

令和元年度原子力規制庁委託成果報告書

古地磁気学的手法を用いた噴火現象の時間進展
プロセスに関する研究

国立大学法人 茨城大学

令和2年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

1. 前書き：研究背景と研究目的	1
2. 研究手法	2
2-1. 定方位サンプリングおよび古地磁気測定	2
2-2. 全岩試料の蛍 X 線分析	4
2-3. 研究対象	4
3. 現地サンプリング	5
3-1. 始良カルデラ噴出物	5
3-2. Mamaku/Ohakuri 火砕流	10
4. 古地磁気方位測定結果	14
4-1. 始良カルデラ噴出物	14
4-2. Mamaku/Ohakuri 火砕流	17
5. 議論	21
5-1. 超大規模噴火の継続時間推定	21
5-1-1. 始良カルデラ噴出物	21
5-1-2. Mamaku/Ohakuri 火砕流	23
5-1-3. 他の研究事例との比較検討	25
5-2. 手法の改善	26
5-2-1. 試料採取サイトの選定	26
5-2-2. テフラ試料を熱消磁するためのアルミ・キューブの問題	27
6. まとめ	28
参考文献	29
付録：全試料の消磁曲線と特徴的残留磁化方位	32

1. 前書き：研究背景と研究目的

1回のマグマ噴出量が 100 km³ を超えるような爆発的噴火（ここでは超大規模噴火とする）は、発生頻度が1万年に1回以下と極端に少なく、歴史上、直接観測された例がない。そのため、詳しい噴火推移・様式あるいは地下のマグマ滞留時間などに不明な点が残されている。その中でも特に、噴火継続時間、すなわち噴火活動が開始してから完全な終息に至るまでの時間は、噴火推移やカルデラ形成プロセスに直結する問題であり、それを定量的に見積もることは、学術的に重要なだけでなく、将来予測や防災対策を考える上でもきわめて重要である。

ひとたび噴火が開始してから、いつその噴火活動が終わるのか（いつまで続くのか）という問題は、大規模噴火に限らず、あらゆる噴火において重要かつ予測が難しい問題である。仮にその火山が居住地域にある場合は、住民の避難生活などに直接的な影響を及ぼす。記録が残されている VEI（火山爆発指数）[\[1\]](#) 3以上の爆発的噴火について、噴火開始から最盛期に至るまでの時間をレビューした研究[\[2\]](#)では、計 252 件中の 42%が 1 日以内であることを示した。一方、その経過時間が年単位（最大で 20 年以上）に及ぶ例も 16%にのぼることを示している。このレビューを含めて、地球上の噴火事例を概観する限り、噴火継続時間は、噴火規模が大きくなるほど長くなる傾向が読み取れる。仮に、マグマの噴出率には上限があり、ある値に達すると一定になると考えると、例えば同じプリニー式噴火であっても噴出量が大きいほど継続時間が長いという推定は妥当といえる。ここで大規模な噴火に焦点を当てて、目撃例がある歴史時代、あるいは地質時代でも比較的よく研究されている VEI=5~7の噴火継続時間を見てみる。比較的よく研究されている噴火とは、堆積ユニットの間の境界や二次堆積物といった地質学的データを精査した事例や、堆積物の脱ガスや溶結などの産状に注目し、それらの物理・化学反応に要する時間を数値シミュレーションした事例である。その結果、目撃例がある VEI=5（1 km³~10 km³）ないしは 6（10 km³~100 km³）の噴火継続時間は数日~1週間程度であり、VEI=7（100 km³~1000 km³）あるいはそれ以上になると、数ヶ月~数年以上という時間スケールであることが分かる（表 1）。ただし、やはり後者、つまり超大規模噴火については観測例がないため、定性的な見積もりになりがちで、推定の域を出ない。

表 1. VEI 5 以上の噴火について、活動時間に関する情報が比較的よく研究されている例をまとめた表。上部（VEI 5~6）は目撃情報に基づき、下部（VEI 7~8）は堆積物の地質学的情報からの推定。

Volcano	Country	Eruption	Age	Estimated volume (km ³)	VEI	Duration of preceding activity	Duration of climax eruptions (plinian and PDC)	Duration of following activity
Tambora	Indonesia	1815 Eruption	AD 1815	50	6	3 years	7 days	4 months
Krakatau	Indonesia	1883 Eruption	AD 1883	12.5	6	3 months	6 days	6 months
Pinatubo	Philippines	1991 Eruption	AD 1991	a few	5	3 months	2 days	1 year(?)
Katmai	Alaska, US	1912 Eruption	AD 1912	13.5	6	??	3 days	1 month
Taupo	New Zealand	Oruanui	26.5 ka	530	7	??	months <	??
Yellowstone	Wyoming, US	Huckleberry Ridge Tuff	2.06 Ma	2500	8	??	months or years <	??
Kutcharo	Japan	Kp IV	115 ka	175	7	??	months <	??

堆積物に定量的な時間軸を入れる手段には放射年代測定法があり、過去 5 万年間については、放射性炭素年代法 (^{14}C 法) が適用でき、測定誤差 (不確かさ) において最小で数十年程度と小さく、有効である。しかし、堆積物中あるいは上下に有機物を含んでいなければ測定できないという制約もある。数万年前よりも古い堆積物の場合、噴出物に含まれる鉍物などを利用した K-Ar 法や Ar-Ar 法が一般的であるが、測定誤差は 1,000 年以上であるため、噴火継続時間の測定という観点では適さない。

本研究では、これらの問題を解決すべく、筆者らが開発した、古地磁気学的手法を用いて、超大規模噴火の継続時間スケールを推定する。手法の詳細は次章で述べるが、基本的な原理は、堆積物間に見られる古地磁気方位の差を、古地磁気永年変化曲線から得られる単位時間あたりの方位変化量で除して、堆積時間差を見積もる方法である。著者らは、すでにこの手法を用いて、南九州にある鬼界カルデラ形成噴火時における一連の噴出物の間に、少なくとも約 50 年間の時間間隙を見出している [3]。しかし、同手法による研究で公表された事例は数例 [3, 4] にとどまっており、また、同手法にはいまだ改善の余地も多く残されている。本研究では、同手法の事例研究を増やして、手法の信頼性や問題点のチェックを行いつつ、超大規模噴火の継続時間に関する知見を拡充することを目的とする。

2. 研究手法

2-1. 定方位サンプリングおよび古地磁気測定

本手法の優れた点は、前章で触れた放射性炭素年代測定の範疇外であるような古い噴火堆積物であっても、数十年オーダーの時間間隙の有無を検出できる点である (図 1)。従来も、古地磁気方位の差と地磁気の永年変化率から、複数の噴出物間の時間間隙を見積もる研

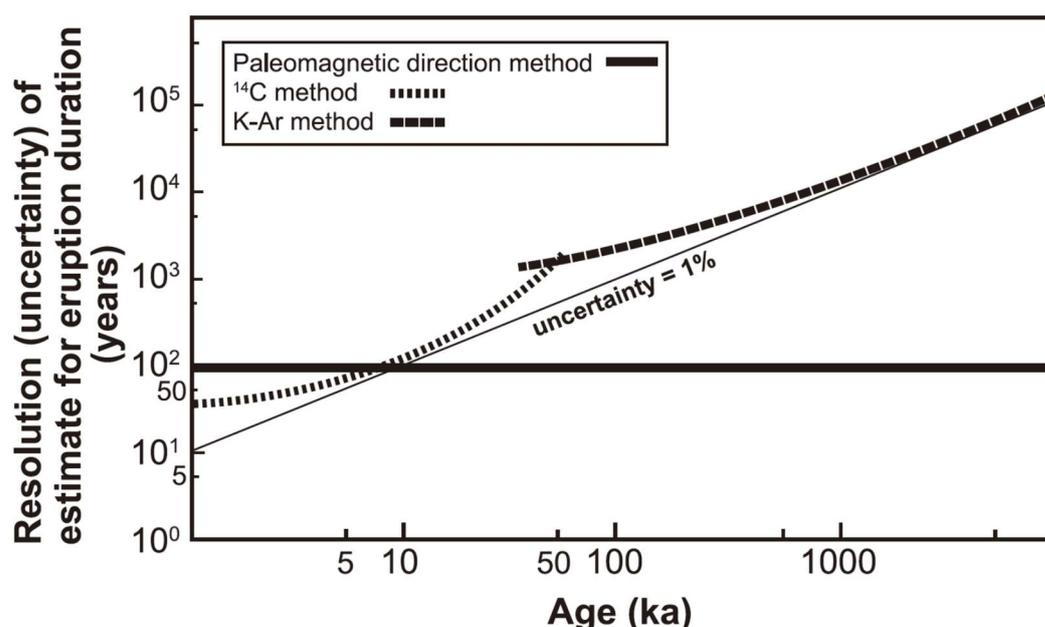


図 1. 堆積物から噴火の継続時間を推定する場合の、手法による時間分解能の違いを示した概念図。あくまで時間スケールの概念を示したものであり、両時間軸の細部を論じるものではない。

究は、数例報告されていたが[5][6]、これらの事例は主に溶岩や溶結凝灰岩を採取・測定したものである。本研究は、非溶結で未固結の火砕物（ここではテフラと呼ぶ）を扱う点で、他の研究にはない特長がある。過去の研究により、広域テフラの残留磁化方位は、同時に噴出した火砕流堆積物の溶結部から得た残留磁化方位（＝古地磁気方位）と一致することが報告されている[5],[7],[8]。このことは、広域テフラの残留磁化方位は信頼できること、また、堆積後に比較的短時間で堆積残留磁化を獲得していることを示している[8]。この前提を基に古地磁気方位を利用して、九州の今市・耶馬溪火砕流堆積物と大阪層群および上総層群に含まれるテフラ層の対比も行われている[9]。ただしテフラは、精度のよい定方位サンプリングが難しいこともあり、一般的には古地磁気学的測定の対象になりにくかった。本研究では、テフラ層を精度よく採取する方法を用いて、古地磁気方位測定を行った。なお、テフラの中でも、降下火山灰の残留磁化獲得プロセスは不明点が多く解明されていないが、堆積後の降水による吸水と脱水を繰り返す過程で、火山灰粒子の磁化ベクトルがランダムな方位から地球磁場方位に偏って、堆積残留磁化を獲得すると推察される。

定方位サンプリングではテフラ層に 7 cc のプラスチック・キューブと 6 cc のアルミ・キューブを打ち込む方法を用いた。この方法は、先行研究[8]を参考にしているが、より精度の高い定方位を実現するために、独自の採取方法を用いた。まず、キューブをテフラ層に押し込む際にガイドとなる治具をテフラ層に固定できるように改良した上で、固定された治具の前面を使って定方位を行う手法にした (図 2)。治具は、アルミとアクリルを材料としている。次に、試料採取の手順を簡単に説明する。露頭の表面をねじり鎌などで削り平面を露出させる。次に、治具の水準器を目視して左右方向の水平をとりながら固定棒を打ち込み、治具をテフラ層の露出面に固定する。キューブ、押し込み棒を順に治具の空洞部に入れてハンマーで注意深く叩いてキューブを露頭面に押し込む。その後露頭の平面に対して平行な治具の前面を用いて、定方位を行う。定方位の終了後、スコップ等でキューブをとり出し、ふたをする。その際、乾燥を防ぐためにキューブの穴や隙間をテープで塞ぐ。なお、これま

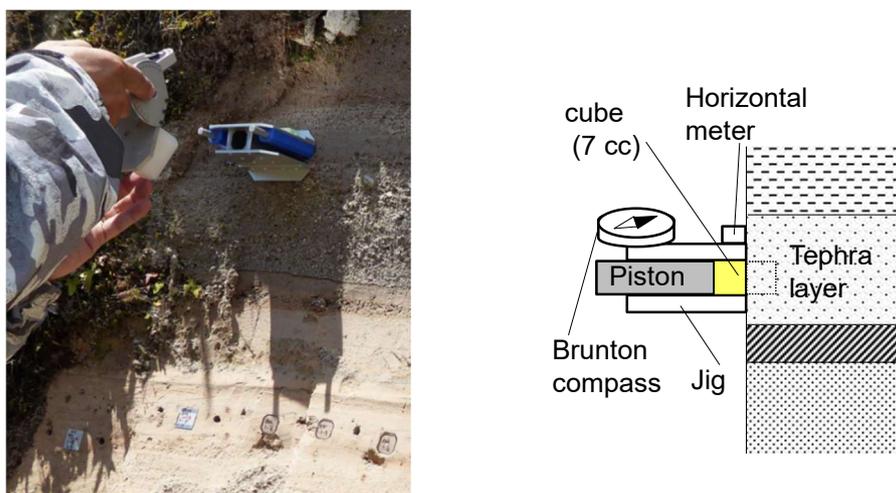


図 2. 治具を用いたテフラの定方位サンプリングの写真（左）と概念図（右）。

での著者らの測定実績により、キューブ試料は、細粒であるほど安定した古地磁気方位データが得られることが分かっている。この理由は、細粒なほど、サンプリングの際にサンプリング誤差やキューブ内での粒子の再移動の可能性が小さいことや、細粒な磁性鉱物が含まれることに関係すると考えられる。本研究では、溶結凝灰岩も採取・測定したが、それらは従来の、ドリルを用いる方法で、直径約 2.5 cm のコアの定方位サンプリングを行った。

各ユニットにつき 8 試料以上を採取し、600°C~630°C までの段階熱消磁あるいは 100 mT までの段階交流消磁を行って、古地磁気方位を測定した。これらの測定には、茨城大学の熱消磁装置 (ASC Scientific 社製 TD-48)、交流消磁装置 (AGICO 社製 LDA5) およびスピナー磁力計 (AGICO 社製 JR-6A) を用いた。消磁曲線において、概ね原点へ向かって直線的に減衰する、連続した 5 段階以上の点に対して主成分解析を適用し、得られた方位のうち最大角分散 15 未満のものを各試料の特徴的残留磁化方位とした。一つのユニットの複数の特徴的残留磁化方位から、平均方位とその 95%信頼限界 ($\alpha 95$) を得て、等積投影図上で半径 $\alpha 95$ の円がユニット間で重なるかどうかを評価 (重ならない場合は時期が異なると判断) した。なお $\alpha 95$ は 2°~9°の範囲にすべて収まった。

プラスチック・キューブは交流消磁用、アルミ・キューブは熱消磁用である。特に、熱残留磁化を獲得したと思われる火砕流堆積物や火口近傍堆積物の場合は、アルミ・キューブによる熱消磁を行うことで、熱履歴を含む、より信頼性の高いデータが得られる。交流消磁で消すことができないような高保磁力の (かつキュリー温度が低い) 磁性鉱物の消磁にも有効である。しかし、アルミ・キューブは高温 (600°C 前後) で変形し始めるなどの問題もあり、改善の余地が残っている。このアルミ・キューブの問題については、今後の改善策なども含めて、詳細は後述する。

2-2. 全岩試料の蛍光 X 線分析

採取試料の正確な識別・同定のため、試片の化学組成分析も行った。全岩化学組成の測定には、茨城大学の XRF (リガク・ZSX Primus II) を用いて、主成分元素について 1 : 2 に希釈したガラスビードを用い、Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P の 10 元素の測定を行った。得られたデータは、全元素の総和が 100%になるように規格化して、識別・同定の指標とした。

2-3. 研究対象

本研究では、国内だけでなく、国外の超大規模噴火についても事例を増やすべく研究を行った。国内では、更新世の超大規模噴火を代表する、九州の始良カルデラ形成噴火の噴出物を対象とする。本カルデラ形成時の一連の噴出物は、下位から大隅降下軽石、垂水火砕流、妻屋火砕流、入戸火砕流そして AT 火山灰である^{[10],[11]}。これらのユニット間には土壌層などが示す顕著な時間間隙の証拠は見られない。本事例では、磁化獲得プロセスが明確でデータの信頼性も高い「火砕流の熱残留磁化」に焦点を当てる。火砕流の大部分は非溶結相であるが、その熱消磁のためにアルミ・キューブを活用する。熱消磁の際には、耐熱処理などの特異な技術が必要であるため、それらの方法に精通する熊本大学の協力を得た。

海外のケースとしては、第四紀の地球上で最も高頻度・高噴出率で珪長質マグマを供給している地域のひとつであるニュージーランド北島のタウポ火山帯^{[12],[13]}に分布する Mamaku/Ohakuri 火砕流を対象とする。この事例では、噴火継続時間を高解像度化に焦点を当てる。前節で説明した通り、同手法では、試料の古地磁気測定の精度と、地磁気の永年変化率が時間分解能の制約となる。本手法では、サンプリング機器の開発や最新機器の導入(図2)により、残留磁化方位の決定精度を誤差 2°程度までに小さくすることに成功しているが、現段階で、これ以上の大きな精度向上を望むのは難しい。そこで、通常より地磁気極の変化速度が大きいとされる「地磁気エクスカージョン」に噴出した噴火イベントを対象にすることで、時間分解能の向上を試みる。Mamaku/Ohakuri 火砕流は、約 24 万年前の Mamaku エクスカージョン^[14]に噴出したとされるカルデラ形成噴出物で、本研究対象として最適である。

3. 現地サンプリング

3-1. 始良カルデラ噴出物

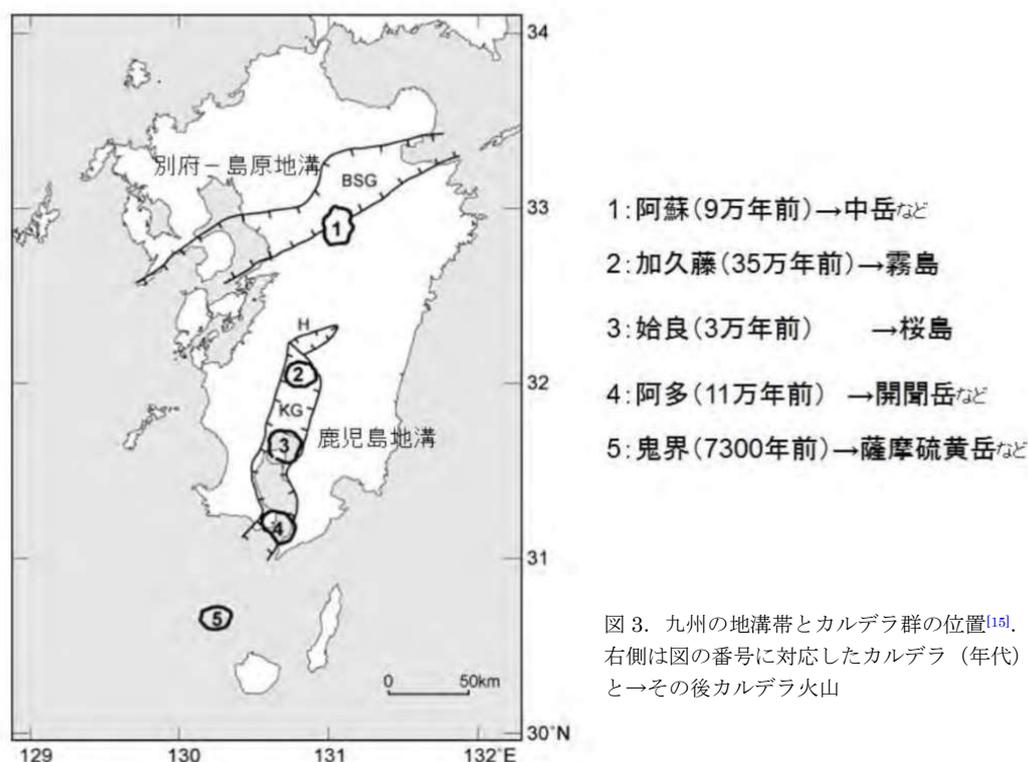


図3. 九州の地溝帯とカルデラ群の位置^[15]. 右側は図の番号に対応したカルデラ (年代) とその後カルデラ火山

南九州には、約 300 万年前以降に形成された鹿児島地溝帯が南北に分布し、その地溝内には、加久藤、阿多、始良そして鬼界といった更新世～完新世のカルデラが連なって形成されている^[15] (図3)。始良カルデラは、約 3 万年前の超大規模噴火で形成された^[16]、日本を代表する大規模カルデラであり、後カルデラ火山としても国内で最も活動的な桜島火

山を有する。始良カルデラ形成時の噴出物は、下位から大隅降下軽石 (OS), 垂水火砕流 (TM), 妻屋火砕流 (TU), 入戸火砕流 (IT), そして AT 火山灰である (図 4)。垂水火砕流 (TM) と妻屋火砕流 (TU) は、直接被覆する露頭が見つかっていないため、お互いの上限関係は不明である。最上位の AT 火山灰は、入戸火砕流の co-ignimbrite ash で、日本全土に広域的に分布する。これらの総噴出量は約 400 km³DRE であり、その大部分 (約 350 km³DRE) を IT と AT 火山灰が占める [10],[11]。本研究では、AT 火山灰を容易に定方位サンプリングできるような露頭が調査地域に無かったことと、高温定置した火砕流堆積物を主な対象としたこと、から AT 火山灰の試料採取は行わず、OS, TM, TU, IT の 4 ユニットの定方位サンプリングを行った。採取地点としては、これらのユニットの上下関係が明瞭な露頭や、定方位サンプリングに有利な溶結相・火口近傍相を示す露頭などを選んだ。その結果、OS と TU をそれぞれ 1 サイト (OS1 および TU1), TM と IT をそれぞれ 2 サイト (TM1, TM2 および IT1, IT2), 合計 6 サイトで定方位サンプリングを行った (図 5)。始良カルデラ噴出物の層相・岩相はすでに多くの研究で報告されているので、ここでは定方位サンプリングを行った 6 サイトについて、ポイントとなる記載にとどめることとする。なお、始良カルデラ噴出物の本質物質 (軽石) は、高シリカ流紋岩で、その岩石学的特徴は、ユニットを通してほぼ均質である。斑晶鉱物組み合わせは、斜長石、石英、斜方輝石、鉄鉱物で、斑晶量は 10~30vol.% 程度である [10],[17]。

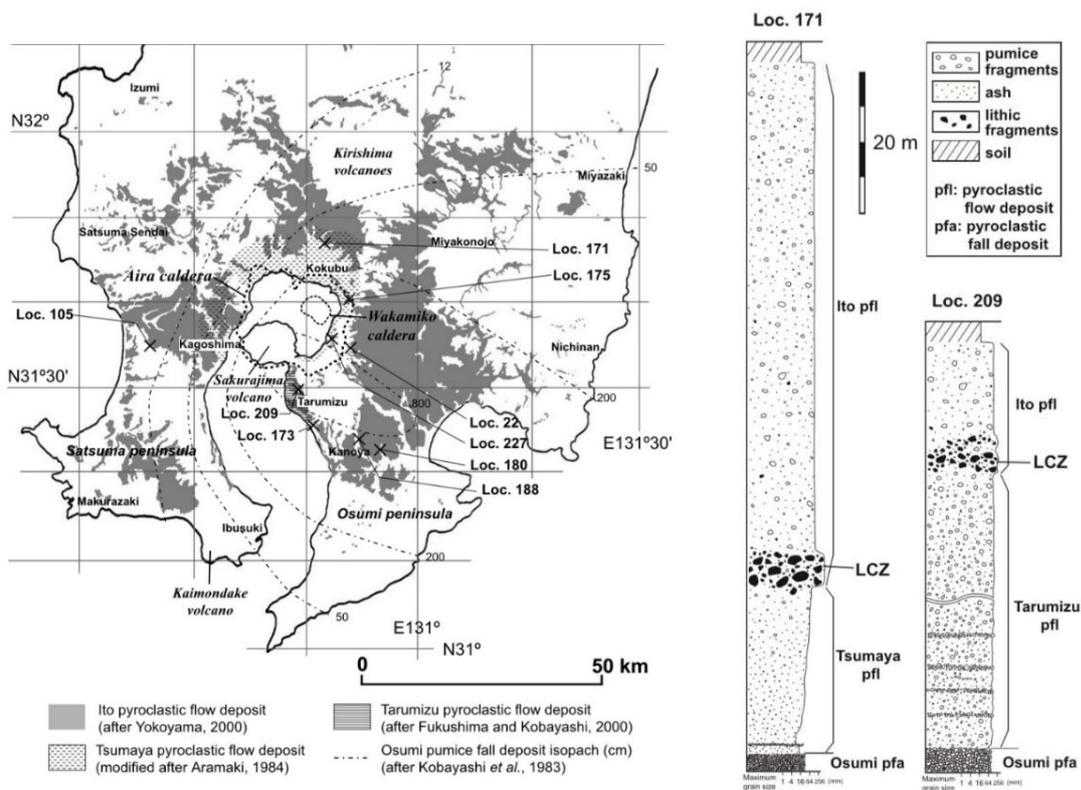


図 4. 始良カルデラ噴出物の分布と代表的露頭の柱状図 [11]。IT がカルデラの四方に広く厚く堆積するのに対し、TM はカルデラ南方、TU は北方に狭く分布する。

OS1 を採取したサイトは、カルデラ南縁にあたり、採取地点の中で最も給源に近い（**図 5** の地点 1：北緯 31°32'41.51”，東経 130°43'55.35”）。ここでは、人頭大あるいはそれ以上（最大粒径約 50 cm）の白色軽石が礫支持で堆積する大隅降下軽石が露出し、その層厚は少なくとも 5 m 以上である。軽石の内部は赤色酸化することから、噴出後も内部は高温状態を維持して空気にさらされていたことが伺える。これらの軽石について、ドリルによる定方位サンプリングが可能なほど十分に大きく、地層内に安定して存在する巨礫 9 つを選び、1 つの礫から最大で 3 つのコア試料を採取した（**図 5** の b）。

TM2 は、カルデラ縁から南方数 10 km、垂水市のまさかり海岸の露頭（**図 5** の地点 2：北緯 31°28'39.9”，東経 130°43'38.4”）で採取した。ここは、OS, TM, IT まで一連の始良カルデラ噴出物が一望できる大露頭である（**図 5** の a）（OS の下位には、約 9 万年前の阿多火砕流も観察できる）。ここでは、OS は古地磁気測定に適した粒径でないという理由で、IT はアクセスが困難であるという理由で採取せず、TM のみを採取した。TM は、上位の IT 最下部に明瞭な石質岩片濃集層があるため、容易にその上限を認識することができる。ここでの TM は、全体に白色で層厚 10 m 前後、基質支持で、下部が弱い成層構造を示す火砕物重力流堆積物である。全体的に南側に傾斜しているが（**図 6** の c）、これが下位層の削り込みによるものか、堆積後の傾動かは不明である。含まれる軽石は全体に上方粗粒化し、その最大粒径は約 15 cm である。本研究では、最下部にあたる細粒火山灰層から、TM2 としてアルミ・キューブ試料を採取した。

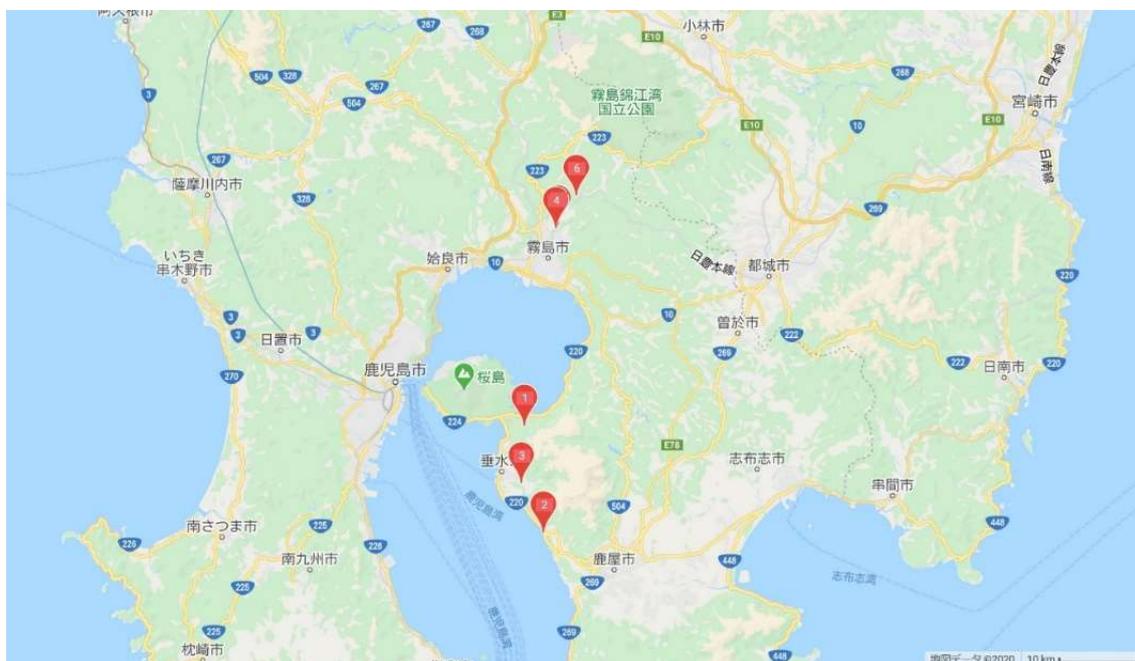


図 5. 始良カルデラ噴出物の試料採取地点。

TM1 は、同じく垂水市で、OS1 と TM2 のサイトの間に位置する露頭（**図 5** の地点 3：北緯 31°25'13.8”，東経 130°45'28”）から採取した。TM2 とは層相が一変し、全体に塊状

