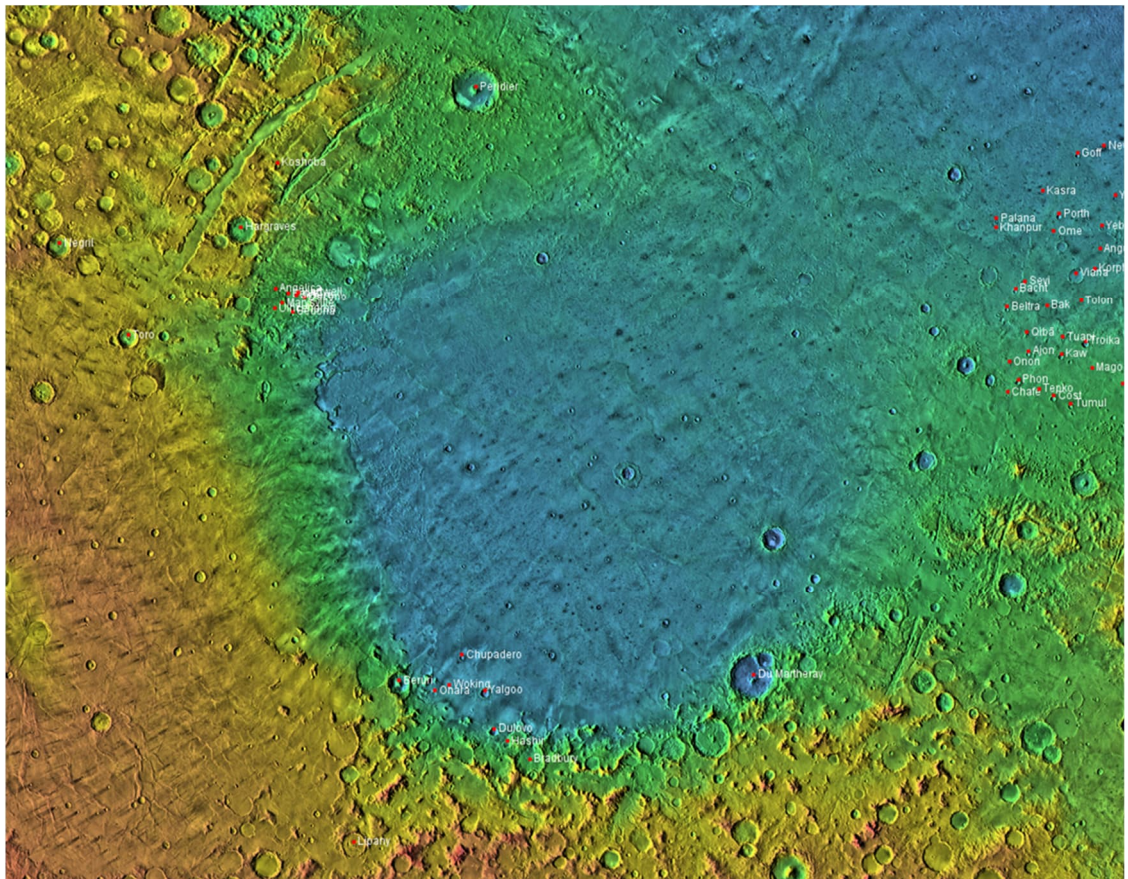


# Nedslagskratrars inverkan på Mars yt-datering

En undersökning av Mars främsta yt-  
dateringsmetod; "Crater Counting"

***Jacob Andersson***

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,  
kandidatarbete, nr 653  
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2022



# **Nedslagskratrars inverkan på Mars yt -datering**

En undersökning av Mars främsta yt-dateringsmetod;  
"Crater counting"

Kandidatarbete  
Jacob Andersson

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2022

# Innehållsförteckning

<b>1. Introduktion</b>	<b>7</b>
<b>2. Mars tidskala</b>	<b>8</b>
2.1 Pre-Noachian-Noachian (4.6-3.7 Ga)	8
2.2 Hesperian ( 3.7-3.0 Ga )	8
2.3 Amazonian (3.0 Ga - nutid )	8
<b>3. Krater datering och bildning</b>	<b>9</b>
3.1 Kraterräkning	9
3.2 Krater Bildning	9
3.2.1 Kontakt/kompressionsstadiet	9
3.2.2 Utgrävningsstadiet	9
3.2.3 Modifikationsstadiet	10
<b>4. Vad finns det för konkreta problem?</b>	<b>11</b>
4.1 Primära mot Sekundära kratrar	11
4.2 Kraterdiameter och area	12
4.3 Kraterutplåning och erosion	13
4.4 Metodik fel, fel bin samt isokronogrammet	13
<b>5. Metod</b>	<b>14</b>
5.1 Kraterräkning av liten area	14
5.2 Stora kratrars relation till area	15
5.3 Olika indelning av kraterintervall	15
<b>6. Observationer</b>	<b>15</b>
6.1 Stora kratrar	15
6.2 Liten area	16
6.3 Fel bin	17
<b>7. Diskussion</b>	<b>18</b>
7.1 Misslyckanden av illustrationen	18
7.2. Kraterdiameter och area	19
7.3 Fel i metoden – isokronogrammet och kraterintervall	19
7.4 Kraterutplåning & erosion	20
7.5 Primära mot Sekundära kratrar	20
<b>8. Slutsats</b>	<b>20</b>
<b>9. Referenser</b>	<b>21</b>

**Omslagsbild:** Topografisk färgbild på Isidis platina tagen från JMARS, rödare färger representerar högre altituder medan mer blå färger tyder på depressioner.

# Nedslagskratrars inverkan på Mars yt-datering

JACOB ANDERSSON

Andersson, J., 2022: Nedslagskratrars inverkan på Mars yt-datering *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 653, 19 sid. 15 hp.

**Sammanfattning:** Många aspekter av Mars geologiska historia förblir gåtfulla, men för att öka vår kunskap om Mars historia är yt-datering metoder väsentliga. Utöver användningen av yt-morfologins relativa åldrar är den vanligaste dateringsmetoden på Mars kraterräkning. Kraterräkning använder SFD "size frequency distribution" frekvensen av primära kraterstorlekar inom en area för att beräkna ytans ålder. Men även med metodens användbarhet finns det viktiga faktorer som kan påverka giltigheten av räkningarna negativt. Denna avhandling syftar till att förklara och illustrera dessa problem genom litteraturforskning och prövning. Problem som illustreras i arbetet är användningen av för många kratrar med stor diameter, som gör att daterad yt-åldern blir äldre än dess sanna ålder. Fel bin, att sätta kratrar i ett olämpligt kraterintervall kommer också att ändra den slutliga åldern. Samt kraterräkning vid mindre areor använda ett litet område kommer att minska den möjliga krater SFD vilket gör att ytans ålder uppges vara yngre. Små kratrar har störst användbarhet på grund av deras stora överflöd på Mars yta. Dess problem är lika stora. Små kraterpopulationer (<1 km i diameter) är mycket känsliga för erosion, vilket i teorin gör frekvensen mindre än den borde vara för att härleda ytans sanna ålder. De flesta av dessa små kratrar är sannolikt inte primära utan sekundära kratrar som inte kan användas för kraterräkning. Skillnaden mellan kratertyperna kan vara svår att urskilja men har nyligen visat sig ha en liten effekt på de kraterräknade ytorna äldre än 20 Ma. Ett större problem är att fastställa exakta "crater retention age" (CRA), kraterbevaringsålder för kratrar med storlekar <10 km i diameter som är känsliga för kraterutplåning och vinderosion, vilket resulterar i att befintliga kratrar raderas eller reduceras genom utfyllnad eller nya nedslag. Nyare beräkningar kan ta hänsyn till kraterutplåningsfelet för kratrar som är större än 10 km i diameter. Med tanke på dessa felkällor krävs noggrann utvärdering vid granskning av kraterräkningsresultat. Men med nya framsteg har denna felmarginal minskat, vilket gör att kraterräkning fortsätter att vara den mest användbara relativa yt-datering metoden.

**Nyckelord:** CRA, erosion rate, sekundära kratrar, primära kratrar, Mars, kraterräkning, kraterutplåning.

**Handledare:** Sanna Alwmark, Carl Alwmark

**Ämnesinriktning:** Geologi

*Jacob Andersson, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige.  
E-post: Ja0503an-s@student.lu.se*

# The effect of cratering on Martian surface dating

JACOB ANDERSSON

Andersson, J., 2022: The effect of cratering on Martian surface dating. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 653, 19 pp. 15 hp (15 ECTS credits) .

**Abstract:** Many aspects of Mars's geological history remain enigmatic, in order to increase our knowledge of Mars's geological history, methods for surface dating are very important. Next to the use of surface morphology superpositions, the most common surface dating method is referred to as crater counting. Crater counting uses the SFD size frequency distribution of primary crater within an area to calculate the surface age. However, even with the usability of the method, there are critical factors that can impact the validity of the counts negatively. This thesis aims to explain and illustrate these problems through research and practical work. Issues illustrated in this thesis include the use of too many large-diameter craters, which will cause the surface age to appear older than it should. This also includes the false usage of diameter bins, which alters the final surface age results. Using a small area will decrease the relative frequency of craters, causing the age to appear younger as well. Small craters have the most usability due to their large abundance on the planet's surface. Its issues are equally abundant. The small crater population (<1 km diameter) is highly susceptible to erosion, which in theory makes the frequency less than it should be for deriving the surface's true age. Most of the small craters on Mars are most likely secondary craters which cannot be used for crater counting. The difference between the crater types can be hard to detect, yet has recently been proven to have a small effect on most crater counts on surfaces >20 Ma. A bigger problem is determining accurate Crater retention ages (CRA), CRA for craters of sizes <10 km in diameter which are susceptible to crater obliteration and wind erosion resulting in the deletion or reduction of existing craters through infilling or new impacts. Newer calculations can account for the crater obliteration error of craters bigger than 10 km in diameter. Considering these sources of fault, meticulous evaluation is needed when evaluating crater counting results. But with new advancements within this field, the margin of error has decreased. This makes it so that crater counting continues to be the most effective source of relative surface dating.

**Keywords:** CRA, Erosion rate, Secondary cratering, Primary cratering, Mars, Crater counting, crater obliteration, SFD.

**Supervisor(s):** Sanna Alwmark , Carl Alwmark

**Subject:** Geology

*Jacob Andersson, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: ja0504an-s@student.lu.se.*

# 1. Introduktion

Vikten av yt-datering på Mars har på senare tid ökat i samband med målet att identifiera spår av levande organismer på Mars i samband med NASA:s "Mars 2020 Mission" (Farley et al. 2020). Under uppdraget undersöker Perseverance Rover området kring Jezero kratern (Farley et al. 2020). Uppdraget har två huvudmål, det första är att mäta förändringar på planetens yta samt att ta reda på när det kan ha funnits förutsättningar för mikrobiologiskt liv på Mars. Det andra huvudmålet är "Mars sample return", vilket innebär insamling och katalogisering av prover från Mars yta, som senare kan skickas tillbaka till jorden för vidare undersökning (Farley et al. 2020). "Mars sample return"-uppdraget kommer att möjliggöra besvarandet av många enigmatiska frågeställningar som finns kring Mars. Exempelvis förbättring av meteorologiska modeller genom provtagning av Mars atmosfär och geologi, ytterligare ska radar ombord kartlägga Mars underjordiska terräng (Farley et al. 2020). Fysiska prover från Mars kommer möjliggöra datering av akvatiska landformer på Mars yta, vilket i sin tur kommer att utöka förståelsen om Mars utvecklingshistoria och ge en inblick i vilka former av liv som kan ha förekommit på Mars (Farley et al. 2020). Fysiska prover från Mars kommer att innebära att ytor på Mars kommer att kunna dateras med en större noggrannhet, vilket kommer möjliggöra mer precis åldersdatering av Mars yta inom yt-datering på Mars. Datering inom geologi delas in i två huvudindelningar, de absoluta och de relativa dateringsmetoderna (Watchman et al. 2002). Relativa dateringsmetoder hänvisar till metoder där geologisk morfologi som sedimentära avlagringar eller landformers som nedslagskratrar Förhållande till varandra i tid, vilket ger en uppskattning om vilket objekt som är äldst. Relativ datering ger dock inte tillräckligt med information som ensam metod utan kombineras därmed med absoluta dateringsmetoder. Absoluta dateringsmetoder är mätningar utifrån fysiska prover som ger exakta beräknade åldrar hos geologiska objekt såsom landformer, basaltflöden eller bergarter (Watchman et al. 2002). Men eftersom fysiska prover från Mars ännu inte finns tillgängligt används alternativa metoder än radiometrisk.

Nedslagskratrar är den huvudsakliga studietekniken på planeter när fysiska prover för radiometrisk datering inte finns tillgängliga. Kratermorfologin hos en nedslagskrater ger viktigt information om målberggrundens egenskaper och morfologiska förändringar över tid till följd av erosion. Utöver kratermorfologi används även SFD (Size-Frequency Distribution), alltså frekvensen av olika kraterstorlekar på en yta, information som sammanlagt hjälper till att få fram en ytas bildningsålder (Platz et al. 2013; Hartmann 2005; Warner et al. 2020; Wang et al. 2020). SFD hos en yta används inom metoden "Crater counting" eller krater-räkning för att datera ytor på Mars och andra planeter, metoden har använts för att datera exempelvis Idisi platina, Jesero och Gusev crater (Golombek 2006; Ivanov 2012; Warner et al. 2020).

Kraterräkning i kombination med relativ datering är det främsta sättet att få fram uppskattningar av åldrar på Mars ytor (Robbins & Hynek. 2011; Palucis et al. 2020). Kraterräkning är en komplex och tidskrävande metod och kräver bred analys för att få pålitliga

resultat, men ger därefter väsentlig information vid forskning kring yt-åldrar och yt-verkande erosionshastighet. Metoden har stor utbredning eftersom nedslagskratrar är den mest förekommande morfologin på Mars yta (Hartmann 2005). Kraterräkning blev först framtagen på 60-talet och togs upp i Hartmann (1966) där han framför användandet av SFD av kratrar genom att räkna antalet nedslagskratrar på en yta, vilket användes för att datera månens yta. Datering utfördes genom att absolut daterade fysiska prover från månens yta samt krater SFD användes för att beräkna kraterproduktionshastigheten över månens livslängd. Med en konstant kraterackumulationshastighet övertid kunde ålderskurvor för månens yta konstrueras (Hartmann 2005). Typkurvorna representerar specifika åldrar på månen och togs fram från dateringsanalyser av prover tagna från månen i samband med Apollo 11 uppdraget, typkurvorna anpassades i senare arbeten till Mars (Fig. 1)(Hartmann & Neukum 2001; Hartmann 2005; Ivanov 2001). Kraterräkning som metod har övertid utvecklats och överförs till andra planeter samt månar bland annat Mars e.g., (Hartmann 1999; Ivanov,2001; Hartmann & Neukum 2001; Hartmann et al. 2005; Michael & Neukum. 2010).

