärden för jordlagrens olika ytor ger ytterligare ledtrådar. Ler- och siltlagrens ytor följer i stort, som förväntat, berggrundens morfologi, och därmed föreslår utredningen att skredets generella rörelser, i stort, har styrts av de naturliga skiktningarna i stratigrafin, och begränsats av uppstickande berg.

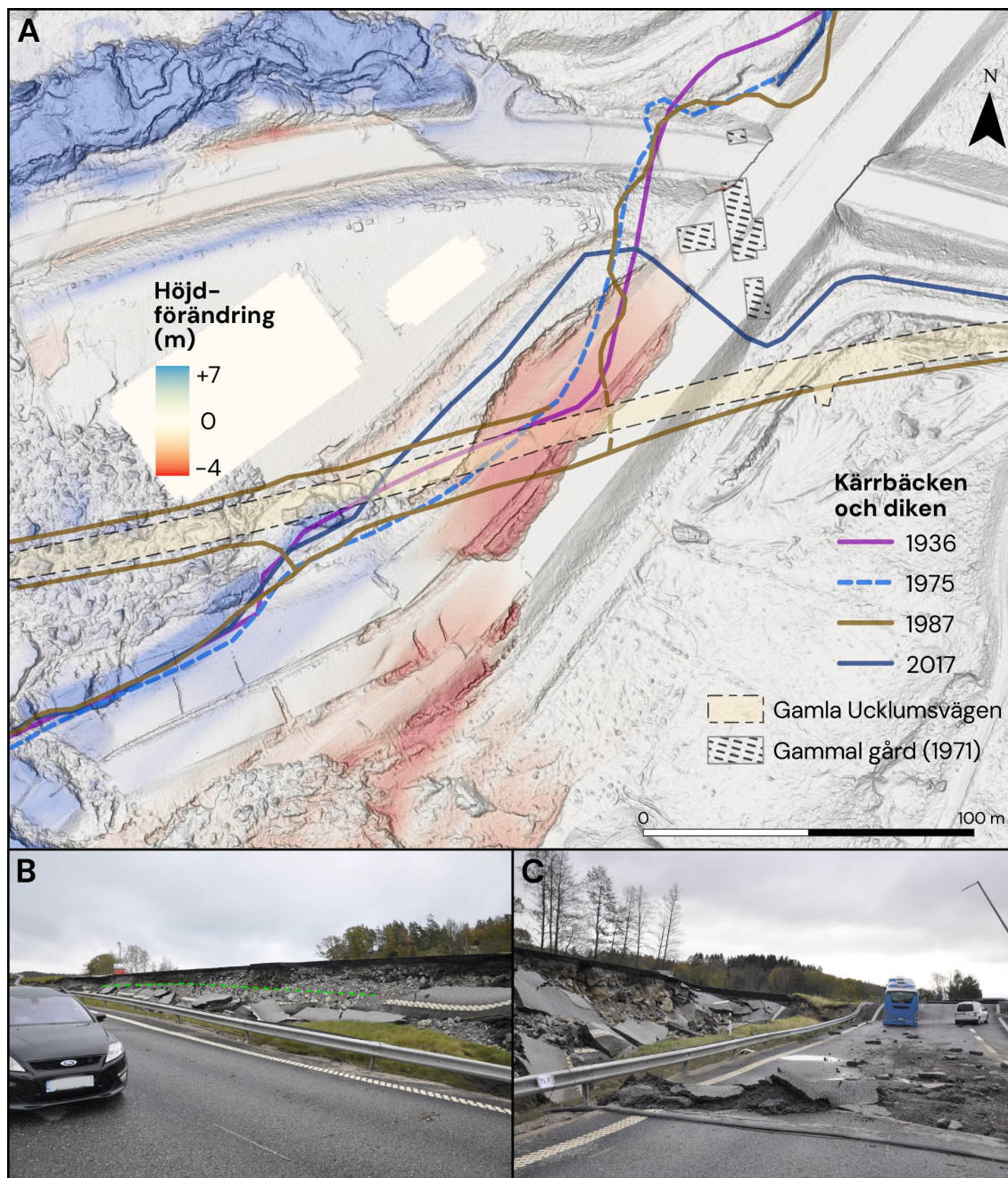
Andra rörelser är inte lika tydligt förknippade med bergstrukturer och de sluttande jordlagren. Här kan förklaringen troligtvis ges av ett flertal väl grundlagda anläggningar i området. Preem-området med flera bränslecisterner under markytan var välförankrade. Byggmax-varuhuset har en pålad grundläggning, och vid det pågående arbetet med Rusta/Jem & fix hade pålningsarbeten utförts. Tvärs över området går väg E6, vilken i skredets "huvudfåra" var anlagd med en bas av stora block, samt en tryckbank utmed centrala till norra delen av vägens västra sida. Dessa olika anläggningar har påverkat händelseförloppet och rörelsemönster, men effekterna på skredets allmänna utveckling är inte entydig.

Den norra delen av södergående körbanan av E6 som sjunkit upp mot 4 m vertikalt är märklig (fig. 65). Tidigare anläggningsarbeten i detta område kan eventuellt vara faktorer som kan förklara delar av rörelsen. I den här delen av området låg det tidigare en gård, där E6 byggdes. Noterbart är ett par företeelser som krävde hantering vid byggandet av E6. Dels Ucklumsvägen som tidigare korsade området diagonalt, mitt över den 'kollapsade' körbanan, dels Kärrbäckens lopp under åren. När E6 skulle byggas följde Kärrbäcken den bruna linjen (1987) i figur 65A, med tillhörande vägdiken utmed den gamla vägen. Dessa diken och gamla bäckfåror fylldes igen och Kärrbäcken fick en ny dragning, som representeras av mörkblå linje (2017) i figuren. Norra halvan av den kollapsade körbanan vilade på lättfyllning (leca-kulor), som söderut successivt övergick i krossberg (streckad grön linje; figur 65B). Varken InSAR-mätningarna eller vittnesuppgifter tyder på ovanliga sättningar. När denna del av området kollapsade måste det underliggande materialet ha pressats undan åt något håll. För att utveckla den morfologi som resulterade av skredet måste material först ha försvunnit från anslutande områden, vilket tillåtit material under E6 att evakuera under markytan. Det är därför osannolikt att skredet initierades här. Två möjliga förklaringar ses: 1. Materialet kan ha getts plats att evakuera åt nord-nordväst när Ucklumsvägen trycktes upp av krafter från väst. 2. När skredets krafter slet isär E6 och fortsatte mot Norumsån, mellan Preem och Byggmax, gavs det plats för materialet att följa med i riktning åt sydsydväst.

Noterbart är att Sylvägen, som korsar Norumsån och ansluter till Ucklumsvägen mitt i området, knappt deformerades vid skredet. Massorna har vikt av på var sin sida om vägbanken som byggts upp av grus och sand över den nerskurna Norumsån (fig. 64).

De kartlagda skärande relationerna mellan olika massrörelser (fig. 61 och 62) visar hur en massrörelse måste ha föregåtts av en annan.

Skredmassorna i Norumsån har en 'blockig' morfologi, vilket tyder på att dess rörelse varit sent i förloppet (fig. 64). Om skredet hade startat i Norumsån skulle massorna likvifierats och flutit ut på ett annat vis. Det är även svårt att förklara avsaknaden av underminerade områden utmed ån, Ucklumsvägen, och fastigheterna på strykjärnet om skredet hade startat vid ån och 'ätit' sig bakåt. Vanligtvis ger ett bakåtskridande förlopp en helt annorlunda morfologi.



Figur 65. Där E6 sjönk vertikalt, utan nämnvärd horisontell rörelse. Linjer visar hur Kärnbäckens lopp utvecklats och diken utmed gamla Ucklumsvägen låg innan E6 byggdes. Foto: Christian Öhrling.

Skredets händelseutveckling

Baserat på fält- och fjärranalysobservationer, SGI:s beräkningar samt Norges geologiska instituts (NGI) modelleringar av skredförloppet leder haveriutredningen till slutsatsen att belastningen från fyllnadsmassorna i östra änden av skredet översteg vad marken kunde bära upp. Isacson m.fl. (2025) presenterar en teknisk beskrivning av det konstaterade händelseförloppet. Nedan följer en diskussion om observationerna i denna rapport samt insamlad data i slutrapporten (SHK 2025), och kring hur dessa kan passa in i det konstaterade förloppet.