無層理で、赤色酸化した火砕物重力流堆積物が観察できる (図 6 の d)。ここでの TM は、層厚 10 m 以上で、軽石に富み、これら軽石の最大粒径は 12 cm 程度である。軽石は押しつぶされてはいないが、焼結作用によって堆積物全体がやや固結しており、ドリルによる定方位サンプリングで TM1 を採取することができた。

TU1 は、霧島市の国分地域 (図 5 の地点 4 : 北緯 31°46'25.19", 東経 130°46' 27.53") で採取した。このサイトは、始良カルデラ噴出物 (および加久藤火砕流などの下位の火砕物) が、異なる標高ごとに連続的に露出するルートの一部にあたる。一部 OS と互層するように堆積し、弱い成層構造を示す火砕物重力流堆積物である (図 6 の e)。全体層厚は 15 m 程度で、含まれる軽石は最大径 5 cm 程度と、全体に細粒である。ここでは、下部細粒部から、アルミ・キューブで定方位サンプリングを行った。

IT1 は、上記 TU1 と同じルート上の、より標高の高い地点で採取した (図 5 の地点 4 より数 100 m 北方 : 北緯 31°46'31.9", 東経 130°46'35.6")。ここでの IT は、塊状無層理で、バブルウォール型のガラス片を多量に含む非溶結の火砕物重力流堆積物である (図 6 の f)。層厚は数十 m 以上、軽石の最大粒径は 20~30 cm ほどである。吹き抜けパイプが直立して認められることから、本堆積物は二次的な移動や傾動を受けていないと判断できる。基質部から、アルミ・キューブ試料を採取した。

IT2 は、IT1 のサイトから 4 km ほど北東に位置する河川沿いの露頭 (図 5 の地点 6 : 北緯 31°32'41.51", 東経 130°43'55.35") で採取した。柱状節理を示す強溶結の火砕物重力流堆積物である (図 6 の g)。含まれる軽石は、溶結作用によって押しつぶされているのが確認できる。柱状節理が直立していることや、軽石が押しつぶされた方向からみて、堆積物は二次的な傾動をほとんど受けていないと判断できる。ここではドリル・コア試料を採取した。また、IT の強溶結相は先行研究でもあまり報告例がないことから、正確な識別・同定を行うために、コア試料の全岩化学組成も測定した。

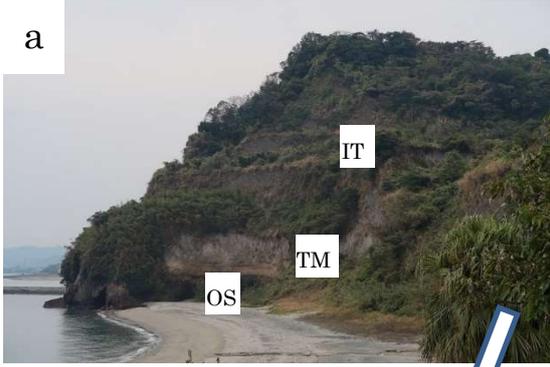


図 6. 始良カルデラ噴出物の露頭写真. a: 図 5 地点 1 の大露頭. b: 図 5 地点 2 における OS の火口近傍相. 一つの礫から複数のコア試料を採取した. c: 写真 a の右手前部, TM2 の採取露頭. 露頭全体が南側に傾斜している. TM の下部 (露頭表面が凹んだ箇所) でサンプリングを行った. d: TM1 のサンプリング地点. 図 5 の地点 3. e: TU1 のサンプリング地点. 図 5 の地点 4. f: IT1 のサンプリング地点. 図 5 地点 4 より数百 m 北方. 露頭中央よりやや左に, 直立する吹き抜けパイプが認められる. 露頭下部 (露頭表面が凹んだ箇所) でサンプリングを行った. g: IT2 の採取地点. 強溶結相で柱状節理を示す.

3-2. Mamaku/Ohakuri 火砕流

タウポ火山帯 (Taupo Volcanic Zone: TVZ) はニュージーランド北島に存在する火山帯で, 長さ約 300 km (このうち陸上部 200 km), 幅約 60 km の範囲に多数の第四紀火山が集中する地域である (図 7). 以下, 先行研究[12],[13],[18],[19]をもとに記す. タウポ火山帯は約 2 Ma の安山岩質火山の活動に始まり, その後約 1.6 Ma から現在にかけて, おもに流紋岩質マグマの活動が続いている. 火山帯直下には断層の発達した変成岩帯が基盤をなしていると考えられている. タウポ火山帯の総噴出量は, 15,000~20,000 km³ と見積もられており, 噴出物のほとんどが流紋岩 (≥15,000 km³) で, これらはおもに大規模火砕流として噴出した. 安山岩はこれより 1 桁小さく, 玄武岩やデイサイトはいずれも 100 km³ 未満である. タウポ火山帯の噴火史は Whakamaru カルデラの活動を境界に, 2.0~0.34 Ma の 'old TVZ' と, 0.34 Ma 以降の 'young TVZ' に分けられる. タウポ火山帯の北東端と南西端には安山岩優勢の複合火砕丘が存在し, ここにはカルデラが認められない (図 7). そして, 長さ 125 km を占める中央部には広大な火砕流の堆積地帯が広がる. 中央部にはこれまでのところ, 少なくとも 8 つのカルデラが確認されている. 65 ka 以降のタウポ火山帯は, 年

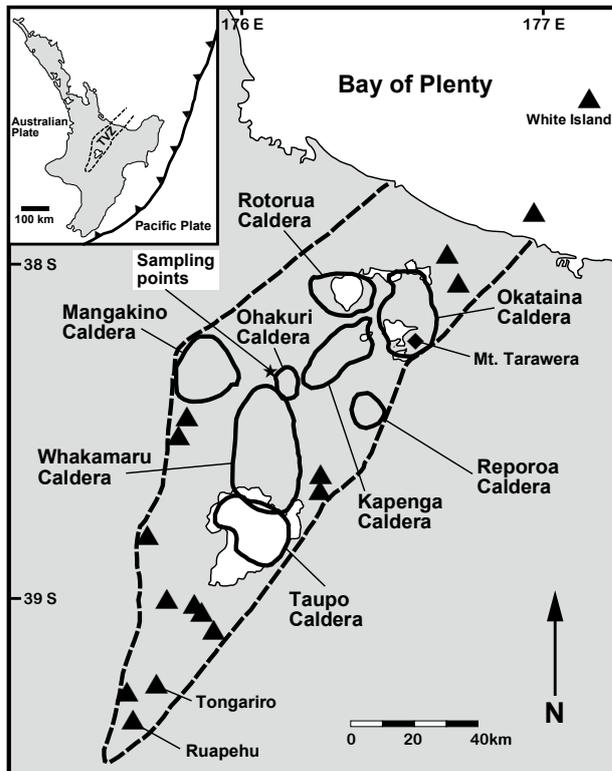


図 7. タウポ火山帯 (TVZ) [12],[13],[18],[19] の全体像を概略的に示した図. 点線が TVZ の範囲で, 実線はカルデラの輪郭. 三角は安山岩質成層火山. タウポ火山帯には少なくとも 8 つのカルデラが認識されている. 試料採取地は星印で示す.

に 7~18 mm の速度でリフティングを起こしており、この拡大速度は 0.9 Ma から続いていると考えられる。タウポ火山帯は、島弧縦断方向にマグマ活動領域が区分されること、また異常な流紋岩質マグマ噴出率を持つことから、特異な島弧—海溝系火山帯にと言える。本研究では、タウポ火山帯の北部にあたり、Young TVZ の初期の活動にあたる、Mamaku/Ohakuri 火砕流の現地サンプリングを行った。

Mamaku/Ohakuri 火砕流とは、それぞれ Rotorua カルデラおよび Ohakuri カルデラから約 24 万年前にほぼ同時に噴出したとされる火砕流群である^[20]。噴出量は、Mamaku 火砕流が 145 km³ 以上、Ohakuri 火砕流は 100 km³ 以上である。Ohakuri 湖 (Ohakuri カルデラ内) の北西十数 km のステートハイウェイ (国道 1 号) 沿い (南緯 38°19'23.8", 東経 175°59'16.1") の一連の露頭 (図 8 の赤マーカー) では、両火砕流が交互に積み重なる指交関係が認められる。先行研究^[20]では、これらの堆積物間の侵食状況などの観察事実からみて、両噴火間における時間間隙は、少なくとも日~週オーダーであったと推測している。

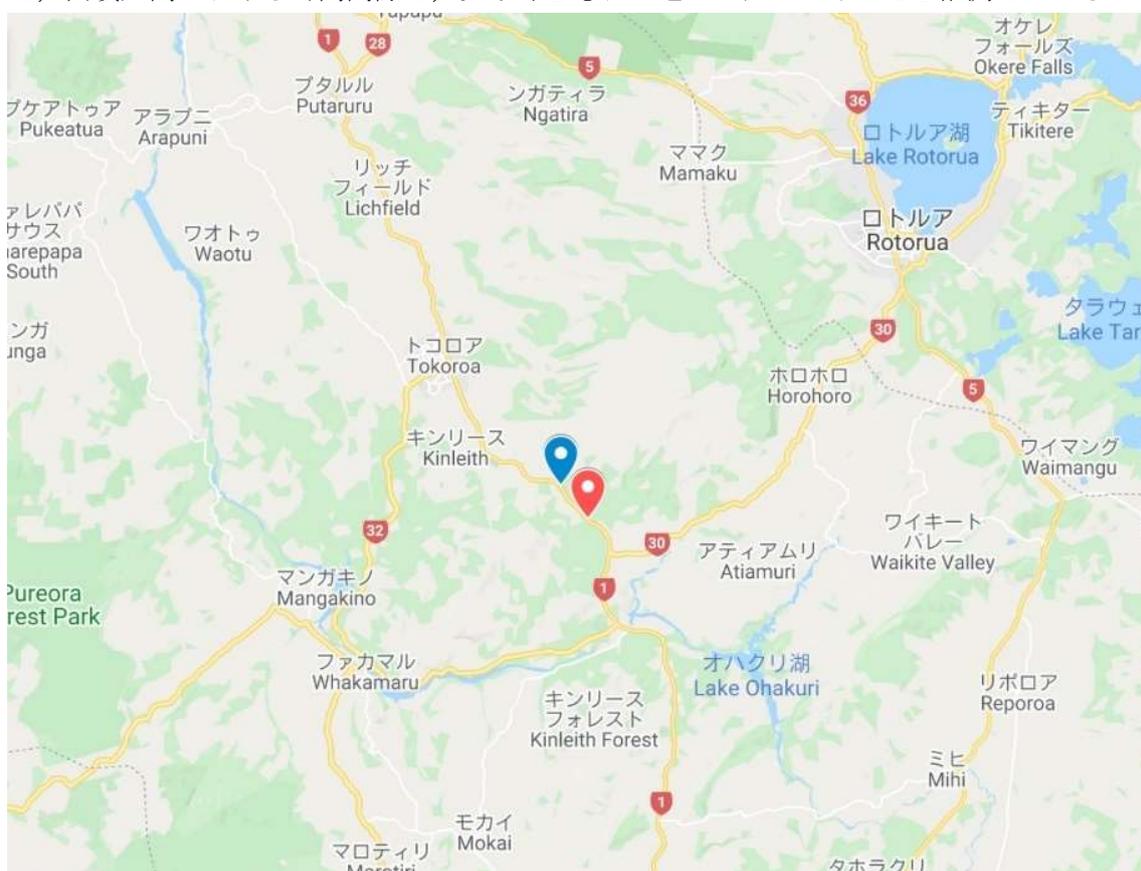


図 8. Mamaku/Ohakuri 火砕流の試料採取地点。2 か所 (赤と青のマーカー地点) で採取した。赤マーカーが模式地。

Mamaku/Ohakuri 火砕流の層序は複雑である。給源カルデラを考慮せずに、下位から Precursor unit, Unit 1, Unit 2, Unit 3, Unit 4, Unit 5 そして Unit 6 と命名されている。このうち Rotorua カルデラ由来の Mamaku 火砕流のユニットは Unit 3~Unit 5 で、Ohakuri 火砕流のユニットは Precursor unit, Unit 1, Unit 2, Unit 3 そして Unit 6 である。Ohakuri カルデラ由来の Unit 2 の間に、Rotorua カルデラ由来の Unit 4 が挟在するのが噴火層序の特徴的な点である。サンプリングを行った模式露頭 (図 8 の赤マーカー: 南緯 38°19'23.81", 東経 175°59'16.08") では、Unit 3 を除くすべてのユニットを観察できた (図 9)。Precursor unit は、土壌層を覆う桃白色火山灰層である。層厚は 5 cm 程度で全体に細粒であるが中部約 1 cm が中粒砂サイズの粒子からなる。上位の Unit 1 との間には厚さ 1 cm 以下の薄い土壌が認められる。一方、Unit 1~Unit 6 との間には土壌層は認められない。Unit 1 は、層厚 5 cm 程度の灰白色火山灰である。極細粒砂~シルトサイズの粒子からなる。Unit 2 は、層厚 40 cm ほどの降下軽石層 (軽石の最大径は 1 cm) で正級化構造を示す。この Unit 2 の間に、Unit 4 が挟まって堆積する。Unit 4 は、層厚 5 m 以下の橙白色~灰色の火砕流で、中部が強溶結し、下部と上部は弱~非溶結相を示す。非溶結相は、塊状無層理で、基質部は固くしまっている。Unit 5 は、褐白色で層厚 40 cm。細粒火山灰層と

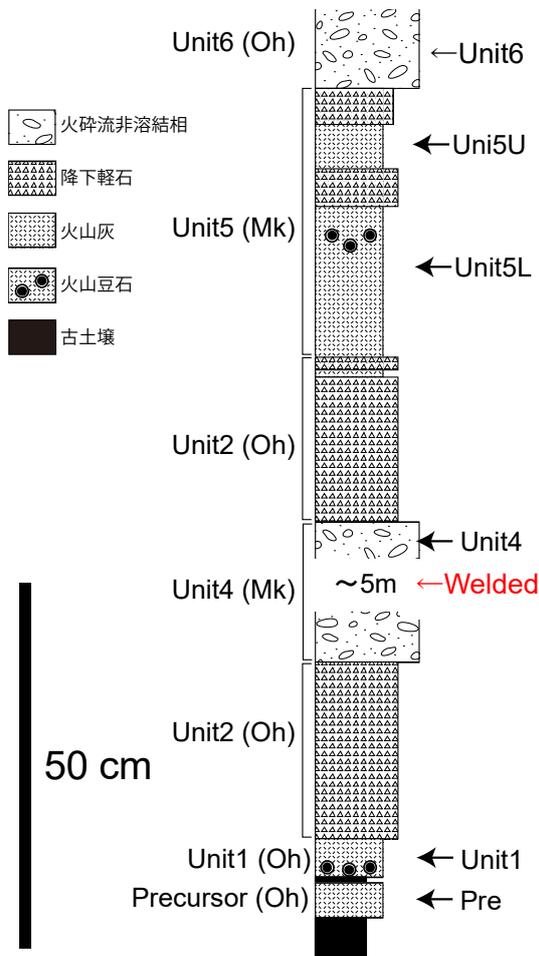


図 9. Mamaku/Ohakuri 火砕流の試料採取露頭の柱状図。

細礫サイズの軽石層の互層からなる降下火砕物である。細粒部には火山豆石が認められる。Unit 6は褐色で層厚 1 m 以上の非溶結火砕流堆積物である。塊状無層理で、火山灰基質に石質岩片と軽石を含み、軽石の最大径は 4 cm 程度である。

Mamaku 火砕流に含まれる軽石は均質で、班晶鉱物に斜長石、石英、斜方輝石が認められるが、まれに斜方輝石や普通角閃石も含まれる。Ohakuri 火砕流の軽石も同様に均質で、班晶鉱物は斜長石、石英、斜方輝石である。



図 10. Mamaku/Ohakuri 火砕流の露頭写真。a: 模式地 (図 8 の赤マーカー)。b: a と同地点の下位にあたり、Unit4 の強溶結相が露出する。c: 同地点のさらに下位。Precursor と Unit 1 の間には薄い土壌がある。d: 模式地から 3 km 離れた別のサンプリング地点 (図 8 の青マーカー)。

本研究では、Mamaku 火砕流と Ohakuri 火砕流の同時性や、Ohakuri 火砕流の前兆噴火と本噴火との時間差、および Mamaku 火砕流中の時間間隙などを推定する目的で、Precursor unit (Oh), Unit1 (Oh), Unit 4 中部 (Ma), 同上部 (Ma), Unit5 下部(Ma), 同上部, そして Unit 6 (Oh) からキューブによる定方位サンプリングを行った (図 10)。主にプラスチック・キューブを用いたが、補足的にアルミ・キューブ試料も採取した。Unit 4 中部は強溶結しており、この層準だけはドリル・サンプリングを行った。また、データの信

傾性を確認する目的で、模式露頭から約 3 km 北西の別の地点（図 8 の青マーカー：南緯 38°18'05.95"，東経 175°57'53.70"）で，Unit 1，Unit 4，Unit 5 のサンプリングを行った。

4. 古地磁気方位測定結果

4-1. 始良カルデラ噴出物

段階熱消磁の代表的な結果を図 11 に示す。ドリルで採取したコア試料は，最大 630°C，アルミ・キューブ試料は熱変形を被るため（詳細は後述）最大 600°C の熱消磁を適用した。また，TU1 については，交流消磁の結果も載せている（後述）。いずれの試料も，原点に向かって直線的に減衰していく磁化成分が認識できる。OS1 は降下軽石であるが，500°C 以上のアンブロッキング温度を示し（図 11 の a），礫内でも，礫間でも，採取した複数試料の残留磁化方位が揃うことから（図 12），高温で定置したことが分かる。TM1 は，概ね 400°C ~ 450°C で残留磁化が消えていることから，ブロッキング温度が 400°C ~ 450°C の磁性鉱物（チタノマグネタイト）が磁化を担っており（図 11 の b），マグネタイトに代表される 500°C 以上の磁化成分が含まれていないと思われる。顕著な赤色酸化を被っている岩相を考慮すると，初生鉱物であるマグネタイトが酸化によってマグヘマイト化した可能性が考えられる。

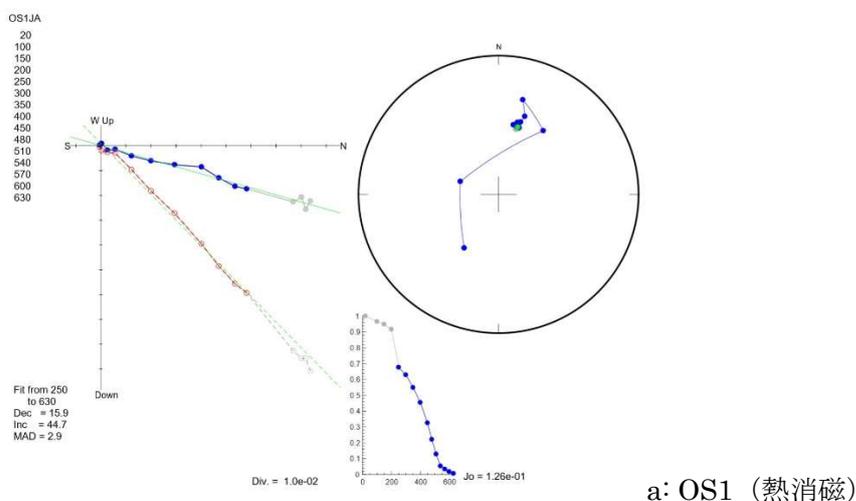
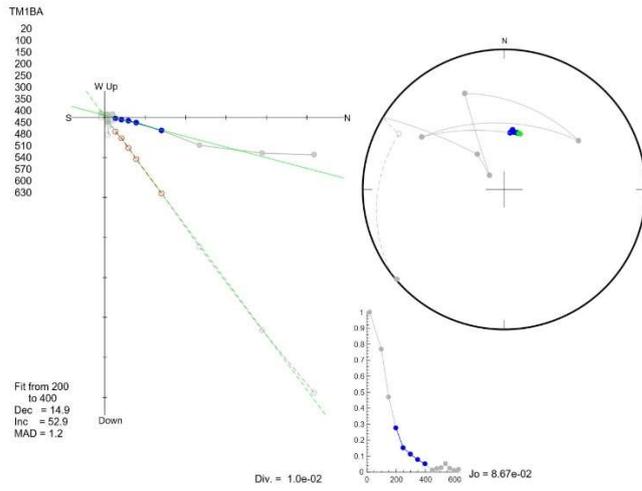
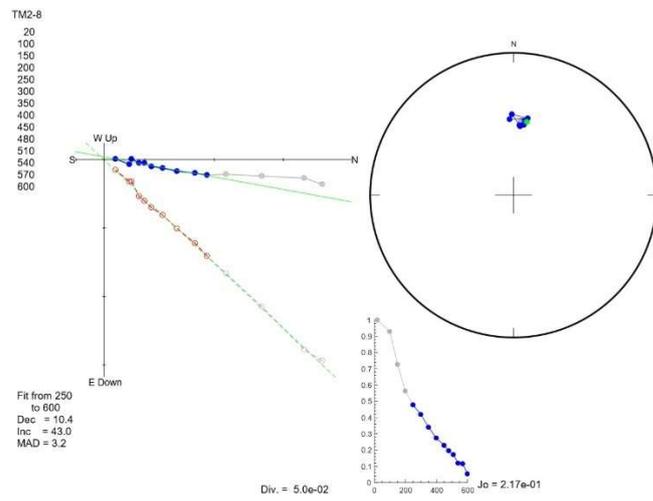


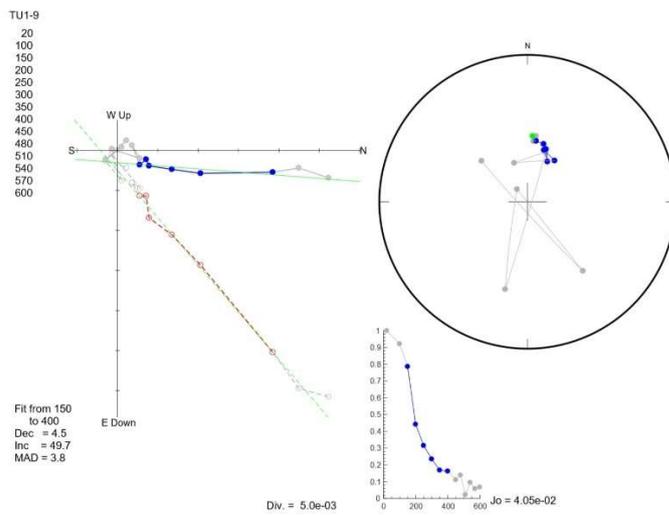
図 11. 始良カルデラ噴出物についての段階消磁結果と特徴的残留磁化の代表例を示した図。ザイダーベルト図では，青が NS-EW 面，赤が NS-Up-Down 面への投影で，緑が主成分分析による特徴的残留磁化方位。等積面図では，緑が特徴的残留磁化方位のプロット。左上の数字は消磁のステップ（上から下）。左下には主成分分析に用いたステップの範囲，特徴的残留磁化方位の偏角（Dec），伏角（Inc），最大角分散（MAD）を，右下には残留磁化強度の減衰の様子を表した。



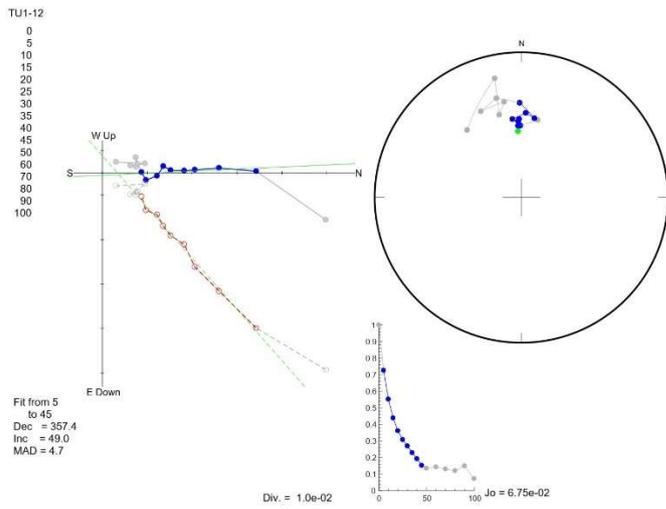
b: TM1 (熱消磁) (以下, 図 11 の続き)



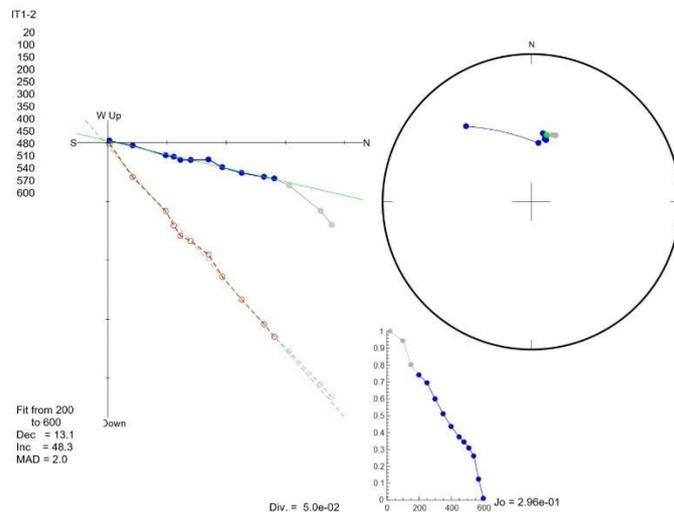
c: TM2 (熱消磁)



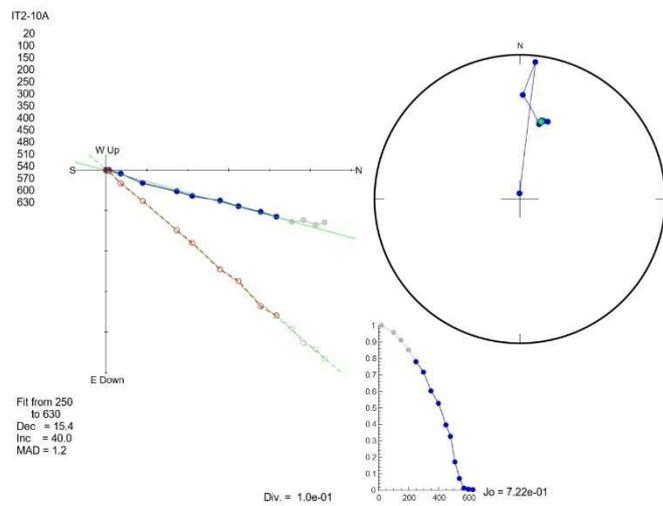
d: TU1 (熱消磁)



e: TU1 (交流消磁)



f: IT1 (熱消磁)



g: IT2 (熱消磁) (以上, 図 11)

TU1 は、低温（100℃～200℃）で大半の残留磁化が消えることと（図 11 の e），低温成分の方位が現在の地軸双極子方位と調和的であることから，二次磁化成分（おそらく水酸化鉄による）が支配的であると考えられる．高温成分から初生的な残留磁化を抽出することを試みたが，残留磁化強度が小さいため，困難であった．交流消磁の結果は，50 mT の段階で 1 割程度の磁化が残っている結果となったが，アルミ・キューブ試料は試料の乾燥と粒子の再移動が影響している可能性も考えられるため，今回 TU1 だけは，交流消磁の結果を参考値として採用することとする．

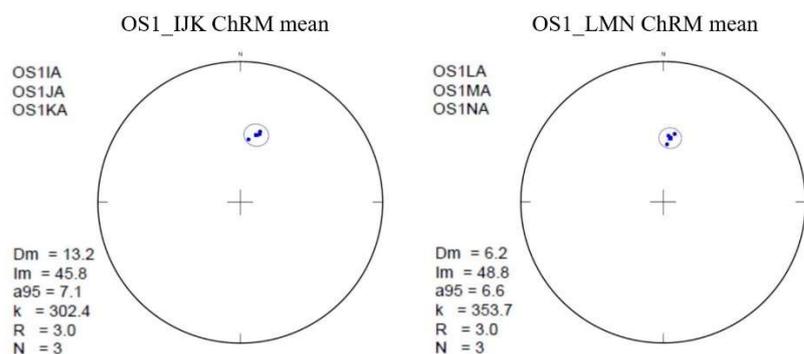


図 12. : OS1 の特徴的残留磁化の等積面プロット図. 左右ともに，それぞれ，一つの礫から得た 3 つのコア（I, J, K および L, M, M）のプロット（青点）．古地磁気方位は，礫内でよく一致し，礫間でも類似する（95%信頼限界（青円）が重なる）．

4-2. Mamaku/Ohakuri 火砕流

Unit 4 の溶結相（ドリル・コア）は段階熱消磁に，その他のキューブ試料は段階交流消磁および段階熱消磁に供し，特徴的残留磁化方位を決定した（図 13）．段階交流消磁では，最大 100 mT の交流磁場を試料に適用したが，残留磁化は 0.02～0.08 A/m 程度であり，スピナー磁力計で十分に測定できる磁化強度であることが確認できた．交流消磁を行った多くの試料において，20～30 mT 以下の低保磁力に全体の直線性を乱すような磁化成分が見え，20～30 mT 以上の磁化成分については，原点に向かって直線的に減衰していく磁化成分が見えた．主に後者の磁化成分を選んで主成分解析を行い，得られた磁化方位を特徴的残留磁化方位とした．

段階熱消磁において，Unit 4 の中部溶結相では，200℃を境に，ベクトルの異なる低温と高温成分が見られ，高温側で直線性が非常に高く原点に向かう成分が得られた．Unit 1 でも，400℃を境に，同様に低温・高温成分に別れたので，高温側を採用したが，その特徴的残留磁化方位は交流消磁のそれと有意に異なる（図 13 の b, c）．この場合は，熱消磁で，より二次磁化の影響を排除（初生的残留磁化を抽出）できていると考え，Unit 1 の平均方位算出には熱消磁の結果のみを用いた．それ以外については，原点への直線性が比較的よいものは，交流消磁の結果とおおむね整合的な特徴的残留磁化を示したので，これらを統合して平均方位を求めた．

なお，模式地でない別の露頭（図 8 の青マーカー地点）で採取した試料は，ユニットの別

に関係なく、すべてが不安定でランダムな磁化成分を示したため (図 13 の e), 特徴的残留磁化方位を求めることはできなかった. この原因は現段階で不明であるが, すべてのユニットの試料が同様の問題を持っていたため, 露頭全体が二次的な変質を受けている可能性が高いと考えられる.