Trots ett brett användningsområde har pålitligheten

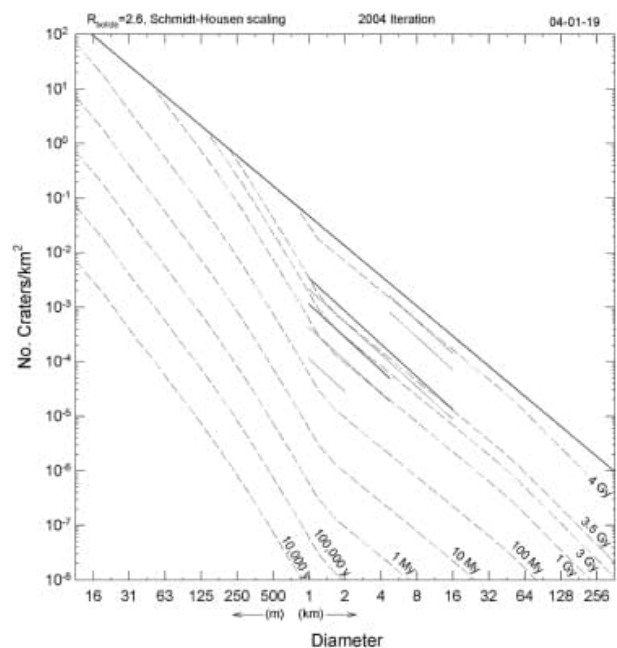


Fig. 1. ett isokronogram framtagen av Hartmann (2005). Som visar krater frekvens/area på y-axeln. X-axeln anger kraterdiametrar intervaller som ökar i stegvis med en bas av 2 ( $2^0, 2^1, 2^2$ ).

av metoden ifrågasatts under en längre tid i flera arbeten e.g., (Xiao & Strom 2012; Robbins & Hynek 2011; Palucis et al. 2020; Wang et al. 2020; Kukkonen & Kostama 2018; Hartmann & Daubar 2017). De främsta problemen som benämns inom litteraturen är användning av små kratrar (<1 km i diameter), stora kraterdiametrars (diameter <20Km) inverkan på mindre areor, sekundära kratrar och kraterutplåning e.g., (Golombek et al. 2014; Hartmann 2005; Palucis et al. 2020; Paltz et al 2013). Användningen av små kratrar (<1 km i diameter) har belysts och diskuterats i stor omfattning under en längre tid (Xia & Strom 2012; Bierhaus et al.

2018; Wang et al. 2020). Att lösa problemet är av stort intresse då användandet av små kratrar (<1 km i diameter) för yt-datering är ytterst användbart. Små kratrar möjliggör datering av mindre areor, och tillåter därmed relativ datering av enstaka yt-morfologi exempelvis nedslagskratrar, basalt flöden eller dyner (Xiao & Strom 2012). Vid användning av små kratrar <1 km i diameter uppkommer ofta flertalet fel marginaler kring erodering samt bildupplösning speciellt från äldre satelliter (Xiao & Strom 2012; Wang et al. 2020).

Bevaringsförmåga hos kratrar har en stor påverkan på korrekt yt-datering speciellt mindre kratrar på grund av deras låga bevaringsålder, vilket ofta medför att det på äldre ytor blir svårare att få fram en sann åldersbestämning (Palucis et al. 2020). Yt-åldern påverkas av kraterutplåning erosion av nedslagskratrar genom olika processer. Exempelvis; lavaflöden, vinderosion eller nya asteroidnedslag (Palucis et al. 2020) (Quantin-Nataf et al. 2019). Kraterutplåningseffekten av att större nedslag förstör tidigare kratrar försvårar korrekt åldersbestämning då kraterfrekvensen ändras från sitt ursprungsförhållande och kan därmed leda till felaktiga åldersbestämningar. Utplåningseffekten ökar i intensitet i takt med ytans ålder, vilket ytterligare påverkar en dateringsvaliditet (Palucis et al. 2020).

Mer problematik kan uppstå genom uppkomsten av sekundära kratrar, oftast mindre kratrar som skapas genom att sekundära materiel kastas upp från det primära nedslaget (Robbins och Hynek. 2011). Sekundära nedslag kan vara svåra att urskilja från primära nedslag på grund av de har snarlik morfologi vid individnivå vilket orsakar osäkerheter i antalet faktiska kratrar i beräkningen (Robbins & Hynek 2011; Xia & Strom 2012). Kraterräkning har trots sin användning ifrågasatts under en längre tid på grund av metodens osäkerheter.

Syftet med denna undersökning är att belysa problematiken kring den främsta dateringsmetoden på Mars. Samt att belysa problematiken hos metoden genom praktisk yt-datering med hjälp av kraterräkning. För att uppnå ovanstående syfte ska följande frågeställningar besvaras.

- Varför är kraterräkning en väsentlig metod på Mars ?
- Vad finns det för eventuella brister samt lösningar med metoden?
- Kan eventuella brister illustreras praktiskt?

## 2. Mars tidskala

Anledning till att dateringar av Mars yta utförs kontinuerligt är för att kunna utöka förståelsen för Mars historia. Till skillnad från jorden har Mars många fler obesvarade frågor kring sin historia. Mars är den fjärde planeten i vårt solsystem och den planet som en gång i tiden varit mest lik Jorden. Mars tidsskala är uppdelad i fyra huvudepoker: Pre-Noachian (cirka 4.6–4.1 Ga), Noachian (cirka 4.1–3.7 Ga), Hesperian (cirka 3.7–3.0 Ga) och Amazonian (ca 3.0 Ga. – nutid Ga) (Carr, 2010).

### 2.1 Pre-Noachian-Noachian (4.6–3.7 Ga)

Det finns minimalt med information kring Pre-Noachian perioden, men det har fastställts att Mars under denna period hade ett fungerande magnetfält (Carr 2010). Yt-förhållanden under perioden var ytterst instabila på grund av förekomsten av flertalet bassäng formerande asteroidnedslag vilket kännetecknar epoken. Påföljden av detta är att frågan om vatten eller andra volatila ämnen förekomst under Pre-Noachian är ytterst osäkert (Carr 2010). Pre-Noachian börjar med planetens skapelse och varade fram tills formationen av Hellas basin (4.1 Ga) (Carr 2010).

Formation av Hellas basin markerar början av Noachian perioden. Noachian karakteriseras av ett landskap med högt varierande topografisk relief på grund av de höga antalet av asteroidnedslag. Ytterligare bör Noachian ha präglats ett fuktigt klimat med hög kemisk vittring på grund av förekomsten av skiktssilikater vid Tharsis regionen (Carr 2010). Erosionshastigheter har beräknats vara hög ca 1 m/My 3 gånger snabbare än senare Amazonian 0.01 m/Ma (Quantin-Nataf 2019; Carr 2010). Noachian förmåddas även ha haft förutsättningar för förekomsten av ytvatten (Carr 2010). Det finns nämligen spår av sjöar och flod drag som troligen varit en del av ett komplext dallandskap (Carr 2010). Vilket tyder på en period med relativt varmt klimat, dock tros klimatet ha varit ostabilt till följd hög nedslagsintensitet och vulkanism som ägde rum under större delen av Noachian perioden (Carr 2010).

### 2.2 Hesperian ( 3.7–3.0 Ga)

Hesperian präglas av en ökad nedslagsintensitet i kombination med ett avtagande av geologiska ytprocesser. Hesperian anses vara en övergångsperiod i Mars klimathistoria, som markeras av en markant yterodering från främst en ytterst hög nedslagsintensitet under en relativt kort geologisk tidsrymd motsvarande cirka 0.7 Ga. Eftersom Hesperian ses vara en övergångsperiod blir det per definition svårt att exakt bestämma epokens tidsintervall. Starkaste teorin tyder på en gradvis övergång av klimatet, från ett fuktigt klimat mot torrare miljöer med minskande erosionhastighet (Quantin-Nataf 2019).

Spår från Hesperian är stora nedslagsfält samt spår av stora massflöden som förmodats ha orsakats av ett asteroidnedslag vilket lede till tömningen av stora samlade vattenmassor (Hartmann 2005). Perioden uppvisar även spår av möjlig vulkanism samt glaciationer i sena Noachian alternativt tidiga Hesperian (Hartmann 2005). Övergången från Hesperian till Amazonian förmodas att ha ägt rum runt 3Ga (Carr 2010).

### 2.3 Amazonian ( 3.0 Ga - nutid)

Amazonian är den tidsperiod som mest efterliknar Mars nutida miljö. Klimatet under Amazonian var huvudsakligen ett torrt klimat med få morfologiska förändringar till följd av periodens låga erosionhastighet (Quantin-Nataf 2019; Carr 2010). Amazonian anses vara en lugnare epok med en gradvis reducerande geologisk aktivitet såsom erosions och vulkanism jämfört med tidigare epoker. Förutom nedslagskratrar



finns spår efter inlandsis och basaltavlagringar som visar på att en viss vulkanisk aktivitet förekom under tidiga Amazonian (Carr 2010). Amazonians låga erosionshastigheter förknippas dels med avsaknaden av hydrererande processer, och dels ett avtagande i nedslagsintensiteten (Carr 2010). Under senare Amazonian fram till nutid präglas Mars yta till större del endast av vinderosion och asteroidnedslag (Carr 2010).

### 3. Krater datering och bildning

#### 3.1 Kraterräkning

För att kunna datera Mars yta och morfologi används främst "crater counting", kraterräkning. Vanligtvis när radiometriskas prover inte finns tillgängliga används relativ datering för att tidsbestämma olika landformer och stratigrafier. Exempelvis används basaltflöden, nedslagskratrar, alluvialkoner samt sprickor. Men vid mer konkret datering på Mars samt månen är kraterräkning den primära metoden. Eftersom nedslagskratrar är den vanligast förekommande morfologin på Mars yta är kraterräkning den metoden med störst applikationsområde (Hartmann 2005). Kraterräkning är en yt-dateringsmetod som utförs genom räkning av primära kratrar som skapas i samband med dom initiala asteroidnedslagen (Bierhaus et al. 2018). Kratrar markeras manuellt utifrån satellitbilder via grafiska informationsprogram som JMARS eller ArcGIS (Wang et al. 2020). Nyligen har det även inläts forskning kring sätt att göra kraterräkningsprocessen automatiserad med hjälp av AI, dock i nuläget görs markeringen manuellt (Yang et al. 2020; Lagain et al. 2021). Vid räkning markeras antalet kratrar inom en förbestämmd area eller utefter existerande topografi (Platz et al. 2013). Kratrar delas sedan in i grupper utefter sin storlek där varje kraterintervall bildar en data punkt benämns i litteraturer som kraterbins (Hartman 2005; Palucis et al. 2020). Om kratrar med liknande storlek delas samma yta antas de ligga nära varandra i tid. Datapunkterna förs sedan in i ett isokrondiagram med isokronkurvor (Fig. 1). Isokronkurvor är ålderskurvor byggda på kraterstatistik över olika kraterdiametrars frekvens under kända åldersperioder kalibrerat från radiometriskas prover från månen (Hartmann 1999; Hartman 2005; Hartmann & Daubar 2017). Data appliceras till isokron kurvorna med "best fit"-metoden, där punkternas kan matchas till en ålderskurva (Palucis et al. 2020). För att ett isokrondiagram ska gälla behövs tre antaganden göras (Hartmann 2005):

- 1) Att en planets yta efter formationen av en fast skorpa antas vara helt slät (Hartmann 2005).
- 2) Att kratrar har producerats och eroderas över tid med en konstant och hastighet. Formeln för kraterproduktion för Mars  $diametrar/km^2$  är känd och beskrivs i Hartmann (1999) och Ivanov (2001). Kraterproduktions formeln för Mars framtog genom jämförelse med Månens kraterproduktion över tid (Hartmann & Neukum 2001). Erosionshastigheten Mars yta är också känd och används för att beräkna Kraterbevaringsåldern eller "Crater retention age" (CRA) hur lång tid det tar för en krater att eroderas bort, begreppet togs först fram av Hartman (1966).
- 3) Att storleksvariansen för asteroider som träffar Månens yta är samma som för Mars.

På Mars finns dock fler faktorer som kan minska kraterproduktions hastigheten än på månen exempelvis erosion vulkanism och atmosfäriskt inträde. Kraterprocesserna som påverkar formationen och morfologin hos en nedslagskrater styrs av många fler olika faktorer än de ovan nämnda. Krater morfologin ger väsentlig information om ytans egenskaper vilket används vid tolkning av kraterräknings resultat (Bierhaus et al, 2018; Glombek et al, 2006).

#### 3.2 Kraterbildning

En nedslagskraters slutliga form påverkas av hastigheten, storleken och sammansättningen hos asteroiden, men även målberggrundens sammansättning. De nedslag som bildar kratrar kallas "hypervelocity impacts" (hyperhastighetsnedslag). Ett hyperhastighetsnedslag är ett nedslag där projektilen behåller sin kosmiska hastighet ( $>11$  km/s), efter att ha passerat Jordens atmosfär (French 1998). Storleksgränsen att ett hyperhastighetsnedslag ska ske har beräknats till  $>50$  m i diameter med undantag för järnrika asteroider där gränsen ligger över 20 m diameter. Under dessa storlekar skapas bara gropar utan konkreta kraterstrukturer (French 1998). Viktigt att poängtera är att nämnda värden är framtagna för Jordens atmosfär och gravitation och variera från Mars, men dom kraterformerande processerna nedan är liknande (Barlow 2006). En kraters formation till följd av ett hyperhastighetsnedslag delas upp i tre delar: 1. Kontakt/kompressionsstadiet 2. Utgrävningsstadiet 3. Modifikationsstadiet (French 1998).

##### 3.2.1 Kontakt/kompressionsstadiet

Tidsintervallet för ett stadie bestäms av projektilens hastighet och storlek. Stadiet påbörjas direkt när projektilen får kontakt med marken (Fig.2 & 3). Nedslaget skapar chockvågor som radierar ut från nedslagets centrum (Fig. 3). Vågorna avtar i energi i takt med ökat avstånd från projektilen på grund av energiförlust i form av friktionskapad värme. Asteroidnedslaget kan producera tryck uppemot 100 GPa. Dock är de vanligare med tryck på 50 GPa (French 1998). Dessa höga tryck och temperaturer i kombination med refraction av tryckvågor inom projektilen resulterar i en total evaporation av projektilen samt smältning av närliggande berggrund (Fig.3). Tryckvågor medför även en deformation av omkringliggande berggrund. Denna process är trots sin komplexitet kortvariga och varar bara i några sekunder även hos större projektiler. En asteroid på 50 km diameter varar kompressionsstadiet i två sekunder (French 1998).

