



Stockholm  
University

# Bachelor Thesis

Degree Project in  
Geology 15 hp

## En fältstudie av relativ post-glacial vittring mellan silikat- och karbonatbergarter på Utö i Stockholms skärgård

Karolina Lagerquist



Stockholm 2024

Department of Geological Sciences  
Stockholm University  
SE-106 91 Stockholm

# En fältstudie av relativ post-glacial vittring mellan silikat- och karbonatbergarter på Utö i Stockholms skärgård

Karolina Lagerquist

## Sammanfattning

Vittring är en av de viktigaste processerna i den långa kolcykeln som reglerar klimatet över tid, därav är det av intresse att studera vittringshastigheter och vad som påverkar dessa. Denna studie baseras på fältarbete på nordöstra Utö i Stockholms skärgård för att undersöka relativ post-glacial vittring mellan karbonat- och silikatbergarter på berghällar som exponerats de senaste tusen åren. Fältarbetet bestod av visuella observationer, mätningar med en handhållen XRF samt kvantitativa mätningar av den relativa vittringsskillnaden. Huvudsyftet var att kvantifiera vittringshastigheter samt verifiera om karbonatbergarter vittrar snabbare än silikatbergarter. Det går att skymta en linjär trend av hur den relativa vittringsskillnaden mellan karbonatbergarterna och silikatbergarterna har förändrats över tid. Däremot visar resultatet också på att karbonatbergarten är mer vittringsbenägen initialt. Den relativa vittringsskillnaden ökar med tiden som berget varit exponerat för vittring över havsytan. Initialt är den relativa vittringshastigheten högre då berget först blir exponerat för vittring. Under en tid av ~700 år halveras den beräknade relativa vittringshastigheten från 100  $\mu\text{m}/\text{år}$  till 50  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Detta visar på att vittringshastigheter ej är linjära och är föränderliga över tid.

# Innehållsförteckning

Figurförteckning.....	2
Tabellförteckning.....	3
1 Inledning.....	4
1.1 Utös geologi / geologin i studieområdet .....	6
1.2 Vittring & klimatet.....	6
1.3 Vittring.....	7
1.3.1 Kemisk vittring.....	7
1.3.2 Fysisk vittring.....	8
1.4 Vittringshastighet.....	9
1.5 Absoluta och relativa vittringshastigheter.....	9
1.6 Vittring & erosion i samspel .....	9
2 Metod- och lokalbeskrivning.....	11
2.1 Lokalbeskrivning .....	11
2.1.1 Lokal 1.....	11
2.1.2 Lokal 2.....	12
2.2 Metodbeskrivning .....	13
2.2.1 Fältobservationer .....	13
2.2.2 Karakterisering av silikatbergarten.....	13
2.2.3 Kvantitativ studie.....	13
2.2.4 XRF- röntgen.....	16
3 Resultat.....	17
3.1 Fältobservationer.....	17
3.2 Kvantitativa data / kvantitativ studie .....	24
4 Diskussion.....	28
5 Slutsats.....	31
6 Referenser.....	32

## Figurförteckning

Figur 1. Översikt över mätområdet .....	4
Figur 2. Strandförskjutningskurva, Utö .....	5
Figur 3. Översiktsbild lokal 1 .....	12
Figur 4. Översiktsbild lokal 2 .....	13
Figur 5. Illustration över hur höjdmätningar för mätpunkterna utfördes.....	14
Figur 6. Mätning av vittringsskillnader .....	15
Figur 7. Vittring nära vattnet vid lokal 2 .....	17
Figur 8. Vittring nära vattnet vid lokal 2 .....	18
Figur 9. Vittring nära vattnet vid lokal 1, mätpunkt 1.36 och 1.361 .....	18
Figur 10. Vittring nära vattnet vid lokal 1, mätpunkt 1.11 .....	19
Figur 11. Vittring högre upp på hällen vid lokal 1.....	20
Figur 12. Exempel på spår av honeycomb weathering, mätpunkt 1.35.....	20
Figur 13. Exempel på spår av honeycomb weathering, mätpunkt 1.29.....	21
Figur 14. Kiselrikt skarn.....	22
Figur 15. Ganska kiselrik med parallella sprickor eller gröna mineral synliga, utan strålande mineral	22
Figur 16. Skarn med parallella sprickor eller gröna mineral synliga samt strålande mineral .....	23
Figur 17. Skarn med mestadels strålande mineral .....	23
Figur 18. Resultat för de kvantitativa mätningarna av den relativa vittringsskillnaden (d) .....	25
Figur 19. Resultat för vittringshastigheten per år .....	26

## **Tabellförteckning**

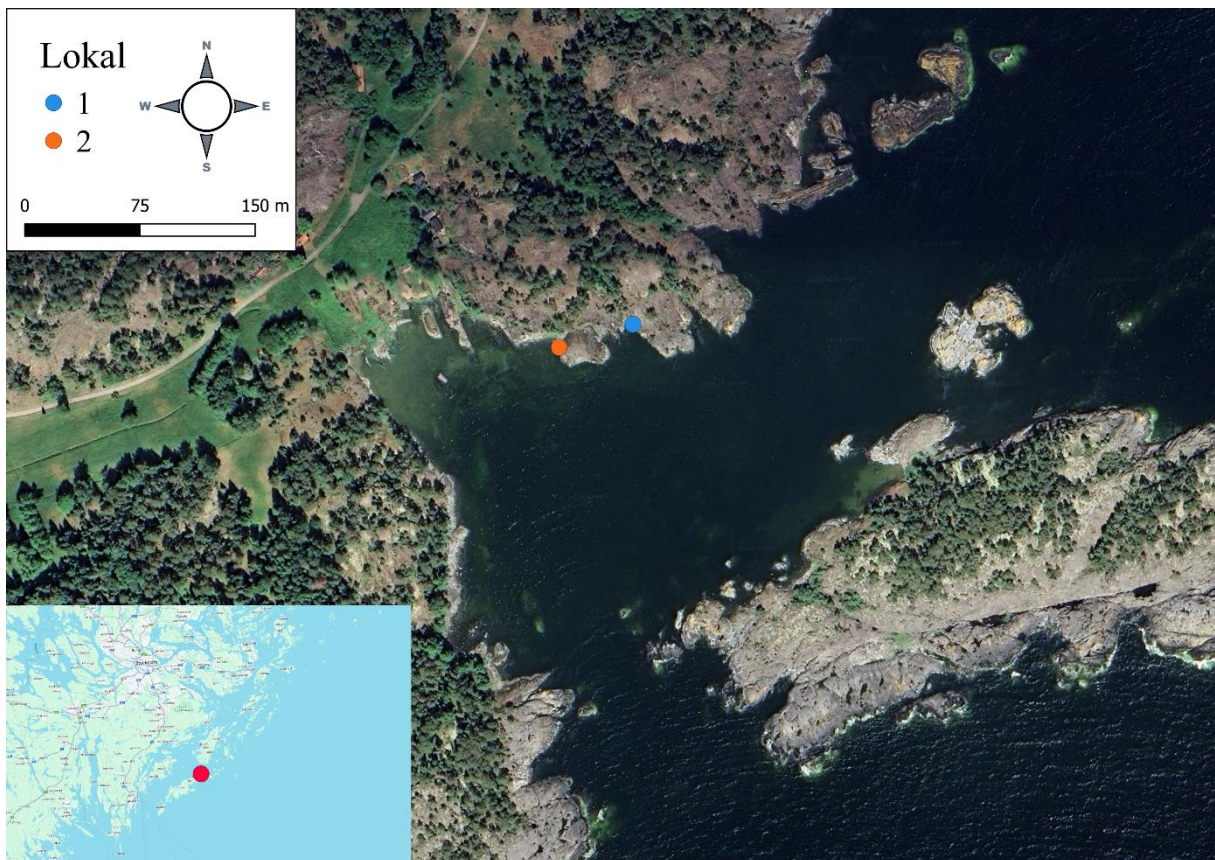
Tabell 1. Tabell över mätdatat för dolomitstenen vid Lokal 1 .....	27
--	----

# 1 Inledning

I denna studie undersöks relativ post-glacial vittring av silikat- och karbonatbergarter på Utö i Stockholms skärgård. Hypotesen är att karbonatbergarter vittrar snabbare än silikatbergarter. Tidigare studier visar att karbonatbergarter vittrar snabbare (e.g. Bluth & Kump 1994, Xiong et al. 2022). Den här studien ämnar undersöka om mätningar av relativ vittring kan verifiera eller falsifiera detta.

Genom att studera bergarter kan det ge oss mer data som kan bidra till vetenskapen i form av fler lärdomar och insikter om hur jorden och dess naturliga processer fungerar. På kortare sikt påverkas jordens klimat och koldioxidnivåerna i atmosfären av den korta kolcykeln vilket innefattar fotosyntes och nedbrytning. I den långa kolcykeln är vittring av silikatbergarter den enda processen som är en sänka för koldioxid, varpå vulkaner och metamorfa reaktioner är de processer som tillför koldioxid (Kasting 2019). Att människans fossilutsläpp tillhör den långa kolcykeln gör att det är av särskilt intresse att studera vittring. Utöver hypotesen är huvudsyftet i denna studie att bättre kunna kvantifiera vittringshastigheter.

Studien utfördes på Utö i Stockholms skärgård (Figur 1) där det finns väl exponerade berghällar där silikat- och karbonatbergarter är lokaliserade intill varandra. Dessa hållar lämpar sig väl för att mäta relativ vittring mellan två olika bergarter på samma höjd över havet, då bergarterna befinner sig intill varandra i kontinuerlig följd på flertalet höjdmeter över havet. Utö är en av de största öarna i Stockholms skärgård och är belägen i den södra delen av Stockholms skärgård med ett kallt, tempererat maritimt klimat. Föregående år i Sverige var medeltemperaturen 5,2 °C (SMHI 2023) och årsnederbörden för 2021 var 700 mm (SMHI 2024).

