

Utökad geologisk undersökning – Tjärnviksdalen



Gustaf Peterson, Peter Dahlqvist & Björn Wiberg

SGU-rapport 2025:08
Diarie-nr: 000471-2023

www.sgu.se

Författare: Gustaf Peterson, Peter Dahlqvist och Björn Wiberg
Granskad av: Anna Hedenström och Mats Wallin
Ansvarig enhetschef: Mats Wallin
Redaktör: Johan Sporrang

Omslagsbild: Drönarbild från Indalsälven mot Gesunden
Fotograf: Gustaf Peterson

Juni 2025

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

Innehåll

Inledning.....	5
Bakgrund.....	6
Tidigare studier i Tjärnviksdalen.....	6
Geologisk bakgrund	8
Syfte och mål med studien	9
Kunskap om bergöverytans läge.....	9
Kunskap om jordlagerföljden.....	9
Kunskap om de hydrogeologiska förhållandena	9
Erosionskänslighet och förutsättning för skred och slamströmmar.....	10
Metoder	11
Borrningar	12
Geofysiska undersökningar.....	13
Mätning av grundvattennivåer	14
Interpolering av grundvattenyta	15
Kemisk analys av vattenprover.....	16
Jordartsanalyser	17
Fältarbete	17
Lodning av Öratjärn	18
3D-modellering.....	18
GIS-analyser, skred och slamströmmar	18
Modellering av geomorfologiska förutsättningar för slamströmmar	18
Modellering av geomorfologiska och geologiska förutsättningar för skred.....	19
Resultat och tolkning.....	20
Geologiska förhållanden	20
Lagerföljder	20
GFP232001.....	22
GFP232002	23
GFP232003	24
GFP232004	25
GFP232005	26
GFP232006	28
GFP232007.....	29
GFP232008	30
GFP232009	32
GFP232054.....	34
GFP232055.....	35
GFP232057.....	37
GFP242001.....	39
GFP242003	41
GFP242005	42
Jordartsanalyser.....	43
Geofysiska mätningar	43
Jordartsgeologisk kartläggning	45
Förutsättningar för slamströmmar och skred.....	48
Hydrogeologiska förhållanden.....	50

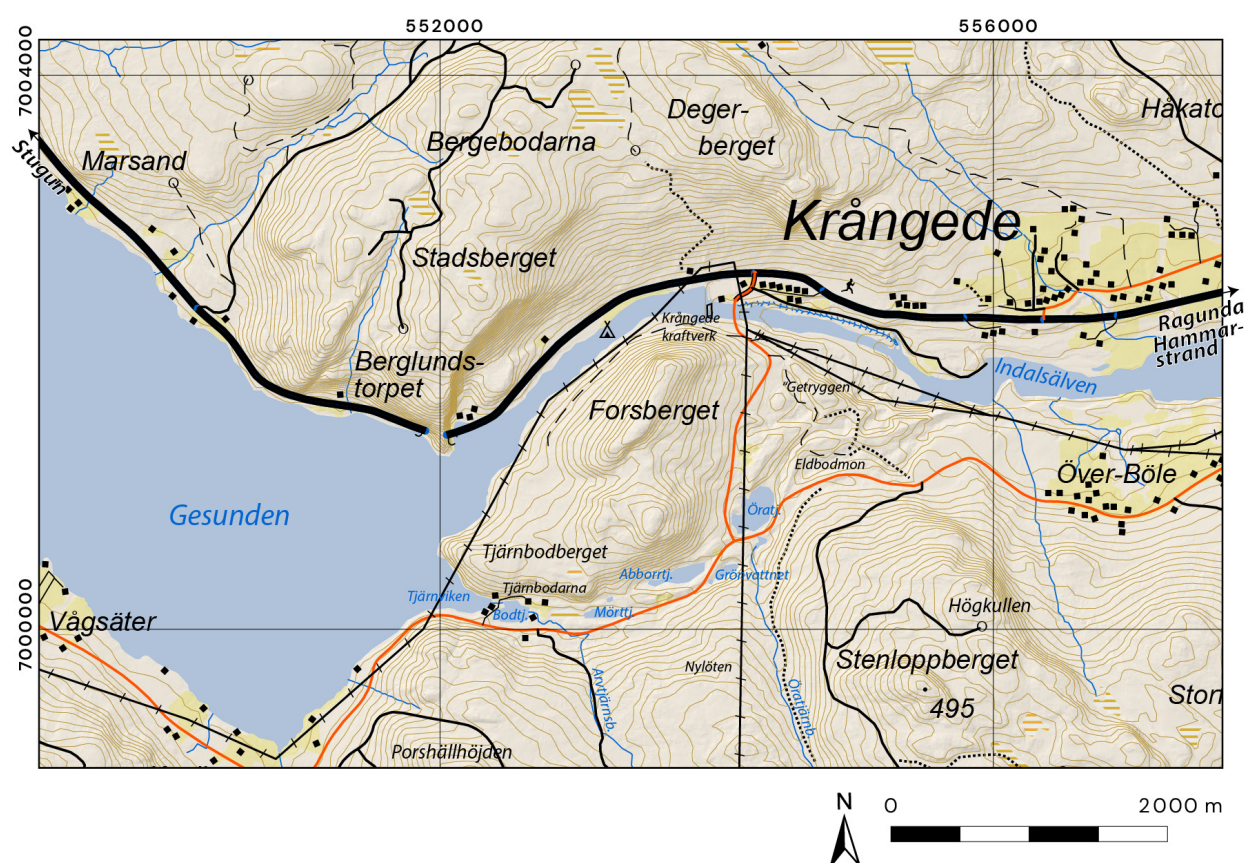
Grundvattenundersökningar.....	50
Källor	52
Resultat grundvattenkemi	53
Grundvattenytan.....	55
Grundvattenmagasin	56
Öratjärns bottenpografi	56
3D-modell.....	58
Antaganden.....	58
Beskrivning av geologiska sektioner	59
Längs dalgången, V–O	60
Sektion A (figur 41).....	60
Tvärs dalgången, V–O; N–S.....	63
Sektion 7 (figur 42)	63
Sektion 6 (figur 43).....	65
Sektion 4 (figur 44).....	66
Sektion 2 (figur 45).....	67
Beskrivning av 3D-modellen.....	68
Diskussion	70
Den geologiska utvecklingen.....	70
Förekomst av bergtröskel	71
Hydrauliska gradienten genom Tjärnviksdalen	72
Komplexa lagerföljder	73
Geologiska förutsättningar för genombrott	74
Intern erosion	74
Bakåtgripande erosion	76
Överströmning.....	77
Slutsatser och rekommendationer.....	80
Slutsatser	80
Bergtröskel	80
Jordarternas utbredning och egenskaper	80
Grundvattnet	80
Förutsättningar för genombrott.....	81
Bedömning	82
Geologisk historia.....	82
Geologisk uppbyggnad.....	82
Hydrogeologiska förhållanden	83
Rekommendationer	84
Referenser.....	86
Bilaga 1	

Inledning

Tjärnviksdalen i Ragunda kommun utgör ett område med intressant geologisk historia. Dalen, som under istiden utgjorde en dräneringsväg för inlandsisens smältvatten under isen, kännetecknas idag av en mäktig rullstensås och ett antal tjärnar, skapade när begravda isblock smälte. Den så kallade Tjärnviksdalen är den dalgång som löper söder om Forsberget, från Gesunden (Tjärnviken) i väster till Indalsälven i öster (fig. 1).

En frågeställning som har diskuterats under lång tid är eventuella förutsättningar för att Indalsälven ska kunna bryta en ny fåra genom dalen, vilket skulle få betydande konsekvenser för landskapet, infrastrukturen och den omgivande miljön.

Denna rapport är ett resultat av undersökningar genomförda av Sveriges geologiska undersökning (SGU) på uppdrag av Ragunda kommun med finansiering från MSB (SGU diarienummer 000471-2023). Rapporten syftar till att kartlägga de geologiska och hydrogeologiska förhållandena i Tjärnviksdalen, bedöma de geologiska förutsättningarna för ett eventuellt genombrott samt diskutera eventuella följder av markanvändning och verksamheter i området.



Figur 1. Översiktskarta över studieområdet med namn som nämns i texten utsatta.

Bakgrund

Tidigare studier i Tjärnviksdalen

En oro för ett potentiellt genombrott har funnits under en längre tid, vilket har lett till ett antal studier och utredningar som har syftat till att belysa och kartlägga förutsättningarna för ett genombrott från Gesunden i väster, genom Tjärnviksdalen och ut i Indalsälven.

Högbom (1899) beskriver hur Tjärnviksdalen (Tjernviken) utgör en intressant plats att undersöka de isälvs-sediment som finns i dalgången och som har dämt upp Gesunden. Han beskriver också hur dessa sedimentavlagringar har påverkat Indalsälvens lopp så att den rinner genom Krångede, på andra sidan av Forsberget, i stället för genom Tjärnviksdalen. Tjärnviksdalen var i stället aktiv som en dräneringsväg under inlandsisen, i samband med att rullstensåsen bildades. Högbom beskriver situationen på sidan 62 i ”Om Ragundadalens geologi” 1899:

”Kolossala och af stor betydelse för dalens geografiska fysiognomi äro de åsbildningar, som ifrån Tjernviken sträcka sig genom den trånga och djupa, af flera småsjöar utmärkta dalgången framemot Krångede (Tjernviksdalen). Sina största dimensioner nå dessa nedanför och öster om Öringstjernen, men de blifva der också mycket oregelbundna, uppdelade i flera kullar och ryggar, af hvilka likvisst en del blifvit i senare tid tillformade eller modifierade af elfven. Då småsjöarna öster om Tjernviken dels ligga i samma nivå med denna (de två vestligaste), dels betydligt lägre, och då de lösa aflagringarna i denna dal ha en stor mäktighet, så är det intet tvifvel om, att Gesunden, hvars nuvarande utlopp går öfver klippgrund, på denna väg skulle kunna afstäppas och sänkas.”

Hans W:son Ahlmann och Carl C:zon Caldenius genomförde omfattande studier av Ragundadalens geomorfologiska och stratigrafiska utveckling (W:son Ahlman m.fl. 1924). Dessa studier ger en geologisk och historisk kontext till Tjärnviksdalen, men inga direkta studier kring Tjärnviksdalen utfördes som en del av deras arbete.

Mer populärvetenskapligt, eller närmast poetiskt, beskrivs förutsättningar för ett genombrott, och den förmodade likheten med geologin kring det nuvarande Dödafallet, av provinsialläkare Karl Wedholm i STF:s årsbok om Jämtland (1934). Förutom sitt målade språk hade Wedholm en stor tilltro till ingenjörskonsten i samband med bygget av Krångede kraftverk (sidan 155 i ”Svenska turistföreningens årsskrift 1934: Jämtland”):

”Ett grävningsföretag à la Vild-Hussen genom grusåsarna i Indalsälvens forntidsfåra vid Gesundens utlopp skulle lätt kunna tömma den stora sjön och förvandla Krångedeforsarna till en serie av döda fall. En katastrof på denna punkt finge ännu väldigare mått än 1796 års tilldragelser. Emellertid pågår nu dessa forsars industriella utbyggnad. De män, som leda denna, äga kunskaper och ansvarskänsla av andra mått än Vild-Hussen. Sjöns och fallens tillvaro är därför tryggad för överskådlig tid.”

Wedholms resonemang baserades på underlag från de av SGU tidigare utförda geologiska kartläggningarna (Högbom 1899, W:son Ahlman m.fl. 1924). Det är i dessa texter som grunden till diskussionen om problematiken kring ett eventuellt genombrott har sitt ursprung.

Åke Hörnsten (1968) beskriver kortfattat slutsatserna av en litteraturstudie, flygbildsanalys och ett platsbesök sommaren 1968. Hörnsten noterade att de nordöstra delarna av dalgången sannolikt består av ett delta, troligen byggt upp till eller nära högsta kustlinjen. Sand- och grusavlagringarna ansåg Hörnsten huvudsakligen vara åsar och laterala isälvsavlagringar, alltså de vid sidan om åsen avsatta sedimenten, och att de dämmer upp Gesunden. Vidare resonerade han kring de isdämda sjöar som beskrivits i området (Lundqvist 1959) men att deras tappningar inte har påverkat landskapet nämnvärt. Han noterade också att området har ett stort grundvattenflöde genom grusavlagringarna. Hörnsten lyfter också fram Tjärnviksdalen som en plats för att studera isälvsavlagringar inom till exempel geovetenskapliga utbildningar och inte minst att området sannolikt har ett stort värde för rekreation och friluftsliv (Hörnsten 1968).

Förutsättningarna för ett genombrott i Tjärnviksdalen uppmärksammades senare i samband med en kraftig vårflood 1995 (SMHI 2009). Vattennivån i sjön Gesunden var vid det tillfället mycket hög och frågan kom då upp om det fanns möjligheter att vattnet i en höglödessituation skulle kunna ta en ny väg genom Tjärnviksdalen. Diskussionen ledde till ett behov av att utreda förutsättningar för ett genombrott och som en följd av detta utfördes en geologisk undersökning uppdelad i två steg, på uppdrag av Länsstyrelsen i Jämtlands län, av SGU med syfte att lokalisera en eventuell bergtröskel i dalgången. (Daniel 2004, 2005). Steg 1 innebar insamling och sammanställning av befintligt geologiskt och geotekniskt material från bland annat projekteringen av Krångede kraftverk. Steg 2 inkluderade omfattade fältundersökningar, inklusive seismiska undersökningar, för att kartlägga jordlagerföljden och djupet till berg i dalgången. Studien konstaterade att det var svårt att göra en säker bedömning med den tillgängliga informationen och rekommenderade ytterligare undersökningar.

År 2013 utfördes en sjömätning på uppdrag av Länsstyrelsen i Jämtland (Vestlund 2014). Sjömätningen visar hur rullstensåsen fortsätter ut i Gesunden samt indikationer om bergytans läge, ingen tydlig bergtröskel påträffades.

Med grund i studierna från SGU (Daniel 2004, 2005) sammanställde Länsstyrelsen i Jämtlands län en rapport som granskade förutsättningarna för ett genombrott av Gesunden (Svedberg & Olofsson 2014). Rapporten konstaterade att det fanns ett antal faktorer som påverkar förutsättningarna för ett eventuellt genombrott, bland annat dalens sammansättning av lätt eroderbara sediment, en hög grundvattengradient och avsaknad av en tydlig bergtröskel. Att dalen enligt studien (Svedberg & Olofsson 2014) består av lätt eroderbara sediment har inte stöd i tidigare studier (se Högbom 1899) eller senare kartläggningar (Lundqvist 1969, Peterson Becher m.fl. 2024). Svedberg och Olofsson (2014) rekommenderade ytterligare undersökningar för att bättre förstå de geologiska förhållandena.

Karl-Erik Löven (2015), civilingenjör vid Fortum, skrev en kommentar kring förutsättning för älvgenombrott i vilken han utförde kortfattade och övergripande analyser för att ge en indikation huruvida någon förutsättning för genombrott föreligger. Baserat på dessa analyser menar han att förutsättningarna för genombrott, genom intern erosion, är låga även med en höjning av vattennivån. Däremot påtalar han att förutsättningarna för bildandet av en ny älvfåra, genom överströmning, kan vara ett mer aktuellt problem men berör inte det mer i sin text.

På uppdrag av Fortum, som äger och driver kraftverksdammen i Krångede, besökte konsultföretaget WSP området och gjorde bedömningen att förutsättningarna för genombrott är reella men att ytterligare undersökningar behövs (Nilsson & Wallström 2015). Nilsson och Wallström (2015) beskriver tre tänkbara förlopp: överströmning, intern erosion och bakåtgripande erosion. Bland dessa tre anger de att det förlopp som är mest kritiskt att utreda är bakåtgripande erosion i slutningen ned mot Indalsälven. I beskrivningen till besöket påtalas vikten av ökad förståelse för variationen i sjöarnas nivåer, speciellt i Öratjärn. Vidare påtalar Nilsson och Wallström (2015) vikten av att få en bild av Öratjärns bottenpografi, grundvattenytan i dalgången samt jordarternas utbredning.

Konsultföretaget Norconsult utförde ytterligare en fältstudie på uppdrag av Fortum (Wilén & Persson 2021). Studien omfattade geologiska, geotekniska och hydrogeologiska observationer. Rapporten föreslog kompletterande undersökningar i form av en stegvis strategi, bland annat installation av grundvattenrör för att övervaka grundvattennivåer och provtagning av botten-sediment i tjärnarna. Författarna rekommenderade även en analys av avrinningsområdet och hydraulisk modellering för att få en bättre förståelse för vattenbalansen i dalgången.

Dessa tidigare studier har bidragit till att öka kunskapen om Tjärnviksdalen. De har dock också identifierat ett antal kunskapsluckor som behöver åtgärdas genom ytterligare undersökningar för att med större trovärdighet bedöma förutsättningen för ett genombrott.

Genom att kombinera resultat från tidigare studier med nya undersökningar syftar denna rapport till att ge en mer komplett bild av Tjärnviksdalen och de förutsättningar som är förknippade med ett potentiellt genombrott. Rapporten utgör ett viktigt underlag för att fatta välgrundade beslut om markanvändning och förvaltning av detta unika område.

Geologisk bakgrund

Studieområdet utgörs av avrinningsområdena ned mot sjöarna i Tjärnviksdalen samt branterna ned mot Indalsälven (fig. 1). Den norra delen av studieområdet utgörs av Forsberget 382 meter över havet (m. ö.h.). Den södra delen avgränsas i höjdområdena mellan Porshällhöjden (331 m ö.h.), Storrisberget (473 m ö.h.), Fjällmarkshöjden (503 m ö.h.), Stenloppberget (496 m ö.h.) och Höggkullen (442 m ö.h.). Själva dalgången ligger kring 200 m ö.h., med lågpunkter ned mot 170 m ö.h. och höjder på närmre 230 m ö.h. Sjön Gesunden i områdets västra del har en vattennivå mellan 203 och 205 m ö.h. Indalsälvens nivå nedströms Krångede kraftverk ligger på cirka 145 m ö.h., således mer än 50 m under Gesundens yta.

Området ligger inom vad som brukar kallas Bergkullelandskapet (Lundqvist 1969), vilket karakteriseras av mjukt rundade kullar med en relief på 40–800 m. Det anses ursprungligen vara en slätt som sedermera djupvittrat, varav kullarna utgör kvarlämnade restberg som sedan blivit glacialt präglade (till exempel Lidmar-Bergström & Näslund 2002) och därför är ställvis höjdområdena utdragna i inlandsisens rörelseriktning (Blomdin m.fl. 2021). Bergarterna i området utgörs främst av olika graniter, ställvis med porfyrisk egenskaper (Gorbatshev m.fl. 1997, SGU 2024a)

Glacialgeologin i centrala Jämtland de senaste cirka 100 000 åren är komplicerad, men nedan följer ett försök till sammanfattning. Under perioden cirka 71 000–57 000 år sedan avsattes sediment framför inlandsisen under dess tillväxt och deglaciation. Dessa sediment, återfinns ställvis under en moränbädd bildad av yngre nedisningar i Jämtland (Lundqvist 1967, Peterson Becher m.fl. 2024). I området kring studieområdet förekommer sediment från denna period, bland annat vid Kånkback, Dövik och Köttsjön (Lundqvist 1967, Peterson Becher m.fl. 2024).

För runt 55 000 år sedan retirerade inlandsisen från öster mot fjällkedjan, vilket skapade landformer utefter iskanten, såsom randmoräner och Veikimorän (Alexanderson m.fl. 2022, Lagerbäck 1988, Peterson Becher m.fl. 2022, 2024). En av dessa randmoräner ligger i anslutning till studieområdet, i höjdområdena kring Hammarstrand (Peterson Becher m.fl. 2022).

För cirka 35 000 år sedan nådde inlandsisen sin minsta utbredning innan den senaste deglaciationen. Moräntäckta sediment i områden som Undersåker (Peterson Becher m.fl. 2024) indikerar att isen under denna tid främst höll sig inom fjällregionen. Liknande fynd i Norges inland (Mangerud m.fl. 2023) påvisar en liten så kallad bergskedjeis. Hela Jämtlands län var sannolikt mer eller mindre isfritt vid denna tid.

Ett kallare klimat ledde till att en inlandsis ytterligare en gång avancerade från fjällen och under perioden cirka 30 000–10 600 år sedan nådde inlandsisen sin största utbredning, med iskanten i norra Tyskland cirka 21 000 år före nutid. När inlandsisen drog sig tillbaka skiftade isrörelsen från nordlig till östlig riktning.

Vid cirka 10 500–10 000 år före nutid började iskanten dra sig tillbaka, i västra Jämtland mot öster, från nuvarande Norge mot fjällens vattendelare och i Västernorrland i stället mot väster, från nuvarande Östersjökusten och inåt landet. Issjöar bildades och tappades successivt i väst, med den Centraljämtska issjön som störst cirka 10 100 år före nutid, innan den tappades genom Gimdalen till Ancylussjön (nuvarande Östersjön) (Regnéll m.fl. 2023).

I Tjärnviksdalen bildas nu den rullstensås som är central i dalgången. Rullstensåsen bildas genom snabbt flödande smältvatten i en tunnel under inlandsisen. Avsättningen av sedimenten skedde i

ett flöde från de inre delarna av inlandsisen och ut mot iskanten, i Tjärnviksdalen således från väster mot öster.

Vid cirka 9 800 år före nutid hade inlandsisen försvunnit från området, och den högsta kustlinjen nådde sin högsta nivå. Ancylussjön sträckte sig som längst in till Stugun, och lera samt silt avsattes på Ancylussjöns botten. Vid Tjärnviksdalen avsattes sediment upp till Ancylussjöns nivå. Rullstensåsen och övriga sediment dämde effektivt upp Tjärnviksdalen och vattnet flödade i stället vid Krågedeforsen. Landhöjning och vågsvall formade dalgångens sluttningar och skapade svallgrus samt ursvallad morän. Alltmedan landet höjde sig skar den dåvarande Indalsälven ned i sin nuvarande fåra och Tjärnviksdalen hade rest sig över Ancylussjöns nivå för knappt 8 500 år sedan (Peterson Becher m.fl. 2024).

Syfte och mål med studien

Trots flertalet studier om Tjärnviksdalen finns det fortfarande ett antal obesvarade frågor som kräver ytterligare undersökningar för att få en fullständig bild av förutsättningarna för ett eventuellt genombrott, och för att i ett senare skede kunna utforma effektiva åtgärder vid behov. Genom att besvara dessa kvarstående frågor med hjälp av ytterligare forskning och undersökningar kan vi få en djupare förståelse för förutsättningar för ett eventuellt genombrott i Tjärnviksdalen. Denna kunskap är avgörande för att kunna fatta välgrundade beslut om och hur området ska förvaltas, samt att utveckla effektiva strategier för att skydda miljön och samhället.

Kunskap om bergöverytans läge

Tidigare geofysiska mätningar har gett en indikation om bergöverytans djup, men informationen är begränsad och osäker. Därför har det i denna studie utförts borrhningar och sonderingar i hopp om att bekräfta bergöverytans läge och utesluta eventuella områden med små jorddjup. Utöver detta har det utförts ytterligare studier med geofysiska metoder i form av resistivitet och georadar.

Kunskap om jordlagerföljden

Tidigare studier har visat att jordarterna i Tjärnviksdalen är förhållandevis finkorniga men med grövre sediment på djupet (Daniel 2004, 2005). Dock saknades detaljerad kunskap om jordlagerföljden, särskilt förekomsten av eventuella tätande lager, som kan ha en avgörande betydelse för grundvattenflöden och erosionskänslighet. Det finns indikationer på att det kan finnas ett tätande lager på botten av i vart fall Öratjärn. Dessutom finns det i närområdet kända komplexa lagerföljder, såsom moräntäckta sediment eller dubbla moränbäddar, vilket gör det viktigt att undersöka om liknande formationer förekommer i Tjärnviksdalen (Högbom 1899, Lundqvist 1967, Peterson Becher m.fl. 2024).

Genom borrhningarna är det möjligt att få detaljerad information om jordlagren. Borrhningar har därför utförts som en del i projektet med syfte att skapa en konceptuell modell över den geologiska uppbyggnaden av Tjärnviksdalens sedimentlager. Utöver detta har dessa lagerföljder använts för att skapa en 3D-modell över jordarterna.

Kunskap om de hydrogeologiska förhållandena

De hydrogeologiska förhållandena i dalen är komplexa och inte tillräckligt utredda. En central fråga är hur de olika tjärnarna i dalen är hydrauliskt kopplade till varandra, till grundvattnet, till Gesunden och till Indalsälven. Det finns en betydande nivåskillnad mellan tjärnarna och älven, vilket kan tyda på att det finns tätande jordlager som hindrar ett fritt flöde av grundvatten. Det är också oklart hur grundvattenytan varierar över tid och hur den påverkas av faktorer som nederbörd, snösmältning och vattenreglering i Indalsälven.

Genom installation av grundvattenrör, mätning av grundvattennivåer över tid samt kemisk analys av grundvatten har det varit möjligt att öka kunskapen om de hydrogeologiska och hydrologiska förhållandena.

Erosionskänslighet och förutsättning för skred och slamströmmar

Tidigare studier har pekat på att Tjärnviksdalen är känslig för erosion, men det saknas en kvantitativ bedömning av erosionskänsligheten. Det är viktigt att undersöka hur erosionsprocesser påverkas av faktorer som jordartssammansättning, grundvattenflöden, vegetationstäckning och mänsklig aktivitet.

I denna studie ingår inte att utföra geotekniska beräkningar eller modeller över risk för genombrott. Däremot kommer vi ta fram en konceptuell geologisk modell över Tjärnviksdalen vilken kan vara en del i att förstå de geologiska förutsättningarna, en grund som ytterligare geotekniska studier kan baseras på. Utöver det kommer studier av geomorfologiska och geologiska förutsättningar för skred och slamströmmar modelleras.

Metoder

För att svara på de kvarvarande frågor som beskrivits ovan och som berörs av syftet med denna studie har följande arbete utförts:

- Skruvborrning för att få en detaljerad bild av jordlagrens egenskaper samt i de fall detta inte gick, sondering för att nå bergöverytan.
- Geofysiska undersökningar med georadar och resistivitet för att få en inblick i jordarternas struktur, grundvattenytans läge i sedimenten samt indikationer på bergets läge.
- Utsättning av grundvattenrör med automatisk mätutrustning för att få en tydlig bild av grundvattennivån, samt dess förändring över tid. Öratjärns bottentopografi har också undersökts med hjälp av ekolod.
- För att ytterligare öka kunskapen kring de hydrologiska förutsättningarna utfördes också kemiska analyser på grundvatten, källor och ytvatten.
- Fältarbete för att förbättra detaljeringsgraden på den befintliga jordartskartan samt öka den konceptuella förståelsen för geologin i området.
- Framtagande av en konceptuell modell över bildningen av sediment och landformer i Tjärnviksdalen och dess koppling till regionalgeologin.
- Framtagande av jordartsgeologiska sektioner samt en 3D-modell över området.
- Enklare GIS-analyser för bedömning av områden med förutsättningar för skred och slamströmmar.

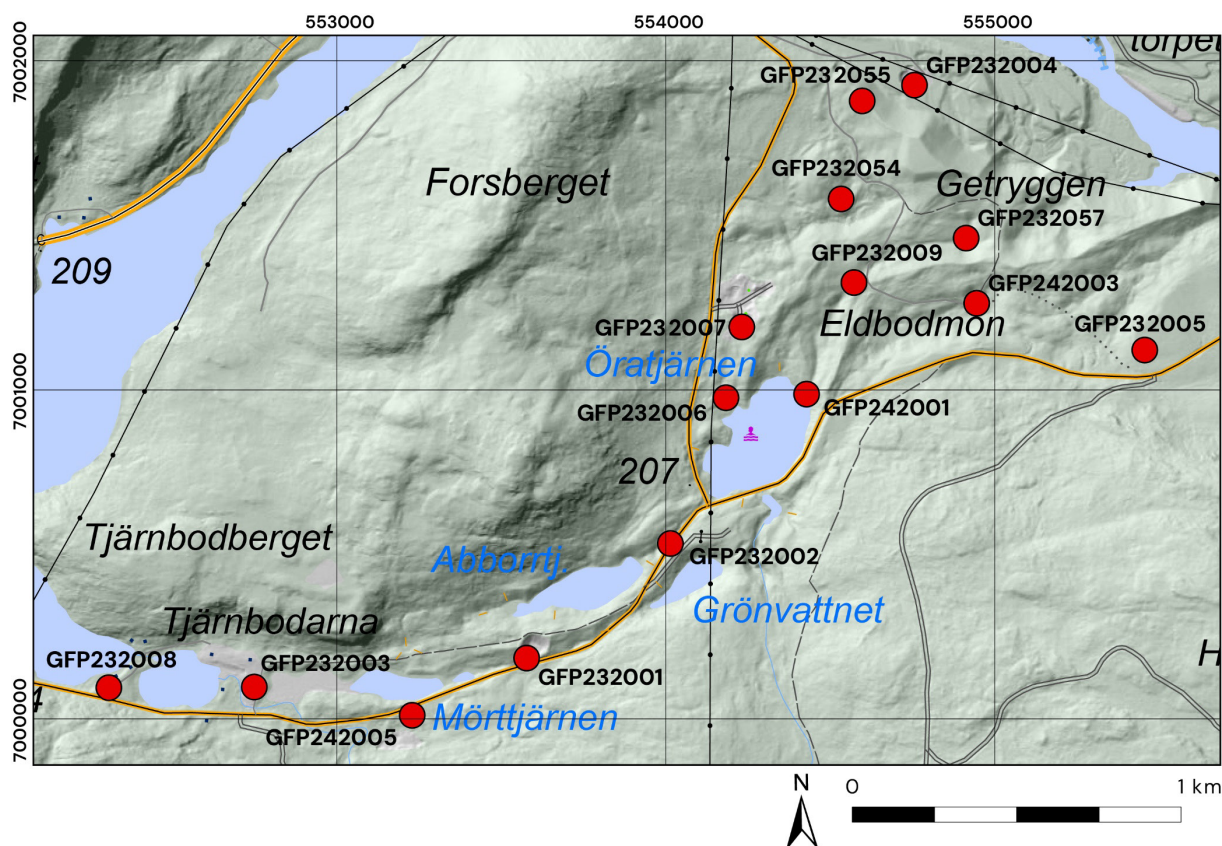
Nedan beskrivs metoderna kortfattat.

Borrningar

Samtliga borrningar utfördes med SGU:s borrhandsvagn, en Geotech 604 (fig. 2). I största möjliga mån användes så kallad skruvborr, en metod där materialet tas upp och kan studeras eller provtas. Längre ned i lagerföljden är det ofta inte möjligt att driva skruvborren och då har i stället sondering utförts. Vid sondering pressas borrhålsstål med krona ned, med kraften från rotation och slag, och det finns ingen möjlighet att ta prover. Det är dock möjligt att göra antaganden av jordart med en god förståelse för områdets regionalgeologi och erfarenhet. Vid behov av provtagning på dessa djup användes i stället mejselförstagare. Totalt utfördes 15 borrningar under våren respektive hösten 2023 samt hösten 2024 (fig. 3). Positionerna för borrningar valdes utifrån olika kriterier, såsom möjlighet till kompletta och detaljerade lagerföljder, närhet till tidigare och i projektet planerade geofysiska mätlinjer, möjlighet till ökad förståelse av den geologiska uppbyggnaden eller hydrogeologiska förutsättningar, samt praktisk möjlighet att framföra borrhandsvagnen.



Figur 2. Borrning centralt i Tjärnviksdalen.
Fotograf: Gustaf Peterson.



Figur 3. Borrningar utförda under 2023 och 2024.

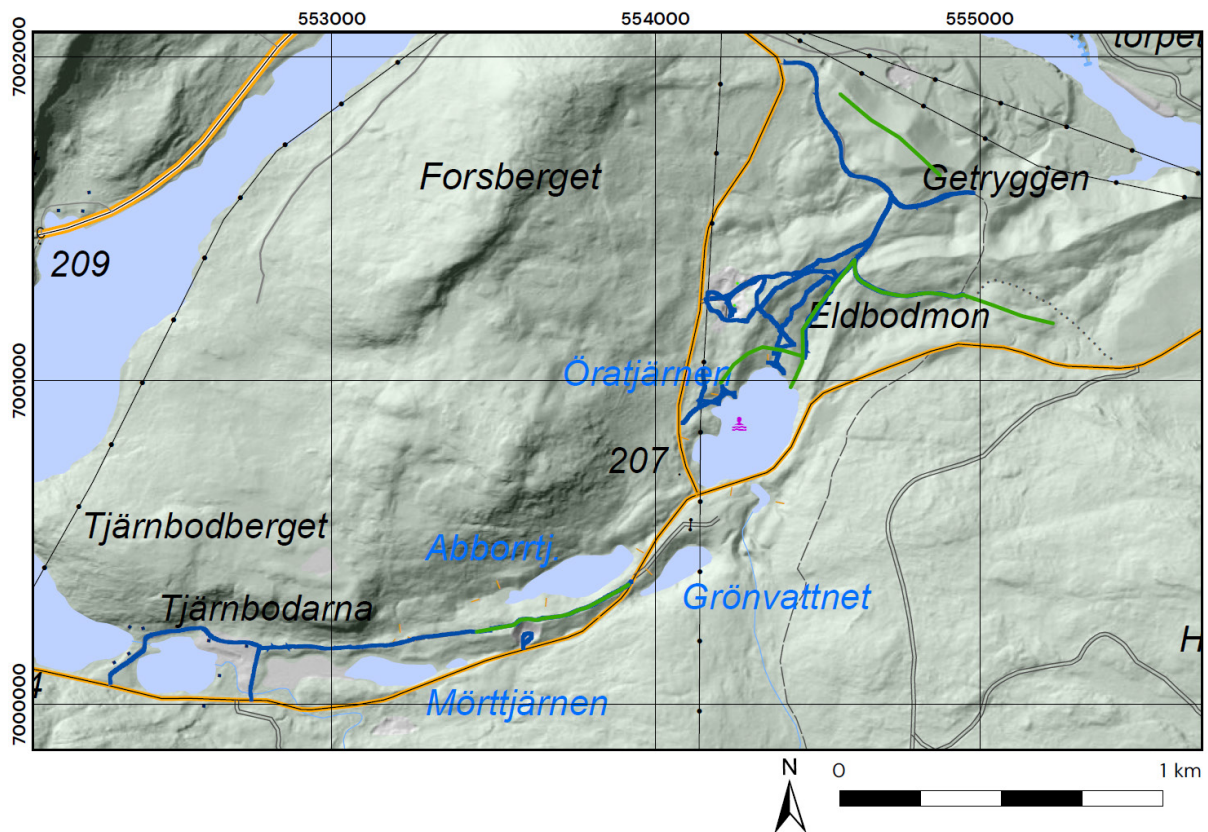
Geofysiska undersökningar

För att få en bild av sedimentens inre struktur, grundvattennivåerna och om möjligt bergöverytans läge kördes georadar och resistivitet. Georadar mättes för att få bättre förståelse för jordlagrens interna strukturer och grundvattennivån. Resistivitet mättes för att få information om grundvattennivåer och bergytans läge i första hand.

Georadar används för att kartlägga sedimentstrukturer genom att skicka elektromagnetiska vågor ner i marken. Reflektioner från olika lager i sedimenten ger information om deras mäktighet, sammansättning och vatteninnehåll. Georadar kördes med 300 Mhz och 70 Mhz för mer detalj på strukturer respektive bättre förmåga att nå djupare ned i sedimenten.

Resistivitetsmätning mäter markens elektriska motstånd och kan användas för att kartlägga sedimentlager, identifiera grundvattennivån och ibland berggrunden beroende på resistivitetskontraster. Tekniken kan nå betydligt djupare än georadar men har lägre upplösning och är mindre effektiv för detaljerade strukturer i ytnära sediment. Detta gör resistivitetsmätning lämplig för att undersöka djupare liggande lager eller berg.

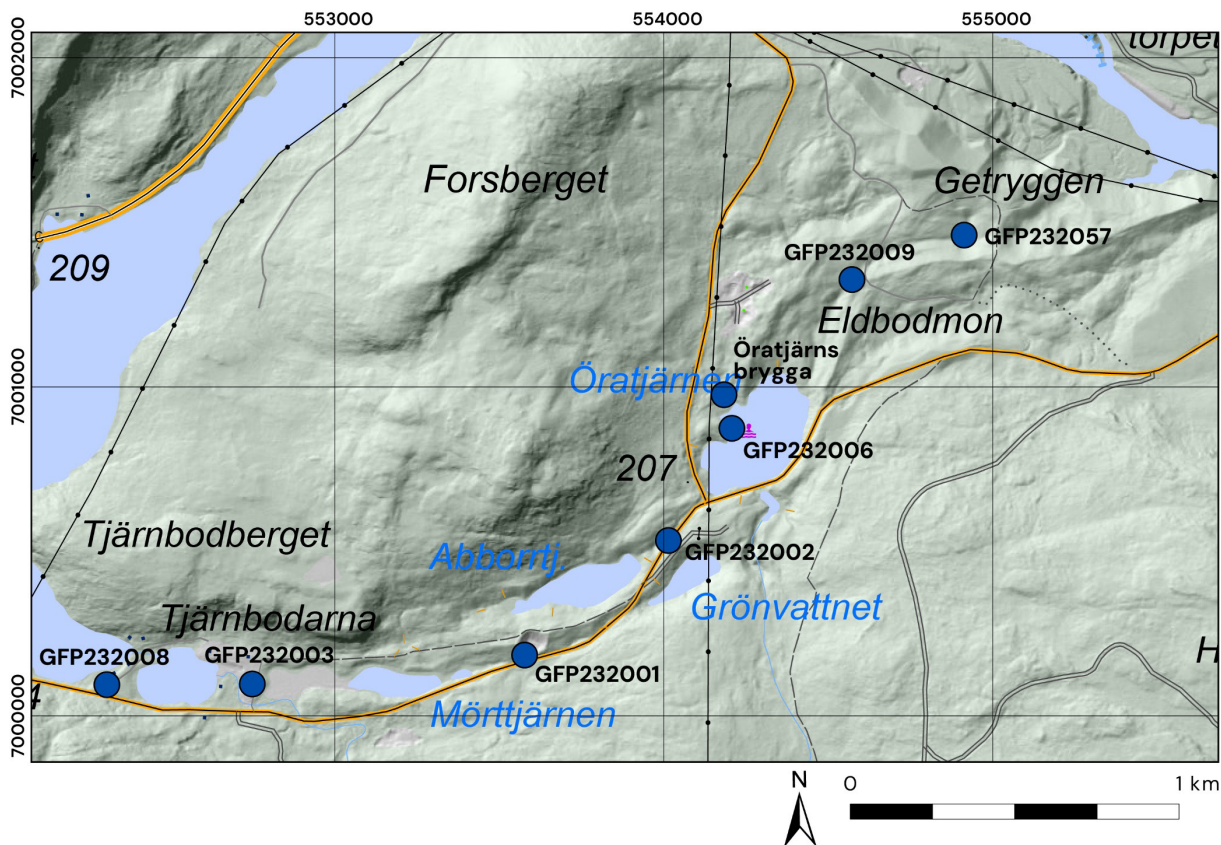
Linjernas dragning har planerats utifrån möjligheten att koppla dem till befintlig djupinformation samt de inom detta projekt insamlade jordlagerföljderna (fig. 4). Dragningen har också planerats efter möjligheten att se bergytan, interna strukturer och grundvattenytan.