##### 3.2.2 Utgrävningsstadiet

Till följd av kompressionsstadiet påbörjas utgrävningsstadiet där tryckvågornas deformerar och gräver ut nedslagszonen (Fig. 2 & 3) (French 1998). Orsaken ligger i att chockvågor stutsar och består av med kinetisk energi. Det resulterande trycket omformar krater genom att omkring liggande material kastas upp (Fig. 1) och underliggande lager trycks ned och utåt. (Fig. 2). Vilket leder till att nedslagytan omformas genom en ökning av markdepressionens diameter, vilket leder till formationen av en transientkrater en depression i marken med distinkta väggar (Fig. 2). (French 1998).

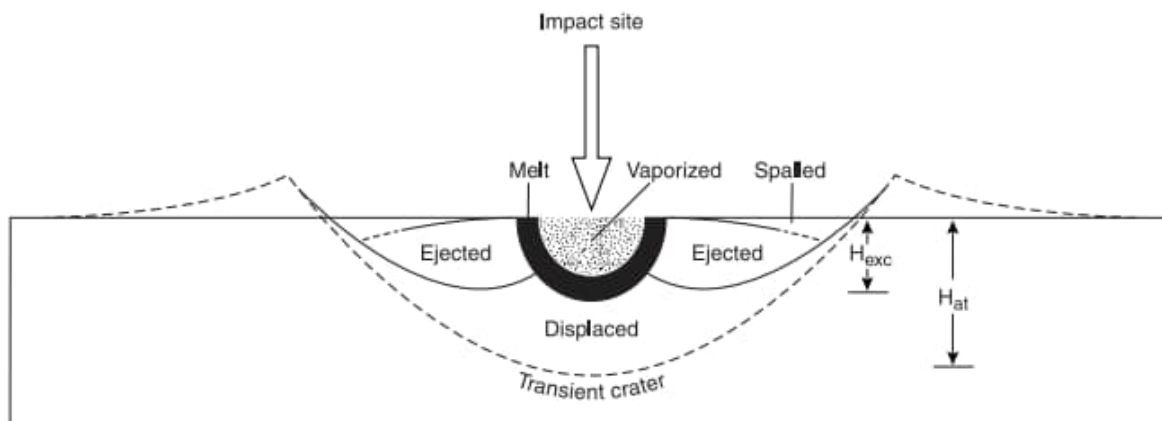


Fig. 2. Bild tagen från French (1998) illustrerande utformningen av en krater från initialt nedslag till en transient krater som visar nedslagszonen skapad av projektilen samt vilka delar av den närliggande berggrund som blir utsatta för.

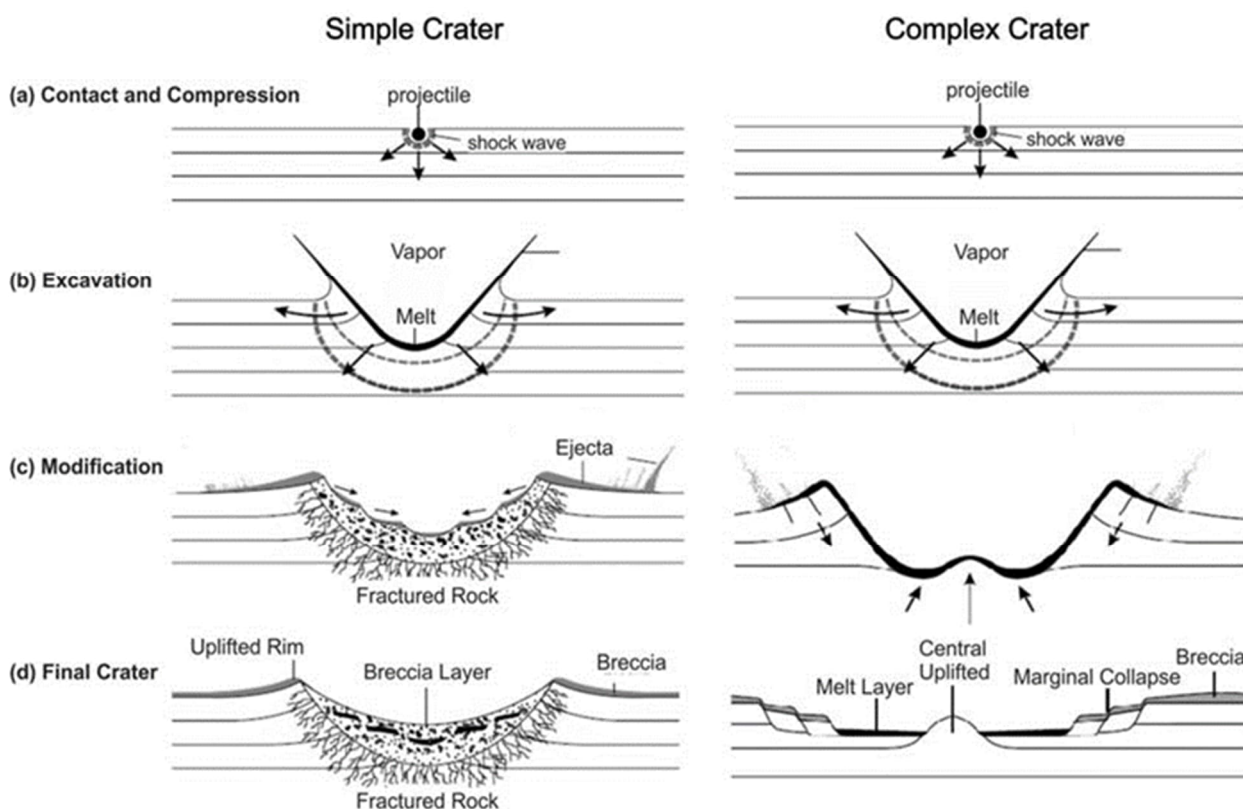


Fig. 3. Figur tagen från French (1998), som visar stadier av kraterutformningen av en simpel och komplex krater.

Deformationen avtar successivt i takt med tiden vilket till slut får kraters tillväxt att avstanna. Sedan börjar gravitations motiverade processer, såsom nedfall av krater ejekta utkastat material från det primära nedslaget. När tillväxten avstannat på börjas modifikationsstadiet (Fig. 3). Längden av utgrävning stadiet beror på storlek, 1 km diameter nedslaget varar i sex sekunder medan ett 200 km nedslag beräknats till 90 sekunder (French 1998).

### 3.2.3 Modifikationsstadiet

Material som kastats upp under utgrävningstadiet, börjar nu att falla och lägger sig runt den nybildade kratern och bildar en zon av ejektamaterial. Modifikationsstadiet har inget konkret slut utan fortsätter fram tills de geologiska processer som erosion, sedimentation, massrörelser, spröda brott samt isostatisk upplyftning fortgår. Slutresultat av denna process blir bildande av en av två kraterstrukturer, antingen en simpel eller komplex krater strukturer. En simpel kra-

ter definieras som en skålformad depression i berggrunden mindre än ett par kilometer i diameter (French, 1998). En simpel krater har relativt små förändringar gentemot dess transienta kraterform såsom, något reducerad massa av ejektamaterial och ned erosion av dess yttre väggar. Komplexa kratrar är där emot något större i omfattning. I kristallin berggrund dras gränsen mellan en simpel /komplex krater vid 4 km i diameter. På Mars skiljer sig storleksgränsen på grund av annorlunda atmosfär och mindre gravitation (Barlow 2006). Storleksgränsen för att ett nedslag på Mars yta ska bilda en komplex kratermorfologi är ca 10 km i diameter (Barlow 2006). Krater utformning på Mars har också visat sig variera mellan olika latituder vilket antas bero på variation i målberggrunden (Barlow 2006).

#### 4. Vad finns det för konkreta problem?

Inom krateräkning finns det fyra större problem som kommer tas upp i följande kapitel.

1. Kontaminering av SFD, sekundära kratrar
2. Kraterdiameter och area
3. Kraterutplåning och fyllning
4. Beräknings fel, data-gruppering och isokrondiagram

##### 4.1 Kontaminering av SFD, sekundära kratrar

Krateräkning bygger på att räkna SFD av primära kratrar inom en area (Hartmann 2005). Vid krateräkning måste därmed primära kratrar särskiljas från sekundära kratrar orsakade av sekundärt materialnedfall i samband med det primära nedslaget (Bierhaus et al. 2018). Antalet sekundära kratrar som bildas är beroende av storleken av det primära asteroidnedslaget (Bierhaus et al. 2018). Sekundära kratrar identifieras genom två primära strukturer kluster eller "rays" strålar (Fig. 4 & 5). Strålar identifieras genom att de har

en tydlig dammsvans framför kratern (Bierhaus et al. 2018). Kluster av sekundära kratrar uppträder ofta som en samling av mindre kratrar runt en större primär krater (Fig. 4 & 5) (Bierhaus et al. 2018; Hartmann & Daubar 2017). Morfologin hos sekundära kratrar är ofta enklare än primära och beskrivs som cirkulära grunda depressioner i berggrunden med en ojämn kant (McEwen et al. 2005).

Identifiering av sekundära kratrar försvåras när de bildats från hyperhastighetsnedslag. Hyperhastighetsnedslag tenderar att orsaka sekundära kratrar med stort avstånd från det ursprungliga nedslaget (McEwen et al. 2005). På månen kan denna typ av nedslagskrater särskiljas genom analys av ejektablock från högupplösnings satellitbilder. Sekundära nedslag tenderar att lämna relativt små block i sitt ejektamaterial jämfört med primära kratrar (Bart & Melosh 2007). Förutom denna metod används målytans ålder i kombination med områdets geologiska historia för att ta reda på kratrars förhållande i tid för att sedan särskilja deras ursprung (Bart & Melosh 2007).

Svårigheterna kring sekundära kratrars inverkan på bestämningen korrekt SFD för ytor på Mars har belysts sedan metodens begynnelse och var en stor kritik mot krateräkning studier runt sekelskiftet (Bierhaus et al. 2018). Sekundära kratrar har bevisats skapa felmarginaler vid krateräkning av mindre kratrar (Robbins 2011). Kritiken grundades på att majoriteten av mindre kratrar (<1 km diameter) på Mars anses vara orsakade av sekundära nedslag (McEwen, Preblich et al. 2005; Bierhaus et al. 2018). På senare år har problemets utsträckning kunnat reducerats med data från högupplösta satellitbilder (Bierhaus et al. 2018).

Sekundära kratrar har en försumbar effekt på resultat vid beräkning av större kraterdiameter, på grund av att produktion av stora sekundära kratrar kräver ovanligt stora primära nedslag. Eftersom en sekundär kraters storlek är 10% av primära nedslagets kraterdiameter. (Bierhaus et al. 2018). Sekundära kratrar har också en mindre påverkan på längre tidsåldrar

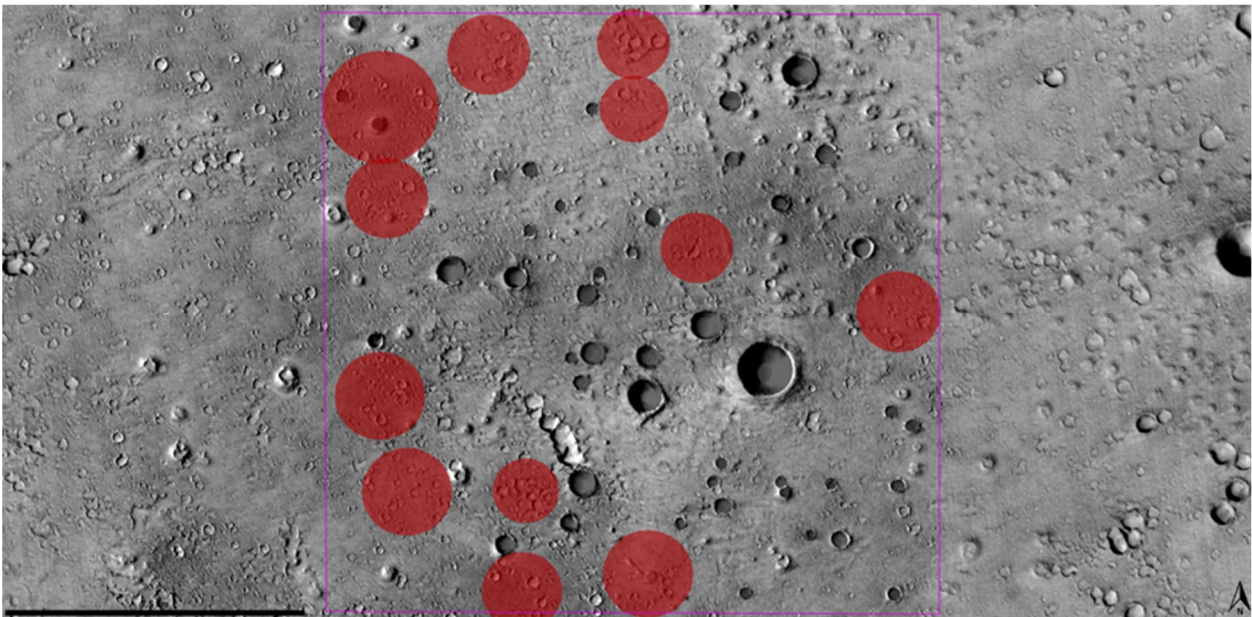


Fig. 4. Satellitbild tagen från JMARS som visar mindre primära kratrar som användes under illustrationen för problematiken kring sekundära kratrar som kan uppstå vid krateräkning av mindre areor. Medräknade kratrar markerade med svart samt de röda cirklarna uppvisar misstänkta kluster av sekundära kratrar.