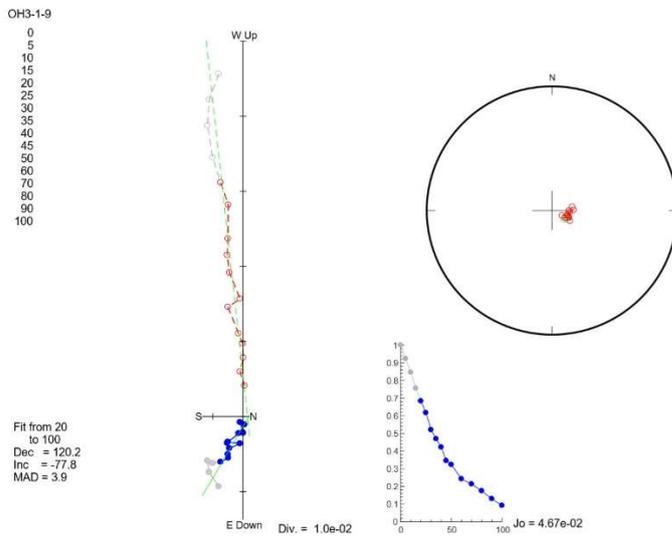
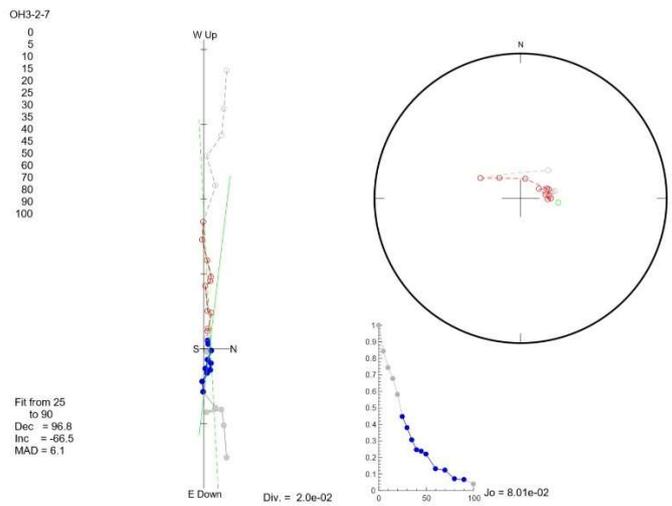
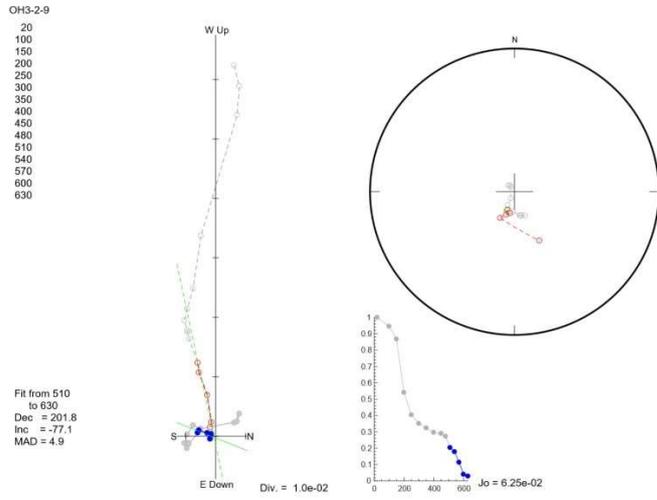


図 13. Mamaku/Ohakuri 火砕流についての段階消磁結果と特徴的残留磁化の代表例. 図の説明は図 11 と同様.

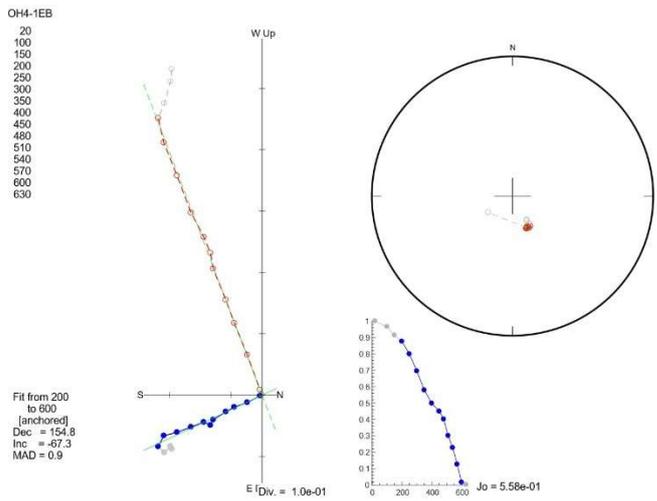
a: Precursor (交流消磁)



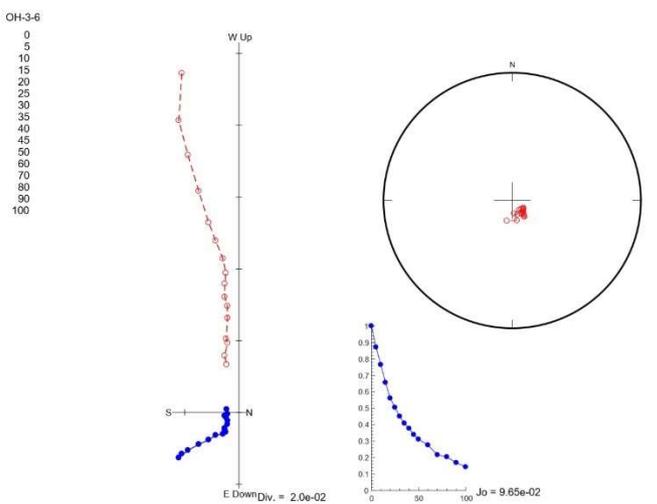
b: Unit 1 (交流消磁)



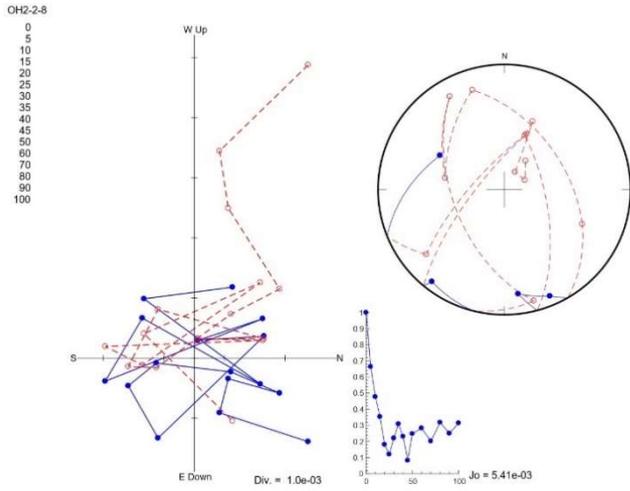
c: Unit 1 (熱消磁)



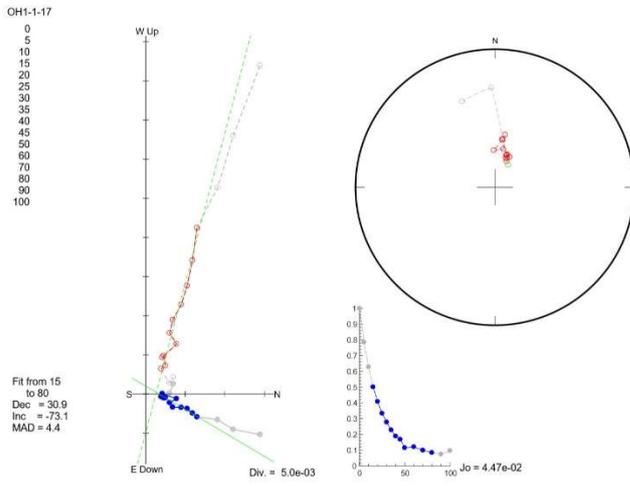
d: Unit 4 (中部 : 溶結) (熱消磁)



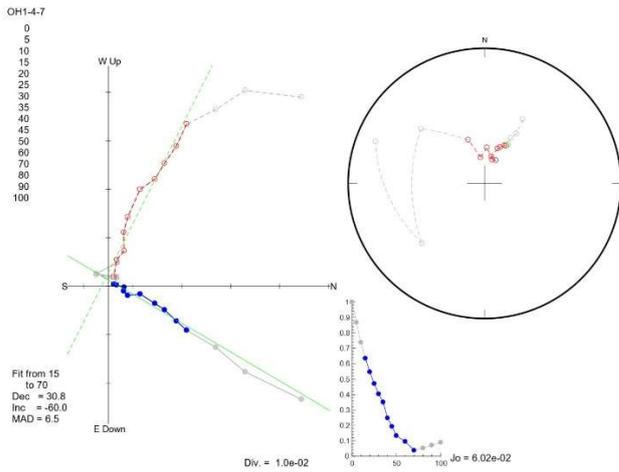
e: Unit 4 (上部 : 非溶結) (交流消磁)



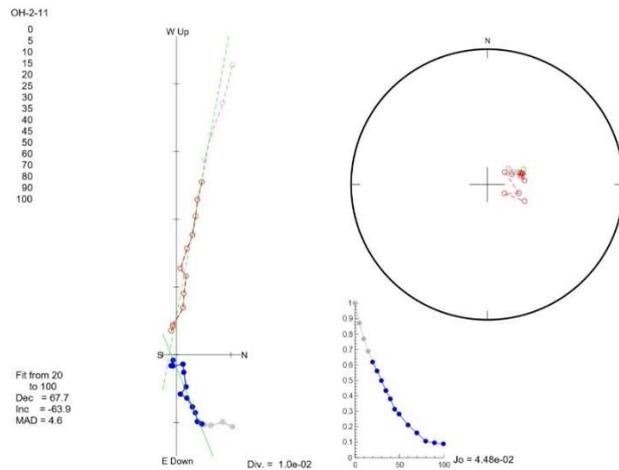
f: Unit 4 (模式地でない: 図8の青地点)



g: Unit 5L



h: Unit 5U



i: Unit 6

5. 議論

得られた古地磁気方位や地磁気極変化率などの情報から、超大規模噴火の継続時間を推定する。本来この見積もりでは、古地磁気方位の差から想定される地磁気極の角移動量を計算し、これを当時の地磁気極変化速度で除して（割って）継続時間を算出するべきである。しかし、年代が古くなればなるほど噴出時の正確な永年変化率を知ることは困難であること、また本研究では、オーダー単位の時間スケール推定を行っていることから、従来研究[3],[4],[5],[6]に倣い、地磁気極の移動量は平均磁化方位の偏角差を、極極変化速度はよく研究されている研究例から引用した代表的な値を用いて継続時間見積もりを行う。

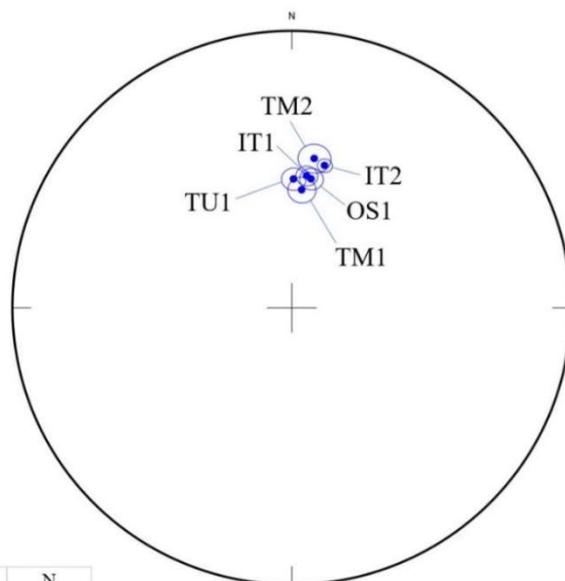
5-1. 超大規模噴火の継続時間推定

5-1-1. 始良カルデラ噴出物

OS1, TM1, TU1, IT1 の平均方位は、偏角が $1^{\circ} \sim 9^{\circ}$ (TU1 を参考値として外すと $5^{\circ} \sim 9^{\circ}$)、伏角が $46^{\circ} \sim 52^{\circ}$ の範囲で一致し、95%信頼限界を超えるような顕著な方位の差は認められない (図 14)。これらの値は、入戸火砕流の既報データ (溶結部: 4 試料) [8] と比べても整合的である。

TM2 は、今回採取した中で、唯一、傾動の可能性が残される露頭から得たものである。本地域は、冒頭で述べた通り、鹿児島地溝の中に位置し、堆積後の傾動の可能性は完全には排除できない。採取露頭は南～南東側にゆるく傾斜しているように見え、仮にこれが TM2 の古地磁気方位に影響しているならば、TM2 が他よりもやや浅い伏角を示すことは説明可能である。いずれにしても詳しい検討は今後の課題とし、ここではこれ以上の議論を避け、TM2 を継続時間見積もりのデータから外すこととする。

Aira site mean



sample ID	Dm	Im	$\alpha 95$	k	N
IT2	13.0	42.6	2.2	465.4	10
IT1	6.5	46.9	3.2	206.9	11
TU1	0.9	48.2	3.6	1181.7	3
TM1	4.9	51.6	4.2	206.4	7
TM2	8.6	41.0	4.7	107.4	10
OS1	8.6	47.7	3.5	216.0	9

図 14. 始良カルデラ噴出物の平均方位の等積面プロット図。

IT2 も、他のユニットと比べ、95%信頼限界を超えて異なる（浅い）伏角を示す。従来の地質学的研究を見ても、IT（入戸火砕流）の強溶結相はあまり記載例がなく、IT2 は入戸火砕流ではない、あるいはメインのユニットとは別のフローユニットの可能性が考えられる。本地域に堆積している可能性のある既報の大規模火砕流は、IT の他に、約 35 万年前に霧島火山地域から噴出した加久藤火砕流があるが、これに特徴的に含まれる角閃石斑晶は、IT2 には認められなかった。そこで本研究では、IT2 の全岩化学組成を測定し、既報の分析値と比較してその識別・同定を行った。IT2 は溶結凝灰岩であるため、目視により異質岩片を含まないと思われる 3 試片を測定に供したが、これらはいずれも同じような化学組成を示した（表 2）。テフラの識別・同定に有効とされる SiO_2 や K_2O 値だけ見ても、IT2 は、既報の入戸火砕流とはやや異なる組成を示すことが分かる。IT2 が $\text{SiO}_2=73.1\sim 73.8\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}=2.6\sim 2.8\%$ であるのに対し、始良カルデラ噴出物の主部をなす軽石 (Ito5~Ito11a) は、 $\text{SiO}_2=74.7\sim 75.8\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}=3.0\sim 3.3\%$ とより珩長質な組成を示す。既報のデータの中で、最上部に位置する試料（かんらん石斑晶を含む Ito11c と Ito12）が、 $\text{SiO}_2=67.5\sim 71.2\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}=2.3\sim 2.4\%$ であり、比較的苦鉄質な組成を示す。IT2 は、これらの中間的な組成を持つため、入戸火砕流を構成する 1 ユニットである可能性も高いが、いずれにしても、全岩化学組成の違いからみて、メインとなる入戸火砕流（本研究の IT1）とは異なる層準であると考えられる（入戸火砕流を構成する別ユニットの場合、組成変化傾向から見て、おそらく上部に位置する）。

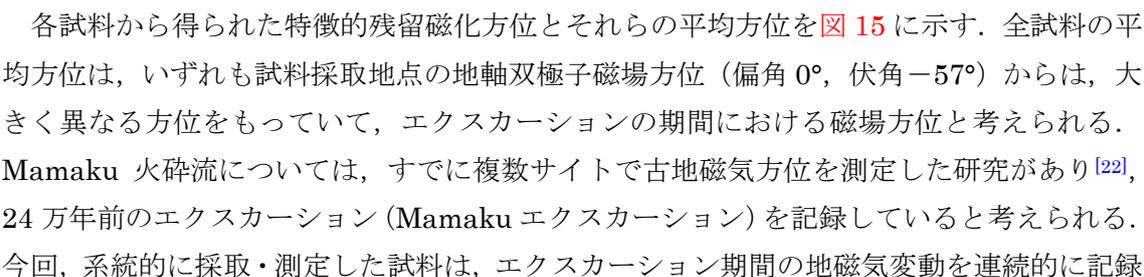
	IT-02 a	IT-02 b	IT-02 c
SiO ₂	73.60	73.13	73.80
TiO ₂	0.23	0.25	0.24
Al ₂ O ₃	14.19	14.78	14.67
FeO*	2.08	2.07	2.08
MnO	0.06	0.07	0.07
MgO	0.45	0.46	0.45
CaO	2.92	2.98	2.69
Na ₂ O	3.64	3.50	3.35
K ₂ O	2.78	2.72	2.61
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.04

表 2. IT2 (左) と既報の入戸火砕流^[17]の全岩化学組成. 引用値は, Ito5 から最上部である Ito12 までを示した. Ito11c はかんらん石斑晶を含む試料.

	Ito5	Ito6	Ito7	Ito8	Ito9	Ito10	Ito11a	Ito11c	Ito12
SiO ₂	74.71	75.52	75.57	75.46	75.48	75.36	75.72	67.46	71.17
TiO ₂	0.20	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.20	0.57	0.26
Al ₂ O ₃	14.51	13.89	13.65	13.69	13.74	13.78	13.51	16.03	18.17
FeO*	1.86	1.63	1.66	1.72	1.64	1.66	1.79	4.81	2.39
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.12	0.06
MgO	0.26	0.22	0.26	0.27	0.24	0.24	0.28	0.95	0.32
CaO	1.92	1.91	1.95	1.95	1.95	2.00	1.85	3.87	2.05
Na ₂ O	3.40	3.43	3.41	3.49	3.45	3.52	3.39	3.67	3.16
K ₂ O	3.05	3.14	3.22	3.14	3.24	3.18	3.16	2.33	2.39
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.19	0.03

始良カルデラ噴出物の古地磁気方位を概観すると、最下位ユニットである OS、中間ユニットである TZ と TU、そしてメインとなる入戸火砕流である IT1 の間には、明瞭な方位差は認められず、これら一連の噴出物は短期間で堆積したものと考えられる。過去 2,000 年間の日本における須恵器の窯跡などの、考古遺物の測定により得られた信頼性の高い地磁気永年変化カーブに基づくと、その変化率の平均的な値は $0.06 \pm 0.04/\text{year}$ である^[21]。ここで、時間間隙の最小値を見積もることを目的とする場合、最大の変化率、すなわち $0.1^\circ/\text{year}$ を仮定すればよい。OS1, TM1, TU1 および IT1 の平均方位の誤差 (95%信頼区間) は最大で 4° 程度であるので、永年変化率 $= 0.1^\circ/\text{year}$ を仮定すると、OS から IT1 までは、少なくとも 40 年以内に噴出したと見積もることができる。一方、IT2 が入戸火砕流の 1 フローユニットである場合、それと IT1 との間にみられる平均方位の偏角の差は 5.5° であるので、入戸火砕流の噴出期間中に、55 年以上の時間間隙が存在したと見積もることができる。

5-1-2. Mamaku/Ohakuri 火砕流

各試料から得られた特徴的残留磁化方位とそれらの平均方位を  に示す。全試料の平均方位は、いずれも試料採取地点の地軸双極子磁場方位 (偏角 0° 、伏角 -57°) からは、大きく異なる方位をもっていて、エクスカージョンの期間における磁場方位と考えられる。Mamaku 火砕流については、すでに複数サイトで古地磁気方位を測定した研究があり^[22]、24 万年前のエクスカージョン (Mamaku エクスカージョン) を記録していると考えられる。今回、系統的に採取・測定した試料は、エクスカージョン期間の地磁気変動を連続的に記録

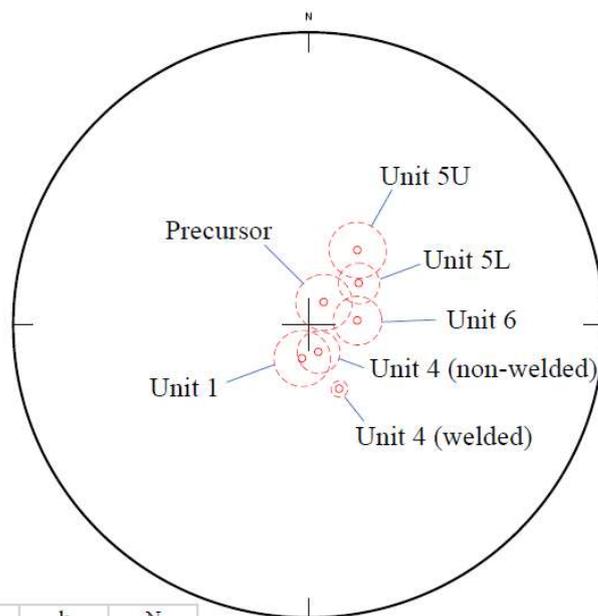
していると考えてよいであろう。Unit 4 上部の非溶結相の方位が、同中部の溶結相のそれとやや異なるが、これも Unit 4 内における堆積時間差を表している可能性がある。なお、全体的に 95%信頼限界が、始良カルデラ噴出物の降下火山灰層に比べて大きいのは、これらの磁化が地球磁場強度の弱い（現在の数分の一である）エクスカージョンの期間に獲得されたことが原因と考えられる。

95%信頼限界も含めた平均方位を見てみると、Precursor と Unit 1 の間、Unit 4 の中（中部と上部の間）、そして Unit 4 と Unit 5 の間、に明瞭な方位差^{注1}が認められ、有意な時間間隙が存在したと判断できる。エクスカージョンの期間（多くは数千年以下）は、通常時の永年変化よりも地磁気方位の変化速度は速いと推測される。比較的よく研究されている Laschamp イベントの例では、2,000 年の間に最大で 360°分の方位変化が起きており、これに基づくと 1 年あたり 0.2°の方位変化量である^{[23],[24]}。また最近では、年縞を利用した高解像度の古地磁気編年が水月湖の堆積物で行われており、そこに記録されている地磁気エクスカージョンでは、130 ~ 380 年間に 200°（あるいはそれ以上）の方位変化が認められ^[25]、これに基づくと、1 年に 1°前後の変化量になる。Precursor と Unit 1 の間および Unit 4 と Unit 5 の間の古地磁気方位差の偏角の差を、誤差も考慮して、それぞれ 20°程度とおき（注 1 を考慮して計算）、0.2°/year を採用すると、100 年程度（2 回の時間間隙を合計すると 200 年程度）、1°/year を採用した場合 20 年程度（同様に合計で 40 年程度）、の時間間隙が示唆される。Precursor と Unit 1 との間には、厚さ 1 cm 以下の古土壌が挟存するので（**図 9 および図 10 の c**）、地質学的観察とも整合的であり、妥当な見積もりと言える。一方、Unit 1~6 については、地質学的に見て少なくとも日~週オーダー以内のイベントと推定されていたが^[20]、今回の見積もりは、それに比べて著しく大きいものである。今後は、本研究による古地磁気データも考慮して噴火史を再検討し、マグマ系変遷の時間スケールも再考する必要がある。

Unit 4 は、Mamaku ignimbrite と称され、Mamaku/Ohakuri イベント中、最大規模で、噴出量の大半を担うメインの噴火堆積物であるが、今回、Unit 4 中部強溶結相と上部非溶結相の間にも 95%信頼区間をわずかに超える方位差が認められた。Mamaku エクスカージョン・イベントを認識した研究^[22]でも、Mamaku ignimbrite の溶結相が比高 100 m 以上で露出する場所において、高度の異なる 4 層準でサンプリングを行い古地磁気方位を測定しているが、同様に下部と上部で方位が異なることを示している。これらのことから、Mamaku ignimbrite は、溶結しているため地質学的には認識が容易ではないが、複数のフローユニットからなり、これらの発生・堆積の間にも、比較的短い数十年以上の時間間隙が存在した可能性が指摘できる。

*注 1) 本事例の場合、エクスカージョン期間のため、伏角が立って（垂直により近い値を示して）おり、それに伴い、想定地磁気極の移動量が少ない場合でも、偏角の表現が大きく変わる（例えば図 15 において、Precursor と Unit4 (non-welded)は角移動距離は小さいが、偏角の差は 120° 以下で表現されてしまう）場合があるので注意が必要である。

Ohakuri site mean



site	Dm	Im	α_{95}	k	N
Unit 6	84.9	-75.0	7.4	26.1	16
Unit 5U	33.1	-62.6	8.5	118.5	4
Unit 5L	50.2	-70.0	6.2	39.4	15
Unit 4 (non-welded)	160.0	-81.1	6.5	88.4	7
Unit 4 (welded)	154.4	-68.2	2.5	508.8	8
Unit 1	190.5	-79.5	8.6	206.7	3
Precursor	34.1	-81.6	8.6	29.3	11

図 15. Mamaku/Ohakuri 火砕流の平均方位の等積面プロット図.