Figur 4. Geofysiklinjer. Blått = Georadar. Grönt = Resistivitet.

Mätning av grundvattennivåer

Grundvattennivåerna mättes manuellt vid och efter borrning med ett så kallat klucklod eller ett ljus-/ljud-lod. I samtliga rör installerades dessutom tryckgivare som ger möjlighet till mätning av grundvattennivån flera gånger per dygn. Mätningar sker var 4:e timme. En av anledningarna är att SGU:s mätningar i det nationella grundvattennätet har den upplösningen, vilket gör att man enklare kan göra korrelation mot andra mätserier. Data från tryckgivare (*Solinst levellogger*) laddades ned manuellt. Alla grundvattenrör har lagrats som nivåstationer i SGU:s grundvattennät (SGU 2024b) och här hamnar även nivådata efterhand som denna hämtas hem. Vid installation av tryckgivare och vid varje hämtning av data registrerades grundvattennivån manuellt. Tryckgivarna mäter trycket vilket gör att all data kompenseras för lufttrycket, vilket hämtas från väderstationen vid Krångede kraftverk. Grundvattenrörens läge presenteras i figur 5.



Figur 5. Grundvattenrör som satts ut i samband med borringarna. Notera att Öratjärns brygga mäter ytvatten.

Interpolering av grundvattenyta

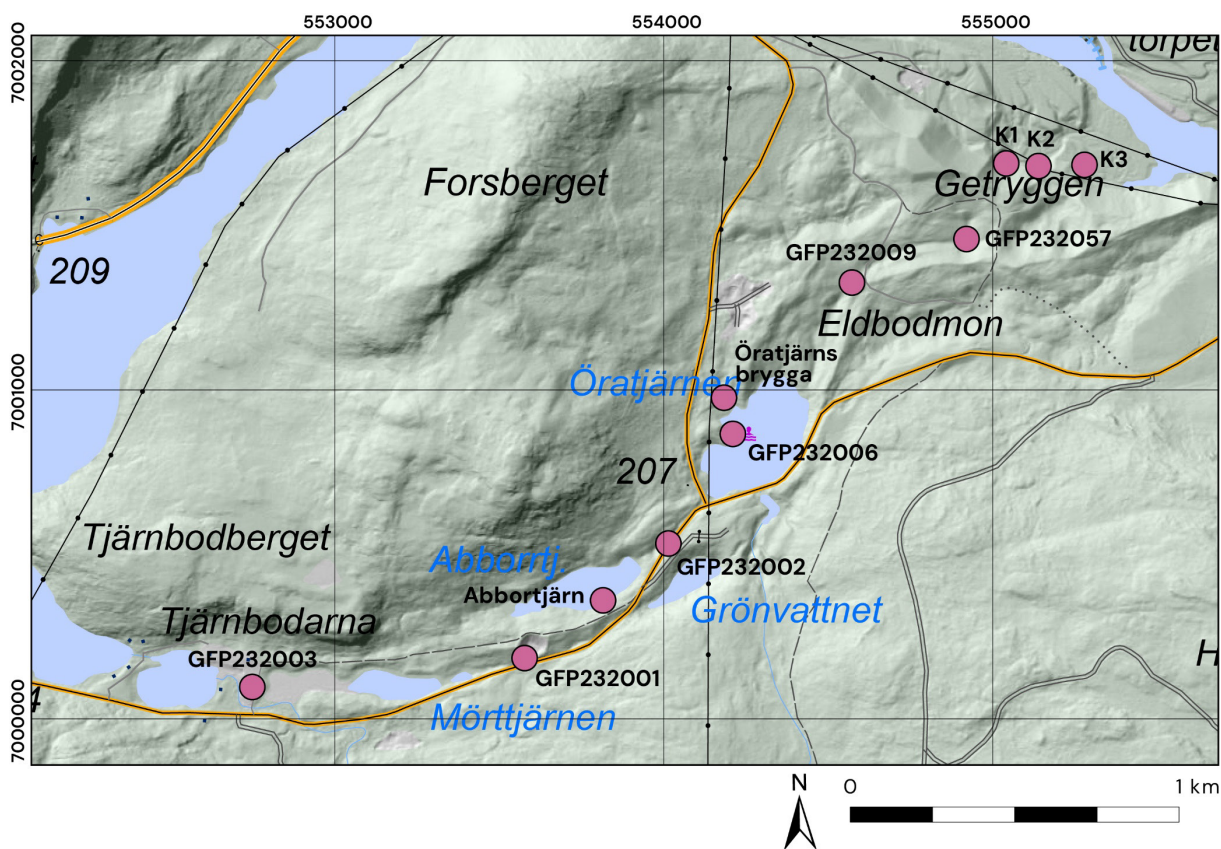
Interpolering av grundvattennivåerna, insamlade vid tillfället för borring eller strax efter utsättning av grundvattenrör, utfördes med *Empirical Bayesian Kriging*. Förutom information från borringarna användes vattennivåerna i sjöarna inmätta med Nationella höjdmodellen, exklusive Öratjärn. Interpolationen utfördes endast inom dalgången, de ovanliggande morän- och bergsområdena inkluderades ej. Resultatet är en yta som på ett översiktligt sätt visar grundvattenytans form och lutning. Med endast ett fåtal datapunkter blir resultatet därefter och det är viktigt att notera att den genomsnittliga standardavvikelsen är ungefär 8 m. Den genomsnittliga standardavvikelsen representerar osäkerheten i resultatet och är i princip en uppskattning av hur mycket de interpolerade värdena kan förväntas avvika från de verkliga värdena.

Kemisk analys av vattenprover

Vattenprover på grundvatten och ytvatten togs under fältbesöken 3–4/7 2023 samt 21–22/8 2024 och har analyserats på SLU:s laboratorium i Uppsala. 27 olika parametrar mättes på samtliga prov (tabell 1). Samtliga grundvattenrör som provtagits är utav rostfritt stål. Totalt provtogs 11 punkter, 6 grundvattenrör, 3 källor och 2 ytvatten (fig. 6).

Tabell 1. Parametrar uppmätta vid kemisk analys av vattenprover.

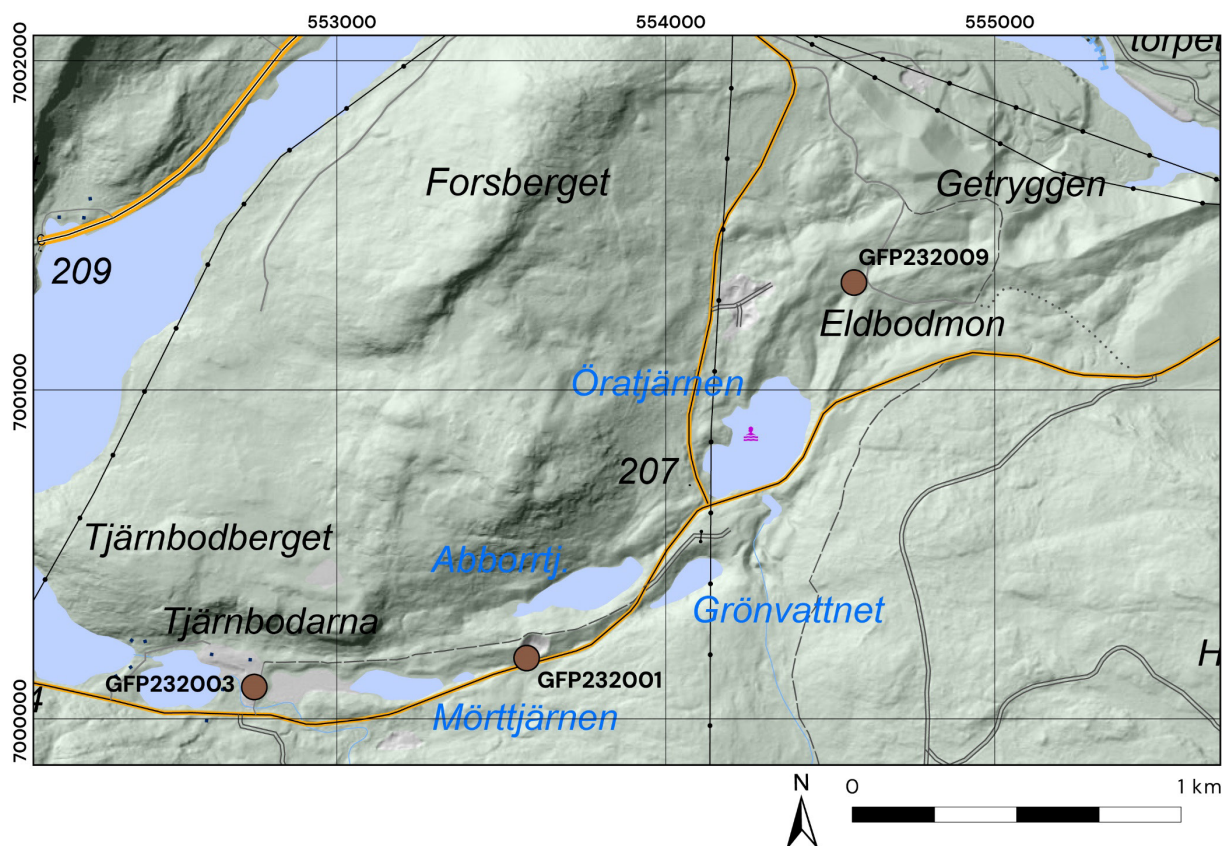
Parameter	Enhet	Parameter	Enhet
Surhet	pH	Aluminium	mg/l
Alkalinitet, HCO ₃	mg/l	Järn	mg/l
Kalcium	mg/l	Mangan	mg/l
Kalium	mg/l	Arsenik	µg/l
Magnesium	mg/l	Bly	µg/l
Natrium	mg/l	Kadmium	µg/l
Totalhårdhet	mg/l	Kobolt	µg/l
Kiseldioxid	mg/l	Koppar	mg/l
Klorid	mg/l	Krom	µg/l
Konduktivitet	mS/m	Nickel	µg/l
Sulfat	mg/l	Vanadin	µg/l
Ammonium	mg/l	Zink	mg/l
NO ₂ +NO ₃	mg/l	Fluorid	mg/l
		Fosfat	mg/l



Figur 6. Grundvattenrör, källor och ytvatten som provtagits.

Jordartsanalyser

Jordartsanalyser för att få fram kornstorleken har utförts på tre platser (fig. 7). Proven har tagits upp genom skruvborring. Kornstorleksanalys görs för att bestämma fördelningen av olika kornstorlekar i materialet. Detta görs genom siktning för grövre material och sedimentationsanalys för finare partiklar. Provet torkas och vägs först, och därefter separeras det genom en serie siktar med successivt mindre maskstorlek eller genom suspension i vätska. Resultatet används sedan för att skapa en kornstorleksfördelningskurva, vilken kan användas för att klassificera sedimentet.



Figur 7. Läge för borrningar där prov för kornstorleksanalys tagits.

Fältarbete

Förutom borring, installation av grundvattenrör, geofysiska mätningar och insamling av prover för grundvatten- och jordanalys har fältarbete utförts enligt SGU:s standardmetod för jordarts-kartläggning (Karlsson m.fl. 2021). Detta innebär en systematisk insamling av jordarternas sammansättning genom okulär besiktning, tolkning av avsättningsmiljö, utbredning och mäktighet. Ibland används en mindre jordborr, handgrävning av mindre provgropar eller studier av naturliga skärningar för att identifiera jordarterna. Arbetet kompletteras med tolkning av jordarternas utbredning med detaljerade höjddata (LiDAR) och tidigare insamlade data för att skapa en detaljerad kartbild.

När det gäller det hydrogeologiska fältarbetet består det till största delen av nivåmätningar och provtagning i grundvattenrör, källor och ytvatten. I övrigt handlar det till stora delar om att få en bild av områdets karakteristika vad gäller topografi, markanvändning, avrinning, växtlighet, med mera.

Lodning av Öratjärn

Vid fältarbetet utfördes enklare inmätning av vattendjup med ekolod i Öratjärn med syftet att utröna kopplingen mellan Öratjärns ytvatten och grundvattnet. Detta kunde genomföras genom lån av båt och ekolod från Ragunda fiskevårdsområde (www.ragundafvo.se) samt assistans från Ragunda kommun. 157 mätpunkter samlades in och interpolerades i ArcGIS 3.4.0 (2024) till en djupkarta.

3D-modellering

Efter tolkning av lagerföljder och andra observationer samt tolkningen av en ny jordartskarta skapades en 3D-modell över jordarternas utbredning. Programvaran som användes för modelleringen var Groundhog 2.8.4 (2022). Jordartskartan, lagerföljder (inklusive geofysisk data från Daniel 2005, Vestlund 2014), georadar- och resistivitetsdata samt höjdmodellen importerades i Groundhog. Jordartskartan användes för att definiera ytliga geologiska enheter, lagerföljder importerades för att få en bild av jordlagrens faktiska mäktigheter, geofysiska profiler för att få ytterligare förståelse för jordlagrens utbredning på djupet och höjdmodellen användes för att definiera markytan. Lagerföljderna, samt övriga data, användes sedan för att tolka geologiska tvärsektioner genom området. Dessa tvärsektioner användes för att interpolera sammanhängande geologiska 3D-enheter. Resultatet är flertalet tolkade geologiska profiler och en 3D-modell över jordarterna i Tjärnviksdalen.

GIS-analyser, skred och slamströmmar

Förutom de geologiska förutsättningarna för ett genombrott av Gesunden genom Tjärnviksdalen, vilket är huvudsyftet med denna studie, förekommer också andra geologiska processer. Dessa processer kan direkt eller indirekt ha en påverkan på dalgången och därför har GIS-analyser utförts för att skapa en bättre bild av förutsättningar för skred och slamströmmar i avrinningsområdena ovanför Tjärnviksdalen.

Modellering av geomorfologiska förutsättningar för slamströmmar

Ett klassiskt sätt att utröna huruvida ett avrinningsområde har förutsättningar för slamströmmar är det så kallade Meltonratiet (MRN), förhållandet mellan höjdskillnaden inom avrinningsområdet och roten av arean i avrinningsområdet (Melton 1957). Detta ger dock endast en indikation per avrinningsområde, och inte var inom avrinningsområdet. För att i stället få samma möjlighet, men beräknat per pixel, är det möjligt att använda ett så kallat *Distributed Melton ruggedness number* (DMRN), vilket beräknas på liknande sätt men per pixel inom avrinningsområdet. Att beräkningen görs per pixel innebär att den lägsta höjden motsvarar höjden vid pixelns position (Marchi & Dalla Fontana 2005, O'Callaghan & Mark 1998). Resultatet blir ett raster med värden i varje pixel för DMRN och kan sägas beskriva på vilka platser den potentiella flödesenergin är så stark att slamströmmar kan initieras.

Höga värden indikerar branta, små avrinningsområden där vatten och sediment snabbt kan samlas och börja röra sig, vilket skapar förutsättningar för initiering av slamströmmar. MRN kan ses som en beskrivning av energin som finns tillgänglig för sedimenttransport, där högre värden antyder en snabbare respons på regn eller avrinning. Det är ett enkelt men effektivt mått baserat på endast topografi.

En bedömning görs, kopplat till lokala förhållanden, var tröskelvärde för när sådan initiering kan ske. I Tjärnviksdalen valdes värden > 2 ut som förutsättningar för initiering av skred enligt typiska värden för bergiga områden och överskattar sannolikt förutsättningarna i detta fall (Marchi & Dalla Fontana 2005). Dessa initieringspunkter ska alltså tolkas som ett *worst case*-scenario och endast användas som underlag för diskussion.

Modellering av geomorfologiska och geologiska förutsättningar för skred

För att uppskatta vilka områden som har förutsättningarna för skred i Tjärnviksdalen utfördes en modellering enligt algoritmen utvecklad av Tryggvason m.fl. (2014). Algoritmen behöver information om jordarter, en höjdmodell och en för området representativ kritisk vinkel.

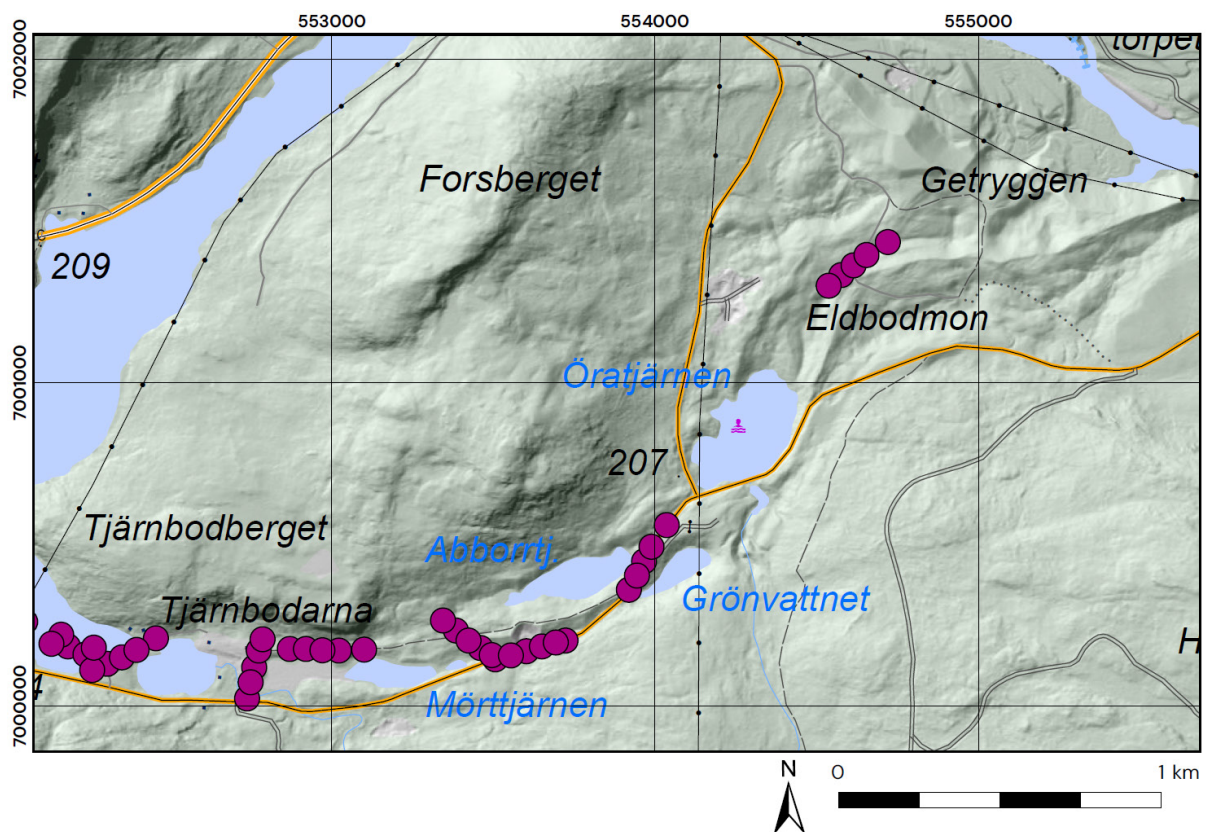
Först valdes de jordarter, utifrån jordartskartan, som ansågs vara utan förutsättningar för skred. Till exempel antogs berg, morän och isälvsmaterial grövre än finsand inte ha förutsättningar för skred. Baserat på dessa studier förekommer i Tjärnviksdalen stora mängder växelvis lagrad silt och finsand. I de områdena med brantare sluttningar är jorden generellt torr, i och med att den vattenmättade zonen utgör en liten del av jorddjupet. Baserat på dessa antaganden valdes ett värde för kritisk vinkel på 27° , precis under den flackaste nivån i ett spann på 28° – 35° (Terzaghi m.fl. 1996). Höjdmodellen som användes hade en upplösning på 2 m (Lantmäteriet 2015). Resultatet ska endast ses som en indikation på områden som kan antas ha förutsättningar för skred.

Resultat och tolkning

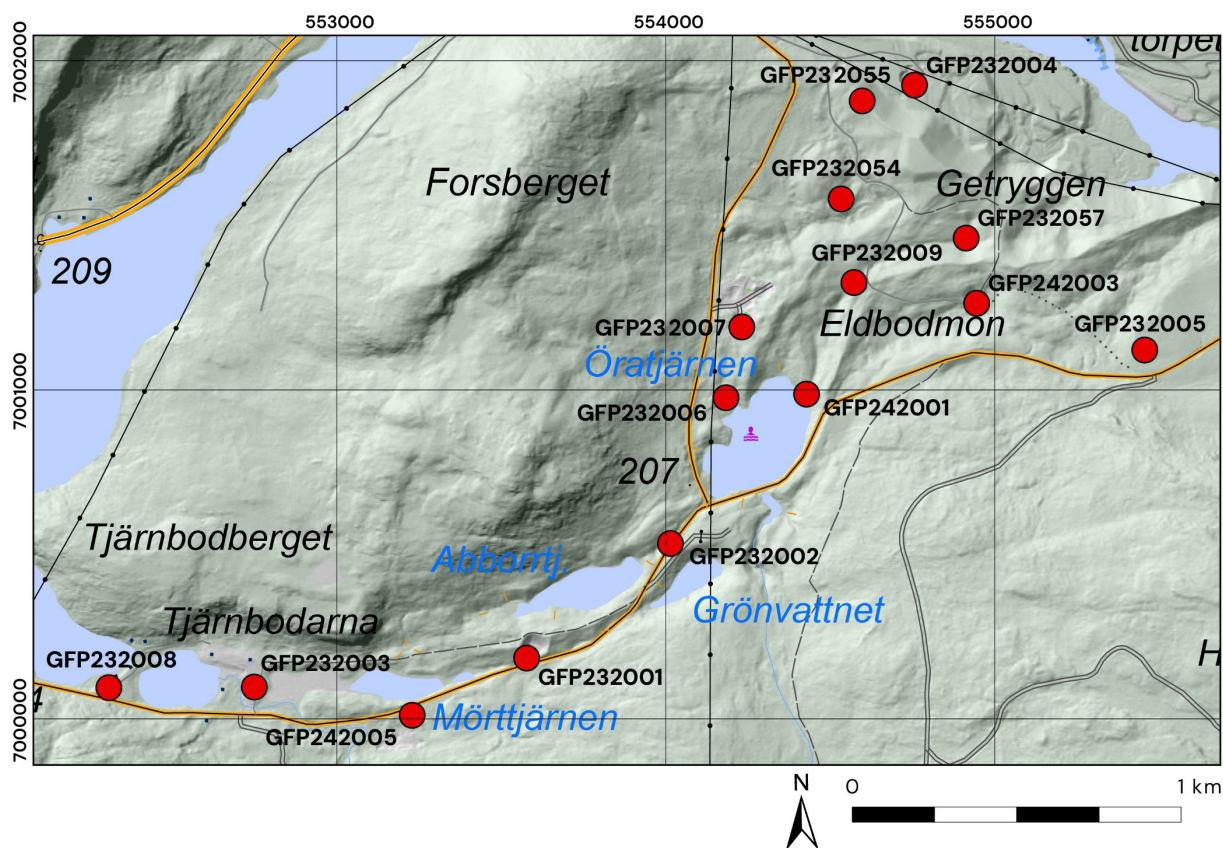
Geologiska förhållanden

Lagerföljder

Under arbetet med denna studie har totalt 15 borrhningar med detaljerad sedimentologisk beskrivning samlats in (fig. 8b). Ytterligare 42 tolkade lagerföljder från geofysiska mätningar har samlats in från tidigare undersökningar (fig. 8a) (Daniel 2005, Vestlund 2014). Dessa beskrivs inte i mer detalj men används som indata i 3D-modellen.



Figur 8a. Tidigare insamlad information om jorddjup och lagerföljder. Endast från geofysiska mätningar.



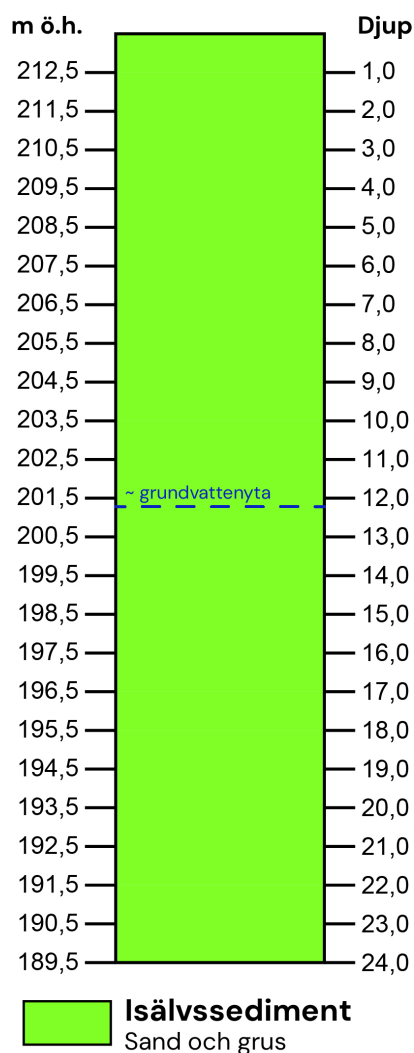
Figur 8b. Borrningar utförda under 2023 och 2024, jämför med lagerföljderna nedan (fig. 9–13, 15–17, 19–25).

GFP232001

Lokalen ligger i en grustäkt mitt i den markanta rullstensås som löper genom Tjärnviksdalen, mellan Mörttjärnen och Abbortjärnen (7000185; 553577, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 24 m under markytan. Efter borring installerades grundvattenrör. Grundvattenytan mättes till 12,13 m under markytan efter borring.

Lagerföljden består av växelvis lagrad sand och grus (fig. 9). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1. Tolkningen är att sedimenten är isälvsmaterial avsatt i form av en rullstensås med skiktade lager sand och grus, ställvis troligen också sten. Materialet är avsatt i en tunnel under inlandsisen vid deglaciationen när stora mängder smältvatten lämnade isen. Kraften i ett sådant flöde har antagits varit så kraftfullt att centralt under rullstensåsen har tidigare avsatta jordlager (till exempel morän) eroderats bort. Resultatet är att sand och grus vilar direkt på berget.



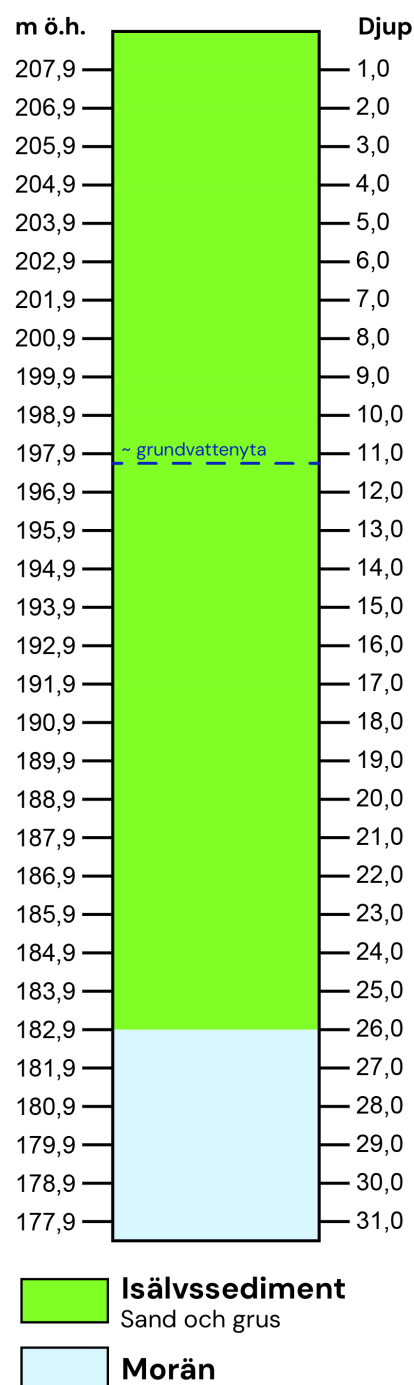
Figur 9. Förenklad lagerföljd för GFP 232001.

GFP232002

Precis som GFP232001 ligger denna lokal mitt i rullstensåsen men nordost om Abbortjärn (7000533; 554014, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 31,5 m under markytan. Efter borrning installerades grundvattenrör. Grundvattenytan mättes till 11,18 m under markytan.

Nederst finns ett 5 m mäktigt diamikton som överlagras av 16 m sand, grus och sten (fig. 10). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1. Tolkningen är att diamiktonet representerar en morän vilken sedan överlagras av en serie växellagrad sand, grus och sten tolkad som isälvsmaterial. Lagerföljden är typisk för en rullstensås.



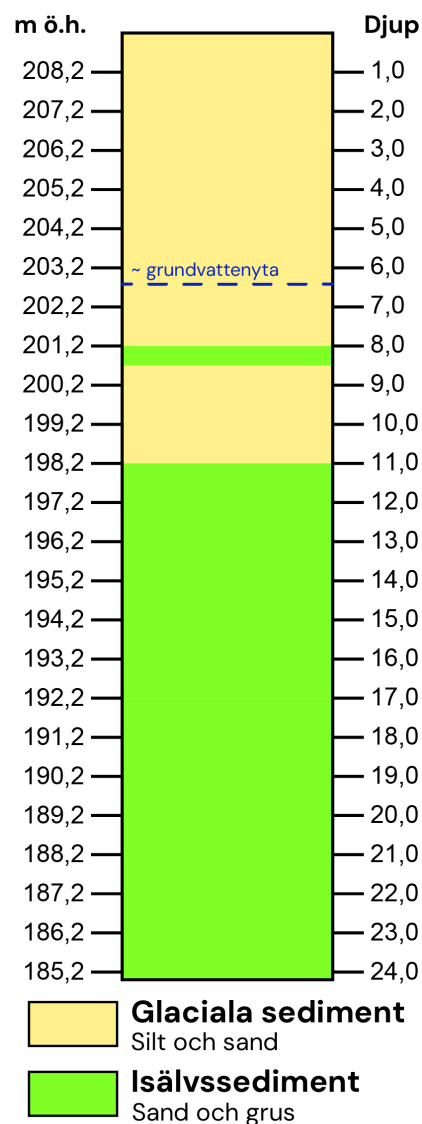
Figur 10. Förenklad lagerföljd för GFP232002.

GFP232003

Borrplatsen ligger mellan Bodtjärnen och Mörttjärnen i ett flackt område med finkorniga sorterade sediment i ytan (7000097; 552749, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 24 m under markytan. Efter borrning installerades grundvattenrör. Grundvattenytan mättes till 6,44 m under markytan.

Lagerföljden uppvisar i botten en cirka 12 m mäktig sekvens av sand och grus. Överlagrande denna en serie med nästan 10 m sand vilken i sin tur överlagras av silt och finsand (fig. 11). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1. Tolkningen är att i botten syns isälvsmaterial, troligen en del av rullstensåsen. Detta material avsattes nära eller under iskanten. När isen drog sig tillbaka och havsytan var fortsatt hög avsattes finkornigare sediment, så kallade issjösediment.



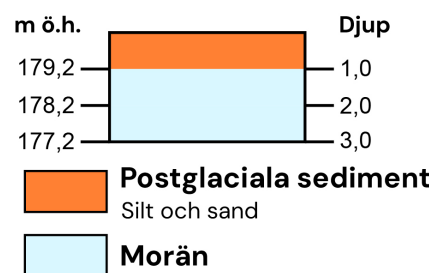
Figur 11. Förenklad lagerföljd för GFP232003.

GFP232004

Borrplatsen ligger i ett mindre grustag nedanför den så kallade Getryggen, mot Indalsälven till (7001926; 554756, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 3 m under markytan. Lagerföljden antas vara torr, alltså ingen tydlig grundvattennivå.

Diamikton som går från sandigt till sandig-siltigt för att sedan överlagras av sorterad sand (fig. 12). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1. Tolkningen är att diamiktonet är morän, eventuellt två olika moränbäddar. Sanden som överlagrar diamiktonet tolkas som älvsediment, bildat genom post-glacial erosion och deposition av Indalsälven.



Figur 12. Förenklad lagerföljd för GFP232004. Ingen grundvattenyta noterades.

GFP232005

Läget för borrhningen är uppe på den platå som ligger i områdets östra del, längs grusvägen mot Hammarstrand (7001121; 555456, fig. 8b).

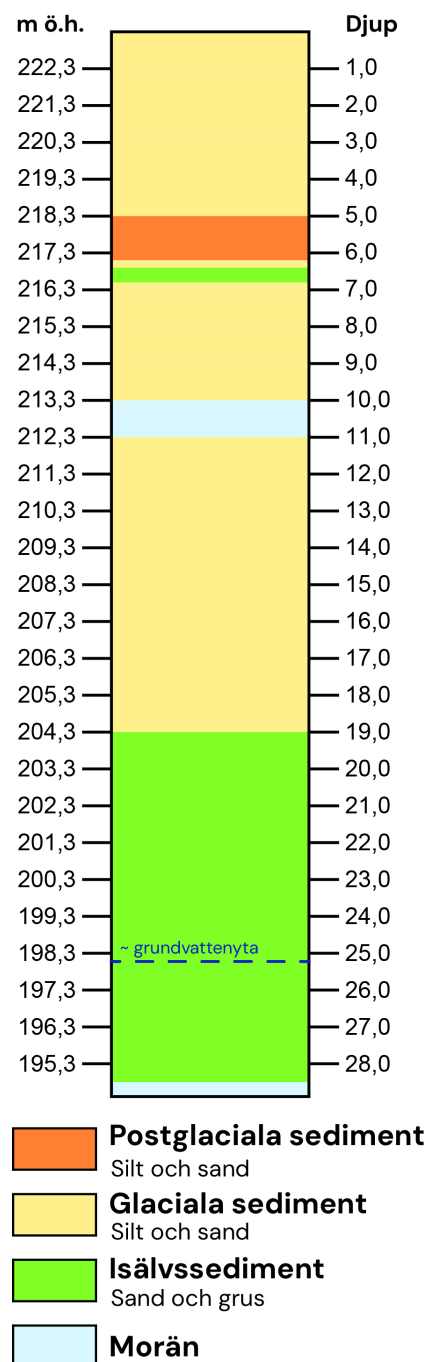
Skrubborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 28,9 m under markytan. I samband med borrhningen noterades en grundvattenyta cirka 25 m under markytan.

Direkt på berget vilar sannolikt ett diamikton, ungefär en meter mäktigt (fig. 13). Ovan detta 8 m friktionsjord, mestadels sand och grus. Ett sandig-siltigt diamikton överlagrar friktionsjorden och överlagras i sin tur av 8 m kohesionsjord (lera eller silt). Över kohesionsjorden ligger ytterligare ett diamikton som sedan överlagras av en serie växlande silt och sand om totalt knappt 4 m mäktighet. Ställvis har denna en varvighet (fig. 14). Över dessa sediment ligger en tredje diamikton, 1,2 m mäktig. På det tredje diamiktonet vilar 5 m växlande grovsand och mellansand. För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Tolkningen av de sorterade sedimenten bygger på att lite grövre sediment tolkas som isälvs sediment och lite finare sediment som ishavs/issjö-sediment. Det som är utmärkande här är de totalt tre diamiktonen. Är dessa diamikton genetiskt moräner skulle det vara mycket speciellt, och skulle i så fall betyda att lokalen uppvisar tre isfria perioder innan den senaste nedisningen, något som anses osannolikt baserat på den regionalgeologiska förståelsen.

Lokalen ligger dock nära brant terräng. Dessa sluttningar, nordsluttningarna på Högekullen, kan möjligen ha skredat vid upprepade tillfällen. Sannolikt kan något av diamiktonen helt enkelt vara morän som skredat från sluttningen ovan och avsatts i terrassen där borrhningen utfördes. För att med säkerhet kunna avgöra detta krävs ytterligare borrhningar, men i detta skede och utifrån projektets syfte kan det vara rimligt att lämna frågan obesvarad. Genom att titta på närliggande lokaler, såsom GFP232007, GFP232006 och GFP232009, är det rimligt att anta att en äldre morän förekommer ställvis. Den översta av de tre diamiktonen tolkas därför som skredmassor från sluttningarna ovan och inkluderas för enkelhetens skull som glaciala och postglaciala sediment.

Sammantaget tolkas det undre diamiktonet som en undre morän med 9 m isälvs material direkt överlagrat. Ovan dessa vilar finkornigare sorterade sediment innan ett ytterligare diamikton, vilket tolkas som morän. Ovan moränen är ishavs/-issjösediment. Baserat på läge och landform har dessa sannolikt avsatts i eller vid ett delta.



Figur 13. Förenklad lagerföljd för GFP232005.



Figur 14. Varviga sediment på 7,5 m djup vid GFP232005. Fotograf: Gustaf Peterson.