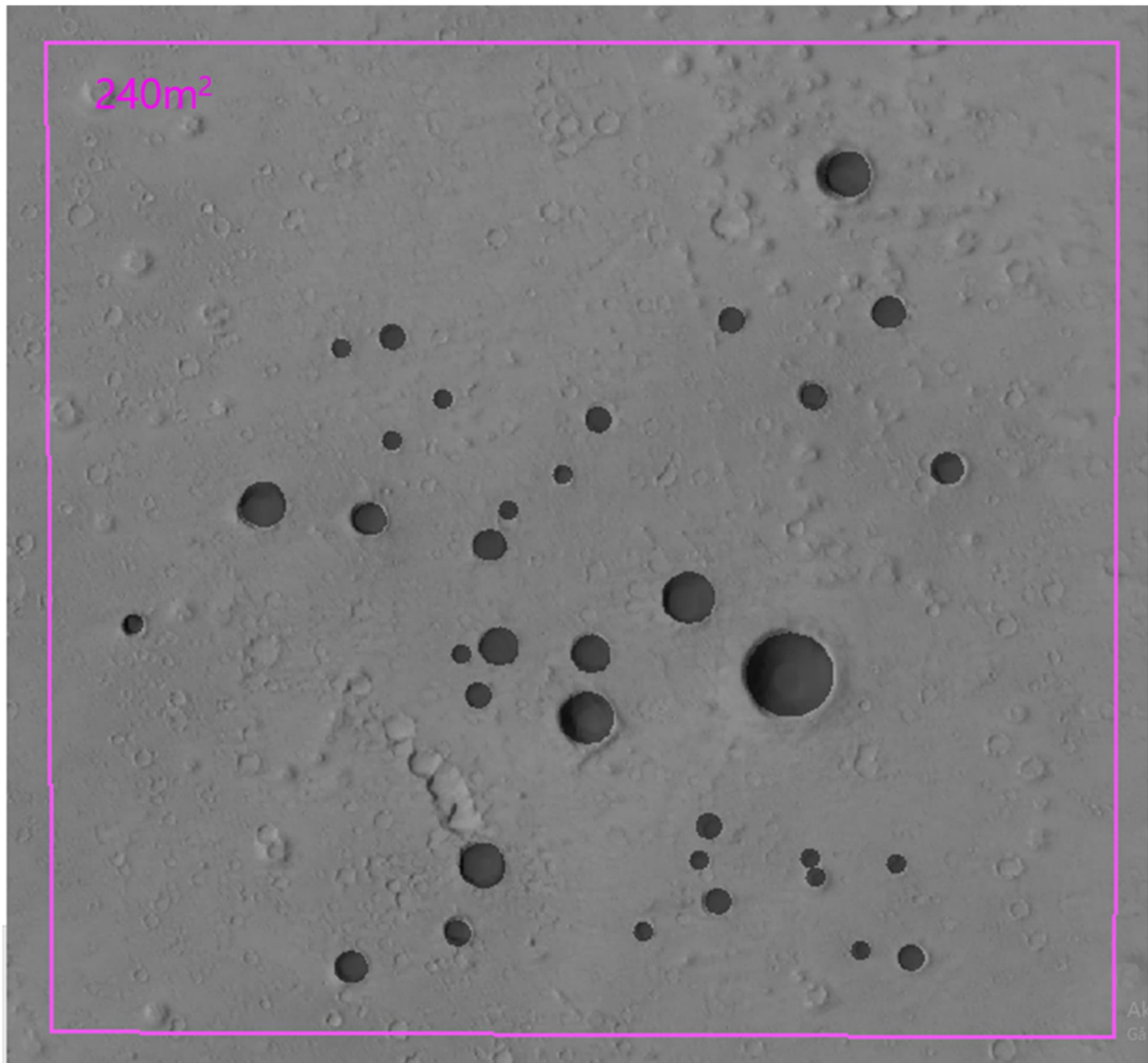


Fig. 5. in zoomad satellitbild från JMARS av området i figur 4 vilket visar små primära kratrar (under 1 km diameter) över en area på 240 km<sup>2</sup>. Valda kratrar användes vid beräkning av illustrationen för små kraterdiameter data.

(>20 Myr) (Quantin et al. 2016). Således behövs ingen större åtanke kring sekundära kratrar vid dateringar av äldre ytor samt större kraterstorlekar (Beirhaus et al. 2018).

## 4.2 Kraterdiameter och area

En stor del av krateräkningens dateringssäkerhet ligger i val av area i förhållande till frekvensen av kraterdiameter. Problemet är vanligt när krateräkning används för att datera små ytor för att exempelvis kunna datera närliggande mindre morfologier som flodstrukturer och dyner (Palucis et al. 2020; Kukkonen & Kostama 2018; Hartmann & Daubar 2017; Xiao & Strom. 2012). Detta har sedan länge ifrågasatts av flertalet forskare. Många studier har påträffat felaktigheter i resultaten vid krateräkningar med små kratrar (<1 km diameter) (Xiao & Strom 2012; Hartmann & Daubar 2017). Osäkerheten förekommer främst om ytan har utsatts för någon form av omstrukturering som glacial erosion, samt tidigare nämnda kontaminat-

ionen av sekundära kratrar (Hartmann & Daubar 2017). Omstrukturerade ytor ger oftast yngre åldrar än förväntat på grund av kraterutplåning eroderar ytan och ändrar ursprungskrater SFD hos ytan (Kukkonen & Kostama, 2018). Användning av en liten area i relation till kraterstorlek kan leda till felmarginaler eftersom kraterfrekvensen är beroende på hur många kratrar som får plats i undersökningsarean. Om en area fylls upp helt av kratrar blir utan mättad på kratrar och "crater saturation equilibrium" eller kratermättnadsjämvikt uppnås. Kratermättnadsjämvikt är när kraterfrekvensen blir så hög att nästa asteroidnedslag kommer utplåna en krater eller flera kratrar vilket gör att kraterproduktionen avstannar (Hartman 2005).

Vid beräkning av mindre ytor krävs det att rätt kraterintervall används för given area som räknas (Palucis et al. 2020). Tidig forskning tyder på att areaminimumet för att behålla resultatsäkerhet vid krateräkning med kratrar över 1 km diameter är 1000 km<sup>2</sup>. Krateräkningar på små areor med samma kraterdiameter på



olika ytor ger liknande åldrar, nyare arbeten har dock visat att detta möjligen inte stämmer (Palucis et al. 2020). Minimumarean för korrekt beräkningen av ytans ålder varierar och styrs av flertalet faktorer kraterstorleks, minsta kraterdiametern för arean som räknas, antagen erosions samt vilken kraterutplåningshastighet antas verka över ytan (Palucis et al. 2020).

Problem uppstår också vid räkning med stora kratrar (diameter >20 Km), stora kratrar bildas mer sällan än små kratrar vilket gör att stora kratrar ofta upptäcks tillsammans med en samling av mindre kratrar vanligast på äldre ytor. Vid sådana fall tenderar de större kratrarna att minska krater frekvensen på grund av att de tar upp mer av den totala ytan inom mättnings arean (Palucis, et al. 2020). Enstaka massiva kratrar i ett område som minskar kraterfrekvensen men förhöjer SFD vilket förskjuter en ytas ålder mot äldre åldrar (Kukkonen & Kostama 2018). Stora kratrar i små områden har visats empiriskt ge åldrar kring 4 Ga även om ytans sanna ålder är betydligt yngre (Kukkonen & Kostama 2018).

### 4.3 Kraterutplåning och erosion

Reducering av en ytans kraterfrekvens sker huvudsakligen genom två processer: kraterfyllning och utplåning. Kraterutplåning innebär att kratrar skadas eller raderas helt från en yta genom antingen erosion, ifyllning eller större asteroidnedslag. En krater definieras vara utplånad när den saknar djup (Smith et al. 2008). Kraterutplåning på Mars orsakas av flera erosionsprocesser: vulkanism, eolisk erosion samt nya asteroidnedslag, processer som har dominerat stora delar av Mars historia (Beirhaus 2018). Erosion av en yta leder till att äldre ytor kan observeras vara yngre än deras sanna ålder eftersom det leder till en minskad SFD över tid då erosion främjar större kratrar med hög CRA (Palucis et al. 2020; Smith et al. 2008).

Erosion och ifyllning skapar även svårigheter vid datering av ytor med små kratrar på grund av deras känslighet för ifyllning och erosion eftersom småkratrar har lågt CRA (Hartmann & Neukum 2001). Mindre kratrar har mindre djup vilket gör att det snabbare kan fyllas upp med erosions material samt har dom en högre sannolikhet att raderas vid större asteroidnedslag. Ytterligare svårigheter på mindre skalor är att, erosionshastigheten påverkar kratrarnas CRA vilket kan leda till olika resultat inom kraterberäkning av samma yta beroende på vilken erosionshastighet som används (Smith et al. 2008). Erosionshastigheten har högst effekt på resultat vid datering av äldre landformer, vid räkning med mindre kratrar (Smith et al. 2008). Om möjligt används större kraterdiametrar för att kringgå problemet då större nedslagskratrar är mer motståndskraftiga mot både erosion och kraterutplåning vilket gör att kraterfrekvensen över mätningssytan är stabilare över tid (Palucis et al. 2020; Lagain et al. 2021).

Datering försvåras ytterligare av att Mars erosionshastighet inte är konstant utan har varierat över tid. Kraterutplåningshastigheten varierar också över tid och är beroende av erosionshastigheten. Kraterutplåningen på Mars var

störst runt 3.8–4 Ga med minskande effekt i Amazonian (Hartmann 2005; Quantin-Nataf 2019). För att kunna lösa problemet har forskning gjorts av bland annat Smith et al. (2008) där de tog fram en funktion för att kunna kvantifiera kraterutplåning effekt på en yta. I rapporten beräknas konstanter för kraterproduktions samt erosionshastighet som tar hänsyn till olika bergarters erosionsmotstånd. Resultat från applikationer av formeln visar att med mindre utplåningshastigheter  $10 \text{ nm a}^{-1}$  över en längre tid finns det ingen märkbar effekt på kratrar <10km (Smith et al. 2008). Dock vid högre hastigheter  $50 \text{ nm a}^{-1}$  är effekten på dateringen stor. Beräkningarna gjorda av Smith et al. (2008) visar vikten av att kvantifiera krater utplåningshastigheten vid kraterberäkning.

### 4.4 Fel inom data-gruppering & isokrondiagram

Kraterberäkning som andra metoder har flertalet praktiska metodikfel exempelvis storleksindelning och gruppering av kratrar i kraterbins samt användning av olika isokrontabeller. Isokrontabellen har uppdaterats över tid och blivit mer detaljerad allt eftersom metoden har utvecklats (Fig. 6) (Hartmann 2005; Hartmann & Neukum 2001; Hartmann & Daubar 2017). För att en isokrontabell ska kunna användas korrekt måste man räkna ut SFD för en yta detta görs genom att ett kraterintervall väljs (Hartmann 2005). Val av kraterintervall varierar beroende på studiens storlek och precisions behov. För en snabb och grov datering kan stora kraterintervall användas 1–16 km i diameter (Hartmann 2005). För precisions krävande dateringar rekommenderas det att använda Hartmanns kraterbindnings teknik där uppmätta kratrar delas in i steg med  $\sqrt{2}$

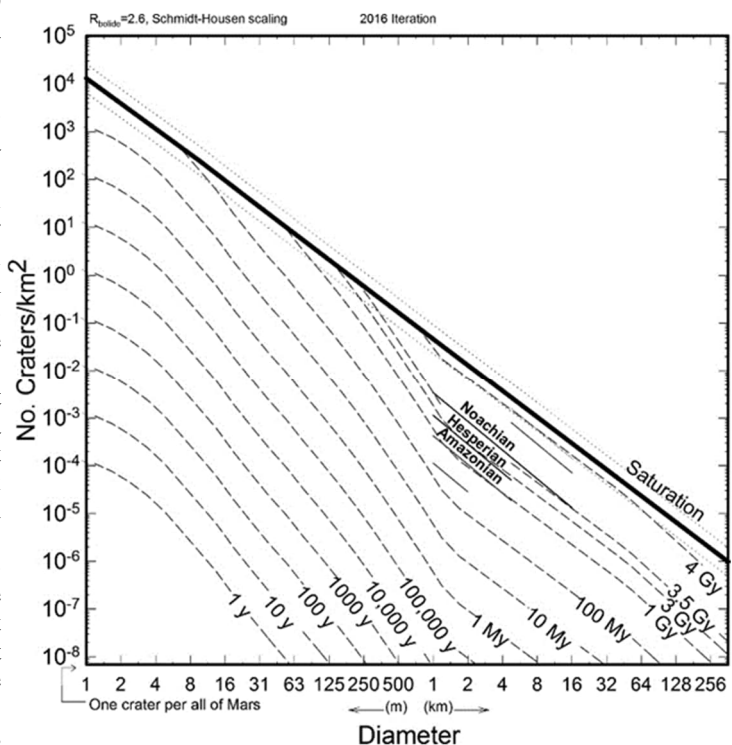


Fig. 6. Standardiserad version av en kraterberäkning isokrondiagram framtagen av Hartmann och Daubar (2017). Som visar krater frekvens/area på y-axeln. X-axeln anger kraterdiametrar intervaller som ökar i stegvis med en bas av 2 ( $2^0, 2^1, 2^2$ ).

från 1 (1, 1.4, 1.9, 2.8...) (Paltz et al. 2013; Beirhaus 2018; Hartman och Daubar 2017; Robbins et al 2018). Om mindre kraterintervall behövs används bindningar med  $\sqrt{2}^{1/2}$  i stället. Rekommendationsindelningen är baserad på den statistiska storleksutdelningen av kratrar i diameter på hela Mars yta (Hartman 2005; Hartman och Daubar 2017; Robbins et al 2018). Kraterstorleksfrekvensen har mätts empiriskt och ökar i storlek generellt med en bas av två starkast är mönstret Inom storleksordningarna 1-16 km och 16-32 km i diameter (Hartman 2005).

Upptäckten av nya mindre primära kratrar i meterskalan har dock gjort det möjligt att uppdatera isokronogram, för att bättre datera mindre ytor med små kraterdiametrar (Hartmann & Daubar 2017). Nuvarande isokronogram anses vara korrekta utan större felmarginaler diagrammen har uppdateras för att kunna inkludera kratrar i decimeterskalan (Fig. 5) (Hartmann & Daubar 2017). Isokronogramens största varians kommer från hur bra kratrarna markeras manuellt samt vilken produktions formel som använts vid beräkning av Isokronlinjerna (Hartman & Neukum 2001; Paluic et al. 2020).

## 5. Metod

För att illustrera problemen med kraterberäkning används JMARS för att genomföra kraterberäkningar som illustrerar problemen nämnt ovan. JMARS är ett Java script baserat geografiskt informationssystem som projekterar satellitdata från Mars och andra planeter i solsystemet. JMARS har ett inbyggt verktyg för kraterberäkning som har använts för insamling av data till illustrationerna. Verktyget fungerar genom att en yta för datering avgränsas och arean räknas ut. Kratrar inom undersöknings arean markeras efter sin diameter (Fig. 4 & 5). Insamlade data är antalet kratrar av vardera storleken. Kratrarna grupperas efter sina diametrar och läggs in i ett satt kraterintervall (Tabell 1). Intervallen väljs efter kraterdiametrarnas storlek antalet grupper väljs efter önskad mängd data punkter. För att illustrera problemet kommer två olika isokronogram som vardera är anpassat för olika kraterstorlekar. För större kratrar används ett isokronogram skalat för större kraterdiametrar 2–256 km taget från CLSE (2015). För att data ska kunna användas i valt isokronogram standardiseras kraterfrekvensen till en area av 1,000,000 km<sup>2</sup> enligt följande ekvation tagen från CLSE (2015). Kraterfrekvensen per 1,000,000 km<sup>2</sup> = Antalet kratrar × (1,000,000 km<sup>2</sup> / bild area km<sup>2</sup>). Resultatet bildar kraterfrekvensen per 1,000,000 km<sup>2</sup>, data punkten plottas sedan ut i ett isokronogram efter sin diameter och ålder utläses (Fig. 7).