5-1-3. 他の研究事例との比較検討

本研究では、試料から得られた古地磁気方位と、地磁気極の変化率などから、始良カルデラ噴出物および Mamaku/Ohakuri 火砕流を供給した超大規模噴火の継続時間を推定することができた。始良カルデラ噴出物については、IT2 の問題が残るため、2つの場合分けを考える必要がある。IT2 を入戸火砕流のメンバーと考える場合、OS1 から IT1 まで、一連の噴出物の間に明瞭な時間間隙が認められず、従来言われていた通り、始良カルデラ形成噴火は短時間で噴出・堆積した超大規模噴火例として認定することができる。本手法を用いた、著者らのこれまでの研究では、明瞭な時間間隙のない大規模噴火の事例は見いだされていなかったため、本研究によって、定量的にその具体例を示せたこととなる。一方、IT2 を入戸火砕流のメンバー（最上部ユニット）と考える場合、メインの入戸火砕流の堆積から 55 年以上の時間間隙を経て、強溶結の比較的小規模の火砕流をカルデラ北側に噴出したというストーリーが考えられる。この場合、今後、そのような視点で野外調査などを行うことで、IT2 相当の噴出物に関する地質学的な証拠を見出すことができるかも知れない。

Mamaku/Ohakuri 火砕流の事例では、地球磁場強度の弱いエクスカッション・イベント中の堆積物のためか、全体的 95%信頼限界が大きいだが、その中でも、95%信頼区間を超えて方位の異なるユニット関係が複数見いだされた。特に、従来 1 ユニットとしてまとめられ

ていた Unit 4 (Mamaku ignimbrite) の中にも時間間隔が示唆された。これは、地磁気の変化速度が速いエクスカージョン期に該当するため、より高時間分解能で時間差検出が可能であったためと考えられる。本事例は、噴火を通して、40 年～200 年以上 (=20 年～100 年以上の時間間隔 2 回分の合計) の継続時間を経たと見積もられ、既報の鬼界カルデラや支笏カルデラ噴出物と同様の時間スケールで超大規模噴火が経過した事例と結論することができる。

本研究で事例を増やすことにより、大規模噴火の継続時間は、従来地質学的かつ定性的に考えられてきたような短期間 (数十年以下) の事例が確かに存在すること、そして、それ以上 (数十年～100 年以上) の時間を要する事例もやはり複数存在すること、が明らかとなった。超大規模噴火の継続時間には、従来考えられてきたよりも大きな幅があり、今後も本手法による事例研究を増やし、噴火の継続時間と、噴火様式や規模あるいはマグマ滞留時間との関連性を検討していく必要がある。

今回特筆すべき点として、顕著な時間間隔がある場合、噴出量の大半を担うメインの噴火が終了したのち、数十年以上を経て、比較的小規模の火砕流を噴出するというパターンが見えてきた点が挙げられる。Mamaku/Ohakuri 火砕流では、メインの Unit 4 (Mamaku ignimbrite) の後、時間間隔を介して、比較的小規模な Unit 5～6 (Ohakuri ignimbrite) が発生した。始良カルデラの例も、IT2 を一連の噴火メンバーとする場合、同様に、メインの入戸火砕流 (IT1) の後に、古地磁気方位に現れるような時間差を経て、IT2 が噴出したと考えることができる。著者らの先行研究^[4]にも、同様のパターンの存在が示唆されている。また、本手法による時間間隔の定量は行っていないが、北海道東部で約 12 万年前に発生した屈斜路カルデラ形成噴火 (Kp4) も、メインとなる噴出物 (150 km³ 以上) の後に、少なくとも数か月以上の時間を介して、比較的小規模な火砕流は発生している^[26]。さらに注目すべきは、これらの例はすべて、その時間間隔の前後で、噴出するマグマの化学組成がやや変化している点である。今後は、本研究手法だけでなく、岩石学的・地球化学的研究とも連携して、カルデラ形成噴火の時間推移プロセスを解明してゆくことが重要であると考えられる。

5-2. 手法の改善

5-2-1. 試料採取サイトの選定

本研究では、古地磁気データの信頼性をチェックするため、同じ層準とされるテフラでも、複数地点で定方位サンプリングを行った。始良カルデラ噴出物については、TM1 と TM2、IT1 と IT2 が、その例にあたるが、いずれの場合も、同層準 (と考えた) かつ異なる地点で得た古地磁気方位は、95%信頼区間で一致しなかった。TM2 については、露頭状況からも傾動の可能性が考えられ、また 95%信頼区間も他の試料に比べて大きいこと、時間推定のデータからは除外することとなった。IT2 は、露頭状況から傾動の証拠は認められないことと、全岩化学組成がメインとなる入戸火砕流とは異なることから、古地磁気方位の違いは、やはり層準の違いを反映している可能性が高いと思われる。Mamaku/Ohakuri 火砕流につ

いては、Unit 1, Unit 4 および Unit 5 について、2カ所の露頭で試料採取したが、一方の地点（模式地でない露頭）から採取した試料は、すべて安定した磁化方位を得ることはできなかった。原因は現在検討中であるが、露頭全体が地下水などの影響で風化・変質している可能性が高いと考えられる。この点を明らかにするためには、今後、岩石磁気学的な分析が必要である。

今回、複数地点で同じユニットを採取する試みでは、同じ方位を示す例が得られない結果となった。当然、良好な複数露頭で試料採取することは、データの質・量を増やして、クロスチェックや古地磁気方位のわずかな違いを議論したり、IT2 の例のように、新しいユニットの認定・発見にもつながるので、可能な限り行ったほうが良いが、本手法を用いる研究においては、まず露頭の傾動や風化・変質状況を注意深くチェックし、最良な条件を持つ1つの露頭で、系統的にサンプリングを行うのが有効であると考えられる。この場合は、仮にその露頭が二次的に移動していても、相対的な方位差を見て、時間間隙を見積もることが可能である。超大規模噴火を対象とする場合は、1) 給源より少し離れた地域で、なるべく複数のユニットが見えている露頭を選定する、2) 給源近傍などの大露頭でも、高所で定方位サンプリングできる技術（ロープや櫓の利用）を導入する、あるいは3) 定方位のボーリング技術を導入する、などの対応策が考えられる。

5-2-2. テフラ試料を熱消磁するためのアルミ・キューブの問題

本研究では、アルミ・キューブを用いた火砕流堆積物の熱残留磁化測定を試みた。試料採取と古地磁気測定を行う中で、いくつかの問題点が明確になったので、ここに記す。

まず、使用したアルミ・キューブは、市販の角柱アルミ・パイプを輪切りにしたものと、市販のアルミ板を切断して作った底と蓋を、テープで接着したものである。切断時のわずかなズレによって、角柱と底・蓋のサイズが正確に一致せず、スピナー磁力計のホルダーに挿入しづらい、ホルダー回転時に、蓋と角柱との僅かな隙間から内部の試料が粉状になって漏れ出る、角柱と蓋を固定していたテープが切れるなどの問題が生じた。型が確立しており、世界的に利用されているプラスチック・キューブに比べて、形状の精度や密封度に大きな問題がある。今回は、回転時にアルミ・キューブの蓋が取れないように、また、試料が漏れ出ないように、アルミ・キューブにパラフィルムを巻いて対処したが、ホルダーとキューブの隙間が僅かであるためパラフィルムは薄く一巻きしかできず、蓋の隙間を完全に塞ぐことができなかった。漏れ出した細粒子は、ホルダーの隙間に入り込み、ホルダーの回転に支障をきたすため、早急に改善すべき問題である。

また、一部のアルミ・キューブは600°Cで側面と蓋に歪みが生じた。しかし、スピナー磁力計のホルダーが球形であるため、アルミ・キューブの角にさえ歪みがなければ挿入・測定することができた。しかし630°Cでは、アルミ・キューブの歪みはさらに大きくなったため、現段階では、600°Cが熱消磁温度の限界である。

また、アルミ・キューブでは、帯磁率測定ができないことも分かった。段階熱消磁において帯磁率を試験的に5段階測定してみたところ、値はランダムに変動した。アルミ・キューブ

ブは側面と蓋とで厚さが異なるため、アルミ・キューブの置き方によっても値は大きく変動する。したがって、アルミ・キューブの段階熱消磁では、帯磁率変化を用いた試料の熱変質のチェックは難しい。アルミ・キューブの磁力ノイズは、スピナー磁力計のホルダーのノイズの 10 倍程であり、そのノイズは 100 mT 交流消磁を施しても変化が見られなかった。

理想的には、プラスチック・キューブと同様の形状のアルミ・キューブ（および蓋）を作成できれば、上記の多くの問題は解決すると思われるが、費用対効果の点に課題が残る。最近では、3D プリンターの技術も向上しているため、金属 3D プリンターの活用も視野に入れて、手法の開発を進めていきたい。

6. まとめ

本事業では、目撃例もなく不明点の多い超大規模噴火（噴出量 100 km³ 以上）について、著者らが開発した古地磁気学的手法を適用し、その継続時間を定量的に算出する事例研究を行った。対象としたのは、国内外を代表する 2 つの超大規模噴火であり、国内では九州の始良カルデラ噴出物、国外ではニュージーランドの Mamaku/Ohakuri 火砕流の試料を採取した。

採取した試料について、古地磁気方位差と地磁気永年変化率を用いて継続時間を評価した結果、Mamaku/Ohakuri 火砕流の事例では、土壌を挟んで堆積する Precursor（前兆）噴火と本噴火の間に、20～100 年以上の時間間隙が、本噴火以降においても Unit 4 と Unit 5 の間に、同じく 20～100 年以上の時間間隙が認められた。これは、従来著者らが主張してきた、「数十年以上の時間間隙を経ながら終息する超大規模噴火」に当てはまる事例と考えられる。さらにこの事例は、地磁気極の変化率が大きいエクスカージョン・イベント中に噴出したため、一つの火砕流クーリング・ユニット（Unit 4）中に存在する比較的短い時間間隙も検出することができた。この事例により、著者らが従来から主張してきたような、数十年以上の時間間隙を経ながら終息する超大規模噴火の存在がより確実に認識できたといえよう。一方で、伝統的に考えられてきたような、地質学的短期間に終息する事例も始良カルデラ噴出物で確認することができた。このことは、超大規模噴火の時間推移は、噴火様式・規模、テクトニック・セッティングあるいはマグマ滞留時間と密接に関係しながら多様に変化する可能性があることを示唆している。

事例研究を拡充することで、超大規模噴火の推移における共通性も見出すことができた。本研究で対象とした少なくとも 1 例と既報の支笏カルデラの例などを見ると、噴出量の大半を担うメイン噴出物の後に、数十年以上の時間を介して、比較的小規模な火砕流が発生し、遂に噴火が終息していることが分かる。これらの事例は、防災学的にも重要であり、100 km³ を超えるような超大規模噴火が発生した後、数十年～数百年間は、比較的小規模ではあるが依然として規模の大きい爆発的噴火が発生しうる可能性をきちんと想定しておくべきであることを示唆している。これらの場合は、いずれも、顕著な時間間隙の前後でマグマ組成が変化していることから、後発のマグマはメイン噴火時には火山下には存在しておらず、数十

年の時間間隙の間に、新たに形成された可能性も考えられる。これらの詳細な検討は、地質学や岩石学などの多分野融合型の研究により今後明かされていくことが期待できる。いずれにしても、噴火時に噴出物のマグマ組成をモニターすることは、防災や将来予測を考える上で必須であると考えられる。

また本研究のねらいとして、アルミ・キューブによる熱消磁実験の実施、と地磁気エクスカッション・イベントを利用した継続時間見積りの高解像度化、を挙げていた。後者は、ねらい通りの結果が得られたが、前者については、いくつかの問題点も浮き彫りとなった。今後は、これらの問題点を解決しつつ、さらなる事例研究を増やししながら、超大規模噴火の継続時間に関する事例研究を積み上げていきたい。

参考文献

[1] Newhall, C.G. and Self, S. (1982) The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research*. 87, 1231–1238.

[2] Simkin, T. and Siebert, L. (2000) Earth's volcanoes and eruptions: An overview. in *Encyclopedia of Volcanoes* edited by Sigurdsson, H., Academic Press, 249-261.

[3] Hasegawa, T., Mochizuki, N., Oiwane, H. (2018) Methods of Estimating the Durations of Super Large Eruptions Based on Pyroclastic Deposits. *JOURNAL OF GEOGRAPHY-CHIGAKU ZASSHI*. 127, 273 – 288.

[4] 望月伸竜・長谷川健・中川光弘 (2018) 支笏カルデラ噴火堆積物の古地磁気学的測定：大規模噴火堆積物の時間間隙の推定へ向けて。JpGU 2018 meeting [SEM17-09]

[5] Fujii, J. and Nakajima, T. (2001) T. and Kamata, H., Paleomagnetic directions of the Aso pyroclastic-flow and the Aso-4 co-ignimbrite ash-fall deposits in Japan. *Earth Planets Space*, 53, 1137-1150.

[6] 安田裕紀・佐藤鋭一・和田恵治・鈴木桂子 (2015) 大雪山御鉢平カルデラ起源の 2 種類の火砕流堆積物の噴出間隔：古地磁気方位に基づく推定。火山, 60, 447-459.

[7] Reynolds, R.L. (1979) Comparison of the TRM of the Yellowstone Group and the DRM of some Pearlette ash beds. *Journal of Geophysical Research*, 84, 4525–4532.

[8] 中島正志・藤井純 (1995) 始良 Tn テフラの古地磁気方位。第四紀研究, 34, 297-307.

- [9] Hayashida, A., Kamata, H. and Danhara, T. (1996) Correlation of widespread tephra deposits based on paleomagnetic directions: link between a volcanic field and sedimentary sequences in Japan. *Quaternary International*, 34-36, 89-98.
- [10] Aramaki, S. (1984) Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000 years ago. *J. Geophys. Res.*, 89, 8485-8501.
- [11] 上野龍之 (2007) 入戸火砕流堆積物に認められる石質岩片濃集部の特徴と形成機構. 日本. 大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 42, 129-147.
- [12] Wilson, C.J.N., Rogan, A.M., Smith, I.E.M., Northey, D.J., Nairn, I.A., Houghton, B.F., (1984) Caldera volcanoes of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Jour. Geophys. Res.*, 89, 8463-8484.
- [13] Houghton, B.F., Wilson, C.J.N., McWilliams, M.O., Lanphere, M.A., Weaver, S.D., Briggs, R.M. and Pringle, M.S. (1995) Chronology and dynamics of a large silicic magmatic system: Central Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geology*, 23, 13-16.
- [14] Thouveny, N., Carcaillet, J., Moreno, E., Leduc, G., and Nerini, D. (2004) Geomagnetic moment variation and paleomagnetic excursions since 400 kyr BP: a stacked record from sedimentary sequences of the Portuguese margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 219, 377-396.
- [15] 小林哲夫 (2014) 九州を南北につらなるカルデラたち. *科学*, 84, 84-93.
- [16] 奥野充 (2002) 南九州に分布する最近約 3 万年間のテフラの年代学的研究. *第四紀研究*, 40, 225-236.
- [17] 津久井雅志・荒牧重雄 (1990) 始良火砕噴火のマグマ溜り. *火山*, 35, 231-248
- [18] Wilson, C.J.N., Houghton, B.F., McWilliams, M.O., Lanphere, M.A., Weaver, S.D. and Briggs, R.M. (1995) Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New Zealand: a review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 68, 1-28.
- [19] Cole, J.W., Deering, C.D., Burt, R.M., Sewell, S., Shane, P.A.R. and Matthews, N.E.

(2014) Okataina Volcanic Centre, Taupo Volcanic Zone, New Zealand: A review of volcanism and synchronous pluton development in an active, dominantly silicic caldera system. *Earth-Science Reviews*, 128, 1-17.

[20] Gravley, D. M., Wilson, C. J. N., Leonard, G. S. and Cole, J. W. (2007) Double trouble: Paired ignimbrite eruptions and collateral subsidence in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *GSA Bulletin*, 119, 18-30.

[21] Hirooka, K. (1971) Archaeomagnetic Study for the Past 2,000 Years in Southwest Japan, *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University. Series of geology and mineralogy*, 38(2): 167-207.

[22] Tanaka, H., Turner, G. M., Houghton, B. F., Tachibana, T., Kono, M., and McWilliams, M. O. (1996) Paleomagnetism and chronology of the central Taupo Volcanic zone, New Zealand. *Geophysical Journal International*, 124, 919-934.

[23] Laj, C., Kissel, C., Roberts, A.P. (2006) Geomagnetic field behavior during the Iceland Basin and Laschamp geomagnetic excursions: A simple transitional field geometry?, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q03004, doi:10.1029/2005GC001122.

[24] Korte, M., Brown, M.C., Panovska, S., Wardinski, I. (2019) Robust Characteristics of the Laschamp and Mono Lake Geomagnetic Excursions: Results From Global Field Models. *Front. Earth Sci.* 7:86. doi: 10.3389/feart.2019.00086

[25] 田辺祥汰・三木雅子・兵頭政幸・中川 毅・北場育子・山田圭太郎・北川淳・Suigetsu 2014 Project Members (2019) 水月湖年縞堆積物に記録された最終氷期の地磁気エクスカッション. JpGU 2018 meeting [SEM18-P07]

[26] Hasegawa, T., Matsumoto, A., Nakagawa, M. (2016) Evolution of the 120 ka caldera-forming eruption of Kutcharo volcano, eastern Hokkaido, Japan: Geologic and petrologic evidence for multiple vent systems and rapid generation of pyroclastic flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 321, 58-72.

以下，付録（33～176 ページ：ページ番号はヘッダに示す）

ザイダーベルト図では，青が NS-EW 面，赤が NS-Up-Down 面への投影で，緑が主成分分析による特徴的残留磁化方位．等積面図では，青が下半球，赤が上半球投影で，緑が特徴的残留磁化方位のプロット．ザイダーベルト図左上の数字は消磁のステップ（上から下）．同図左下は，成分分析に用いたステップの範囲，特徴的残留磁化方位の偏角（Dec），伏角（Inc），最大角分散（MAD）を記し，同図右下には残留磁化強度の減衰の様子を表した．

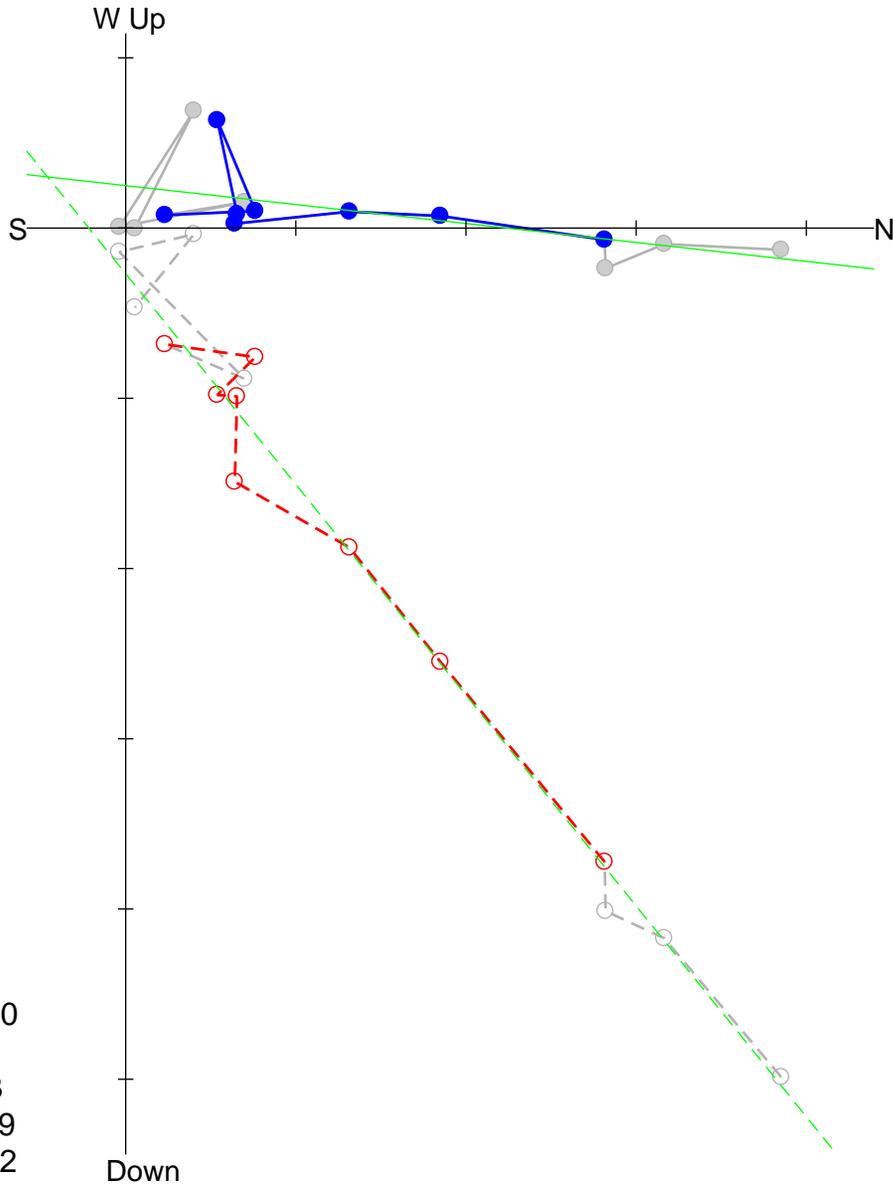
始良カルデラ噴出物

大隅降下軽石：OS1

OS1AA

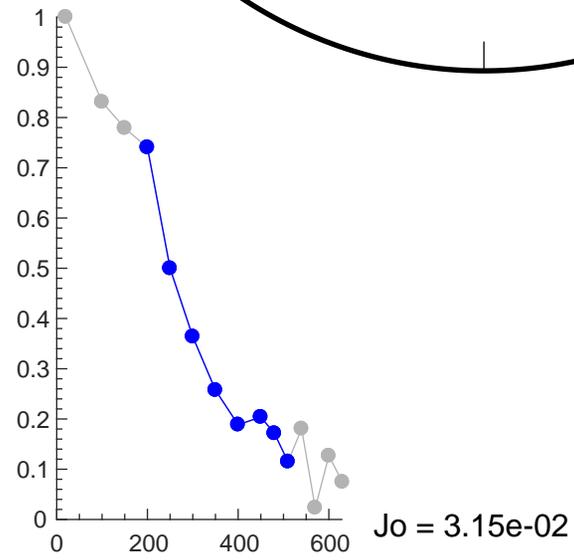
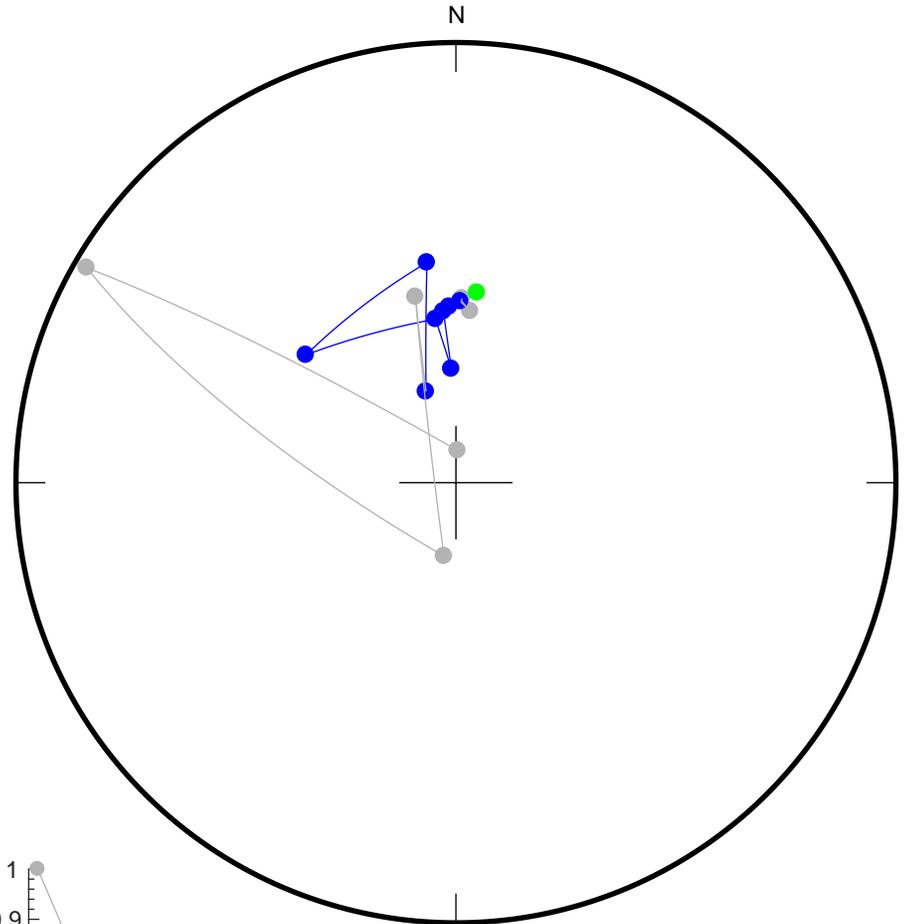
34

