

Hällristningars geologi

Mineral och bergarter

Rapport från projektet SAMHELL

Linus Brander – RISE Division Built Environment

RISE



Länsstyrelsen
Västra Götaland



UNIVERSITETET I BERGEN



Titel: Hällristningars geologi - Mineral och bergarter

Utgivare: Länsstyrelsen Västra Götaland

Omslagsbild: Skeppsrisingar från hällristning L1967:2462 (RAÄ nr Tanum 262:1) i Fossum.

Fotograf: Fanny Axellie, Länsstyrelsen Västra Götaland 2022.

Rapport: 2022:46

ISSN: 1403-168X

Förord

SAMHELL är ett svenskt-norskt samarbetsprojekt om hållristningar som har pågått mellan maj 2019 och september 2022. Projektet har genomförts inom ramen för det territoriella samarbetsprogrammet Interreg Sverige-Norge, delområde Gränslöst samarbete, och delvis finansierats av EU-medel genom Europeiska regionala utvecklingsfonden. Länsstyrelsen i Västra Götaland och norska Riksantikvaren har varit projektägare och huvudprojektledare. Arbetet har skett i samverkan med Universitetsmuseet i Bergen. Projektets undertitel - samarbete om hållbilders bevarande, visualisering, dokumentation och förmedling – är en komprimerad beskrivning av dess syfte.

I bidragsansökan redovisas tre övergripande mål för projektet:

1. Ett permanent organiserat gränsöverskridande samarbete om visualisering, bevarande och vård av hållristningar,
2. Gemensamma rutiner och arbetssätt (standarder) för dokumentation, vård och synliggörande av hållristningar och
3. En gemensam praxis för 3D-dokumentation med handhållen laserskanner.

Dessa mål bygger i sin tur på att det finns tillgängliga resultat från följande tre delmål:

1. Projektet har samlad kunskap om de senaste 30 årens forskning om hur man bäst bevarar och vårdar hållristningar,
2. Det finns en utvärdering av olika metoder att tillgängliggöra hållristningar utan att använda skadliga metoder, till exempel målning med färg, och
3. Det finns en utvärdering av utvecklingsarbetet avseende 3D-teknik som dokumentationsmetod för hållristningar.

För att öka förståelsen av begreppet vittring och vilka faktorer som kan vara orsak till att vissa bergarter vittrar mer än andra behöver vi ta utgångspunkt i geologin. Inte minst viktigt är det som en bakgrund till SAMHELL:s mål 2. I den här rapporten ges därför en översiktlig beskrivning av de processer som kan resultera i att bergytan bryts ner, vilket i sin tur kan leda till att eventuella hållristningar riskerar att skadas eller till och med försvinna.

Innehåll

Förord.....	2
Inledning.....	4
Mineral och bergarter	4
Vittringsprocesser	5
Mekanisk vittring	6
Kemisk vittring.....	8
Resultat av vittring.....	10
Faktorer som påverkar vittringshastighet	11
Geologi i hållristningsområden	14
Referenser	18

Inledning

Jordskorpan (berggrunden) är uppbyggd av olika *bergarter*, vars utbredning såväl horisontellt som på djupet är ett resultat av den geologiska historien och de geologiska processer som varit verksamma. Ofta är berggrunden täckt av ett jordlager och växtlighet, men på vissa håll är den exponerad i håll eller "berg i dagen". I kontakt med atmosfären och hydrosfären bryts mineral och bergarter ner till mindre fragment (block, sten, grus, sand, osv.) och omvandlas till mineral som är stabilare vid de förhållande som råder vid jordytan, genom det vi kallar vittring. I föreliggande rapport beskrivs olika vittringsprocesser, faktorer som styr vittring och påverkar dess hastighet, samt hur olika vittringsskador ser ut. Eftersom de påverkande faktorerna inte bara är yttre sådana utan initialt beror på bergartens beskaffenhet, så börjar vi med en introduktion till mineral och bergarter.

Mineral och bergarter

Mineral är den mest grundläggande och med blotta ögat minsta identifierbara byggstenen i geologiska material. Ett mineral är en naturligt förekommande och fast kemisk förening, som definieras utifrån de kemiska grundämnen som ingår. Ett mineral är dessutom *kristallint*, vilket innebär att de ingående grundämnena på atomnivå sitter ordnade i ett repetitivt, kontinuerligt och förutsägbart tredimensionellt mönster. Ett exempel är is, som bildas när den kemiska föreningen H₂O (diväteoxid) fryser från vätskan *vatten* till den fasta fasen *is*, där molekylerna binder till varandra i en repetitiv hexagonal struktur. Det vanligaste sättet att klassificera mineral på utgår från kemisk sammansättning. Eftersom jordskorpan till 75% består av de två grundämnena syre (O) och kisel (Si), så domineras vår värld av *silikatmineral*, i vilka det minsta gemensamma byggblocket är silikatanjonen ([SiO₄]⁴⁻). Exempel på silikatmineral är kalifältspat (kalium-aluminium-silikat, KAlSi₃O₈) och kvarts (kiseldioxid, SiO₂), medan kalcit (kalciumkarbonat, CaCO₃) och pyrit/svavelkis (järnsulfid, FeS₂) är exempel på icke-silikater (i detta fall karbonatmineral respektive sulfidmineral).

En bergart i sin tur är ett aggregat eller tredimensionell mosaik av korn av ett eller flera olika mineral, sammansvetsade med varandra i magmatiska eller metamorfa bergarter, eller sammanhållna genom ett utfällt cement i sedimentära bergarter. Bergartsnamn definieras efter en sammanvägning av tre essentiella materialegenskaper:

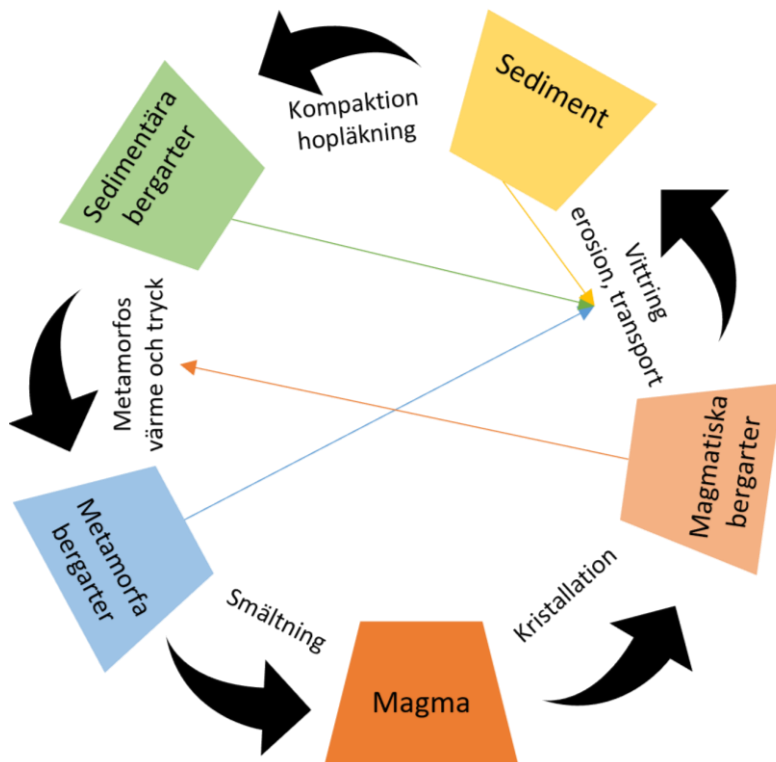
- *Mineralinnehåll*: vilka mineral bygger upp bergarten och i vilka relativa proportioner?
- *Textur*: hur stora är de enskilda mineralkornen, hur sitter de fast i varandra, hur ser korngränserna ut?
- *Struktur*: är enskilda mineralkorn slumpmässigt orienterade och fördelade i bergarten eller är vissa eller alla mineralkorn orienterade i en gemensam riktning och/eller ansamlade?