För mindre kratrar används diagrammet från Hartman och Daubar (2017) som anpassat för mindre kraterstorlekar och kan hantera kratrar i meter skala (Fig. 6). Isokronlinjerna i diagrammet är standardiserade efter den statistisk utbredning hos kratrar mellan 16–32 m i diameter baserat på kraterproduktions formeln från Hartman (2005). Eftersom diagrammet är standardiserat efter kraterfrekvenser så då kan kraterfrekvensen per area användas direkt: antalet kratrar per grupp/bild area km<sup>2</sup>. Illustrationerna av problemen delas in i tre delar kraterberäkning av liten area, stora kratrar i relation till area och olika indelning av kraterintervall.

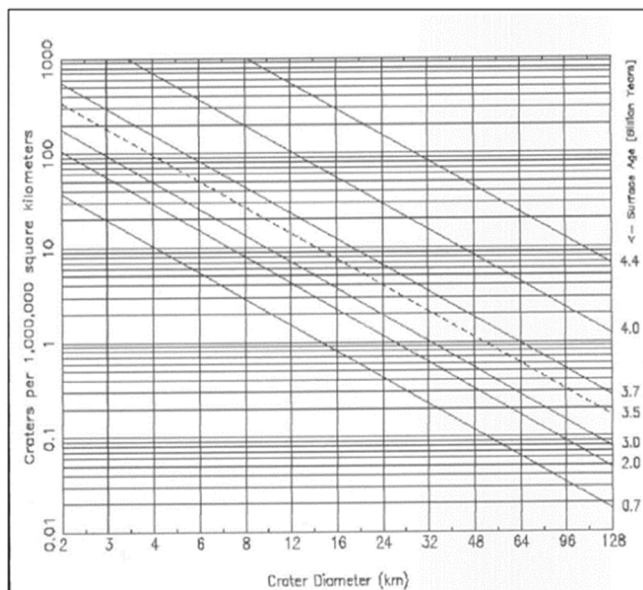


Fig. 7: Ett standardiserat Isokronogram använt för illustration av problemet för stora kraterdiametrar, y axeln visar en kraterfrekvensen / 1000000 Km<sup>2</sup> som en semi-logaritmiskt medans x axeln visar kraterdiametrar i km log-

### 5.1 Kraterberäkning av liten area

För att illustrera förhållandet mellan avgränsningsareans storlek och antalet kratrar samt deras påverkar på en mindre ytas kraterfrekvens som beskrivs i litteraturen e.g., (Palcus et al. 2020; Xiao & Strom 2012; Hartmann & Daubar 2017; Kukkonen & Kostama 2018). Utförs en kraterberäkning på Isidis platina med en area under 1000 km<sup>2</sup>. För att illustrera små kratrars effekt på kraterberäkning används ett område där majoriteten av kratrarna var <1 km diameter. Området avgränsades till en area på 15.5\*15.5 km med profilverktyget i JMARS. Undersökningsområdet är 240 km<sup>2</sup> (Fig. 5). Sedan markerades alla primära kratrar inom avgränsnings arean, kratrar som misstänks vara sekundära har valts bort genom identifieringen av antingen strålar eller klusterstrukturer (Fig. 4). Kratrar under 200m i diameter valdes bort då plottning av mindre storlekar är opålitligt på grund av meteorit förluster vid inträde till Mars atmosfär som ålderskurvorna ej tar hänsyn till (Paltz et al. 2013; Hartmann 2005). För kraterintervall valdes samma som används av Hartman och Daubar (2017) där kratrar grupperades i intervall med en stegvis ökning med  $\sqrt{2}$  från 1 m. Första intervall som används börjar vid 181–255 m då minsta data punkten är 200 m (Tabell 1). Kraterfrekvensen av varje kraterintervall beräknades sedan enligt formeln beskriven i 5.0. För att illustrera specifikt kraterfrekvensen koppling till area appliceras en konstant kra-

Tabell 1: Kraterbinning för metod 5.1 med stegvis ökning med  $\sqrt{2}$  från 1 m utformat efter kraterbin strukturen i Hartman och Daubar (2017).

Kraterintervall (m)	Kraterintervall (m)
181-255	512-724
255-362	724-1023
362-512	1023-1448

terfrekvensen på två olika areor. Undersökningsområdet på 240 km<sup>2</sup> skalas upp till 2400 km<sup>2</sup> medan krater frekvensen behålls. För att illustrera hur en ändrad kraterfrekvens påverkar kraterräkning hålls arean konstant på 240 km<sup>2</sup> men krater antalet ökas. Två ökningars görs där 10 respektive 5 adderas till respektive kraterintervall och plottas i samma isokront diagram som för ökningen i area och jämförs med ursprungsdatering från figur 3. Framtagna åldrar jämförs sedan med tidigare datering av hela ytan Isidis platina som är en av Mars yngre ytor som inte har genomgått större omformeringar vilket gör att mindre kratrar bevaras längre. Ytans ålder är beräknad till 3.9 Ga.

## 5.2 Stora kratrar i relation till area

Stora kratrars inverkan på kraterräkning, hur större kratrar från 20 km och uppåt beroende på area storlek förskjuter en ytas ålder. Effekten illustreras genom att kratrar inom ett stort område markeras med diametrar från 1–70 km där effekten av de stora kraterdiametrarna kan förtydligas. För kraterintervall används rekommenderat intervall som anges i CLSE (2015) vilket är samma intervall som för små kratrar intervall  $\sqrt{2}$  dock med början vid 1 km diameter. Undersökningsområdet är en area på 336 400 km<sup>2</sup> vid Hargraves krater (Fig. 8). Resultaten jämförs sedan med en tidigare datering av en yta närliggande Hargraves krater som gav en ålder mellan 3.2-3.7 Ga, late Noshian till Hesperian (Mangold 2020).

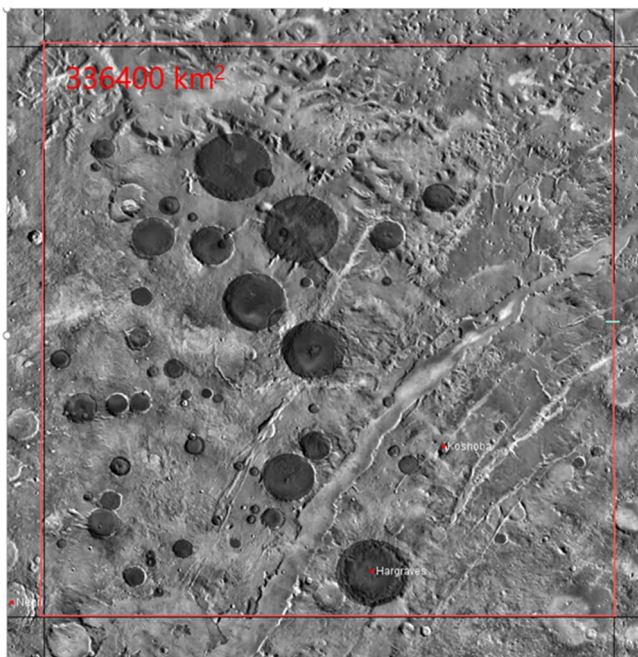


Fig. 8. Satellitbild över Mars yta taget med JMARS över undersökningsområdet vid Hargraves krater använd för kraterräknings illustrationen för stora kraterdiametrar. Kratrarna som använts för beräkning är markerade som mörka cirklar, kratrar av osäkert ursprung har ej markerats.

## 5.3 Olika Indelning av kraterintervall

För att illustrera vad som kan hända vid olika val av kraterintervall ändrades kraterintervallet från illustrationen av stora kratrar (Fig. 5), till en konstant grupp av 10 m för att illustrera hur olika bins har för effekt på framtagna ålder.

## 6. Observationer

Resultat över från genomförda metodik för att illustrera problemen med kraterräkning. Resultatet är uppdelat i tre delar där problemen samt allmänna observationer lyfts fram.

### 6.1 Stora kratrar

Illustration av kraterräkning med större kratrar från figur 8 visas i figur 9.

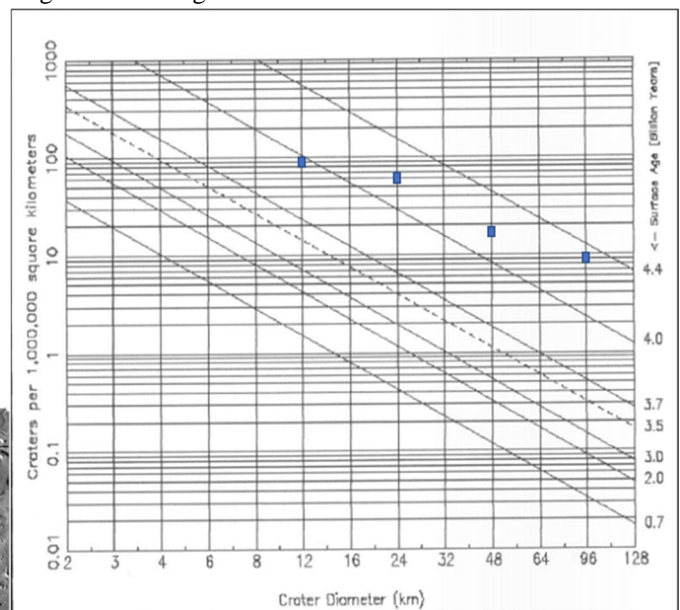


Fig. 9. Resultande data från kraterräkning gjord för illustration av problematiken för stora kratrar (figur 8). Plottat i ett Isokronogram standardiserat till en area på 1000000 km<sup>2</sup> varje data punkt är en frekvens av kratrar binat stegvis med  $\sqrt{2}$  avrundat till heltal. Diagrammet är taget från CLSE (2015).

Tabell 2: Kraterräkningsdata tagen med Jmars från kraterräkning utförd metodiken i 5.2. Kraterintervall är indelade med en stegvis ökning med  $\sqrt{2}$  enligt metodik utförd i CLSE (2015). Resultaten är plottade i figur 8.

Kraterintervall (km)	Antalet kratrar st	kraterfrekvens* (1000,000/336400 km <sup>2</sup> )
8-16	31	92.2
16-32	21	62.4
32-64	6	17.8
64-128	3	8.9

Totalt räknades 60 kratrar i området vilket gav 4 data punkter med valt kraterintervall (Tabell 2). Majoriteten av rå data innehöll kratrar <30 km diameter. 31st av de markerade kratrarna uppmättes till 10 km i diameter samt 16 kratrar uppmättes till 20 km i diameter medan

resterande kratrar uppmättes till 30, 40, 50 och 60 km. Diagrammet ger en ålder mellan 4.0–4.4 Ga vilket är äldre en jämförelseareas nära Hargravs krater med en ålder 3.7–4.0 Ga. De tre större datapunkterna mellan 24–96 km visar en näst intill rätt linje medan punkten vid 12 km som representerar bin 8–16 km i diameter avviker något från den övergående trenden.

## 6.2 Kraterräkning av liten area

Totalt räknades 35 kratrarna i området (Fig. 4 & 5) (Tabell 3) var av resterande antogs vara sekundära kratrar och valdes bort enligt beskrivning i 5.1. Vanligaste krater storlekarna i området var mellan 400–300 m resterade storlekarna <300 och >400 hade förekom lika frekvent i området. Punkterna plottar längs kurvorna för 3Ga och 3.5 Ga vilket ger en relativ ålder hos ytan mellan 3–3.5 Ga (Fig. 10). Vilket är yngre en Isidis platinas som har en ålder runt 3.9 Ga.

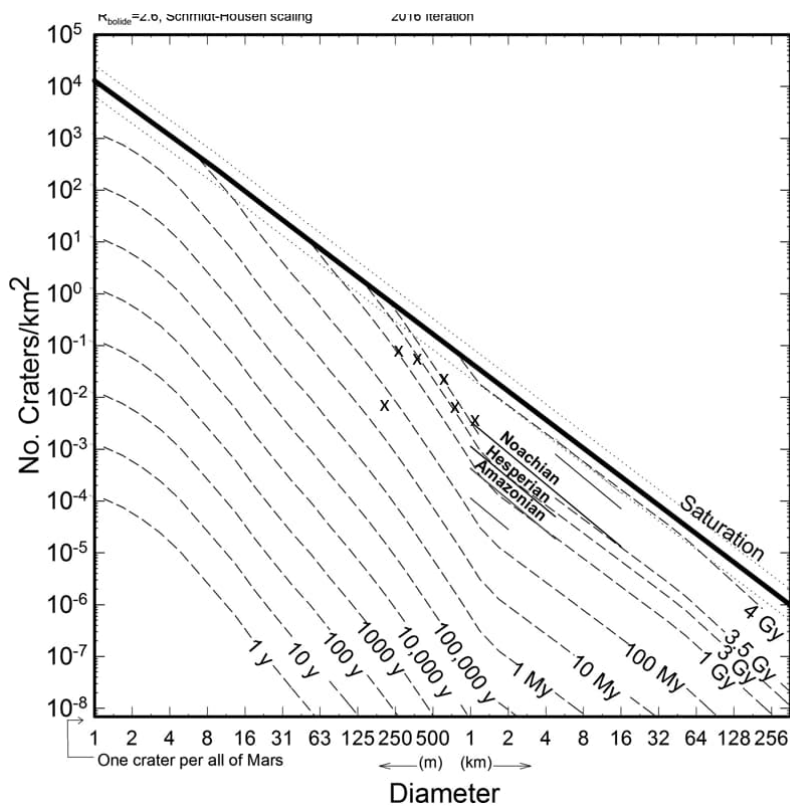


Fig. 10. Isokronendiagram taget från Hatman och Daubar (2017) data plottad från Tabell 3 gjord från metodiken i 5.1. Diagrammet har krater diameterar på x-axeln som stegvis ökar med  $\sqrt{2}$  från 1m. Y-axeln är antalet kratrar/undersöknings larea skalat med en logaritmisk skala med en bas av 10.

Tabell 3: Kraterräknings data tagen från JMARS från krateräkning som visas i figur 9, Beräknad enligt metod för mindre kratrar i Excel med en area av 240 km<sup>2</sup>.