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

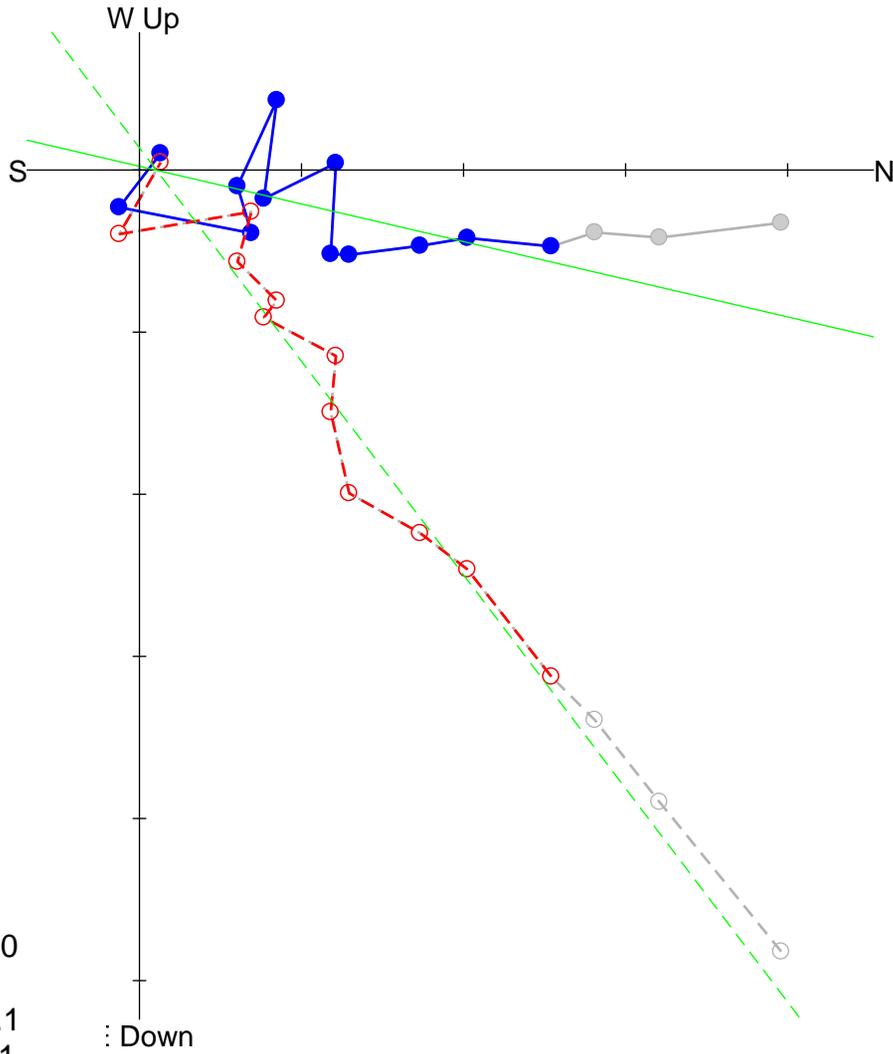


Fit from 200
to 510
Dec = 6.3
Inc = 50.9
MAD = 10.2

Div. = 5.0e-03



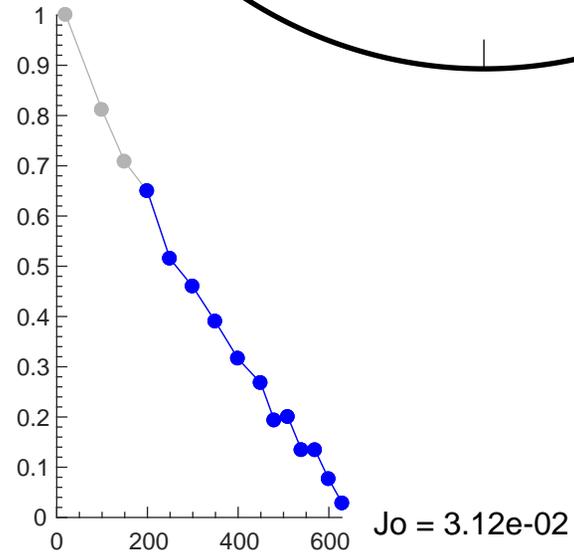
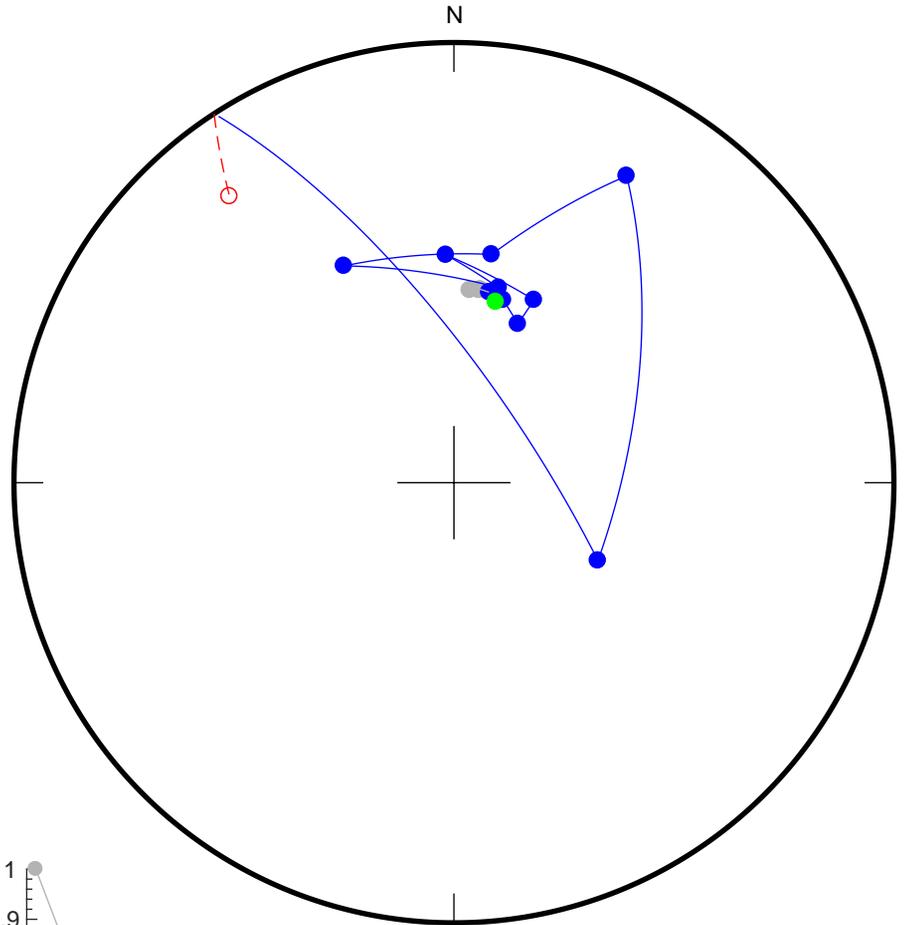
20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



Fit from 200
 to 630
 Dec = 13.1
 Inc = 52.1
 MAD = 14.1

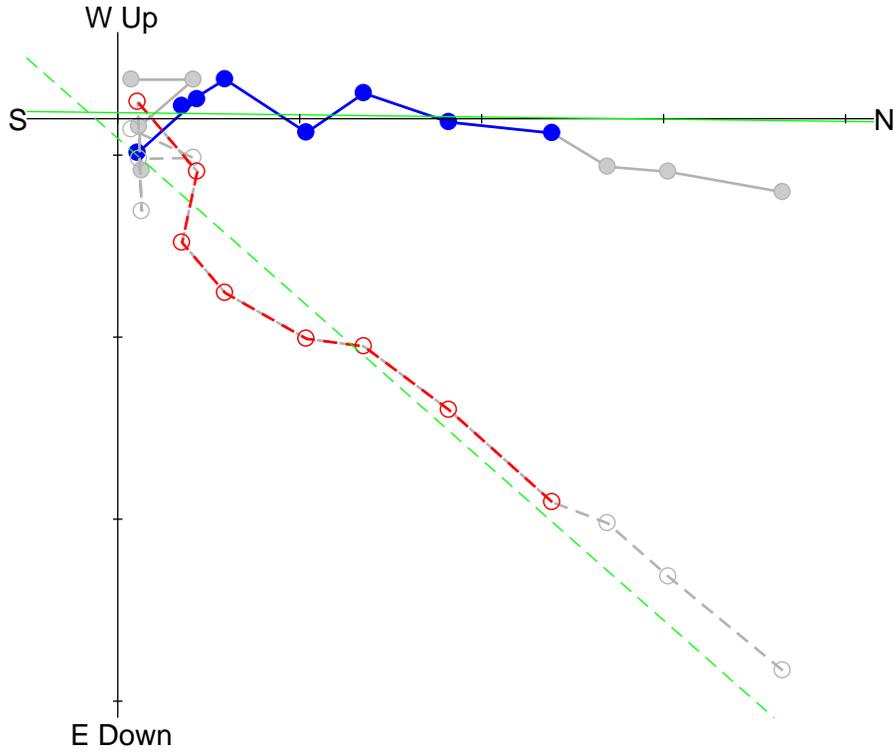
: Down

Div. = 5.0e-03



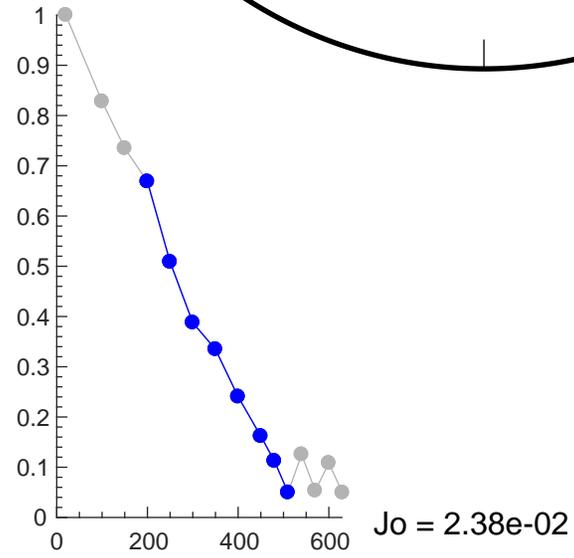
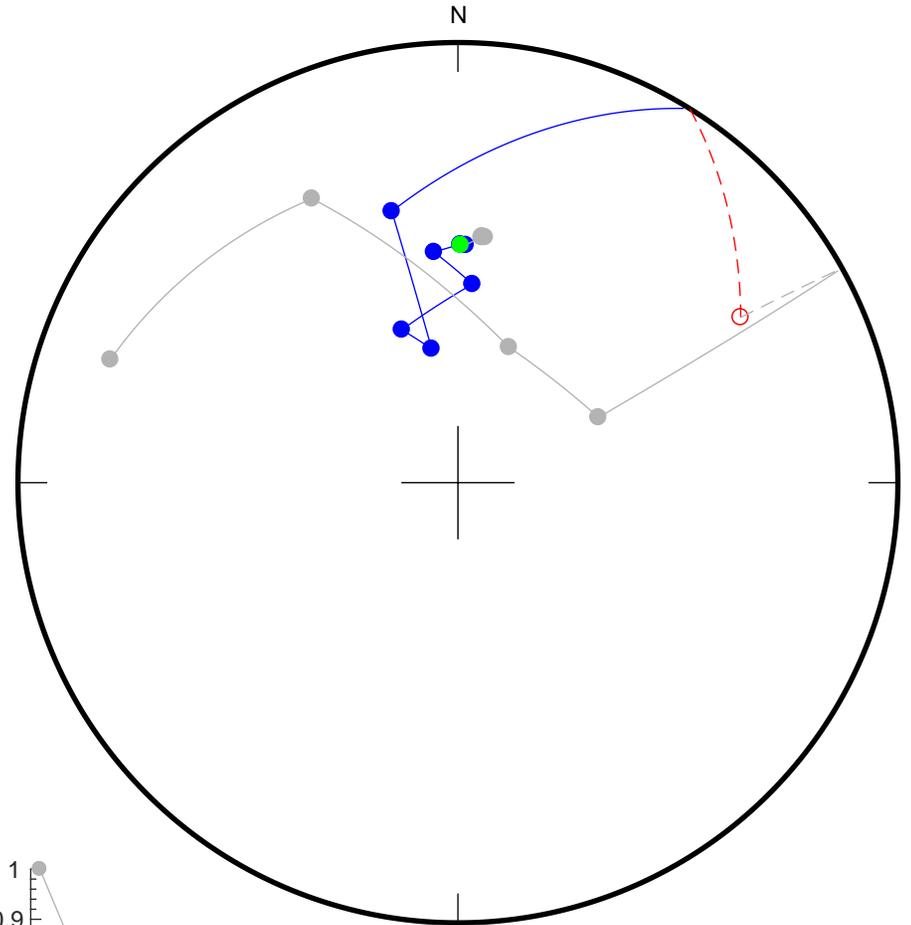
Jo = 3.12e-02

20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



Fit from 200
 to 510
 Dec = 0.7
 Inc = 41.4
 MAD = 11.7

Div. = 5.0e-03

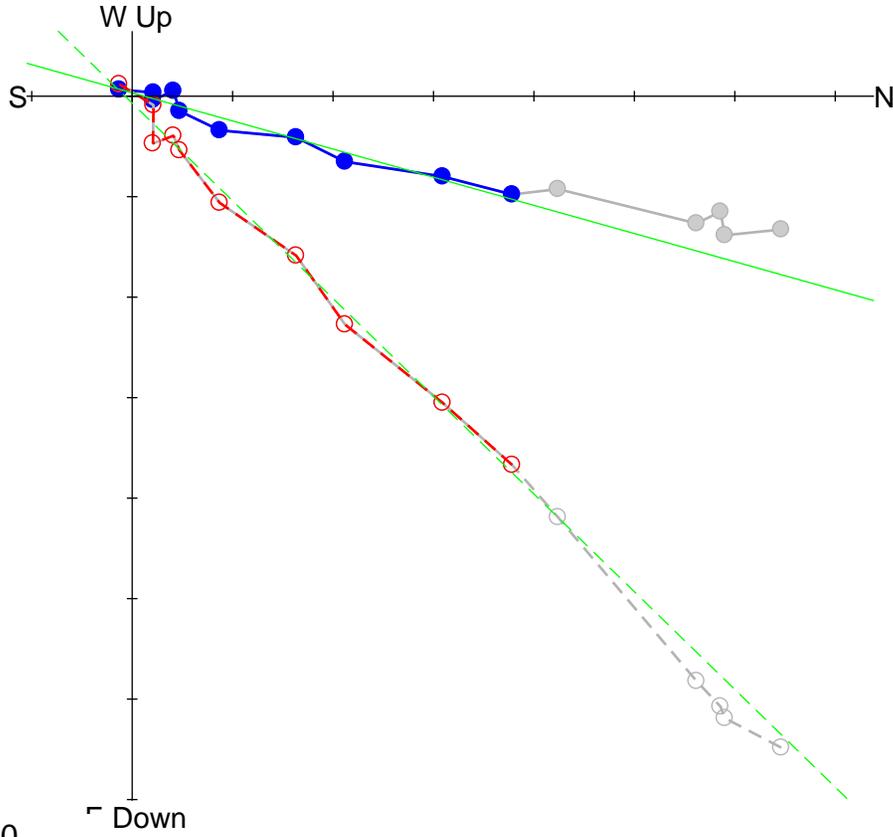


Jo = 2.38e-02

OS11A

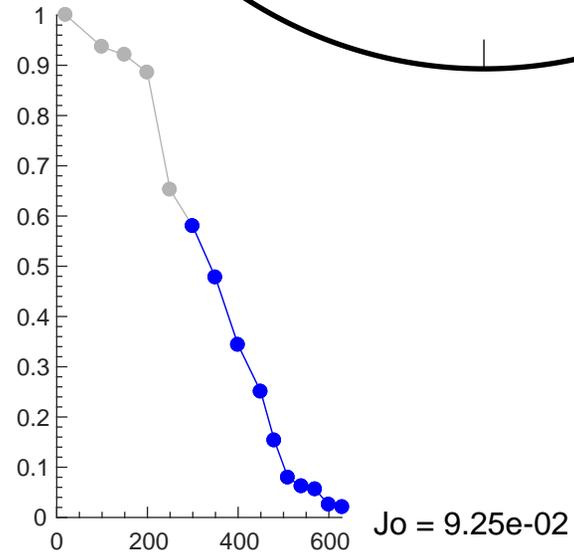
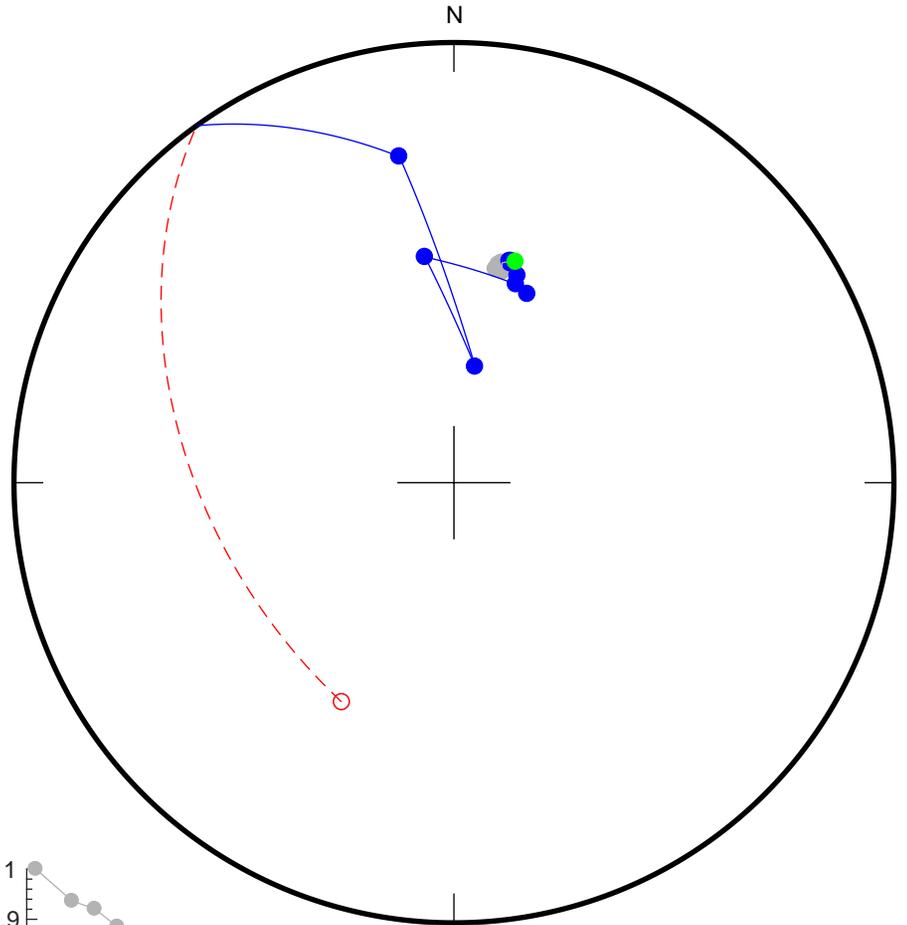
37

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



Fit from 300
to 630
Dec = 15.6
Inc = 43.1
MAD = 3.3

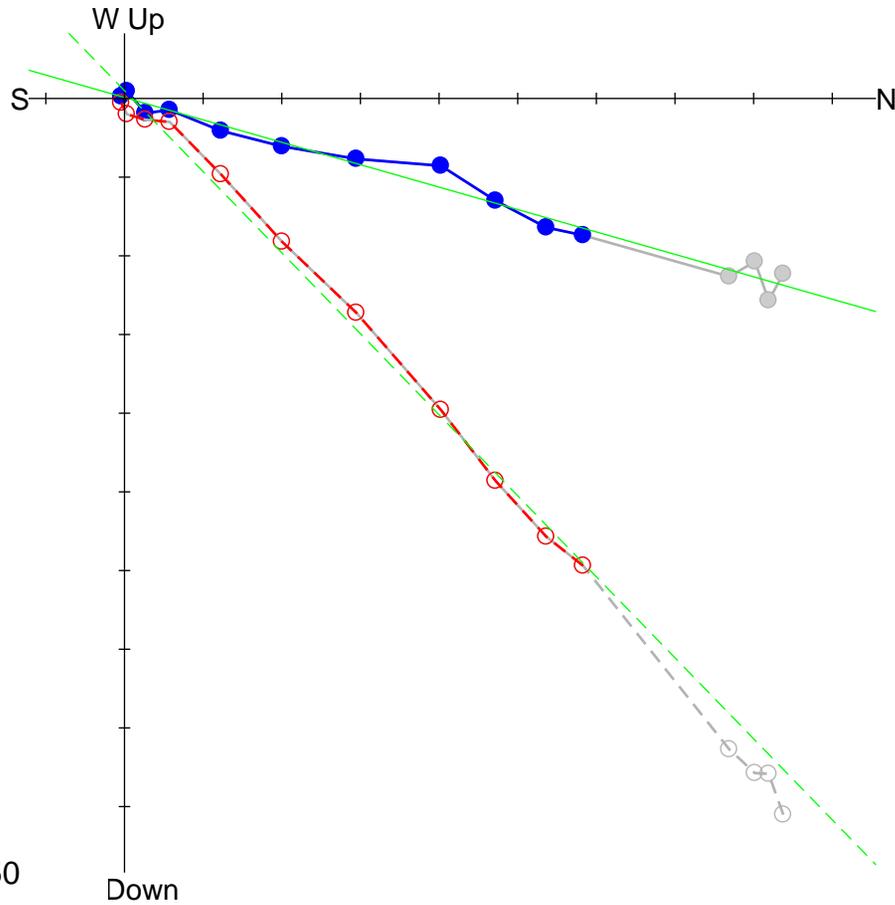
Div. = 1.0e-02



OS1JA

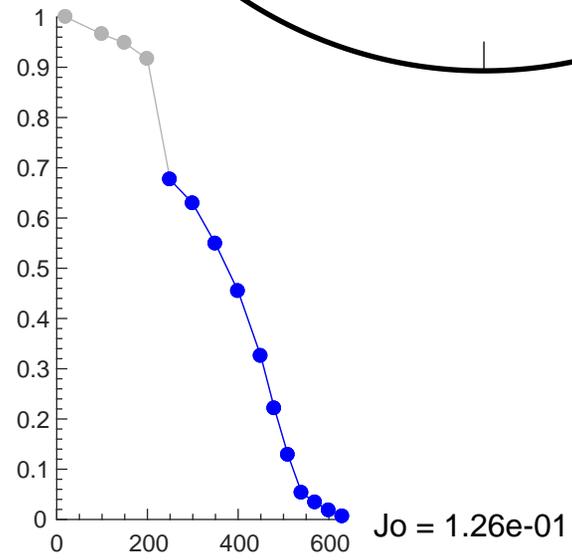
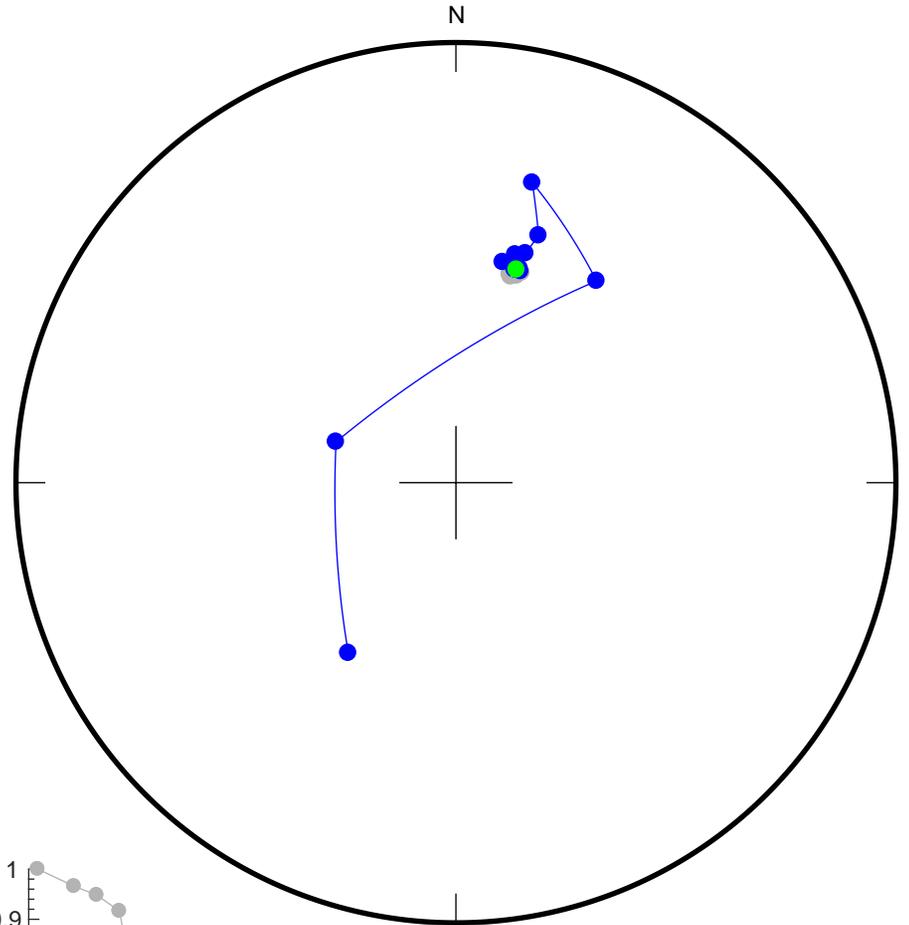
38

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

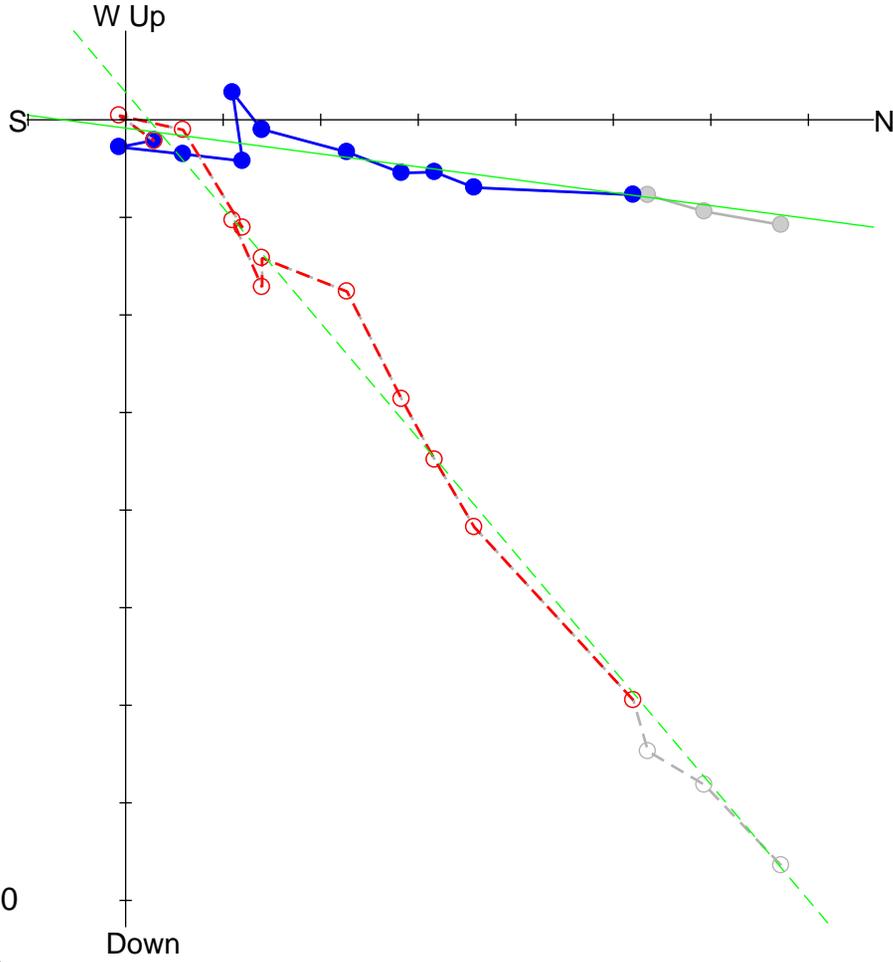


Fit from 250
to 630
Dec = 15.9
Inc = 44.7
MAD = 2.9

Div. = 1.0e-02

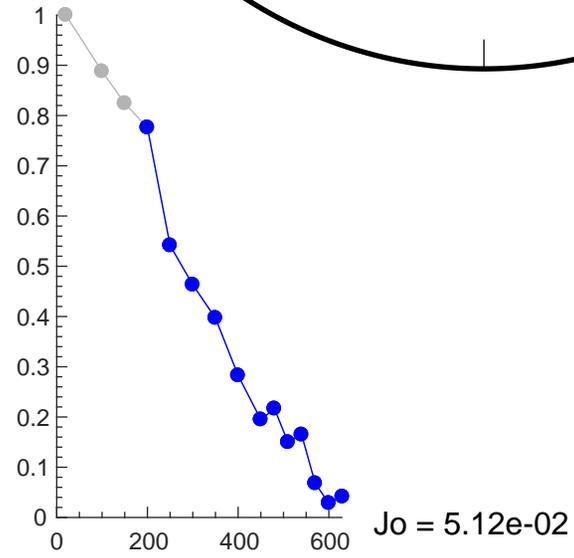
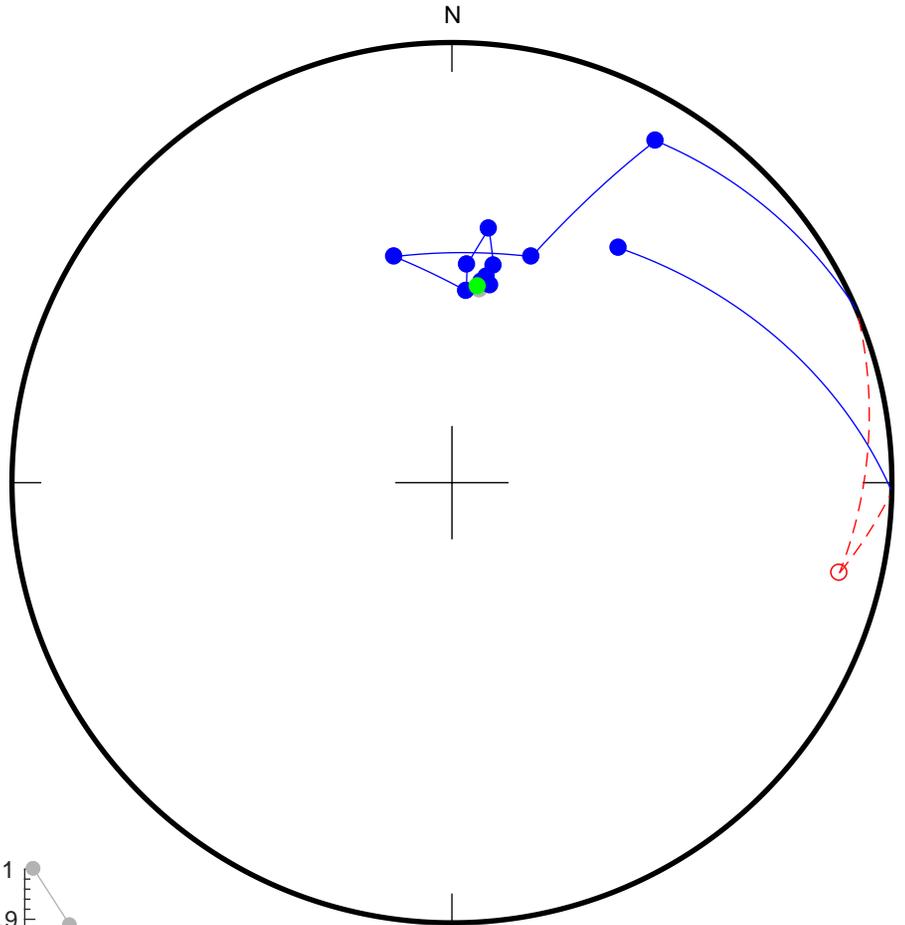