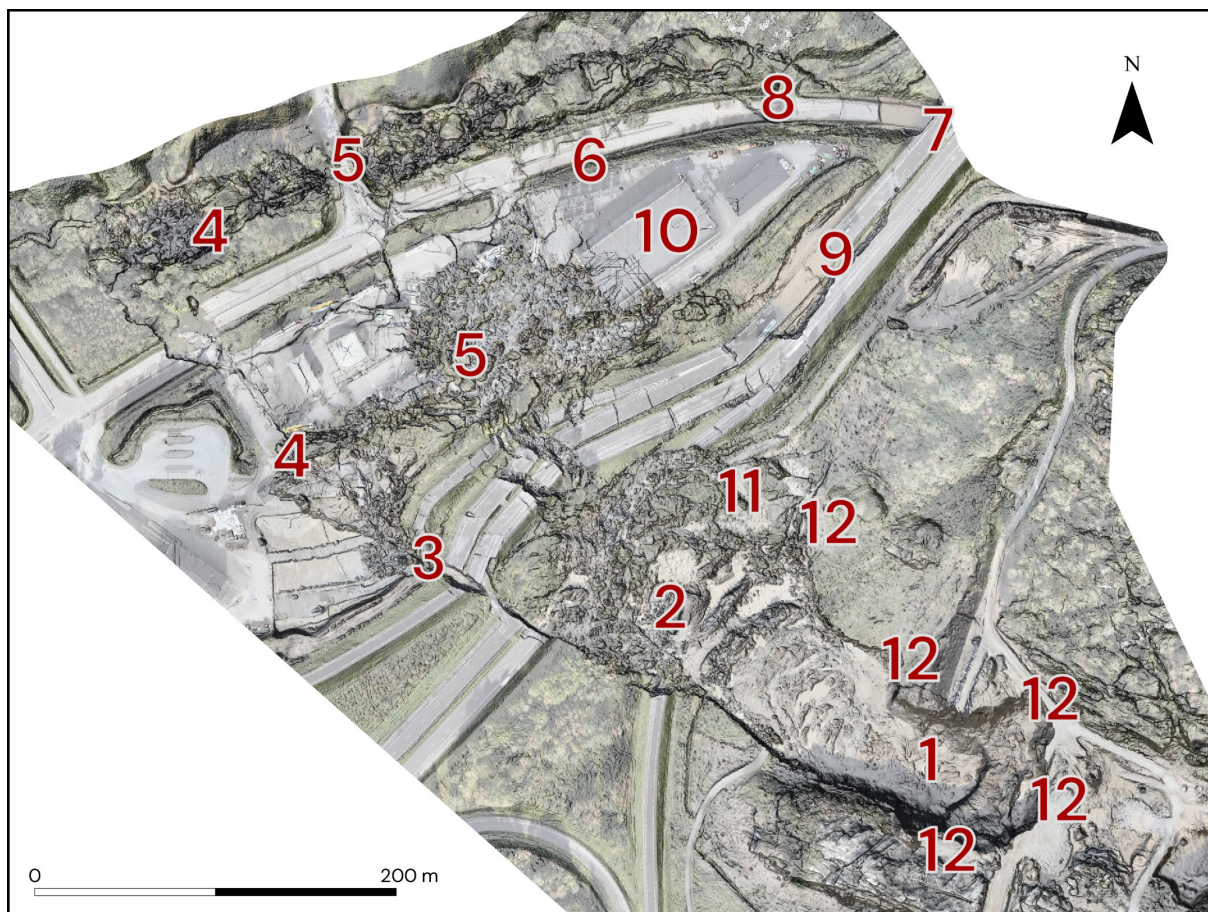
De geotekniska beräkningarna visar att brott uppstod i leran under fyllnadsmassorna (fig. 66:1) och att detta sedan utvecklades västerut (Fornes 2024; fig. 67A). Figur 60, 62 och 62 presenterar skredets kartlagda morfologi, vilken visar rörelser som går att särskilja bland skredmassorna.

I gränsen mellan olika 'rörelseenheter' går det att utläsa hur de rört sig i förhållande till varandra (fig. 62). En signifikant sådan gräns syns mellan den gula enheten, öster om E6, och den större blå enheten norr därom. Bevisen indikerar att den gula enheten flyttades innan den blå. Detta kan förklaras genom att när fyllnadsmassorna, och slänten under och västerut, börjat röra på sig i ett stort sammanhängande flak agerade väganläggningen E6 mothåll (fig. 66:2). När E6 brister (fig. 66:3 och 67E) rör sig hela massan i riktningen som den gula enheten visar, men sedan uppstår en divergerande rörelse och den blå enheten flyter norrut. Denna utveckling kan bero på att rörelseenergin i den initiala riktningen avtog något (exempelvis när E6 nådde Kärrbäcken), tillsammans med större jorddjup norrut, som gjorde att det minsta motståndet för de påtryckande krafterna nu var i den riktningen. Om energin avtog när E6 nådde Kärrbäcken bör det ha varit marginellt eller tillfälligt då rörelsen fortsätter i den riktningen med kraftiga deformationer vid de pågående byggnadsarbetena (Rusta), via Preem till Norumsån, och sprickbildningar i marken västerut mot pendelparkeringen (fig. 66:4).

Innan och under tiden som den blå enheten (fig. 62) svänger av norrut och bildar den ovan nämnda 'flödesgränsen' så sker en gradvis rotation som framför allt koncentrerar massrörelsen i centrumlinjen mellan Preem och Byggmax i riktning mot Sylvägen (fig. 66:5). Större jorddjup åt nordost, tillsammans med motståndet av den i parallellt orienterade Sylvägen och andra krafter tvingar här massrörelsen i nordostlig riktning. Mönstret av sprickbildningar i Ucklumsvägen (fig. 66:6), från Sylvägen och upp till E6-bron, indikerar att denna rörelse mot nordost var kraftig. En trolig förklaring till den två och en halv meter vertikala förkastningen i Ucklumsvägen är att då rörelsen i denna riktning bromsades på grund av att brofundamentet (fig. 66:7) stod emot så byggdes spänningarna upp till dess att vägbanken gick till brott och avlastningen resulterade i en vertikal förskjutning (fig. 66:8). Möjligtvis var det denna plötsliga rörelse som gav plats för jordmassor att röra sig på djupet och orsaka kollapsen av E6 sydost härom (fig. 66:9).

Parallellt med detta händelseförlopp vred sig trekanten där Byggmax stod (fig. 66:10), med cirka tolv meters förskjutning i de västra delarna, men bara tre meter i de östra. Under denna tid divergerade också den tidigare beskrivna rörelsen av, öst om E6. Denna nordliga rörelse syns i sprickmönstret i asfalten, förskjutningar av grusvägar, samt lobar av skredmassor (fig. 66:11).

Mindre bakåtskridande massrörelser sker sedan på flera ställen utmed skredärret (fig. 66:12).



Figur 66. Skredområdet med nummer som kopplar till texten under avsnittet *Skredets händelseutveckling*. Numreringen representerar inte nödvändigtvis ordningsföljden på rörelserna. Ortofoto och höjdsuggning: Swescan, 2023-11-06.

När startar markrörelsen?

Större delen av det ovan beskrivna förloppet kan ha utspelats i sin helhet under några få minuter, men inte nödvändigtvis. Nedan följer en sammanfattning av tidsuppgifter och tolkning, kopplade till skredet, som finns att läsa i SHK:s slutrapport (2025).

Data från fjärrvärmesystemet visar ett tryckfall vid 01:23 och vid 01:40 går stamledningen av. Mellan 01:35 och 01:40 registreras en kraftig flödesökning vid pumpstationen för spillvatten, sydväst om Preem. Flödesökningen avtar lika hastigt som det uppstod, cirka 4 timmar senare, sannolikt då ledningarna stängs av. Tryckfallet i fjärrvärmesystemet är registrerat knappt 20 minuter före det katastrofala skredförloppet. Detta visar enligt systemets operatör möjligtvis att någon av servisledningarna i skredområdet börjar läcka, men kan också bero på ett läckage någon annanstans i systemet eller en temperaturförändring på vattnet från produktionsanläggning.

Uppgifter från elnätet (SHK 2025) är att ledningarnas reläer slogs ifrån 01:40:30 och 01:40:40.

Den seismiska signalen, som tolkas reflektera skredet, är detekterad mellan 01:39:30 och 01:41:20, med sitt maximum vid 01:40:10.

Övervakningsfilm visar att en bil körde in i skredområdet, på Ucklumsvägen norrut (nordost) 01:40:08. Den vände inte om, vilket indikerar att vägen var farbar vid denna tidpunkt. Föraren har inte intervjuats, men kan ha pratat med räddningstjänsten nordost om skredområdet. När räddningstjänsten anlände på Ucklumsvägen från nordost träffade de en person som sa att hen

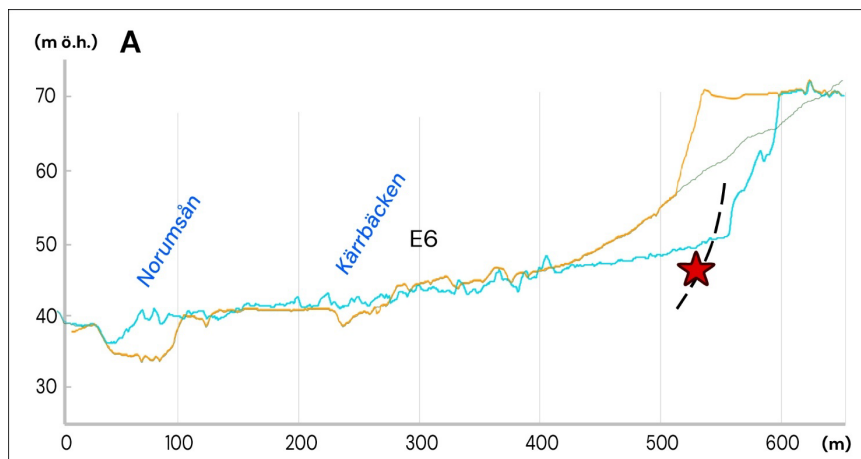
körde på Ucklumsvägen när gatlyktorna slocknade och att bilen skakade till när den passerade Byggmax; där den kraftiga hävningen i Ucklumsvägen inträffade.

Ungefär 02:10 hörde räddningstjänstens personal, som befann sig i södra delen av området, kraftiga dån uppifrån östra delen av skredområdet. Det gjorde att de hastigt tog sig upp från skredområdet tillsammans med de personer som hjälptes ut från sina bilar.