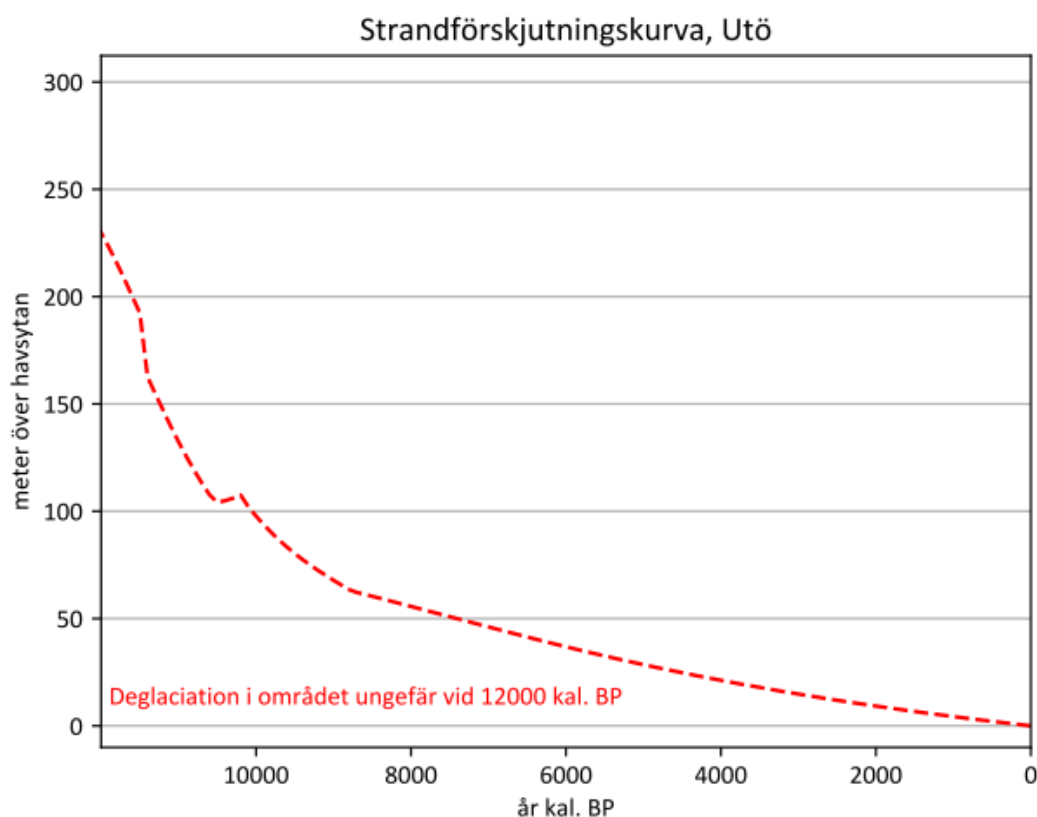


Figur 1. Översikt över mätområdet  
Koordinater för lokal 1: Lat. 58.976269° Long. 18.364610°, lokal 2: Lat 58.976170°, Long. 18.363825°. Referenssystem: SWEREF99 TM – Projected. Kartan är baserad på material från Google

I fält framgår det att vittring tilltar mer då berget kommer i kontakt med luft och att vi nästintill kan anta att vittringen varit försumbar då bergarten befunnit sig under havsytan (Figur 8). Då Östersjöns havsnivå varit relativt oförändrad de senaste tusentals åren, har bergarterna blivit exponerade mestadels på grund av landhöjning. Enligt lantmäteriet sker en landhöjning på ca 5 mm/år i området där Utö är beläget.

Däremot finns det strandförskjutningsmodeller som tar hänsyn till hur strandlinjen förflyttats över tid (Sveriges geologiska undersökning 2015). Strandlinjens förskjutning är ett resultat av hur eustasi och isostasi samverkar. Eustasi syftar till hur havsnivån förändras varpå isostasi syftar till då det sker en landhöjning eller landsänkning i det aktuella området då jordskorpan rör sig. Den relativa havsnivån varierar inte bara i världshaven utan även lokalt samt regionalt beroende på olika faktorer. Utmed Sveriges kust i Östersjön har landhöjningen varit dominerande sedan den senaste istiden, däremot är det av värde att ta med flera möjliga faktorer som kan ha påverkat havsnivån i området (Peterson Becher 2022). Då denna studie ämnar undersöka och kvantifiera hur vittringen förändrats sedan berget steg upp ur havet är det en viktig aspekt hur strandlinjen förflyttats. Data över hur strandförskjutningen förändrats i området kommer därför att tillämpas i denna studie. Studiens mätningar kan därmed ge oss en uppfattning om hur den relativa vittringshastigheten varierat över tid.

Enligt strandförskjutningskurvan (Figur 2) går det att utläsa att förflyttningen av strandlinjen varit relativt konstant de senaste tusentals åren. Baserat på data från SGU (Sveriges geologiska undersökning) över strandförskjutningen regionalt i området där studien genomfördes beräknades ett medelvärde för de senaste 1200 åren (Sveriges geologiska undersökning 2024). Detta beräknades till en strandförskjutning på 4,3 mm/år för landmassa som ligger mellan 0 och 5,2 m ö h.



Figur 2. Strandförskjutningskurva, Utö  
Kal. BP förkortningen står för kalibrerade år enligt kol-14 metoden före nutid, varpå nutid är 1950. Strandförskjutningskurvan är baserad på data från SGU (Sveriges geologiska undersökning 2024)

## 1.1 Utös geologi / geologin i studieområdet

Enligt Stephens et al. (2009) är Utö en del av Bergslagens litotektoniska enhet. Enheten består av sedimentära och vulkaniska bergarter som har bildats mellan 1.91-1.89 Ga. Dessa bergarter blev intruderade av magmatiska bergarter lite senare, var på de senare genomgick metamorfos under den svekokarelska orogenesisen (1,9-1,8 Ga). Utö ligger i den sydöstra delen av Bergslagens litotektoniska enhet och består mest av metasedimentära och magmatiska bergarter.

De sedimentära bergarterna på Utö består mestadels av kemiskt utfällda karbonatbergarter men det finns även kemiskt utfällda järnformationer samt klastiska sedimentära avlagringar. De magmatiska bergarterna består mestadels av extrusiva vulkaniska avlagringar varav en mindre proportion består av intrusiva magmatiska bergarter. Det finns inte dateringar för alla formationer på Utö men det finns en datering av zirkoner i de vulkaniska bergarterna där åldern fastställts till  $1904 \pm 4$  Ma (Lundström et al. 1998).

I området för studien dominerar sedimentära avlagringar av karbonatbergarter, inslag av olika typer av silikatbergarter samt en sedimentär klastisk bergart. Därefter har alla bergarter genomgått metamorfos. Lagerföljden i mätområdet börjar med karbonatbergarter (metadolomitsten) innehållande mindre partier av skarn, mestadels på dm-skala. Området varvas av karbonatbergarter och kiselrika bergarter, dessa har observerats i fält som skarn samt metaryoliter. Dessa bergarter överlappar sedan mer eller mindre med nästa avlagring som är en klastisk sedimentär bergart som består av metasiltsten och metasandsten. Bergarten har en hög järnhalt. Mäktigheten av denna bergart fortsätter precis intill mätområdet för studien varpå den delvis överlappar gradvis med dolomitstenen nära lokal 1.

## 1.2 Vittring & klimatet

Studiens huvudsyfte är att bättre kunna kvantifiera vittringshastigheter. Detta är viktigt ur ett samhällsperspektiv eftersom vittring spelar en mycket viktig roll i klimatsystemet.

I dagsläget lever vi på en planet med ett klimat där det sker en ökning av medeltemperaturen, koldioxidhalten och andra växthusgaser i atmosfären. Ökningen av medeltemperaturen har tilltagit de senaste decennierna (IPCC, 2021) i samklang med att koldioxidnivåerna har ökat. Detta i takt med att vi människor släpper ut alltmer koldioxid i atmosfären, framför allt genom förbränning av fossila bränslen och cementproduktion (IPCC, 2021). Utöver dessa ”fossila” utsläpp påverkar människan även klimatet genom lantbruk och andra aktiviteter (IPCC, 2021). Utsläppen orsakade av människan påverkar och blir en del av den korta kolcykeln. De naturliga processerna i den korta kolcykeln innefattar fotosyntes, celandning och nedbrytning av organiskt material. Vid utvinning och förbränning av fossila utsläpp blir det en onaturlig påverkan på klimatet då bildandet av kol och olja sker under miljontals år och är en del av den långa kolcykeln. De storskaliga geologiska processerna som påverkar den långa kolcykeln är vulkanism, metamorfos och vittring. Eftersom vi börjat och även fortsätter att påverka den långa kolcykeln är det av särskilt intresse att studera vittring, då vittring är den enda processen som tar upp koldioxid i denna cykel.

På en geologisk tidsskala (miljontalsår) är vittring av silikater den enda sänkan för atmosfärisk koldioxid (Huh, 2010). Vittring sker enligt kemins förutsättningar och fysikens grundlagar, om temperatur och luftfuktighet höjs kan detta påverka framför allt de kemiska reaktionerna och i vilken hastighet de sker. Med en ökad temperatur sker förmodligen en ökad vittringshastighet (Walker et al., 1981) men mätdata från paleocen-eocen-termalmaximumet (McInerney och Wing, 2011) visar att responstiden är mycket lång (tio till hundratals tusen år).

I den nuvarande studien samlas mätdata in för att utforska vittringsprocesser och dess hastigheter. Ur ett större klimatperspektiv vore det av intresse att utforska möjligheter för hur vittringshastigheter kan kvantifieras bättre och med mindre felmarginaler. Mer och bättre data på detta skulle kunna öka

förståelsen för vad som styr dessa samt att det skulle kunna bidra till modellering av vittring för att kunna svara på frågeställningar likt:

- ”Hur lång tid skulle det ta för vittring av silikatbergarter att ta upp den koldioxid vi människor släppt ut?”
- ”Hur mycket koldioxid kan silikatbergarter ta upp på denna latitud?”
- ”Vilken typ av vittring dominerar i detta klimat?”

## 1.3 Vittring

De olika typerna av vittring delas in i de två huvudkategorierna kemisk och fysisk vittring. Vittring sker då exponerat berg bryts ned genom processer som sker vid eller nära jordens yta. Jordens atmosfär & hydrosfär skapar gynnsamma förhållanden för att vittring av mineral ska kunna ske. Det omfattande djur-, bakterie- och växtliv som finns på jorden har också en betydande del i vittringsprocesserna (Marshak 2019). Vidare baseras avsnitten om vittring och vittringshastighet på Marshak (2019).

### 1.3.1 Kemisk vittring

Kemisk vittring sker då mineral bryts ned eller alterneras genom kemiska reaktioner då de kommer i kontakt med luft eller vattenlösningar. Vid varmare temperaturer sker denna process oftast snabbare, däremot spelar fuktighet också in och därav så vittrar en bergart kemiskt mycket långsammare i öknen än i regnskogen till exempel. Av denna anledning kan bland annat latitud, altitud, biotop, samt lokala klimat- och väderförhållanden påverka den kemiska vittringens hastighet. Kemisk vittring kan ske på flera sätt såsom upplösning, hydrolys, oxidering, hydrering samt med hjälp av biologiska processer.

#### 1.3.1.1 Kemisk upplösning

Kemisk upplösning sker då berg kommer i kontakt med vatten varpå joner i mineralerna kan övergå från att vara i fast form till löst form i vattnet. Vilket mineral det är påverkar om det vittrar mer eller mindre genom kemisk upplösning, även pH-värdet på vattnet påverkar lösligheten. När regn kommer i kontakt med koldioxid i luften eller när vatten perkolerar och reagerar med organiskt material i jorden så kan pH-värdet i vattnet sjunka då mer kolsyra bildas, vilket leder till ökade vittringsförhållanden för vissa bergarter. Salt och karbonater är de mineral som vittrar mest effektivt genom kemisk upplösning varpå kvarts vittrar till viss mån. Kalcit vittrar exempelvis mer effektivt genom kemisk upplösning då vattnet är surare.