20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



Fit from 200
 to 630
 Dec = 7.5
 Inc = 49.5
 MAD = 6.5

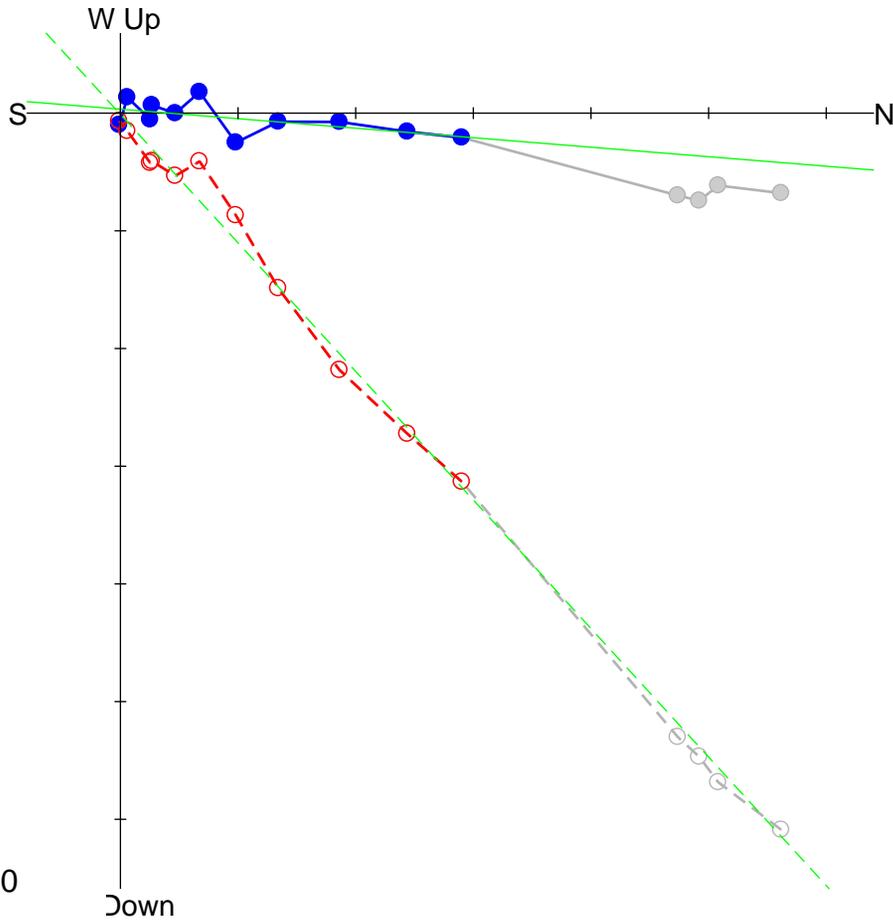
Div. = 5.0e-03



OS1LA

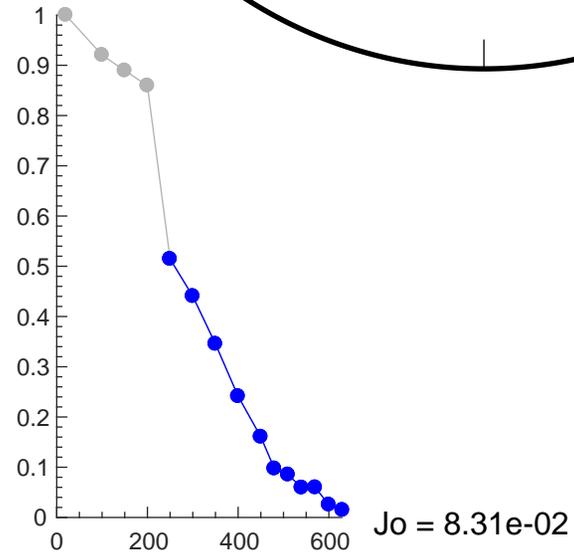
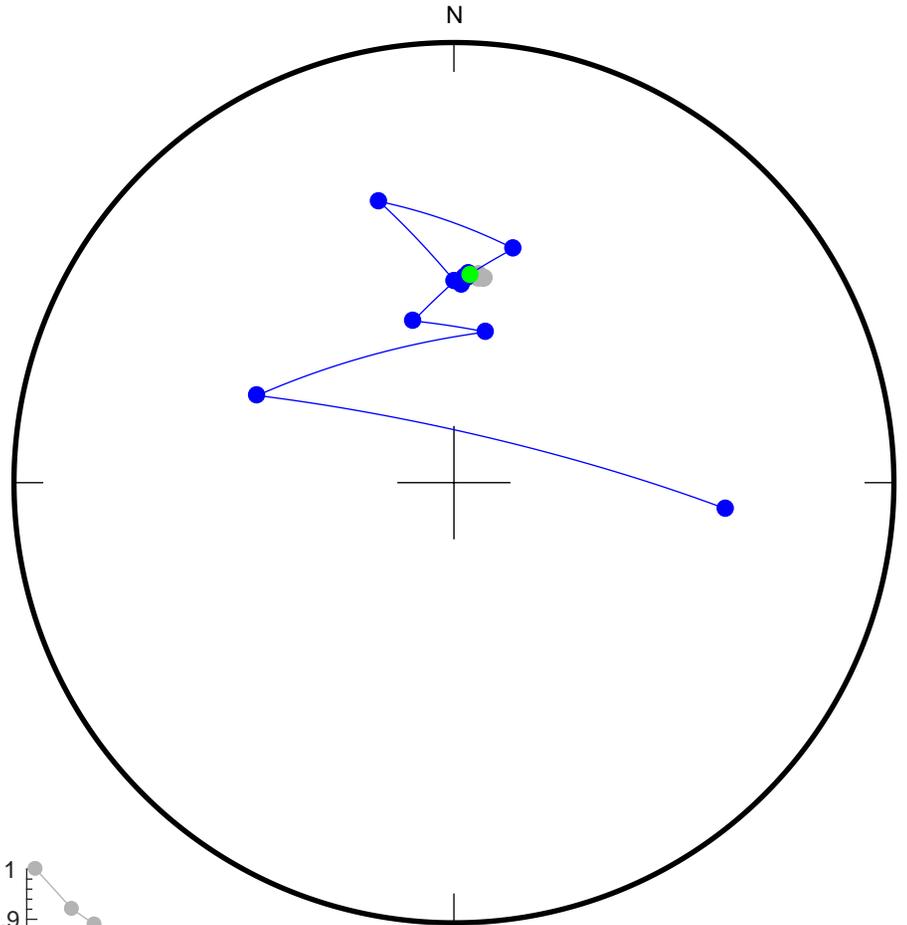
40

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



Dec = 4.6
Inc = 47.4
MAD = 5.7

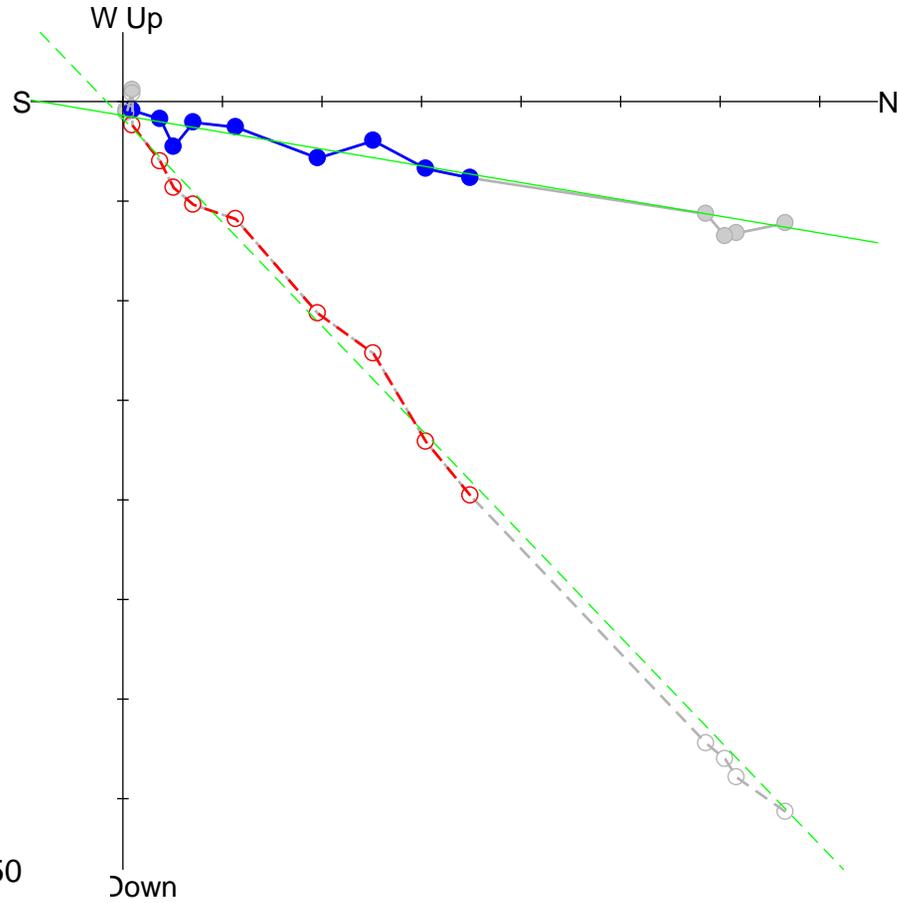
Div. = 1.0e-02



OS1MA

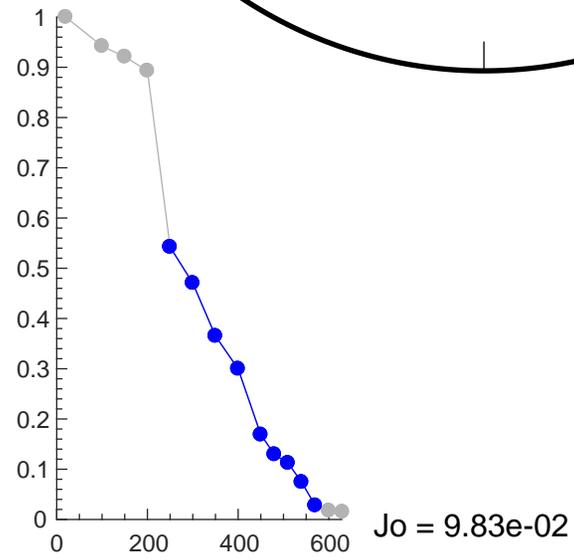
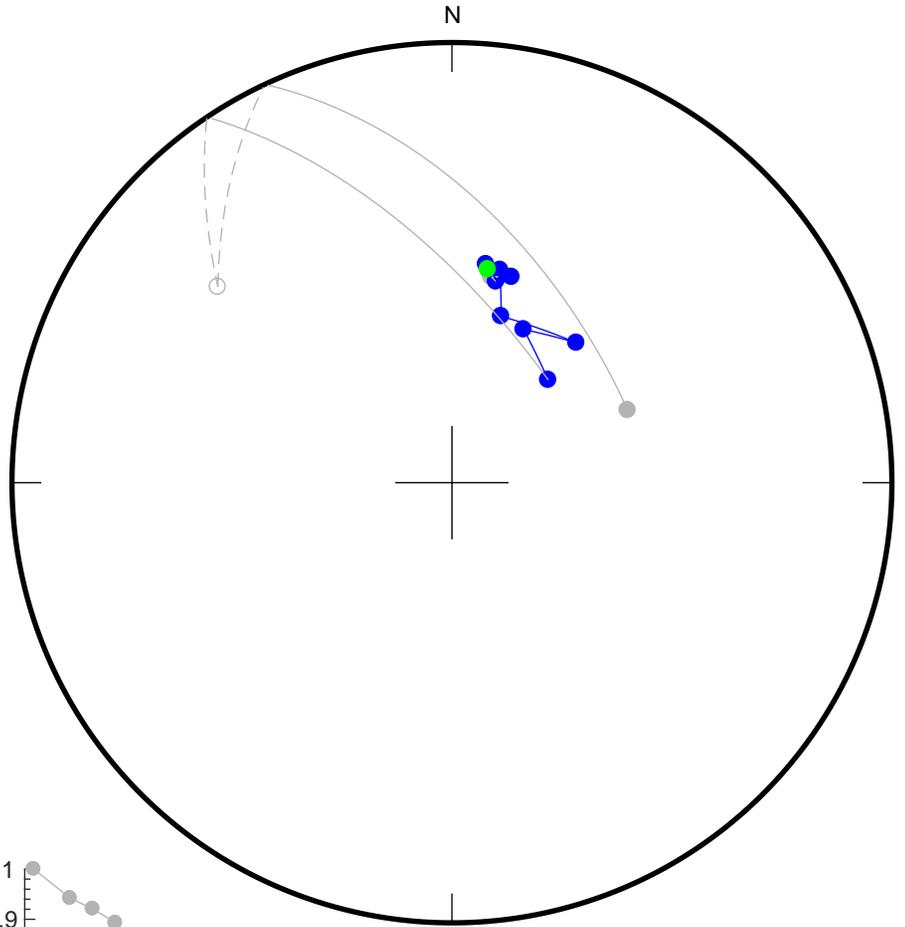
41

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



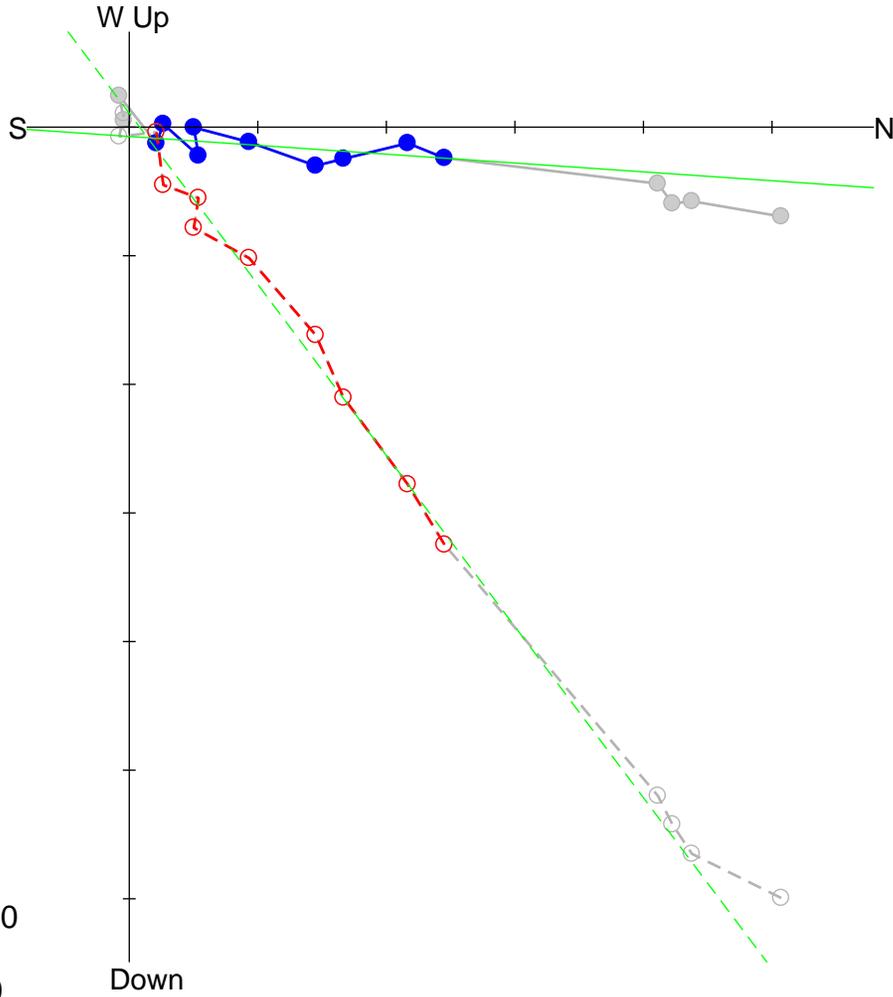
Fit from 250
to 570
Dec = 9.6
Inc = 45.8
MAD = 4.7

Div. = 1.0e-02



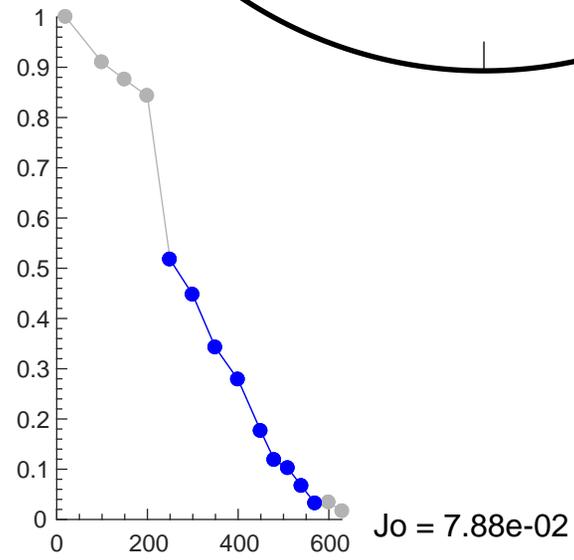
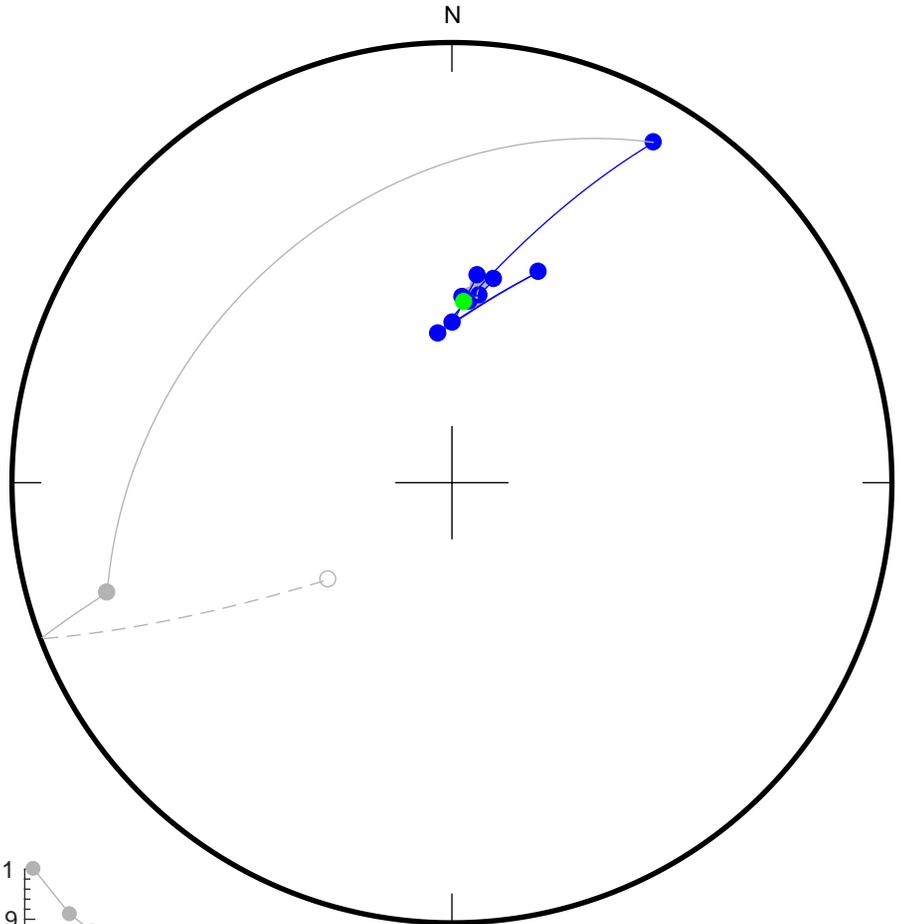
Jo = 9.83e-02

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



Fit from 250
to 570
Dec = 3.9
Inc = 53.0
MAD = 5.4

Div. = 1.0e-02



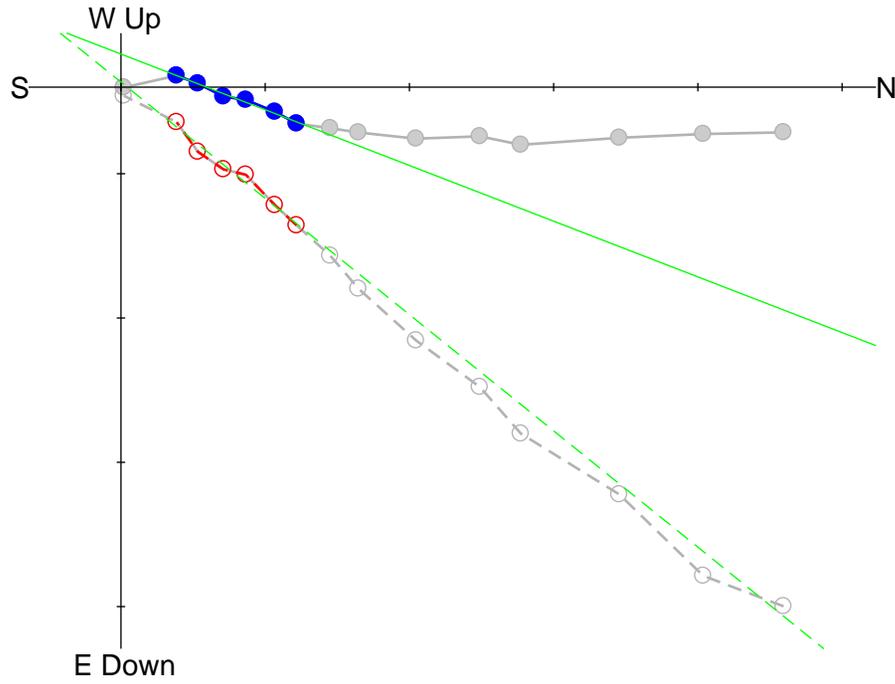
始良カルデラ噴出物

垂水火砕流：TM2

TM2-1

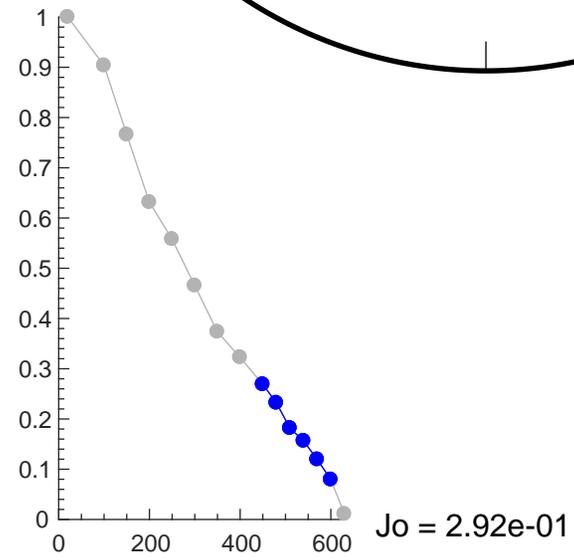
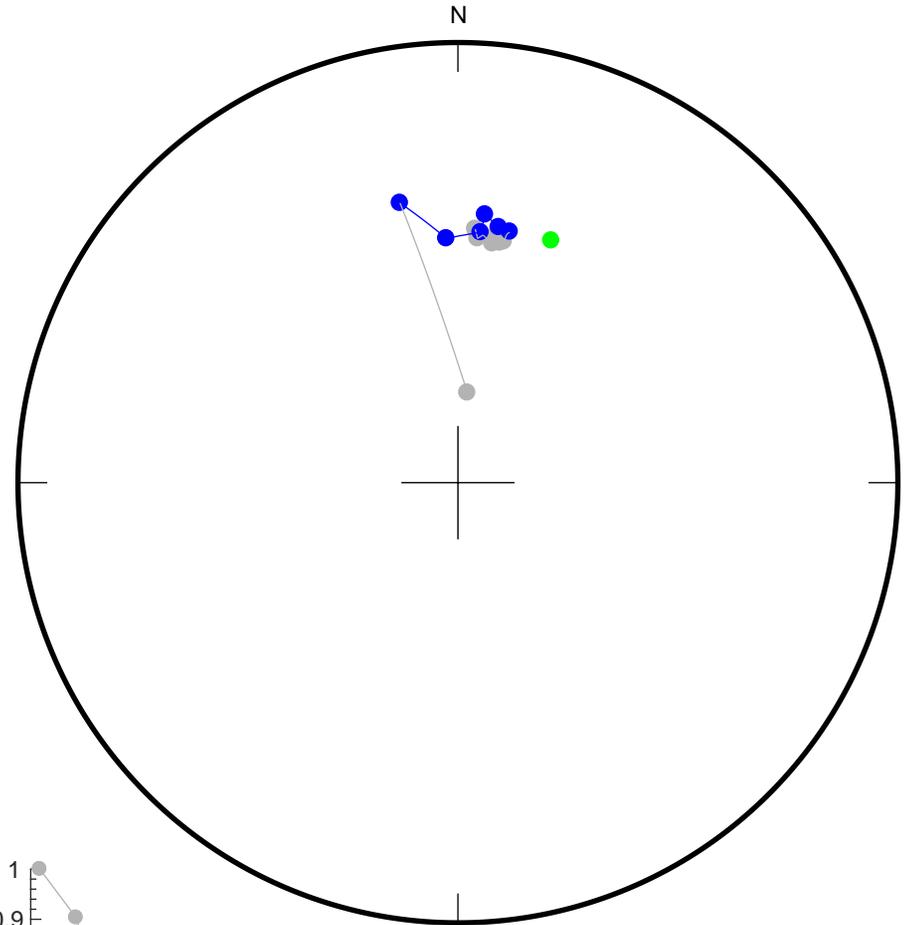
44