Dessa tre faktorer beror på den process som bildat bergarten och därför kommer även den så kallade *genesen* in i bilden, om än indirekt. Modern bergartsnomenklatur följer rekommendationer från IUGS (*International Union of Geological Sciences*), även om lokala och historiska bergartsnamn och terminologi dyker upp i framför allt äldre litteratur och berggrundskartor. Eftersom silikatmineralen dominerar mineralriket sett till andel av jordskorpan, så byggs de allra flesta bergarterna också upp av just silikatmineral. Exempel på bergarter byggda av silikatmineral är granit, gnejs, sandsten och fyllit. Marmor och kalksten byggs upp av karbonatmineral, främst kalcit eller dolomit.

Med tanke på hur en bergart är uppbyggd och definierad, så är det lätt att se och förstå att dess kemiska, fysikaliska och mekaniska egenskaper är en produkt av mineral, textur och struktur. Enligt IUGS är granit en bergart som kristalliserat från en magma (smält berg) och som består av 20–60%

kvarts, 20-70 % alkalifältspat och 10-50% plagioklas. Granit får enligt definition även innehålla andra mineral i begränsade halter, till exempel biotit eller muskovit. Mineralkornen i en granit är sammanvuxna med varandra i slumpmässig orientering och griper in i varandra som pusselbitar (magmatisk textur), en effekt av kristallisation från magma. Mineralkornen ska dessutom ligga i storleksspannet 0,1 millimeter till som mest några centimeter; mer finkorniga varianter benämns *aplit*, mer grovkorniga *pegmatit*. Detta kan verka petigt men har betydelse inte bara för tolkning av hur bergarten bildats, utan även för förståelse av bergartens materialegenskaper. Ett exempel är just *vittringsbeständighet*, som påverkas inte bara av mineralinnehållet utan också av textur och struktur.

Olika bergarter bildas i tre huvudsakliga processer: magmatiska, metamorfa och sedimentära. En magmatisk bergart bildas då mineral kristalliserar från smält bergmassa (magma eller lava) i samband med att denna kallnar från de temperaturer som krävs för att hålla magman flytande (700–1200 °C). En metamorf bergart bildas då mineral, textur och/eller struktur i en befintlig bergart (*protolit*) ombildas i fast tillstånd till följd av att den utsätts för förändringar i temperatur, tryck och/eller kemi. En sedimentär bergart bildas då vittringsprodukter genom erosion och sedimentation avsätts som fragment och/eller fälls ut ur vattenlösning, och cementeras till en bergart genom tyngden av ytterligare sediment som pålagras. Alla dessa bildningsprocesser drivs i regel av jordens inre motor (omfördelning av värme) och de tektoniska plattornas rörelser i det vi kallar plattektoniska processer.



Figur 1. Schematisk bild över det geologiska kretsloppet. Illustration: Länsstyrelsen Västra Götaland.

Vittringsprocesser

Samtidigt som den plattektoniska aktiviteten och de bergartsbildande processerna bygger upp jordskorpa och skapar höjdparter och relief, så finns det krafter och processer som bryter ner dessa. Ibland talar man om de förra processerna som *endogena*, medan dessa senare är *exogena*. De exogena processerna är vittring, massrörelser och erosion.

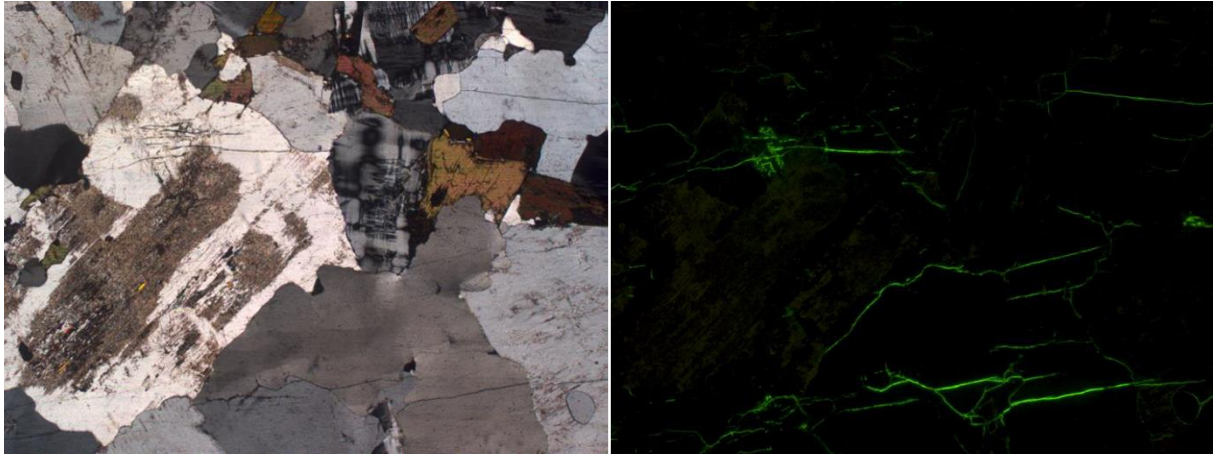
Vittring innebär fysisk nedbrytning och kemisk förändring av mineral i kontakt med atmosfär och hydrosfär. Det vittrade materialet som ligger kvar på plats kallas *regolit*. Den kan vara alltifrån obefintlig, eller endast någon millimeter tjock i områden där vittringsprocesserna är långsamma eller

äldre regolit flyttats bort genom massrörelser och erosion, till 10-tals eller 100-tals meter tjock i områden med omfattande vittring i kombination med väldigt lite erosion. *Massrörelser* är de processer som flyttar vittringsprodukter till lägre höjd endast genom gravitationens inverkan, det vill säga ras eller skred. *Erosion* slutligen är den process som transporterar materialet via erosionsagenterna vatten, vind, vågor och is, från hög till låg lägesenergi (höjd), där det deponeras från erosionsagenten. Slutmålet för vittring, massrörelser och erosion, om man kan tala i de termerna när det gäller naturliga processer, är anpassning av landskapets relief till en helt plan bergyta nära havsyttnivån, där lägesenergin är som lägst. En sådan yta benämns *penneplan*. I Sverige är regoliten i regel mycket tunn (millimeter-skala), till följd av att inlandsisen så sent som för 10 000 år sedan täckte vårt land och att djupare regolit då transporterades bort genom inverkan av is, floder och vågor.