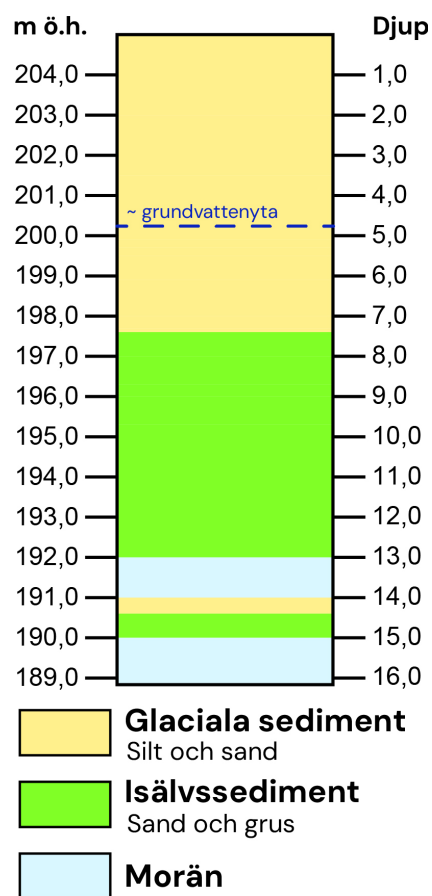
GFP232006

Lokalen ligger vid Öratjärns badplats, på nordvästra sidan av sjön (7000976; 554183, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 16,2 m under markytan. Efter borrning installerades grundvattenrör och grundvattentytan mättes till 4,8 m under markytan.

Längst ned noterades ett cirka 1 m mäktigt diamikton överlagrat av 0,5 m mellansand och 0,5 m silt. Över mellansanden vilar ytterligare ett diamikton med en mäktighet på 1 m. Överlagrandes detta ligger sedan cirka 6 m sand och grus vilket överlagras av en sekvens med finkornigare material, såsom sand och silt (fig. 15). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Tolkningen är att de båda diamiktonen är morän och att de mellanlagras av sand. Ett alternativ är att sanden är intramorän och således bildad under isen eller eventuellt av en oscillation av iskanten, dock finns inga spår i landskapet av det senare förslaget. Ett annat alternativ är att sanden representerar en isfri period innan den senaste nedisningen. Det senare alternativet bedöms troligast baserat på att sådana lokaler beskrivits i närområdet, till exempel vid Pilgrimstad, Kånkback, Dövikén m.fl. (Lundqvist 1967 och referenser däri). Ovan den övre moränen tolkas sanden som isälvsmaterial, dock förhållandevis finkornigt och väl sorterat vilket talar för att materialet är avsatt i vattenmassor nära iskanten men inte nödvändigtvis i en tunnel under isen. Således är materialet avsatt i samband med rullstensåsen i sydost men inte av samma process eller miljö. Överlagrandes detta är silt och sand vilka tolkas som issjösediment.



Figur 15. Förenklad lagerföljd för GFP232006.

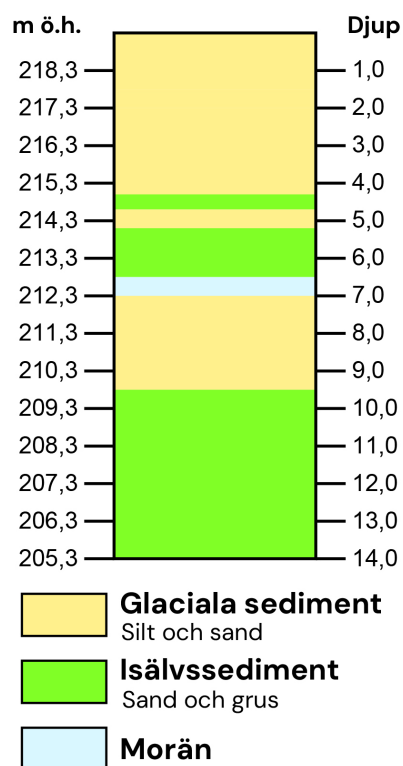
GFP232007

Lokalen ligger i grustäkten nordväst om Öratjärn (7001191; 554231, fig. 8b).

Skruvborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 14 m under markytan. Lagerföljden antas vara torr, alltså ingen tydlig grundvattennivå.

Direkt på sannolikt berg vilar 7 m friktionsjord, mestadels sand. Överlagrande detta ligger en halv meter tjockt lager sandig-siltig diamikton. Diamiktonet överlagras sedan av drygt en meter mellansand vilket övergår i finkornigare sediment, såsom silt och sand (fig. 16). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Tolkningen är att de undre sedimenten med mestadels sand är isälvsmaterial vilket överlagras av en morän. Det betyder, baserat på resonemanget i GFP232006, att isälvs materialet representerar en tidigare isfri period innan den senaste nedisningen. Överlagrande moränen finns en kort sekvens med isälvs material som sedan övergår i issjösediment.



Figur 16. Förenklad lagerföljd för GFP232007.

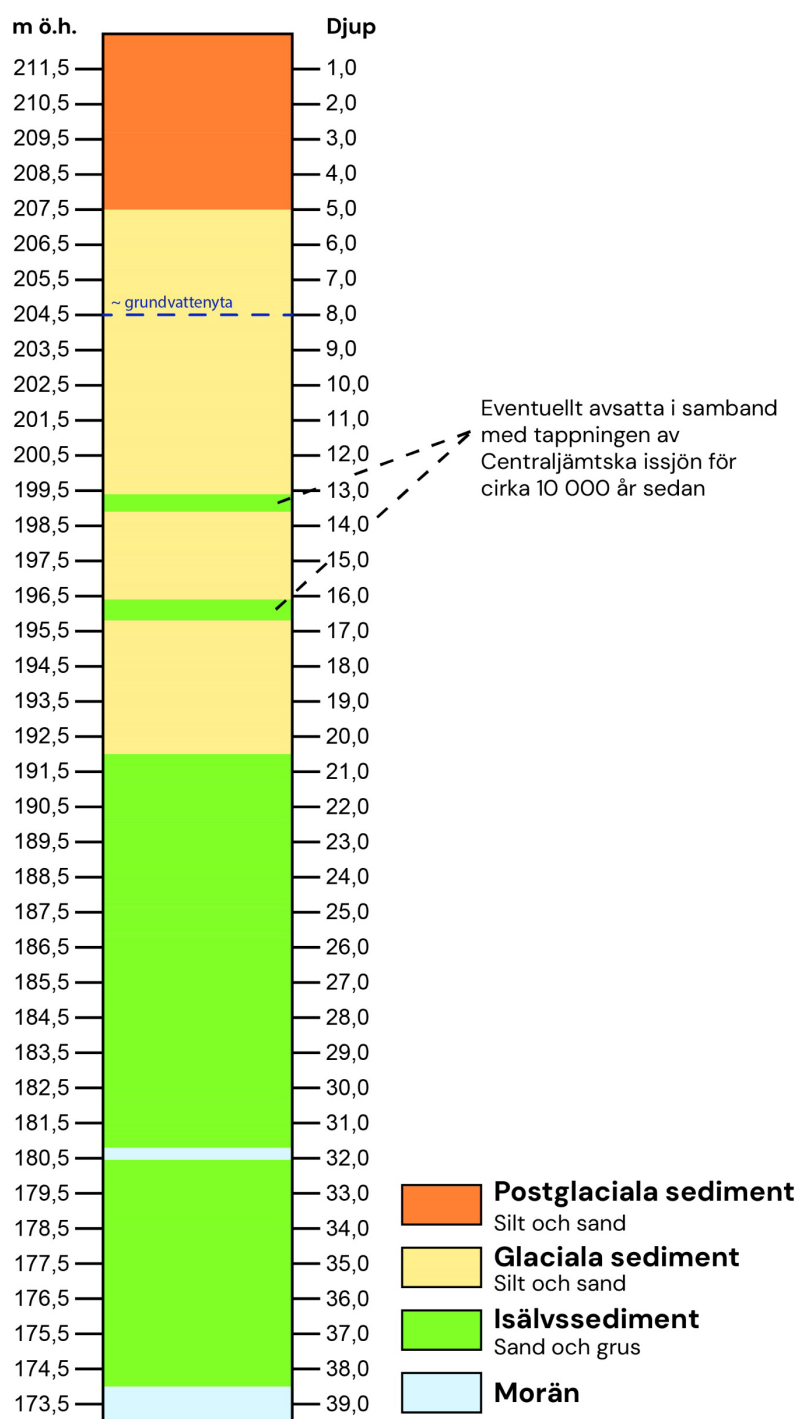
GFP232008

Borrplatsen ligger på tvärryggen längst ut mot Tjärviken i Gesunden (7000095; 552307, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering utfördes ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid knappt 40 m under markytan. I samband med borrhningen sattes grundvattenrör ut och en grundvattenyta noterades 8 m under markytan.

Lagerföljden uppvisar i botten ett tunt diamikton som överlagras av en sekvens med sand och grus med en mäktighet på cirka 5 m. Dessa sediment underlagras ett ytterligare diamikton. Ovan diamiktonet förekommer först sand och sedan finkornigare sediment, dessa består av skiktade lager med finsand och grovsilt samt två tydliga mellansandlager (fig. 17). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Baserat på ovanstående resonemang (till exempel GFP232006 och GFP232007), och områdets regionalgeologi, görs tolkningen att först avsattes morän och sedan isälvsand direkt framför inlandsisen när iskanten var nära. Denna sand är sannolikt från en äldre isfri period då den överlagras av vad som tolkas som en morän. Över moränen vilar ett drygt 10 m mäktigt lager med sand. Dessa sediment hänger ihop med bildandet av åsryggen österut. Lagerföljden övergår sedan till finkornigare issjösediment som avsatts nära isen, men i lugnare vatten. Intressant att notera är de två lagren med grövre sediment i den övre delen, dessa tolkas som tappningssediment. När inlandsisen drog sig tillbaka i Jämtland tappades den så kallade Centraljämtska issjön ut genom Indalsälven vid minst två tillfällen, för cirka 10 000 år sedan (Regnéll m.fl. 2023). Denna lokal är i så fall en analog till lokalen i Dövik, ett 10-tal kilometer ned längs Indalsälven, där liknande lagerföljder har beskrivits (De Geer 1940, W:son Ahlman m.fl. 1924).



Figur 17. Förenklad lagerföljd för GFP232008.

GFP232009

Lokalen ligger i en dödisgrop precis väster om rullstensåsen som löper genom Tjärnviksdalen, cirka 300 m nordost om Öratjärn (7001326; 554572, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering ned till sannolikt berg. Bergytan nåddes vid 45 m under markytan. Efter borrning installerades grundvattenrör. Grundvattenytan mättes till 30,5 m under markytan.

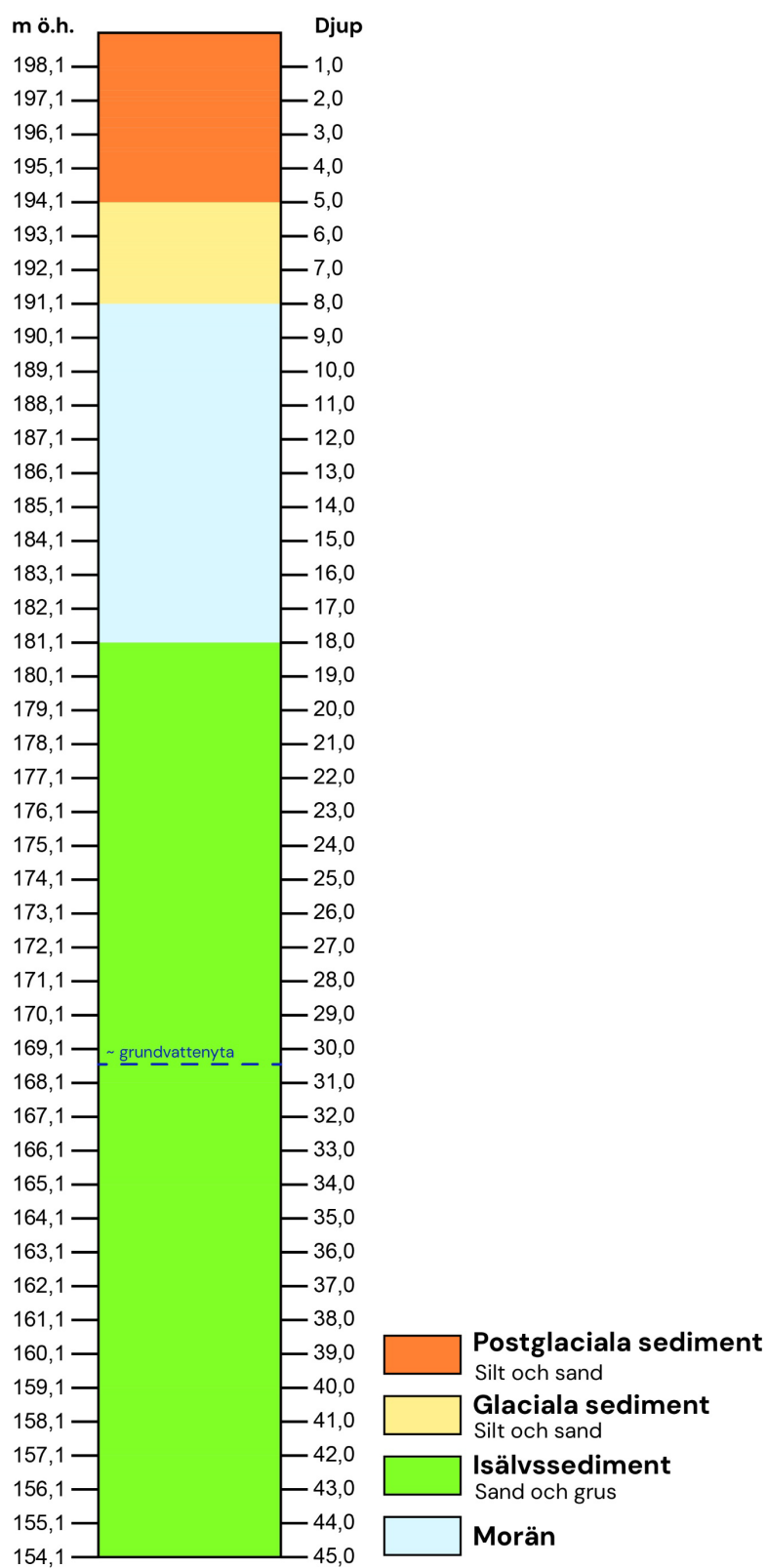
Direkt på sannolikt berg ligger friktionsjord med en mäktighet på cirka 15 m. Dessa sediment är troligen skiktade mellan sand, grus och sten. Över denna sekvens vilar ett sandigt siltigt diamikton med en mäktighet på 12 m (fig. 18). I sin tur överlagras diamiktonet av silt och sand, där de nedre delarna är ställvis ofullständigt sorterade (fig. 19). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Denna lagerföljd tolkas som att materialet direkt ovan berg är isälvs-material, antingen från åsryggens laterala delar eller eventuellt sediment avsatta i nära anslutning till iskanten.

Det överlagrande diamiktonet tolkas som en morän. Detta medför att de underliggande sorterade sedimenten troligen är äldre än den senaste nedisningen, vilket stämmer väl med den regionala geologin i området (Peterson Becher m.fl. 2024). Moränen överlagras sedan av finkorniga sediment som tolkas som ishavs/issjö-sediment, de ofullständigt sorterade delarna kopplas till sediment som rasat ned från den branta åsryggens sidor ned i åsgropen.



Figur 18. Kompakt sandig-siltig morän (diamikton) på cirka 10 m djup vid GFP232009. Fotograf: Gustaf Peterson.



Figur 19. Förenklad lagerföljd för GFP232009.

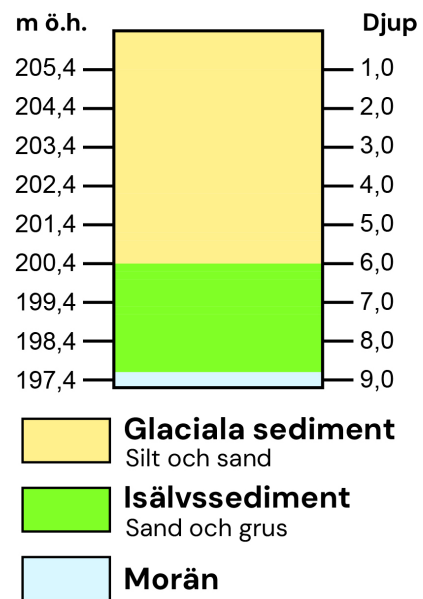
GFP232054

Borrplatsen ligger 250 m sydost om den så kallade Gettryggen i ett område med lägre relief och en något finkornigare karaktär i de översta lagren (7001580; 554533, fig. 8b).

Skrubborrning ned till berg. Tre sonderingar i närheten genomfördes för att utesluta block. Bergytan nåddes vid 9,2 m under markytan. Lagerföljden antas vara torr, alltså ingen tydlig grundvattennivå.

I botten av lagerföljden finns ett siltigt sandigt diamikton som överlagras av sand, sedan silt och överst sand (fig. 20). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Diamiktonet tolkas som en morän som vilar direkt på berget. Den överlagrande sanden tolkas som ett isälvs-material, således bildat förhållandevis nära eller under iskanten. Den överlagrande finkornigare delen, till övervägande del silt, tolkas som avsatt i en havsvik men med tydlig påverkan av den smältande inlandsisen i väster. Det översta lagret tolkas som sand som avsatts av strandprocesser eller vattenströmmar i samband med landhöjningen.



Figur 20. Förenklad lagerföljd för GFP232054.

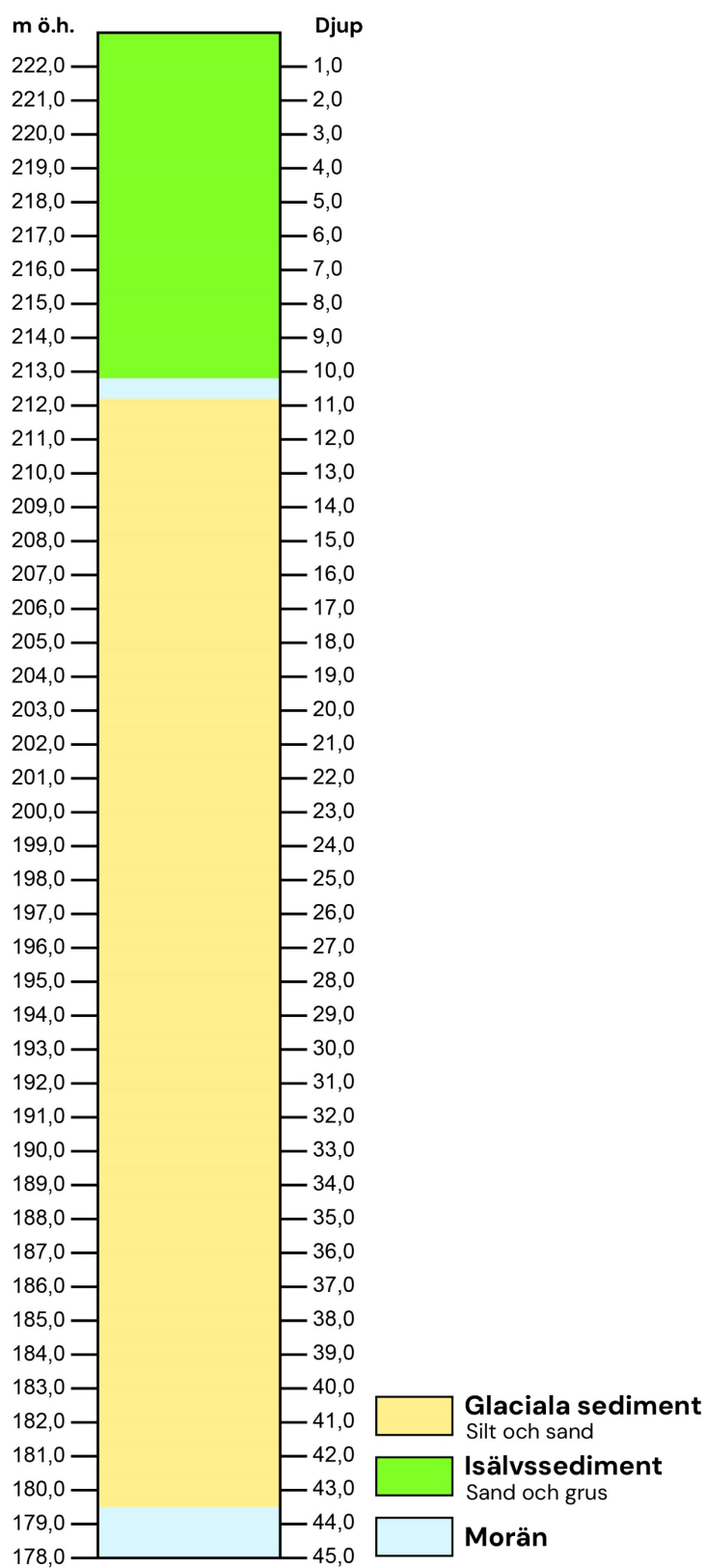
GFP232055

Borrlokalen ligger i den nordvästra delen av den så kallade Getryggen (7001878; 554597, fig. 8b), ungefär 200 m från den plana terrass som utgör Getryggens högsta nivå.

Skrubborrning och sondering utfördes ned till sannolikt berg. Sondering påbörjade efter 11 m. Sannolikt berg nåddes 45 m under markytan. Lagerföljden antas vara torr, alltså ingen tydlig grundvattennivå.

Ett diamikton vilar på sannolikt berg vilket sedan överlagras av kompakt silt och sand, möjligen överkonsoliderad. Överst i denna siltiga sekvens är ett ytterligare sandigt-siltigt diamikton. Detta överlagras i sin tur av skiktad sand (fig. 21). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Tolkningen är att det undre diamiktonet är en morän vilken i sin tur överlagras av sediment (silt och sand) avsatta i en havsvik eller issjö. Den kompakta, överkonsoliderade, egenskapen samt det överlagrande sandig-siltiga diamiktonet leder till en tolkning att de siltiga sedimenten kan vara avsatta i en tidigare isfri period. Överlagrande denna silt och sand finns sedan ett sandigt-siltigt diamikton till, också tolkat som en morän, vilken har egenskaper liknande övriga diamikton tolkade som morän i området. Över moränen vilar sedan skiktad sand, med ett undre siltigare lager. Dessa tolkas som deltaavsättningar, med en finare 'bottomset' överlagrad av dryga 8 m 'foresets' och överst 'topset' eller svallningssediment i form av mellansand.



Figur 21. Förenklad lagerföljd för GFP232055. Ingen grundvattenyta noterades.

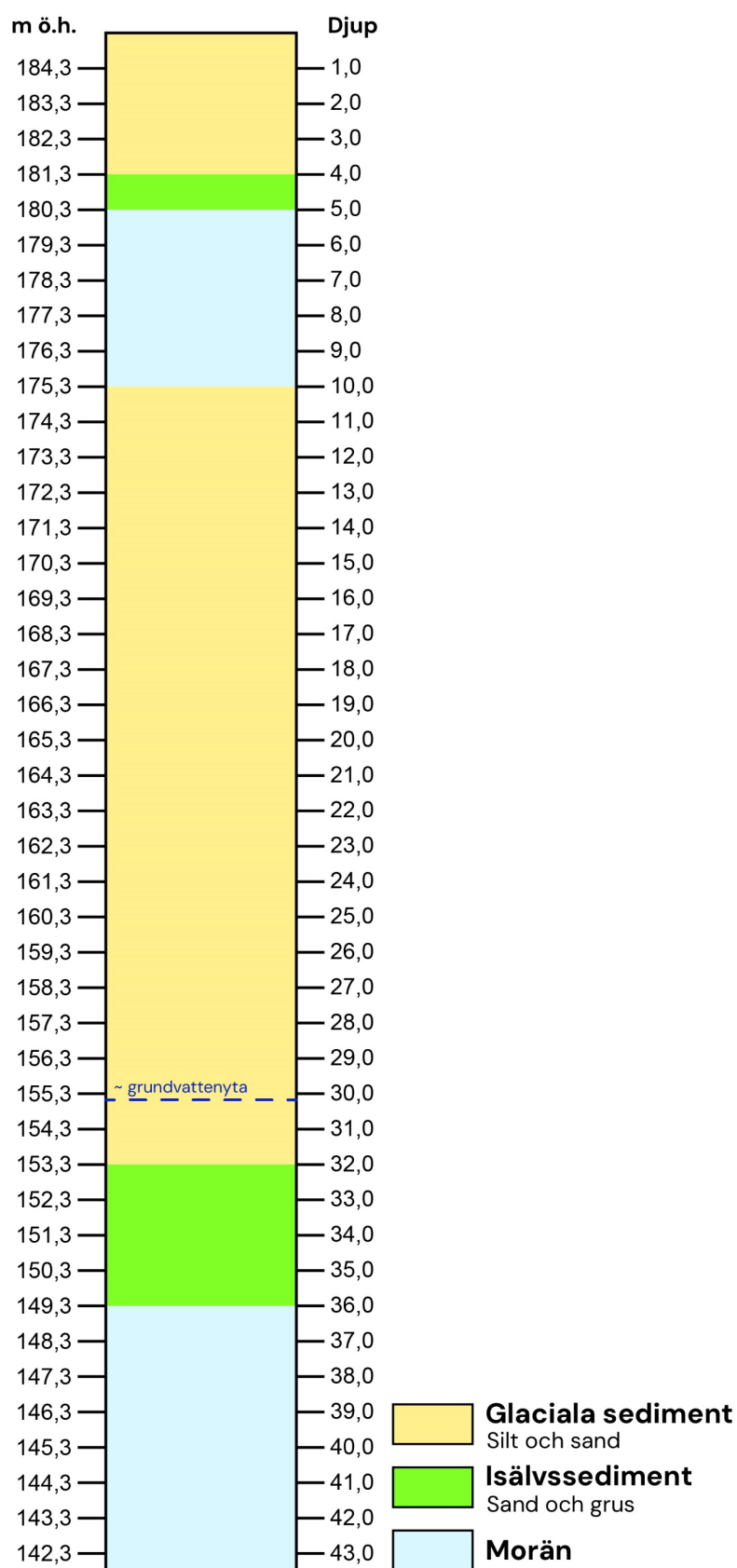
GFP232057

Borrningen utfördes i den stora dödisgropen norr om rullstensåsen (7001450; 554903, fig. 8b).

Skrubborrning och sondering från knappt 10 m ned till sannolikt berg på 43,5 m. Grundvattenrör sattes i samband med borrningen. Grundvattenytan mättes till 30,1 m under markytan.

I botten av lagerföljden vilar ett sannolikt diamikton överlagrat av ett par meter sand och silt. Denna sekvens överlagras sedan av en mycket kompakt silt, med ställvis förekommande sand, grus och sten, ett troligt siltigt diamikton. Vilken i sin tur överlagras av grovsand, skiktad sand och överst mellansand (fig. 22). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Lagerföljden tolkas som att underst vilar en morän på berget vilken överlagras av isälvssand och sedan silt avsatt som issjösediment. Detta överlagras i sin tur av en morän eller ställvis moräniserad silt och sand. Detta betyder att underliggande sediment är tolkade som äldre än den senaste nedisningen i området. Över denna morän följer en sekvens med isälvssediment, sand avsatt i ett stilla vatten och överst spår av strandprocesser i samband med landhöjningen, då strömmar och vågor påverkade landskapet.



Figur 22. Förenklad lagerföljd för GFP232057.

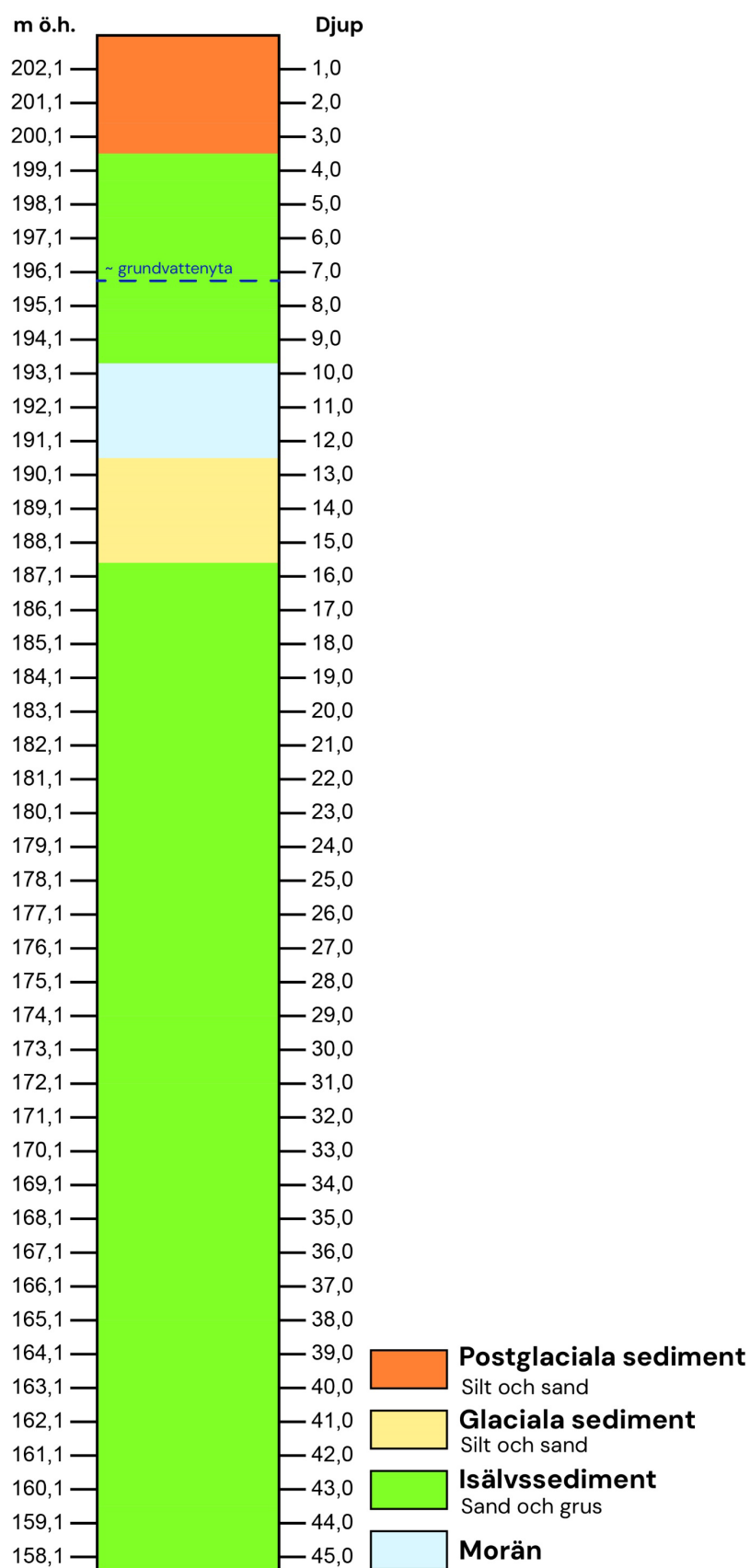
GFP242001

Borrlokalen ligger vid strandkanten i Öratjärns nordöstra del, precis under rullstensåsens västra sluttning och vid lågpunkten längs stranden (7000987; 554428, fig. 8b).

Borrning med skruvborr genomfördes ned till 11 m, resterande del sonderades. Sannolikt berg nåddes vid 45,4 m under markytan. En diffus grundvattenyta noterades kring 7 m under markytan. Inget grundvattenrör installerades.

Direkt överlagrat berget vilar ett grovt men väl sorterat material, sannolikt grus. Grus och sand ligger växellagrat med en mäktighet på nära 20 m och överlagras sedan med 3 m silt och finsand. Dessa sorterade sediment underlagras ett sandigt-siltigt, kompakt, diamikton. Över diamiktonet ligger 5,5 m växellagrad silt och sand. Överst i lagerföljden återfinns 3,5 m sand (fig. 23). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Tolkningen är att den understa lagret, som vilar direkt på berg, utgörs av isälvsmaterial. Detta överlagras av mer distala finkorniga isälvs sediment, bildade längre från iskanten, som i sin tur övergår i en trolig morän. De lager som ligger under denna morän antas alltså härröra från en äldre isfri period. Moränen överlagras sedan av växelvis lagrad sand och silt avsatta i samband med bildandet av rullstensåsen. De översta dryga 3 m består av postglacial sand, bildad av svallprocesser under landhöjningen. Den diffusa grundvattenytan tolkas som infiltration från sjön, och kan med säkerhet inte antas utgöra grundvattenytan.



Figur 23. Förenklad lagerföljd för GFP242001.

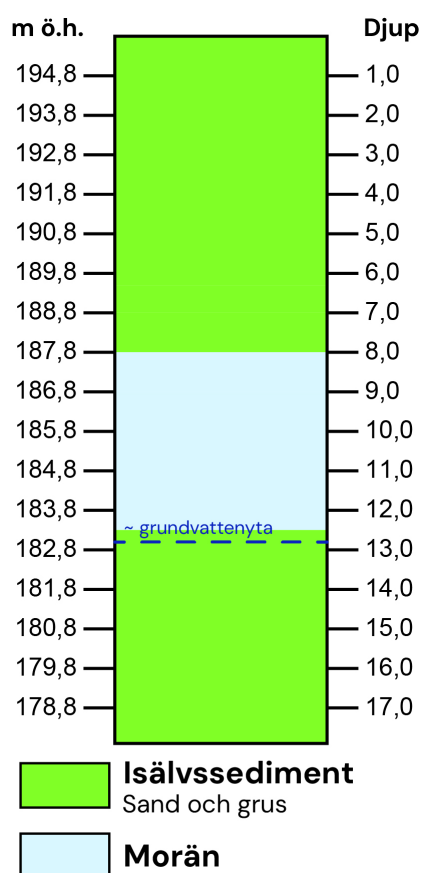
GFP242003

Borrplatsen ligger i dalgången vid Eldbodmon, i en trolig avlång dödisgrop (7001263; 554945, fig. 8b).

Borrning med skruvborr genomfördes ned till ett par meter, resterande del sonderades (fig. 24). Sannolikt berg nåddes vid 17,9 m under markytan. En diffus grundvattenyta noterades kring 13 m under markytan. Inget grundvattenrör installerades.

De undre sedimenten består av grövre kornstorlekar, såsom grus med ställvis förekommande sten. Dessa sediment överlagras av sandigt-siltigt diamikton som övergår mot sandigare längre upp. Överlagrandes diamiktonet vilar sorterad grus och sand. För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1.

Denna lagerföljd tolkas som ett grovt isälvsmaterial i botten överlagrat av en morän. Överst ligger ytterligare ett isälvssediment, dock inte fullt så grovkornigt. Denna tolkning innebär att de undre sorterade sedimenten utgör rester från en tidigare isfri period.



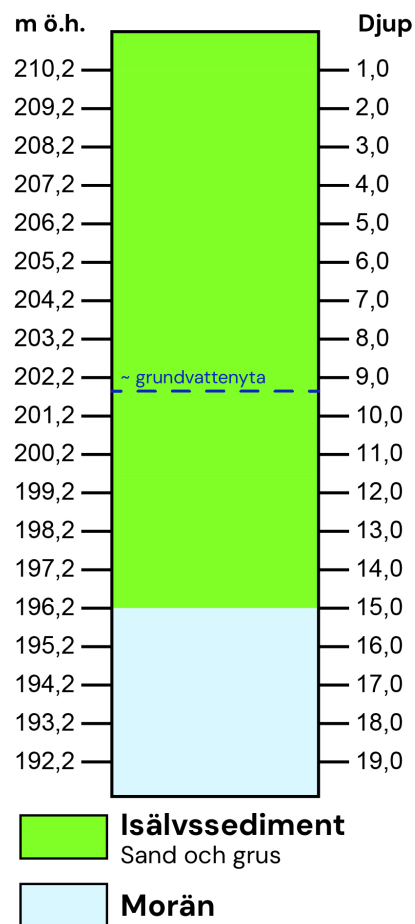
Figur 24. Förenklad lagerföljd för GFP242003.

GFP242005

Borrplatsen ligger i de västra delarna av området, 50 m söder om Mörttjärn, i utkanten av en igenväxt grustäkt (7000011; 553229, fig. 8b).

Lagerföljden sonderades, ingen skruvborr användes. Grundvattenytan noterades vid ungefär 9 m under markytan.

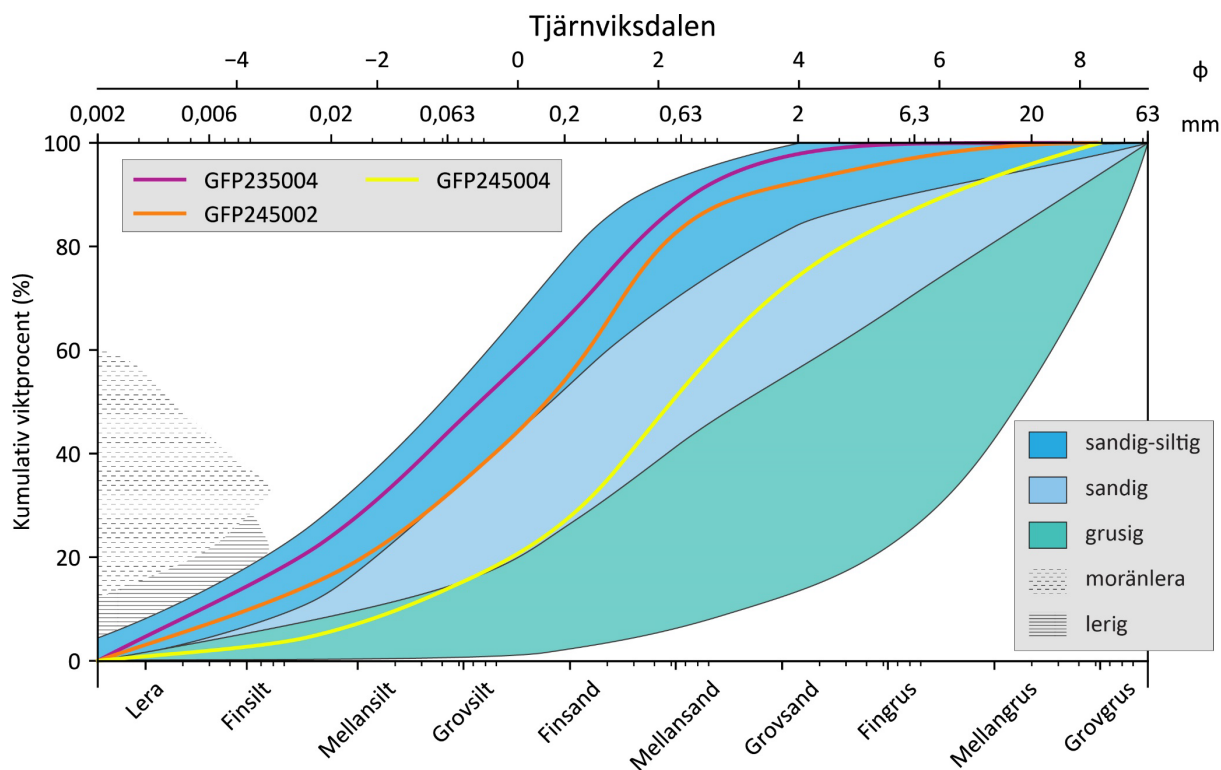
Nederst, direkt överlagrande sannolikt berg, vilar ett kompakt diamikton. Detta överlagras i sin tur av sand och grus (fig. 25). För detaljerad beskrivning av lagerföljden, se bilaga 1. Detta tolkas som en undre morän som överlagras av isälvsmaterial.