En lastbilschaufför, och tillika geolog, larmade (i enlighet med gällande instruktioner för chaufförer att meddela dåliga arbetsvägar som riskerar påverka deras körning) två dagar före skredet om att arbetsvägarna ovanför skredet hade sättningar och upp till en halv meter djupa, och breda, vatteneroderade fåror på flera ställen. Fotografier från två dagar före skredet visar spår av erosion och jordrörelser i den så kallade 'vallen' (fig. 54). Det syns även sprickbildningar som tyder på ytterligare rörelser. Analys av höjdnivåer i fotografierna (2023-09-20) avslöjar också troliga sättningar av hela vallen. Sättningar och erosion i arbetsvägarna ovanför, öster om vallen tyder på sättningskänslig mark och vattenerosion. Dock, denna senare typ av sättningar är inte ovanligt på byggarbetsplatser med frekvent lastbilstrafik. Sättningar och erosion i vallens slänt kan ha inducerats på grund av att arbetsvägen ställvis gick utanför den grundlagda basen av stora block (fig. 23). Analysen av vallen indikerar alltså tecken på viss instabilitet. Detta visar inte att det var rörelser i vallen och tillhörande fyllnadsmassor som initierade skredet, dock kan det ge ledtrådar till att förstå dess uppbyggnad och genomsläpplighet.

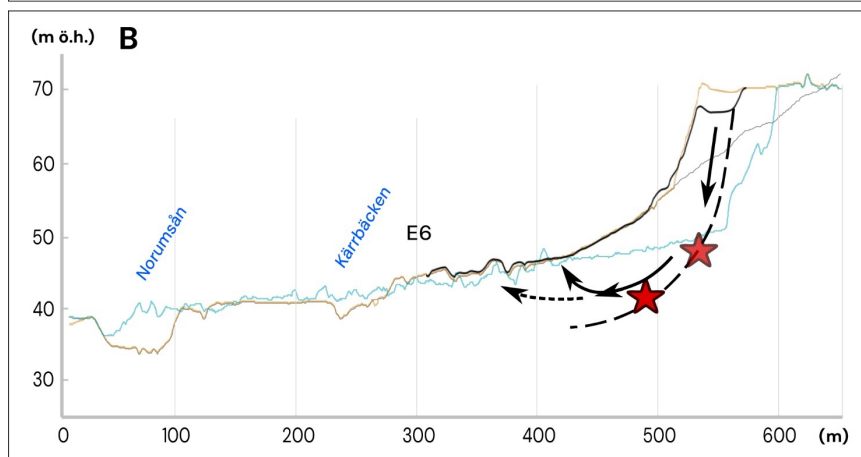
En bilförare körde omkring kl. 01 på E6 söderut och vittnar om "gupp" i vägen i höjd med Burger King.

Ett annat vittne, som körde bil på E6 i norrgående riktning, upplevde att vägen var deformerad vid 22-tiden på kvällen före skredet; vägbanan kändes vågig. Ett annat vittne observerade vid samma tid "ovanligt kraftigt" forsande vatten i Norumsån, där Kärrbäcken ansluter, söder om skredområdet (fig. 1). Uppgiften om att E6 upplevdes "vågig" vid 22-tiden kan ha andra förklaringar, men kan också tyda på hävning till följd av en sättning i området vid vallen vilken påverkade E6 norrgående körbana. Det kraftiga vattenflödet söder om skredområdet kan även det vara ett sammanträffande eller en felaktig minnesuppgift, men också förklaras av markrörelser. Om en hävning av E6 påbörjats är det möjligt att vattenföringen i trummorna under motorvägen, samt Kärrbäcken dit dessa ansluter, kan ha påverkats av ett ökat tryck med ett förändrat flöde till följd.

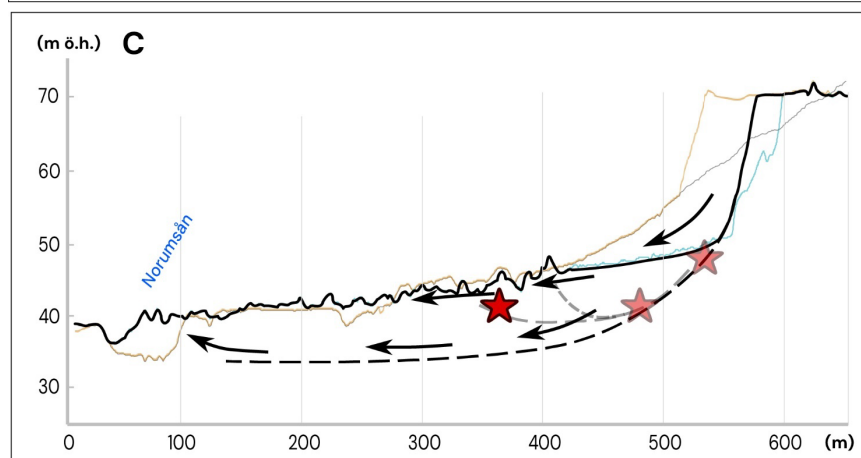


Figur 67. Förslag på skredets händelseutveckling. Baserat på brottmodellering (Fornes 2024) samt morfologi och kinematikkartläggning.

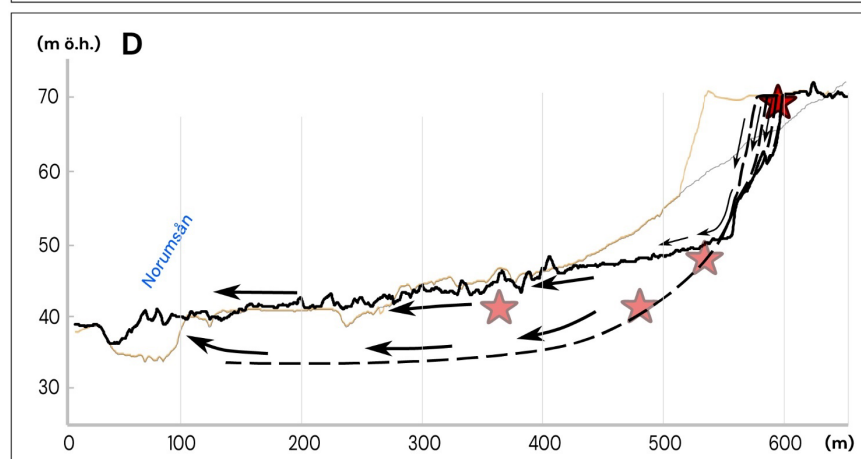
A. Pålastningen gör att jordlagren under 'vallen' börjar utveckla brott.



B. Brottutvecklingen fortsätter enligt teorin vid ett translativt progressivt skred.



C. När E6 går till brott och dess mothållande kraft försvinner är flaskskredets brottyta troligtvis välutvecklad.



D. Skredet utvecklas progressivt, med en spridning till Norumsån, samt norrut. Kraftig hävning i Norumsån. Delarna längst österut, i skredets bakkant, ger efter regressivt, vilket stämmer överens med tolkningen av morfologin.

Det är konstaterat att skredet inträffade just före 01:40 och orsakade kraftiga markrörelser under ett par minuter. Den seismiska signalen som detekterades av SNSN visar varaktigheten av rörelser som skapade vibrationer i berggrunden. Någon alternativ förklaring till signalen har inte upptäckts. Elavbrott och brott på fjärrvärmeledningen avslöjar när rörelserna där ledningarna går blev så stora att de påverkades.

Den morfologiska och kinematiska analysen av skredmassorna ger inget absolut klockslag, men visar dock det relativa förhållandet mellan olika massors rörelser.

Ucklumsvägen var fortfarande farbar vid 01:40:08, och om bilen körde i 50 km/h så passerades den vertikala förkastningen i vägen vid 01:40:38. Bilföraren upplevde att gatlyktorna slocknade under färden, vilket troligtvis var 01:40:30. Dessa uppgifter, tillsammans med ledningsavbrotten, begränsar när de första kraftiga rörelserna i Ucklumsvägen ägde rum.

Vittnesuppgifterna om upplevda ovanliga företeelser vid 22-tiden, några timmar före skredet, samt kl. 01 är intressanta eftersom de är möjliga att passa in med de tidigare nämnda 'hårda' fakta. Liknande möjliga skredförlopp för flaxskred (specifikt, translativt progressivt skred) finns rapporterat (Bjerrum 1967, Quinn m.fl. 2012, 2011, Torrance 2012).

Nedan följer ett förslag på beskrivning av händelseförloppen i figur 67, där samtliga observationer och tidsangivelser vävs in.

Figurruta **A** illustrerar var det första brottet i de underliggande leriga jordlagren inträffade. Den tydligt märkbara skredrörelsen startades nödvändigtvis inte nu, utan brottet kan ha fortplantat sig utmed det modellerade glidplanet, upp mot tio meter under markytan. I figurruta **B** har denna fortplaning rört sig upp mot markytan där grundläggningen och tyngden av E6 agerar mothållande kraft. Det sker en sättning i 'vallen' i samband med att marken hävs upp längre ner i slänten. Denna markhävning kan då ha skapat viss deformation i E6 körbanor. Avvattningen i detta område bör då också ha påverkats och eventuellt förändrat flödet i Kärrbäcken. Figurruta **C** illustrerar att E6 bryts sönder och när de mothållande krafterna där släpper så följer flaket, som redan utvecklat ett glidplan till följd av överbelastningen i öst, efter. Sedan inträffar en följd av markrörelser, som slutgiltigt når balans då massorna trycks ut i Norumsåns flodplan. Möjligen uppstod de seismiska signalerna när E6 slets isär och de kraftiga efterföljande massförflyttningarna. Sedan fortsätter mindre skred ställvis att 'äta' sig bakåt i terrängen (regressiva skred), varav de lite större sker längst i öst (figurruta **D**). Ett av dessa var möjligen orsaken till det då vid 02:10, som fick Räddningstjänsten att evakuera skredområdet. Det kan exempelvis ha varit då arbetsvägen längst in i skredet gav med sig.