#### 1.3.1.2 Hydrolys

När mineral kommer i kontakt med vatten kan det leda till att kemiska reaktioner sker, vilket kallas för hydrolys. Mineral reagerar med vatten varpå det bildas ett annat mineral samt fria joner i vattnet. Hydrolys vittrar vanligen fältspater, glimmer och mafiska mineral (såsom amfibol, pyroxen och olivin) med ökade vittringshastigheter. Även kvarts kan vittra genom hydrolys men med en väldigt låg vittringshastighet, därav är det tämligen sällsynt och sker exempelvis i samband med kraftiga regnfall. Allt som oftast blir kvarts kvar som en rest då den är vittringsbeständig.

#### 1.3.1.3 Oxidering

Vid oxidering sker en förflyttning av elektroner från ett mineral till ett annat. Detta sker oftast då ett mineral reagerar med syre för att sedan bilda ett eller flera mineral.

#### 1.3.1.4 Hydrering

I en del fall då vatten kommer i kontakt med vissa mineraler, vanligtvis lermineral, kan vattenmolekyler absorberas in till mineralet. Kemiska bindningar av svagare grad mellan mineralet och

vattenmolekylerna resulterar i att mineralet expanderar. Detta kan leda till att krafter utför en stress på mineralet vilket gör att det sönderdelas.

#### *1.3.1.5 Kemisk vittring orsakat av biologiska processer*

Biologiska processer hjälper till mycket vid kemiska vittringsprocesser. Det är många olika typer av organismer, såsom lavar, svampar och växter som vill komma åt näringsämnen i mineral. För att komma åt näringsämnena utsöndrar organismerna organiska syror som löser upp mineralen. Även mikroorganismer såsom bakterier och arkéer använder sig av energin i de kemiska bindningarna i mineralen för att tillgodose sig själva med energi.

### **1.3.2 Fysisk vittring**

Grundprincipen för att fysisk vittring ska ske är att någon form av kraft eller åverkan utövas på berget. Då fysisk vittring sker bryts berget ned till regolit bestående av klaster i olika storlekar, allt från lerpartiklar till block. En förutsättning för att fysisk vittring ska ske effektivt är sprickbildning. Berg som tidigare varit djupt ner i jordskorpan kan blottläggas genom erosion och tektoniska krafter. Då berget blottläggs och befinner sig närmare jordens yta minskar trycket och temperaturen. Detta kan leda till volymförändringar vilket kan leda till sprickbildning. När det har bildats sprickor i berget kan olika typer av fysisk vittring lättare sönderdela berget då bergytan som exponeras för luft och vatten blivit större. Fysisk vittring kan ske genom frostsprängning, rotsprängning, saltsprängning, termisk expansion samt djur- och människans påverkan.

#### *1.3.2.1 Frostsprängning*

Om det finns vatten i sprickor i berget, kan detta generera frostsprängning om vattnet fryser till is. Vid fasövergången från vatten till is kan denna utveckla ytterligare sprickbildning eller dela upp berget i mindre klaster, då is har större volym än vatten.

#### *1.3.2.2 Rotsprängning*

Trädrötter kan liksom vatten leta sig in i sprickor i berget. När trädrötterna växer genererar de krafter på berget vilket leder till att sprickorna i berget blir större.

#### *1.3.2.3 Saltsprängning*

Saltsprängning är vanligt i torrare klimat där lösta salter i vattnet faller ut då vattnet avdunstar. När saltkristallerna faller ut i öppna porutrymmen i berget och växer till sig utövar de en kraft på den omkringliggande delen av bergarten. Detta försvagar berget och vid ytterligare erosion av till exempel vind och vatten så sönderdelas berget till mindre delar. Saltsprängning kan också ske då havsvatten sköljs upp eller då det sprids med vinden på berghällar som ligger vid kusten. Havsvattnet perkolerar ner i stenen, torkar upp och genererar över tid en vittring som namnges *honeycomb weathering* på engelska, då stenen får ett utseende som påminner om cellerna i en bikupa.

#### *1.3.2.4 Termisk expansion*

När en bergart hettas upp, vanligtvis av bränder, genererar detta att den översta delen av berget expanderar. När berget svalnar kontraherar det, det utför krafter på berget som gör att skalliknande lager av berget lossnar. Denna process kan även ske vid upphettning av solen i väldigt varma områden men orsakar då inte lika omfattande lager av berget lossnar.

#### *1.3.2.5 Djur- och människans påverkan*

Sönderdelning av berget kan åsamkas av djur då de gräver eller på annat sätt utsätter berget för fysisk påverkan. Människan, som är den levande organism som orsakar störst påverkan i form av fysisk vittring i dagsläget gör detta till största del genom gruvdrift. Det finns även andra sätt där människan använder sig av jordens resurser eller påverkar berggrunden i form av fysisk vittring.

## 1.4 Vittringshastighet

Olika typer av vittring kan ske på varierande tidsskalor och med olika vittringshastigheter beroende på vilka bergarter som vittrar. Vilket klimat som råder och hur omgivningen ser ut där dessa bergarter befinner sig i är också faktorer som påverkar vittringshastigheten. Vilken typ av vittring som sker påverkar också tidsskalan för vittringen, då vittringshastigheten för de olika typerna av vittring varierar. Generellt sker fysisk vittring av olika bergarter med liknande hastighet jämfört med kemisk vittring där en del mineraler vittrar lättare och snabbare. Kemisk och fysisk vittring kan samverka och därmed hjälpa varandra att accelerera processen av nedbrytandet av berget. Hur benägen en bergart är till kemisk vittring påverkas av bergartens mineralsammansättning. En grundprincip är att olika mineral är olika stabila vid jordens yta i enighet med Bowens reaktionsserier. För silikatmineraler gäller att den ordning i vilken de kristalliserar från magman är beroende av temperaturen samt den kemiska sammansättningen av magman. De mineral som kristalliserar först ur magman vid högre temperaturer tenderar att vittra snabbare och vara mer instabila när de exponeras vid jordens yta än de som kristalliserar vid lägre temperaturer. Skillnaden i varför vissa mineral vittrar snabbare beror på bland annat på den kemiska sammansättningen samt kristallstrukturen.

## 1.5 Absoluta och relativa vittringshastigheter

De flesta studier på vittringshastigheter använder sig av mätning av vittringsprodukter från floder (e.g. Gaillardet et al. 1999; Lee 2013; Ryu 2008). I denna typ av studier är det möjligt att beräkna denudationshastigheten, vilket är summan av hastigheterna för erosionen och den kemiska vittringen. Kombinationen av att kunna mäta denudationen och mätningar av kosmogeniska nuklider gör det möjligt att kvantifiera erosionshastighet samt kemisk vittringshastighet på tidsskalor av 1000 till 10 000 tals år (Kirchner 2006).

Det är sällan möjligt att mäta absoluta vittringshastigheter i fält över tid eftersom vittring sker för långsamt för att kunna vara mätbart. Däremot om man vet när vittringen startade, exempelvis tidpunkten då en berghäll steg upp ur havet på grund av landhöjning, går det att mäta relativa vittringshastigheter mellan bergarter som ligger bredvid varandra. I en studie av svekofenniska gnejser och amfiboliter som genomfördes i närheten av Åkersberga kunde man visa att amfiboliter vittrar snabbare än felsiska gnejser (Strandberg 2022).

I den här studien jämförs vittring av silikat- och karbonatbergarter. Silikatbergarterna är mestadels metaryoliter och skarn. Karbonatbergarterna är mestadels orene dolomitiska kalkstenar. Bergarterna har exponerats mellan 0 och 5 meter ovanför havsnivån (vilket motsvarar en ungefärlig ålder mellan 0 och 1200 år sedan de steg upp ur havet) på nordöstra Utö i Stockholms skärgård (Figur 2).

## 1.6 Vittring & erosion i samspel

Nedbrytningen av berg och mineral i form av vittring förbereder för att erosion ska kunna transportera bort vittringsprodukterna. Erosion av klaster kan ske genom transport och deposition med hjälp av vind, vatten, is eller gravitation. Erosion och vittring kan samspela på olika sätt och kan förmodligen ha olika inverkan på varandra.

Vid kvantifiering av vittring av karbonatbergarter med LiDAR undersöktes huruvida erosion av rinnande vatten kan samspela med kemisk vittring. Det visade sig att kornstorleken av karbonatbergarten förmodligen har en stor påverkan på om bergarten kan vittra med en högre hastighet. När karbonatbergartens textur bestod av mindre kornstorlek på mikroskala vittrade den betydligt snabbare i samspel med eroderande vatten än vid de fall då bergarten bestod av större kornstorlek (Emmanuel & Levenson 2014).

Vid kemiska vittringshastigheter av silikater däremot verkar det saknas ett samband med avrinning eller temperatur, men en koppling mellan erosionshastighet och kemisk vittringshastighet (Millot 2002). Det är allt fler som menar på att hastigheten av kemisk vittring av silikater kanske inte är lika starkt kopplat till klimatet (e.g Riebe et al 2001; Kirchner 2006), som tidigare varit den övergripande teorin inom forskningen (Archer et al. 2009). Enligt Riebe (2001) finns det en stark koppling mellan kemisk vittringshastighet av silikater och erosionshastighet, däremot menar de att det är möjligt att temperatur och nederbörd inte är särskilt starkt kopplat till hur snabbt silikater vittrar kemiskt. Riebe (2004) visar även de att det finns en stark koppling mellan denudationshastighet och kemisk vittringshastighet av silikatbergarter. Båda dessa studier menar på att det förmodligen är erosionen som styr den kemiska vittringen, varpå erosionshastigheten har en stark koppling till tektonisk upphävning.

I detta sammanhang är det intressant att notera att enligt Huh (2003) råder det ingen systematisk latitudinell variation mellan kemisk vittring av basalter och silikatbergarter. Studien menar på att det som påverkar att vittringen skiljer sig åt latitudinellt är att det bildas mer regolit i de tropiska regionerna vilket hämmar ytterligare vittring. I de arktiska och subarktiska regionerna bidrar frostsprängning till att mindre regolit täcker berget. När mer färsk bergyta blir blottad i större och snabbare utsträckning kan därmed vittringshastigheten öka. Gaillardet et al. (1999) observerade att de fann ett samband mellan kemiska & fysiska vittringshastigheter för silikatbergarter. Även de lyfter fram aspekten av att erosion är en förutsättning för att lagret av regolit ska transporteras bort och inte bli för mäktigt, varpå kemisk vittring kan fortlöpa i högre grad.