Figur 25. Förenklad lagerföljd för GFP242005.

Jordartsanalyser

Tre jordprover togs på olika diamikton under borrhningarna för att stärka tolkningen som har varit baserad på okulär besiktning. Proverna visar alla på typiska kornstorleksfördelningar för morän enligt SGU:s definitioner (Persson & Svantesson 1994) (fig. 26). Proverna GFP235004 (GFP232009 i figur 7) och GFP245002 (GFP232001 i figur 7) faller alla inom kategorin sandig-siltig morän. GFP245004 (GFP2320003 i figur 7) däremot är något mer sandig och klassificeras som en sandig morän.

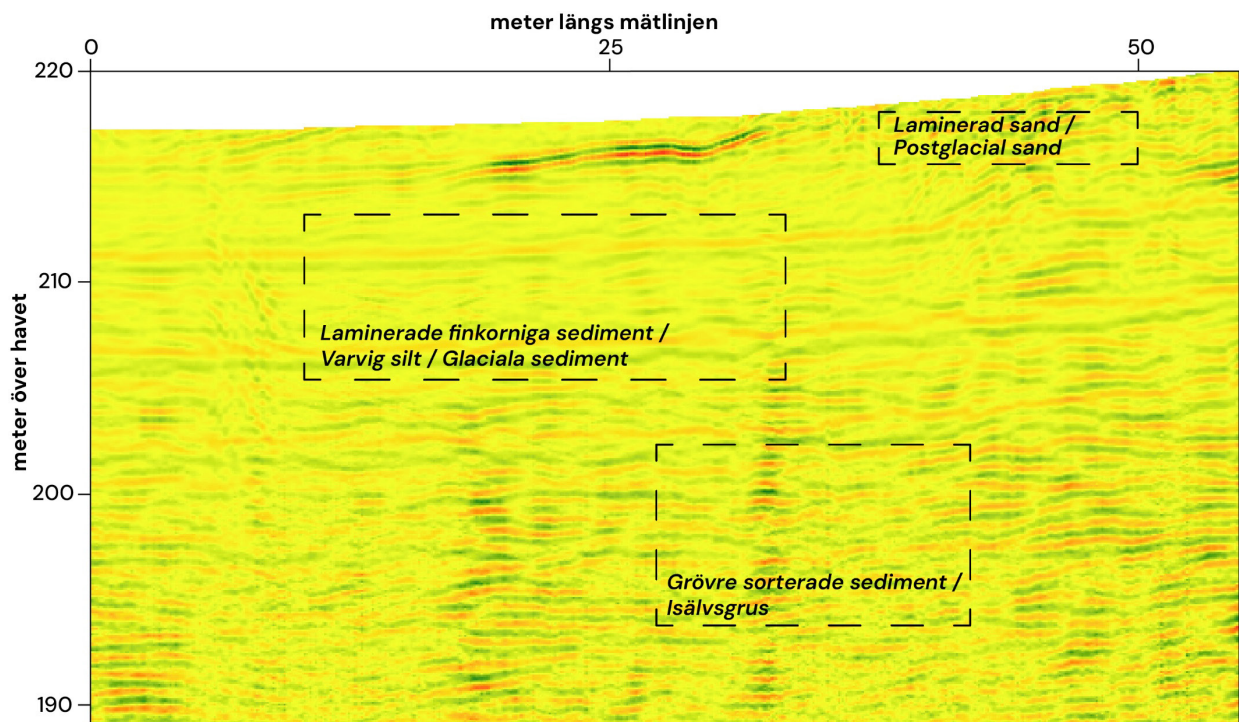


Figur 26. Kornstorleksanalyser på diamikton provtagna vid borrhningar.

Geofysiska mätningar

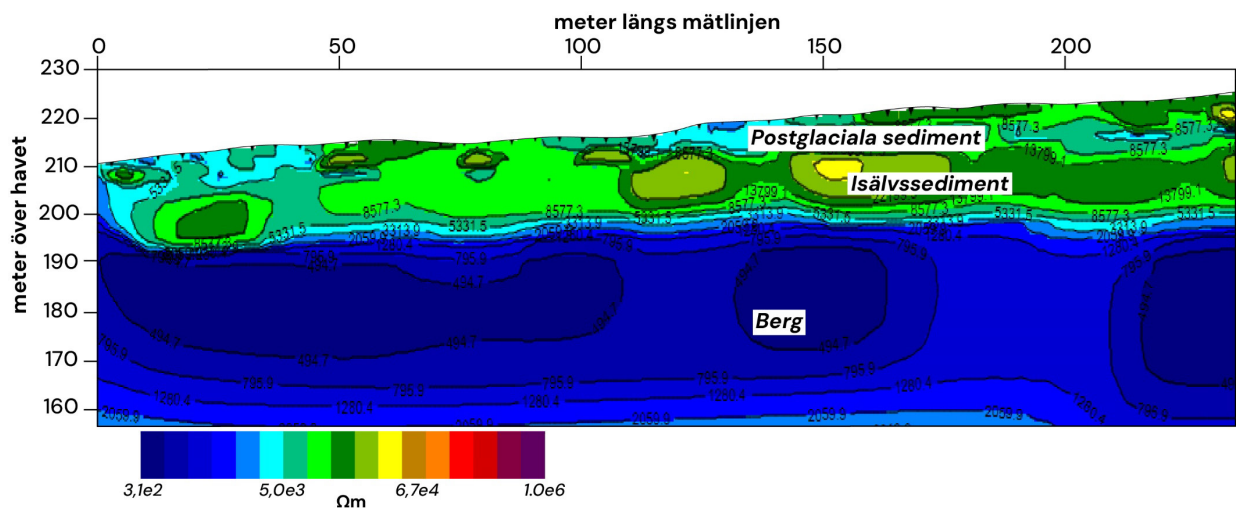
Totalt mättes närmare 8 km georadarprofiler och knappt 2,5 km resistivitetsprofiler (fig. 4). Data från geofysiska mätningar har i första hand använts som stöd till den geologiska och hydrogeologiska tolkningen. Av den anledningen kommer ej beskrivningar av alla geofysiska mätningar presenteras, utan endast exempel för att visa hur de har använts och för att skapa en uppfattning om hur data ser ut.

Georadarprofilerna har stärkt tolkningen av bergyta, grundvattenyta och jordarter. Ett exempel är hur det är möjligt att se olika typer av jordarter i en georadarprofil (R232) tvärs dalgången närmast Tjärnviken i Gesunden. I denna profil går det att tolka olika typer av jordarter genom att tolka reflektionerna utifrån genes och kornstorlek (fig. 27).



Figur 27. Exempel från georadarprofil R232.

Resistivetsprofilerna har varit viktigast för att bekräfta och tolka bergytan samt till viss mån vilka områden som är vattenmättade eller ej, alltså grundvattennivå. Ett exempel är hur det är möjligt att se skillnaden mellan berg, torrt sorterat isälvsmaterial och en eventuell zon av postglacialt omarbetat material (fig. 28).



Figur 28. Exempel på resistivetsprofil res11, transverst åsryggens riktning på dess norra sida.

Jordartsgeologisk kartläggning

Under fältarbetet utfördes också kartläggning av jordarter för att uppgradera jordartskartan över Tjärnviksdalens avrinningsområde med ett fokus på området centralt i dalgången (fig. 29). Kartläggningen utfördes enligt SGU:s standardmetodik för jordartskartläggning i skala 1:25 000, och kommer att uppdateras och tillhandahållas via kartvisare och databaser (Karlsson m.fl. 2021).

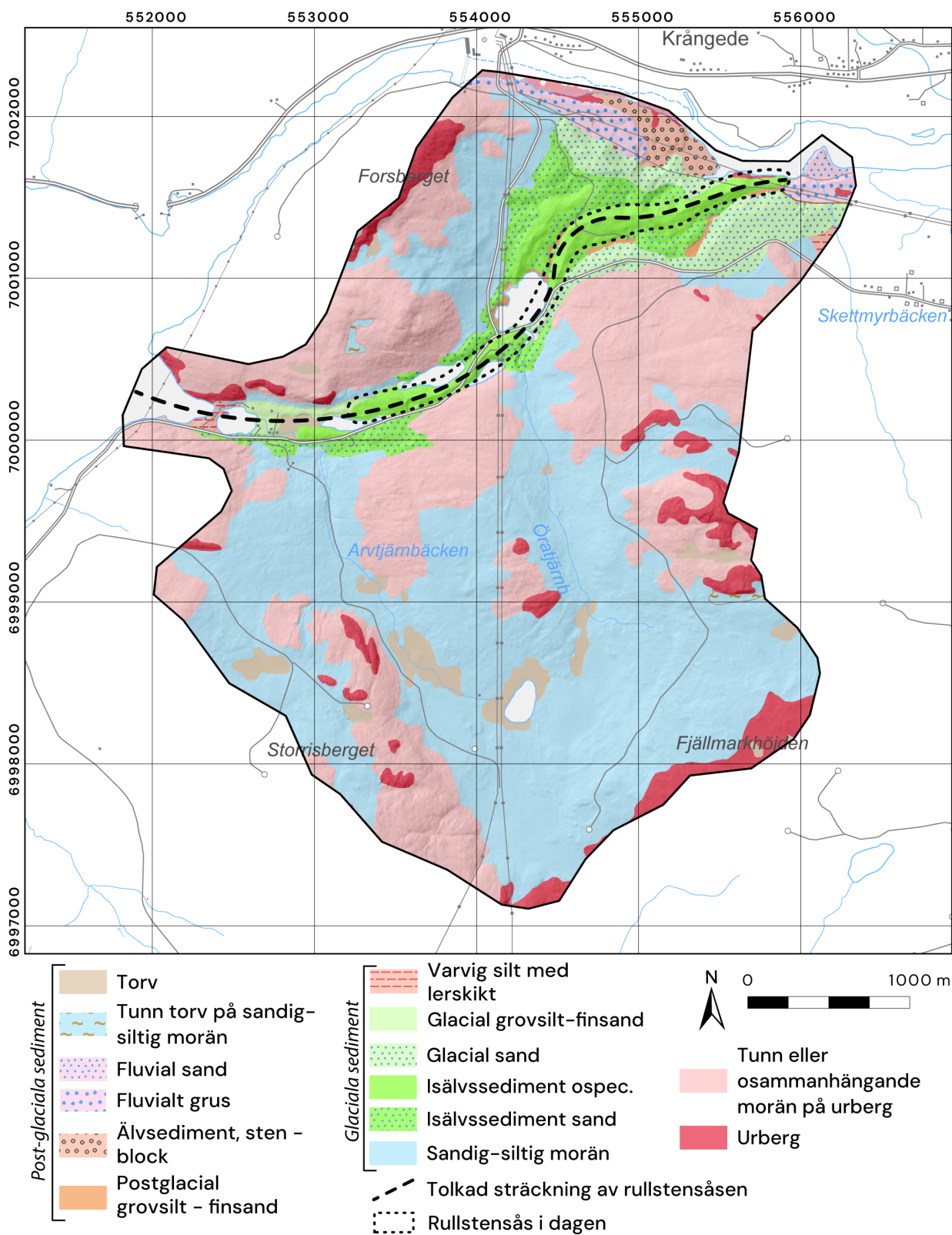
I de övre delarna av avrinningsområdet ned mot dalgången förekommer främst morän, berg och tunna eller osammanhängande lager av morän på berg, där de högst belägna områdena består av berg i dagen. Moränen avsattes under inlandsisen, av krossat berg omblandat med tidigare bildade sediment. I lågpunkter i landskapet återfinns torv. Dessa torvmarker är sällan mäktiga och på ett par platser har de kartlagts som tunna lager av torv på morän. Sannolikt förekommer sorterade sediment, såsom sand och grus, längs med bäckarna ned genom avrinningsområdena men inte i en sådan omfattning att det är möjligt att synliggöra det i kartbilden.

Längre ned i dalgången är bilden en annan, med en stor variation av sorterade jordarter, från sten till lera. Centralt i dalgången löper en rullstensås, som sannolikt avsattes av ett vattenflöde från Gesunden och österut i en tunnel under inlandsisen. Enligt batymetriska data fortsätter rullstensåsen ut i Tjärnviken i Gesunden (Svedberg & Olofsson 2014, Vestlund 2014). Detta betyder att rullstensåsens krön sannolikt löper genom hela dalgången, trots att den inte syns i de västligaste delarna (fig. 29). I dessa delar är dalgången trängre och sannolikt till stora delar utfylld med isälvssand och grus på djupet, men i ytan förekommer olika generationer av finkorniga jordarter, mestadels silt och sand, avsatta i vatten framför inlandsisen i samband med eller strax efter deglaciationen.

Den södra delen av dalgången, längs vägen, är betydligt sandigare medan den norra delen generellt är siltigare, sedimenten i söder utgör sannolikt delar av rullstensåsen som i norr är dold. Vid Mörttjärns västra del börjar en ryggform bildas som sedan fortsätter på den nordöstra sidan som en tydlig rullstensås. Rullstensåsens krön består av sten, grus och sand och löper genom dalgången, mellan Abborrtjärn och Grönvattnet, fram till Öratjärn. Här ser krönet ut att dela sig i två, ett nordligt lite flackare och lägre parti som sträcker sig från Öratjärns badplats mot den så kallade Getryggen, och ett krön som är skarpare och mäktigare och utgör den tydligaste åsryggen. Denna rullstensåsrygg fortsätter sedan mot öster och försvinner först vid Indalsälven, där den är mycket tydlig och uppvisar en typisk jordartssammansättning med grus och sten (fig. 30).

Lateralt kring rullstensåsarna förekommer finkornigare jordarter, såsom sand avsatt i vatten framför den avsmältande inlandsisen, så kallad isälvssand (fig. 31). Längre österut finns mäktiga sedimentavsättningar som har byggt sig upp till en nivå nära den dåvarande vattennivån (ungefär högsta kustlinjen). Dessa sediment har sannolikt avsatts i ett delta när inlandsisen dragit sig tillbaka ytterligare västerut, men sedimenttillförseln har fortsatt varit hög. Detta har lett till de stora sedimentavsättningarna med terrassliknande ytor i öster, så kallad glacial sand.

Ställvis i ytan, och kanske allra tydligast i lågpunkterna i dalgången, förekommer ytterligare en typ av sand. Denna bildades alltmedan landhöjningen fortskred och vattenströmmar samt strandprocesser omarbetade isälvssedimentet, så kallad postglacial sand.



Figur 29. Jordartskarta över Tjärnviksdalen. Rullstensåsens morfologi markerad med prickad svart linje, dess troliga sträckning även dold av sediment i streckad svart linje.



Figur 30. Toppen på rullstensåsens nordöstra spets med det grova materialet som är typiskt för denna typ av avsättning. Fotograf: Gustaf Peterson.



Figur 31. Typiska sediment, mellansand, i avlagringarna kring Gettryggen. Fotograf: Gustaf Peterson.

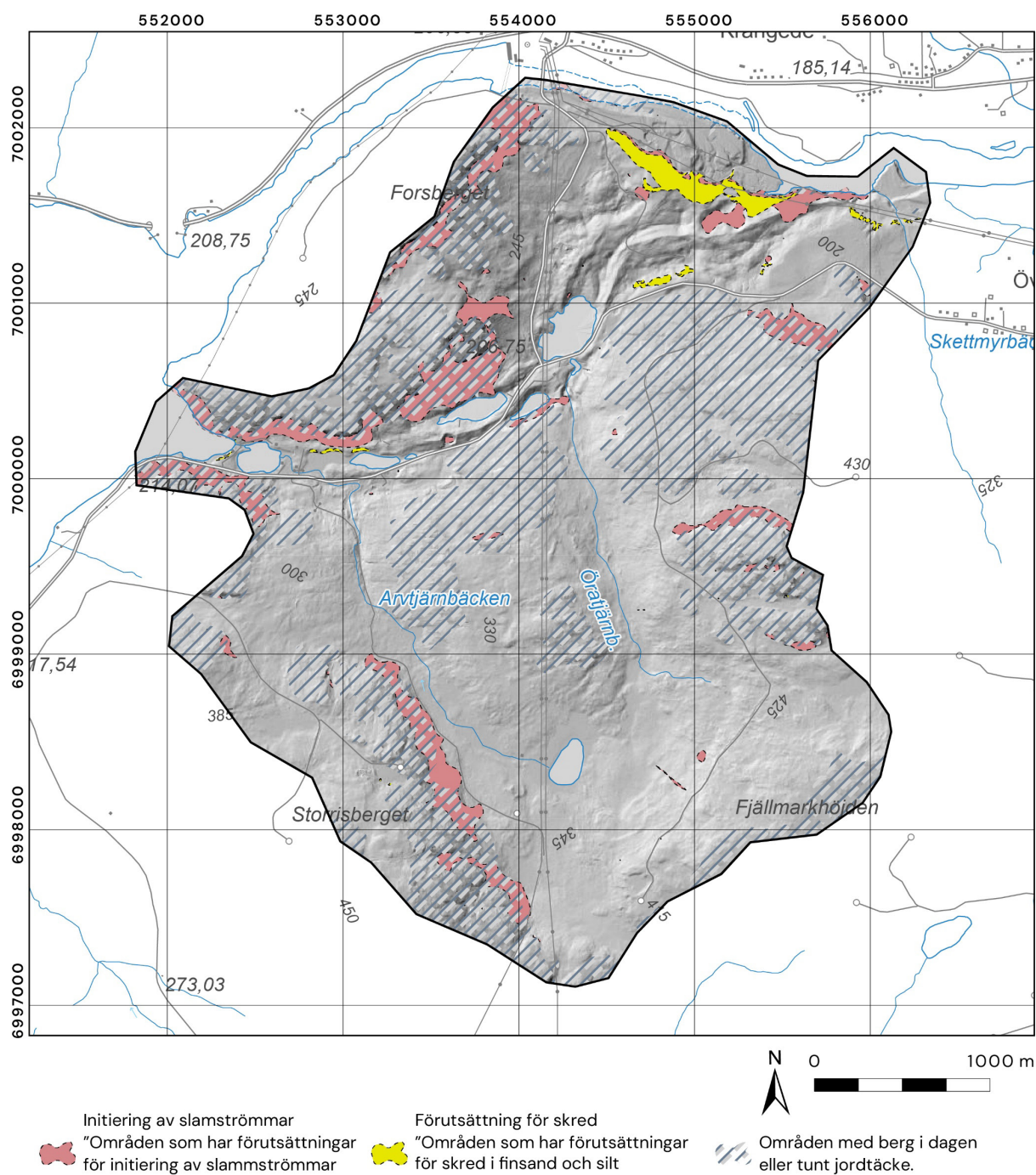
Förutsättningar för slamströmmar och skred

Enkla GIS-analyser utfördes för att skapa en bild av eventuella förutsättningar för skred och slamströmmar (fig. 32).

Enligt de GIS-analyser som utförts antas initieringen av möjlig slamström vara kopplad till de delar i landskapet som har mycket potentiell flödesenergi. Detta i sin tur antas ge förutsättningar för att vatten och sediment mobiliseras och initierar en slamström. Det är viktigt att notera att denna typ av analys inte är exakt, utan initiering av slamströmmar beror på ett stort antal parametrar förutom de som används i analysen; såsom jordart, nederbördsintensitet, markanvändning och andra lokala variationer. Resultatet som presenteras här bygger på ett standardantagande om ett DMRN på mer än 2, och ger sannolikt en överdriven utbredning av områden med förutsättning för initiering av slamströmmar. Analysen ger däremot en indikation om vilka sluttningar som kan ha förutsättningar för initiering. De områden i Tjärnviksdalen som faller ut i analysen är nordostsluttningen av Storrisberget, Tjärnbodbergets sydsluttning och Forsbergets sydostsluttning (fig. 32).

Storrisbergets sluttning avvattnas genom Arvtjärnsbäcken. Arvtjärnsbäcken har eroderat ned i jordlagren och ökade vattenflöden här skulle öka erosionen. I analysen, om än i mindre omfattning, faller också nordsluttningen på Stenloppsberget ut. I samband med detta är det värt att nämna att berg i dagen inte har inkluderats i analysen. I områden med berg finns begränsat med sediment tillgängligt och det är därför viktigt att ha dessa områden i beaktande när resultatet från analysen studeras. Så, baserat på förekomsten av tunna eller obefintliga jordtäcken är sannolikt initieringsområdena betydligt överdrivna vid Tjärnbodberget och Forsberget. I figur 32 är områden med berg i dagen och tunt jordtäckte markerat.

Förutsättningarna för skred har beräknats med antagandet att de områden som i ytan har finsand och silt består av silt från markytan till bergöverytan. Silten antas, baserat på observationer av grundvattenytan, vara torr. Baserat på att silten tolkas som torr har en lutning på 27° eller 1:2 valts (Terzaghi m.fl. 1996). Lagerföljden som har antagits i modellen är en kraftig förenkling då vi i borrhningarna ser att det finns en stor variation med grövre sediment (grus) på djupet och i detta fall extra intressant, en morän i de mellersta delarna av lagerföljden. En morän utgör en relativt stabil jordart som sannolikt stabiliserar och motverkar förutsättning för skred. Trots det ger analysen en tydlig bild av att branten från Getryggen ned mot Indalsälven är speciellt utsatt. Också ett mindre område som sluttar ned mot Eldbodmon faller ut i analysen.

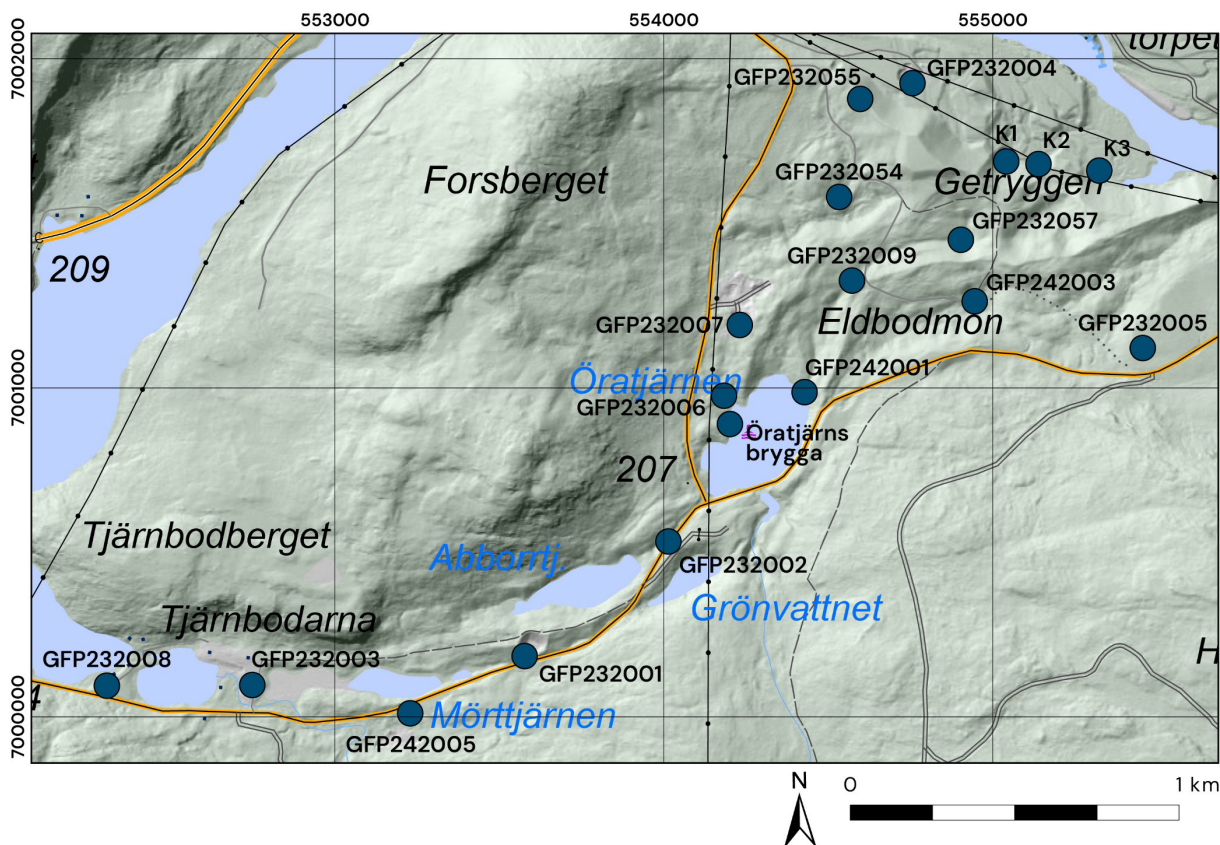


Figur 32. Förutsättningar för slamströmmar och skred i Tjärnviksdalen.

Hydrogeologiska förhållanden

Grundvattenundersökningar

Under fältarbeten borrades 15 platser och totalt uppmättes diffusa till stabila grundvattennivåer vid 10 borrhningar och vid 7 av dessa sattes grundvattenrör (fig. 5 och 33). 5 av lagerföljderna var således torra. I grundvattenrören har tryckmätare (nivåloggers) placerats.



Figur 33. Översiktskarta med lokaler där observationer av grundvattennivå och/eller prov före kemisk analys tagits. För mer information om punkterna se tabell 2.

Vid två tillfällen utfördes vattenprovtagning och i någon punkt även fältmätning av vissa parametrar (Temperatur, pH, konduktivitet och syrehalt). Under det andra fältarbetet 2024 upptäcktes att ett antal loggrar av någon anledning inte hade börjat mäta, eller mätte korrekt, så detta åtgärdades vid tillfället.

Provtagningen för kemisk analys av grundvatten gick förhållandevis bra, grundvattenrören hade generellt god tillrinning samt snabb klarning. I flera rör är dock avståndet ned till grundvattenytan så långt att pumpen inte nådde ned till grundvattennivån. I dessa rör utfördes därför provupphämtning med *bailer*. Som en parentes kan nämnas att i rör GFP232009 lossnade repet från bailern vid uppdragning (vid fältarbete 2023) och störde därmed loggermätningar i röret. Under fältarbetet 2024 lyckades vi få upp bailern, mäta grundvattenytan och installera loggern på nytt.

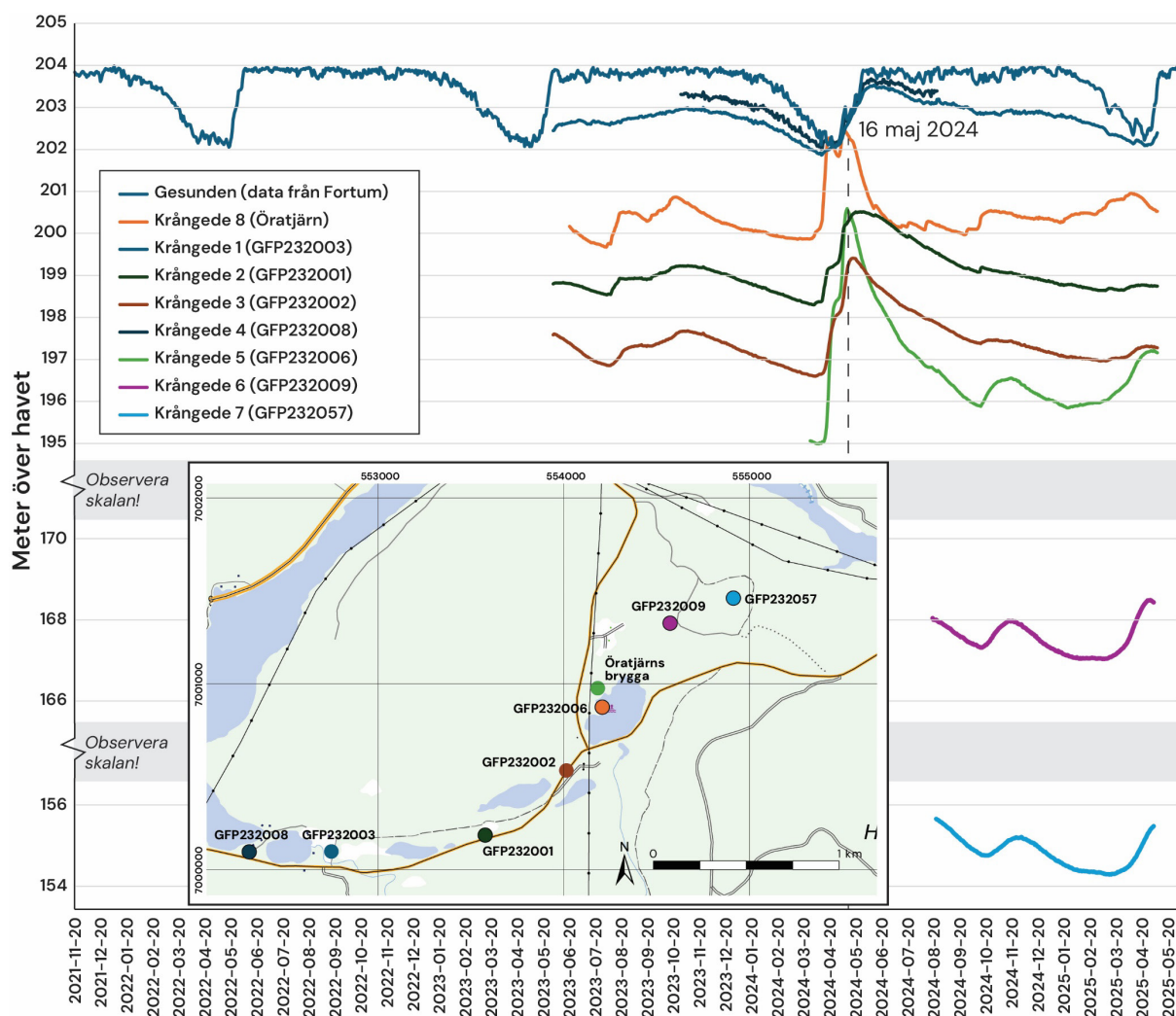
Tabell 2. Koordinater, information om grundvattenrör samt uppmätta grundvattennivåer.

Lagerföljd/Lokal	N	E	GV-rör	DATA-Logger	Analys GV-kemi	GRUNDVATTENNYTA VID BORRNING (m ö.h.)	Jorddjup (m)
GFP232001	7000185	553577	ja	ja	ja	199	24
GFP232002	7000533	554014	ja	ja	ja	198	31,5
GFP232003	7000097	552749	ja	ja	ja	202	24,2
GFP232004	7001926	554756	-	-	-	torrt	3
GFP232005	7001121	555456	-	-	-	198	28,9
GFP232006	7000976	554183	ja	ja	ja	197	16,2
GFP232007	7001191	554231	-	-	-	torrt	14
GFP232008	7000095	552307	ja	Ja	-	202	39,5
GFP232009	7001326	554572	ja	ja	ja	170	45
GFP232054	7001580	554533	-	-	-	torrt	9,2
GFP232055	7001878	554597	-	-	-	torrt	45
GFP232057	7001450	554903	ja	ja	ja	156	43,5
GFP242001	7000987	554428	-	-	-	196	45,4
GFP242003	7001263	554945	-	-	-	183	17,9
GFP242005	7000011	553229	-	-	-	202	19,9
K1	7001688	555041	-	-	ja	151	-
K2	7001680	555139	-	-	ja	150	-
K3	7001634	555316	-	-	ja	147	-
Öratjärns brygga	7000890	554201	-	ja	ja	200 (ytvatten)	-
Abortjärn	7000441	553903	-	-	ja	198 (ytvatten)	-

Grundvattennivåer har mätts manuellt vid ett flertal tillfällen och i de 7 grundvattenrören och i rör i Öratjärn med tryckgivare. Längden på perioden för trycknivådata är olika beroende på när röret sattes samt när en fungerande logger började mäta.

Rören ligger längs hela Tjärnviksdalen och har relativt liknande fluktuation över året. Högst grundvattennivåer är det i slutet av maj till början av juni, och sedan sjunker de långsamt och är vanligen som lägst i mitten av april. Årsfluktuationerna ligger vanligen på cirka 1,5–3,0 m. Man kan tydligt se tre olika hydrologiska miljöer bland stationerna.

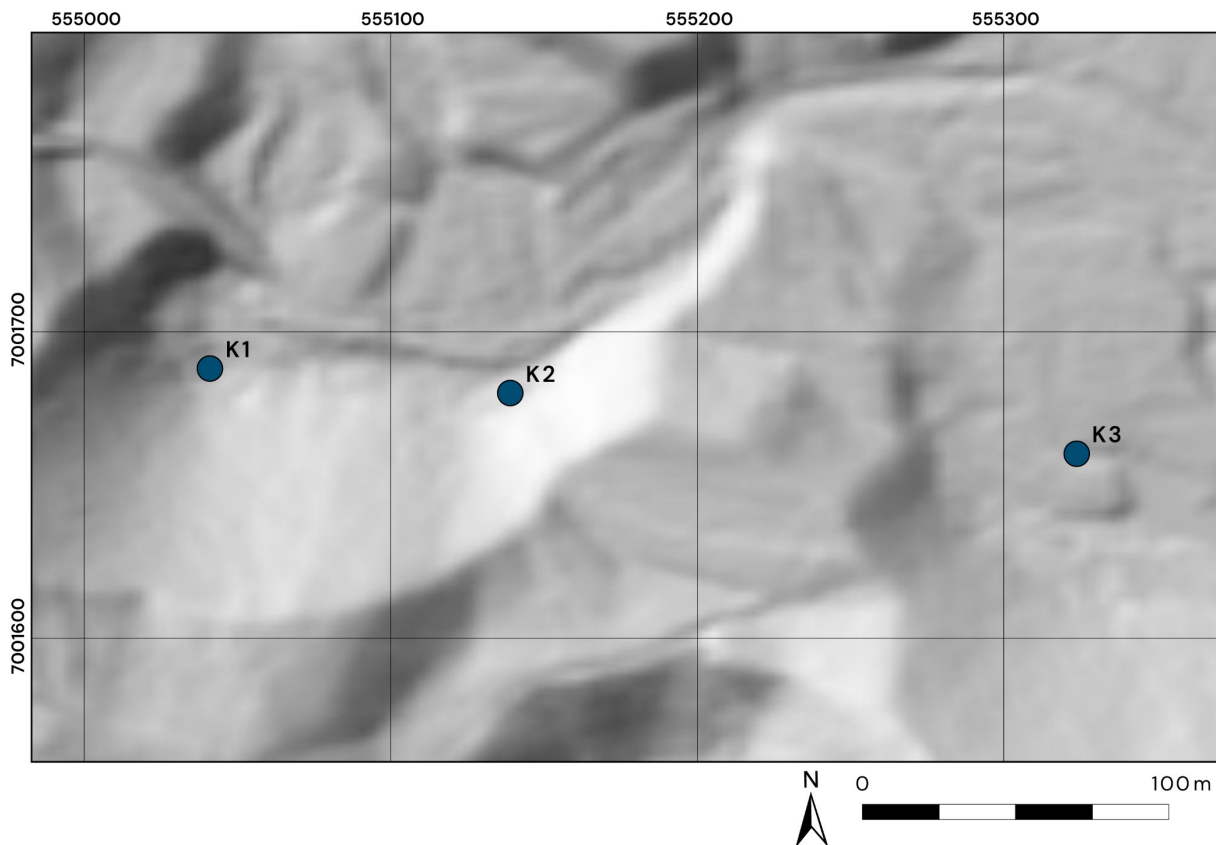
- Stationerna Krångede 4 (GFP232003) och till viss del även Krångede 1 (GFP232008), som ligger närmst Gesunden, uppvisar små och snabba förändringar i grundvattenytans nivå som tyder på att de påverkas av nivåförändringar i Gesunden (fig. 34).
- Stationerna Krångede 3 (GFP232002) och Krångede 2 (GFP232001) och i viss mån Krångede 5 (GFP232006) har mycket liknande fluktuationer förutom att Krångede 5 verkar ha en större påverkan från högvattnet i Öratjärn maj 2024.
- Stationerna Krångede 6 (GFP232009) och Krångede 7 (GFP232057) skiljer sig markant vad gäller grundvattennivåerna då de ligger under -30 m under marknivå. Alla grundvattenrör med nivåmätningar ligger som nivåstationer i SGUs grundvattennät (*SGU:s Kartvisare och diagram för mätstationer*, SGU 2024b)



Figur 34. Nivådata (meter över havet) från grundvattenrör och mätningar av Gesundens nivå (*pers. kom. Gustav Enmark, Fortum*). Data från maj 2023–slutet av augusti 2024.

Källor

Längs med, vid foten av den branta avlagringen vid Getryggen (fig. 35), finns ett flertal källsprång och källhorisonter. Dessa bildar mindre bäckflöden som nedströms rinner ut i Indalsälven. Det samlade utflödet beräknas till > 50 l/s. Vattenprovtagning skedde i tre punkter (K1, K2 och K3). K1 representerar det första utflödet i väster med cirka 3 l/s, K2 är i den östra sluttningen vid en tydlig punktkälla med cirka 5 l/s. Båda dessa rinner ner till en bäck nedanför slänten. I området mellan K1 och K2 finns flera områden med källutflöden. I slänten syns en tydlig förändring i markfuktigheten vid cirka 147–151 m ö.h. K3 är ett prov taget i ett tidigt skede av en bäck som kommer från ett område med flera mindre källutflöden och källhorisonter.



Figur 35. Karta med provtagna källor (K1, K2 och K3) vid slutningens slut ned mot Indalsälven.

Resultat grundvattenkemi

Grundvattenkemin är utifrån fältmätningarna relativt överensstämmande inom området (tabell 3). Temperaturmätningarna i fält varierar, detta kan förklaras med att de skett i provbehållaren som kan påverkas av lufttemperatur. Fältmätningar utfördes endast under juli 2023 och inte vid senare tillfällen.