Slutsatser

- De geologiska förutsättningarna för problem med markstabilitet är gynnsamma i området.
- Kartunderlag som visar detta, specifikt där skredet startade, fanns tillgängligt innan skredet, under projekteringsfasen.
- Exploatering i hela området har förändrat markanvändning och påverkat markstabiliteten.
- Skredet orsakades av överbelastning.
- Grundvattenflöden, porttryck, och förändrad avrinning bidrog till tidpunkten.
- Att skredmassorna rörde sig under ett par minuter omkring 01:40 är bekräftat från flera, automatiskt registrerade data.
- Kartläggning av skredmassornas morfologi och kinematik föreslår att den initiala sättningen/brottet under 'vallen', fortplantade sig och initierade markhävningar 150 till 200 m västerut, innan massorna däremellan gled ut.

Referenser

- Algeo, T.J., Hong, H. & Wang, C., 2025: The chemical index of alteration (CIA) and interpretation of ACNK diagrams. *Chemical Geology* 671, 122474. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122474>
- Berling, V., 2024: Väg E6 Stenungsund återuppbyggnad, Munkeröd 1:5 med flera - markteknisk undersökningsrapport (MUR) geoteknik (COWI-rapport No. 1G14MUR1). Trafikverket.
- Bjerrum, L., 1967: The Third Terzaghi Lectures; Progressive Failure in Slopes of Overconsolidated Plastic Clay and Clay Shales. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 93, 1–49. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001017>
- Björnsjö, N., 1949: Israndstudier i Södra Bohuslän: Summary: Studies of Marginal Deposits and of Ice Borders in South Bohuslän.
- Blomqvist, T. & Gustafson, G., 1981: Tuveskredet Hydrogeologi (Rapport No. 11c). Statens geotekniska institut.
- Brodzikowski, K., 1981: Dilatancy and the course of the deformational process in unconsolidated sediments. *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 51, 83–98.
- Brown, G. & Brindley, G.W., 1980: X-ray Diffraction Procedures for Clay Mineral Identification, in: Brindley, G.W., Brown, G. (Eds.), *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland*, p. 0. <https://doi.org/10.1180/mono-5.5>
- Caldenius, C., Lundström, R., Fellenius, B. & Mohrén, E., 1956: The Landslide at Surte on the River Göta Älv: a geologico-geotechnical study. Sveriges geologiska undersökning, Avhandlingar och uppsatser.
- Cato, I., 1997: Contaminants in the Skagerrak and Kattegat sediments, in: Proceedings of the Fourth Marine Geological Conference. *Sveriges geologiska undersökning Ca 95*.
- Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W. & McCabe, A.M., 2009: The Last Glacial Maximum. *Science* 325, 710–714. <https://doi.org/10.1126/science.1172873>
- EGMS, 2024a. European Ground Motion Service: Ortho – East-West Component 2019-2023 (vector), Europe, yearly, Oct. 2024. <https://doi.org/10.2909/6ad89038-76c3-4ce4-9125-5c0b59816438>
- EGMS, 2024b. European Ground Motion Service: Ortho – Vertical Component 2019-2023 (vector), Europe, yearly, Oct. 2024. <https://doi.org/10.2909/9abe5dd1-3639-4aeb-a8de-ec2eb2f7fc93>
- Elverhøi, A., Lønne, Ø., Seland, R., 1983. Glaciomarine sedimentation in a modern fjord environment, Spitsbergen. *Polar Research* 1, 127–150. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.1983.tb00697.x>
- Engdahl, M., Cato, I., Snäll, S. & Eliasson, T., 2007: Skredet i Småröd , Bohuslän Geologiska undersökningar. *SGU-rapport 2007:29*, Sveriges geologiska undersökning.
- Enghag, P., 1999: *Jordens grundämnen och deras upptäckt: en bok om sällsynta jordartsmetaller, ädelmetaller, ädelgaser och naturligt radioaktiva grundämnen. Sällsynt-ädel-aktivt*. Industrilitteratur.
- European Ground Motion Service [WWW Document], n.d. <<https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>> åtkommen 14 maj 2025).
- Fornes, P., 2024: Skredet i Stenungsund - progressiv bruddutveckling. Norges geotekniske institut, NGI-rapport.

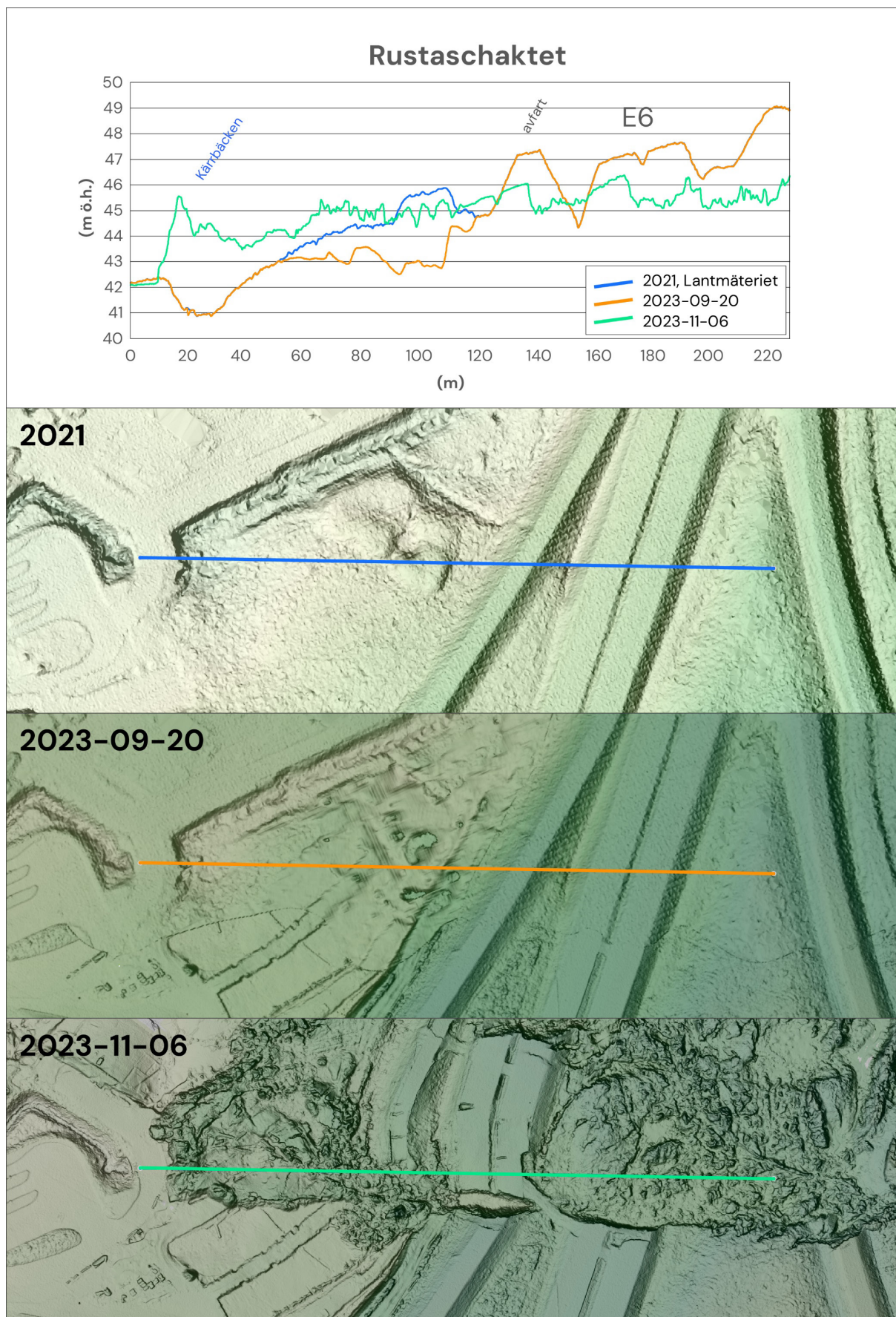
- Fredén, C., 1988: Marine life and deglaciation chronology of the Vänern basin, southwestern Sweden.
- Fredén, C., 1987: Beskrivning till jordartskartan Marstrand NO/Göteborg NV. *Sveriges geologiska undersökning A6 63*.
- Fredén, C., 1986: Quaternary marine shell deposits in the region of Uddevalla and Lake Vänern.
- Fredén, C., Brusewitz, A.M., Cato, I., Fält, L.M., Häger, K.-O., Miller, U. & Samuelsson, L., 1981: Tuveskredet 1977-11-30 Geologiska undersökningar. *Rapporter och meddelanden 29*. Sveriges geologiska undersökning.
- Freeman, T.G., 1991: Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences 17*, 413–422. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90048-I](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90048-I)
- Frogner-Kockum, P., Loores, K.-J. & Lindgren, Å., 2015: Trafikverkets handbok för hantering av sulfidförande bergarter. Trafikverket.
- Geertsema, M. & Torrance, J.K., 2005: Quick clay from the Mink Creek landslide near Terrace, British Columbia: Geotechnical properties, mineralogy, and geochemistry. *Can. Geotech. J.* 42, 907–918. <https://doi.org/10.1139/t05-028>
- Hibert, C., Ekström, G. & Stark, C.P., 2017: The relationship between bulk-mass momentum and short-period seismic radiation in catastrophic landslides. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface 122*, 1201–1215. <https://doi.org/10.1002/2016JF004027>
- Highland, L.M. & Bobrowsky, P., 2008: The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides (Circular No. 1325), Circular. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Hillel, D., 2003: Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier.
- Hjerne, C., Retzner, A., Hellstrand, E. & Thunholm, B., 2024: Klimatmodellering av grundvatten – grundläggande analys. *SGU-rapport 2024:04*. Sveriges geologiska undersökning.
- Hughes, A.L.C., Gyllencreutz, R., Lohne, Ø.S., Mangerud, J. & Svendsen, J.I., 2016: The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. *Boreas 45*, 1–45. <https://doi.org/10.1111/bor.12142>
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L., 2014: The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides 11*, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Isacsson, U., Sellin, C., Thorén, Grahnström, A., Öberg, M. & Kennedy, H., 2025: Skred vid Stenungsundsmotet i Stenungsunds kommun, Geoteknisk utredning av släntstabilitet. Statens geotekniska institut, SGI, Linköping.
- Jakobson, B., 1952: Landslide at Surte on the Göta River. Statens geotekniska institut.
- Johnson, M.D., Fredin, O., Ojala, A.E.K. & Peterson, G., 2015: Unraveling Scandinavian geomorphology: the LiDAR revolution. *Gff 137*, 245–251. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1111410>
- Karlsson, C., Sohlenius, G. & Becher, G.P., 2021: Handledning för jordartsgeologiska kartor och databaser över Sverige. *SGU-rapport 2021:17*. Sveriges geologiska undersökning, 83 s.
- Kenney, T.C., 1964: Sea-Level Movements and the Geologic Histories of the Post-Glacial Marine Soils at Boston, Nicolet, Ottawa and Oslo. *Géotechnique 14*, 203–230. <https://doi.org/10.1680/geot.1964.14.3.203>
- Kranck, K., 1975: Sediment deposition from flocculated suspensions. *Sedimentology 22*, 111–123. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1975.tb00286.x>
- Kristensson, T., 2014: Översiktlig stabilitetskartering Stenungsund kommun (MSB-rapport).
- Larsson, R., Westerberg, B., Albing, D., Knutsson, S. & Carlsson, E., 2007: Sulfidjord - geoteknisk klassificering och odränerad skjuvhållfasthet. *SGI rapport No. 69*. Statens geotekniska institut.