Kraterintervall (m)	Antal kratrar st	Kraterfrekvens/240 km <sup>2</sup>
181-255	2	0.008
255-362	22	0.092
362-512	14	0.058
512-724	6	0.025
724-1023	2	0.008
1023-1448	1	0.004

Tabell 4: Data från samma områden som data i tabell 3 med ökad area till 2400km<sup>2</sup>.

Kraterintervall (m)	Antal kratrar st	Kraterfrekvens/2400 km <sup>2</sup>
181-255	2	0.0008
255-362	22	0.0092
362-512	14	0.0058
512-724	6	0.0025
724-1023	2	0.0008
1023-1448	1	0.0004

Tabell 5. Data från tabell 3 med antalet kratrar adderat med 5 kratrar per bin. Data plottas i figur 10.

Kraterintervall (m)	Antal kratrar st	Kraterfrekvens/240 km <sup>2</sup>
181-255	7	0.03
255-362	27	0.11
362-512	19	0.08
512-724	11	0.045
724-1023	7	0.03
1023-1448	6	0.025

Tabell 6. Data från tabell 3 med antalet kratrar adderat med 10 kratrar per bin. Data plottas i figur 10.

Kraterintervall (m)	Antal kratrar st	Kraterfrekvens/240 km <sup>2</sup>
181-255	12	0.05
255-362	32	0.13
362-512	24	0.1
512-724	16	0.067
724-1023	12	0.05
1023-1448	10	0.04

Med en ökning av arean med en storleksordning på 10<sup>1</sup> vilket ses i tabell 4 visar krateräkningen i figur 11 en värdeminskning i storleksordningen 10<sup>2</sup>. Värdeminskningen från tabell 3–4 är dubbelt så stor som ökningen i area. En ändring i area visar en markant förändring i kraterfrekvensen per area. Resultande diagram plot 2 i figur 11 gav en ålder mellan 1Gy - 100 Myr vilket är betydligt yngre en både åldern från figur 9 och åldern för Isidis platinas.

Ovan tabeller Tabell 2–4) samt figur 11 visar att stora ändringar i åldrar vid en ändring av areafaktorn för uträkningen. Ändring av antalet kratrar per bin har en mindre påverkan på resultaten än ökning av arean. Fler kratrar i ett mindre område ger åldrar närmre 4.0ga och ökad närhet till kratermätadslinjen tendensen visas tydligast för Plot 4 där antalet ökat med 10st kratrar per bin (Fig. 11). Punkterna i figur 11 för de ökade kraterantalen +5 och +10 skiljer sig från punkterna för Plot 1 och ger båda liknande åldrar. Ökningarna mellan Plot 3 och 4 är minimala, en noterbar skillnad är att mindre ökningen passar bättre till en ålders kurva (4.0 Ga) än för data där kratrarna ökats med +10 (Fig. 11).



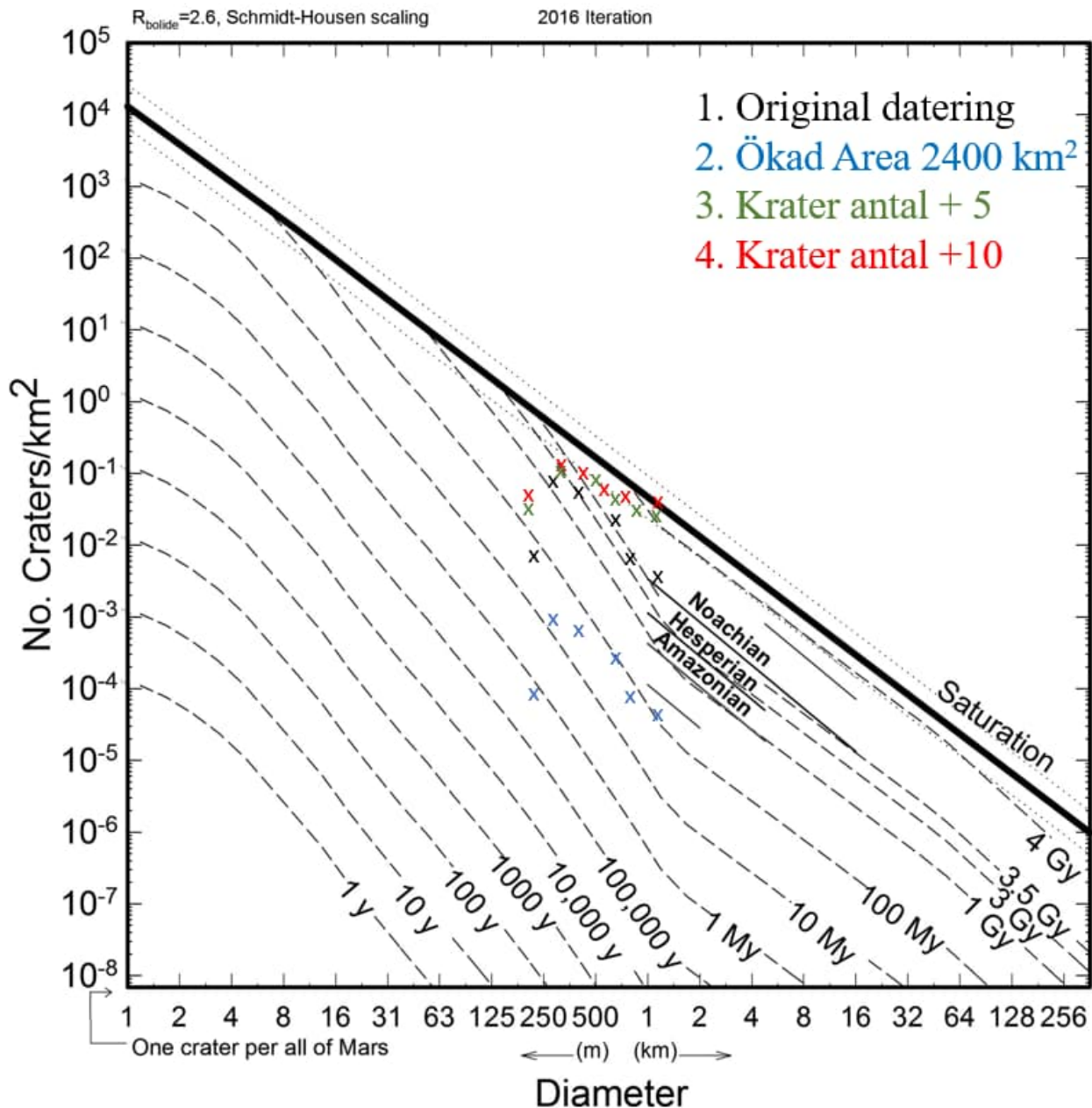


Fig. 11: Isokronendiagram taget från Hatman och Daubar (2017) data plottad från Tabell 4–6 gjord från metodiken i 5.1. Diagrammet har kraterdiametrar på x-axeln som stegvis ökar med  $\sqrt{2}$  från 1m. Y axeln är antalet kratrar/undersöknings area skalat med en logaritmisk skala med en bas av 10. Diagrammet visar fyra olika plotter av original dateringen av ytan (fig. 9) (svart), samma datering med ökad area (blå), ökat krater antal med +10 i varje bin (Röd) och +5 i varje bin (grön).

### 6.3 Olika indelning av kraterintervall

Inom detta kapitel beskrivs resultat från metod 5.3 ångående fel bin av kratrar i figur 12.

Tabell 7. Data tillhörande de vänstra diagrammet i figure 12.

Kraterintervall (Fel bin)	Antalet kratrar st	Antalet kratrar* 1000,000/336400km <sup>2</sup>
1- 10km	31	92.2
11-20km	16	47.6
21-30 km	5	14.9
31-40 km	2	5.9
41-50km	1	3.0
51-60km	2	5.9
61-70km	3	8.9

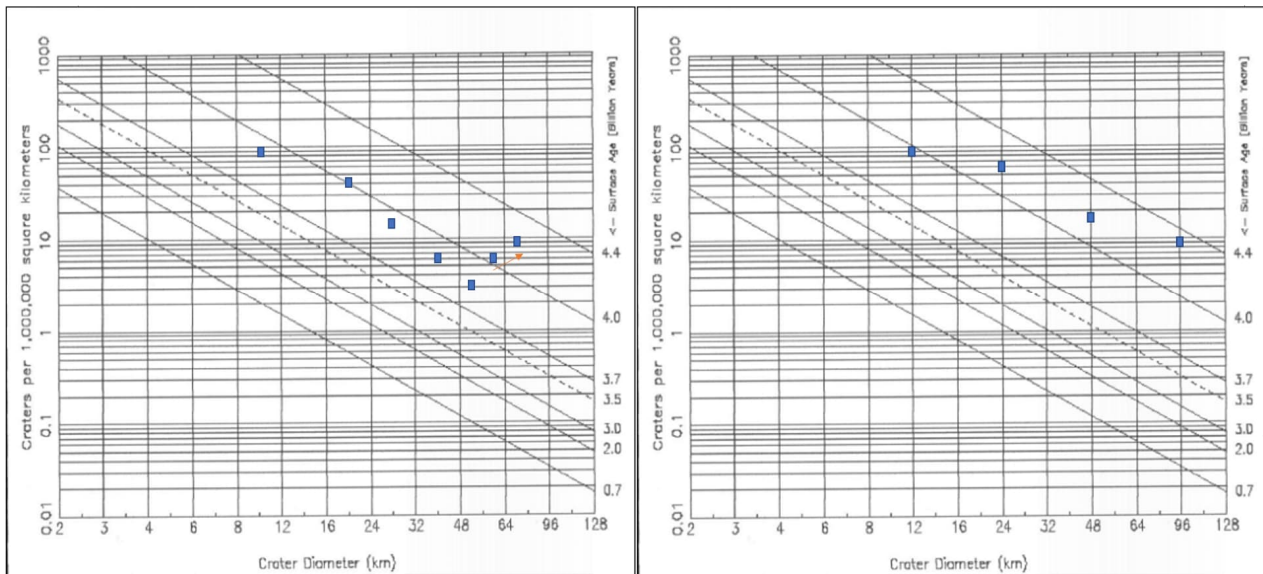


Fig. 12. Figur som visar resultatet från 5.3 med användning av ett kraterintervall med 10m indelning v och dess påverkan på resulterande isokronidiagram jämfört illustration från figur 9 till höger. Stor kraterdiameter räkning ställt i jämförelse med samma data indelad i 10 m bins.

Resultaterande diagram från före och efter fel indelning av kraterintervall (Fig. 12) illustrera en förändring i resultat och antalet data punkter. Vid indelning, med 10 km kraterintervall (Tabell 7) ger mer data punkter samt har vi samma startpunkt men 10 km i diameter ger en skarpare kurva och yngre ålder som sedan förskjuts vid 50km diameter. Utan förskjutningen ges en ålder mellan 3-7-3.0 Ga med förtjusning uppvisas åldern bli närmre 4.0 Ga. Datering med data punkter ger en ålder närmre Hargraves ålder 3.7-4.0 Ga och yngre en original dateringens ålder på 4.0-4.4 Ga.

## 7. Diskussion

### 7.1 Misslyckanden av illustrationen

Vald metod har inte fullständigt kunna illustrera samtliga av kraterräkningsmetodens problem som nämnts inom arbetet. Först har försöket att illustrera problemet med mindre areor från 5.1 lyckats visa att ett litet område inte är representativt för hela Isidis platina då ytans ålder är ca 1-0.5 Ga yngre än Isidis platina. Dock är dateringen förlitan i omfattning för att konkret veta om resultatet endast beror på just mindre areor och kraterstorlekar därmed blir illustrationen ofullständig. Fler ytor hade behövts mättas för att säkert kunna färdigställa att resultatet speglar problemet kring mindre areor. På grund av bristande erfarenhet i bedömning av kraterursprung (sekundära mot primära kratrar) var undersökning av fler areor ej möjlig inom tidsramen för arbetet. Detta bidrog till att en relativt liten area användes för räkning, med syftet att minimera antalet kratrar som behövdes räknas för att bespara tid samt minimera bedömningbördan av kraterursprung primära mot sekundär, och därmed minimera kontaminerings effekt hos sekundära kratrar. Dock har sambandet mellan antalet kratrar och ytans arena kunnat illustreras (Fig. 11)

Problematiken kring kraterutplåningen gick ej heller att illustrera genom den valda metoden, då ingen riktigt kraterräkning gjorts kan ej befintliga metoder

beräkna utplåningshastigheten som exempelvis görs i Smith et al (2008). För att utföra en bedömning hade fler talet kraterräkningar behövts göras av ytor med liknande ålder som sedan plätas i olika isokronidiagram med baserade på olika utplåningshastighets formler. En sådan metodik hade gått utanför tidsramen för arbetet och krävt en djupare förståelse av metoden en vad som kan skaffas under ett kandidat arbete. Primära mot sekundära kratrar effekt på kraterräkning kan ej illustreras praktiskt med vald metod. För att illustrerar problemet enkelt krävs en yta bestående av enbart sekundära kratrar av samma ålder som en med primära vilket ej är praktiskt möjligt. Då kontaminering av sekundära kratrar är enkelt i teorin men komplicerat att kvantifiera eftersom problemen beror på subjektiv klassificering, där av kan problemet endast diskuteras teoretiskt. Effekten antas ha påverkat utförda dateringar samt är det första gången jag utför kvalificering av sekundära kratrar så kontaminerings effekten antas ha förstörats.

Placering av datapunkter gjordes manuellt vilket också påverkar alla resultaten men faller inom rammarna för mänskligt fel. Större problematik kring placering av data punkter kring x-axeln i isokronidiagrammen då en punkt representerar ett helt intervall av kraterdiameter. Val av placering används median eller genomsnitt talet för kraterintervallet exempel för 10-16 används 12 likt figur 9. Beroende på placering i horisontalld kommer punkterna matchas olika att ge variationer i åldrar. Hade metoden gjorts om hade problemen kunnat minimeras genom antingen ett automatiserat program kunnat användas som ArcGIS för plottning av data där punkterna placering blir mer konsekvent. Möjligen hade fler data punkter eller använda ett diagram med mindre skala på x-axeln som figur 9 minimerat osäkerheten men då hade eventuella datastrukturer i framförallt 5.2 blivit mindre tydliga.

Ytterligare felmarginaller inom utförd metod behövs belysas, specifikt markering av stora kratrar i 5.2 vilket innehåller en stor preferens emot kratrar runt 10 och 20 km i diameter samt att majoriteten av kratrar

uppmättes till samma storlek. Problemet orsakas av att mätning av stora kratrar var den första mätning jag utförde och första gången som jag applicerade metoden. Detta leder till att resultaten har en viss partiskhet mot senare utförda dateringar då min kraterklassificering och mätnings förmåga har förbättrats under arbetets gång.