Det finns två huvudgrupper av vittringsprocesser: mekaniska och kemiska. De mekaniska (ibland används begreppet *fysikaliska*) processerna **fragmenterar berg och mineral till mindre och mindre delar utan att förändra mineralsammansättningen**, medan de kemiska processerna **löser upp mineral till nya salter och fäller ut nya mineral**. Jämför en sockerbit – om du med handkraft eller kniv delar en sådan i två halvor utövar du mekanisk vittring; de är nu var och en mindre än ursprungsbiten, men fortfarande sockerbitar. När du istället lägger sockerbiten i kaffe motsvarar det kemisk vittring; sockerbiten löses upp och de ingående sockermolekylerna förekommer nu fritt i vätskan. De båda huvudprocesserna verkar dock sällan ensamma, utan oftast handlar det om växelverkan mellan de båda. Mekanisk vittring skapar sprickor och andra kontaktytor för vatten att ta sig in i bergmassan och ökar på det sättet omfattningen av kemisk vittring. Mineralreaktionerna i den kemiska vittringen är i sin tur ofta av sådan natur att mineral helt eller delvis försvinner i lösning och efterlämnar håligheter, som kan angripas och vidgas genom mekanisk vittring. Jämför igen med sockerbiten och kaffet ovan; upplösningen av sockret i vätskan ("kemisk vittring") går mycket snabbare om man innan delat upp sockerbiten i många mindre bitar, eller använder strösocker, eftersom många fler aktiva ytor skapats för samma totalvolym sockerbit.

Mekanisk vittring

De mekanismer som ryms inom mekanisk vittring verkar såväl regionalt som mikrolokalt. På regional skala orsakar rörelser och krafter mellan litosfärens tektoniska plattor sprickor som löper genom landskapet i olika riktningar; dessa är i regel vertikala (stående). Sprickor bildas också när magmatiska bergarter svalnar från höga temperaturer i jordskorpan; bergkroppen kontrakteras då (dras samman) med sprickor som resultat (jämför torkande lera). Horisontella (liggande) sprickor bildas när bergmassa som tidigare haft flera kilometer med berg ovanpå friläggs genom vittring och erosion; det blir då en tryckavlastningseffekt som gör att den yttnära bergmassan spricker parallellt med markytan i det som kallas bankningsplan. Tektoniska sprickor, avkylningssprickor och avlastningssprickor bildar på så sätt ett tredimensionellt mönster med nya ytor, där andra mekaniska och kemiska vittringsprocesser kan fortsätta vittringsarbetet på lokal skala. Denna sprickbildning är ett mer eller mindre avslutat kapitel i det idag exponerade snittet av berggrunden, men har skapat förutsättningarna för nu pågående vittringsprocesser. Dessutom åtföljs de storskaliga sprickorna till olika grad av mikroskopiska sprickor som inte syns med blotta ögat (så kallade *mikrosprickor*); dessa utgör potentiella svagheter som vid ny påfrestning lättare kan utveckla nya synliga sprickor och som dessutom kan utnyttjas i mekanisk och kemisk vittring.



Figur 2. Ett tunnslipspreparat av bohusgranit fotograferat i transmissionsmikroskop, där bildstorleken är 11 x 8 millimeter (till vänster polariserat ljus och till höger fluorescerande ljus). Detta granitprov är ovittrat och visar den inre texturen av friska mineralkorn. Centralt i bilden till vänster möts tre olika mineral: kvarts (ljus- till mörkgrå), plagioklas fältspat (vitt med bruna områden, delvis omvandlade), samt kalifältspat (ljusgrått med svart diffust korsmönster). Bilden till höger visar tydligare hur mikroskopiska sprickor (så kallade mikrosprickor) uppträder såväl längs korngränser som genomkorsande mineralkorn. Trots att dessa sprickor ibland bara är några mikrometer breda, så utgör de möjliga transportvägar för vatten eller öppningar där lavars hyfer kan få fäste. Det är i regel mikrosprickor som vid olika typer av mekanisk belastning vidgas och propagerar in i materialet, de utgör typiska svagheter där berget företrädesvis spricker/flagar. Foto: Linus Brander.

På lokal nivå är de vanligaste mekaniska vittringsprocesserna avlastning, frostsprängning, termisk expansion och biologisk aktivitet (se Tabell 1).

Tabell 1. Mekaniska vittringsprocesser:

Process	Förklaring
Avlastning, svalnande magmatisk bergart, tektonik	Processer som verkat tidigare i den geologiska historien, men som skapat grundförutsättningarna för nutida vittring på den lokala platsen. Framför allt olika typer av långtgående sprickor, såväl horisontella som vertikala och allt där emellan.
Frostsprängning	Vatten är en ovanlig vätska på många sätt. Bland annat har den större volym i fast tillstånd (is) än som vätska. Vid frysning sker därför en volymexpansion på nästan 10%, vilket skapar ett övertryck i utrymmen där vattnet lyckats ta sig in. Trycket är inte tillräckligt stort att spräcka berg vid enstaka tillfällen, men när berget utsätts för många cykliska växlingar mellan vatten och is sker en utmattningseffekt som gör att det till slut spricker. Denna process är således viktigast i fuktigt klimat där temperaturen över dygnet växlar mellan plusgrader och minusgrader.
Termisk expansion	Olika mineral har olika värmeutvidgning när temperaturen växlar, så åtminstone i teorin borde det leda till spänningar i bergarten och stress mellan mineralkorn i miljöer där temperaturen växlar med över 40 °C över dygnet, till exempel i ökenklimat. Dock har inte laboratoriestudier övertygande visat att det är en viktig process och i skandinaviskt sammanhang är den sannolikt försumbar.
Biologisk aktivitet	Växter med rotsystem, grävande djur och människor kan bidra till vittring av bergmassa. Speciellt rötter som söker sig ner i sprickor och håligheter i jakt på vatten och näringsämnen kan vidga befintliga sprickor och få dessa att propagera, samt dra loss sten i takt med att rötterna blir grövre

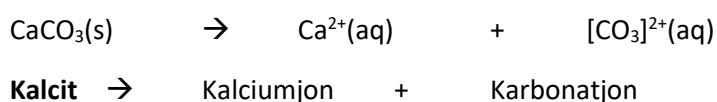
	<p>eller trädet faller och drar med sig material (rotvälta). Även lavar kan förmodligen påverka vittringen genom att deras hyfer (rottrådar) är tillräckligt fina att ta sig in i mikrosprickor och porer.</p> <p>Biologisk aktivitet bidrar också till den kemiska vittringen, genom tex frigörande av olika syror och komplexbildare.</p>
Erosion	<p>Erosion är inte en vittringsmekanism i strikt mening utan den process varmed vittringsprodukter transporteras bort från bildningsplatsen. Erosionsagenterna (vatten, vind, is, vågor) bidrar dock i viss mån till vittring, tex inlandsis/glaciär som bryter av utstickande delar eller hållar som slipas av sedimenttyngt forsande vatten.</p>

De mekaniska vittringsprocesserna verkar som nämnts fragmenterande, det vill säga de delar upp bergmassan i mindre och mindre delar. Bergvolymen får därmed en större effektiv yta där kemiska processer kan verka, jämfört med om det inte funnits sprickor i olika skalor. Detta gynnar i sin tur den kemiska vittringen.