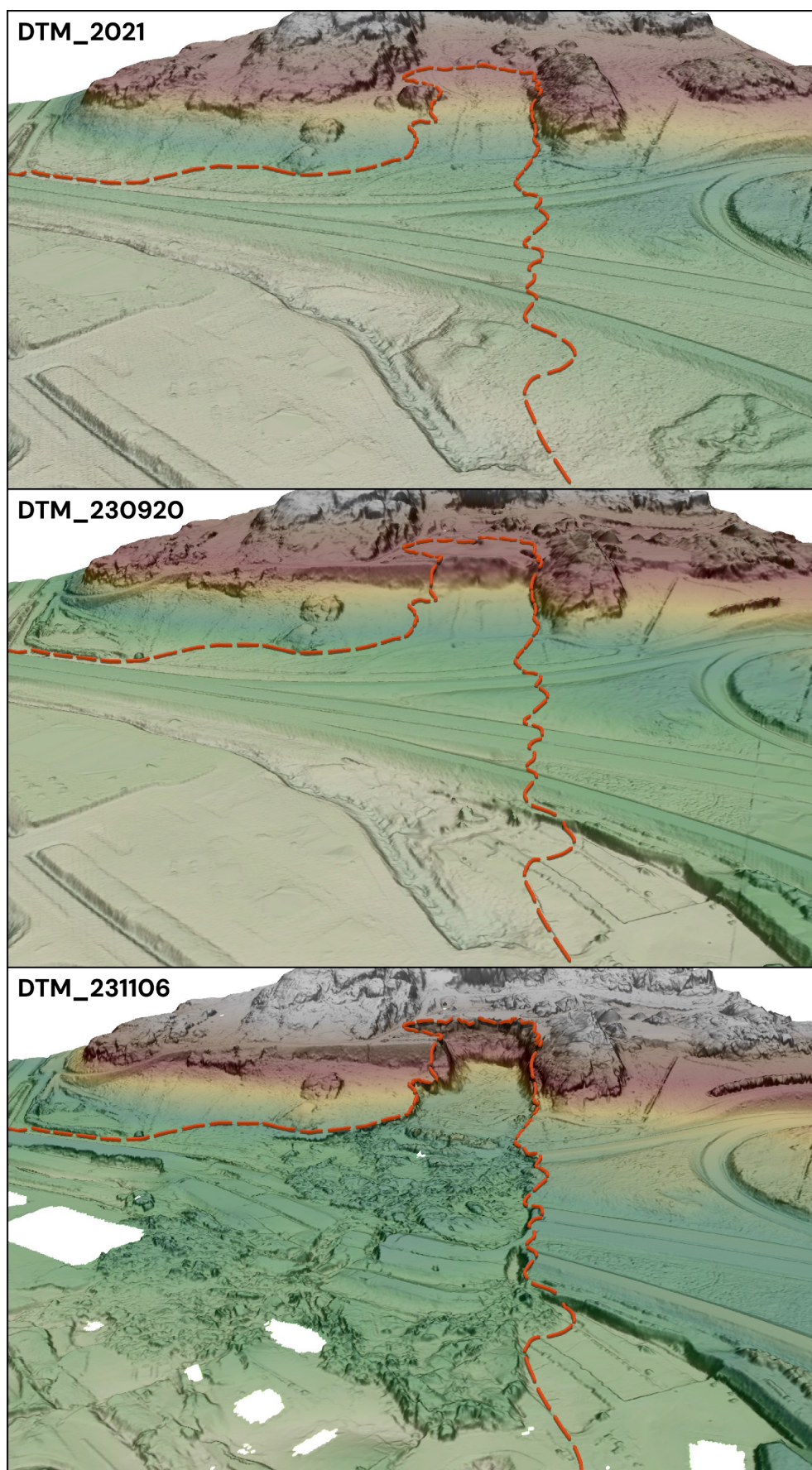
- Lindmark, A. & Norder, B.E., 1987: Väg E6 Göteborg - Uddevalla, anläggning av motorväg på delen Stora Höga - Bratteröd (Bygghandling). Statens geotekniska institut.
- Løken, T. & Torrance, J.K., 1971: The Geochemistry of Leached Drammen Marine Clay. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 93, 171–175.
<https://doi.org/10.1080/11035897109451936>
- Lundström, K., Andersson, M., Olsson, P. & Hedfors, J., 2016: Möjligheter att minska stabilitetsrisker i raviner och slänter vid skogsbruk och exploatering (*Skogsstyrelsen No. 10*).
- Moran, A., 2023: Fem saker som kan ligga bakom det stora skredet. Göteborgs-Posten.
<<https://www.gp.se/nyheter/vastsverige/fem-faktorer-som-kan-ha-utlost-skredet-vid-e6.b2c4db3b-f89f-4548-9d87-e52b58641116>> åtkommen 13 december 2024.
- Moum, J., Løken, T. & Torrance, J.K., 1971: A Geochemical Investigation of The Sensitivity of a Normally Consolidated Clay From Drammen, Norway. *Géotechnique* 21, 329–340.
<https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.4.329>
- Naturvårdsverket, 2024: Riktvärden för förorenad mark.
<<https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/fororenade-omraden/riktvarden-for-forerenad-mark/>> åtkommen 10 mars 2025.
- NGU, 2024: About InSAR Norway. <<https://www.ngu.no/en/geological-mapping/about-insar-norge-map-subsidence-and-unstable-rock-formations>> åtkommen 22 maj 2025.
- Påsse, T., Daniels & J., 2015: Past shore-level and sea-level displacements. *Rapporter och meddelanden* 137. Sveriges geologiska undersökning, 40 s.
- Persson, G., 1973: Postglacial transgressions in Bohuslän, southwestern Sweden. *Sveriges geologiska undersökning C* 684.
- Persson, H., 2007: Estimation of pore pressure levels in slope stability calculations: Analyses and modelling of groundwater level fluctuations in confined aquifers along the Swedish west coast. *SGI rapport No. 73*. Statens geotekniska institut, SGI, Linköping.
- Persson, M., 2014: Predicting spatial and stratigraphic quick-clay distribution in SW Sweden (PhD). University of Gothenburg, Department of Earth Sciences, Gothenburg.
- Peterson, G., 2023: Dokumentationsrapport. Observationer i samband med slamströmmen i Mörviksån, Åre, 7–8 augusti 2023. *SGU-rapport 2023:11*. Sveriges geologiska undersökning.
- Plink-Björklund, P. & Ronnert, L., 1999: Depositional processes and internal architecture of Late Weichselian ice-margin submarine fan and delta settings, Swedish west coast. *Sedimentology* 46, 215–234. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1999.sed195.x>
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. & Planchon, O., 1991: The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes* 5, 59–79. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- Quinn, P.E., Diederichs, M.S., Rowe, R.K. & Hutchinson, D.J., 2012: Development of progressive failure in sensitive clay slopes. *Can. Geotech. J.* 49, 782–795.
<https://doi.org/10.1139/t2012-034>
- Quinn, P.E., Diederichs, M.S., Rowe, R.K. & Hutchinson, D.J., 2011: A new model for large landslides in sensitive clay using a fracture mechanics approach. *Can. Geotech. J.* 48, 1151–1162.
<https://doi.org/10.1139/t11-025>
- Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V. & Dahlin, T., 2004: Quick clay in Sweden. (*No. 65*), *SGI rapport*. Statens geotekniska institut.
- Regnéll, C., Mangerud, J. & Svendsen, J.I., 2019: Tracing the last remnants of the Scandinavian Ice Sheet: Ice-dammed lakes and a catastrophic outburst flood in northern Sweden. *Quaternary Science Reviews* 221, 105862. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105862>