## 7.2. Kraterdiameter och area

I resultaten visas problemen med area tydligt där förhållande mellan en ytas area och kraterdiameter har stor påverkan på given ålder. Resultatet visar även att ändringar i area har en större påverkan på resultatet än kraterfrekvensen (Fig. 11) vilket överensstämmer med litteraturen (Kukkonen & Kostama 2018; Xiao & Strom 2012; Hartmann & Daubar 2017; Palucis et al. 2020). Kraterfrekvensen kan observeras ha en mindre påverkan på åldern än arean (Fig. 11) då förskjutningen i ålder är runt 3.0 Ga vid areaökning med ca 0.5 Ga vid ökning av krater antalet. Förmodligen beror den mindre ålderskillnaden på att det krävs större ändringar i kraterantalet för att åstadkomma en markant skillnad i ålder. Dock är effekten mer påtaglig vid räkning av mindre areor då maxantalkratrar som kan finnas i ett område är mindre jämfört om arean ökas. Vilket är ett av argumenten bakom varför sekundära kratrar och kraterutplåning har minimala effekt på kraterfrekvenser i en större area (Palucis et al. 2020; Palts et al. 2013).

Resultaten för liten area (Fig. 11) illustrerar att en ändring av area påverkar ytans beräknade ålder då kraterfrekvens är beroende av ytans area. Det blir där med viktigt att bestämma ett areaminimum för varje undersökning. Dock eftersom en ytas areaminimum är beroende på flertalet faktorer exempelvis, vilken minimumkraterdiameter som används, kraterintervallens storlek, samt vilken kraterutplånings och erosionshastighet som antas verka på ytan (Palucis et al. 2020). Därav måste kraterdiameterns intervall samt areaminimumet för varje kraterberäkning bestämmas från fall till fall. Forskning visar att desto mindre kraterstorlekar som räknas desto mindre undersöknings area kan användas (Palucis et al. 2020; Hartman & Daubar 2017; Kukkonen & Kostama 2018). Kraterberäkning är en metod som har sin grund i att datera stora ytor följden blir att resultat av mindre area inte kan vara representativ för hela undersökningsytan (Kukkonen & Kostama 2018). Små områden leder också till att stora kratrar får en större inverkan på områdets kraterdiameterfrekvens genom att mer av ytan täcks upp av en specifik krater (Kukkonen & Kostama 2018; Palucis et al. 2020). Denna effekt kan observeras i figur 10 där ålder på ytan i figur 4 var 1–0.5 Ga yngre än isidis platina dock krävs mer analyser för att kunna dra en konkret slutsats.

Datering med mindre kraterdiameter kan göras med uppdaterade isokrondiagram och bättre satellitbilder, dock förutsätter detta att de kratrar som mäts är primära (Hartmann & Daubar. 2017). I samband kraterberäkning av mindre areor blir chansen för sekundära kratrars påträffas allt större (Beirhaus et al. 2018). Dock vid beräkning av äldre ytor anses förekomsten av sekundära kratrar vara mindre. På grund av att den storleksordning av primära nedslag som behövs för att producera sekundära kratrar i km skala med högt nog

CRA för att bevaras under längre tids perioder är extremt ovanligt. Om ytans ålder är  $>20$  Ma påverkas resultatet i en mindre utsträckning av sekundära kratrar på grund av deras låga bevaringstid (Quantin et al. 2016). Därmed blir det viktigt fastställa en relativ ålder av kratrarna som räknas med att exempelvis kolla på mognaden hos en kraters ejektamaterial för att få en uppfattning om ytans ålder. En relativ åldersbestämning gör att resultatet av en datering kan sättas i en geologisk kontext och kan därmed upplysa samt förebygga problematik som kan uppstå vid datering av mindre ytor.

Resultaten från datering av ytan intill Hargraves krater illustrerar stora kratrars effekt på datering, i samband med att given ålder är mellan 4.0–4.4 Ga (Fig. 9). Resulterande ålder är äldre än området vid Hargraves krater 3.2–3.7 Ga bestämt från tidigare undersökningar som gjorts i området (Mangold 2020). Denna observation stämmer bra överens med den information som återfinns i litteraturen. Där få stora kratrar inom en mindre area i förhållande till kraterdiameter  $>20$  km i diameter, bidrar till förhöjda ytdaterings resultat på grund av en icke-representativ kraterfrekvens. Dock syns ingen direkt förskjutning av data från yngre till äldre åldrar möjligen kan detta bero på bristande data punkter.

## 7.3 Fel i metoden – isokrondiagrammet och kraterintervall

Kraterberäkningens viktigaste metodik fel vid genomförande av metoden är fel gruppering av kraterstorlekar. Fel i val av kraterdiameterns intervall försämrar statistiska säkerheten hos isokrondiagrammet (Hartmann 2005). Detta illustreras av resultaten i 5.3 där figur 12 visar att val av kraterintervall starkt påverkar läsligheten och statistiska säkerheten hos isokrondiagrammets data. Fel i bin av kraterintervall är ett rent praktiskt fel inom metodiken för kraterberäkning, som kan leda till ett överflöd eller avsaknad av data punkter samt större osäkerhet i den givna åldern. Kraterintervalls uppdelning beror på den statistisk utbredning av kraterstorlekar vilken styrs mycket av den valda mätningsytan. Den vanligaste fördelningen är att använda  $\sqrt{2}$  eller  $\sqrt{2}^{1/2}$  beroende på storleksfördelningen hos kratrarna och önskat antal data punkter. Därav bestäms vilket intervall som används främst utifrån antalet och storleksvariansen hos kratrarna samt mängden data som används (Hartmann 2005; Palucis al. 2020). Antalet datapunkter som ges och påverkar i sin tur isokrondiagrammets statistiska säkerhet då fler data punkter ger större precision. Därav understryks vikten av att vid utvärdering av kraterberäkningens resultat bör grunden för val av kraterintervall analyseras noggrant (Hartmann 2005). Helst bör intervallen hållas små för att representera maximala antalet kraterstorlekar och ge en hög mängd med datapunkter som ger en högre statistisk säkerhet.

På grund av tidsbesparing räknades i arbetets metod ett mindre antal kratrar en vad som rekommenderas. Inom litteraturen uppkommer kraterberäkning från databaser som innehåller uppemot 1000 olika kratrar i en beräkning e.g., (Kukkonen & Kostama 2018; Hartmann & Daubar 2017; Hartmann 2005; Bierhaus et al. 2018). Fler kratrar leder till att mindre intervall kan antas och således fås mer data punkter för isokrondia-



grammet. Bättre sätt att illustrera detta problem som gjorts av bland annat av Hartmann (2005) är att fokusera specifikt på bara fel i isokrondiagrammet och valet av kraterintervall för att kunna göra en mer utförlig bedömning.

#### 7.4 Kraterutplåning & erosion

Kraterutplåning går ej att praktiskt illustrera genom vald metod eftersom det inte finns någon data som kan representera erosion och degradering av kratrar. Kraterutplåning är ett problem som existerar mest inom teorin eftersom det är omöjligt att observera en sådan lång tidsvariation av en yta. Effekten går dock att beräkna genom funktioner framtagna av Smith et al (2008) vilket visar att höga kraterutplåningshastigheter har stora effekter på kraterräkningsresultat. Dock verkar det också visa att mindre utplåningshastigheter över lång tid har en försumbar effekt på framtagna åldrar. Vid kraterräkning kan utplåningseffekten inte uteslutas helt, dock behövs effekten tas i mindre beaktning vid beräkning av kratrar över >10 km diameter. Ändringar inom antagen erosionshastighet har störst effekt vid beräkning med kratrar <10 km diameter, eller vid områden som varit utsatta för markant ytomvandling från exempelvis vulkanism. Beräkningar av mindre områden har därmed större risk för märkbara ändringar i åldrar hos isokrondiagrammen. Det är också rimligt att anta att räkning av kratrar >10 km, påverkas minimalt av kraterutplåning med tanke på sällsyntheten hos större nedslag och deras höga CRA.

#### 7.5 Primära mot Sekundära kratrar

Illustration av felmarginall kring primära och sekundära kratrar är svårt att genomföra inom ramarna för arbetet. Eftersom särskiljandet mellan primär och sekundära är subjektiv. Beskrivningar av sekundära kraterklassificeringar är få, identifiering görs främst efter de morfologiska aspekter som beskrevs i 4.1. De morfologiska likheterna mellan sekundära och primära kratrar vid små kraterdiametrar försvårar klassificering ytterligare. Till exempel i figur 4 och 5 är det svårt att urskilja om kratrarna är grunda depression, sekundära nedslagskratrar eller starkt eroderad primära kratrar då ett väldefinierat kraterkant inte alltid är synlig. Högupplösta bilder av ejektblock skulle kunna hjälpa till att förenkla identifiering mellan sekundära och primära kratrar (Bart & Melosh 2007). Dock är metodens säkerhet på Mars ej utförligt testad och är därmed opålitlig för användning.

Andra lösningar som jämförande av resultat med geologiska bildningsordning hos yt-morfologierna i ett område är sällan möjligt innan en datering är gjord. Datering av mindre kratrar är möjligt dock krävs exkludering av uppenbara sekundära kraterformationer som strålar och kluster. (Kukkonen & Kostama 2018). På grund av att större delen av små kratrar (<1km i diameter) på Mars troligen är sekundära, har svårigheten att särskilja sekundära kratrar från mindre primära kratrar stor effekt och kan få kraterräkning av mindre kratrar att framstå som opålitligt. Dock som nämnts tidigare har nyare arbeten visat att sekundära kratrar med lågt CRA inverkan på resultatet avtar på ytor äldre en 20 Ma. På grund av att koncentrationen av mindre kratrar avtar och större kratrar med högre CRA

dominerar (Quantin et al. 2016). Följaktligen kan problemet med sekundära kratrar kringgås med en viss lätthet, bortsett från dateringar av yngre och små ytor.

### 8. Slutsats

Sammanfattningsvis kan inte all problematik inom kraterräkning illustreras på grund av rådande tidsbegränsning och vald metodik. Dock med hjälp av litteraturkällor kan slutsatser om metoden ändå göras. Kraterräkning är den främsta metoden vid datering av Mars yta och är således best tillämpad för att öka förståelsen av Mars historia. Metoden har dock viss problematik som har belysts i arbetet.

Första problemet är att avsaknaden av radiometriskt daterade prover med känd proveniens gör det svårt att till 100% utvärdera metodens pålitlighet i enskilda dateringar. Ytterligare problem låg inom klassificering av primära och sekundära kratrar inom Mars population av små kratrar (<1 km diameter). Problemet utsträckning visats vara minimal och ligger främst inom identifiering. Då nyare arbeten tyder på att sekundära kratrar har en försumbar effekt vid datering av ytor >20 Ma. Därutöver har problem kring olika kraterdiameter påverkan på undersökningsarean diskuterats. Undersökningsareans storlek i förhållande till kratrarnas storlek har störst påverkan på kraterfrekvensen inom undersökningsområdet. Problemet har en större effekt på mindre areor på grund av att mer av den totala ytan kan tas upp av enstaka större kratrar, vilket ökar kraterdiameterfrekvensen och ytans ålder. Till skillnad från användande av större areor där kraterfrekvensen får en högre tolerans för räkning med stora kratrar. Problemet kan dock lösas genom anpassning av kraterintervallet samt area.

Problemet kring erosion och kraterutplåning vid kraterräkning är störst vid datering med mindre och sekundära kratrar. Eftersom utplåningseffekten anses vara minimal hos nybildade och större kratrar men ökar i takt med ökad ålder samt minskar med minskande kraterdiametrar. Effekten anses störst vid kratrar vars diameter är <10 km, över denna storlek kan utplåningshastighet räknas bort med olika formler exempelvis uträkningarna framtagna av Smith et al. (2008). Vid allmän beräkning för att kringgå användning av mer avancerade erosionsberäkningar bör kratrar inom 10–30 km diameters intervallet dateras för att uppnå best resultatsäkerhet. Med anledning av att kraterintervallet 10–30 km diameter räknar kratrar med högre bevaringsålder samt påverkas mindre av felmarginaller kring små eller stora kratrar.

Kraterräkning har vid första anblick många felmarginaller, men majoritet har kunnat lösas med modern teknik och ytterligare forskning. Fram till radiometrisk prov finns tillgängliga borde resultat från kraterräkning vid ytor yngre >20 Ma tas med försiktighet och utvärderas med andra relativa dateringsmetoder såsom mognade hos krater ejektblock. Felmarginaller i metoden har minskat över tid och tills det att radiometrisk prov blir tillgängliga fortsätter kraterräkning att vara den främsta metoden för datering av ytor på Mars.

## 9. Referenser

Bart, G. D. & Melosh, H. J., 2007: Using lunar boulders to distinguish primary from distant secondary impact craters: *Geophysical Research Letters* 34. doi: 10.1029/2007gl029306

Bierhaus, E. B., McEwen, A. S., Robbins, S. J., Singer, K. N., Dones, L., Kirchoff, M. R. & Williams, J. P., 2018: Secondary craters and ejecta across the solar system: Populations and effects on impact-crater-based chronologies: *Meteoritics & Planetary Science* 53, 638-671. doi: 10.1111/maps.13057

Carr, M. H. & Head, J. W., 2010: Geologic history of Mars: *Earth and Planetary Science Letters* 294, 185-203. doi: 10.1016/j.epsl.2009.06.042

CLSE, 2015: Using JMARS for crater counting: hämtad 2021-05-10 från [https://www.lpi.usra.edu/exploration/education/hsResearch/lunar\\_data/UsingJMARSforcratercounting.pdf](https://www.lpi.usra.edu/exploration/education/hsResearch/lunar_data/UsingJMARSforcratercounting.pdf)

Farley, K. A., Williford, K. H., Stack, K. M., Bhartia, R., Chen, A., Manuel, Hand, K., Goreva, Y., Herd, C. D. K., Hueso, R., Liu, Y., Maki, J. N., Martinez, G., Moeller, R. C., Nelessen, A., Newman, C. E., Nunes, D., Ponce, A., Spanovich, N., Willis, P. A., Beegle, L. W., Bell, J. F., Brown, A. J., Hamran, S.-E., Hurowitz, J. A., Maurice, S., Paige, D. A., Rodriguez-Manfredi, J. A., Schulte, M. & Wiens, R. C., 2020: Mars 2020 mission overview: *Space Science Reviews* 216. doi: 10.1007/s11214-020-00762-y

Golombek, M. P., Crumpler, L. S., Grant, J. A., Grealey, R., Cabrol, N. A., Parker, T. J., Rice, J. W., Ward, J. G., Arvidson, R. E., Moersch, J. E., Fergason, R. L., Christensen, P. R., Castaño, A., Castaño, R., Haldemann, A. F. C., Li, R., Bell, J. F. & Squyres, S. W., 2006: Geology of the gusev cratered plains from the spirit rover traverse: *Journal of Geophysical Research: Planets* 111, n/a-n/a. doi: 10.1029/2005je002503

Golombek, M. P., Warner, N. H., Ganti, V., Lamb, M. P., Parker, T. J., Fergason, R. L. & Sullivan, R., 2014: Small crater modification on meridiani planum and implications for erosion rates and climate change on Mars: *Journal of Geophysical Research: Planets* 119, 2522-2547. doi: 10.1002/2014je004658

Hartmann, W. K., 1966: Early lunar cratering: *Icarus* 5, 406-418. doi: 10.1016/0019-1035(66)90054-6  
Hartmann, W. K., 1999: Martian cratering VI: Crater count isochrons and evidence for recent volcanism from Mars Global Surveyor. *Meteoritics & Planetary Science* 34, 167-177. doi: 10.1111/j.1945-5100.1999.tb01743.x

Hartmann, W. K., 2005: Martian cratering 8: Isochron refinement and the chronology of Mars. *Icarus*, 294-320. doi: 10.1016/j.icarus.2004.11.023.