Detta är bara en handfull av studier som studerat samspelet mellan erosion och vittring. Bara dessa få studier visar på att det finns fler olika infallsvinklar. Även om det går att se att det finns ett starkt samband mellan erosion och vittring finns det fortfarande obesvarade frågor och många olika faktorer som påverkar samspelet mellan dessa processer. Goudie (2012) belyser samspelet utifrån det större perspektivet och nämner flertalet av de naturliga processerna som kan påverka hur vittring, erosion och klimatet på jorden samspekar.

## 2 Metod- och lokalbeskrivning

Fältarbetet utfördes under tre veckors tid i augusti och september månad 2023. Under den största delen av fältarbetet, som utfördes i augusti, påverkades förhållandena till stor del av stormen Hans med till exempel ovanligt högt vattenstånd. Därav adderades några dagar i september för att kunna samla in mer data vid ett lägre vattenstånd.

För att studera skillnaden mellan vittring av karbonat- och silikatbergarter användes följande metoder; fältobservationer, kvantitativa mätningar av den relativa vittringsskillnaden samt en handhållen XRF-röntgen.

### 2.1 Lokalbeskrivning

Studieområdet ligger relativt skyddad från vågerosion då området är beläget i en mindre vik med en skärgårdsö samt grynnor öster om denna. Detta förhindrar större vågor från Östersjön att nå berghällarna. Det noterades att trots att vindriktningen samt styrkan på vinden var av olika riktning och styrka så höll sig vågorna mindre inne i viken. Både lokal 1 och 2 består av berghällar som vetter i sydvästlig riktning mot vattnet.

Karbonatbergarter olika till utseendet noterades i området. En del av karbonatbergarterna i området är förmodligen övervägande rena kalcitiska och dolomitiska kalkstenar, varpå en del är mer varierande i sin komposition.

#### 2.1.1 Lokal 1

Valet av lokal 1 baserades på flera kriterier. Slutningen har en relativt liknande lutning, utöver några plattåer med partier av avsevärt lägre lutning (Figur 3).

Karbonatbergarten i området verkar till synes variera i komposition både i sin kemiska sammansättning samt hur mycket den är uppblandad med klastiska partiklar och dess kornstorlek. Kornstorleken är förmodligen av storleken sand och partiklar av mindre storlek såsom silt och eventuellt lerpartiklar. Därav var det av intresse att hitta en slänt där det gick att ta mätningar på flera olika höjdmeter där karbonatbergartens komposition såg ut att vara någorlunda uniform och där bergarten såg ut att bete sig liknande i sin vittringsprocess.

Då huvudfokus för denna studie var att studera kemisk vittring var det av intresse att tillgodose att påverkan av fysisk vittring inte var betydande samt att växtligheten var av minsta möjliga mån på lokalerna. Lokal 1 visade på bra förutsättningar för detta då det inte noterades några lösa block i fält av frostsprängning samt att växtligheten nästintill var obefintlig förutom påväxt av lavar. Det fanns en planare del av slänten med partier av jord och grästuvor, där utfördes dock inga mätningar.

Högst upp på slutningens nordvästligare del har en del bergkross deponerats från 2: a världskriget. Mätpunkterna placerades därför ut på slutningens sydöstligare del där berget till synes inte påverkats av denna yttre faktor. Några större sprickor observerades mellan 0 och 1,5 meter över havsytan, i övrigt observerades inte någon mer framträdande storskalig sprickbildning där mätpunkterna placerades ut.



Figur 3. Översiktsbild lokal 1

### 2.1.2 Lokal 2

Då vattenståndet blev lägre exponerades lokal 2 och var en av de få hållarna i närheten som till synes låg inom samma sekvens av lagerföljden. Lokal 2 var även den bäst lämpade hållen att ta mätningar nära havsytan för att komplettera mätningarna från lokal 1 då det fanns flera skarnpartier blottade i nära anslutning och precis vid havsytan. Valet av lokal 2 baserades även på att den vetter ner i havet i liknande kompassriktning som lokal 1 (Figur 4). Mätningar på lokal 2 togs, liksom lokal 1, endast där det var minsta möjliga biologiska aktivitet. Därav lämpade sig inte en del områden högre upp på hållen för att ta mätningar då det var omfattande mosspåväxt, förmodligen på grund av en lägre lutning på hållen.

Det som skiljde hållarna åt var att lokal 2 hade en avsevärt lägre lutning generellt. Då lutningen var lägre än vid lokal 1 innebar det att förhållandena nära havsnivån skiljde sig åt. Vid lokal 2 var det mer växtlighet i form av vass vid vattenytan samt alger högre upp på hållen ovanför vattenytan. Detta är förmodligen en konsekvens av att en lägre lutning på hållen ger förutsättningar för att en större del av hållen täcks av vatten vid högre vattenstånd, jämfört med lokal 1 där hållen stupar brantare ned vid vattenytan. Ingen sprickbildning eller annan utomstående fysisk faktor noterades på lokal 2.



Figur 4. Översiktsbild lokal 2

För att säkerställa att lokal 1 och 2 låg någorlunda inom samma del av lagerföljden utfördes visuella observationer av bergarterna samt några strukturella mätningar mellan de två lokalerna för att se att dessa hade liknande strukturell orientering.

## 2.2 Metodbeskrivning

### 2.2.1 Fältobservationer

Visuella observationer av vittringen av bergarterna i fält dokumenterades med bilder samt anteckningar.

### 2.2.2 Karakterisering av silikatbergarten

Silikatbergarten kategoriserades enligt följande; 1. Kiselrik, 2. Ganska kiselrik med parallella sprickor eller gröna mineral synliga, utan strålände mineral, 3. Skarn med parallella sprickor eller gröna mineral synliga samt strålände mineral, 4. Fullt utvecklade skarn med mestadels strålände mineral.

### 2.2.3 Kvantitativ studie

De kvantitativa mätningarna av den relativa vittringsskillnaden mellan karbonatbergarter och intilliggande silikatbergarter utfördes på två lokaler. Lokal 1 (Figur 3) utgjorde huvudfokus för den kvantitativa studien. Då alltför få mätningar kunde utföras inom den första metern över havsnivån på lokal 1 så kompletterades dessa mätningar med mätningar på lokal 2 (Figur 4).

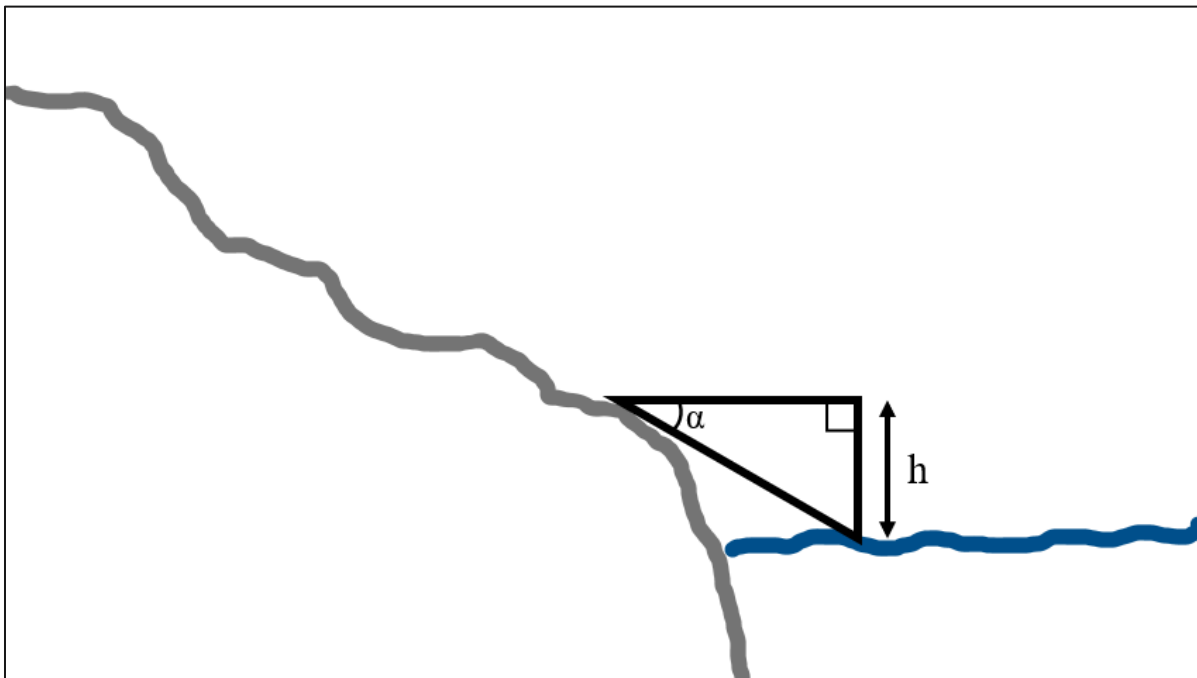
På lokalerna placerades mätpunkter ut på olika höjder med hjälp av maskeringstejp på silikatbergarten. Mätpunkterna markerades med penna på maskeringstejpen med numreringen 1.1, 1.2, 1.3.... Detta gjorde det möjligt att gå tillbaka och se över mätningarna om dessa utmärkte sig i resultatet. För att effektivisera arbetet och samla in mer data togs två mätningar på samma höjd där förhållandena tillät, varpå dessa mätningar fick samma namn men med en extra etta på slutet. Det var möjligt att ta en andra mätning på andra sidan av silikatbergarten, då dessa partier oftast inte var bredare än några decimeter,

genom att använda måttband och vattenpass för att säkerställa samma höjd utan att behöva ta en ny höjdmätning.

För varje mätpunkt samlades följande data in: mätningar för att beräkna höjden över havet (h), den relativa vittringsskillnaden (d), den ungefärliga lutningen på berggrundshällen, kategorisering av silikatbergarten i olika grupper baserat på visuella observationer av vittring och trolig mineralsammansättning.

Höjden för mätpunkterna relativt havsnivån mättes på två olika sätt baserat på rådande förutsättningar. Den huvudsakliga metoden baserades på mätningar samt uträkningar med hjälp av trigonometri. Avståndet från havsnivån (eller mätpunkt på lägre höjd) till mätpunkten mättes med hjälp av ett måttband i metall, detta avstånd motsvarade hypotenusan i en rätvinklig triangel. Lutningen på måttbandet och på berget mättes med hjälp av mobilappen Rockd. Innan appen började användas utfördes flertalet mätningar med kompassens funktion för mätning av lutning och jämfördes med mätningar av lutningen i RockD. RockD valdes framför kompassens funktion för mätning av lutning då förhållandena ibland gjorde det svårt att avläsa lutningen på kompassen.

Med dessa data kunde därefter höjden (h) beräknas enligt (Figur 5).