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



Fit from 450
to 600
Dec = 21.1
Inc = 36.9
MAD = 4.5

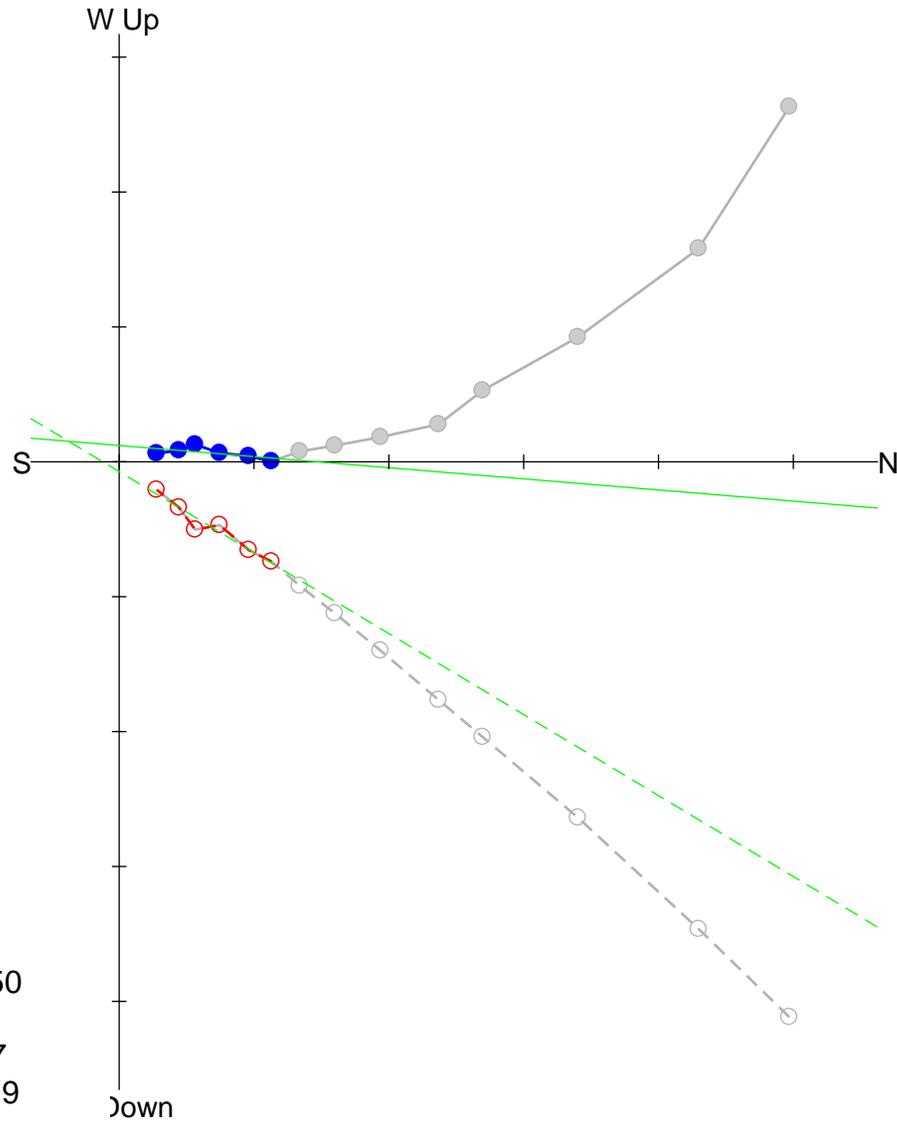
Div. = 5.0e-02



TM2-2

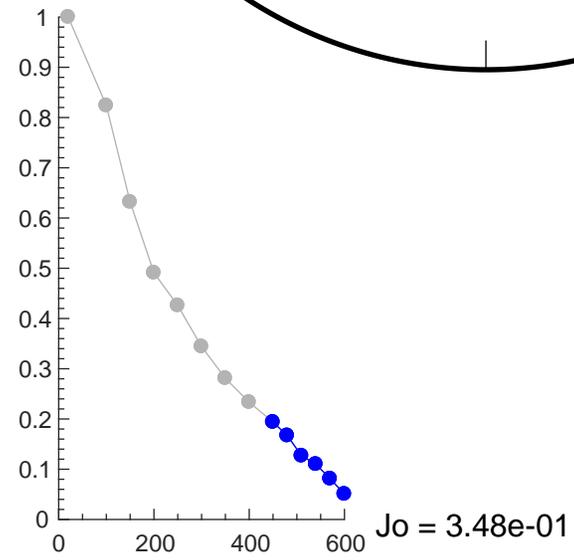
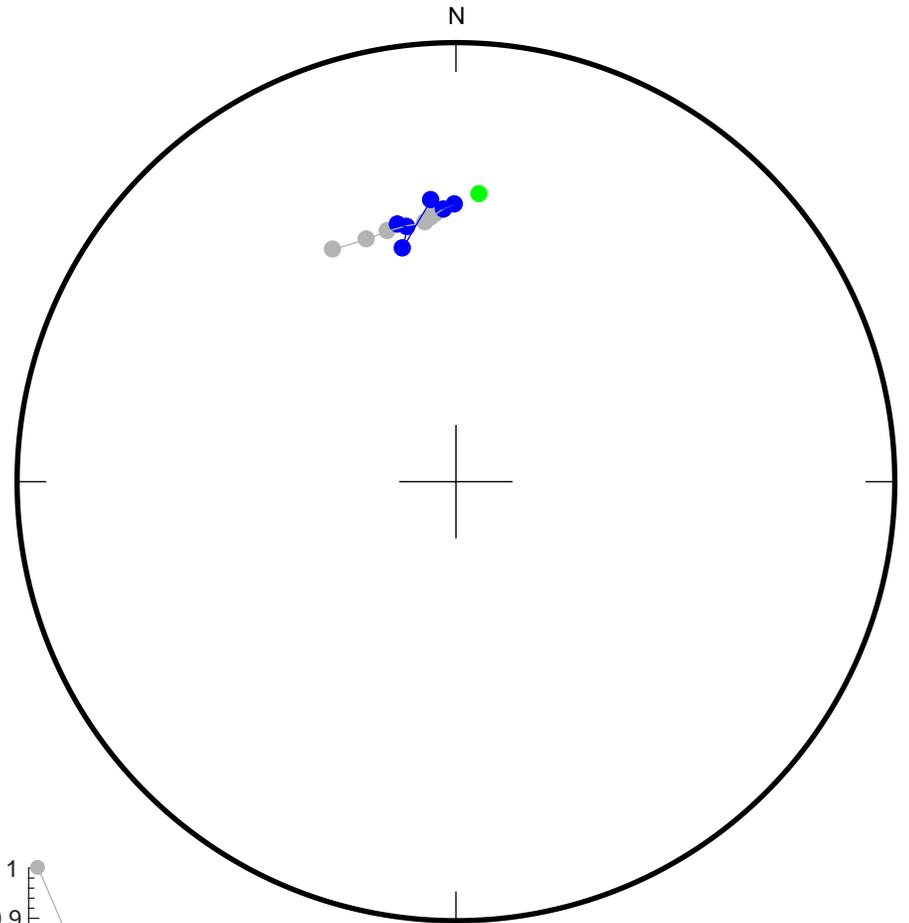
45

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 450
to 600
Dec = 4.7
Inc = 30.9
MAD = 8.1

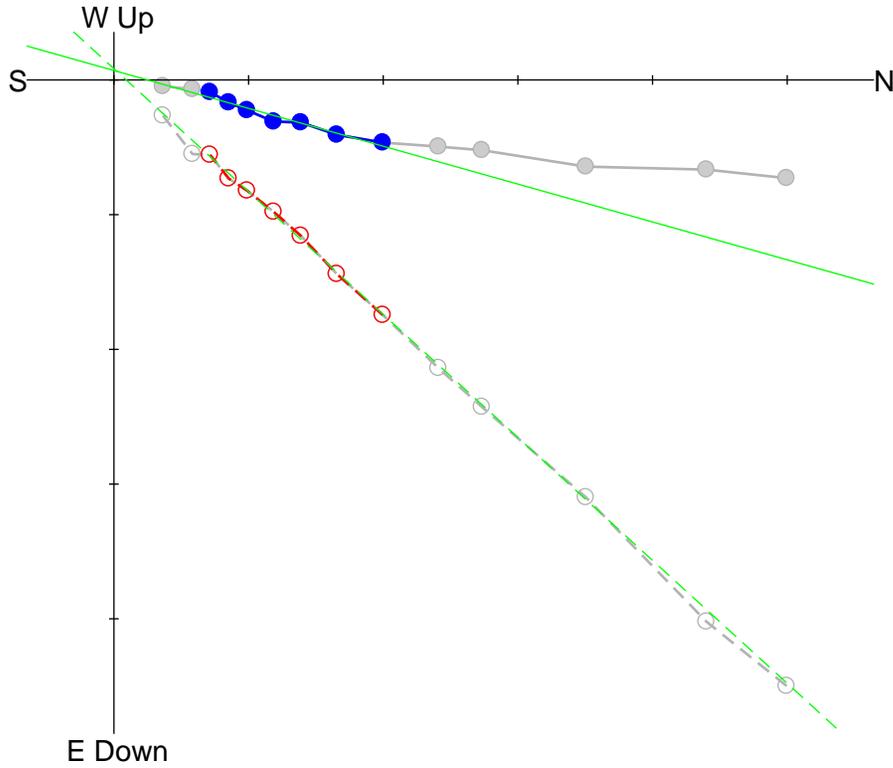
Div. = 5.0e-02



TM2-3

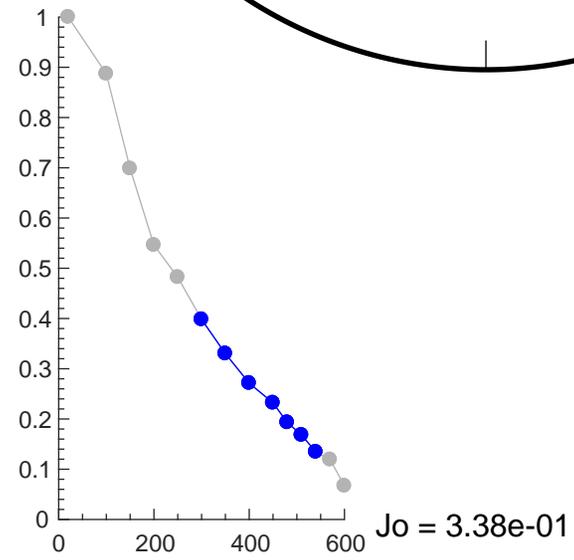
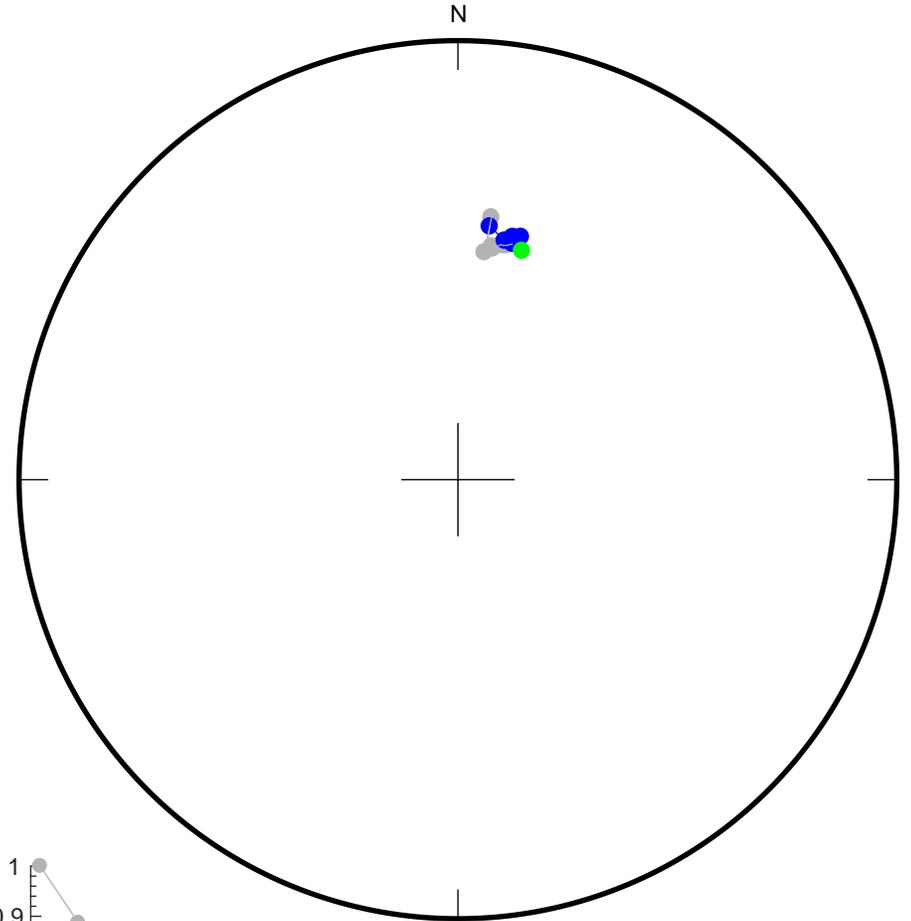
46

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600

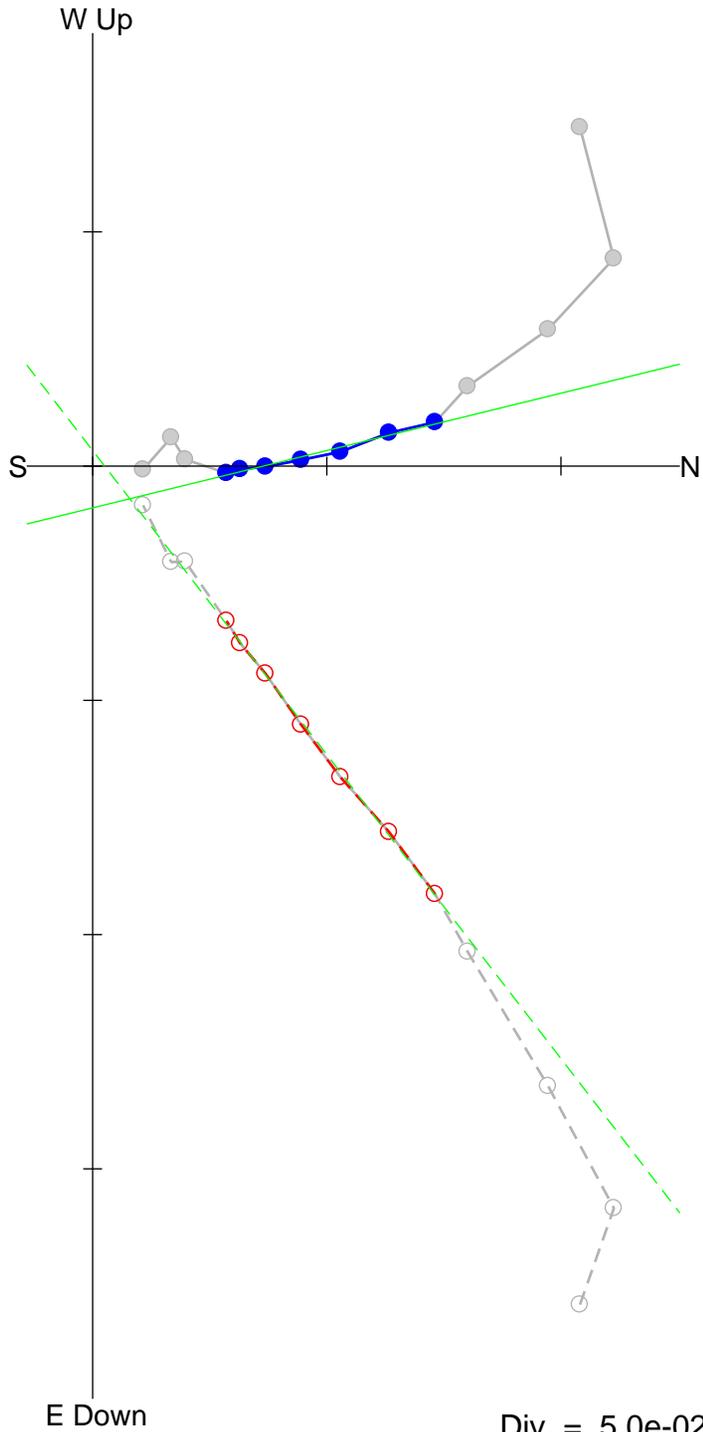


Fit from 300
to 540
Dec = 15.7
Inc = 41.3
MAD = 2.9

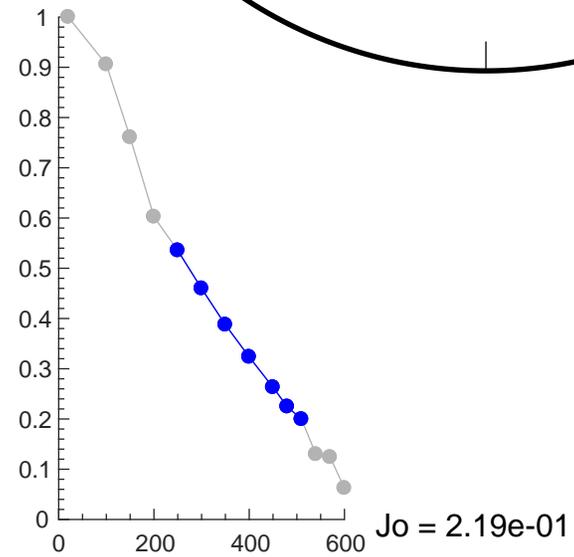
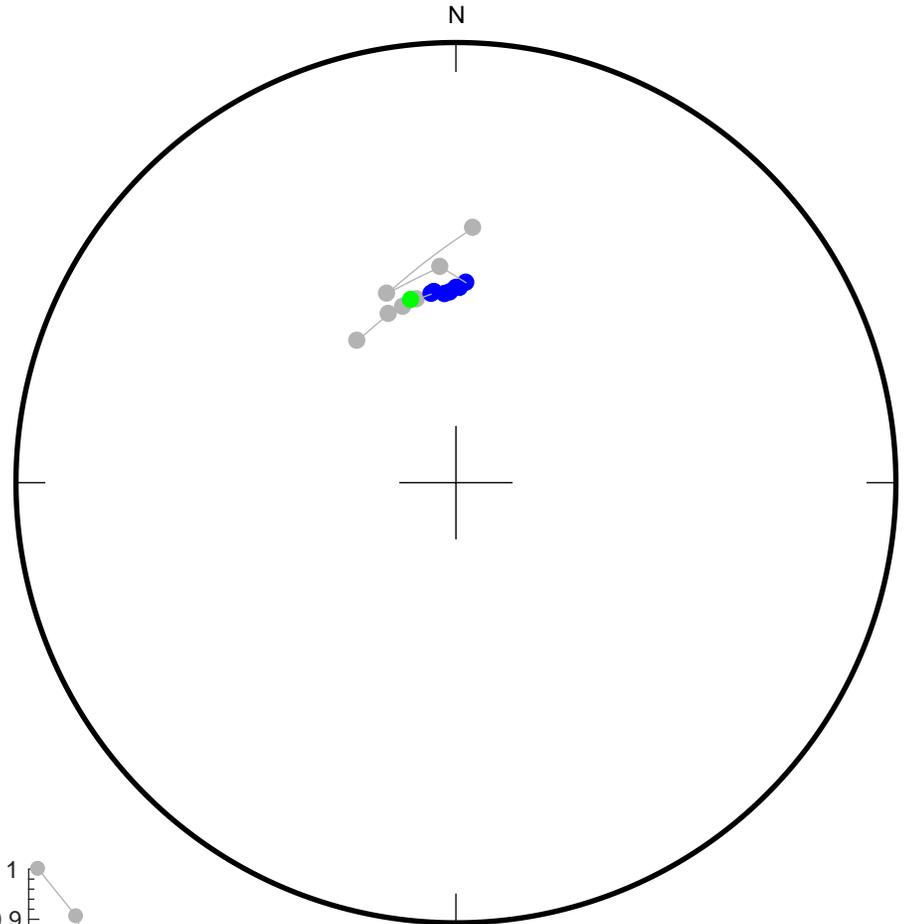
Div. = 5.0e-02



20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600



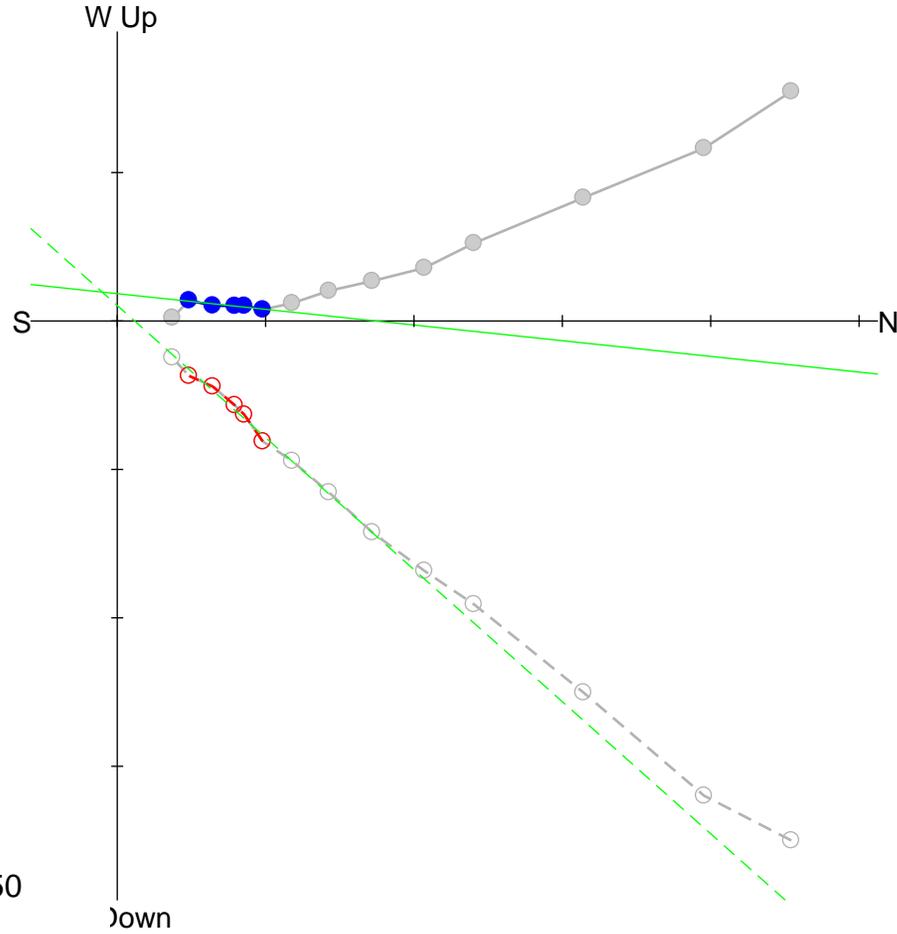
Fit from 250
 to 510
 Dec = 346.3
 Inc = 51.6
 MAD = 1.7



TM2-5

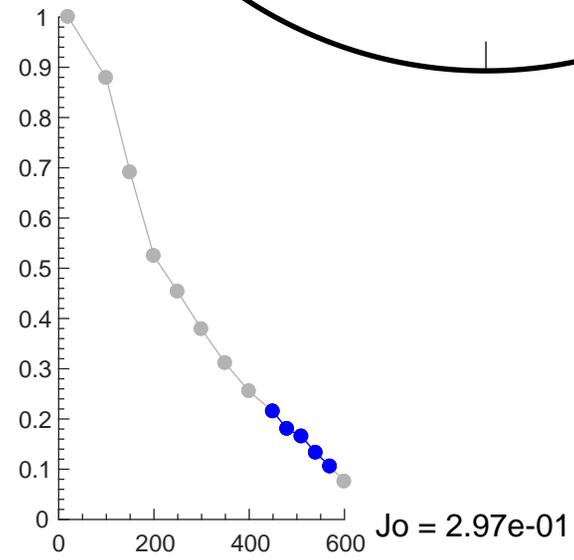
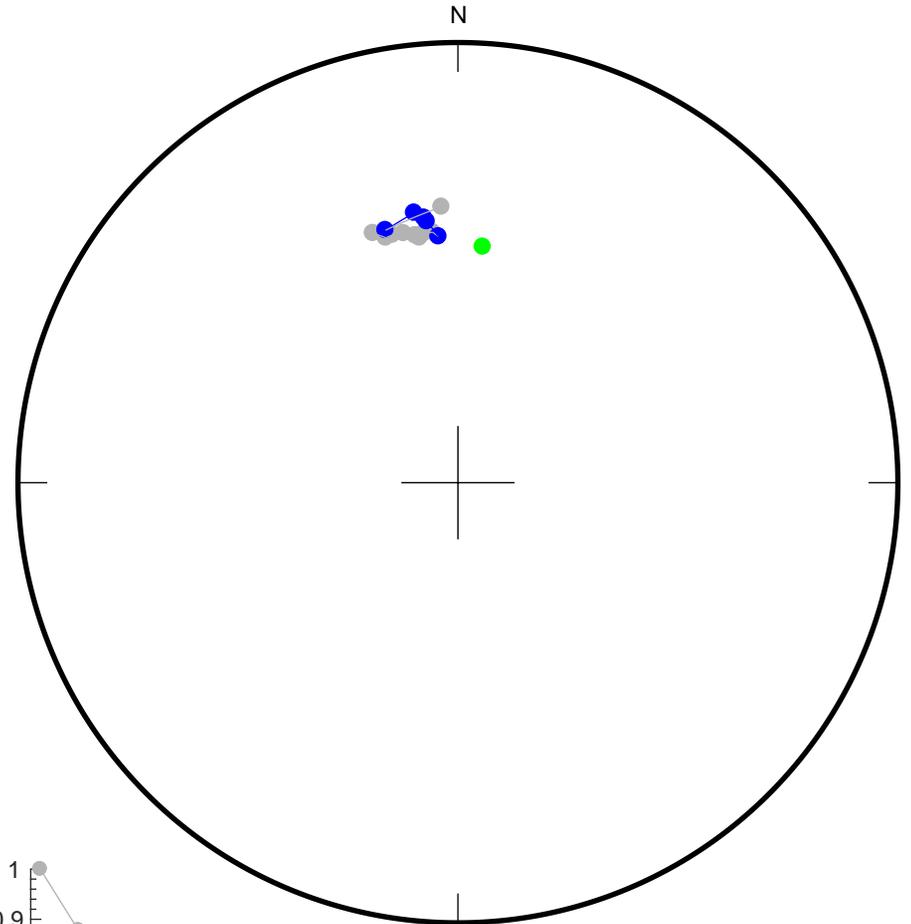
48

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 450
to 570
Dec = 6.0
Inc = 41.5
MAD = 6.8