- Regnéll, C., Peterson Becher, G., Öhrling, C., Greenwood, S.L., Gyllencreutz, R., Blomdin, R., Brendryen, J., Goodfellow, B.W., Mikko, H., Ransed, G. & Smith, C., 2023: Ice-dammed lakes and deglaciation history of the Scandinavian Ice Sheet in central Jämtland, Sweden. *Quaternary Science Reviews* 314, 108219. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108219>
- Regnéll, C., Greenwood, S.L., Gyllencreutz, R., Peterson, G., Regnéll, J., Öhrling, C., Hardeng, J., Johnson, E., Bakke, J. & Cederström, J.M., 2025: *Anchoring the Swedish Time Scale to the Radiocarbon Time Scale — An Absolute Age for De Geer's Zero Varve*. *Geology*, April 28, 2025. <https://doi.org/10.1130/G53280.1>.
- Rosenqvist, I.T., 1977: A general theory for quick clay properties, in: Proc. 3. European Clay Conf. OS/O, 215–228.
- Scandiaconsult, 1993: Skredrisker i Stenungsunds kommun (MSB-rapport).
- Schoning, K., 2016: Saltvattenavsatta leror i Sverige med potential för att bilda kvicklera. *SGU-rapport 2016:08*. Sveriges geologiska undersökning, 7 s.
- Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (Eds.), 1978: Landslides: analysis and control, Special report / Transportation Research Board. National Acad. of Sciences, Washington, DC.
- SGI, 2024: Kartunderlag om ras, skred och erosion. <<https://www.sgi.se/sv/samhallsplanering--sakerhet/planeringsunderlag/kartunderlag-om-ras-skred-och-erosion/>> åtkommen 18 december 2024.
- SGI, 2021: Inträffade skred, ras och övriga jordrörelser (ver. 2021 - 1.4.1) <<https://gis.swedgeo.se/skred/>> åtkommen 18 december 2024.
- SGI, 2019: Skredrisker i ett förändrat klimat, prioritering för kartering (*SGI Publikation No. 47*). Statens geotekniska institut.
- SGU, 2024a: Jordartsdata (öppna data).
- SGU, 2024b: Jorddjupsmodell (öppna data).
- SGU, 2024c: Förutsättningar för skred i finkornig jordart.
- SGU, 2024d: Fastmark.
- SGU, 2024e: Riksöversikt över finkorniga jordars skredbenägenhet <<https://www.sgu.se/samhallsplanering/risker/skred-och-ras/riksoversikt-over-finkorniga-jordars-skredbenagenhet/>> åtkommen 18 december 2024.
- SGU, 2024f: Jordskred och raviner.
- SGU, 2024g: Kartvisare och diagram för beräknade nivåer <<https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/berakningsmodell/>>
- SGU, 2024h: Berggrund 1:50 000–1:250 000.
- SGU, 2024i: Isräfflor (öppna data).
- SGU, 2024j: Marina sedimentprov produktbeskrivning.
- SHK, 2025: Jordskred i Stenungsund: Statens haverikommission har utrett ett jordskred i Stenungsund den 23 september 2023.
- SLU, 2025: Artdatabanken. < <https://www.slu.se/artdatabanken/>> åtkommen 14 mars 2025.
- Smith, C.A., Engdahl, M. & Persson, T., 2014: Geomorphic and stratigraphic criteria used to date the Råda Landslide, Västra Götaland, Sweden. *GFF* 136, 1–5. <https://doi.org/10.1080/11035897.2014.910546>
- Smith, C.A., Larsson, O. & Engdahl, M., 2017: Early Holocene coastal landslides linked to land uplift in western Sweden. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 288–311. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1329624>
- Snäll, S., Persson, C. & Wikström, A., 1979: Mineralogisk undersökning av morän från ett område väster om Katrineholm, Serie C. SGU ; LiberKartor (distr, Uppsala : Stockholm.

- Söderblom, R., 1974: Organic Matter in Swedish Clays and its Importance for Quick Clay Formation (*SGI Publikation No. 26*), Proceedings.
- Stroeve, A.P., Hättstrand, C., Kleman, J., Heyman, J., Fabel, D., Fredin, O., Goodfellow, B.W., Harbor, J.M., Jansen, J.D., Olsen, L., Caffee, M.W., Fink, D., Lundqvist, J., Rosqvist, G.C., Strömberg, B. & Jansson, K.N., 2016: Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 147, 91–121. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.016>
- Suriñach, E., Vilajosana, I., Khazaradze, G., Biescas, B., Furdada, G. & Vilaplana, J.M., 2005: Seismic detection and characterization of landslides and other mass movements. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 791–798. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-791-2005>
- Talme, O.A., 1968: Clay sensitivity and chemical stabilization. Svensk byggtjänst (distr.).
- Torrance, J.K., 2012: Landslides in quick clay. Landslides: types, mechanisms and modeling. Cambridge University Press, Cambridge 83–94.
- Torrance, J.K., 1983: Towards a general model of quick clay development. *Sedimentology* 30, 547–555. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1983.tb00692.x>
- VISS, 2024: Vatteninformationssystem Sverige. VISS, Norumsån.
<<https://viss.lansstyrelsen.se/Waters.aspx?waterMSCD=WA81848005>>
åtkommen 25 september 2024.
- Waltham, T., 2009: Foundations of Engineering Geology, 3rd ed. Taylor & Francis Group.
- Wedel, P.O., 1971: The gothenburg moraine. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 93, 525–536. <https://doi.org/10.1080/11035897109455383>
- Wenner, C.-G., 1951: Data on Swedish Landslides. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 73. <https://doi.org/10.1080/11035895109453344>
- Yfantis, G., Pytharouli, S., Lunn, R.J. & Carvajal, H.E.M., 2020: Determination of the seismic signatures of landslides in soft soils: A methodology based on a field scale shear box. *Engineering Geology* 279, 105853. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105853>

Bilaga I – Kartor

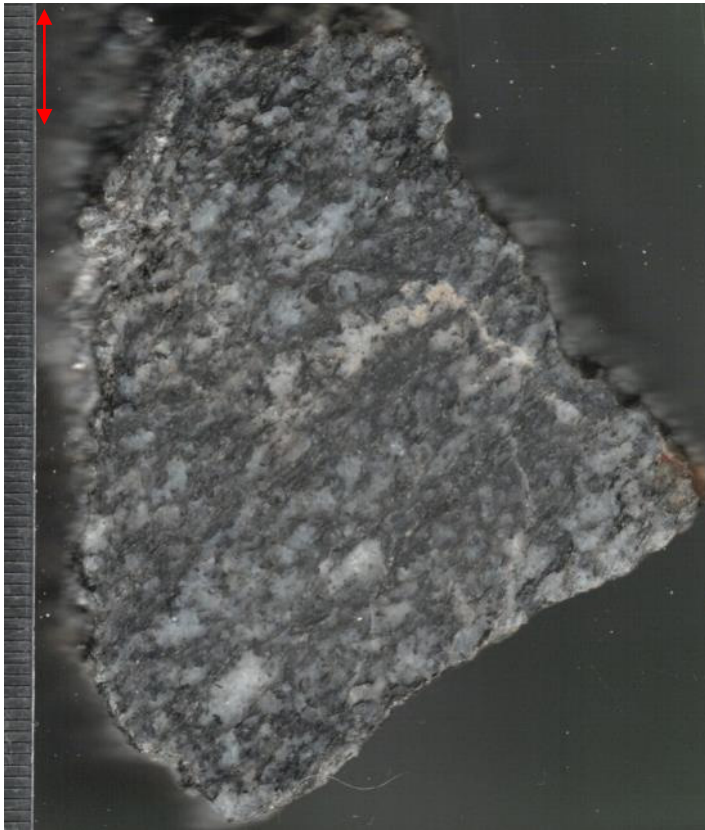




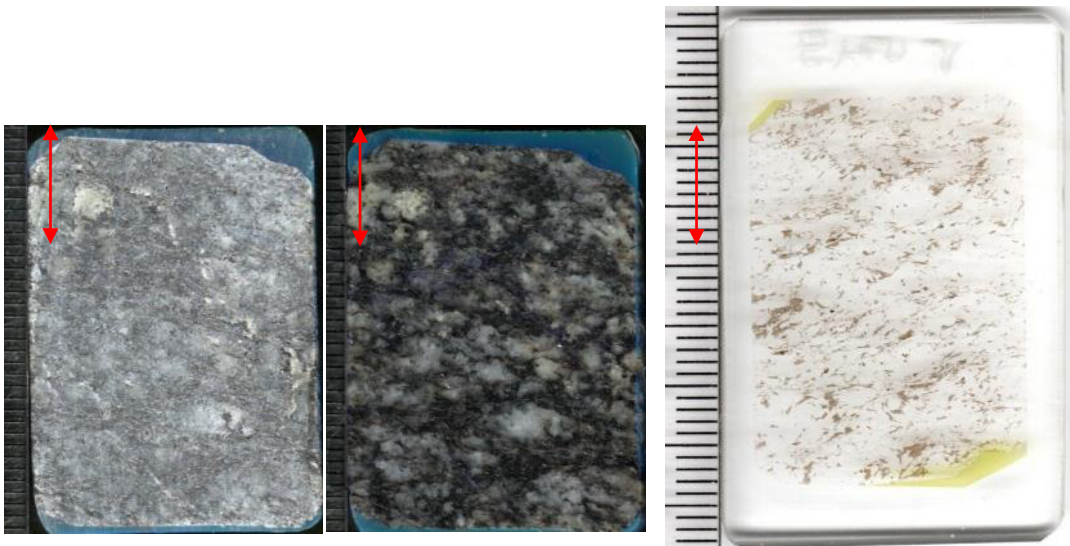
Bilaga II – Petrografi

Tabell IIa. Mineralfördelning (volymprocent) i undersökta bergprov från skredområdet. s = spår, Punkter = antal punkter räknade.