Figur 5. Illustration över hur höjdmätningar för mätpunkterna utfördes  
Höjden (h) beräknades därefter enligt:  $\sin v \times \text{hypotenusan} = h$

Vid några av de första mätningarna närmast vattnet kontrollerades höjden (h) då det var möjligt att vara två på plats. Mätningarna skedde då utan trigonometri och alternativt kunde måttband, tumstock samt vattenpass användas. Denna metod visade sig även vara möjlig att utföra för en person om mätpunkterna låg tillräckligt nära varandra, detta var att föredra för korta avstånd och vid mindre vinklar för att resultatet skulle få en bättre noggrannhet samt att det var tidseffektivt.

Vid jämförelse mellan de olika mätmetoderna visade de sig att båda metoderna hade hög noggrannhet, varpå båda användes i denna studie. Däremot blir felmarginalen i båda fallen större högre upp på hällen eftersom mätningarna bygger vidare på varandra.

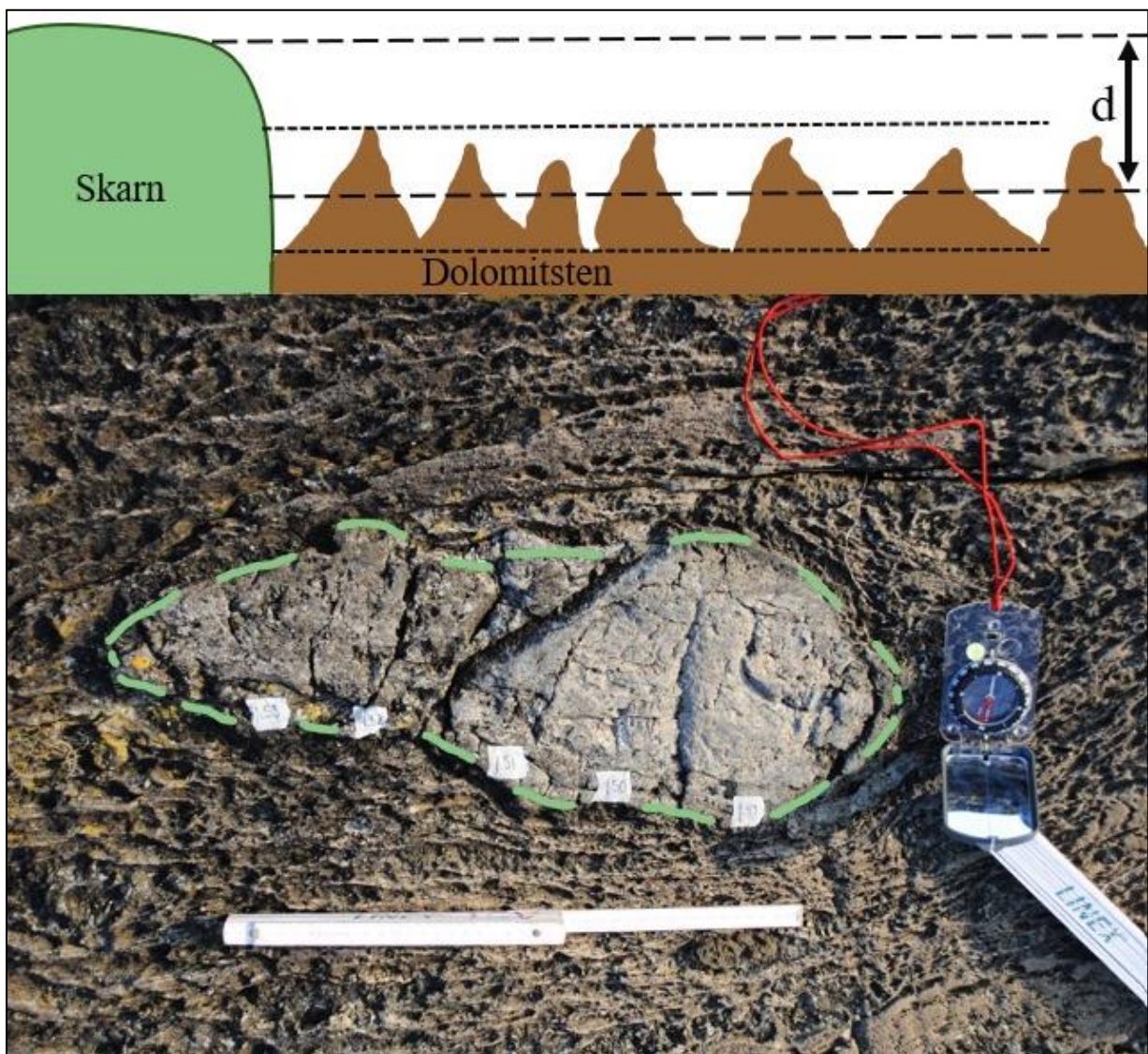
Mätningarna närmast vattnet utfördes gentemot havsytan och vattenståndet noterades enligt mätdata från Sjöfartsverkets Vind- och vatteninformation (ViVa) för mätstationen Nynäs fiskehamn (Sjöfartsverket 2024).

### 2.2.3.1 Relativ vittringsskillnad

För att mäta den relativa vittringen mellan bergarterna användes två tumstockar. En tumstock placerades på silikatbergartens kant ut över karbonatbergarten, förutom vid två mätningar där silikatbergarten vittrat mer än karbonatbergarten, vartefter avståndet från den tumstocken mättes ned till karbonatbergartens högsta och lägsta punkt (vanligtvis inom ett avstånd av ca 1 dm ut från silikatbergarten). I en del fall där silikatbergarten vittrat lite mer mättes även denna vittring 1 dm in på silikatbergarten och ett medelvärde på vittringsytan uppskattades.

Detta för att slutligen anteckna vittringsskillnaden ( $d$ ) mellan de olika bergarternas genomsnittliga vittringsyta (Figur 6).

Vid mätningarna på lokal 2 var den relativa vittringsskillnaden märkbart mycket mindre (mm-skala) då mätpunkterna befann sig väldigt nära havsnivån hade berget inte vittrat lika mycket som på lokal 1. Detta ledde till att tumstocken ej kunde användas för att mäta detta då den var för bred, därav täljdes tumstocken till halva bredden för att kunna användas för mätningar på denna lokal.



Figur 6. Mätning av vittringsskillnader

I nedre delen av figuren visar fotot ett skarn från lokal 2 tagen ovanifrån. Skarnet är markerat i grönt och omges av dolomitsten. I övre delen av figuren illustreras hur den relativa vittringsskillnaden ( $d$ ) mättes, sett från sidan.

#### **2.2.4 XRF- röntgen**

Mätningar av bergarternas kemiska sammansättning utfördes med en handhållen röntgenfluorescens (XRF), Olympus DELTA (model DP-6000). På mätområdet utfördes tio mätningar för att sedan beräkna ett medelvärde av dessa för att se grundämnenas fördelning i karbonatbergarten.

## 3 Resultat

### 3.1 Fältobservationer

Det noterades i fält att karbonatbergarten såg ut att innehålla små bitar av silikatrika mineraliseringar i varierande grad. Karbonatbergarten visade på en foliation som deformerats plastiskt där en del lager vittrats och eroderats mer än andra. Mer framträdande *honeycomb weathering* hade utvecklats på planare delar eller där lutningen var låg runtomkring lokalerna. Vid lokalerna där mätningarna utfördes noterades endast spår av *honeycomb weathering* varvat med lager och partier som vittrat mer eller mindre (Figur 12 & 13). Visuellt var det tydligt att vittringen av karbonatbergarten relativt silikatbergarten ökade vid mätningar högre upp på berghällarna (Figur 7-11).



Figur 7. Vittring nära vattnet vid lokal 2  
Mätunkt 1.46. Lokalen är belägen 19,5 cm ö. h. Uppmätt relativ vittringskillnad ( $d$ ) för mätpunkten: 0,46 cm



Figur 8. Vittring nära vattnet vid lokal 2  
Mät punkt 1.46 är belägen 19,5 cm ö. h. Uppmätt relativ vittringskillnad ( $d$ ) för mät punkten: 0,46 cm



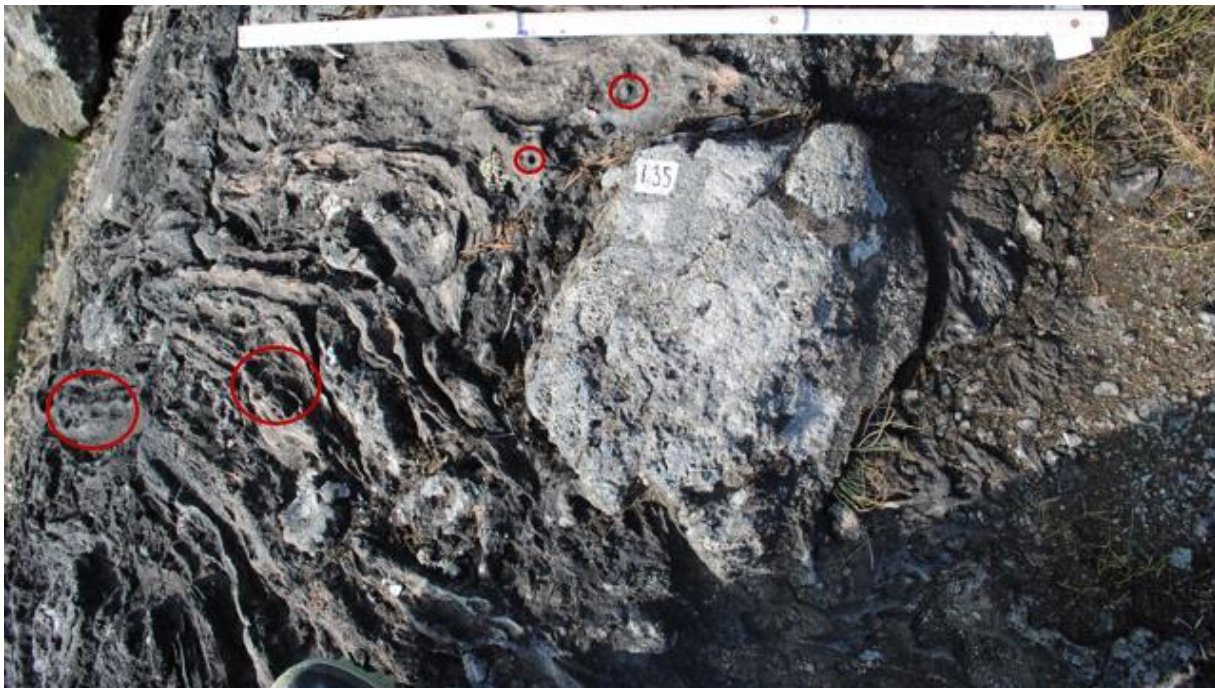
Figur 9. Vittring nära vattnet vid lokal 1, mät punkt 1.36 och 1.361  
Mät punkterna 1.36 & 1.361 är belägna 173,5 cm ö. h. Uppmätt relativ vittringskillnad ( $d$ ) för dessa mät punkter: 1,2 cm & 3,6 cm



*Figur 10. Vittring nära vattnet vid lokal 1, mätpunkt 1.11  
Mätpunkten 1.11 är belägen 88,5 cm ö. h. Uppmätt relativ vittringsskillnad ( $d$ ) för denna mätpunkt: 2,5 cm*



Figur 11. Vittring högre upp på hällen vid lokal 1  
Till vänster är en närbild på mätpunkt 1.43 och den högra bilden är tagen längre ifrån. Mätpunkterna 1.43 & 1.431 är belägna 463,5 cm ö. h. Uppmätt relativ vittringsskillnad ( $d$ ) för dessa mätpunkter: 2,7 cm & 2,5 cm



Figur 12. Exempel på spår av honeycomb weathering, mätpunkt 1.35  
Vittringstypen är markerat med röda cirklar. Mätpunkt 1.35 är belägen 170,7 cm. ö h.