Utifrån analyserna kan konstateras att grundvattnets kemi i Tjärnviksdalen i allmänhet är av god kvalitet (tabell 3 och tabell 4). Det finns inga tydliga påverkansparametrar med höga halter, till exempel är nitrat och kloridhalterna låga. Jonhalterna är generellt sett låga. När det gäller klorid och sulfat är de till och med mycket låga. De grundvattenrör som avviker är GFP232006 vid Öratjärn, där pH, alkalinitet och kalciumhalterna är lägre än i de andra provpunkterna. Möjligen är grundvattnet i området påverkat av ett läckage från Öratjärn och att grundvattnet därmed inte hunnit få grundvattenkaraktär.

Ett annat prov som avviker är från GFP232002 sydväst om Öratjärn där halterna av järn, mangan och arsenik är betydligt högre än övriga punkter (tabell 4). Halten arsenik är anmärkningsvärt hög, detta kan bero på antingen lokala inslag av morän med hög arsenikhalt eller om det vid tidigare tillfällen deponerats avfall med arsenikhaltigt material i närheten. Att en äldre inlandsis kan ha transporterat material österut ligger helt i linje med den regionalgeologiska kunskap som finns över området. En annan möjlig anledning är att det, nära röret, dels står en telefonstolpe, dels ligger en telefonstolpe. Båda ser ut att bestå av impregnerat trä. Vid andra provtillfället i augusti 2024 togs ett extra prov i detta rör (GFP23202) som dock inte påvisade några förhöjda värden av dessa parametrar. Provet från GFP232009 i augusti 2024 visar höga halter, eller i alla fall förhöjda halter, när det gäller samtliga metaller jämfört med det prov som togs i juli 2023. Resultaten med höga metallhalter från rören GFP23202 och GFP232009 kan vara påverkade av provtagningen då de är så pass olika mellan två provtagningstillfällen.

De tre proverna från källorna K1, K2, K3 har en mycket snarlik kemi och de är alla tre av grundvattenkaraktär (tabell 4). Två vattenanalyser togs, i Öratjärn respektive Abborrtjärn (tabell 4). Det är en klar skillnad mellan dessa, Abborrtjärn har en tydlig grundvattenkaraktär som speglas framför allt i parametrar som alkalinitet, totalhårdhet och konduktivitet. Öratjärn däremot har betydligt lägre värden när det gäller dessa parametrar, och sjön har klar ytvattenkaraktär.

Tabell 3. Fältmätningar.

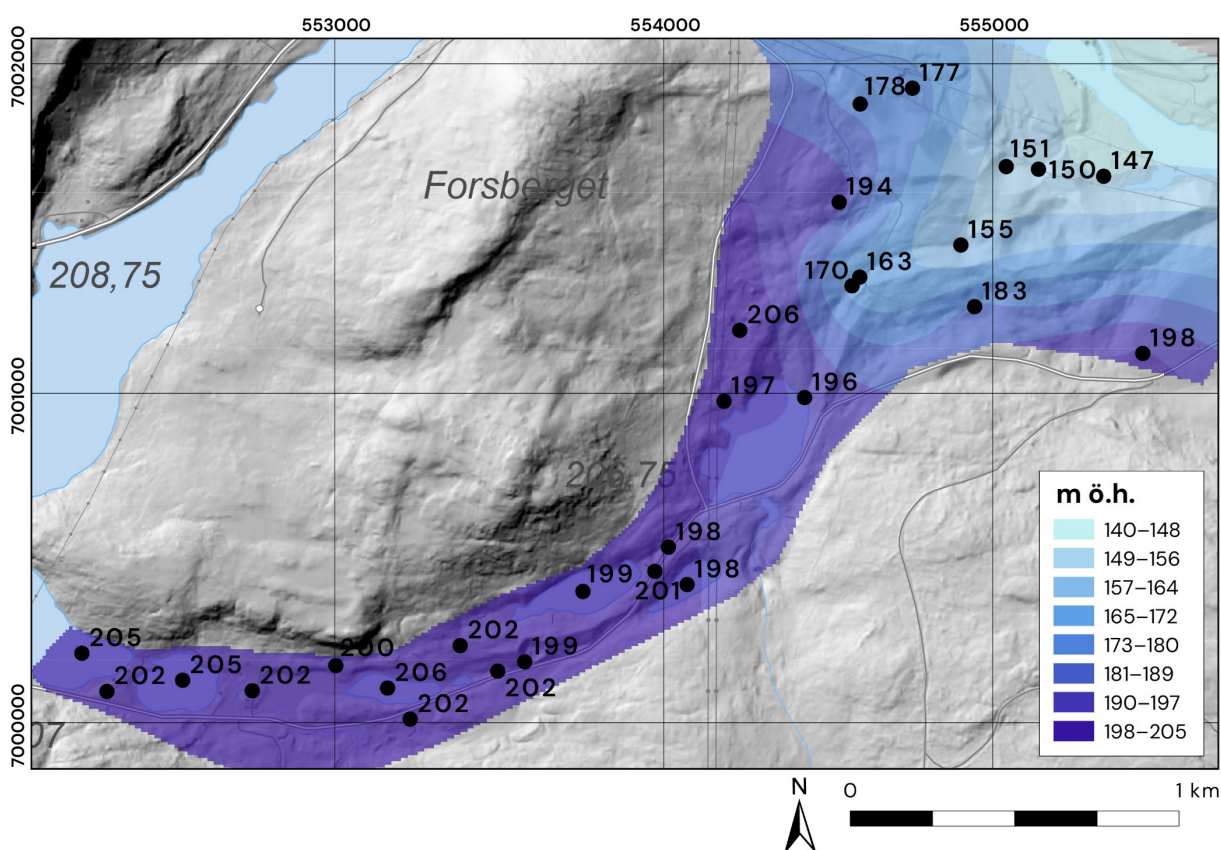
Lokal	Temp (°C) (lod)	Konduktivitet (µS/cm) (lod)	Temp (°C) (Hach)	pH (Hach)	O ₂ (mg/l) (Hach)	Konduktivitet (µS/cm) (Hach)
GFP232003	5,1	124	8,3–9,9	6,97	2,05	178,5
GFP232001	6,3	223	8,7–12,3	7,42	5,42	235
GFP232002	7,2	199	10,2–11,0	7,24	1,2	253
GFP232006	5,2	66	7,1–9,4	6,56	2,34	67,1
GFP232009	—	—	—	—	—	—
K1	—	—	7,6–9,9	7,45	9,7	194,8
K2	—	—	6,2–6,7	7,74	9,26	211,1

Tabell 4. Analyser av grundvattenkemi. Sammanställningen följer i tillämpliga delar klassindelningen i SGU:s "Bedömningsgrunder för grundvatten" (SGU 2013, uppdaterad 2024) och redovisningen har färgkodats därefter (Klass 1 = blå, Klass 2 = grön, Klass 3 = gul, Klass 4 = orange, Klass 5 = röd). (1) – Mycket låg halt till (5) – Mycket hög halt (eller motsvarande) Klassindelningens innebörd skiljer sig åt mellan parametrar. Höga halter representeras i regel av högre men undantag finns (till exempel för parametern alkalinitet). För några värden anges "<" vilket innebär att en halt ligger under rapporteringsgräns. För vissa ämnen finns inga klasser, dessa är därför utan färgkodning.

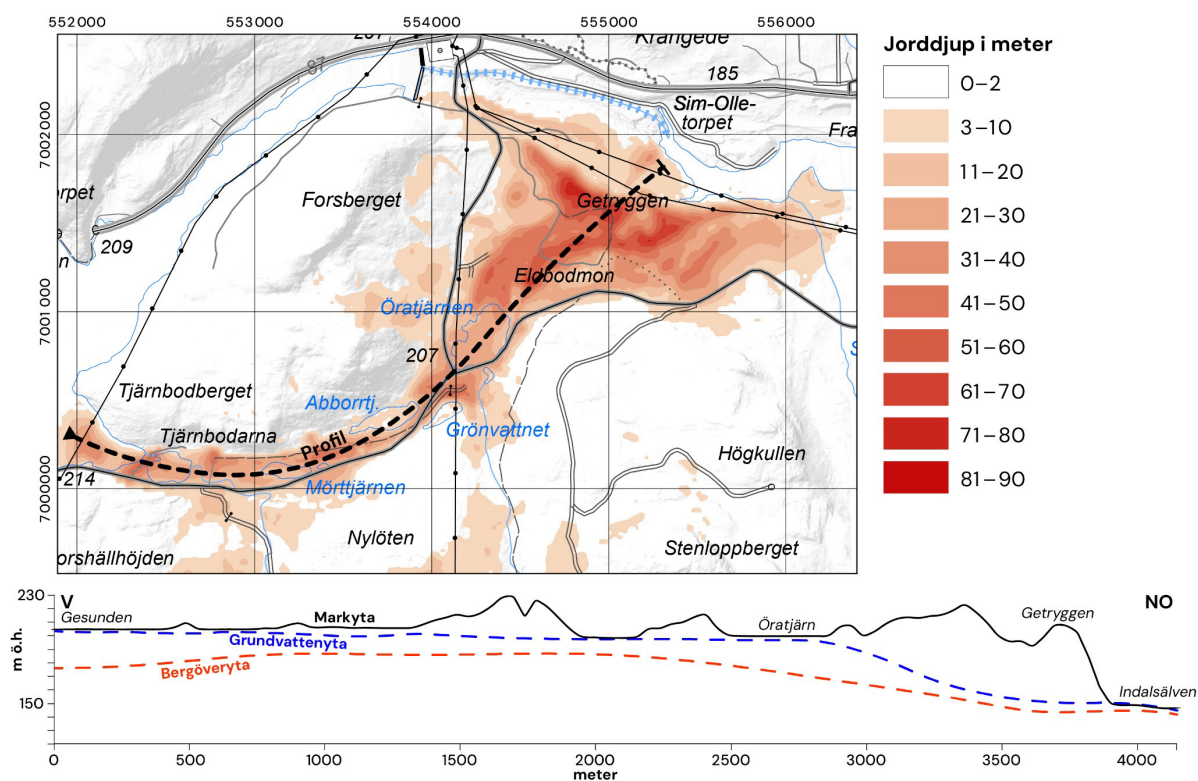
	GFP232003	GFP232001	GFP232002	GFP232006	GFP232009	GFP235057	GFP232002	GFP232009	K1	K2	K3	Abborrtjärn	Öratjärn
pH	6,9	7,5	7,6	6,6	7,7	8,64	7,63	7,28	7,6	7,8	7,66	7,94	7,22
Alkalinitet, HCO₃ mg/l	114	168	173	36	136	87,2	165,3	117,7	126	136	108	104,9	16,35
Kalcium mg/l	33	50	50	11	25	22	48,1	32,1	38	40	32,1	30,06	5,21
Kalium mg/l	1,1	1,2	1,1	0,75	3,5	2,39	1,29	2,11	0,87	0,84	0,74	0,82	0,43
Magnesium mg/l	2,2	2,2	2,1	0,93	1,6	1,46	1,94	1,58	1,6	1,7	1,46	1,7	0,17
Natrium mg/l	2,3	3,6	3,2	1,7	4,2	2,99	3,22	3,45	2,2	2,7	2,21	2,99	1,61
Totalhårdhet mg/l	37	54	53	12	28	24	51	34	41	42	35	33	5
Kiseldioxid mg/l	5,8	5,8	5,3	4,3	3,6	2,6	9,2	10,7	4,5	4,8	8,8	7,1	7,5
Klorid mg/l	1	2,6	2,2	1,1	1,9	2,2	2,3	2,8	2,3	2,2	1,7	1,99	0,81
Konduktivitet mS/m	18,6	26	27	7	18,7	14,3	26,4	20,1	20,5	21,9	18,2	17,4	3,89
Sulfat mg/l	3	1	0,51	1,7	2,8	1,4	0,8	2	2,1	1,7	1,7	1,2	1,4
Ammonium mg/l	<	<	0,08	<	0,46	0,14	0,13	0,18	<	<	<	<	0,01
NO₂+NO₃ mg/l	0,13	0,09	<	0,03	0,02	0,04	0,01	0,23	0,04	0,12	0,07	<	<
Aluminium mg/l	0,004	0,003	<	0,002	0,003	0,01	0,006	0,51	<	<	<	<	0,065
Järn mg/l	0,03	<	1	0,02	0,006	0,006	0,009	1,3	<	<	<	0,003	0,022
Mangan mg/l	0,06	0,04	0,9	0,16	<	0,001	<	0,31	<	<	0,18	0	0,0005
Arsenik µg/l	0,11	0,2	22	0,12	4,6	0,26	3,4	9,2	0,39	0,88	1,7	2,9	0,13
Bly µg/l	0,02	<	<	0,03	0,01	0,01	0,05	2,1	<	<	<	<	0,01
Kadmium µg/l	0,01	<	<	0,04	0,02	0,004	0,014	0,051	<	<	<	<0,004	0,005
Kobolt µg/l	0,02	0,01	0,08	0,2	0,27	0,24	0,22	1,4	<	<	0,009	<0,008	0,011
Koppar mg/l	<	0,005	<	<	0,02	0,018	0,014	0,14	<	<	2E-04	0,0002	0,00067
Krom µg/l	0,09	0,16	<	0,13	1,1	0,24	0,22	9,6	0,17	0,15	0,1	0,03	0,1
Nickel µg/l	0,32	0,27	0,3	1,2	7,1	1,6	6,1	30	0,04	0,04	0,03	0,06	0,29
Vanadin µg/l	0,09	0,16	0,05	0,06	0,22	0,07	0,06	1,1	0,2	0,14	0,15	0,09	0,09
Zink mg/l	6E-04	<	<	<	<	0,078	0,011	0,049	<	<	0,001	0,002	0,002
Fluorid mg/l	0,15	0,37	0,41	0,51	0,71	0,52	0,41	0,51	0,33	0,37	0,58	0,37	0,48
Fosfat mg/l	<	0,03	<	0,03	0,005	<	<	0,03	<	<	<	<	<

Grundvattenytan

Med hjälp av uppmätta grundvattennivåer har en interpolerad grundvattenyta tagits fram (fig. 36). Grundvattennivån i dalgången faller från 202,65 m ö.h. i väster till cirka 150 m ö.h. i öster där grundvatten trycker ut i både diffusa källhorisonter och tydliga punktkällor norr om Gettryggen (fig. 36). Grundvattnets gradient mellan de fyra rören från Gesunden fram till Öratjärn ligger mellan 2,5 och 6 ‰ vilket får anses som en 'normal' lutning för grundvattennivå. I stor kontrast till detta är den hydrauliska gradienten från området nordost om Öratjärn och ner till källutflödena. Det är dock svårt att avgöra med tillförlitlighet beroende på var och hur gradienten beräknas. Med detta sagt sker trots allt en dramatisk förändring i grundvattennivåerna. På bara några hundra meter skiljer det 30 m på grundvattenytan, vilket tyder på att något ändras rent geologiskt längs denna gradient. Med hjälp av den interpolerade grundvattenytan och 3D-modellen tolkar vi det som att det öster om Öratjärn finns en större mäktighet på jordlagren och ett grundvattenmagasin med en större omättad zon än i väst (fig. 37). Detta kan liknas vid något som kallas för ett stalp, med vilket menas en brant sluttning i bergytan som orsakar ett grundvattenflöde med stor lutning. Den omättade zonen är i flera fall över 25 m mäktig och den kan vara över 50 m i de östra delarna. Det finns flera indikationer på att jordlagren i delar av området består av en övre sand, en relativt tät morän och ett underliggande sandmagasin i isälvsavlagringar (se avsnitt *3D-modell*). I de nordöstra delarna med stor mäktighet finns det en möjlighet till en hängande grundvattenyta i det övre sandlagret vid stor, långvarig nederbörd eller när vatten till exempel svämmar över från Öratjärn. Men oftast är den övre sanden utan grundvattenyta i dessa delar, vilket tydligt syns i profilen i figur 37.



Figur 36. Beräknad grundvattenyta, inklusive datapunkter.



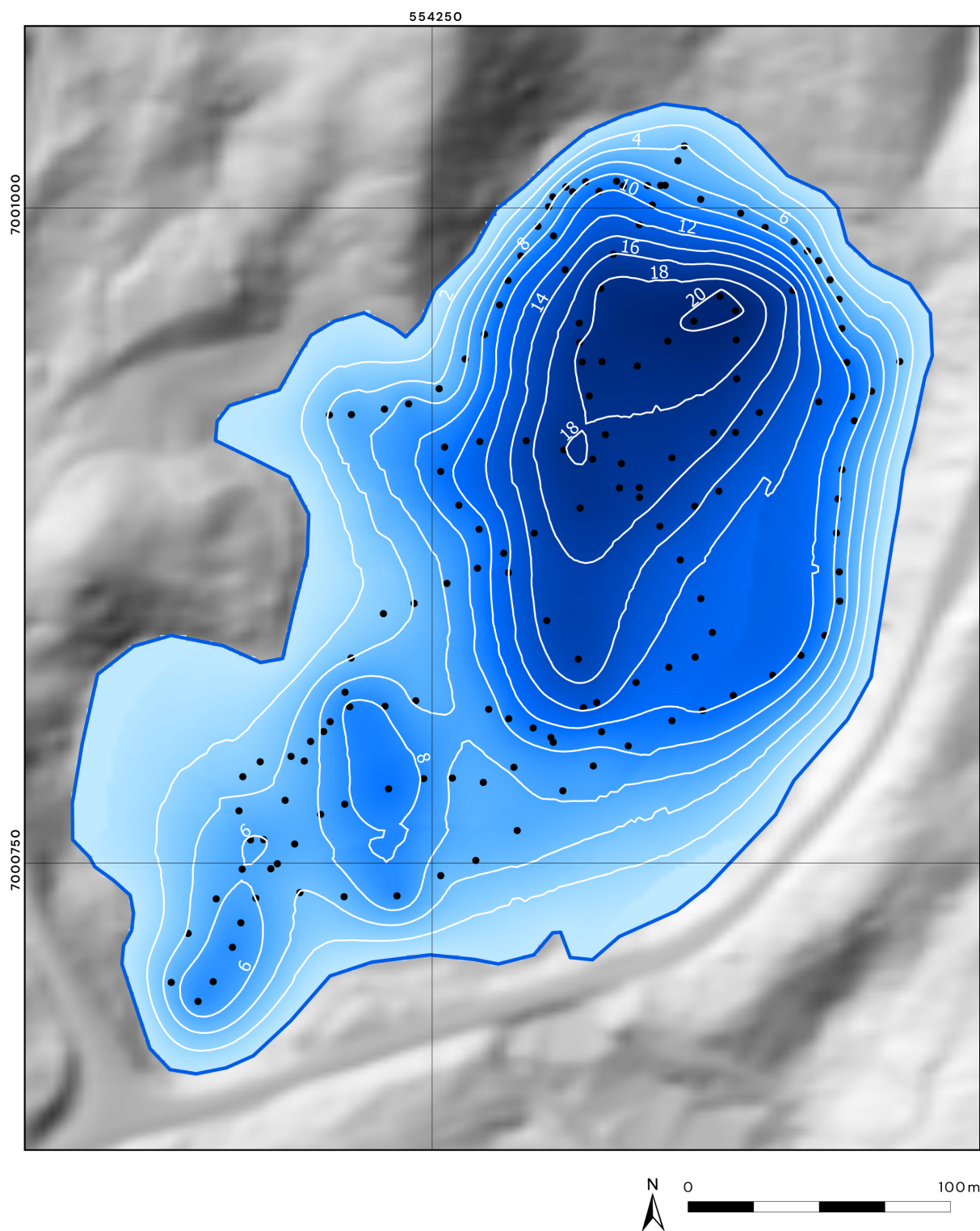
Figur 37. Jorddjup från 3D-modellen samt längsprofil. Notera att bergöverytan högst troligen inte är så jämn som i profilen.

Grundvattenmagasin

Idag har grundvattenförekomsten i Tjärviksdalen en avgränsning som grundar sig på den gamla jordartskartan (VISS 2024). Baserat på bland annat ytdata i form av en ny jordartskarta från denna undersökning kommer förekomstens utbredning att ändras (jämför figur 29) för ungefärlig utbredning av isälvsediment och glacial sand. Vidare kommer data från borrhningar, nivåmätningar, kemidata, samt 3D-modellen ligga till underlag för en utförlig beskrivning av grundvattenförekomsten i en annan, kompletterande, SGU-rapport (Dahlqvist m.fl., *i produktion*). Översiktligt kan man säga att uttagsmöjligheterna i grundvattenförekomsten generellt är goda till mycket goda och ligger inom uttagsintervallet 30–50 l/s och att kvaliteten på vattnet är god. I princip all nederbörd som faller på de grovkorniga sand- och grusavlagringarna kan bilda grundvatten och det kommer även vatten från höjdområdena längs dalen. I de västra delarna av Tjärviksdalen finns det koppling mellan tjärnarna och grundvattenmagasinet. De östra delarna kännetecknas av en stor omättad zon. I områden med lagerföljden sand-morän-sand (se avsnitt *3D-modell*) utgör detta underliggande sandlager det egentliga grundvattenmagasinet. I de delar av området där själva rullstensåsen finns utgör detta det huvudsakliga grundvattenmagasinet. Kontakten är troligen god mellan de olika laterala grundvattenmagasinen då rullstensåsen skurit ned genom tidigare isälvsavlagringar. Grundvattenmagasinet dräneras i nordost vid ett flertal källsprång och källhorisonter.

Öratjärns bottentopografi

Med hjälp av ekolod och GPS utförde vi en enklare inmätning av Öratjärns djup. I figur 38 har vi interpolerat värdena och gjort en batymetrisk karta över Öratjärn. Man ser tydligt en större och två mindre djuphål. Sjön är som djupast cirka 20 m (augusti 2024) och har branta stränder i stort sett runt hela sjön.



Figur 38. Batymetrisk karta över Öratjärn. Notera cirklarna som motsvarar enskilda mätpunkter, områden med flera mätpunkter visar säkrare värden än områden med få eller inga mätvärden.

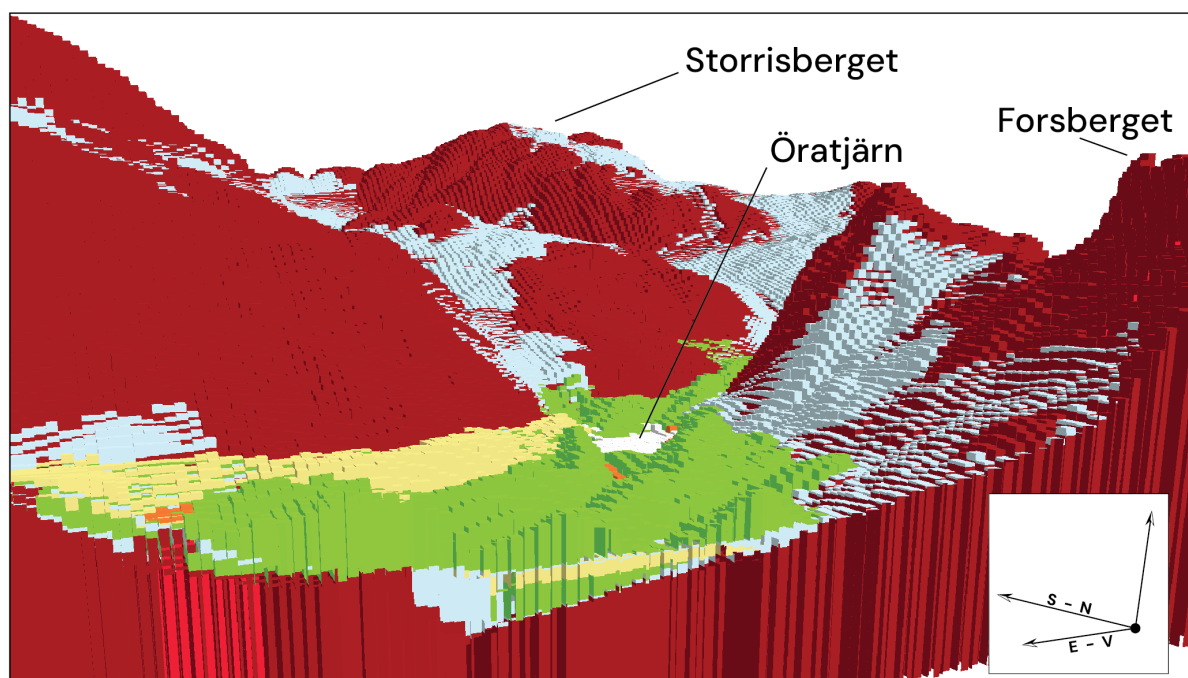
3D-modell

Antaganden

Genom att studera de lagerföljder som samlats in och tolkats så behöver en modell över jordartsgeologin i Tjärnviksdalen innehålla i vart fall två olika generationer av nedisningsförlöpp/isfria perioder, detta beror på att det i flera av lagerföljderna förekommer en morän i lagerföljden som överlagrar sorterade sediment. I och med att sådana lagerföljder förekommer i stora delar av området behöver det också inkluderas i arbetet med 3D-modelleringen. Jordartskartan förenklades genom att slå samman olika detaljerade enheter i jordartskartan till färre antal klasser (tabell 5).

Tabell 5. Klassning av jordartskartan för arbete med 3D-modell.

Klassning i 3D-modell	Jordart i jordartskartan
Torv	Torv
Postglaciala sediment	Postglaciala sediment, Fluvial sand och grus, Älvsediment
Glaciala sediment	Varvig silt, Glacial grovsilt-finsand och sand, Isälvsediment sand
Isälvsediment	Isälvsediment
Morän	Morän
Glaciala sediment, undre	Förekommer ej i dagen
Isälvsediment, undre	Förekommer ej i dagen
Morän, undre	Förekommer ej i dagen
Urberg	Urberg, Tunn morän på berg



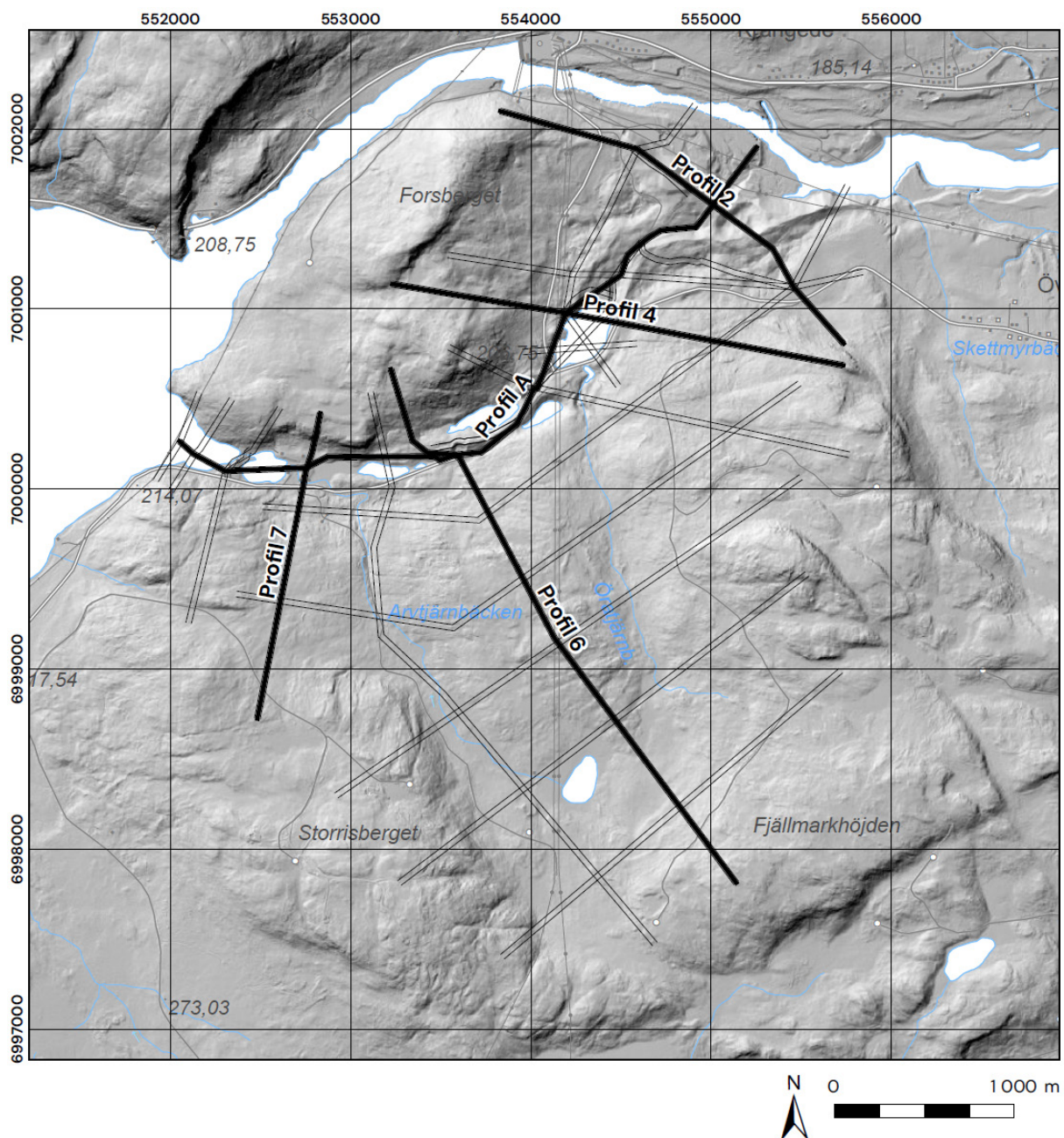
Figur 39. Jordarternas utbredning i Tjärnviksdalen i form av en voxelmodell.

Ett flertal antaganden, baserade på geologiska resonemang görs för att möjliggöra framtagandet av 3D-modellen. Nedan förklaras de fyra viktigaste:

- Ett antagande är att varje sekvens av sorterade sediment har en grövre kornstorlek med djupet, så kallad normal gradering. Detta syns till viss del i de insamlade lagerföljderna.
- Vidare antas att rullstensåsen förekommer under markytan i de centrala delarna av dalgången, i och med att den sträcker sig i dagen från Indalsälven i öster till Mörttjärn i väster, samt att den fortsätter dold ut i Gesunden (Svedberg & Olofsson 2014, Vestlund 2014).
- Det antas också, som nämnts tidigare, att de diamikton tolkade som morän och som förekommer i flera av lagerföljderna förekommer i stora delar av Tjärnviksdalen.
- Utöver detta antas att depositionen av rullstensåsen från den senaste deglaciationen under sin bildning har eroderat genom de sediment som legat i smältvattenflödets väg och direkt under åsryggen och den vilar därför direkt på berget.

Beskrivning av geologiska sektioner

3D-modelleringen genererar en så kallad voxelmodell (fig. 39), beskrivningen av geologin kommer dock i första hand göras genom att presentera ett par geologiska sektioner genom dalgången (fig. 40). Totalt har ett 20-tal geologiska profiler tolkats utifrån lagerföljdsinformation, geofysiska mätningar och geologiska antaganden.



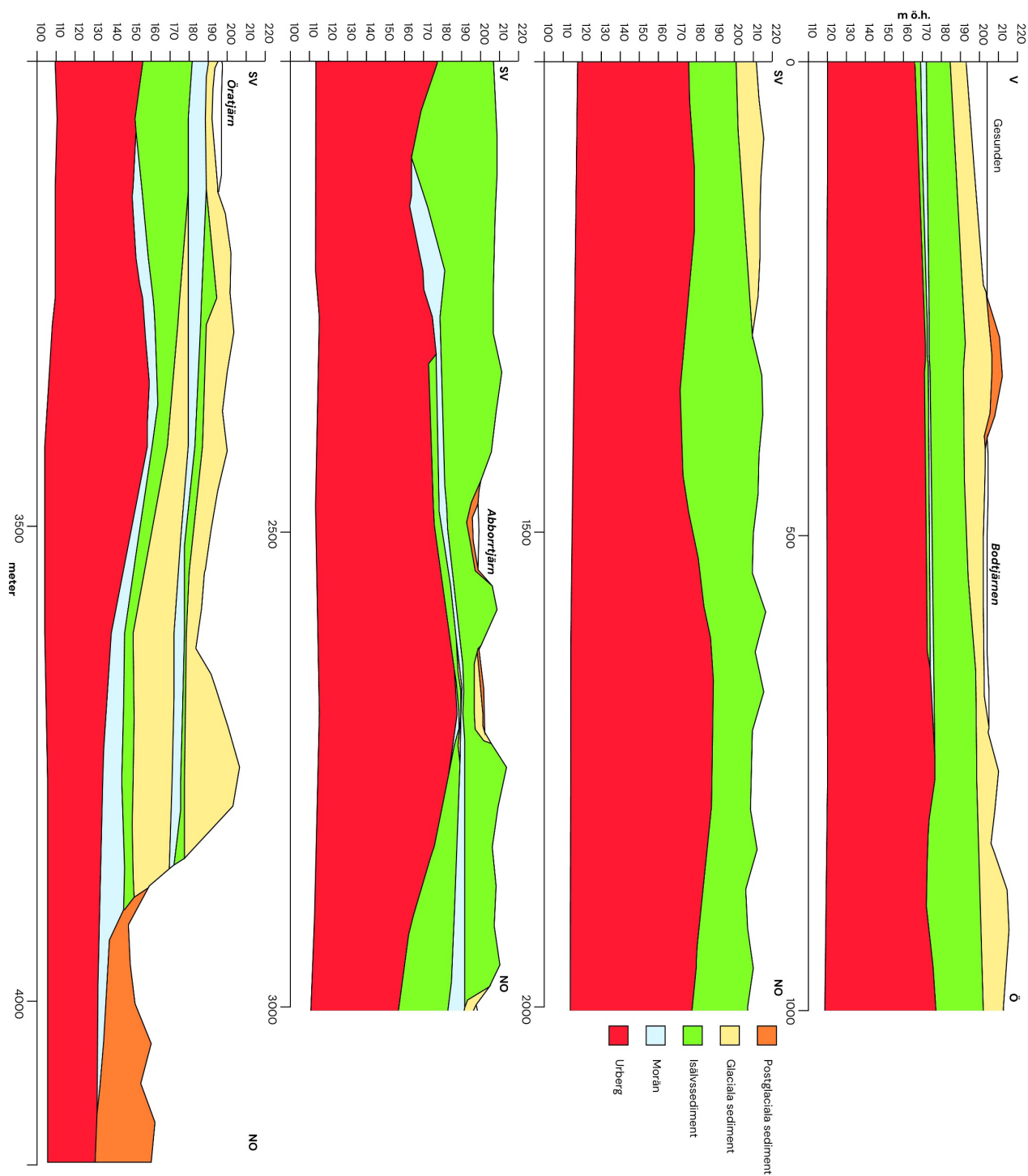
Figur 40. Läget för de geologiska sektioner som beskrivs i texten i svart samt med tunna dubbel dragna linjer de profiler som ritats vid framtagandet av 3D-modellen.

Längs dalgången, V–O

Sektion A (figur 41)

I lagerföljden GPF232008 finns allra överst ett fåtal meter med vad som är tolkat som postglaciala sediment, under den finner vi glaciala sediment som överlagrar mäktiga förekomster av sand och grus vilken antas tillhöra den åsrygg som löper genom Tjärnviksdalen. I Tjärnviken i Gesunden syns rullstensåsens krön i botten topografin vilket gör det rimligt att låta isälvs materialet sträcka sig hela vägen till studieområdets västra gräns. Under detta isälvs material finns en morän som överlagrar ytterligare sorterade sediment. Hur långt denna lagerföljd är giltig ut mot Gesunden är osäkert, men i den geologiska sektionen är den tolkad till studieområdets gräns. Denna lagerföljd sträcker sig öster ut ungefär till Tjärnbodarna. Här blir rullstensåsens krön mer tydligt och då antas de lagerföljder som i väster underlagrat isälvs materialet här vara helt borteroderat. Dock före-

kommer glaciala sediment i ytan tills att åsryggen blir markant. Sektionen följer sedan rullstensåsens krön fram tills den östra viken av Abbortjärn där lagerföljden GFP232003 visar morän på djupet. Vid lagerföljden GFP232006 återfinns den moränen under isälvs materialet igen. Denna morän överlagras också silt, sand och grus, samt en morän närmast berget. Så, på sträckan mellan dessa två lagerföljder behöver sektionen tillföras dessa jordarter. Öster om Öratjärn förekommer sannolikt betydande mängder grovkorniga isälvs material under den övre moränen, vilken överlagras av mestadels sand. I lågpunkterna i terrängen förekommer tunna lager tolkade som postglaciala sediment. Efter Öratjärn fortsätter profilen mot nordost och sedimentens totala mäktighet blir större. Speciellt ökar mäktigheten hos den undre enheten av isälvs sediment. Den övre delen blir finkornigare, ned mot finsand. Vid Gettryggen är mäktigheten som störst och här återfinns en komplett lagerföljd med mestadels finsand och silt. Branten ned mot Indalsälven utgörs av en erosionskant bildad vid ett tidigare flöde i samband med landhöjningen. Älven har också avlagrat de postglaciala sedimenten i och med dess erosion och deposition av sand och grus.