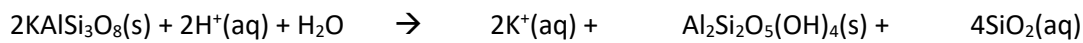
Kemisk vittring

De kemiska vittringsprocesserna verkar i kontakten mellan berg och den ur bergets synvinkel mycket aggressiva atmosfären. Ju större totalyta som en given volym mineral och berg exponerar utåt, desto fler möjligheter för kontakt med vatten och kemiska reaktioner. Bergarter bildas i regel vid mycket hög temperatur och tryck, under förhållanden helt skilda från de som råder vid jordytan. De magmatiska och metamorfa bergarter som finns i södra Skandinavien (tex Bohus-/Idefjordgraniten) har i regel bildats vid temperaturer upp till 600–1200 °C och ett tryck som motsvarar 3000 till 12 000 atmosfärer; det är vid sådana förhållanden som dess mineral är i kemisk jämvikt och trivs som bäst! Miljontals år av vittring, erosion och tektoniska rörelser i höjdled har slutligen exponerat dessa bergarter för jordytan och de förhållanden som råder där. Miljön vid jordytan – med sin modesta temperatur och tryck på 0±40°C och 1 atmosfär, samt syrgasrika luft och rikliga tillgång på fritt vatten – är mycket främmande för bergartsbildande mineral. De senare är helt enkelt inte längre kemiskt stabila, utan kommer anpassa sig till jordytans förhållanden genom *kemisk vittring*. De stabila slutprodukterna är framför allt olika lermineral, kvarts och oxy-hydroxidmineral.

Kemisk vittring innebär som nämnts tidigare att materialet förändras mineralogiskt och kemiskt. De vanligaste processerna är upplösning, oxidation, hydrolys och hydrering, processer som alla inbegriper vatten (se Tabell 2). Vanligen uppskattar man vittringshastighet för olika mineral genom att mäta och ange *upplösning* som sammanfattande och övergripande process, vare sig grundprocessen är den man strikt kallar upplösning, eller om det egentligen handlar om oxidation eller hydrolys. Man skiljer på *kongruent upplösning* där mineralet löses upp i sina beståndsdelars (joners) exakta proportioner och *inkongruent upplösning* där vissa komponenter av mineralet går i lösning snabbare medan andra dröjer; resultatet i den förra blir att mineralet helt försvinner i vattenlösning och lämnar ett tomrum, medan resultatet i den senare innebär att en viss del av mineralet går i lösning och en del faller ut som nytt mineral. Ett exempel på mineral som genomgår kongruent upplösning är kalcit – den kalcit som går i lösning gör det genom processen *upplösning*, det vill säga i de ingående komponenternas exakta proportioner. Kemiskt kan vi uttrycka det så här (fast mineral i fetstil):



Ett exempel på inkongruent upplösning är kalifältspat, som främst bryts ner genom processen *hydrolys*. Vätejoner i vattnet angriper mineralkornets yta och kaliumjoner går i lösning, medan lermineralet kaolin och kiseldioxidgel fälls ut eller går i lösning. Kemiskt kan processen sammanfattas så här (aq = aqua, dvs jonen/molekylen är i vattenlösning):



Kalifältspat + Vätejon → Kaliumjon + **Kaolin** (lermineral) + Kiseldioxid



Figur 3. Ett exempel på vittring där hällen runt det ristade skeppet är flakvittrad. Hällens vita yta kan möjligtvis bero på kemisk vittring i form av leromvandling av fältspat (kaolinitisering). (Hällristning L1967:2639, RAÅ nr Tanum 225:1.) Foto: E-K Granberg, Länsstyrelsen Västra Götaland 2021.

Bland de vanliga bergartsbildande mineralen är det de med hög andel jonbindning som är mest vittringsbenägna, medan de med lite högre andel kovalent karaktär i sina kemiska bindningar är mer beständiga mot kemisk vittring. De som (kemiskt) vittrar relativt lätt är karbonatmineralen kalcit och dolomit, samt silikatmineralen olivin och kalciumrik plagioklas. Pyroxen, amfibol och biotit har något bättre vittringsbeständighet, medan natriumrik plagioklas, kalifältspat och muskovit är svårvittrade. Kvarts är det kemiskt stabilaste av de vanliga mineralen och har därmed störst beständighet vad gäller vittring (vid "normala" förhållanden ska sägas, det vill säga pH 4–7). Denna ordning är som synes högst relativ, men för att ge en känsla av upplösningshastighet vid 25 °C och pH 6, så vittrar kalciumrik plagioklas cirka 10 000 gånger snabbare än natriumrik plagioklas (10^{-12} respektive 10^{-16} mol $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$); kalcit i sin tur vittrar 1 000 000 gånger så snabbt som plagioklas. Hastigheten får ändå sägas vara långsam, men vittringshastigheten ökar om vattnet är surt. Vid pH 3 är vittringshastigheten för kalciumrik och natriumrik plagioklas 100 respektive 10 gånger snabbare än vid pH 6. Hastigheten påverkas också av temperatur, där en ökning på 25°C snabbar på vittringen med en faktor 10.