Figur 13. Exempel på spår av honeycomb weathering, mätpunkt 1.29

Vittringstypen är markerad med röda cirklar. Runt skarnet där mätpunkt 1.29 är belägen går det att notera att vittring skett i högre grad, vilket noterades runt flertalet skarn. Mätpunkt 1.29 är belägen 249,9 cm ö. h

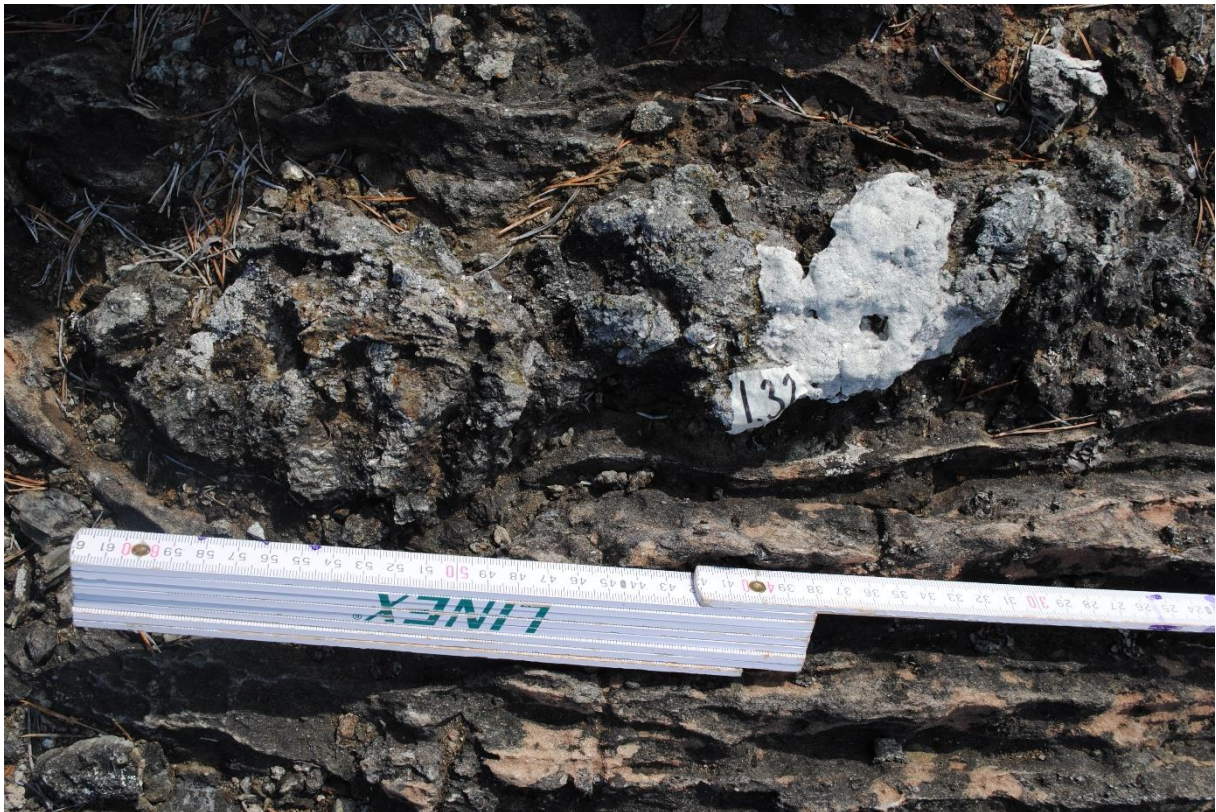
Vid mätningarna av den relativa vittringsskillnaden noterades att vittringen av silikatbergarten varierade, främst vid lokal 1, därav gjordes en karakterisering av denna i olika grupper (Figur 14-17). Däremot verkar det som att silikatbergarten också vittrar olika mycket även lokalt. Baserat på observationer av silikatbergarten vid mätningarna verkar inte lutningen påverka vittringen nämnvärt vid lokal 1 då olika partier som befann sig på liknande höjd och lutning hade vittrat avsevärt olika mycket.



Figur 14. Kiselrikt skarn



Figur 15. Ganska kiselrik med parallella sprickor eller gröna mineral synliga, utan strålande mineral



Figur 16. Skarn med parallella sprickor eller gröna mineral synliga samt strålande mineral



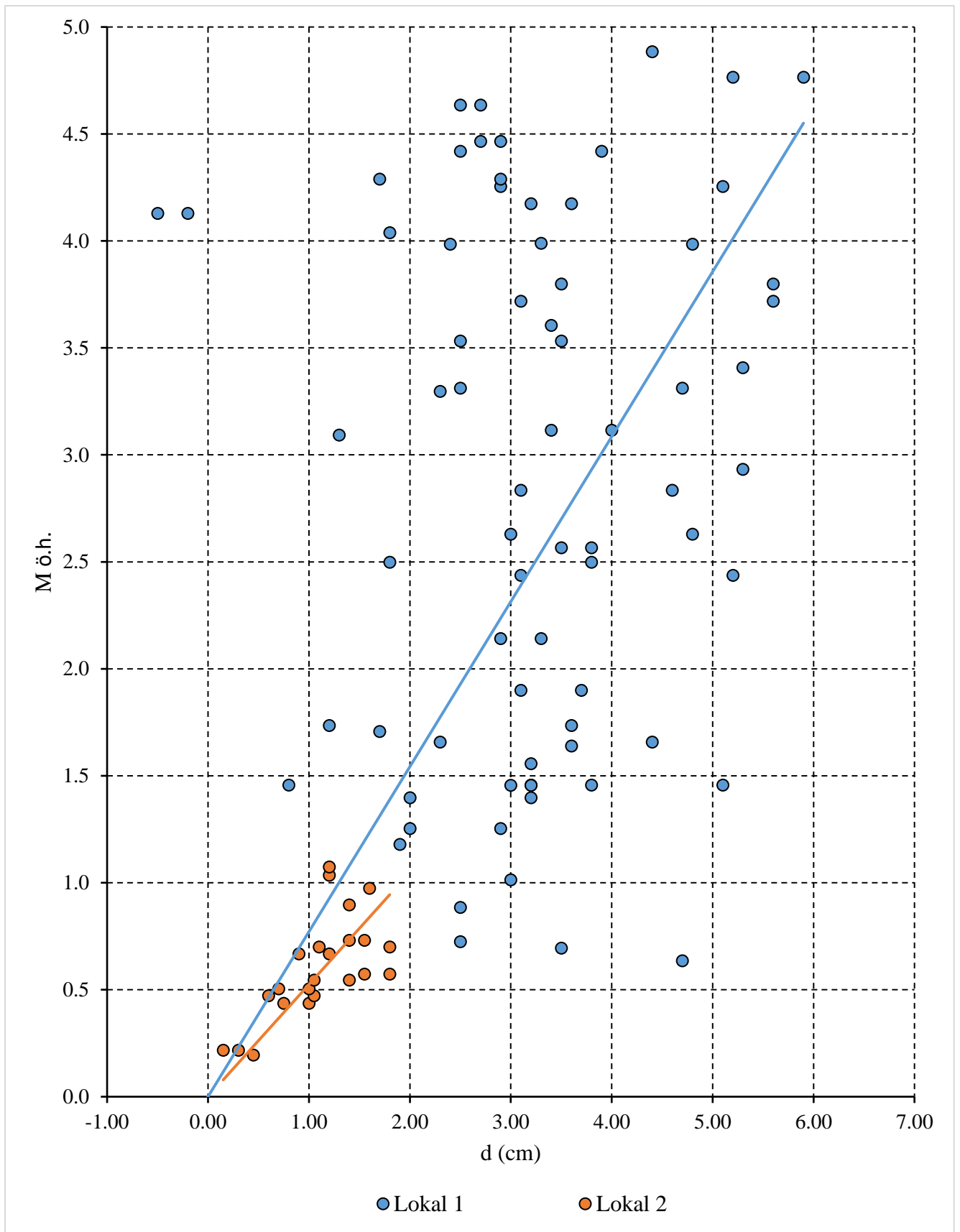
Figur 17. Skarn med mestadels strålande mineral

### 3.2 Kvantitativa data / kvantitativ studie

Resultatet från de kvantitativa mätningarna visar på ett positivt samband mellan meter över havet och den relativa vittringskillnaden ( $d$ ) för lokal 1 och 2 (Figur 18) vilket visar på att den relativa vittringskillnaden mellan karbonatbergarten och silikatbergarten ökar med tiden.

Trendlinjens  $r^2$  värde för lokal 1 är 0,75. Trendlinjens  $r^2$  värde för lokal 2 är 0,91. Trendlinjens  $r^2$  värde för båda lokalerna är 0,75. Mätningarna från lokal 1 visar på en lägre korrelation än mätningarna från lokal 2 på grund av en högre spridning i mätdata.

De värden som är positiva är då karbonatbergarten vittrat mer än silikatbergarten. De två mätpunkter som visar på en negativ vittringskillnad har ett negativt värde för att silikatbergarten vittrat mer än karbonatbergarten.