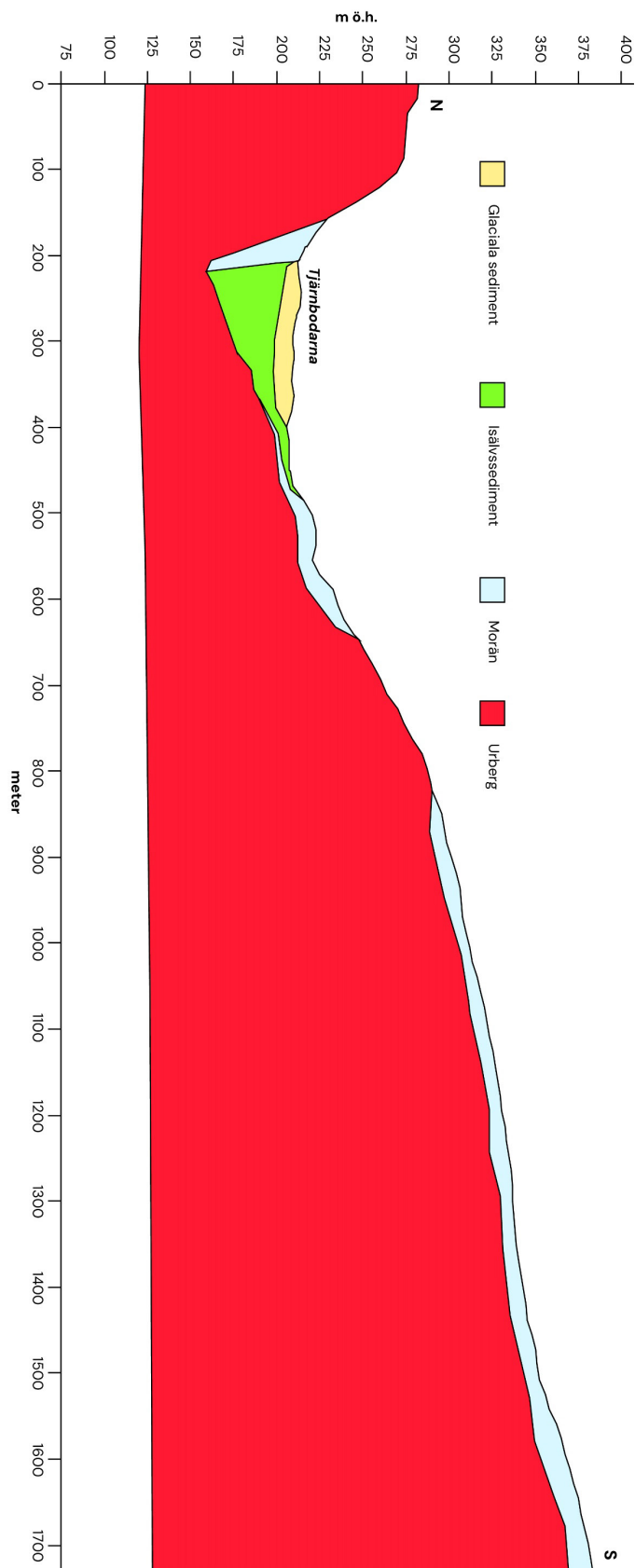
Figur 41. Geologisk sektion A längs dalgångens botten, från Gesunden till Indalsälven. Notera utbredningen av dubbla moräner i de östligaste delarna av profilen.

Tvärs dalgången, V–O; N–S

I detta avsnitt beskrivs kortfattat fyra tvärprofiler, representativa i olika delar av dalgången. Profilerna beskrivs från norr till syd och med början i väst.

Sektion 7 (figur 42)

Dalgången i de västra delarna av Tjärnviksdalen är den smalaste delen, med en bredd på knappt 500 m. I de nordligaste delarna av profilen förekommer endast berg i dagen och det är först nere i dalgången som betydande mängder sediment förekommer. Baserat på geofysiken som tidigare samlats in (Daniel 2004, 2005) blir jorrdjupet snabbt stort. Till en början endast morän, men 50–100 m från den branta bergssidan på Tjärnbodberget består i princip hela dalgången av isälvssediment, sannolikt mestadels sand. Ovan isälvssedimentet vilar ett par meter finkornigare sediment. Isälvssedimentet är sannolikt avsatt i samband med bildandet av rullstensåsen som löper genom dalgången. Den södra sidan av dalgången är betydligt flackare än den nordligare, med en jämn lutning upp mot Storrisberget. Precis innan morän och berg blir ytligt igen förekommer isälvssand och grus i dagen, samma enhet som underlagrar de finkornigare sedimenten centralt i dalgången. Höjdområdena på den södra delen, upp mot Storrisberget, präglas av morän och ställvis berg i dagen.

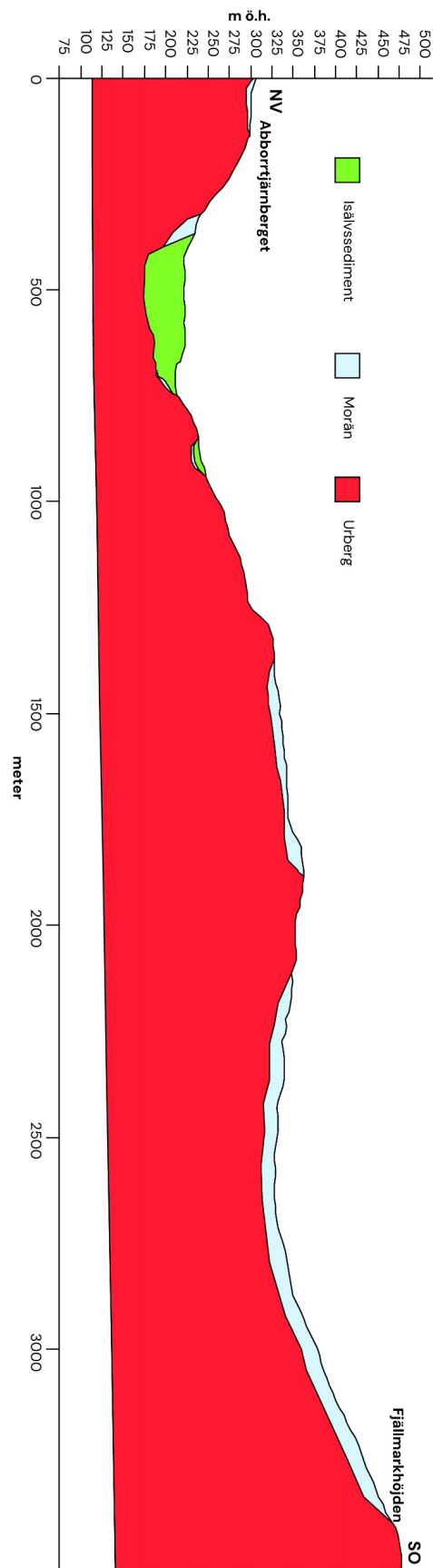


Figur 42. Geologisk sektion 7 tvärs över dalgången, från norr till syd.

Sektion 6 (figur 43)

Sektion 6 ligger drygt 600 m österut från profil 7. I nordväst, på Tjärnbodberget ligger tunna lager morän på berget. När branten ned mot dalgången avtar täcks berget med morän, innan hela dalgången fylls med isälvssediment, troligen mestadels sand och en del grus, speciellt i de centrala delarna. Isälvssedimentet är sannolikt avsatt i samband med bildandet av rullstensåsen som löper genom dalgången.

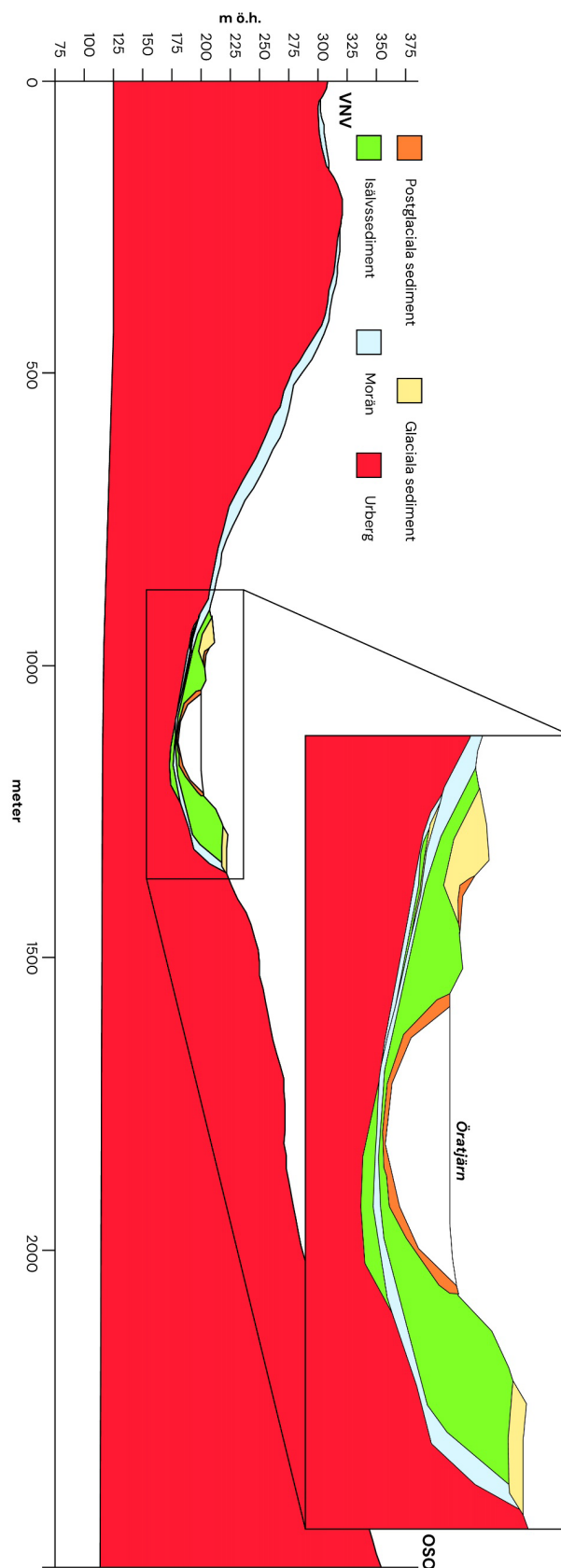
Strax ovanför dalbotten, mot sydost förekommer tunna lager av isälvssediment med underliggande morän. Längre mot sydost, upp mot Nylöten och vidare mot Fjällmarkhöjden, består profilen mestadels av berg i dagen, och i lågpunkterna morän.



Figur 43. Geologisk sektion 6 tvärs dalgången, från nordväst till sydost.

Sektion 4 (figur 44)

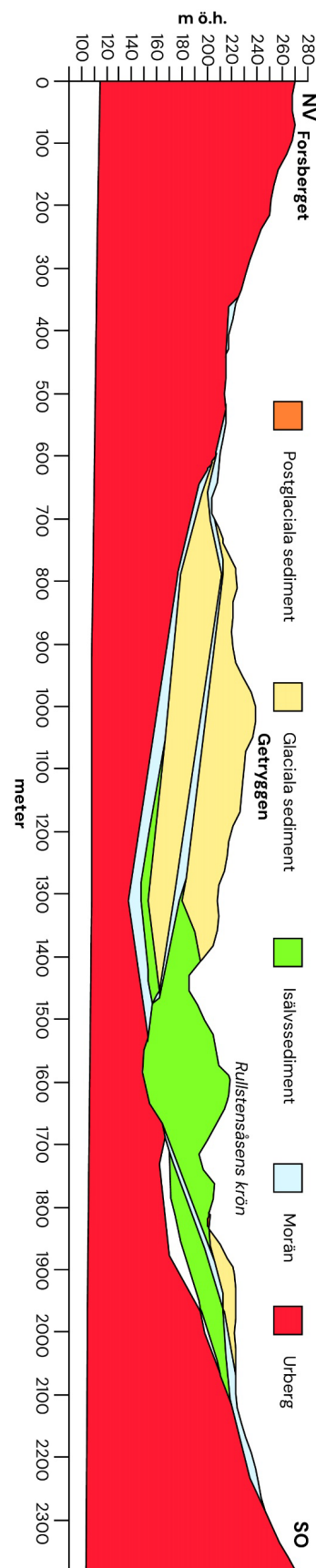
Sektion 4 ligger 700 m nordost om profil 6 och sträcker sig genom Öratjärn, från västnordväst och Forsberget mot ostsydost. Den västnordvästliga delen av profilen består av ett tunt lager morän och endast i de högsta delarna förekommer berg i dagen. Sluttningen ned mot Öratjärn består av en flack moränsluttning och övergår snabbt i en mer komplex lagerföljd. Vid lagerföljden GFP232006 finns i botten en äldre morän överlagrad av grus, sand och silt och sedan en ytterligare morän. Ovanliggande denna morän isälvssediment och sedan finkornigare glaciala och postglaciala avlagringar. I och med liknande lagerföljder i Öratjärns östra del GFP242001 är det sannolikt att denna lagerföljd förekommer under hela sjön. I och med att vattennivån i Öratjärn relativt grundvattennivån förändras långsammare är det troligt att botten i tjärnen inte är lika genomsläpplig som de övriga sjöarna i dalgången. Detta tolkas som att ett lager postglaciala finkorniga sediment täcker hela Öratjärns botten. Ostsydost om Öratjärn höjer sig sedan en terrass som till största del består av isälvssediment, sannolikt mestadels grus. Överlagrande detta tunna lager av glaciala sediment, silt och finsand. Profilen sträcker sig sedan ytterligare drygt 1 km, med endast berg i dagen, vilket inte visas i figur 44.



Figur 44. Geologisk sektion 4 tvärs dalgången från västnordväst till ostsydost. Notera dubbla moränlager samt moräntäckt sediment väster och under Öratjärn.

Sektion 2 (figur 45)

Sektion 2 sträcker sig parallellt med Indalsälven, drygt 900 m nordost om Öratjärn och profil 4. Profilen löper från Forsberget mot terrassen och utlöparen från Högekullen i sydost. Längs, eller i närheten av, denna profil förekommer flera lagerföljder med liknande uppbyggnad: GFP232055, GFP232057 och GFP232055. Dessa uppvisar alla en undre och en övre morän, separerade av sorterade sediment. Förutom längs rullstensåsens krön, där tolkning är att smältvattnet som har bildat rullstensåsen eroderat och transporterat bort alla underliggande sediment, antas därför lagerföljden innehålla dubbla moräner med mellanliggande sorterade sediment. På Forsbergets sluttning i de nordvästra delarna av profilen förekommer i princip endast berg i dagen. Längre ned i sluttningen blir dock tunna och osammanhängande lager av morän vanligare. Vid dalbotten reser sig mäktiga finkorniga sediment genomskurna av morän och isälvssediment, ställvis sannolikt mäktigare än totalt 60 m i närheten av Getryggen. Längre mot sydost övergår profilen till att i princip endast bestå av isälvsgrus. Där rullstensåsen är som mäktigast är det inte omöjligt att den närmar sig 70 m. I sydost återkommer sedan lagerföljden med sorterade sediment genomskurna av morän. I denna del består profilen dock av sand och grus under moränen som i sin tur överlagras av finkornigare sediment.

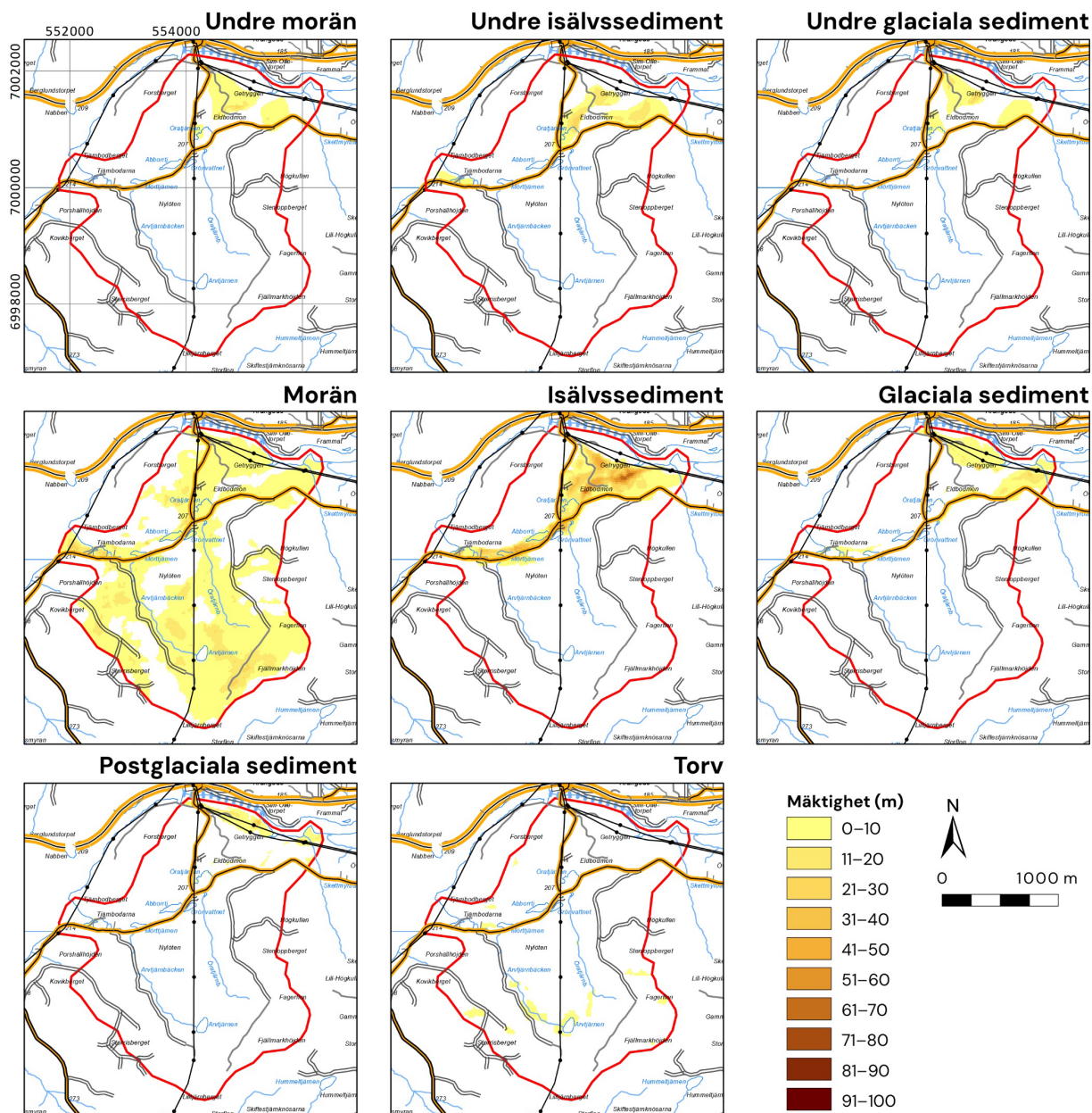


Figur 45. Geologisk sektion 2 tvärs dalgången från nordväst till sydost.

Beskrivning av 3D-modellen

De geologiska profiler som tolkats genom Tjärnviksdalens jordarter gör det möjligt att med hjälp av mjukvaran Groundhog 2.8.4 att i 3D interpolera voxlar (3D-pixlar) för jordarterna (fig. 39).

Ett ytterligare sätt att visualisera 3D-modellen är att skapa kartor som visar varje jordarts mäktighet (fig. 46). Genom att studera dessa blir det tydligt att vissa jordarter utgör merparten av sedimenten i dalgången. De understa sedimenten, de som ligger under moränen från den senaste nedisningen utgör en begränsad del areellt och förekommer till övervägande del i Tjärnviksdalens östra delar (se de tre första kartorna: undre morän, undre isälvssediment och undre glaciala sediment i figur 46). Mäktigheterna på dessa sediment är ofta begränsade men ställvis mäter de tillsammans upp emot 20 m. Moränen från den senaste nedisningen är den jordart som till ytan täcker störst del. En morän är sällan mäktigare än 10 m vilket också är tydligt utifrån resultatet vid 3D-modelleringen (se morän i figur 46). Isälvssedimenten är den jordart med störst mäktighet, ställvis över 50 m (se isälvssediment i figur 46). Dessa stora jorddjup förekommer längs rullstensåsens krön, i synnerhet i delarna närmast Indalsälven i öster. Ovanliggande glaciala sediment återfinns till största del i de östra delarna samt i mindre omfattning närmre Gesunden och sällan är de mäktigare än 20 m (se glaciala sediment i figur 46). De postglaciala sedimenten utgör endast tunna lager, max 10 m, och ligger framför allt i lågpunkter i landskapet, samt längs Indalsälvens lopp då sediment avsatta av älven inkluderats i denna jordartskategori (se postglaciala sediment i figur 46). Torv förekommer i tunna lager, mestadels i svackor i moränområdena (se torv i figur 46).



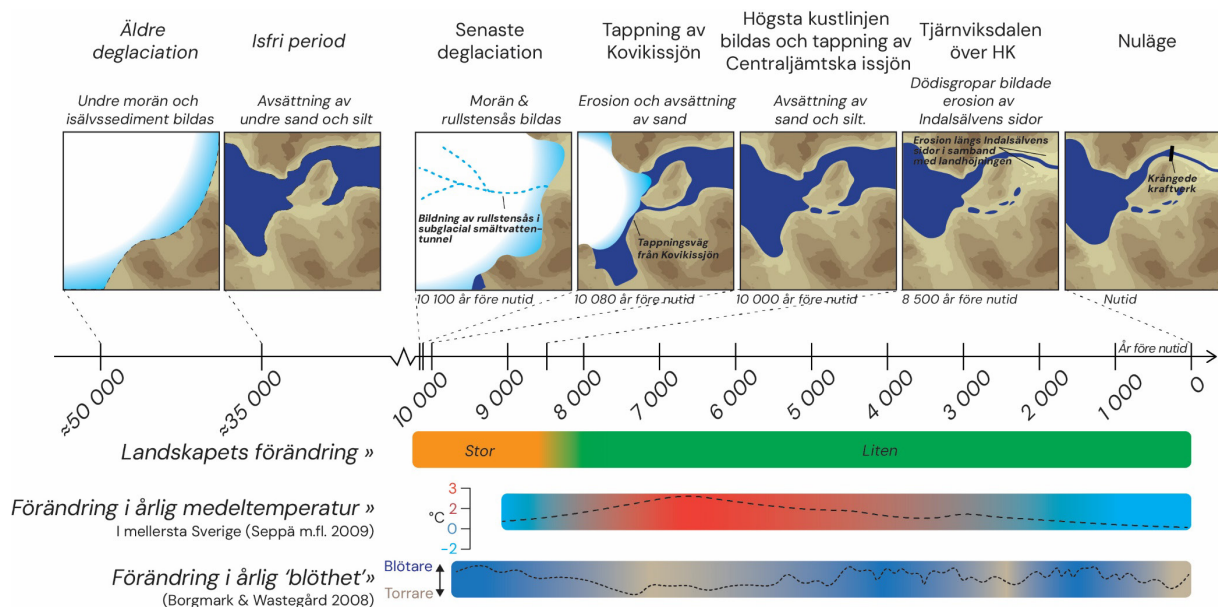
Figur 46. Jordarternas mäktigheter baserat på resultat från 3D-modelleringen. Kartserien börjar med den äldsta jordarten längst upp till vänster och avslutas med den yngsta jordarten torv längst ner.

Diskussion

Den geologiska utvecklingen

Olika delar av den geologiska utvecklingen har beskrivits tidigare i rapporten men som en del i resonemanget om förutsättningar för ett genombrott av Gesunden följer en kortfattad sammanfattning.

De äldsta sedimenten i Tjärnviksdalen kan, baserat på regionalgeologisk kunskap (Alexanderson m.fl. 2010, Blomdin m.fl. 2021, Kleman m.fl. 2021, Kulling 1945, Peterson Becher m.fl. 2024, Wohlfarth m.fl. 2011) och de lokala jordlagerföljderna, antas vara bildade för 50 000–70 000 år sedan. När den näst senaste nedisningen täckte området, avsatte den alltså morän. Senare, för ungefär 50 000 år sedan, avsattes sorterade sediment framför inlandsisens kant (fig. 47). När isen dragit sig tillbaka mot fjällkedjan avsattes finkornigare sediment (fig. 47). Dessa tre enheter utgör de underst liggande jordlagren i Tjärnviksdalen.



Figur 47. Den geologiska utvecklingen i Tjärnviksdalen.

Den senaste nedisningen avancerar över området för ungefär 35 000 år sedan (Kleman m.fl. 2021) och täcker sedan området fram till dess tillbakadragande, den senaste deglaciationen, för ungefär 10 100 år sedan (Regnéll m.fl. 2023). Under denna period avsattes den morän som syns i ytan på dalsidorna, och på många ställen förekommer över de äldre sedimenten i Tjärnviksdalen. Sedimenten som ligger under denna morän är därför sannolikt överkonsoliderad, alltså kompakterad av den tunga överliggande inlandsisen. Under själva deglaciationen bildades också den mäktiga rullstensås som löper genom dalgången och utgör en betydande del av sedimenten i dalgången (fig. 47).

När inlandsisen drar sig tillbaka och iskanten löper längs den västra sidan av Forsberget, Tjärnbodberget och Porshällhöjden däms en issjö vid Koviken, den så kallade Kovikissjön (Lundqvist 1959). Även om inga tydliga spår syns i landskapet är det sannolikt att issjön dränerades genom Tjärnviksdalen och ut i Ancylussjön. Den kan eventuellt vara så att spåren av en tappning har förstörts när de stora dödisgröparna bildats av i sedimenten smältande isblock.

Medan området täcktes av Ancylussjöns vatten avsattes sediment som bildade det delta som utgör den så kallade Gettryggen i områdets nordöstra del. Inlandsisen fortsatte att dra sig tillbaka och för ungefär 10 000 år sedan tappades den Centraljämtska issjön genom nuvarande Indalsälvens dalgång, en händelse som präglar stora delar av Indalsälvens dalgång väster ut (Regnéll m.fl. 2023).

Den geologiska utvecklingen från deglaciation fram till 8 500 år sedan präglas sedan av landhöjningen och de processer kopplade till det. Vid Tjärnviksdalen är det i första hand erosionen av Indalsälven som påverkar landskapet mest, alltmedan landet höjs sänks älven basnivå vilket leder till att den eroderar sig längre och längre ned (fig. 47). För ungefär 8 500 år sedan hade landet stigit så pass att hela studieområdet låg över den blivande Östersjöns yta.

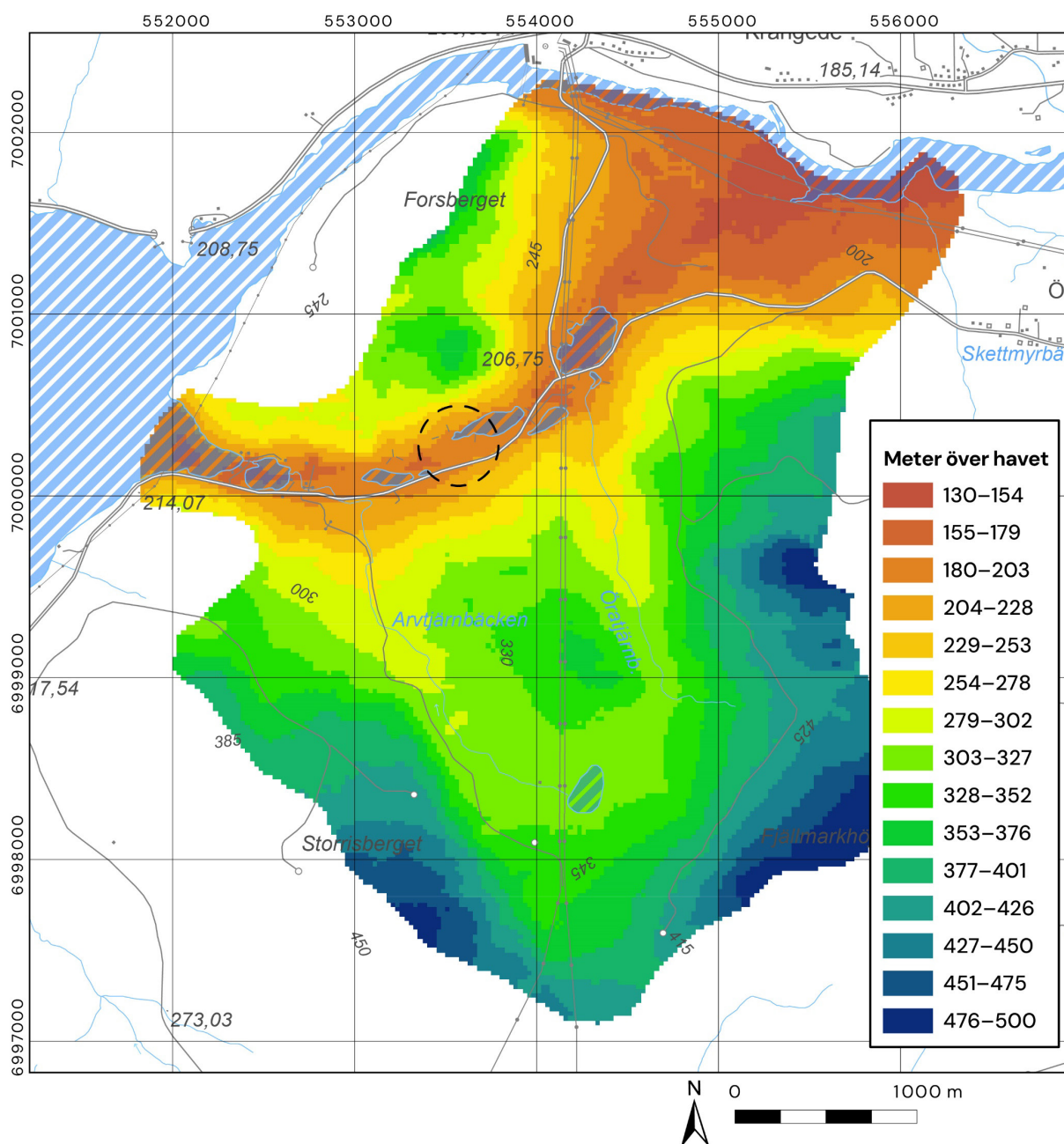
De senaste 8 500 åren har inte Tjärnviksdalen förändrats nämnvärt ur ett geologiskt perspektiv. Under denna tid förändrades dock klimatet, både gällande nederbörd och temperatur. Mellan 7 000 och 8 000 år sedan var klimatet relativt torrt och varmt. Efter detta kommer en period med lägre temperaturer och ökad nederbörd (Borgmark & Wastegård 2008, Seppä m.fl. 2009).

Det kan antas att det sedan 8 500 år sedan fram till nu har förekommit både torrare, blötare och varmare klimat i området än vad vi har idag (fig. 47) och eventuellt också de närmaste åren. Studierna av de senaste 8 500 åren kan på sätt och vis tolkas som ett experiment att Tjärnviksdalen klarar ett 10 000-årsflöde, eller i vart fall ett 8 500-årsflöde. Därtill har Tjärnviksdalen stått emot tappningen av Kovikissjön och den betydligt större Centraljämtska issjön.

Förekomst av bergtröskel

Tidigare studier har fokuserat på att bekräfta eller avvisa förekomsten av en bergtröskel tvärs Tjärnviksdalen. En sådan bergtröskel hade gjort det enkelt att avskriva möjligheten till ett genombrott från Gesunden samt förklarat den kraftiga hydrauliska gradienten. Vare sig de geofysiska mätningar som utfördes i Tjärnviksdalen eller de som utförts i Tjärnviken visar några indicier på bergtröskel (Daniel 2004, 2005, Vestlund 2014).

Ett syfte med denna studie har varit att ytterligare undersöka denna fråga genom att komplettera tidigare undersökningar. Resultatet är att det inte heller i denna studie finns några tecken på en bergtröskel i de observationer som har utförts. De observerade jorrdjupen vid borrhning och ny geofysik ligger väl i linje med tidigare resultat (Daniel 2004, 2005). Vid analys av resultaten, till exempel i samband med framtagandet av 3D-modellen, är det tydligt att om en tolkning av lagerföljderna i 3D ska vara geologiskt rimlig är det inte möjligt att inkludera en bergtröskel som skulle vara i nivå med Gesunden, på cirka 200 m ö.h. Genom att studera den bergöveryta som interpolerats i samband med 3D-modelleringen går det dock att uppskatta troligt läge och höjdnivå. Den plats längs dalgången där berget enligt interpoleringen är som högst ligger mellan Mörttjärnen och Abbortjärnen (fig. 48). En uppskattad nivå på en passpunkt här hamnar någonstans kring 185 ± 5 m ö.h., alltså minst 10 m under Gesundens nivå. Detta kan jämföras med tröskeln vid Krångede kraftverk på 197 m ö.h. (*pers. kom. Gustav Enmark, Fortum*). Således kan man anta att Tjärnviksdalens bergtröskel är lägre än Gesundens nivå samt tröskeln vid Krångede kraftverk.



Figur 48. Bergytans läge i meter över havet. Inom streckad markering finns sannolikt högsta bergströskel i dalgången, uppskattat till 185 ± 5 m ö.h.

Hydrauliska gradienten genom Tjärnviksdalen

Resultaten från mätningar av grundvattennivå och interpolering av grundvattenytans nivå i Tjärnviksdalen indikerar en hydraulisk gradient på ungefär 4 % öster om Öratjärn och väster därom endast kring 6 %. Som nämnt tidigare är det dock viktigt att notera att den interpolerade grundvattenytan har en standardavvikelse på upp emot 8 m, vilket gör det viktigt att resonera kring troliga gradientintervall. Genom att räkna gradienten mellan ett par olika faktiskt inmätta nivåer diskuteras eventuell felmarginal nedan.

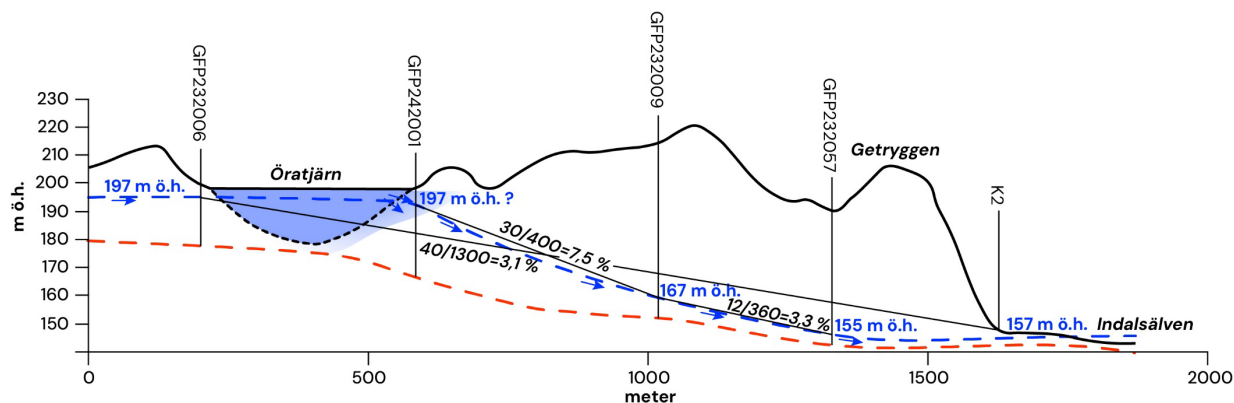
Gradienten med den starkaste lutningen är GFP242001–GFP232009, en sträcka på 400 m och en höjdskillnad på 30 m, vilket resulterar i en lutning på 7,5 %. Det finns dock en del frågetecken kring i första hand den uppskattade grundvattennivån i GFP242001, vid Öratjärns östra strand (fig. 49).

Grundvattennivån är inte uppmätt genom installation av grundvattenrör utan endast genom att notera när borrstängerna och/eller sedimenten som tas upp blir fuktiga, vilket av förklarliga skäl endast ger en indikation om nivån. Borrningen av GFP242001 gjordes endast ett tiotal meter från Öratjärns strand vilket sannolikt leder till diffus infiltration från sjön och ned mot grundvattenytan, vilken enligt resonemang ovan (avsnitt *Hydrogeologiska förhållanden*) sannolikt inte utgör grundvattenytan utan den är snarare kopplad till ytavrinning. Det finns dock en infiltration från sjön och ut i omgivande sediment, vilket gör att sedimenten är fuktiga trots att det inte är den faktiska grundvattenytan (fig. 49). Detta skulle medföra en tolkning av grundvattenytan på en allt för hög nivå, vilken har stor inverkan på den beräknade hydrauliska gradienten. Den hydrauliska gradienten på 7,5 % anses således inte tillförlitlig och ska ses som ett maxvärde.

För att minimera feltolkning av grundvattenytan kan i stället gradienten mellan GFP232009 och GFP232057 beräknas (fig. 49). Båda dessa mätpunkter är säkra och de ligger längs den antagna lutningsriktningen på grundvattenytan. Avstånden mellan de två är 360 m och med en höjdskillnad i grundvattennivån på 12 m vilket ger en hydraulisk gradient på 3,3 %. Alltså betydligt lägre än gradienten mellan GFP242001 och GFP232009 på 7,5 %.

Genom att mäta gradienten mellan GFP232006 och K2, alltså från grundvattenröret på Öratjärns norra strand (vilket sannolikt inte ger samma möjlighet till feltolkning som GFP242001) och källutflödena ned mot Indalsälven, fås en mer övergripande bild av lutningen. Avståndet mellan GFP232006 och K2 är 1 300 m och höjdskillnaden i grundvattennivå 47 m, vilket resulterar i en lutning på 3,6 %.

Baserat på ovanstående beräknade gradienter är det klart att det finns en betydande osäkerhet, trots omfattande undersökningar. En rimlig bedömning baserat på tillgängliga data är att den hydrauliska gradienten kan antas vara kring 4 %, i ett spann på 3–7 %. Möjligen kan en framtida analys av de kontinuerliga mätningar som sker i grundvattenrören ge tydligare svar på grundvattenytans gradient.



Figur 49. Schematisk bild med olika möjliga hydrauliska gradienter beräknade. Avstånden mellan borrhöjningarna är ej skalenliga. Streckad röd linje visar bergöverytans läge.

Komplexa lagerföljder

Tidigare studier har ofta antagit en förhållandevis homogen jordartsfördelning i Tjärnviksdalen, både i ytan och på djupet (Daniel 2004, 2005, Nilsson & Wallström 2015, Svedberg & Olofsson 2014). Detta är inte konstigt då ytan i landskapet ger en sådan bild. Regionalt i området östra Jämtland finns en händelserik geologisk historia som har lett till flertalet kända lokaler med komplexa lagerföljder (Högbom 1899, Lundqvist 1967, Lundqvist & Pleijel 1976, Peterson Becher m.fl. 2024, Wohlfarth m.fl. 2011). Med denna förståelse för den regionala geologin i området är det därför inte anmärkningsvärt att borrhöjningarna visar en stor heterogenitet, med till exempel

moräntäckta sediment. Genom den 3D-modellering som utförts i detta projekt har förståelse för dessa lagerföljder kunnat beskrivas i mer detalj (3D-modell).