Tabell 2. Kemiska vittringsprocesser:

Process	Förklaring
Upplösning (kongruent upplösning)	Total upplösning i vatten, på samma sätt som salt löser sig och mineralet delar helt upp sig proportionellt i sina ingående joner. Av de vanligaste mineralen är det bara kalcit och dolomit som följer denna strikta löslighet i vatten.
Hydrolys (inkongruent upplösning)	Vanligaste processen för silikatmineral. Reaktion mellan mineral och vatten, där vätejon byter ut relativt svagt jonbunden katjon i mineralstrukturen, eller där hydroxidjon angriper själva silikatstrukturen. Båda alternativen slutar i att mineralstrukturen förstörs, joner med hög jonbindningskaraktär går i lösning, samt att lermineral faller ut. Dessutom bildas överskott av kiseldioxid, som antingen faller direkt som en gel eller i mikrokristallin form (till exempel flinta), eller går i lösning tills den når miljö där den faller ur vattenlösningen. Silikatmineral med hög andel jonbindning faller lättast offer, medan hög grad av kovalenta bindningar (tex Si-O) är starkare. Kwarts har bara Si-O-bindningar och är mycket vittringsresistent vid neutralt och lågt (surt) pH. Vid högt pH och därmed hög aktivitet av hydroxidjoner, så är kwarts mer känsligt. I naturen är dock kraftigt basiska miljöer ytterst ovanliga, i relation till miljöer där pH är neutralt och lågt (surt).
Oxidation (inkongruent upplösning)	Reaktion med luftens syre, där syre tar upp elektroner från annan atom, i naturen främst järn (Fe) eller svavel (S), eftersom de är relativt vanliga grundämnen och dessutom har lätt för att donera elektroner. Oxidationsprocessen förstör befintligt minerals kristallstruktur och öppnar upp för annan kemisk vittring. Mineral som ofta vittrar genom oxidation är de järnförande biotit, pyroxen och amfibol, samt det järn- och svavelförande pyrit/svavelkis. Eftersom järn i regel är inblandat kan man se tecken på oxidation genom gul-bruna utfällningar (jämför rost) när vittringsprodukten är limonit (järnfällning med syre och vatten, FeOOH). Om järnet faller som hematit (järnfällning med endast syre, Fe ₂ O ₃) syns det som rödfleckning. Vid oxidation av sulfidmineral bildas också svavelsyra, som surgör vattnet och accelererar de andra vittringsprocesserna. Oxidation till järnoxider innebär också en volymökning, vilket kan "spränga" omkringliggande mineral.

Resultat av vittring

Vittringsprocesser ger upphov till olika typer av skador, beroende på hur grundmaterialet (bergarten) är beskaffad och vilka processer som dominerat. Mekanisk vittring resulterar vanligen i att sprickor uppstår, vidgas och propagerar ("letar sig vidare"). Sprickorna kan vara sådana som syns för blotta ögat, men också mikrosprickor som kräver förstoring i mikroskop för att synas. Tryckavlastning ger sig i regel till känna som avskalning av tunna partier eller sjok av berget (exfoliation), vanligen parallellt med hällytans morfologi (eftersom denna vanligen har formats genom denna typ av skalning). Sjok som börjat släppa men fortfarande sitter kvar kallas för bompartier; onomatopoetiskt efter det dova "bom"-ljud som blir följderna om man knackar med hammare, som kontrast till det friska berget som vid sådan knackning ger upphov till distinkt mer klangfullt ljud.

Kemisk vittring kan ge upphov till olika skador, som i regel ger mer fläckvis relief till hällytan. Till följd av att olika mineral har olika vittringsbeständighet, kommer de mer lättvittrade brytas ner först och

lämna ett skelett av mer vittringsbeständiga mineral efter sig. Om mineralkornen är relativt jämnstora och fritt utspridda resulterar det i en porstruktur med små håligheter (några millimeter stora) här och var i hällen. Är lättvittrade mineral ansamlade i vissa delar av bergarten medan svårvittrade är ansamlade på annat håll, blir resultatet en heterogen råhet i hällytan. I en ådergnejs typisk för Västsverige utgörs ådrorna av kvarts och kalifältspat – vilka är svårvittrade – medan mellanmassan består av plagioklas och biotit – som är mer lättvittrade. I en sådan hällyta blir resultatet en ”dal-och-rygg-struktur” på centimeterskala i hällytan, där svårvittrade ådror står upp ovan den mer lättvittrade mellanmassan. Ett annat exempel är Västsveriges ögongnejser, där ögonen (stora mineralkorn) av kalifältspat är mer vittringsbeständiga och därmed står upp som *knölar* ur hällytan.

Omvänt finns till exempel charnockitbergarter i Varbergsområdet, där relativt lättvittrade ögon av ortopyroxen (flera centimeter stora) vittrar bort och lämnar gropar efter sig, det vill säga *gropvittring*. Där lättvittrade mineral som är mer utspridda vittrar bort så snabbt att mer vittringsbeständiga mineralkorn frigörs, kan sådana ”överlevare” bli liggande länge på en plan hällyta, tills tillräckliga skyfall eller andra erosionsagenter lyckas transportera bort dem. Eftersom dessa kvarliggande mineralkorn i regel har storlek av grus, kallas det för *grusvittring*. Material kan också lösgöras som flagor, om sammanhållningen mellan de mer svårvittrade mineralen är tillräckligt hög och det finns en plan ansamling av mer lättvittrade mineral strax under. En sekundär effekt av kemisk vittring kan också vara missklädsamma utfällningar, som bildas när nybildade vittringsprodukter avsätts eller fälls ut på hällytan. Exempel på sådana är till exempel rostfärgade järnhydroxider, röda fällningar av hematit, kalkutfällningar, mörka manganutfällningar eller beläggningar av mikrokristallin kvarts (från kiseldioxid som frigörs vid vittring av silikatmineral). Källan kan också vara extern, till exempel kalkutfällningar från betong och bruk, eller utfällningar från kemikalier och medel som har använts vid skötsel av hållristningar.

Det finns sätt att uppskatta hur snabbt framför allt den kemiska vittringen verkat på en viss håll eller del av håll. Utgångspunkten är att alla ojämnheter nöttes bort genom erosion vid senaste nedisningen och sedan jämföra mineral i samma håll som vittrat olika snabbt. För att sådant antagande ska vara robust bör det vara möjligt att i de mest vittringsbeständiga mineralen kunna notera polerad övertyta, helst med bevarade isräfflor. Det kan då med fog antas att den delen av hällen fanns och slipades vid senaste inlandsisens framfart. Saknas slipad yta kan man inte utgå från detta, då isen inte alltid har slipat hållar och tagit bort ojämnheter, utan ibland lämnat underliggande bergyta i det närmaste opåverkad. De vittringsbeständiga delar som typiskt finns kvar sedan en sådan ”isens nollställning” är kvartsgångar som kan ”klippa” över alla möjliga typer av hållar, kvarts-kalifältspat-dominerade ådror i ådergnejs, samt kalifältspatögon i granit och gnejs.

Vittringshastigheten kan uppskattas genom att mäta höjdskillnaden mellan det av isen påverkade men kvarliggande, och de lägre liggande delarna av samma håll, samt dela denna höjdskillnad med år sedan isen smälte bort från området. Det blir en grov och högst linjär uppskattning av den kemiska vittringens hastighet under denna tidsperiod. Eftersom vittringsprocessernas hastighet påverkas av bland annat temperatur, nederbörd och vattenkemi, så har verklig vittringshastighet sannolikt varierat kraftigt under perioden, beroende av klimat, vegetation och markanvändning.

Faktorer som påverkar vittringshastighet

Vilka vittringsprocesser som är aktiva och den hastighet varmed de verkar, varierar med avseende på såväl de inneboende materialspecifika egenskaperna hos bergarten, som på yttre miljöfaktorer. En genomgång av dessa sammanfattas i Tabell 3 och 4.