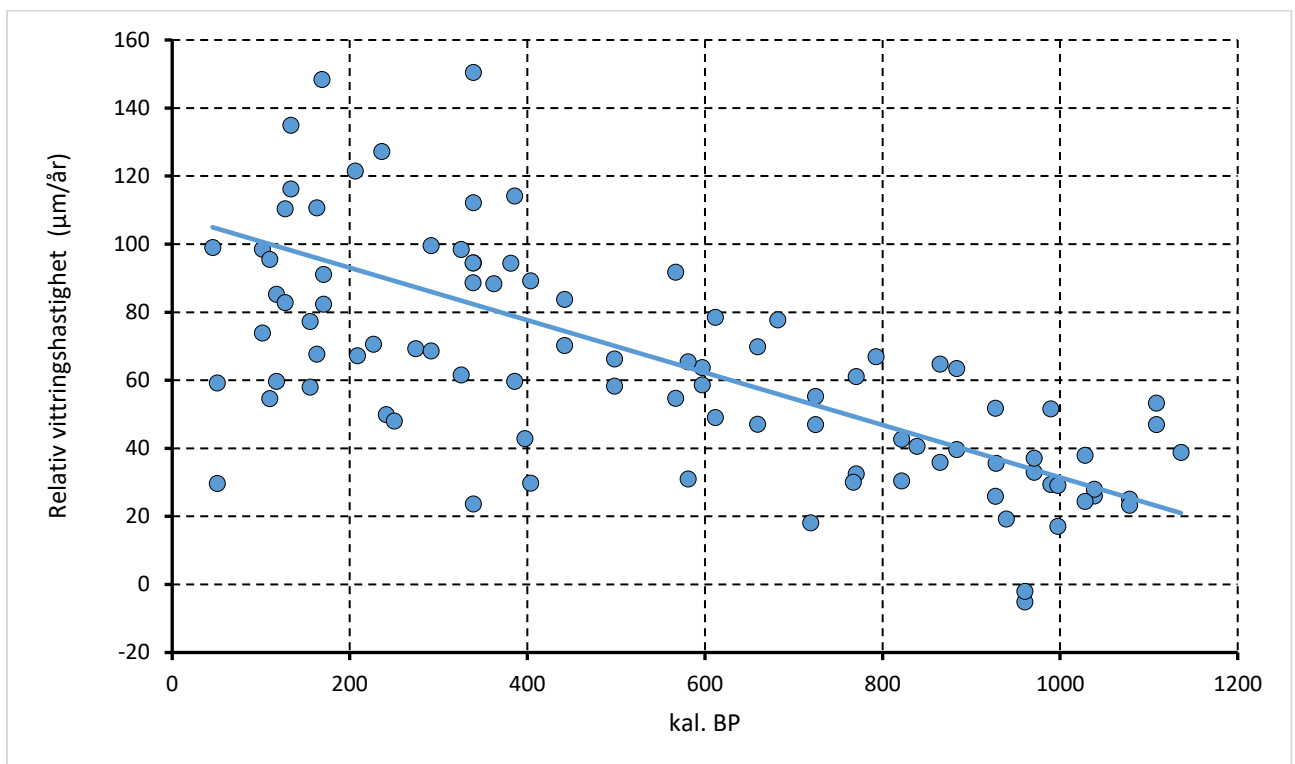


Figur 18. Resultat för de kvantitativa mätningarna av den relativa vittringsskillnaden ( $d$ )  
 Trendlinjerna har en skärningspunkt vid noll baserat på antagandet att vittring varit obeständig under havsytan. Meter över havet (m.ö.h.) i förhållande till höjdsystemet RH2000

Den relativa vittringshastigheten för hur karbonatbergarten vittrar relativt till silikatbergarten beräknades med hjälp av mätningarna (figur 10) samt ett beräknat medelvärde på en strandförskjutning på 4,3 mm/år baserat på data från SGU (Sveriges geologiska undersökning 2024) enligt ekvation (1) & (2).

$$\frac{\text{Höjd över havet för mätpunkt}}{4,3 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{år}} \right]} = \text{År upp ur havet för mätpunkt} \quad (1)$$

$$\frac{d}{\text{År upp ur havet för mätpunkt}} = \text{Relativ vittringshastighet} \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{år}} \right] \quad (2)$$



Figur 19. Resultat för vittringshastigheten per år  
Året då berget blev exponerat över havsytan är i denna plot i enheten kal BP som syftar till år före 1950. Figurens y-axel har begränsats till skalan 160 (µm/år) varpå två outliers därmed inte syns i figuren (161.5, 216.7 & 147.8, 318.0)

### 3.2.1.1 XRF- mätningar

Mätningarna med den handhållna XRF-röntgen (Tabell 1) visar att karbonatbergarten är en dolomitsten då andelen av kalcium och magnesium är höga. Däremot är det inte en ren dolomitsten då mätningarna även visar på högre värden av kisel, järn, aluminium samt kalium. Detta skulle kunna vara på grund av att det finns en del biotit men även en del sulfider i dolomitstenen.

Värdena för LE (*Light elements*) är högre än vad de bör vara, förmodligen har biologisk växtlighet samt skrovlighet på berghällen påverkat. För att vidare kunna använda dessa data kvantitativt i denna studie för beräkning av oxider baserat på den kemiska sammansättningen hade den procentuella andelen av LE behövt visa på lägre värden. Därav användes mätdata endast kvalitativt för att utläsa vilka ämnen som dolomitstenen innehåller.

Tabell 1. Tabell över mätdata för dolomitstenen vid Lokal 1

		<b>Grundämne (%)</b>									
		LE	Ca	Mg	Si	Fe	Al	Mn	K	S	P
		66.6	15.1	8.1	5.5	2.4	1.5	0.4	0.3	0.2	
		68.8	13.9	6.9	6.2	2.2	1.0	0.4	0.3	0.2	
		56.6	16.1	14.1	7.8	2.4	2.0	0.4	0.4	0.1	
		75.5	9.2	6.0	4.3	2.1	1.2		1.0	0.3	0.2
		63.9	20.7	8.8	3.8	1.6	0.5	0.4		0.1	0.1
		72.6	6.2	3.6	13.9	2.1	0.5	0.4	0.4	0.2	
		71.1	13.8	5.3	5.9	1.8	0.9	0.4	0.3	0.3	
		73.0	5.3	4.6	12.5	2.0	0.8		0.7	0.6	0.3
		70.5	8.9	5.9	9.0	2.4	1.7	0.3	0.8	0.3	
		60.7	8.5	8.6	15.3	2.4	2.1		1.1	0.7	0.3
<i>Medelvärde</i>		67.9	11.8	7.2	8.4	2.1	1.2	0.4	0.6	0.3	0.2
<i>Sd</i>		6.0	4.9	3.0	4.1	0.3	0.6	0.0	0.3	0.2	0.1

## 4 Diskussion

Studiens hypotes att karbonatbergarter vittrar snabbare än silikatbergarter stämmer generellt med resultatet av denna studie.

Baserat på observationer i fält är det tydligt att karbonatbergarten vittrar snabbare än silikatbergarten. Från den kvantitativa studien av den relativa vittringsskillnaden (Figur 18) går det att se att det finns en linjär trend. Däremot finns det en spridning i datasetet för hur den relativa vittringsskillnaden varierar, framför allt för lokal 1. Spridningen i datasetet för lokal 1 beror troligtvis mest på varierande komposition av bergarterna lokalt men troligtvis har även lutningen på berghällen en påverkan.

Resultatet av mätningarna från den kvantitativa studien visar på att den relativa vittringshastigheten / år följer en trend över tid (Figur 19). Den första tiden då berget blir exponerat för vittring är den relativa vittringshastigheten högre. För de mätpunkter som ligger närmast vattnet och exponerats de senaste 200 åren ligger vittringshastigheten kring storleken  $100 \mu\text{m}/\text{år}$  varpå den minskar till hastigheter omkring och under  $50 \mu\text{m}/\text{år}$  för de mätpunkter som ligger högre upp på hällen och varit exponerade mellan 600 och 1000 år. Det är dock viktigt att ha i åtanke att dessa värden är beräknade på en strandförskjutning som är beräknad i 100-årsintervall, varpå detta resultat inte går att applicera på en årlig skala utan bör läsas som en uppskattning över hur hastigheten förändrats över tid. Däremot varierade strandförskjutningen som användes i denna studie ej mer än mellan 40 och 50 cm per hundra år de senaste 1200 åren, kal BP (Sveriges geologiska undersökning 2024).

Karbonatbergarten är mer vittringsbenägen initialt och vittringshastigheten av karbonatbergarten verkar vara högst under den första tiden som berget blir exponerat över havsytan. Detta baserat på fältobservationer samt mätdata från lokal 2 (Figur 18). Mätdata från lokal 2 visar på ett  $r^2$  värde på 0,91 som indikerar på en hög korrelation mellan den relativa vittringen (d) och hur högt mätpunkterna befann sig över vattenytan. Fältobservationerna från lokal 2 visade att karbonatbergarten vittrade i kontinuerlig takt samtidigt som silikatbergarten inte visade på någon betydande vittring. Den tydliga korrelationen beror förmodligen på att vittringen av karbonatbergarten är den dominerande faktorn för den relativa vittringsskillnaden initialt. Däremot desto längre tid berget varit exponerat är det en annan eller flera faktorer som påverkar den relativa vittringsskillnaden mer. Detta baserat på att  $r^2$  värdet för lokal 1 är lägre. Det kan vara värt att notera att det inte helt går att jämföra de olika lokalerna och anta att bergarterna består av liknande komposition, varpå mer petrologiska analyser skulle krävas för att kunna fastställa detta. Däremot noterades det i fält att dessa såg ut att tillhöra ungefär samma del av lagerföljden.

En eventuell anledning till att karbonatbergarten vittrar med en högre och nästintill kontinuerlig hastighet vid lokal 2 är att vid en lägre lutning på hällen kan mer havsvatten skölja upp på hällen i omgångar. Erosion av stenar i vattnet kan hjälpa till att transportera bort vittrat material och blottlägga mer färsk ovittrad yta vilket gör att den kemiska vittringen kan fortlöpa med en högre vittringshastighet. Det är även möjligt att salt från havsvattnet kan hjälpa till mer i vittringen utifrån dessa förutsättningar. Teorin att hällens lutning har en betydande roll för hur vittringshastigheten av karbonatbergarten påverkas när berget stiger upp ur havet stärks också av fältobservationer från lokal 1. Visuellt såg karbonatbergarten annorlunda ut nära havsnivån vid lokal 1 (figur 10), bergytan såg inte lika färsk ut och det såg ut som att vittringsprocessen hade fått fortlöpa på ett annat sätt under en längre tid. Detta kan också bero på att en brantare lutning gör att bergytan stiger snabbare ur havet och därav vittrar berget snabbare. Karbonatbergarter påverkas betydande av kemisk upplösning, med tanke på de stigande halterna av koldioxid i atmosfären så skulle sur nederbörd kunna vara en faktor som kan ha påverkat karbonatbergartens vittring de senaste decennierna men även mer i framtiden. Vid en brantare lutning torde mer regnvatten komma i kontakt med berget än havsvattnet den närmsta metern från havsytan, om regnvattnet är surare än havsvattnet skulle detta kunna vara en faktor som påverkar. Däremot utfördes väldigt få mätningar den första metern över havsnivån vid lokal 1 då lutningen på hällen var så pass brant att detta inte gick att utföra på ett säkert sätt för en person i fält.

Variationen i hur silikatbergarten vittrar beror förmodligen på mineralsammansättningen och att olika mineral dominerar mer i vissa partier på grund av varierande kemisk sammansättning. Den övergripande trenden är att silikatbergarten vittrar med en lägre vittringshastighet än karbonatbergarten, vilket stämmer i enlighet med tidigare studier. Att silikatbergarten vittrar med olika vittringshastigheter beroende på olika mineralsammansättning kan vara en av faktorerna som påverkar korrelationen för de kvantitativa mätningarna för lokal 1, då olika mätningar av silikatbergarten på ungefärlig samma höjd över havet visade på vittring i betydande olika grad.