De komplexa lagerföljderna förekommer sällan centralt i dalgången, och inte där rullstensåsen är som mäktigast i den östra delen. Däremot finns stora jorrdjup med komplicerade lagerföljder i sedimentterrasserna vid Getryggen i nordväst och längs vägen mot Över-Böle (fig. 45). Detta beror på att när rullstensåsen bildades vid den senaste deglaciationen eroderades allt material under den bort av det kraftfulla vattenflödet innan isälvsgrus och sand avsattes. Således utgör lagerföljden längs rullstensåsens krön endast sand och grus, sannolikt i det grövre spannet, vilket är ett viktigt resultat för att kunna utvärdera vilken hydraulisk gradient som är kritisk för initiering av intern erosion.

I de från rullstensåsens laterala delar förekommer däremot som sagt ofta en lagerföljd med silt-sand överlagrande en morän och under detta silt och grus över ytterligare en morän närmast berget (fig. 46). De sorterade sediment som vilar överst i dessa lagerföljder är förhållandevis lätt eroderbara, speciellt de delar som består av silt, såsom området vid Getryggen (fig. 45, GFP232005, GFP232055). Men i dessa fall är sedimenten torra vilket gör att förutsättningarna för till exempel skred minskar och är av uppenbara skäl inte heller ett problem när det gäller hydraulisk gradient. Sedimenten som överlagras av morän har alltså efter avsättning i en tidigare isfri period täckts av inlandsis och har då blivit kompakterat av inlandsisens vikt, de har blivit så kallat överkonsoliderade, vilket ökar deras skjuvhållfasthet. Vidare är det rimligt att anta att den morän som ställvis förekommer mitt i lagerföljderna kan agera som en 'armering' av sedimentavlagringarna.

Geologiska förutsättningar för genombrott

Det finns i vart fall tre olika skeenden som teoretiskt skulle kunna leda till ett genombrott och en tappning av Gesundens vatten genom Tjärnviksdalen: intern erosion, bakåtgripande erosion och överströmning; vilket också har påtalats tidigare (Nilsson & Wallström 2015).

Intern erosion

Med intern erosion menas den process där jordpartiklar inom en damm eller sedimentvall, som Tjärnviksdalen utgör, eroderas av vattenflöde genom sedimenten. Intern erosion kan därför påverka förutsättningarna för sedimentvallen att hålla emot vattenmassorna, vilket potentiellt kan leda till instabilitet eller kollaps (Foster m.fl. 2000).

Den hydrauliska gradienten representerar förändringen i vattentryck och har stor påverkan på förutsättningarna för intern erosion. En hög (brant) hydraulisk gradient ökar hastigheten och kraften hos vattenflödet, vilket därmed främjar erosion och sedimenttransport (Wan & Fell 2004). Å andra sidan leder en låg hydraulisk gradient till långsammare vattenrörelse och minskar sannolikheten för erosion och sedimenttransport. Den kritiska hydrauliska gradienten är den gräns i lutning på den hydrauliska gradienten när sedimentet eroderas och det är därför viktigt att förstå den, samt sedimentens egenskaper, för att kunna bedöma förutsättningarna för intern erosion (Terzaghi 1943).

Som nämnts ovan uppvisar sedimenten i Tjärnviksdalen en stor variation, i synnerhet på djupet. De centrala östra delarna, mot Indalsälven, består till övervägande del sannolikt av grus och sand i form av rullstensåsen som löper genom dalgången. Lateralt till rullstensåsen är lagerföljderna betydligt mer komplicerade med en variation från silt till grus och morän. Detta betyder att den kritiska hydrauliska gradienten kommer att vara olika beroende på område.

Denna studie inkluderar inte några numeriska modelleringar eller geotekniska beräkningar för att förstå förutsättningar för genombrott kopplat till intern erosion. Däremot är det möjligt att göra

en bedömning kopplat till information om hydrauliska gradienter i geologiska analogier samt experiment. Information om kritiska gradienter från litteraturen finns samlat i tabell 6.

I samband med en utredning av förutsättningar för genombrott i gruvdammar har platser med genombrott under geologisk och historisk tid studerats, inklusive händelsen vid nuvarande Döda fallet (Agrell 2002).

De kritiska hydrauliska gradienter som har samlats in av Harald Agrell (2002) uppvisar generellt lutningar i procent som är jämförbara med det som har diskuterats för Tjärnviksdalen ovan. Det är ett par saker som gör att dessa data behöver diskuteras innan de kan användas som jämförelse. Förutom gradienten som anges vid Döda fallet (Ragundasjön i tabell 6), 4 %, har de andra genombrotten skett under geologisk tid. Utan att i detalj beskriva varje enskild del av dessa fall så är det rimligt att anta att dess genombrott skedde strax efter att landet restes över havet i samband med landhöjningen. I dessa fall var sedimenten vattenmättade, sannolikt med mindre vegetation och det mothållande stödet från vattnet blev obefintligt i samband med landhöjningen. En sådan situation är mycket annorlunda från den situation som finns i Tjärnviksdalen nu. Tjärnviksdalen har sannolikt varit stabil sedan havsnivån låg under Indalsälvens nuvarande nivå nedan Krångede kraftverk, cirka 150 m över havet. Baserat på den så kallade strandförskjutningen i området hade Tjärnviksdalen helt rest sig över Ancylussjöns nivå för drygt 8 000 år sedan (Peterson Becher m.fl. 2024). Således bör de analogier beskrivna av Harald Agrell ses som minimivärden, förutom situationen vid Döda fallet. Vid döda fallet är det dock viktigt att förstå att lagerföljderna skiljer sig markant från de i Tjärnviksdalen. Den dämning som bröts igenom när Ragundasjön tömdes bestod till största del av silt och en del sand (Peterson Becher m.fl. 2024); en lagerföljd med större förutsättning för skred och erosion. Vidare är det också så att Ragundasjöns tappning var en överströmning i samband med Magnus "Vild-Hussen" Huss omledning av vatten och kan därför inte direkt användas som jämförelse i samband med diskussion om kritisk hydraulisk gradient.

Studier som görs på gruvdammar är direkt applicerbara på situationen i Tjärnviksdalen. Studier har utförts vid dammar av morän vid Kiilavaara där en kritisk hydraulisk gradient om 6,7 % påvisats (Jantzer & Knutsson 2010) vilket kan jämföras med uppskattade spannet på den hydrauliska gradienten i Tjärnviksdalen på 3–7 %.

Vid experiment, där modeller av sedimentdammar byggs upp, fås generellt betydligt högre kritiska hydrauliska gradienter (tabell 6), ibland över 20 %. Intressant att notera är att variationen är stor mellan olika kornstorlekar, där grus generellt har högre värden och finkorniga sediment, såsom finsand och silt, lägre. Värdena för finsand och silt är betydligt närmre de värden som påvisats i olika analogier (Agrell 2002, Jantzer & Knutsson 2010) och av den anledningen inte fullt så anmärkningsvärt. De centrala delarna av Tjärnviksdalen, i synnerhet i den östligaste delen, är uppbyggt av grus och sand.

Tabell 6. Kritiska vinklar för hydraulisk gradient kopplat till intern erosion.

Plats	Typ	Material	Kritisk hydraulisk gradient	Referens
Ragundasjön	Naturlig analogi	Lera, silt och sand	4,0 %	(Agrell 2002)
Hennan	Naturlig analogi	Moräntäckt isälvs sediment	2,0 %	(Agrell 2002)
Mången	Naturlig analogi	Isälvs sediment	1,2 %	(Agrell 2002)
Styggjärn	Naturlig analogi	Morän	2,1 %	(Agrell 2002)
Skuttungesjön	Naturlig analogi	Isälvs sediment	5,0 %	(Agrell 2002)
Kiilavaara	Antropogen analogi	Morän	6,7 %	(Jantzer & Knutsson 2010)
Experiment	Experiment	Siltig sand – sandig silt	26±7 %	(Dirkx m.fl. 2020)
Experiment	Experiment	Sand – grus	4,2–14,7 %	(Okeke & Wang 2016)
Experiment	Experiment	Grus	25 %	Chugaev (1962)*
Experiment	Experiment	Grovsand	25 %	Chugaev (1962)*
Experiment	Experiment	Mellansand	11–15 %	Chugaev (1962)*
Experiment	Experiment	Finsand	10–12 %	Chugaev (1962)*
Experiment	Experiment	Grus	11 %	Bligh (1910)*
Experiment	Experiment	Grovsand	8,3 %	Bligh (1910)*
Experiment	Experiment	Finsand	6,7 %	Bligh (1910)*
Experiment	Experiment	Grus	9,5 %	Lane (1935)*
Experiment	Experiment	Grovsand	6,7 %	Lane (1935)*
Experiment	Experiment	Mellansand	5,6 %	Lane (1935)*
Experiment	Experiment	Finsand	4,8 %	Lane (1935)*
Experiment	Experiment	Grovsand	12–17 %	Müller-Kirchenbauer m.fl. (1993)*
Experiment	Experiment	Mellansand	8–10 %	Müller-Kirchenbauer m.fl. (1993)*
Experiment	Experiment	Finsand	6–8 %	Müller-Kirchenbauer m.fl. (1993)*
Experiment	Experiment	Grus	28–34 %	Weijers & Sellmeijer (1993)*
Experiment	Experiment	Grovsand	18–28 %	Weijers & Sellmeijer (1993)*
Experiment	Experiment	Mellansand	16–24 %	Weijers & Sellmeijer (1993)*
Experiment	Experiment	Finsand	9–14 %	Weijers & Sellmeijer (1993)*

*(Perzmaier 2007)

Det är också i denna del som den hydrauliska gradienten är som högst (fig. 36). En sannolik bedömning är således att de centrala, grusiga och sandiga, delarna av Tjärnviksdalen troligen klarar en gradient som är betydligt högre än den uppmätta. Även om värden över 20 % påvisats i experiment (Dirkx m.fl. 2020, Perzmaier 2007) är det rimligare att anta en lägre kritisk hydraulisk gradient för Tjärnviksdalen om 10 %, som en säkerhetsmarginal i och med uppenbara skillnader mellan experiment och faktiska naturliga förhållanden. En ytterligare sak som är värd att notera är att i experiment har det påvisats att dammens bredd, alltså avståndet från den dämde sjön och nedströms till dammens slut, är av stor vikt för stabiliteten (Okeke & Wang 2016). Även om förhållanden mellan konstruerade dammar och naturliga förhållanden skiljer sig är det rimligt att anta att Tjärnviksdalen betydande 'bredd' i förhållande till en konstruerad damm sannolikt påverkar förutsättningarna.

Vidare bör det noteras att eventuella förändringar i grundvattenytans läge kommer att påverka lutningen, men endast i begränsad omfattning. Om till exempel grundvattnet skulle höjas med en meter i de västra delarna skulle gradienten öka med ungefär en tiondels procentenhet.

Bakåtgripande erosion

Bakåtgående erosion är en process där sediment eroderas, särskilt i finkorniga sediment, genom vattenflöde som sker under tryck. Erosionen initieras när vatten pressas genom sedimenten. Vid ett tillräckligt högt flöde börjar sedimentet eroderas och transporteras (Bernatek-Jakiel & Poesen 2018).

Den bakåtgående erosionen är en process som påverkar förutsättningar för att initiera ett skred. När erosionen fortlöper kan det leda till minskat stöd i den nedre delen av sluttningen vilket kan leda till att destabilisera sluttningen och, i kombination med högt portryck i sedimenten, skulle kunna utlösa skred.

Ett eventuellt bakåtgripande erosionsförlopp skulle sannolikt initieras nere vid grundvattenutströmningen där sluttningen har sin fot ned mot Indalsälven. Det har noterats eventuella tecken på erosion tidigare (Nilsson & Wallström 2015) men det är inget som vi under detta arbete har kunna bekräfta. Det finns i vart fall två saker som talar emot ett sådant förlopp. Först och främst, lagerföljderna närmast Indalsälven visar tydligt på att de är torra. I de grundvattenrör som sitter något längre västerut förekommer grundvatten i botten, men endast cirka 10 m över berget. Förutom detta är grundvattenytan sannolikt helt i grovkorniga sorterade sediment, såsom sand och grus, vilka inte alls har samma förutsättning att utveckla erosion. I fält kan det dock se ut som att grundvattenytan rinner ut genom finsand och silt, sannolikt för att dessa sediment rasat ned i tidigare skede.

Det skulle dock kunna, beroende på ändrade förutsättningar, gå skred i sluttningen ned mot Indalsälven. Genom att köra SGU:s modell 'Förutsättning för skred i finkornig jordart' (Hedfors & Rodhe 2018, Peterson Becher 2021) med justerade parametrar och jordartsinformation utifrån Tjärnviksdalens uppbyggnad har detta testats. De jordarter som kartlagts under fältarbetet för denna studie användes som indata. Antagande gjordes vidare att sedimentpacken helt består av silt, något som inte överensstämmer med verkligheten men är en förenkling som snarare ökar förutsättningarna för skred. Baserat på jordarterna som förekommer i lagerföljderna i närheten av branten är silt den finkornigaste och på så vis också den med högst förutsättningar för skred. Vidare antogs att silten var torr. Typiska värden för kritisk vinkel i torr silt är mellan 28° och 35° (Terzaghi 1943), modellen kördes därför på en kritisk vinkel om 27° eller 1:2 för att inte underdriva förutsättningarna.

Resultatet visas i figur 32. Det är tydligt att sluttningarna ned mot Indalsälven faller ut i analysen. Samtidigt har lagerföljden antagits vara homogen silt och därför saknas den 'armerande' egenskapen hos morän eller jordarter med grövre kornstorlek vilket eventuellt skulle ge mindre förutsättning för skred. Vidare, och som nämnts tidigare, har under fältarbetet inte noterats några direkta tecken på erosion i sluttningen vilket påtalats vid tidigare fältbesök (se Nilsson & Wallström 2015). Trots detta är det viktigt att notera att en oförsiktig markanvändning sannolikt skulle kunna förändra förutsättningarna markant.

Överströmning

Kraftiga flöden in i de olika tjärnarna kan självklart ha stor påverkan på lokala förhållanden, allt ifrån naturmiljön till infrastruktur. Resonemangen här handlar i första hand om förutsättningarna för genombrott, alltså att erosionen kopplat till en eventuell överströmning skulle leda till att Gesunden dräneras genom Tjärnviksdalen. Även om ett skeende inte leder till katastrofala följder kan det ha en lokal påverkan, dessa är dock inte det primära målet med nedanstående diskussion.

Översvämning av sedimenten i Tjärnviksdalen, så kallad överströmning eller krönöversvämning, sker när vattennivån i en uppströms sjö stiger över sedimentens krön. Generellt kan man säga att överströmning kan inträffa vid till exempel extrema nederbördsmängder, snabb snösmältning eller i situationer med byggda dammar och felaktig dimensionering av spillvattenkapacitet (Foster m.fl. 2000). När vatten flödar över sedimentytan eroderar det snabbt, särskilt om dammen består av finkorniga sediment. Erosionen kan skära ned i sedimenten som dämmer vattnet uppströms, vilket i sin tur leder till accelererad erosion (Wahl 1998).

För att erosion genom överströmning ska bli aktuell från Gesunden ned mot Indalsälven via Tjärnviksdalen behöver Gesunden höjas med upp emot 14 m, vid lågpunkten strax öster om

Grönvattnet. En höjning av vattenytan med 14 m är osannolik, inte minst för att Krångede kraftverk skulle vara översvämmat i en sådan situation.

De sjöar som ligger i de centrala delarna av Tjärnviksdalen är till stor del påverkade av grundvattenytans nivå, då sjöarna ligger i direkt anslutning till rullstensåsen. Påverkan från stora inflöden från ovanliggande avrinningsområde skulle därför till viss del infiltreras i rullstensåsen och bli grundvatten. Möjligheten att dessa sjöars nivå skulle höjas till den grad som krävs för en överströmning anses begränsad.

Den västligaste belägna sjön, Bodtjärnen, är i stället tydligt påverkad av Gesundens nivå. Tillförsel av vatten från avrinningsområdet rinner således ut i Gesunden. Den största delen av avrinningsområdet avvattnas genom Arvtjärnsbäcken. För att en överströmning ska ske behöver Bodtjärns vattenyta höjas betydligt, något som anses osannolikt då vallen mellan Bodtjärn och Gesunden endast reser sig fem meter. Det är dock viktigt att notera att förutsättningarna för erosion och slamströmar sannolikt skulle öka i samband med ökad nederbörd eller förändringar i skogens egenskaper, såsom slutavverkning (kalhygge). Diskussionen här rör i första hand förutsättningarna för ett genombrott av Gesunden utifrån ökad avrinning. Ökad erosion i Arvtjärnsbäcken skulle sannolikt påverka infrastruktur, såsom kraftledning och vägar (inklusive den skogsbilväg som löper parallellt med bäcken), samt Bodtjärnens vattenkvalitet kopplat till ökat inflöde av sediment och organiskt material.

En eventuell överströmning är däremot intressantare att diskutera vid Öratjärn. Öratjärn påverkas främst av ytvattentillrinning, något som är tydligt både vid jämförelse mellan Öratjärns vattenkemi och grundvattenkemin samt vid jämförelse enligt resultat från de nivåloggrar som placerats ut (fig. 34). Det senaste gjordes extra tydligt under snösmältningen våren 2024, när Öratjärns nivå höjdes närmare två meter (fig. 50, *pers. kom. Lars Amrén, Ragunda kommun*).

I samband med de höga vattenflödena eroderades väg och parkeringsplats vid badplatsen i Öratjärn, ett tydligt tecken på att dränering och avrinning behöver vara dimensionerat för relativt höga och kortvariga flöden inom avrinningsområdet till Öratjärn.



Figur 50. Hög vattennivå i Öratjärn 16 maj 2024. Normalvattenstånd ligger mellan 1–2 m under bryggans högsta punkt. Jämför figur 34. Fotograf: Lars Amrén.

Studerar man topografin längs Öratjärns strand är den lägsta passpunkten > 6 m över Öratjärns normalnivå på 200 m över havet. Om vi utgår från att avrinningsområdet till Öratjärn är ungefär 450 hektar ($4\,500\,000\text{ m}^2$), Öratjärns area cirka $90\,000\text{ m}^2$ samt ett så kallat 1 000-årsregn (240 mm under 24 timmar) (Alfredsson & Bern 2017) kan vi beräkna hur mycket vattnet teoretiskt kan stiga i Öratjärn.

För enkelhetens skull antar vi att Öratjärn är tät och att infiltrationen är försumbar, detta är sannolikt en förenkling vilket gör att vattenytan kommer stiga mindre i verkligheten än i överslagsberäkningen. Vidare antar vi att inget vatten infiltrerar i jorden, eller på annat sätt hålls kvar uppe i avrinningsområdet, allt regn som faller flödar direkt till Öratjärn. Detta är också en kraftig förenkling. Slutligen antar vi att Öratjärn är konformad och att stränderna höjer sig 1 höjdmeter per 5 längdmeter, alltså ökar volymen ju högre vattennivån blir, också detta är en förenkling om än mer riktigt än att anta en cylinderform. Dessa förenklingar leder till att resultatet ska tolkas som ett absolut maximum. Genom att beräkna volymen vatten och sedan jämföra den med Öratjärns volym kan vi estimerar hur mycket ytan stiger.

Volymen vid ett 1 000-årsregn, V_a , i Öratjärns avrinningsområde blir:

$$V_a = A_a \times P$$

Där A_a är avrinningsområdets area i m^2 , P är nederbörden i meter under 24 timmar. Volymen vatten under 24 timmar i avrinningsområdet är således ungefär $1\,200\,000\text{ m}^3$.

Radien för Öratjärn ökar vid vattennivåhöjning enligt:

$$r_{ny} = r_0 + 5H$$

Där r_{ny} är radien efter H meters höjning och r_0 är radien innan höjning. Detta betyder att ytan av sjön, A_H , ökar per meter högre vattennivå enligt:

$$A_H = \pi(r_0 + 5H)^2$$

Det går nu att beräkna volymen per meter, V_{pm} , höjning enligt:

$$V_{pm} = A_H \times 1 = \pi(r_0 + 5H)^2$$

För att beräkna den totala volymen, summerar vi volymen för varje meter tills Öratjärns volym är nära V_a , alltså när allt vattnet under hundraårsregnet fyllt Öratjärn. Detta sker vid ungefär 10 m, enligt:

$$V_{tot} = \sum_{H=1}^{10} \pi(r_0 + 5H)^2$$

Där V_{tot} är totala volymen, vilken enligt ekvationen ovan blir $1\,231\,273\text{ m}^3$, vilket är i linje med den uppskattade volymen vid ett 1 000-årsregn i Öratjärns avrinningsområde, V_a , på ungefär $1\,200\,000\text{ m}^3$.

Resultatet blir en höjning med 10 m. Alltså, vattennivån stiger under ett 1 000-årsregn maximalt 10 m. Som sagt, ett sådant scenario innefattar antagandet att allt vatten rinner av ned till Öratjärn direkt och att inget bromsas upp tillfälligt på grund av vegetation eller torvmarker, samt att Öratjärns form är förenklad och dess botten tät.

Det är således inte uteslutet att Öratjärn skulle kunna svämma över sin pasströskel. Samtidigt, studeras pasströskeln och området direkt öster om Öratjärn, är det tydligt att ett sådant flöde endast skulle fortsätta till nästa dödisgrop.

Slutsatser och rekommendationer

Slutsatser

Bergtröskel

Denna studie har inte funnit några tecken på en bergtröskel i Tjärnviksdalen. De observerade jorddjupen vid borrhning och geofysiska mätningar överensstämmer med tidigare studier. 3D-modelleringen visar att det inte är möjligt att inkludera en bergtröskel i nivå med Gesunden (cirka 200 m ö.h.) för att få en geologiskt rimlig tolkning av lagerföljderna. Den interpolerade bergöverytan i 3D-modellen indikerar att den högsta punkten på berget i dalgången ligger mellan Mörttjärnen och Aborttjärnen, med en uppskattad nivå på cirka 185 ± 5 m ö.h. Detta innebär att bergtröskeln sannolikt är minst 10 m lägre än Gesundens nivå och tröskeln vid Krångede kraftverk.

Jordarternas utbredning och egenskaper

Utbredningen av jordarter i Tjärnviksdalen är komplex och varierar både i ytan och på djupet. Tidigare studier har ofta antagit en mer homogen jordartsfördelning, men denna studie visar att det finns en betydande heterogenitet. Borrhningar och geofysiska mätningar har bekräftat förekomsten av komplexa lagerföljder med växlande kornstorlekar, inklusive moränlager som överlagrar sorterade sediment. Detta indikerar att området uppvisar spår efter två istider och den isfria perioden där emellan, vilket har lett till en mångfald av jordarter.

Genom 3D-modellering har det varit möjligt att skapa en detaljerad bild av jordarternas utbredning i tre dimensioner. Denna modell visar att:

- De äldsta sedimenten, som avsattes före den senaste istiden, förekommer främst i de östra delarna av dalgången och har begränsad utbredning i ytan.
- Morän från den senaste istiden är den jordart som täcker den största arealen, men har generellt sett en begränsad mäktighet.
- Isälvsediment, främst i form av rullstensåsen, utgör den mäktigaste jordarten och kan vara över 70 m djup i vissa områden.
- Finkorniga glaciala sediment, avsatta i vattenmiljöer, finns främst i de östra delarna och nära Gesunden.
- Postglaciala sediment utgör tunna lager i lågpunkter och längs Indalsälven.

Resultaten visar att rullstensåsen sannolikt sträcker sig under markytan längs hela dalgången, även om den inte är synlig i ytan i de västligaste delarna.

Den stora variationen av jordarter och deras egenskaper, i synnerhet förekomsten av moränlager och att de under moränen liggande finkorniga jordlagren sannolikt är överkonsoliderade, har betydelse för bedömningen av Tjärnviksdalens stabilitet och förutsättningen för erosion och eventuell genombrott.

Grundvattnet

I de västra delarna, där rullstensåsen inte är synlig i ytan, finns en tydligare koppling mellan tjärnarna (Abborrtjärnen och Grönvattnet) och grundvattnet. Öster om Öratjärn finns en stor omättad zon. I de östra delarna av Tjärnviksdalen är mäktigheten stor och det finns ett djupt liggande grundvattenmagasin i de undre isälvsedimenten och i rullstensåsen.

Grundvattenkemin i Tjärnviksdalen är generellt sett av god kvalitet. Vattenprover från grundvattenrör, källor och tjärnar visar att det finns variationer i kemin, främst genom att Öratjärn har

en tydlig ytvattenkaraktär. Vidare noteras förhöjda halter av vissa metaller i ett par grundvattenrör. De förhöjda metallhalter kan bero på lokala geologiska förhållanden, tidigare markanvändning, eller fel vid provtagningen.

Grundvattenytan i Tjärnviksdalen lutar från väst mot öst, med en nivåskillnad på cirka 45 m över en sträcka på ungefär 3 km. Den hydrauliska gradienten, som beskriver grundvattenytans lutning, har en svag lutning om 2,5 och 6 ‰ från Gesunden fram till Öratjärn, och från Öratjärn och ned mot Indalsälven uppskattas gradienten till cirka 4 ‰, i ett spann på 3–7 ‰ i de östliga delarna. Denna gradient påverkar grundvattenflödets hastighet och riktning samt förutsättningarna för intern erosion.

Den hydrauliska gradienten i Tjärnviksdalen är generellt lägre, även om uppskattad felmarginal är stor, än de kritiska gradienter som observerats vid genombrott i vissa naturliga och antropogena analogier. Samtidigt är det viktigt att komma ihåg att den kritiska gradienten varierar beroende på jordarternas egenskaper, och att de centrala delarna av Tjärnviksdalen, där gradienten är som högst, består av mer genomsläppliga isälvsediment (sand och grus). Studier, i form av laboratorieexperiment, visar att sand och grus har betydligt högre kritisk hydraulisk gradient än finkornigare jordar.

Förutsättningar för genombrott

Studien har utvärderat tre potentiella förlopp av genombrott från Gesunden genom Tjärnviksdalen:

- Intern erosion är en process där vatten under tryck eroderar och transporterar finkornigt material inom en jorddamm eller sedimentpack.
- Bakåtgripande erosion uppstår när erosionen i en slänt fortgår uppströms på grund av vattenflöde och underminerar släntens stabilitet.
- Överströmning sker när vattennivån i en sjö eller vattendrag stiger över krönet på en sedimentdamm.

Den hydrauliska gradienten i Tjärnviksdalen, som är en viktig faktor för att bedöma möjligheten för intern erosion, är generellt lägre än kritiska gradienter som observerats vid genombrott i vissa analogier, men den exakta hydrauliska gradienten för Tjärnviksdalen är osäker och i vetenskapliga studier om kritiska hydrauliska gradienter är variationen stor. Samtidigt är det viktigt att beakta att de centrala delarna av dalgången, där gradienten sannolikt är som högst, består av genomsläppliga isälvsediment (sand och grus), vilket kan innebära att de tål en högre gradient.

Förutsättningar för bakåtgripande erosion i sluttningen ned mot Indalsälven anses vara begränsad, men inte osannolik. Lagerföljderna i den delen av dalgången är generellt torra, och grundvattenytan ligger i grovkorniga sediment som är mindre känsliga för erosion. Modellering av förutsättningar för skred i finkornig jordart visar dock att ett eventuellt skred i sluttningen är möjligt men sannolikt inte skulle kunna utvecklas långt in i dalgången. Modelleringen gjordes med ett "*worst case scenario*", där det antogs att sedimentpacken helt bestod av silt. I verkligheten finns moränlager i lagerföljderna som kan stabilisera sedimenten och minska förutsättningarna för skred.

Överströmning från Gesunden är osannolik med tanke på den betydande höjning av vattennivån som skulle krävas om minst 14 m. En överströmning av Öratjärn österut genom dess lägsta pasströskel är mindre osannolik, särskilt vid extrema flöden. Det skulle dock krävas ett 1 000-års regn för att nå Öratjärns tröskel och de grovkorniga omättade sedimenten precis öster om tröskeln skulle sannolikt infiltrera vattnet snabbt.

Bedömning

Bedömningen görs baserat på tre olika resonemang; Tjärnviksdalens geologiska historia, dess geologiska uppbyggnad och de hydrogeologiska förhållandena för intern erosion.

Geologisk historia

De äldsta jordarterna i Tjärnviksdalen antas vara kring 50 000 år gamla. De understa jordarterna har således överskridits av en kilometermäktig inlandsis, vilken överkonsoliderat jordarterna, och i samband med detta avsatt ett moränlager. Dessa har senare täckts av glacifluviala och glacilakustrina sediment. Under själva deglaciationen tappades den issjö som bildats i dalgången innanför Koviken, den så kallade Kovikissjön, genom Tjärnviksdalen. En sådan händelse kan anses utgöra ett 'stresstest' av dalgångens motståndskraft mot erosion.

När inlandsisen lämnat området var kustlinjen i höjd med de nu högsta delarna av Tjärnviksdalens dalbotten. Här avsattes finkorniga sediment genom deltabildning vid högsta kustlinjen som mäktiga finkorniga sediment, silt till mellansand. Dessa jordarter har förutsättningar för skred, i synnerhet de siltiga partierna är specifikt känsliga för skred vilka förekommer ställvis i dalgången och i synnerhet i de östliga delarna.

Efter avsättningen av dessa sediment fortgick landhöjningen vilket ledde till erosion av Indalsälvens fåra och för cirka 8 500 år sedan hade hela Tjärnviksdalen rest sig över havet, vilket lett till att dagens fåra för Indalsälven utvecklats. De senaste 8 500 åren har upplevt både blöta och torra perioder, sannolikt också med skogsbränder och variation av vegetationen. Trots detta antas Tjärnviksdalen varit mer eller mindre stabilt under hela denna period, också denna period antas kunna ses som ett 'stresstest' av förutsättningen för ett eventuellt genombrott.

Baserat på den geologiska historien är bedömningen att förutsättningarna för ett genombrott är relativt låg då den har stått emot ett varierande klimat i över 8 000 år. Under denna period har variationer varit stora men de inkluderar så klart inte storskaliga antropogena förändringar, såsom infrastruktur eller skogsbruk.

Geologisk uppbyggnad

Förutsättningarna för ett eventuellt genombrott är direkt kopplat till vilken typ av jordarter som förekommer i Tjärnviksdalen. Jordarternas egenskaper är i sin tur kopplade direkt till hur de har bildats och således den geologiska historien. Den geologiska historien under de senaste 50 000 åren finns bevarad i de olika lagren i Tjärnviksdalen, inklusive en isfri period före den senaste inlandsisen. Under dess utveckling har Tjärnviksdalen påverkats av flertalet olika geologiska processer och avsättningsmiljöer. De jordarter som förekommer i Tjärnviksdalen uppvisar därför betydligt större variation än vad som tidigare har antagits.

I de djupare delarna vilar de äldre sedimenten, dessa antas vara grovkorniga i stor utsträckning och om finkornigare, såsom silt, antas de vara överkonsoliderade. Överkonsolideringen antas minska de geologiska förutsättningarna för erosion. Dessa sediment har alltså bevarats under den senaste nedisningen och är således täckta med en kappa av morän. En sådan morän kan antas agera armerande, eller i vart fall minska erosionsbenägenheten i de undre lagren. Denna morän förekommer i stora delar av området, speciellt i de östra delarna.

Centralt i dalgången har erosion och avsättning av sediment i isälvar under senaste nedisningen bildat den rullstensåsen som löper i väst–östlig riktning. Rullstensåsen består av grova sorterade sediment, såsom sand, grus och sten. I de delar där rullstensåsen är som mäktigast antas den utgöra hela lagerföljden, alltså utan underliggande sediment av annan karaktär. De grova sedimenten har låga förutsättningar för erosion och de har en hög infiltrationskapacitet. Möjligheten att infiltrera, svälja,

mycket nederbörd kan vara en förmildrande omständighet i samband med stora nederbördsmängder.

Stora delar av dalgången består alltså, som tidigare antagits, av silt och finsand men variationer i djupet och på ytan gör att helhetsbedömningen blir annorlunda. Tjärnviksdalen skiljer sig på så vis mot de förutsättningar som förekom vid Döda fallet där jordarterna var (är) homogena och finkorniga.

Baserat på den geologiska uppbyggnaden i Tjärnviksdalen, tolkad utifrån resultaten i detta arbete, bedöms jordlagerföljderna, i sin helhet, inte ha betydande förutsättningar för genombrott. Det är dock viktigt att notera att det på många platser finns erosionskänsliga jordarter men förutsättningar för ett genombrott anses begränsade.

Hydrogeologiska förhållanden

De hydrogeologiska förhållandena i Tjärnviksdalen visar på förutsättningar där intern erosion till följd av grundvattenflöden inte kan uteslutas. Den interpolerade grundvattenytan och tillgängliga mätdata pekar på en hydraulisk gradient genom dalgången som i huvudsak ligger mellan 2,5 och 7 ‰ i de västra och centrala delarna, men kan lokalt uppgå till cirka 3–7 ‰ i östra Tjärnviksdalen. Dessa värden är i nivå med, eller understiger, vad som i litteraturen beskrivs som kritiska gradienter för att initiera intern erosion i naturliga sediment, men då främst i finkorniga jordarter.

Eftersom dalgångens centrala och östra delar främst består av isälvsmaterial, såsom sand och grus, med generellt god dränering och högre resistens mot intern erosion, minskar förutsättningarna något. Samtidigt finns det indikationer på förekomst av finkorniga skikt och potentiellt tätare lager i delar av dalgången där lokala variationer i gradient och jordart kan skapa förutsättningar för intern erosion.

Sammantaget är förutsättningarna begränsade under nuvarande förhållanden, men i ett scenario med höjda grundvattennivåer eller förändrade flödesförhållanden kan detta förändras.

Rekommendationer

Först och främst, det är viktigt att beakta de geologiska förutsättningarna vid planering av framtida markanvändning och infrastruktur i Tjärnviksdalen, i synnerhet kopplat till höga flöden i ett förändrat klimat.

Förutsättningarna för överströmning från Gesunden över sedimentkrönet i Tjärnviksdalen bedöms som låga. En vattennivåhöjning på minst 14 m skulle krävas för att översvämma den lägsta passpunkten vid Grönvattnet. En sådan höjning är osannolik under naturliga förhållanden. Därmed är risken för överströmning och därpå följande erosion från Gesunden till Tjärnviksdalen begränsad. Trots detta rekommenderas fortsatt bevakning av vattennivåerna i Gesunden och kringliggande sjöar, särskilt vid extremväder och snabba snösmältningar.

Överströmning och erosion är mer relevant att diskutera för Öratjärn, där lägre tröskelnivåer och historiskt noterade höga vattennivåer visar på en lokal känslighet. Vid höga flöden under snösmältningen 2024 observerades erosionsskador vid Öratjärns badplats. Erosionsskadorna kopplas till avsaknaden av möjlighet för vattenavrinning vid parkeringsplatsen. Därför bör sannolikt avrinningssystemet dimensioneras för att hantera höga flödestoppar, till exempel med någon form av dränering vid parkeringen till badplatsen.

På andra sidan Öratjärn, där bäcken från det södra avrinningsområdet leder ut i sjön, är det viktigt att säkerställa en korrekt dimensionerad dräneringsväg, som kan hantera de stora mängder vatten som kan uppstå vid snösmältning och kraftiga regn. Vi har inte på något vis studerat den nuvarande lösningen men påtalar att det är viktigt att vägtrumman inte sätts igen. Följden för infrastrukturen vid en eventuell slamström bör beaktas.

Det är även viktigt att modellera avrinningen ned mot Öratjärn, med hänsyn till jordarterna i området. Den beräkning som utförts för avrinning ned mot Öratjärn i denna studie är kraftigt förenklad och innehåller till exempel inte information om vegetation, jordarternas infiltrationskapacitet eller mäktighet. En mer avancerad modell ger en bättre förståelse för hur vatten flödar genom avrinningsområdet och hur detta påverkas av olika faktorer, som nederbörd, marklutning och jordartstyper. En sådan modell görs företrädesvis av personer med hydrologisk expertis.

Studier av de geologiska förutsättningarna i Tjärnviksdalen visar att sluttningen vid Gettryggen har vissa förutsättningar för skred. Området består till stor del av finkorniga sediment, som silt och finsand, vilka är erosionsbenägna i branta lutningar. En långsiktig planering av markanvändningen i de branta slutningarna, i synnerhet de kartlagda som finkorniga sediment, är viktig för att stabilisera jordlagren och på så vis minska förutsättningarna för skred. Vegetationen fungerar som ett naturligt skyddsnät som binder jorden och minskar påverkan av till exempel ytvatten. Att ta bort vegetationen i detta område, till exempel genom avverkning eller annan exploatering, bör ej göras innan skoglig expertis rådfrågats och eventuell riskbedömning utförts.

Tjärnviksdalens markförhållanden, med inslag av finkorniga och erosionskänsliga sediment såsom silt och finsand, gör området sårbart för körsador från exempelvis skogsmaskiner. Körsador kan leda till markpackning, lokal jordstörning och förändrade ytavrinningsförhållanden. Detta ökar risken för yt- och ravinerrosion, särskilt i områden med lutande terräng eller i anslutning till diken och vattendrag. För att minska risken för körsador rekommenderas att markarbete och körning begränsas till perioder med frusen eller torr mark, när bärigheten är hög och risken för spårbildning är lägre. Det är även viktigt att beakta att körsador i områden med finkorniga sediment kan förvärra erosion och instabilitet i slutningar, och därmed indirekt öka risken för bakåtgripande erosion och skred. För att säkerställa en hållbar hantering av området bör därför skoglig expertis anlitas vid planering av avverkning och terrängtransporter. Terränganalys i kombination med geologisk och hydrologisk information kan ligga till grund för ett åtgärdsprogram anpassat till Tjärnviksdalens specifika förhållanden.

Borrningar i Öratjärns botten skulle ge värdefull information om sedimentlagrens sammansättning och hur dessa har påverkats av eventuellt tidigare slamströmmar. Genom att analysera sedimenten kan man få en bättre förståelse för hur ofta och med vilken intensitet och intervall slamströmmar har inträffat i området. Sådana studier skulle också öka kunskapen om bottenförhållanden för att kunna utesluta att Öratjärns vattennivå utgör grundvattenytan, vilket har en stor påverkan på tolkningen av den hydrauliska gradienten.