Prov	Sten 1
Mineral	Grå, gnejsig granodiorit till tonalit
Kvarts	35,2
Kalifältspat	4,1
Plagioklas	37,2
Biotit	14,8
Klorit	0,1
Muskovit	6,8
Granat	0,3
Titanit	0,6
Epidot	0,4
Allanit	0,2
Apatit	s
Zirkon	0,1
Opak	0,1
Kalcit	0,1
Rutil	s
Punkter	1 149



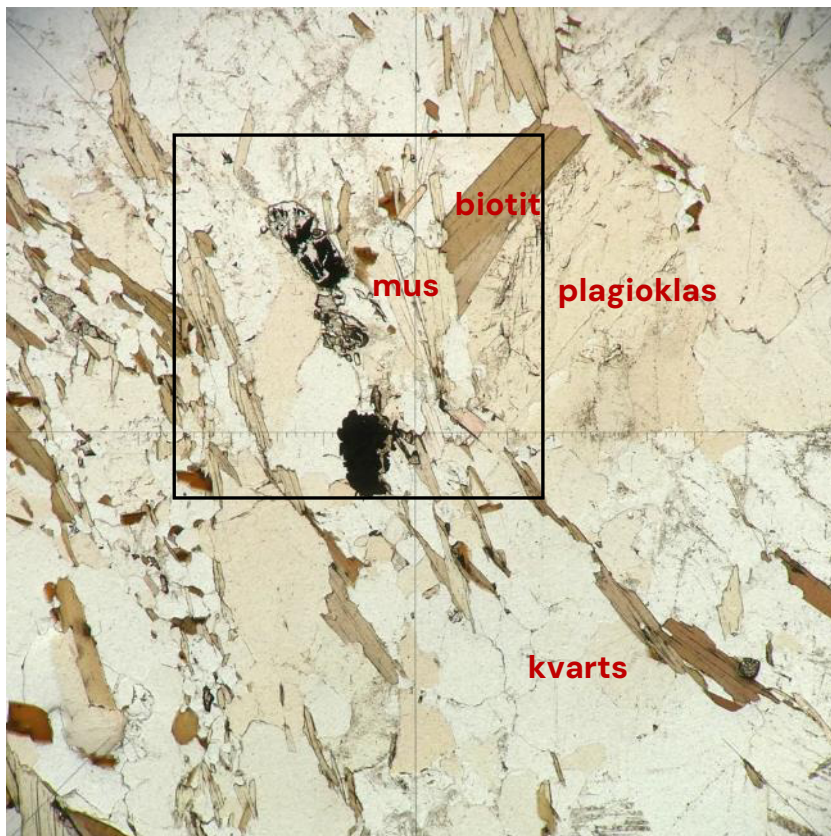
Figur IIa. Fuktad sågad yta av bergartsprov från vilken en bergkloss för tillverkning av tunnslip utsågats. Gnejsigheten (planstrukturen) orsakas främst av strimmor av biotit och muskovit samt utdragna aggregat och kristaller plagioklas. Millimeterskala finns längs vänstra bildkanten.



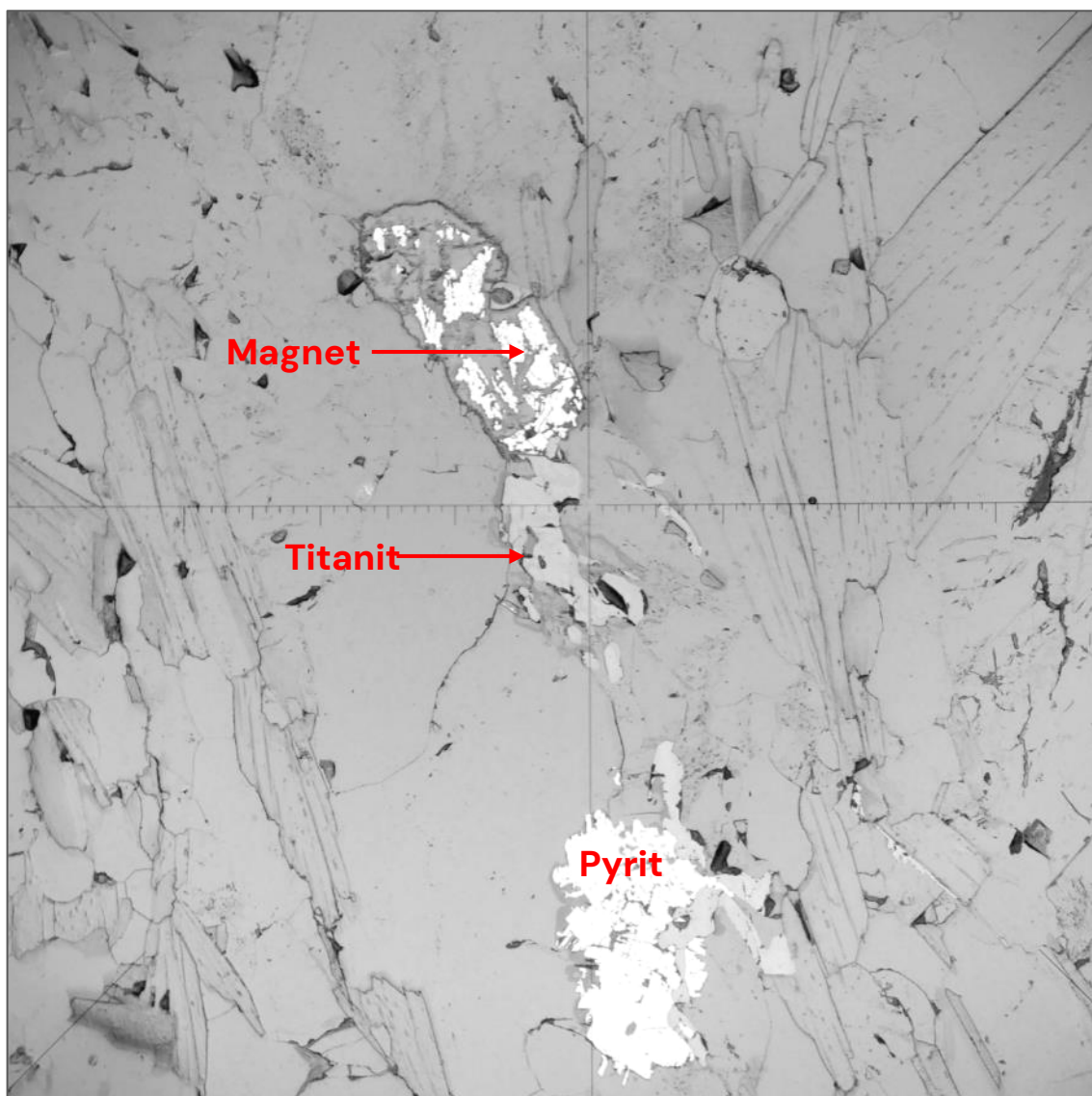
Figur IIb. Torr (t.v.) respektive fuktad motbit (i mitten) från vilket polerat tunnslip är tillverkat. Till höger polerat tunnslip (gulgröna områden är rester av infärgat epoxilim). Notera den tämligen finkorniga texturen och den måttliga foliationen. Skala i millimeter finns i vänstra kanten av motbit och vänstra i kanten av tunnslip. Röd dubbelpil är 10 mm lång.

Tabell IIb. Halt (volymprocent) av glimmermineral (biotit + muskovit), skiktsilikater (glimmermineral + klorit + lerm mineral) och opaka mineral i undersökt prov. Den relativa mängden av opaka mineral uppskattat vid reflektionsmikroskopiering anges från +++ = dominerande till + = underordnat, s = spår.