Olika och varierande komposition på karbonatbergarten kan ha påverkat spridningen i datasetet. Även om lokal 1, som utgjorde den största delen för mätningarna av den relativa vittringsskillnaden, var inom ett begränsat område och inom några meter av samma lagerföljd såg kompositionen ut att variera lokalt. Detta baserat både på observationer i fält samt XRF-data. Resultatet av XRF-mätningarna visar på att det är en oren dolomitsten då en dolomitsten normalt inte innehåller aluminium. Ren dolomitsten består normalt av mineralen kalcit och dolomit. Att XRF-mätningarna visar på halter av kisel tyder på att dolomitstenen innehåller kvarts. Kombinationen av grundämnena aluminium, kisel och kalium pekar på att dolomitstenen troligtvis innehåller biotit.

Även vid mätningarna av vittringsskillnaden noterades att dolomitstenens vittringsskillnad varierade lokalt, även om den hade vittrat avsevärt mer än silikatbergarten förutom vid två mätpunkter. Att karbonatbergartens vittring varierade kan bero på en variation i kompositionen av lagerföljden. Huruvida karbonatbergartens matrix är dominerad av kalcit och dolomit eller består av andra mineral och klaster är en faktor som kan vara betydande för vittringen av bergarten. När en bergart är dominerad av kalcit och dolomit gör det att dessa mineral styr vittringshastigheten. Eftersom kemisk vittring då styr vittringen torde vittringshastigheten bli högre än om bergarten är dominerad av klastiska partiklar. Storleken på mineraliseringarna av mineralen samt de klastiska partiklarna kan också ha en påverkan. Det är dock svårt att svara på hur mycket detta kan ha påverkat mätdata av den relativa vittringsskillnaden (d) utan mer ingående petrologiska analyser.

Att lutningen varierar på hällen kan också ha en betydande påverkan på hur vittringen samspelar med erosion då den befinner sig nära havsytan och stiger upp ur havet där den utsätts för vågerosion. När berget stigit upp ytterligare och inte längre påverkas av vågerosion spelar annan typ av erosion in så som rinnande eller stillastående vatten, både från vatten som sköljs upp från havet vid högre vattenstånd samt nederbörd. Jag tror lutningen kan påverka i form av hur mycket erosion berget utsätts för men även vittringshastigheten av kemisk upplösning, hydrolys samt saltsprängning. Enligt observationerna i fält är *honeycomb weathering* mer framträdande och bevarat på planare delar av dolomitstenen. En anledning till detta kan vara att en lägre lutning möjliggör att havsvattnet perkolerar lättare ner i porutrymmen i stället för att vattnet rinner av berget. Vid en högre lutning på berghällen ökar förutsättningarna för erosion genom avrinning och nederbörd att transportera bort vittrat material lättare och snabbare, vilket gör att kemisk vittring kan ske med en högre hastighet och därmed blir *honeycomb weathering* inte lika framträdande.

Formen av berghällen där lokal 1 befinner sig med det rundade platåliknande utseendet lär ha eroderats och formats av isen vid den senaste nedisningen, samt fortsatt eroderats vidare av nederbörd därefter. Det noterades i fält att vittring av dolomitstenen följer foliationen mer eller mindre. På en del platser visade detta på ett relativt systematiskt mönster där en del lager varit mer vittringsbeständiga varpå intilliggande lager hade vittrat avsevärt mer. En orsak till detta skulle kunna vara att karbonatbergarten avsatts rytmiskt med en dominerande faktor som påverkade avsättningen av lagren, exempelvis klimatet för att bilda detta upprepande mönster. Erosion på grund av nederbörd skulle kunna vara en bidragande faktor som eroderar bort vittringsprodukterna i de mer vittringsbenägna lagren vilket ytterligare ökar vittringen av dessa.

För vidare studier vore det intressant att beräkna den relativa vittringen på hållar i olika väderstreck alternativt en relativt kontinuerlig lutning på en berghäll. Dessutom vore det av intresse med fler mätpunkter nära havsnivån vid lägre vattenstånd.

Huh (2003) skriver att vittringen inte är temperaturberoende, snarare att den är kopplad till latituden baserat på vilka fysikaliska vittringsprocesser som äger rum för att kemisk vittring vidare ska kunna fortgå. Detta stärks av observationer i fält från denna studie då avsaknaden av regolit/laterit skapat goda förutsättningar för att kemisk vittring ska kunna ta vid. I samspel med erosion som transporterar bort vittringsprodukter kontinuerligt leder detta förmodligen till att kemisk vittring kan fortgå med en högre hastighet. Därav är denna typ av studie väl lämpad för att mäta och kvantifiera relativa vittringshastigheter. Fler studier på latituder i detta område kan förmodligen bidra till mer insikter om vittringshastigheter och vad som påverkar dessa.

## 5 Slutsats

Karbonatbergarten på Utö som undersökts i denna studie vittrar snabbare än silikatbergarten. Baserat på mätningarna från den kvantitativa studien och de visuella observationerna är den övergripande trenden att den relativa vittringsskillnaden ökar med tiden som berget varit exponerat över havsytan. Den relativa vittringshastigheten / år är dock högst den första tiden som berget stiger upp ur havet varpå den sedan planar ut. Från ungefär 100 år före nutid till 800 år före nutid har det skett en halvering av denna från omkring 100  $\mu\text{m}/\text{år}$  till 50  $\mu\text{m}/\text{år}$ . De relativa vittringshastigheterna varierar lokalt i studieområdet och baserat på XRF-mätningar och visuella observationer beror det på kemisk heterogenitet i de studerade karbonatbergarterna. Det visade sig även att samspelet mellan erosion och vittring förmodligen kan vara en betydande faktor för hur karbonatbergarten i detta område vittrar.

## 6 Referenser

- Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., ... & Tokos, K. (2009). Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annual review of earth and planetary sciences*, 37(1), 117-134.
- Bluth, G. J., & Kump, L. R. (1994). Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(10), 2341-2359. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90015-9)
- Emmanuel, S., & Levenson, Y. (2014). Limestone weathering rates accelerated by micron-scale grain detachment. *Geology*, 42(9), 751-754.
- Gaillardet, J. D. B. L., Dupré, B., Louvat, P., & Allegre, C. J. (1999). Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical geology*, 159(1-4), 3-30.
- Goudie, A. S., & Viles, H. A. (2012). Weathering and the global carbon cycle: Geomorphological perspectives. *Earth-Science Reviews*, 113(1-2), 59-71.
- Huh, Y. (2003). Chemical weathering and climate—a global experiment: a review. *Geosciences Journal*, 7, 277-288.
- Huh, Y. (2010). Estimation of atmospheric CO<sub>2</sub> uptake by silicate weathering in the Himalayas and the Tibetan Plateau: A review of existing fluvial geochemical data. *Geological Society, London, Special Publications*, 342(1), 129-151.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- Kasting, J. F. (2019). The Goldilocks planet? How silicate weathering maintains Earth “just right”. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 15(4), 235-240.
- Kirchner, J. W., Riebe, C. S., Ferrier, K. L., & Finkel, R. C. (2006). Cosmogenic nuclide methods for measuring long-term rates of physical erosion and chemical weathering. *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), 296-299.
- Lee, B., Han, Y., Huh, Y., Lundstrom, C., Siame, L. L., Lee, J. I., ... & Aster Team. (2013). Chemical and physical weathering in south Patagonian rivers: A combined Sr–U–Be isotope approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 101, 173-190.
- Lundström, I., Allen, R. L., Persson, P. O., & Ripa, M. (1998). Stratigraphies and depositional ages of Svecofennian, Palaeoproterozoic metavolcanic rocks in E. Svealand and Bergslagen, south central Sweden. *Gff*, 120(3), 315-320.
- Marshak, S. (2019). *Earth: portrait of a planet*. Sixth edition. W.W. Norton & Company
- McInerney, F. A., & Wing, S. L. (2011). The Paleocene-Eocene thermal maximum: A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1), 489–516.

- Millot, R., Gaillardet, J., Dupré, B., & Allègre, C. J. (2002). The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion: new insights from rivers of the Canadian Shield. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1-2), 83-98.
- Peterson Becher, G. (2022). Inlandsisen, landhöjningen och landskapet: Ett geologiskt perspektiv. Edlund, L-E. & Nordlund, C. (red.). Som en påminnelse om tidens gång. Svensk-österbottniska samfundet, 17-30.
- Riebe, C. S., Kirchner, J. W., Granger, D. E., & Finkel, R. C. (2001). Strong tectonic and weak climatic control of long-term chemical weathering rates. *Geology*, 29(6), 511-514.
- Riebe, C. S., Kirchner, J. W., & Finkel, R. C. (2004). Erosional and climatic effects on long-term chemical weathering rates in granitic landscapes spanning diverse climate regimes. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3-4), 547-562.
- Ryu, J. S., Lee, K. S., Chang, H. W., & Shin, H. S. (2008). Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea. *Chemical Geology*, 247(1-2), 66-80.
- Sjöfartsverket (2024). Vind – och Vatteninformation (ViVa)  
<https://www.sjofartsverket.se/sv/tjanster/vind--och-vatteninformation-viva/>  
(Hämtad 2024-09-16)
- SMHI (2023). *Klimatindikator – temperatur*.  
<https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/klimatindikator-temperatur-1.2430>  
(Hämtad 2024-09-15)
- SMHI (2024) *Klimatindikator – nederbörd*.  
<https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/klimatindikatorer/klimatindikator-nederbord-1.2887>  
(Hämtad 2024-09-15)
- Stephens, M. B., Ripa, M., Lundström, I., Bergman T., Persson L. (2009). *Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden*. (Ba 58). Sveriges geologiska undersökning.
- Strandberg, T (2022). *Comparing post-glacial chemical weathering of mafic and felsic rock at Brevik, Åkersberga, Sweden* (Bachelor Thesis). Stockholm University. Department of Geological Sciences.
- Sveriges geologiska undersökning (2015). *Past shore-level and sea-level displacements*. (Rapporter & meddelanden 138). Tore Pässe & Johan Daniels.
- Sveriges geologiska undersökning (2024). *Produkt: Strandförskjutningsmodell*. (Produktbeskrivning). Sveriges geologiska undersökning. <https://apps.sgu.se/geolagret/GetMetaDataById?id=71d64ad0-eb2d-4980-9d06-6a36b29de7f2>
- Xiong, L., Bai, X., Zhao, C., Li, Y., Tan, Q., Luo, G., ... & Song, F. (2022). High-resolution data sets for global carbonate and silicate rock weathering carbon sinks and their change trends. *Earth's Future*, 10(8), <https://doi.org/10.1029/2022EF002746>
- Walker, J. C., Hays, P. B., & Kasting, J. F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C10), 9776-9782.