Hartmann, W. K. & Neukum, G., 2001: *Space Science Reviews* 96, 165-194. doi: 10.1023/a:1011945222010

Hartmann, W. K. & Neukum, G. 2001: Cratering chronology and the evolution of mars. I, 165-194. Springer Netherlands,

Ivanov, M. A., Hiesinger, H., Erkeling, G., Hielscher, F. J. & Reiss, D., 2012: Major episodes of geologic history of isidis planitia on Mars: *Icarus* 218, 24-46. doi: 10.1016/j.icarus.2011.11.029

Kukkonen, S. & Kostama, V. P., 2018: Usability of small impact craters on small surface areas in crater count dating: Analysing examples from the harmakhis vallis outflow channel, Mars: *Icarus* 305, 33-49. doi: 10.1016/j.icarus.2018.01.004

Mangold, N., Dromart, G., Ansan, V., Salese, F., Kleinhans, M. G., Massé, M., Quantin-Nataf, C. & Stack, K. M., 2020: Fluvial regimes, morphometry, and age of jezero crater paleolake inlet valleys and their exobiological significance for the 2020 rover mission landing site: *Astrobiology* 20, 994-1013. doi: 10.1089/ast.2019.2132

McEwen, A., Preblich, B., Turtle, E., Artemieva, N., Golombek, M., Hurst, M., Kirk, R., Burr, D. & Christensen, P., 2005: The rayed crater Zunil and interpretations of small impact craters on Mars. *Icarus* 176, 351-381. doi: 10.1016/j.icarus.2005.02.009

Nasa., 2020: objectives: hämtad 09-07-23 från: <https://Mars.nasa.gov/Mars2020/mission/science/objectives/>

Palucis, M. C., Jasper, J., Garczynski, B. & Dietrich, W. E., 2020: Quantitative assessment of uncertainties in modeled crater retention ages on Mars: *Icarus* 341, 113623. doi: 10.1016/j.icarus.2020.113623

Platz, T., Michael, G., Tanaka, K. L., Skinner, J. A. & Fortezzo, C. M., 2013: Crater-based dating of geological units on Mars: Methods and application for the new global geological map: *Icarus* 225, 806-827. doi: 10.1016/j.icarus.2013.04.021

Palucis, M. C., Jasper, J., Garczynski, B. & Dietrich, W. E., 2020: Quantitative assessment of uncertainties in modeled crater retention ages on Mars: *Icarus* 341, 113623. doi: 10.1016/j.icarus.2020.113623

Quantin, C., Popova, O., Hartmann, W. K. & Werner, S. C., 2016: Young martian crater gratteri and its secondary craters: *Journal of Geophysical Research: Planets* 121, 1118-1140. doi: 10.1002/2015je004864

Quantin-Nataf, C., Craddock, R. A., Dubuffet, F., Lozac'h, L. & Martinot, M., 2019: Decline of crater obliteration rates during early martian history: *Icarus* 317, 427-433. doi: 10.1016/j.icarus.2018.08.005

Robbins, S.J., Hynek, B.M., 2011. Secondary crater fields from 24 large primary craters on Mars: Insights into nearby secondary crater production: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116. doi:10.1029/2011je003820

Robbins, S. J. & Hynek, B. M., 2011: Distant secondary craters from lyot crater, Mars, and implications for surface ages of planetary bodies: *Geophysical Research Letters* 38, n/a-n/a. doi: 10.1029/2010gl046450

Smith, M. R., Gillespie, A. R. & Montgomery, D. R., 2008: Effect of obliteration on crater-count chronologies for martian surfaces: *Geophysical Research Letters* 35. doi: 10.1029/2008gl033538

Watchman, A. L. & Twidale, C. R., 2002: Relative and 'absolute' dating of land surfaces: *Earth-Science Reviews* 58, 1-49. doi: 10.1016/s0012-8252(01)00080-0

Warner, N. H., Schuyler, A. J., Rogers, A. D., Golombek, M. P., Grant, J., Wilson, S., Weitz, C., Williams, N. & Calef, F., 2020: Crater morphometry on the mafic floor unit at jezero crater, Mars: Comparisons to a known basaltic lava plain at the insight landing site: *Geophysical Research Letters* 47. doi: 10.1029/2020gl089607

Wang, Y., Xie, M., Xiao, Z., Cui, J., 2020. The minimum confidence limit for diameters in crater counts. *Icarus* 341, 113645. doi:10.1016/j.icarus.2020.113645

Xiao, Z. & Strom, R. G., 2012: Problems determining relative and absolute ages using the small crater population: *Icarus* 220, 254-267. doi: 10.1016/j.icarus.2012.05.012

**Tidigare skrifter i serien  
”Examensarbeten i Geologi vid Lunds  
universitet”:**

600. Paradeisis-Stathis, Savvas, 2020: Holocene lake-level changes in the Siljan Lake District – Towards validation of von Post’s drainage scenario. (45 hp)
601. Johansson, Adam, 2020: Groundwater flow modelling to address hydrogeological response of a contaminated site to remediation measures at Hjortsberga, southern Sweden. (15 hp)
602. Barrett, Aodhan, 2020: Major and trace element geochemical analysis of norites in the Hakefjorden Complex to constrain magma source and magma plumbing systems. (45 hp)
603. Lundqvist, Jennie, 2020: ”Man fyller det med information helt enkelt”: en fenomenografisk studie om studenters upplevelse av geologisk tid. (45 hp)
604. Zachén, Gabriel, 2020: Classification of four mesosiderites and implications for their formation. (45 hp)
605. Viðarsdóttir, Halla Margrét, 2020: Assessing the biodiversity crisis within the Triassic-Jurassic boundary interval using redox sensitive trace metals and stable carbon isotope geochemistry. (45 hp)
606. Tan, Brian, 2020: Nordvästra Skånes prekambriiska geologiska utveckling. (15 hp)
607. Taxopoulou, Maria Eleni, 2020: Metamorphic micro-textures and mineral assemblages in orthogneisses in NW Skåne – how do they correlate with technical properties? (45 hp)
608. Damber, Maja, 2020: A palaeoecological study of the establishment of beech forest in Söderåsen National Park, southern Sweden. (45 hp)
609. Karastergios, Stylianos, 2020: Characterization of mineral parageneses and metamorphic textures in eclogite- to high-pressure granulite-facies marble at Allmenningen, Roan, western Norway. (45 hp)
610. Lindberg Skutsjö, Love, 2021: Geologiska och hydrogeologiska tolkningar av SkyTEM-data från Vombsänkan, Sjöbo kommun, Skåne. (15 hp)
611. Hertzman, Hanna, 2021: Odensjön - A new varved lake sediment record from southern Sweden. (45 hp)
612. Molin, Emmy, 2021: Rare terrestrial vertebrate remains from the Pliensbachian (Lower Jurassic) Hasle Formation on the Island of Bornholm, Denmark. (45 hp)
613. Höjbert, Karl, 2021: Dendrokronologi - en nyckelmetod för att förstå klimat- och miljöförändringar i Jämtland under holocen. (15 hp)
614. Lundgren Sassner, Lykke, 2021: A Method for Evaluating and Mapping Terrestrial Deposition and Preservation Potential- for Palaeostorm Surge Traces. Remote Mapping of the Coast of Scania, Blekinge and Halland, in Southern Sweden, with a Field Study at Dalköpinge Ängar, Trelleborg. (45 hp)
615. Granbom, Johanna, 2021: En detaljerad undersökning av den mellanordoviciska ”furudalkalkstenen” i Dalarna. (15 hp)
616. Greiff, Johannes, 2021: Oolites from the Arabian platform: Archives for the aftermath of the end-Triassic mass extinction. (45 hp)
617. Ekström, Christian, 2021: Rödfärgade utfällningar i dammanläggningar orsakade av *G. ferruginea* och *L. ochracea* - Problemstatistik och mikrobiella levnadsförutsättningar. (15 hp)
618. Östsjö, Martina, 2021: Geologins betydelse i samhället och ett första steg mot en geopark på Gotland. (15 hp)
619. Westberg, Märta, 2021: The preservation of cells in biomineralized vertebrate tissues of Mesozoic age – examples from a Cretaceous mosasaur (Reptilia, Mosasauridae). (45 hp)
620. Gleisner, Lovisa, 2021: En detaljerad undersökning av kalkstenslager i den mellanordoviciska gullhögenformationen på Billingen i Västergötland. (15 hp)
621. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2021: Origin and early evolution of isopods - exploring morphology, ecology and systematics. (15 hp)
622. Selezeneva, Natalia, 2021: Indications for solar storms during the Last Glacial Maximum in the NGRIP ice core. (45 hp)
623. Bakker, Aron, 2021: Geological characterisation of geophysical lineaments as part of the expanded site descriptive model around the planned repository site for high-level nuclear waste, Forsmark, Sweden. (45 hp)
624. Sundberg, Oskar, 2021: Jordlagerföljden i Höjeådalen utifrån nya borrhningar. (15 hp)
625. Sartell, Anna, 2021: The igneous complex of Ekmanfjorden, Svalbard: an integrated field, petrological and geochemical study. (45 hp)
626. Juliusson, Oscar, 2021: Implications of ice-bedrock dynamics at Ullstorp, Scania, southern Sweden. (45 hp)
627. Eng, Simon, 2021: Rödslam i svenska kraftdammar - Problematik och potentiella lösningar. (15 hp)
628. Kervall, Hanna, 2021: Feasibility of Enhanced Geothermal Systems in the Pre-

- cambrian crystalline basement in SW Scania, Sweden. (45 hp)
629. Smith, Thomas, 2022: Assessing the relationship between hypoxia and life on Earth, and implications for the search for habitable exoplanets. (45 hp)
630. Neumann, Daniel, 2022: En mosasaurie (Reptilia, Mosasauridae) av paleocensk ålder? (15 hp)
631. Svensson, David, 2022: Geofysisk och geologisk tolkning av kritskollors utbredning i Ystadsområdet. (15 hp)
632. Allison, Edward, 2022: Avsättning av Black Carbon i sediment från Odensjön, södra Sverige. (15 hp)
633. Jirdén, Elin, 2022: OSL dating of the Mesolithic site Nilsvikdalen 7, Bjørøy, Norway. (45 hp)
634. Wong, Danny, 2022: GIS-analys av effekten vid stormflod/havsnivåhöjning, Morupstrakten, Halland. (15 hp)
635. Lycke, Björn, 2022: Mikroplast i vattenavsatta sediment. (15 hp)
636. Schönherr, Lara, 2022: Grön fältspat i Varbergskomplexet. (15 hp)
637. Funck, Pontus, 2022: Granens ankomst och etablering i Skandinavien under post-glacial tid. (15 hp)
638. Brotzen, Olga M., 2022: Geologiska besöksmål och geoparker som plattform för popularisering av geovetenskap. (15 hp)
639. Lodi, Giulia, 2022: A study of carbon, nitrogen, and biogenic silica concentrations in *Cyperus papyrus*, the sedge dominating the permanent swamp of the Okavango Delta, Botswana, Africa. (45 hp)
640. Nilsson, Sebastian, 2022: PFAS- En sammanfattning av ny forskning, med ett fokus på föroreningskällor, provtagning, analysmetoder och saneringsmetoder. (15 hp)
641. Jägfeldt, Hans, 2022: Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimat-system. (15 hp)
642. Sundberg, Melissa, 2022: Paleontologiska egenskaper och syreisotopsutveckling i borrhäls Limhamn-2018: Kopplingar till klimatförändringar under yngre krita. (15 hp)
643. Bjerme, Tim, 2022: A re-investigation of hummocky moraine formed from ice sheet decay using geomorphological and sedimentological evidence in the Vomb area, southern Sweden. (45 hp)
644. Halvarsson, Ellinor, 2022: Structural investigation of ductile deformations across the Frontal Wedge south of Lake Vättern, southern Sweden. (45 hp)
645. Brakebusch, Linus, 2022: Record of the end-Triassic mass extinction in shallow marine carbonates: the Lorüns section (Austria). (45 hp)
646. Wahlquist, Per, 2023: Stratigraphy and palaeoenvironment of the early Jurassic volcanoclastic strata at Djupadalsmölla, central Skåne, Sweden. (45 hp)
647. Gebremedhin, G. Gebreselassie, 2023: U-Pb geochronology of brittle deformation using LA-ICP-MS imaging on calcite veins. (45 hp)
648. Mroczek, Robert, 2023: Petrography of impactites from the Dellen impact structure, Sweden. (45 hp)
649. Gunnarsson, Niklas, 2023: Upper Ordovician stratigraphy of the Stora Sutarve core (Gotland, Sweden) and an assessment of the Hirnantian Isotope Carbon Excursion (HICE) in high-resolution. (45 hp)
650. Cordes, Beatrix, 2023: Vilken ny kunskap ger aDNA-analyser om vegetationsutvecklingen i Nordeuropa under och efter Weichsel-istiden? (15 hp)
651. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2023: Palaeocolour, skin anatomy and taphonomy of a soft-tissue ichthyosaur (Reptilia, Ichthyopterygia) from the Toarcian (Lower Jurassic) of Luxembourg. (45 hp)
652. Kryffin, Isidora, 2023: Exceptionally preserved fish eyes from the Eocene Fur Formation of Denmark – implications for palaeobiology, palaeoecology and taphonomy. (45 hp)
653. Andersson, Jacob, 2023: Nedslagskratrars inverkan på Mars yt-datering. En undersökning av Mars främsta yt-dateringsmetod "Crater Counting". (15 hp)



# LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
Sölvegatan 12, 223 62 Lund