Tabell 3. Interna faktorer som styr vittring och dess hastighet:

Faktor	Förklaring
Bergartens mineralinnehåll	Mineral är olika känsliga för kemisk vittring och vittrar därmed olika snabbt. Olivin, kalciumrik plagioklas och pyroxen vittrar snabbast, därefter kommer amfibol, biotit, natriumrik plagioklas och kalifältspat. Muskovit och kvarts är stabilast. Kalcit är känsligt mot upplösning i sur miljö och olika sulfider och järnförande silikater kan vara känsliga i oxiderande miljö.
Bergartens mineralkornstorlek	Samma mängd av ett givet mineral har större effektiv yta om mineralet förekommer som många små korn, i stället för som ett fåtal stora. Större korn är därmed mer vittringsresistenta jämfört med finare korn av samma mineral.
Bergartens textur	Texturen hos magmatiska och metamorfa bergarter är i regel mer sammanhållande, jämfört med sedimentära bergarter som oftast är mer porösa. I magmatiska bergarter har mineralkorn växt in i varandra som pusselbitar, medan de i metamorfa bergarter snarare svetsats samman mot varandra i raka kornkontakter. Detta ger färre angreppsvägar för vatten och luft, jämfört med i sedimentära bergarter där olika mineral- och/eller bergfragment packats och cementerats samman till en mindre tät textur.
Bergartens struktur	Strukturen påverkar mest genom att den ger en anisotropi i bergartens mineral- och/eller kornstorleksfördelning. I en massformig eller strukturellt isotrop bergart är mineralkorn och deras storleksfördelning och orientering slumpmässigt fördelad i bergmassan, varför en sådan bergart (till exempel granit) bör vittra homogent (likartat) och de vittringsresistenta mineralen dessutom ge de mindre resistenten ett visst skydd. Som kontrast har anisotrop bergart någon form av foliation eller lineation (det vill säga plan- eller linjärstruktur), tex gnejsighet, skiffrighet eller sedimentär lagring. De mer vittringskänsliga mineralen finns då ansamlade i skikt; de skikten vittrar snabbare och exponerar skikten med större vittringsmotstånd mot fortsatt vittring.
Sprickor och mikrosprickor	Sprickor ger fler ytor för vatten att komma i kontakt med bergmassan och utföra olika typer av vittring (mekanisk, kemisk och biologisk). Även mikrosprickor (syns i mikroskop) påverkar, då kemisk vittring kan försiggå där eller lavens rötter kan söka sig in i så smala utrymmen (mikrometer-skala).
Hällens form	Hällens form spelar roll i det att ju mer yta som samma volym exponerar mot luft och vatten, desto mer utsatt: en skarp alptopp exponerar väldigt mycket yta per volymenhet, medan en flack häll exponerar väldigt lite yta per volymenhet.
Hällens ytråhet	Ytans råhet spelar roll på samma sätt som hällens form och förekomst av sprickor: ju råare (skrovligare) yta, desto större specifik yta för vittringsmekanismer att agera på. Ytråheten ökar grogrund för etablering av till exempel lav och fortsatt vittring, mekanisk (biologiskt) såväl som kemisk (syror). En mindre rå bergyta (exempelvis av isen slipad häll) har mindre ytråhet och är därmed mindre utsatt.

Hällens orientering mot solen	En solbelyst hällsida genomgår fler frys-tö-cykler under en vinter jämfört med en ej solbelyst dito. Frostsprängning verkar genom ett uttröttande arbete och ju fler cykler, desto större påverkan.
-------------------------------	---

Tabell 4. Externa faktorer som styr vittring och dess hastighet:

Faktor	Förklaring
Klimat - temperatur	Temperaturen är viktig för både mekaniska och kemiska vittringsprocesser. Kemisk vittring ökar med ökad temperatur, medan frostsprängning är allvarligast när temperaturen regelbundet pendlar kring 0 °C. Dock krävs som alltid vatten, för såväl kemisk vittring som för frostsprängning. Vittringshastigheten är därmed låg i öken- eller arktiskt klimat, medan den är som snabbast i tropiskt klimat eller solvärmda klippsidor i fuktiga bergsområden.
Klimat – fuktighet, nederbörd	Alla kemiska vittringsprocesser och flera av de mekaniska kräver tillgång till vatten, så nederbördsmönstret är viktigt, det vill säga inte bara hur mycket nederbörd som kommer på årsbasis utan hur denna är fördelad, hur mycket som stannar kontra hur mycket som rinner av eller avdunstar, och så vidare.
Växtlighet	Växtlighetens art och omfattning är mycket viktig. Rötter kan tränga ner i befintliga sprickor och vidga dessa, men lika viktigt är förmultningen av växtrester (barr, löv, grenar) och de organiska syror dessa ger upphov till. Sannolikt ger olika typer av vegetation upphov till olika problem, beroende på om det är barrskog, blandskog, eller lövskog. Lavar som växer på hällar kan påverka dels genom rotsprängning med sina tunna rottrådar (hyfer) som till och med kan ta sig in i mikrosprickor och vidga dessa, dels genom bildande av olika syror som påverkar vattenkemin mikrolokalt.
Markanvändning	Berghällens närmiljö kan påverka vittringshastigheten. Ligger hällen vid väg som vinterväghålls med avsningsalter eller havsnära kan salter spridas till hällen och bidra till vittringsprocesserna. Frostsprängning är i regel kraftfullare i salt vatten än i sött vatten. Betande djur kan bidra med avföring och urin som kan ha relativt aggressiva pH-nivåer (låga eller höga).
Vattnets beskaffenhet	Vatten är som tidigare nämnts ett måste för effektiv vittring. Kemisk vittring är i regel som långsammast vid neutralt pH (vid normala temperaturer är pH 7 neutralt) och när det är fritt från andra naturliga eller av människa tillförda kemikalier, och ökar generellt med minskande eller ökande pH och närvaro av olika kemikalier i lösning. Regnvatten har generellt pH 4–6, men kan påverkas av vegetation till lägre nivåer.
Mänskliga åtgärder som kan ha påverkat kemisk vittring	Historiskt har olika ämnen använts för rengöring av hällar med hållristningar, till exempel klorin och kaustiksoda. Klorin är handelsnamn för natriumhypoklorit, ett medel som dels är starkt basiskt och därmed påskyndar kemisk vittring av framför allt kvarts och fältspat, dels oxiderande och därmed påskyndar vittring av järnförande mineral som biotit. Kaustiksoda är starkt basiskt och påverkar fältspat och kvarts på samma sätt som klorin.

Geologi i hällristningsområden

I Sverige har tidigare regolit sannolikt skalats bort genom erosion under senaste istiden (1,2 miljoner år sedan fram till nu). I tropiska områden där vittring pågått i 100 000-tals år eller till och med miljontals år, kan berggrunden vara djupvittrad ner till 10-tals eller tom 100-tals meters djup; denna regolit kan närmast liknas vid lösa jordarter.