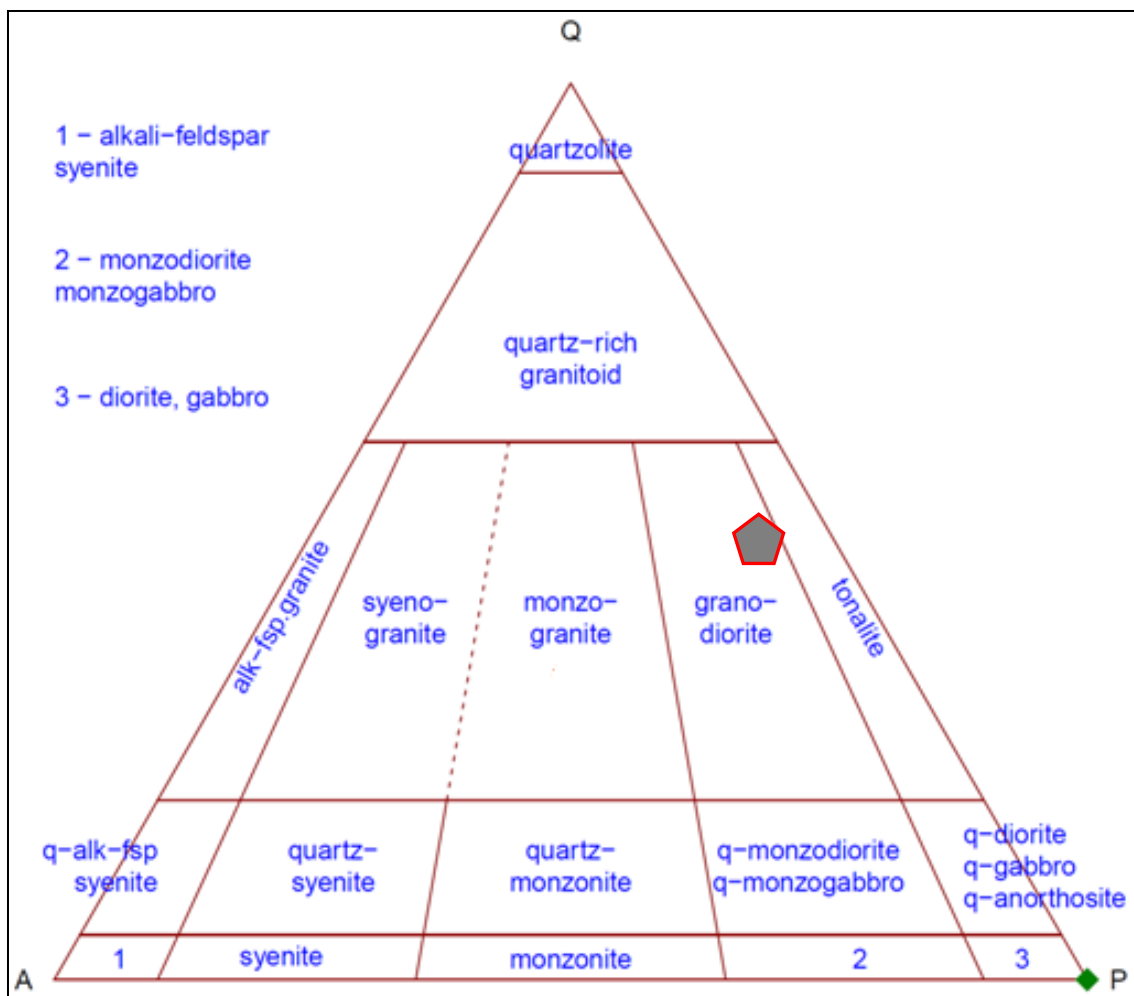
Prov		Sten 1
Bergart		Granodioritisk gnejs
Glimmermineral		21,6
Skiktsilikater		21,7
Opaka mineral		0,1
Oxider	Magnetit	+++
	Hematit	+
	Götit	s
	Ilmenit	+
	Fe-oxyhydroxider	+
Sulfider	Pyrit	++
	Kopparkis	–
	Rutil	+



Figur 11c. Tunnslipsfotografi av bergprovet från östra delen av bergsryggen som begränsar skredområdet åt söder. Gnejsigheten definieras främst av strimmor och flakiga aggregat av glimmer (biotit och muskovit). Även strimmor av kvarts och fältspat bidrar till gnejsstrukturen. Svart kvadrat visar i bildområde reflekterat ljus i figur 12. Mus= muskovit. Bildbredd 2,5 mm.



Figur 11d. Tunnslipsfotografi i reflekterat ljus av bergprovet från gnejsen. Foliation (planstruktur) framträder också i reflekterat ljus. Ilmenit, magnetit och pyrit finns i begränsad mängd i den granodioritiska till tonalitiska gnejsen. Bildbredd 1,25 mm.



Figur IIe. Sammansättning av det undersökta bergprovet från Skredområdet (brun femhörning) plottade i ett klassificeringsdiagram för magmatiska bergarter enligt Streckeisen (1976). Systemet är grundat på bergarters halt av kvarts (Q), alkalifältspat (A) och plagioklas (P).



Figur II f. Reststuffer från tillverkningen av tunnslip. Foto: Thomas Eliasson.

Bilaga III – Jordprov

Grundämne	Stenigskivskredit										Smektvärdet		Glasidre		Vattenhalt		SGU-näringsdatabas 0-10 cm		NV
	21K000	21K002	21K003	21K004	21K005	21K017	21K018	21K019	21K020	21K021	21K022	21K023	21K024	21K025	21K026	21K027	21K028	21K029	
Aluminium	77600	78600	71700	61800	71100	86500	71000	71100	60900	70400	74600	77900	78400	79300	79300	79300	79300	79300	47400
As, arsenik	3.15	5.57	3	3	4.25	679	679	683	346	686	798	670	690	690	690	690	690	690	10
Ba, baryum	765	778	719	606	759	750	750	750	346	686	798	670	690	690	690	690	690	690	10
Be, beryllium	14200	14500	14600	14400	14300	21400	14500	14600	14300	14500	14600	14300	14500	14600	14300	14500	14600	14300	10
Ca, kalcium	0.106	0.0906	0.0684	0.0928	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	0.0887	10
Co, kobolt	15.7	19.8	11.8	8.47	17.4	15.8	11.2	10	12	14	13.9	13.7	12	13	13	13	13	13	10
Cu, koppar	23.4	21.2	35.9	33.1	22	21.1	17.1	15	16.5	21.5	20	15.6	21	20	21	18	23	24	10
Fe, järn	45100	38800	33800	28800	47500	50100	49900	37700	37600	41400	47500	41600	45400	46100	44700	42600	44700	42600	10
Hg, kvicksilver	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	10
Mn, mangan	10000	14100	47800	63300	13700	14600	11100	10100	10600	12500	13300	12900	13700	14600	11100	10100	10600	12500	10
Mg, magnesium	897	924	670	574	987	506	699	709	693	779	819	835	666	705	658	651	852	852	10
Mo, molybden	1.07	1.28	0.702	0.649	1.06	1.11	1.1	1.4	0.678	1.74	0.841	0.582	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	10
Nb, niobium	2.07	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	10
Ni, nickel	15.6	17.1	11.1	10.7	16.7	17.5	16.5	16.6	14.4	15.9	17.1	17.5	21	22	23	21	28	28	10
P, fosfor	8.24	842	648	728	891	911	707	751	652	722	748	726	829	829	786	742	829	829	10
Pb, bly	817	733	727	727	727	727	727	727	727	727	727	727	727	727	727	727	727	727	10
Se, selen	0.36	0.299	0.232	0.239	0.279	0.305	0.189	0.144	0.211	0.327	0.233	0.174	13	14	15	12	14	14	10
Si, silicium	11.5	10.6	8.21	9.71	12.4	14.6	14.1	14.6	10.8	12.5	15.7	12.9	13	14	15	12	14	14	10
Sn, tin	31000	30000	31000	31000	31000	31000	31000	31000	31000	20700	34000	34000	29400	27800	29400	29400	29400	29400	10
Sr, strontium	260	260	274	272	254	260	253	256	215	222	231	243	210	210	220	220	210	210	10
Tl, titan	88.3	97.6	65.3	60.3	93.8	103	76	71	75.9	90.3	90.3	81.3	390	377	4077	4137	3837	4496	10
V, vanadin	34.6	35	28.8	28.9	34.6	37.8	39.3	32.9	68.1	85.4	86	64.6	83	84	85	71	96	88	10
Zn, zink	98.2	94.3	60.1	40.4	102	97.8	71.1	62.9	68.1	85.4	86	64.6	83	84	85	71	96	88	10
Zr, zirkonium	263	269	272	448	284	245	314	372	260	246	245	261	220	240	220	270	220	250	10
LOI 1000°C	2.2	2.38	1.37	0.848	2.69	3.05	1.9	1.52	2.35	2.06	2.36	2.25	3.6	5	5.9	3.9	2.9	2.6	1.7
Vattenhalt	36	31.7	23.4	18.4	32	32.2	31	26.2	23.4	30.3	24.4	24.2	3.3	2.4	1.3	2.3	2.8	2.7	10

Tabell IIIb. Mineralogisk analys med XRD.

Prov	23CW020 18	23CW020 22	23CW020 26	23CW020 30	23CW020 34	23CW127 7	23CW127 9	23CW127 11	23CW127 13	CHO245003	CHO2407	CHO2408
djup	18,0	22,0	26,0	30,0	34,0	7,0	9,0	11,0	13,0	378	42,5	42,5
Amorf	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.	ej signif.
Kvarts, SiO ₂	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Albit, NaAlSi ₃ O ₈	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Mikroclin, KAlSi ₃ O ₈	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
Kalcit, CaCO ₃	(x)	(x)	(x)	(x)	x	x						
Klinoklor, Mg ₂₈ Fe ₁₇ Al ₁₃ Si ₁₂ O ₄₀ (OH) ₈	x	x	x	x	x	x						
Klinoklor–IMlb, Fe+2-haltig, Mg ₂₈ Fe ₁₇ Al ₁₇ Si ₁₂ O ₄₀ (OH) ₈							x	x	x	x	x	x
Biotit–IM, K _{0,84} Na _{0,03} Mg _{0,89} Ti _{0,12} Fe _{1,38} Al _{1,83} Si _{12,77} O _{40,25} (OH) _{1,68} F _{0,07}	xx	xx	xx	x	xx	xx						
Biotit–IM, KFeMg ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂							x/xx	x/xx	x/xx	x/xx	x/xx	x/xx
Magnesiohornblände, Ca ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₄ Al(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH,F)	x	x	x	x	x	x						
Cordierit, Mg ₂ Al ₄ Si ₆ O ₁₈							x	x	x	x	x	x



Prov CHO245003. Foto: Christian Öhrling.



Provgrop. Foto: Christian Öhrling.