För att mer noggrant bedöma förutsättningarna för intern erosion i sedimenten behövs ytterligare studier, inklusive numeriska modelleringar. De komplexa lagerföljderna i Tjärnviksdalen, med en blandning av finkorniga och grovkorniga sediment, gör det svårt att med säkerhet bedöma möjligheten för intern erosion. Numeriska modelleringar kan hjälpa till att simulera hur grundvattenflöden påverkar sedimenten och identifiera områden med förutsättningar för intern erosion. Detta gäller i första hand området öster om Öratjärn, där den hydrauliska gradienten är som brantast. Den information som har tagits fram i detta arbete utgör förhoppningsvis en god grund för en sådan modellering. Förslagsvis bör sådana numeriska modeller utföras av personer med expertis i dammkonstruktioner, till exempel gruvdammar. Sådan kompetens finns till exempel på Luleå tekniska universitet.

Utöver de rekommendationer som nämnts ovan är det viktigt att komma ihåg att Tjärnviksdalen är ett komplext geologiskt område med en unik historia. Kunskap om dess geologiska förutsättningar och den regionala geologiska historien är avgörande för att kunna fatta välgrundade beslut om hur området ska förvaltas.

Referenser

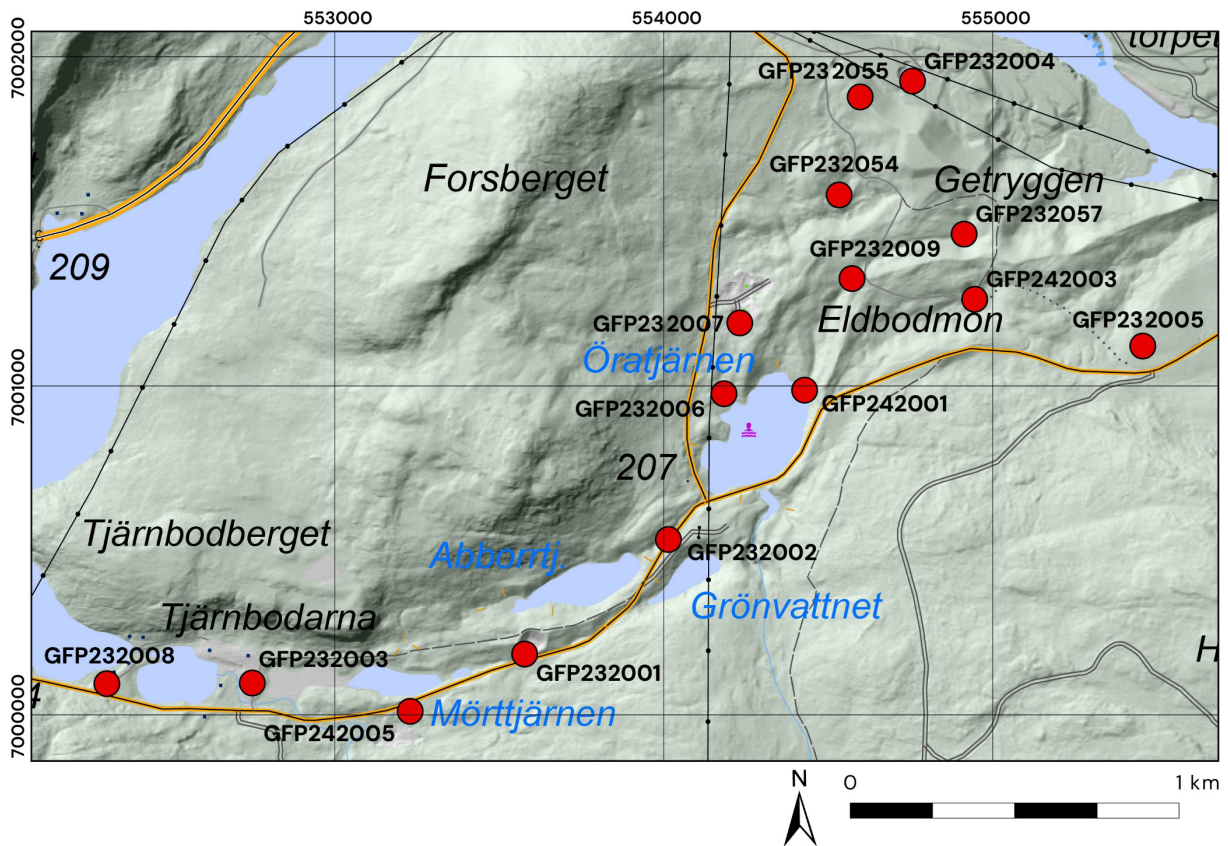
- Agrell, H., 2002: *Naturligt dämnda sjöar—Analogier av dammkonstruktioner* (Uppdrag - Miljö Och Energi No. 08 1144 / 2002; Uppdragsrapport För Svartliden Guld AB). Sveriges geologiska undersökning.
- Alexanderson, H., Hättstrand, M., Lindqvist, M. A. & Sigfúsdóttir, T., 2022: MIS 3 age of the Veiki moraine in N Sweden – Dating the landform record of an intermediate-sized ice sheet in Scandinavia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 54(1), 239–261. <https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2091308>
- Alexanderson, H., Johnsen, T. & Murray, A. S., 2010: Re-dating the Pilgrimstad Interstadial with OSL: A warmer climate and a smaller ice sheet during the Swedish Middle Weichselian (MIS 3)? *Boreas*, 39(2), 367–376. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2009.00130.x>
- Alfredsson, C. & Bern, E., 2017: *Vägledning för skyfallskartering: Tips för genomförande och exempel på användning*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- ArcGIS Pro* (Version 3.4.0), 2024: Windows 10. Esri.
- Bernatek-Jakiel, A. & Poesen, J., 2018: Subsurface erosion by soil piping: Significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, 1107–1128. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>
- Blomdin, R., Peterson Becher, G., Smith, C. A., Regnell, C., Öhrling, C., Goodfellow, B. W. & Mikko, H., 2021: Beskrivning till geomorfologiska kartan Jämtlands län. *Sveriges geologiska undersökning K 705*, 57 s.
- Borgmark, A. & Wastegård, S., 2008: Regional and local patterns of peat humification in three raised peat bogs in Värmland, south-central Sweden. *GFF*, 130(3), 161–176. <https://doi.org/10.1080/11035890809453231>
- Daniel, E., 2004: *Jorddjupsbedömning i Krångedeområdet—Steg 1* (Uppdrag - Fysisk Planering Nos. 08-14361–2004). Sveriges geologiska undersökning.
- Daniel, E., 2005: *Jorddjupsbedömning i Krångedeområdet—Steg 2* (Uppdrag - Fysisk Planering Nos. 08-14361–2004). Sveriges geologiska undersökning.
- De Geer, G., 1940: Geochronologica Suecia Principles. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*.
- Dirkx, W.-J., Beck, R. & Bierkens, M., 2020: The Influence of Grain Size Distribution on the Hydraulic Gradient for Initiating Backward Erosion. *Water*, 12(9), 2644. <https://doi.org/10.3390/w12092644>
- Foster, M., Fell, R. & Spannagle, M., 2000: The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000–1024. <https://doi.org/10.1139/t00-030>
- Gorbatshev, R., Karis, L. & Strömberg, A. G. B., 1997: Beskrivning till berggrundskartan över Jämtlands län. Del 1: Urberget. *Sveriges geologiska undersökningCa 53:1*.
- GROUNDHOG Desktop Professional* (Version 2.8.3), 2022: Computer software. British Geological Survey.
- Hedfors, J. & Rodhe, L., 2018: Handledning till kartan ”Förutsättningar för skred i finkornig jordart”. *SGU-rapport 2018:17*. Sveriges geologiska undersökning.
- Högbom, A. G., 1899: *Om Ragundadalens geologi*. *Sveriges geologiska undersökning C 182*, 117 s.
- Hörnsten, Å., 1968: *Synpunkter på de kvartära avlagringarna vid Öratjärn, Ragunda kommun*. 8 januari. Sveriges geologiska undersökning.

- Jantzer, I. & Knutsson, S., 2010: Critical gradients for tailings dam design. *Mine Waste 2010 : First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste ; Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste ; 29 September - 1 October 2010, Perth, Australia*, 23–32.
- Karlsson, C., Sohlenius, G., & Peterson Becher, G., 2021: Handledning för jordartsgeologiska kartor och databaser över Sverige. *SGU-rapport 2021:17*. Sveriges geologiska undersökning, 83 s.
- Kleman, J., Hättstrand, M., Borgström, I., Fabel, D. & Preusser, F., 2021: Age and duration of a MIS 3 interstadial in the Fennoscandian Ice Sheet core area – Implications for ice sheet dynamics. *Quaternary Science Reviews*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107011>
- Kulling, O., 1945: Om fynd av mammut vid Pilgrimstad i Jämtland. *Sveriges geologiska undersökning C 473*.
- Lagerbäck, R., 1988: The Veiki moraines in northern Sweden – Widespread evidence of an Early Weichselian deglaciation. *Boreas*, 17(4), 469–486. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1988.tb00562.x>
- Lantmäteriet., 2015: *Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+ (Product description)*. GSD.
- Lidmar-Bergström, K. & Näslund, J.-O., 2002: Landforms and uplift in Scandinavia. In A. G. Doré, J. A. Cartwright, M. S. Stoker, J. P. Turner, & N. White (Eds.), *Geological Society, London, Special Publications* (Vol. 196, pp. 103–116). The Geological Society. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.196.01.07>
- Lövé, K.-E., 2015: *Kommentarer till risken för älvgenombrott i Tjärvviksdalen*. Fortum.
- Lundqvist, J., 1959: Issjöar och isavsmältning i Östra Jämtland. *Sveriges geologiska undersökning C 573*.
- Lundqvist, J., 1967: Submoräna sediment i Jämtlands län. *Sveriges geologiska undersökning C 618*.
- Lundqvist, J., 1969: Beskrivning till jordartskarta över Jämtlands län. *Sveriges geologiska undersökning Ca 45*.
- Lundqvist, J. & Pleijel, C., 1976: Mammutbeten från Kånkback, Ragunda s:n, Jämtland. *Flora Och Fauna*, 71(3), 89–96.
- Mangerud, J., Alexanderson, H., Birks, H. H., Paus, A., Perić, Z. M. & Svendsen, J. I., 2023: Did the Eurasian ice sheets melt completely in early Marine Isotope Stage 3? New evidence from Norway and a synthesis for Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 311, 108136. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108136>
- Marchi, L. & Dalla Fontana, G., 2005: GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 48(2), 218–228. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1292-4>
- Melton, M. A., 1957: An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology. *No. 11; Technical Report*. Office of Naval Research. <https://doi.org/10.21236/AD0148373>
- Nilsson, Å. & Wallström, S., 2015: PM TJÄRNVIKSDALEN Minnesanteckningar platsbesök 2015-11-19 (Tjärvviksdalen Riskbedömning No. 10223206; WSP Uppdrag). WSP Sverige AB.
- O’Callaghan, J. F. & Mark, D. M., 1998: The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 323–344.
- Okeke, A. C.-U. & Wang, F., 2016: Critical hydraulic gradients for seepage-induced failure of landslide dams. *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0043-z>
- Persson, C. & Svantesson, S. I., 1994: *Metodik och jordartsindelning tillämpad vid geologisk kartering i skala 1:50 000*. Sveriges geologiska undersökning.
- Perzmaier, S., 2007: Hydraulic criteria for internal erosion in cohesionless soil. In *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*. CRC Press.

- Peterson Becher, G., 2021: *PRODUKT: Förutsättningar för skred i finkornig jordart*. Sveriges geologiska undersökning. <<https://resource.sgu.se/dokument/produkter/forutsattningar-skred-finkornig-jordart-beskrivning.pdf>> åtkommen den 19 juni 2025.
- Peterson Becher, G., Blomdin, R., Goodfellow, B. W., Ising, J., Mikko, H., Ransed, G., Regnéll, C., Smith, C. A. & Öhrling, C., 2024: Beskrivning till jordartskarta över centrala Jämtlands län. *Sveriges geologiska undersökning K 754*, 214 s.
- Peterson Becher, G., Mikko, H., Smith, C. A., Öhrling, C., Ransed, G. & Goodfellow, B. W., 2022: The geomorphological imprint and implications of a 'new' ice margin in central Sweden. *Geologiska Föreningen Specialpublikation*, 1, 404–405.
- 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>
- Seppä, H., Bjune, A. E., Telford, R. J., Birks, H. J. B. & Veski, S., 2009: Last nine-thousand years of temperature variability in Northern Europe. *Climate of the Past*, 5(3), 523–535. <https://doi.org/10.5194/cp-5-523-2009>
- SGU, 2024a: Kartvisare: Berggrund 1:50 000—1:250 000., 2024: <<https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-berg-50-250-tusen.html>> åtkommen den 19 juni 2025.
- SGU, 2024b: Kartvisare och diagram för mätstationer. <<https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/matstationer/>> åtkommen den 19 juni 2025.
- SMHI, 2009: *1995 – Extrem vårflod i norra Sverige*. <<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/historiska-oversvamningar/1995-hoga-varfloden-i-norra-sverige-1.7877>> åtkommen den 19 juni 2025.
- Svedberg, K. & Olofsson, B., 2014: Tjärnviksdalen—Sammanställning av undersökningarna kring genombrottsrisken i Tjärnviksdalen. *Rapport nr 2014:23*. Länsstyrelsen Jämtlands län.
- Terzaghi, K., 1943: *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley & Sons.
- Terzaghi, K., Peck & Mesri, G., 1996: *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Tryggvason, A., Melchiorre, C. & Johansson, K., 2014: A fast and efficient algorithm to map prerequisites of landslides in sensitive clays based on detailed soil and topographical information. *Computers & Geosciences*, 75, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.11.006>
- Vestlund, T., 2014: *Djupmätning och sedimentundersökning Gesunden Hammarforsen*. Norrlands Sjöentreprenad AB.
- VISS, 2024: Grundvatten. SE700293-151397–WA24508223 / SE700293-151397. <<http://viss.lansstyrelsen.se>> åtkommen den 19 juni 2025.
- Wahl, T. L., 1998: *Prediction of embankment dam breach parameters* (No. DSO-98-004; Dam Safety Research Report). U.S. Department of the Interior. Water Resources Research Laboratory. <https://www.nrc.gov/docs/ML0901/ML090150051.pdf>
- Wan, C. F. & Fell, R., 2004: Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 373–380. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(373))
- Wedholm, K., 1934: Ur Ragundadalens saga. I *Jämtland*. Svenska turistföreningen.
- Wilén, P. & Persson, M., 2021: *Tjärnviksdalen, stabilitetsförhållanden—Fältrapport* (Nr 1074116; Fältrapport). Norconsult AB.

- Wohlfarth, B., Alexanderson, H., Ampel, L., Bennike, O., Engels, S., Johnsen, T. F., Lundqvist, J. & Reimer, P., 2011: Pilgrimstad revisited – A multi-proxy reconstruction of Early/Middle Weichselian climate and environment at a key site in central Sweden. *Boreas*, 40(2), 211–230. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2010.00192.x>
- W:son Ahlman, H., Caldenius, C. & Sandegren, R., 1924: Ragundasjön. En geomorfologisk, geokronologisk, växtgeografisk undersökning. *Sveriges geologiska undersökning Ca 12*.

Bilaga 1



Borrningar utförda under 2023 och 2024 och som presenteras som bilagor av detaljerade lagerföljder nedan.

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Isalvssediment	grus	ej bedomd	grus
211.5	2.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	hart material
	3.0					
209.5	4.0					
	5.0					
207.5	6.0					
	7.0					
205.5	8.0					
	9.0					
203.5	10.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	losare material
	11.0					
201.5	12.0					
	13.0					
199.5	14.0					
	15.0					
197.5	16.0					
	17.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	troligen sand
195.5	18.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	stenig friktionsjord
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	21.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	stenig friktionsjord
191.5	22.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	sandig friktionsjord
	23.0					
189.5	24.0					
	25.0					
187.5	26.0					
	27.0					
185.5	28.0					
	29.0					
183.5	30.0					
	31.0					
181.5	32.0					
	33.0					
179.5	34.0					
	35.0					
177.5	36.0					
	37.0					
175.5	38.0					
	39.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	osaker friktionsjord
206.9	2.0		Isalvssediment	grovsand	grusig	grusig grovsand
	3.0		Isalvssediment	sand	siltig	siltig sand
204.9	4.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	5.0		Isalvssediment	sand	siltig	nagot grusig siltig sand
202.9	6.0		Isalvssediment	sand	siltig	siltig finsand
	7.0		Isalvssediment	finsand	siltig	siltig finsand
200.9	8.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	nagot siltig sand
	9.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	nagot siltig sand
198.9	10.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
	11.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
196.9	12.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
	13.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
194.9	14.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
	15.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
192.9	16.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
	17.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
190.9	18.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sonderat latt (under gvy)
	19.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	sand-silt

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Isalvssediment	sand	ej bedomd	sand-silt
— 21.0			Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	nagot stenigt
— 186.9 — 22.0						
— 23.0						
— 184.9 — 24.0			Isalvssediment	sten	ej bedomd	stenigt lattborrat
— 25.0						
— 182.9 — 26.0			Moran	diamikton-ospec	ej bedomd	moran
— 27.0						
— 180.9 — 28.0						
— 29.0						
— 178.9 — 30.0						
— 31.0						
— 176.9 — 32.0						
— 33.0						
— 174.9 — 34.0						
— 35.0						
— 172.9 — 36.0						
— 37.0						
— 170.9 — 38.0						
— 39.0						

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
207.2	2.0		Glaciala sediment	sand	grusig	grusig sand
	3.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
205.2	4.0		Glaciala sediment	grovsilt	ej bedomd	grovsilt
	5.0					
203.2	6.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt med sandlinser
	7.0					
201.2	8.0		Isalvssediment	grovsand	grusig	siltig grusig grovsand
	9.0		Glaciala sediment	grovsilt	ej bedomd	grovsilt med enstaka grus
199.2	10.0					
	11.0		Isalvssediment	grus	siltig	siltigt grus
197.2	12.0		Isalvssediment	fingrus	grovsandig	grovsandigt fingrus
	13.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	stenigt
195.2	14.0					
	15.0					
193.2	16.0					
	17.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	grovt stenigt
191.2	18.0					
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	21.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	grovt stenigt
187.2	22.0					
	23.0					
185.2	24.0					
	25.0					
183.2	26.0					
	27.0					
181.2	28.0					
	29.0					
179.2	30.0					
	31.0					
177.2	32.0					
	33.0					
175.2	34.0					
	35.0					
173.2	36.0					
	37.0					
171.2	38.0					
	39.0					



Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Postglaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
178.2	2.0		Moran	sandig-siltig diamikton	ej bedomd	sandig siltig diamikton
	3.0		Moran	sandig diamikton	ej bedomd	sandig diamikton
176.2	4.0					
	5.0					
174.2	6.0					
	7.0					
172.2	8.0					
	9.0					
170.2	10.0					
	11.0					
168.2	12.0					
	13.0					
166.2	14.0					
	15.0					
164.2	16.0					
	17.0					
162.2	18.0					
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Glaciala sediment	mellansand	grovgrusig	grovgrusig mellansand
	1.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	sorterad homogen mellansand
221.3	2.0					
	3.0		Glaciala sediment	grovsand	ej bedomd	grovsand
			Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
219.3	4.0		Glaciala sediment	mellansand	finsandig	nagot finsandig mellansand
			Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	5.0		Glaciala sediment	grovsand	ej bedomd	grovsand
			Glaciala sediment	mellansand	finsandig	finsandig mellansand
217.3	6.0		Postglaciala sediment	sandig-siltig diamikton	ej bedomd	sandig siltig diamikton
			Glaciala sediment	silt	sandig	sandig silt
	7.0		Isalvssediment		finsandig	finsandig mellansand
			Glaciala sediment	mellansand	siltig	siltig finsand
215.3	8.0		Glaciala sediment	finsand	ej bedomd	varvig silt-finsand
			Glaciala sediment	grovsilt-finsand	ej bedomd	silt
	9.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	varvig silt
			Glaciala sediment	silt	ej bedomd	finsand
213.3	10.0		Glaciala sediment	finsand	ej bedomd	varvig silt
			Glaciala sediment	silt	siltig	ofullständigt sorterad siltig finsand
	11.0		Moran	finsand	ej bedomd	kompakt sandig siltig diamikton
211.3	12.0		Glaciala sediment	sandig-siltig diamikton	ej bedomd	latt sondering-troligen sort Finsed
	13.0			lera-silt (kohesionsjord)		
209.3	14.0					
	15.0					
207.3	16.0					
	17.0					
205.3	18.0					
	19.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	hardare

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	21.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	friktionsjord-sand
201.3	22.0		Isalvssediment	grus	ej bedomd	friktionsjord-sten-grus
	23.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	friktionsjord-sand
199.3	24.0		Isalvssediment	grus	ej bedomd	friktionsjord-sten-grus
	25.0					
197.3	26.0		Isalvssediment	sten	ej bedomd	friktionsjord-sten
	27.0					
195.3	28.0					
	29.0		Moran	diamikton-ospec	ej bedomd	diamikton
193.3	30.0					
	31.0					
191.3	32.0					
	33.0					
189.3	34.0					
	35.0					
187.3	36.0					
	37.0					
185.3	38.0					
	39.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Glaciala sediment	mellansand	finsandig	finsandig mellansand
203.0	2.0		Glaciala sediment	grovsilt	ej bedomd	vaxellagrad finsand-silt-grovsilt dom
	3.0		Glaciala sediment	sand	ej bedomd	vaxellagrad mellansand-finsand
201.0	4.0		Glaciala sediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
	5.0		Glaciala sediment	grovsand	ej bedomd	grovsand
	5.0		Glaciala sediment	grovsand	finsandig	finsandig grovsand
	5.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
199.0	6.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	6.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
	7.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	siltig mellansand
	8.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
197.0	8.0		Glaciala sediment	grovsand	mellansandig	mellansandig grovsand
	9.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
	9.0		Glaciala sediment	grovsand	ej bedomd	grovsand
195.0	10.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
	11.0		Isalvssediment	fingrus	grovsandig	grovsandig fingrus
	11.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
193.0	12.0		Isalvssediment	finsand	siltig	siltig finsand-litet siltlager
	12.0		Isalvssediment	fingrus	grovsandig	grovsandig fingrus
	13.0		Isalvssediment	mellansand	finsandig	ofullst Sort Finsandig mellansand
	14.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
191.0	14.0		Isalvssediment	finsand	siltig	deformerad siltig finsand-load str
	15.0		Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
	16.0		Isalvssediment	silt	ej bedomd	siltlins
189.0	16.0		Isalvssediment	mellansand	siltig	siltig mellansand
	17.0		Isalvssediment	grovsand	ej bedomd	grov sand-enst Gruskorn
	17.0		Moran	sandig-siltig diamikton	ej bedomd	sandig siltig diamikton (moran)
187.0	18.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand-stallvis grus
	18.0		Isalvssediment	mellansand	grusig	nagot grusig mellansand
	19.0		Moran	sandig-siltig diamikton	ej bedomd	sandig siltig diamikton



Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
217.3	1.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	2.0		Glaciala sediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
215.3	3.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	nagot siltig finsand
	4.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
	5.0		Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
			Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
213.3	6.0		Isalvssediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
			Isalvssediment	mellansand	finsandig	finsandig mellansand
211.3	7.0		Moran	sandig-siltig diamikton	ej bedomd	moranlikt-finsand m ngt silt
	8.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
209.3	10.0		Isalvssediment	sand-block (friktionsjord)	ej bedomd	sondering sediment
207.3	12.0					
205.3	14.0					
203.3	16.0					
201.3	18.0					
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Postglaciala sediment	grovsilt	ej bedomd	grovsilt-deformerade varv
210.5	2.0					
	3.0		Postglaciala sediment	grovsilt	ej bedomd	grovsilt-droppstenar av grus
208.5	4.0		Postglaciala sediment	grovsilt	ej bedomd	nagot sandig grovsilt-droppstenar
	5.0		Glaciala sediment	grovsilt-finsand	ej bedomd	grovsilt-finsand-droppstenar
206.5	6.0		Glaciala sediment	silt	finsandig	grusig finsandig silt-droppstenar
	7.0					
204.5	8.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt-droppstenar
	9.0					
202.5	10.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt-enstaka gruskorn
	11.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt-ren
200.5	12.0		Glaciala sediment	finsand	ej bedomd	finsand
	13.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
	14.0		Isalvssediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
198.5	15.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
	16.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	17.0		Glaciala sediment	silt	sandig	sandig silt
	18.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
196.5	19.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand-stenigt
	20.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
	21.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
194.5	22.0		Glaciala sediment	finsand	ej bedomd	finsand
	23.0		Glaciala sediment	silt	finsandig	finsandig silt
	24.0		Glaciala sediment	finsand	ej bedomd	finsand
	25.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	21.0		Isalvssediment	mellansand	grusig	grusig mellansand
190.5	22.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	23.0		Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
188.5	24.0		Isalvssediment	fingrus	sandig	sandig fingrus
			Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	25.0		Isalvssediment	grovsand	ej bedomd	grovsand
			Isalvssediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
186.5	26.0		Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
	27.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
			Isalvssediment	fingrus	sandig	sandigt fingrus
184.5	28.0		Isalvssediment	finsand	mellansandig	mellansandig finsand
			Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	29.0		Isalvssediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
182.5	30.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	31.0		Isalvssediment	fingrus	ej bedomd	fingrus
			Isalvssediment	grovsand	fingrusig	stenig fingrusig grovsand
			Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
180.5	32.0		Isalvssediment	mellansand	finsandig	finsandig mellansand-stenigt
			Moran	sandig diamikton	ej bedomd	osorterad stenig finsand-diamikton
	33.0		Isalvssediment	finsand	ej bedomd	vaxellagrad silt-finsand
178.5	34.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
			Isalvssediment	mellansand	finsandig	finsandig mellansand
	35.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
			Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	homogen mellansand
176.5	36.0					
	37.0					
174.5	38.0					
	39.0		Moran	diamikton-ospec	ej bedomd	trolig moran-sondering

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Postglaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	1.0		Postglaciala sediment	finsand	grusig	ofullständigt sorterad grusig finsand
			Postglaciala sediment	silt	grusig	ofullständigt sorterad grusig silt
197.1	2.0		Postglaciala sediment	mellansand	grusig	ofullständigt sorterad grusig mellansand
			Postglaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
	3.0		Postglaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
195.1	4.0		Postglaciala sediment	finsand	ej bedomd	finsand
			Postglaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	5.0		Postglaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
			Postglaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
193.1	6.0		Postglaciala sediment	finsand	ej bedomd	finsand
			Postglaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	7.0		Glaciala sediment	silt	sandig	ofullst sort sandig silt-mkt kompakt
191.1	8.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
			Glaciala sediment	silt	sandig	ofullst sort Sandig silt-mkt kompakt
	9.0		Glaciala sediment	silt	sandig	ofullst sort Sandig silt-losare
			Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt
189.1	10.0		Glaciala sediment	silt	sandig	ofullst sort Sandig silt-kompakt-G
			Glaciala sediment	silt	sandig	ofullst sort Sandig silt-losare
	11.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	siltig finsand
187.1	12.0		Moran	siltig diamikton	ej bedomd	siltig diamikton
			Moran	finsand	siltig	ofullst sort Siltig finsand
	13.0		Moran	siltig diamikton	ej bedomd	siltig diamikton-kompakt
185.1	14.0		Moran	finsand	siltig	ofullst sort Siltig finsand-los
			Moran	siltig diamikton	ej bedomd	kompakt siltig diamikton
	15.0		Moran	diamikton-ospec	ej bedomd	liknande ovan-
183.1	16.0					
	17.0					
181.1	18.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	lite mjukare-troligen torr sand
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	21.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	lite mjukare-troligen torr sand
177.1	22.0					
	23.0					
175.1	24.0					
	25.0					
173.1	26.0					
	27.0					
171.1	28.0					
	29.0					
169.1	30.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	betydligt mjukare-vat sand
	31.0		Isalvssediment	grus	ej bedomd	stokigt-troligen grus
167.1	32.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	mjukt-vat sand
	33.0					
165.1	34.0		Isalvssediment	grus	ej bedomd	hart-stokigt-troligen grus
	35.0					
163.1	36.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	mjukt-vat sand-stallvis stenskikt
	37.0					
161.1	38.0					
	39.0		Isalvssediment	grus	ej bedomd	stokigt-grus

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	41.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	Sand med grusskikt
157.1	42.0		Isalvssediment	grus	ej bedomd	Grus
	43.0					
155.1	44.0					
	45.0					
153.1	46.0					
	47.0					
151.1	48.0					
	49.0					
149.1	50.0					
	51.0					
147.1	52.0					
	53.0					
145.1	54.0					
	55.0					
143.1	56.0					
	57.0					
141.1	58.0					
	59.0					



Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Glaciala sediment	grovsand	grusig	nagot grusig grovsand
	1.0		Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand-homogen-valsorterad
204.4	2.0					
	3.0					
202.4	4.0		Glaciala sediment	finsand	ej bedomd	finsand
	5.0		Glaciala sediment	finsand	siltig	nagot siltig finsand
			Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
200.4	6.0		Glaciala sediment	grovsilt	ej bedomd	grovsilt (dropsten)
			Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
	7.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
			Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
198.4	8.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
			Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
	9.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	valsorterad mellansand
			Isalvssediment	grovsand	mellansandig	mellansandig grovsand med siltslringar
196.4	10.0		Moran	siltig sandig diamikton	ej bedomd	siltig sandig diamikton
	11.0					
194.4	12.0					
	13.0					
192.4	14.0					
	15.0					
190.4	16.0					
	17.0					
188.4	18.0					
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
221.0	1.0		Isalvssediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
	2.0		Isalvssediment	grovsand	ej bedomd	grovsand
	3.0		Isalvssediment	mellansand	grovsandig	grovsandig mellansand
219.0	4.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	5.0					
217.0	6.0		Isalvssediment	mellansand	finsandig	finsandig mellansand
	7.0					
215.0	8.0		Isalvssediment	finsand	ej bedomd	finsand
			Isalvssediment	mellansand	ej bedomd	mellansand-trolig sten vid 8-5m
	9.0		Isalvssediment	grovsilt	finsandig	finsandig grovsilt
			Isalvssediment	finsand	ej bedomd	daligt sorterad finsand
213.0	10.0		Isalvssediment	grovsilt	ej bedomd	grovsilt
			Moran	sandig-siltig diamikton	ej bedomd	grusig sandig silt-daligt sorterad
	11.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt (hart)
211.0	12.0					
	13.0					
209.0	14.0		Glaciala sediment	sand	ej bedomd	sand (enklare)
	15.0					
207.0	16.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt (hardare)
	17.0		Glaciala sediment	sand	ej bedomd	sand (enklare)
205.0	18.0					
	19.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt (nagat hardare)

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	21.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt (nagat hardare)
201.0	22.0					
	23.0					
199.0	24.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt (hart-slag behovs)
	25.0					
197.0	26.0					
	27.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt (ytterligare hardare)
195.0	28.0					
	29.0					
193.0	30.0					
	31.0					
191.0	32.0					
	33.0					
189.0	34.0					
	35.0					
187.0	36.0					
	37.0					
185.0	38.0					
	39.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	41.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	silt (ytterligare hardare)
181.0	42.0					
	43.0					
179.0	44.0		Moran	diamikton-ospec	ej bedomd	stenigt-friktionsjord-moran?
	45.0					
177.0	46.0					
	47.0					
175.0	48.0					
	49.0					
173.0	50.0					
	51.0					
171.0	52.0					
	53.0					
169.0	54.0					
	55.0					
167.0	56.0					
	57.0					
165.0	58.0					
	59.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Glaciala sediment	mellansand	ej bedomd	mellansand
	1.0		Glaciala sediment	mellansand	grusig	grusig mellansand
183.3	2.0		Glaciala sediment	sand	ej bedomd	sand
	3.0					
181.3	4.0		Isalvssediment	grovsand	grusig	grusig grovsand
	5.0		Moran	siltig diamikton	ej bedomd	siltig moran
179.3	6.0		Moran	sand	ej bedomd	sand med moraninslag
	7.0		Moran	silt	finsandig	nagot finsandig silt
177.3	8.0		Moran	siltig diamikton	ej bedomd	siltig moran-torr hard
	9.0					
175.3	10.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	sonderat silt-inget grovt-hard
	11.0					
173.3	12.0					
	13.0					
171.3	14.0					
	15.0					
169.3	16.0					
	17.0					
167.3	18.0					
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	21.0		Glaciala sediment	silt	ej bedomd	sonderat silt-inget grovt-hart
163.3	22.0					
	23.0					
161.3	24.0					
	25.0					
159.3	26.0					
	27.0					
157.3	28.0					
	29.0					
155.3	30.0					
	31.0					
153.3	32.0		Isalvssediment	sand	ej bedomd	sand lattare att sondera
	33.0					
151.3	34.0					
	35.0					
149.3	36.0		Moran	diamikton-ospec	ej bedomd	stenigt grus
	37.0					
147.3	38.0					
	39.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	41.0		Moran	diamikton-ospec	ej bedomd	stenigt grus
143.3	42.0					
	43.0					
141.3	44.0					
	45.0					
139.3	46.0					
	47.0					
137.3	48.0					
	49.0					
135.3	50.0					
	51.0					
133.3	52.0					
	53.0					
131.3	54.0					
	55.0					
129.3	56.0					
	57.0					
127.3	58.0					
	59.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Postglaciala sediment	mellansand	grusig	
			Postglaciala sediment	finsand	ej bedömd	
201.1	2.0		Postglaciala sediment	mellansand	ej bedömd	
			Postglaciala sediment	finsand	mellansandig	
	3.0		Postglaciala sediment	mellansand	finsandig	
			Postglaciala sediment	finsand	ej bedömd	
199.1	4.0		Isalvssediment	silt	ej bedömd	
			Isalvssediment	grovsand	grusig	
	5.0		Isalvssediment	grovsand	ej bedömd	
			Isalvssediment	diamikton	ospec.	
197.1	6.0		Isalvssediment	grovsand	ej bedömd	
			Isalvssediment	mellansand	grusig	
	7.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedömd	
			Isalvssediment	finsand	ej bedömd	
195.1	8.0		Isalvssediment	silt	ej bedömd	
			Isalvssediment	finsand	ej bedömd	
	9.0		Isalvssediment	silt	ej bedömd	
			Isalvssediment	finsand	ej bedömd	
193.1	10.0		Isalvssediment	finsand	ej bedömd	
			Isalvssediment	silt	ej bedömd	
	11.0		Isalvssediment	finsand	ej bedömd	
			Isalvssediment	silt	sandig	
191.1	12.0		Isalvssediment	finsand	ej bedömd	
			Isalvssediment	finsand	siltig	
	13.0		Moran	sandig diamikton	ej bedömd	
189.1	14.0		Moran	silt	stenig	
			Moran	silt	ej bedömd	hårt/kompakt. Ingen sten. Si?
	15.0		Moran	grus	ej bedömd	stenigt
			Glaciala sediment	silt	ej bedömd	si?
187.1	16.0		Glaciala sediment	silt	ej bedömd	Si?, försök till prov med mejsel. NR
			Glaciala sediment	grovsilt-finsand	ej bedömd	Si eventuellt Sf
	17.0		Isalvssediment	grus	stenig	
185.1	18.0					
	19.0		Isalvssediment	sand	ej bedömd	sandigare
			Isalvssediment	grus	stenig	

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Isalvssediment	grus	stenig	
—	— 21.0		Isalvssediment	sand	ej bedömd	sand med gruslager
181.1	— 22.0					
—	— 23.0					
179.1	— 24.0					
—	— 25.0					
177.1	— 26.0					
—	— 27.0					
175.1	— 28.0					
—	— 29.0		Isalvssediment	grus	ej bedömd	
173.1	— 30.0					
—	— 31.0		Isalvssediment	sand	ej bedömd	
171.1	— 32.0					
—	— 33.0					
169.1	— 34.0		Isalvssediment	grus	ej bedömd	
—	— 35.0		Isalvssediment	fingrus	ej bedömd	S med Grusskikt
167.1	— 36.0					
—	— 37.0					
165.1	— 38.0		Isalvssediment	grus	ej bedömd	
—	— 39.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	41.0		Isalvssediment	grus	ej bedömd	
161.1	42.0		Isalvssediment	grus	stenig	
	43.0					
159.1	44.0		Isalvssediment	sand	ej bedömd	
	45.0		Isalvssediment	grus	ej bedömd	
157.1	46.0					
	47.0					
155.1	48.0					
	49.0					
153.1	50.0					
	51.0					
151.1	52.0					
	53.0					
149.1	54.0					
	55.0					
147.1	56.0					
	57.0					
145.1	58.0					
	59.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
	1.0		Isalvssediment	mellansand	ej bedömd	något grövre i nedre del
193.8	2.0					
	3.0		Isalvssediment	grovsand	grusig	något grusig grovsand
191.8	4.0					
	5.0					
189.8	6.0		Isalvssediment	sand	grusig	
	7.0		Isalvssediment	sand	stenig	inget prov. Stenig sand??
187.8	8.0		Moran	sandig diamikton	ej bedömd	kompakt grått sandigt diamikton
	9.0		Moran	sandig diamikton	ej bedömd	löst grått sandigt diamikton
185.8	10.0					
	11.0		Moran	sandig diamikton	ej bedömd	löst diamikton
183.8	12.0		Moran	siltig diamikton	ej bedömd	siltigt diamikton?
	13.0		Isalvssediment	grus	ej bedömd	stenigt diamikton?
181.8	14.0		Isalvssediment	grus	ej bedömd	stenigt material
	15.0					
179.8	16.0					
	17.0					
177.8	18.0		Isalvssediment	sand	ej bedömd	finare. Sand?
	19.0					

Elevation m	Depth m	Legend	Namn i 3D-modell, Tolkning	Primär kornstorlek	Sekundär kornstorlek	Fältbeskrivning
			Isalvssediment	mellansand	ej bedömd	sorterad mellansand
209.2	1.0		Isalvssediment	sand	ej bedömd	troligen sand
207.2	2.0					
	3.0					
205.2	4.0					
	5.0					
203.2	6.0					
	7.0					
201.2	8.0					
	9.0					
	10.0					
	11.0					
199.2	12.0		Isalvssediment	sand	grusig	grusig sand?
	13.0		Isalvssediment	sand	ej bedömd	sand
197.2	14.0					
	15.0					
195.2	16.0		Moran	diamikton	ospec.	kompaktare. Något grusigare
	17.0					
193.2	18.0		Moran	diamikton	ospec.	stenigt grusigt. Hårt
	19.0					