I Tanumsområdet dominerar den välkända Bohusgraniten, som sträcker sig från Gullmarsfjorden vid Lysekil och hela vägen upp till riksgränsen och in på norska sidan, där den är känd som Iddefjordsgranit.



Figur 4. Granithäll vid Fossum/Balken i Tanums världsarv med hällristning L1967:2462 (RAÄ nr Tanum 262:1). I mitten av bilden och i hällens borte del syns ytor där millimeter- till centimetertjocka stycken av bergytan har sprängts loss parallellt med hällytan (exfoliering). Orsaken är sannolikt horisontella svagheter i graniten till följd av avlastning av borteroderad bergmassa och inlandsis, men effekten kan också ha förstärkts genom frostsprängning eller eldning. Foto: E-K Granberg, Länsstyrelsen Västra Götaland 2022.

Mineralogiskt domineras bohusgraniten av kalifältpat, plagioklas och kvarts, men innehåller också en del biotit och/eller muskovit ("svart eller vit glimmer"). I mindre mängd, det vill säga någon procent, förekommer även magnetit, ilmenit, allanit, apatit, monazit och xenotim. Färgmässigt finns Bohusgraniten i helt röda till helt grå varianter, men även "blandningar" däremellan (rödgrå till gråröd), beroende på varierande halter av ingående mineral. Texturellt finns också olika varianter, från jämnkornig och finkornig (ca 1 millimeter) till ojämnkornig (porfyrisk) och medel- till grovkornig (2–10 millimeter). Ställvis genomsätts graniten av ådror och gångar av pegmatit (mycket grovkornig "granit"), men det förekommer också inslag av andra bergartsfragment som granitmagman plockade

med sig upp från existerande sidoberg, när den steg upp genom jordskorpan. Dessa kallas för xenoliter, från grekiskans xeno (främmande) och litos (sten). Dessa kan vara från decimeterstora till flera meter eller till och med 10-tals eller 100-tals meter, och består i regel av bergarterna ådergnejs, amfibolit eller metagråvacka. Granit är i regel en mycket vittringsbeständig bergart, särskilt de finkorniga varianterna, men kan vara mer lättvittrad när den innehåller högre halt av biotit och/eller mikrosprickor, eller för den delen där den genomsätts mer frekvent av makroskopiska sprickor. En annan svaghetspunkt för Bohusgraniten är de xenoliter som uppträder mer eller mindre frekvent, såsom nämnts ovan. Dessa är genomgående av mer lättvittrade bergarter, vilket innebär att xenoliternas yta i regel ligger några millimeter till centimeter lägre än omgivande granit.



Figur 5. Bohusgranit med ett ca halvmeter långt främmande block (xenolit) av mer mafisk (mörk, järn och magnesiumrik) sammansättning, som är mer lättvittrad än den omgivande graniten och därmed bildar en några centimeter djup försänkning. Notera även en kvartsrik centimeterbred ådra som sneddar genom den mafiska xenoliten i övre högra hörnet. Kvartsådern är hårdare och "står upp" i förhållande till den mer lättvittrade mafiska bergarten. Foto: E-K Granberg, Länsstyrelsen Västra Götaland 2021.

Även om de flesta av Iddefjordsgranitens plutoner utgörs av granit, så förekommer det också två plutoner av annan sammansättning: granodiorit och diorit. Mineralogiskt domineras graniterna av kalifältspat, plagioklas och kvarts, medan granodioriten i huvudsak innehåller kvarts och plagioklas och dioriten plagioklas och amfibol. Utöver dessa huvudmineral förekommer biotit, muskovit, hornblende och/eller klorit. Jämfört med Bohusgraniten rör sig Iddefjordsgraniterna färgmässigt i ett snävare spektrum, från grå till rödgrå. Texturen är i regel jämnkornig och fin- till medelkornig (cirka 1–5 millimeter), även om det ställvis finns ojämknorniga (porfyriska) varianter. Precis som i

Bohusgraniten genomslås Iddefjordsgraniten av pegmatitådror och det finns också xenoliter av andra bergarter.



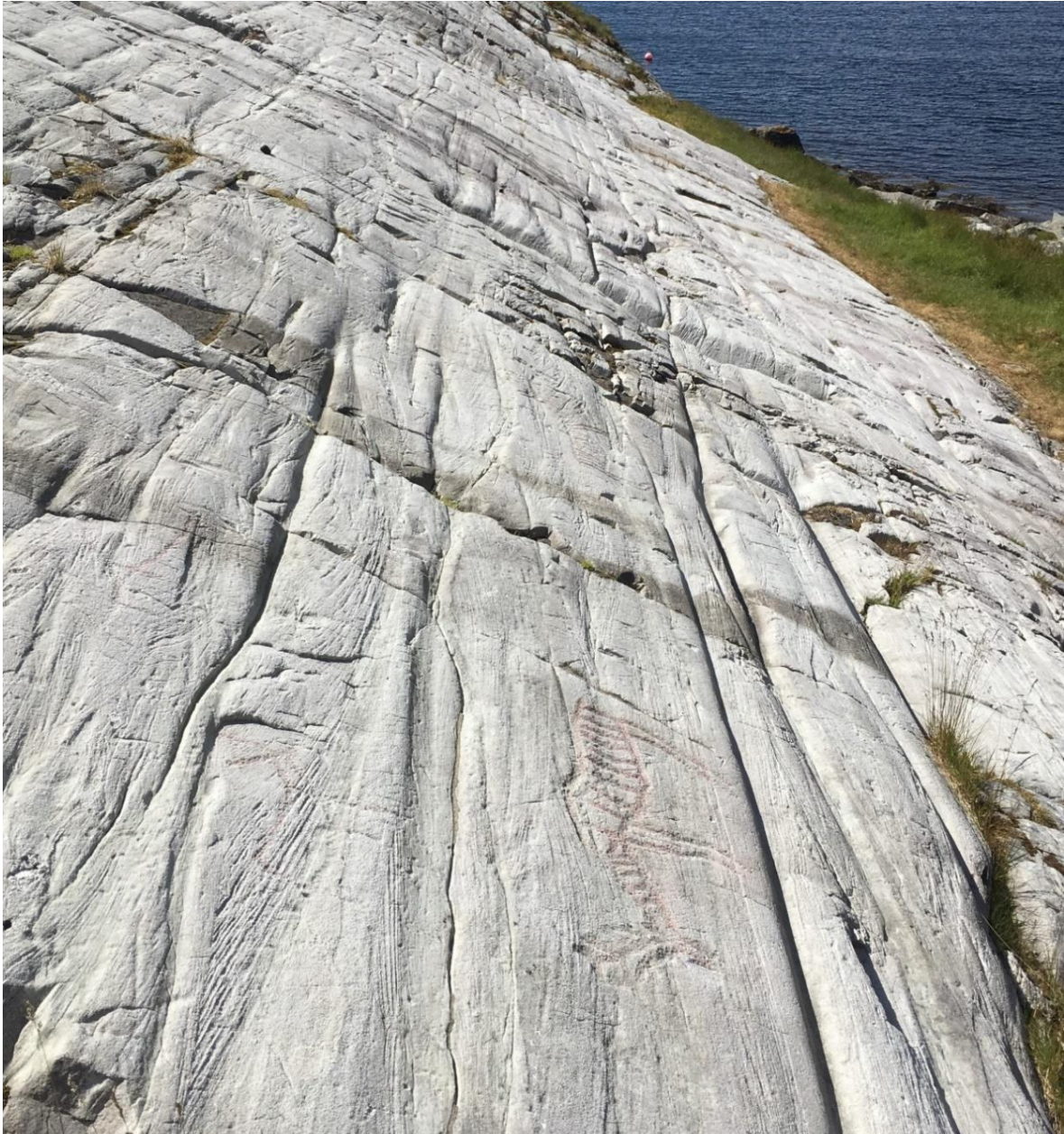
Figur 6. Hällristning 219:4 på hällristningsfältet Hafslund 1 i Sarpsborg består av Iddefjordsgranit. På hällen syns också stora exfolierade partier. Foto: Henrik Zedig, Länsstyrelsen Västra Götaland 2022.

Amfibolit består av kalciumrik plagioklas och amfibol och är relativt homogen, medan metagråvacka har en tydlig struktur i det att den utgörs av alternerande ljusa och mörka band; de ljusa banden består av kvarts och fältspat och är något grövre medan de mörkare är rikare på glimmer (biotit och muskovit) och något mer finkorniga. Ådergnejsen har också den en tydlig bandad struktur med mörkare mellanmassa av plagioklas och biotit, som alternerar med ljusare ådror dominerade av kvarts och kalifältspat. Speciellt amfiboliten är mer lättvittrad än graniten, men även de plagioklas och biotit-dominerade lagren i ådergnejsen och metagråvackan är mer lättvittrade och ger en heterogen vittringsprofil, där kvarts-fältspat-ådrorna sticker upp.

I Östfold dominerar hällristningsområdet av fyllit. Fyllit är en metamorf bergart som ursprungligen varit en lerskiffer, det vill säga en sedimentär bergart främst bestående av lermineral och kvarts i siltstorlek som svetsats samman till en bergart. Vid metamorfos, processer i jordskorpan som under förhöjd temperatur och/eller tryck leder till att mineralen i en bergart omkristalliserar och förgrovas, så omvandlas lerskiffer (shale) till metamorf skiffer (slate). Vid fortsatt metamorfos går slate till fyllit och därefter glimmerskiffer, för att slutligen om temperaturen är tillräckligt hög, ombildas till gnejs. I fylliten har lermineralen omvandlats till glimmermineral, medan fältspat och kvarts i stort är som de var. Den "lilla" skillnaden gör att fyllitens yta får en helt annan lyster än vanlig lerskiffer, som i regel är matt i ytan. Eftersom fylliten är rik på glimmermineral och dessa är relativt lättvittrade (speciellt biotit och klorit, medan muskovit är tuffare), så är fyllit som tumregel mer vittringsbenägen jämfört med granit. Dessutom är fylliten folierad, det vill säga den har en planstruktur längs vilken den är svagare och lätt spricker upp, vilket gör att vatten kan ta sig in lättare och utöva både mekanisk (frostsprängning) och kemisk vittring.

I Vestlandet finns hållristningar på så skilda bergarter som fyllit, metamorf sandsten (kvartsit), samt gnejs. Fylliten är en lågmetamorf folierad bergart som består av kvarts, muskovit och klorit, där kvartsrika millimeter- till centimetertjocka skikt alternerar med tunnare glimmerrika skikt (≤ 1 millimeter tjocka). Andelen muskovit är större än andelen klorit. Fylliten innehåller också andra mineral, men i relativt små mängder. Särskilt kan dock nämnas ankerit, ett blandat karbonatmineral, som kan misstänkas skulle vittra lätt. Studier har gjorts på fylliten, som bekräftar de teoretiska antaganden man kan göra om fyllitens vittringsbenägenhet: muskovit och kvarts är i stort sett opåverkade av kemisk vittring, medan klorit och ankerit tydligt har påverkats. Ankerit är ställvis helt upplöst och lämnar efter sig små gropar i ytan, medan klorit brutits ner till lermineral och järnhydroxider. Kloritvittringen försvagar glimmerskikten, vilket på sikt kan påverka de mer beständiga kvartsskikten när den förra bryts ner och sammanhållningen i materialet försvagas och ger utrymme för vatten att tränga in och öka risken för frostsprängning. Gnejsen som beskrivs från Nedre Tasta är sannolikt en paragnejs, det vill säga bildad genom metamorfos av sedimentära bergarter, då den innehåller mycket kvarts, en del muskovit, samt en mindre mängd albit fältspat. Dessa mineral är alla robusta mot kemisk vittring, men spårmängder av biotit och vissa karbonatmineral insprängda i grundmassan utgör svagheter, vilket också noterats i undersökningar: karbonatmineral har delvis gått i lösning och lämnat järnhydroxid efter sig och även biotit är ställvis angripen.

I hållristningsområdet i Vingenfeltet (Bremangers kommun) består bergarten av arkos som är en sedimentär klastisk bergart av sandstentyp, som jämte kvarts innehåller en hel del fältspat (mer än 20%). Därutöver innehåller arkos normalt en del glimmer, samt litiska fragment (klaster som utgörs av mineralaggregat, det vill säga bergarter snarare än fria mineralkorn). Kornstorleken är typiskt grövre än för ren kvartssandsten. Vittringsresistensen beror till stor del på hur bergarten är cementerad: kvarts- och järnoxidcement är vanligtvis mer motståndskraftiga mot kemisk och mekanisk vittring, medan kalcitcement är mer känsligt för kemisk vittring. I hällen syns skiktning, korsskiktning och diskontinuiteter, strukturella element som är vanliga i olika sandstentyper.



Figur 7. Hällristningar i bergarten arkos (sandsten) på Vingenfeltet i Bremangers kommun. Foto: Henrik Zedig 2018.

Referenser

Tarback, E. och Lutgens, F., 1999. *Earth – an introduction to physical geology (6th edition)*. Prentice Hall.

Eliasson, T., Ahlin, S. och Petersson, J., 2003. *Emplacement mechanism and thermobarometry of the Sveconorwegian Bohus granite, SW Sweden*. GFF, 125:3, 113-130.

Albarède, F., 2003. *Geochemistry – an introduction*. Cambridge university press.

Clowes, A. och Comfort, P., 1998. *Processes and landform (2nd edition)*. Oliver & Boyd.

White, A. och Brantley, S., (redaktörer), 1995. Chemical weathering rates of silicate minerals. *Reviews in mineralogy* 1995, 31 (1): 1–22.



Länsstyrelsen
Västra Götaland