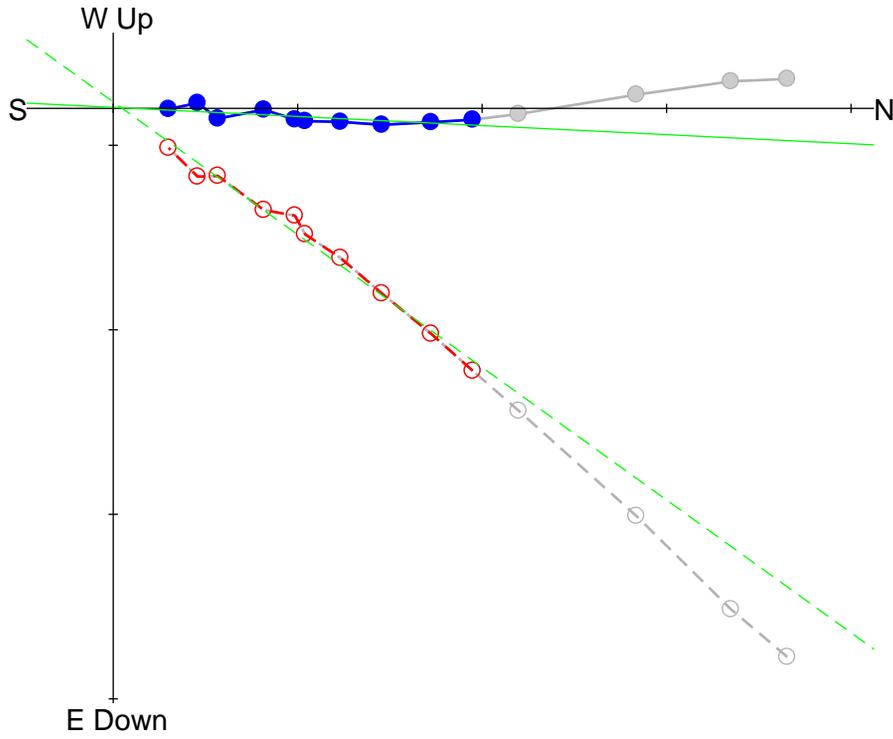
Div. = 5.0e-02



TM2-6

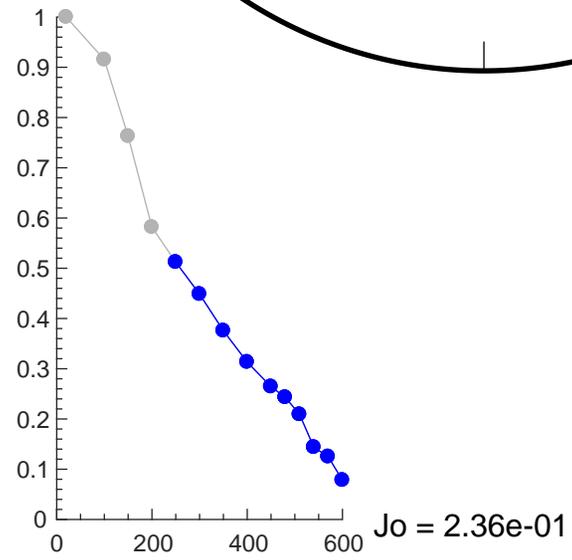
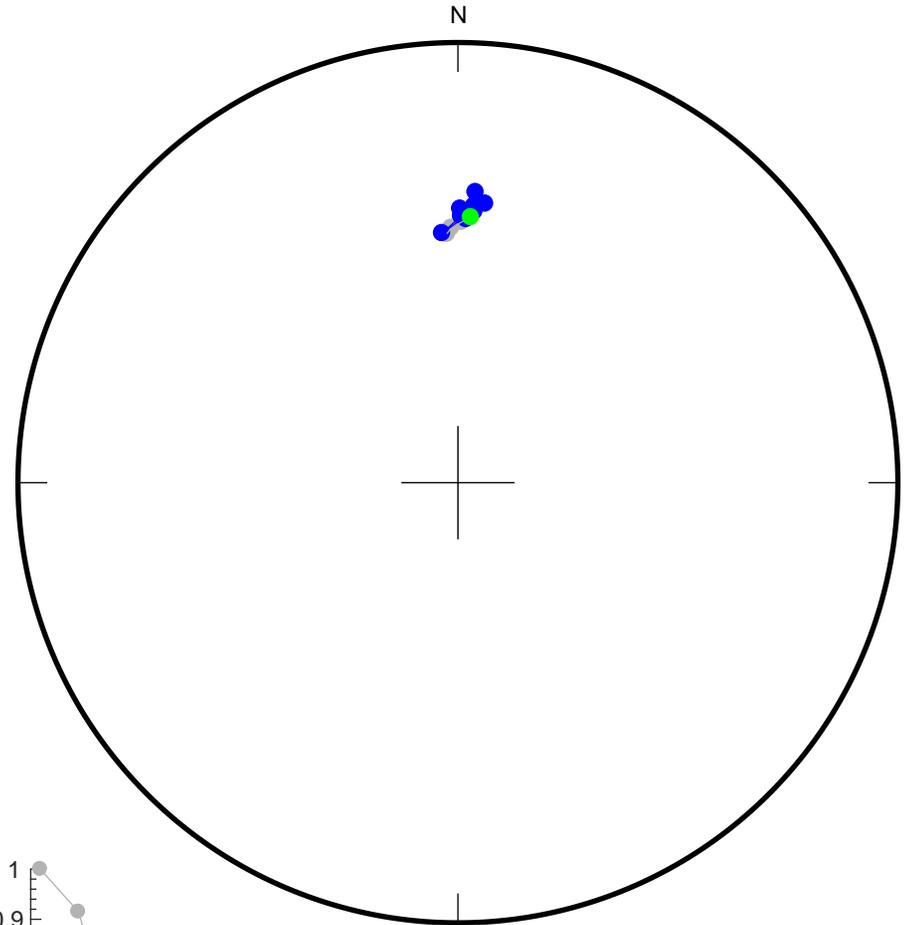
49

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 250
to 600
Dec = 2.8
Inc = 35.7
MAD = 4.1

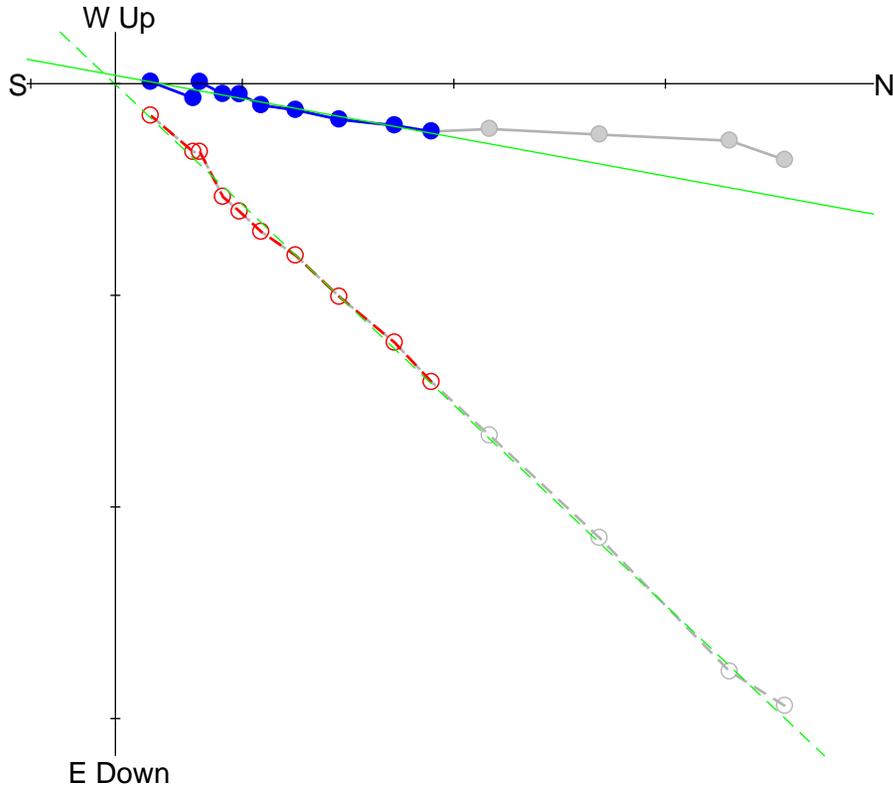
Div. = 5.0e-02



TM2-8

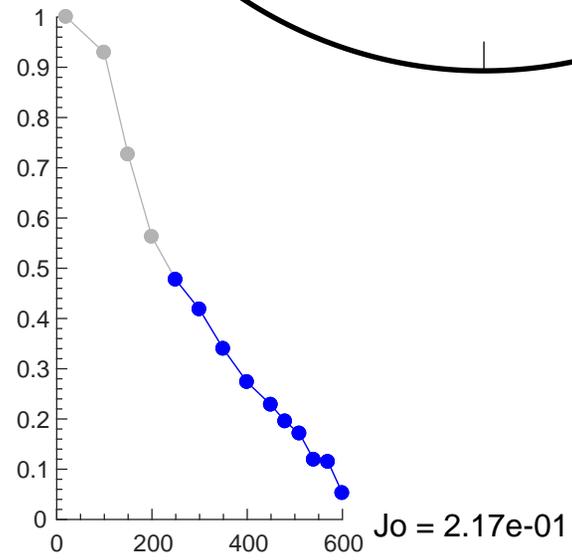
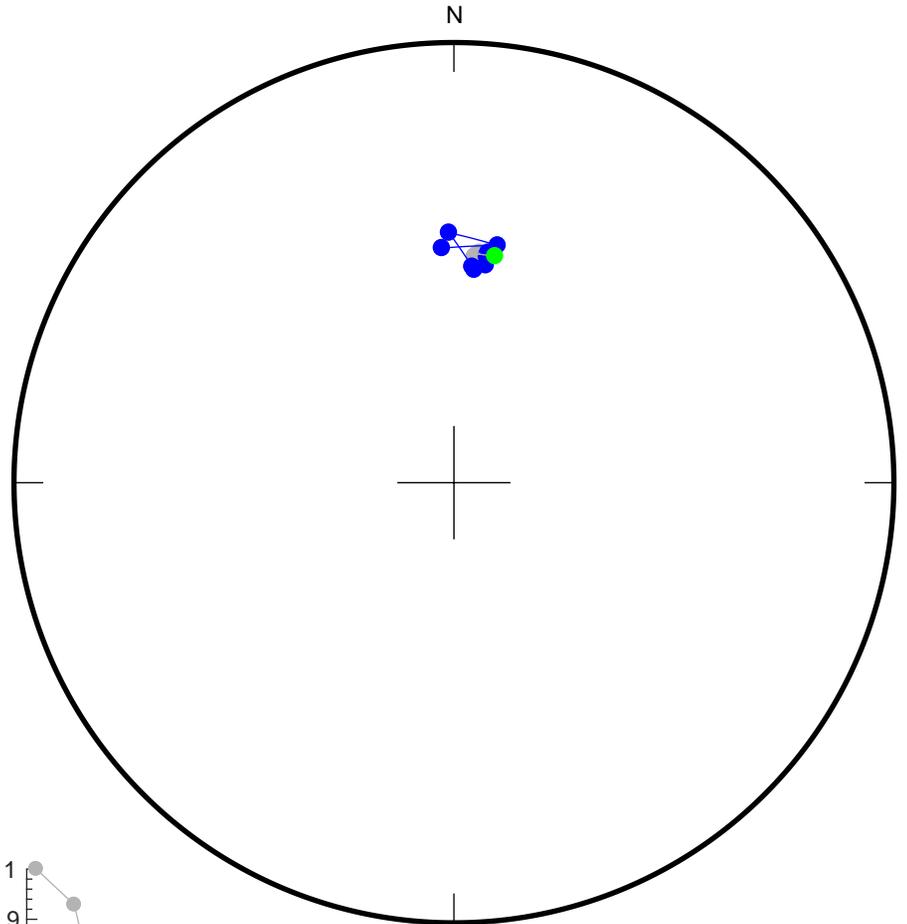
50

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 250
to 600
Dec = 10.4
Inc = 43.0
MAD = 3.2

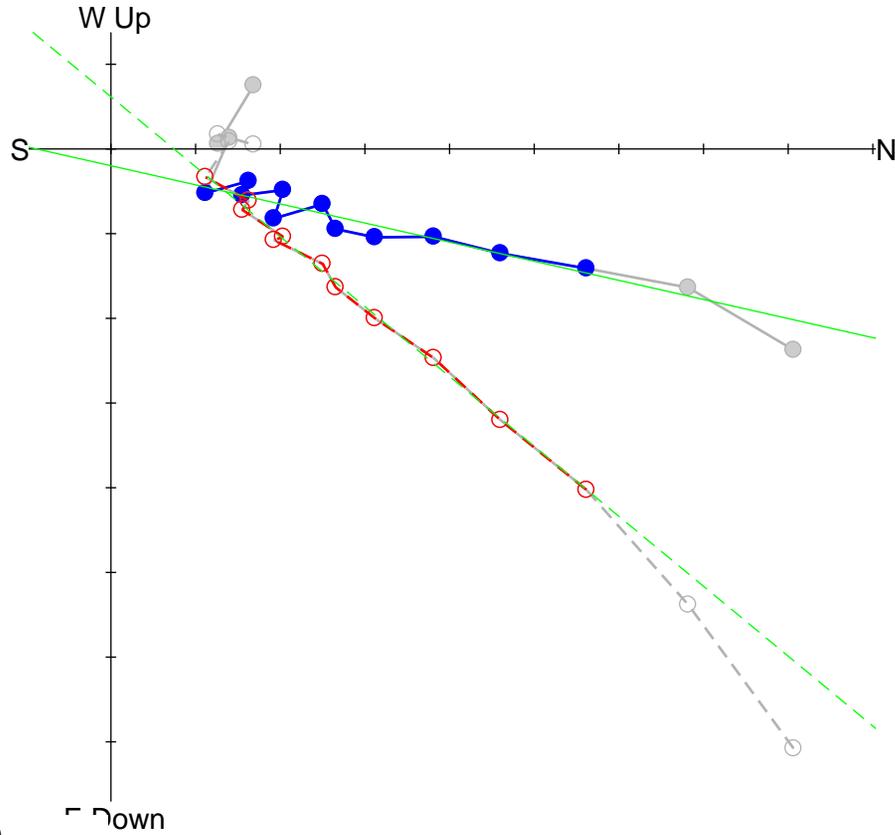
Div. = 5.0e-02



TM2-9

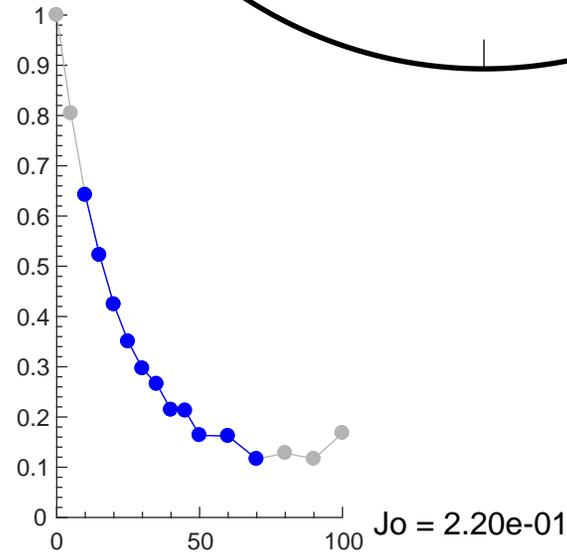
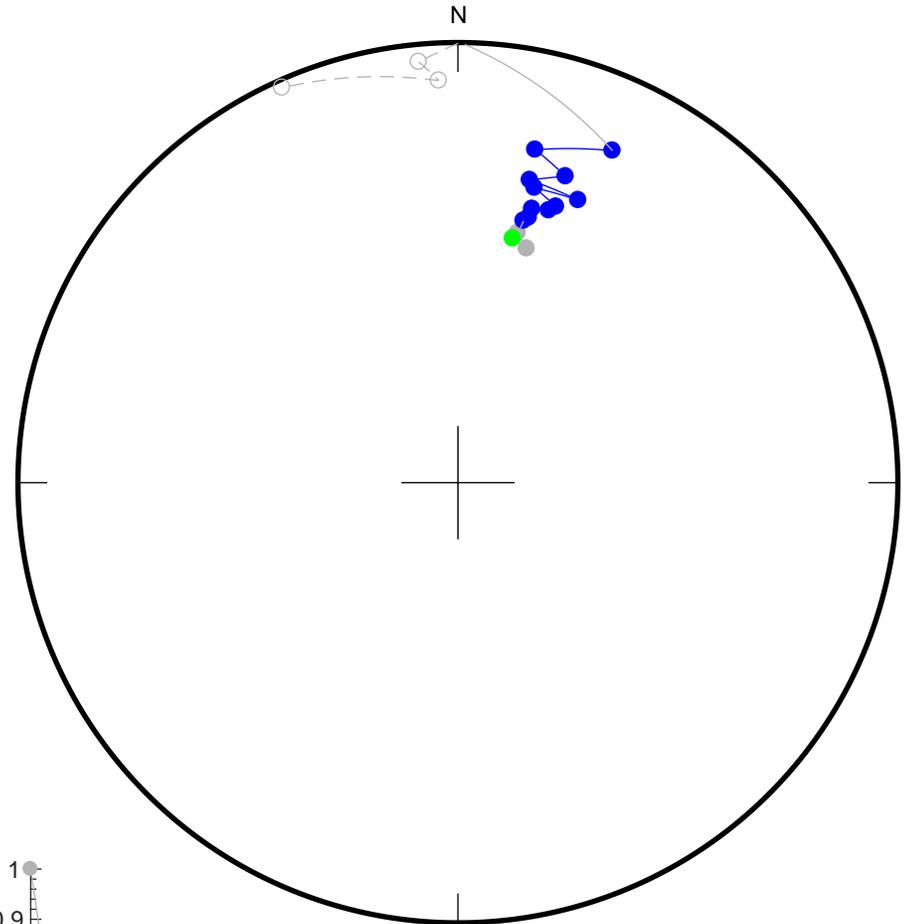
51

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 10
to 70
Dec = 12.7
Inc = 38.8
MAD = 4.1

Div. = 2.0e-02

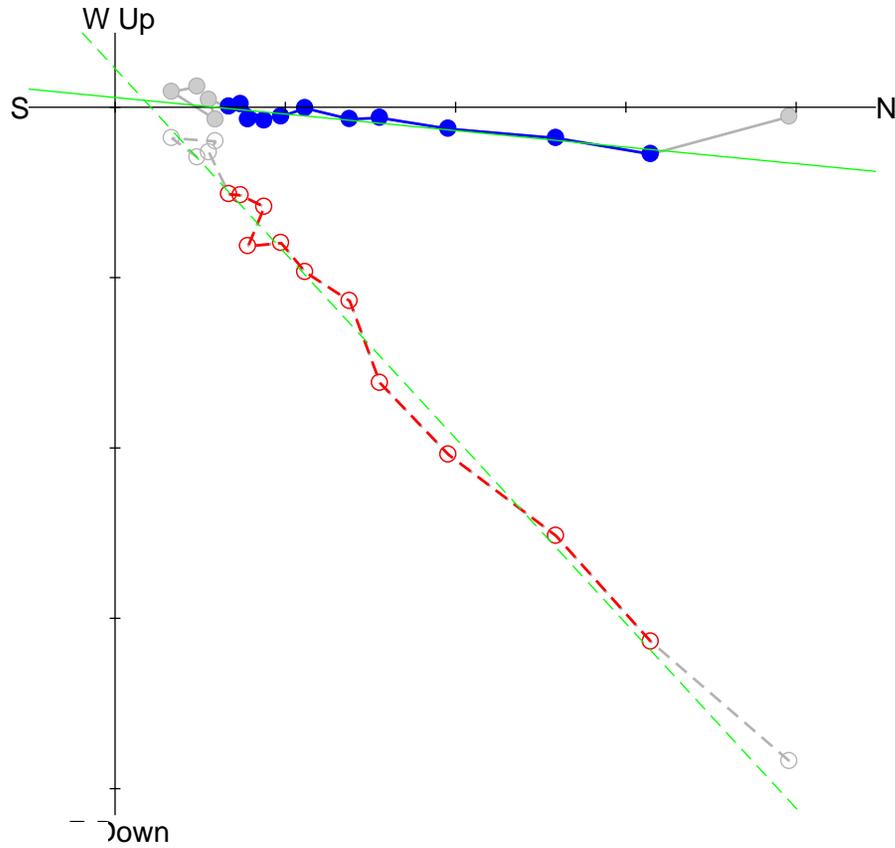


$Jo = 2.20e-01$

TM2-10

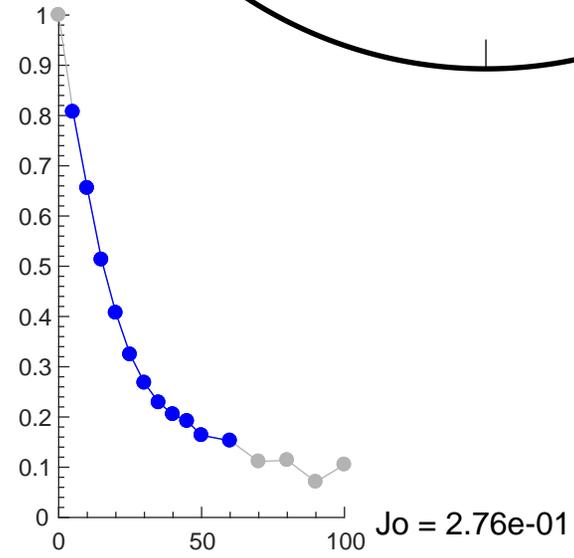
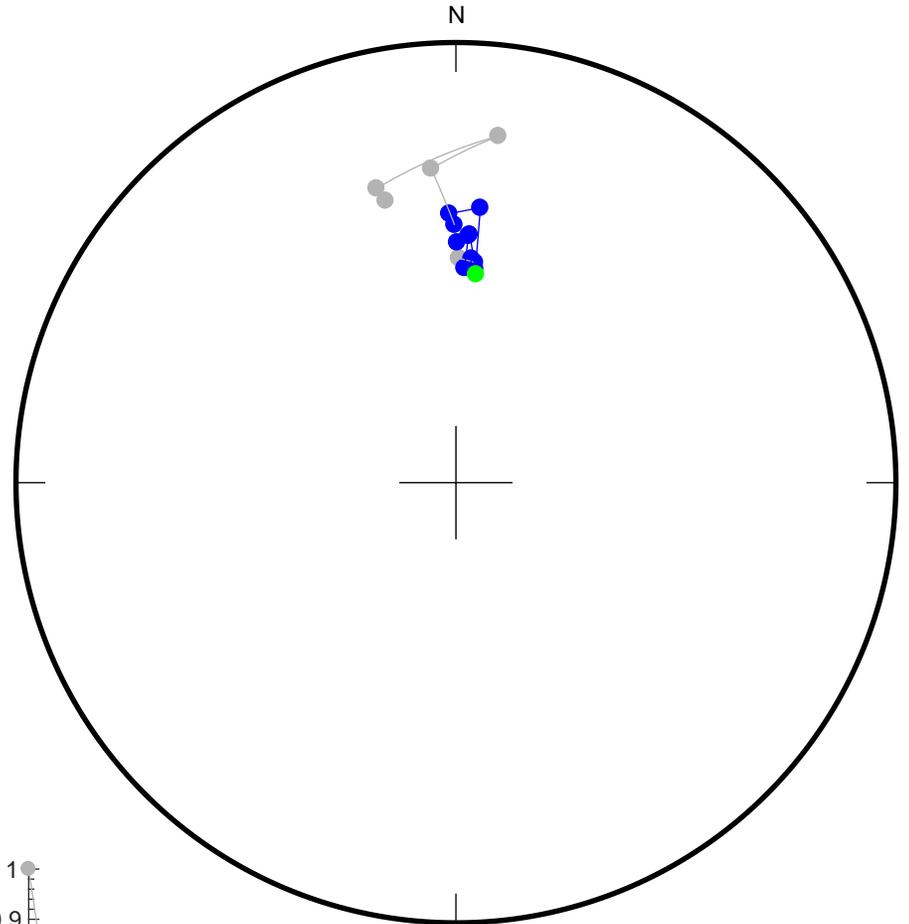
52

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

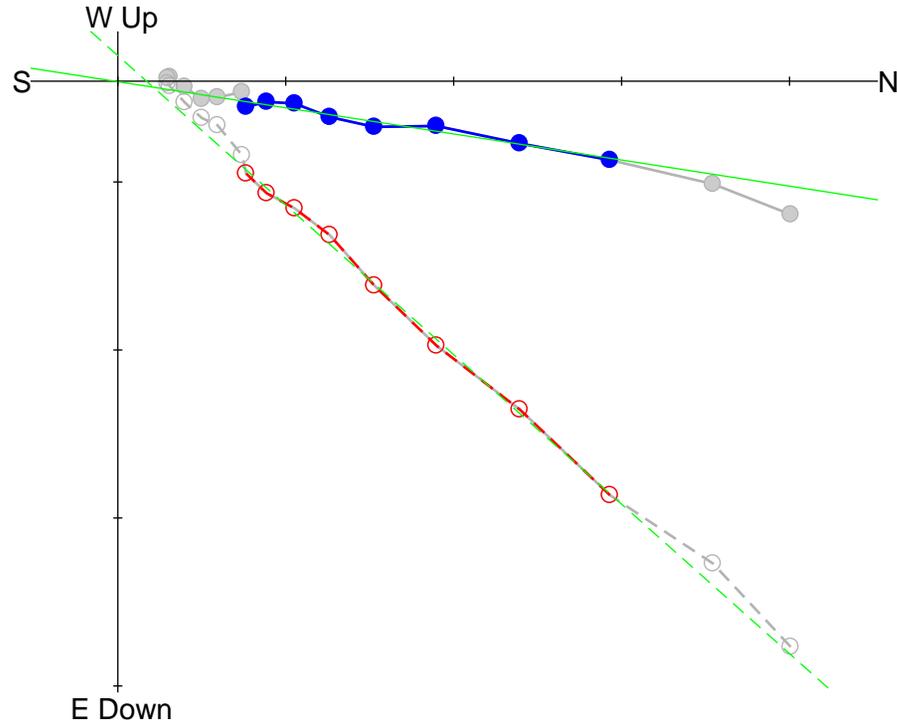


Fit from 5
to 60
Dec = 5.5
Inc = 47.2
MAD = 4.0

Div. = 5.0e-02

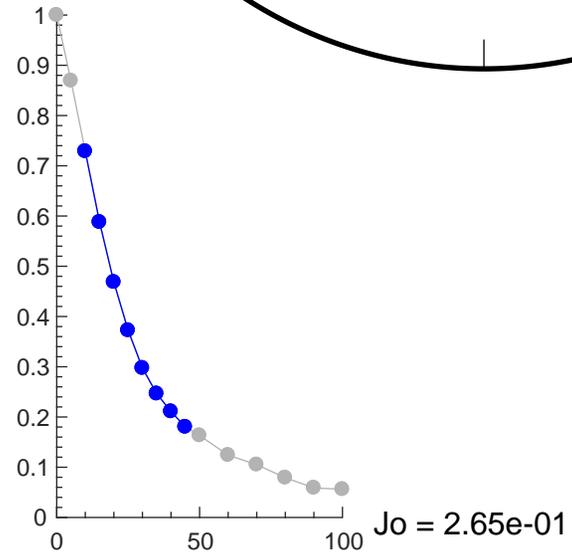
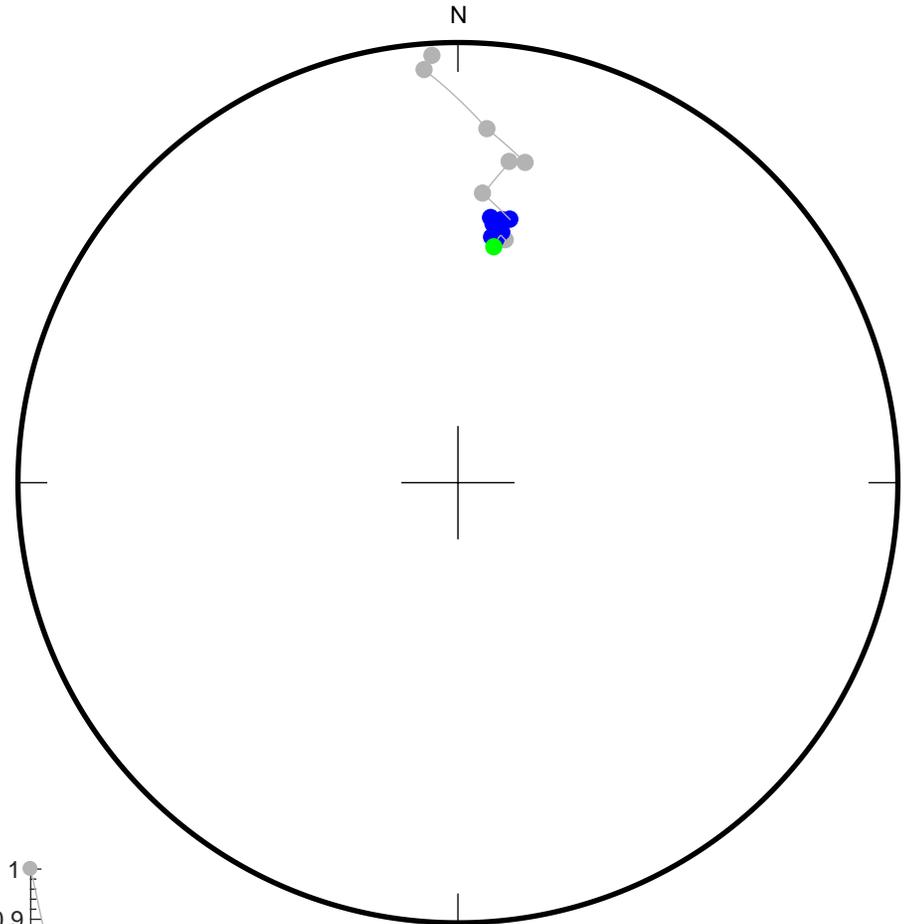


0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 10
to 45
Dec = 8.8
Inc = 41.3
MAD = 2.0

Div. = 5.0e-02



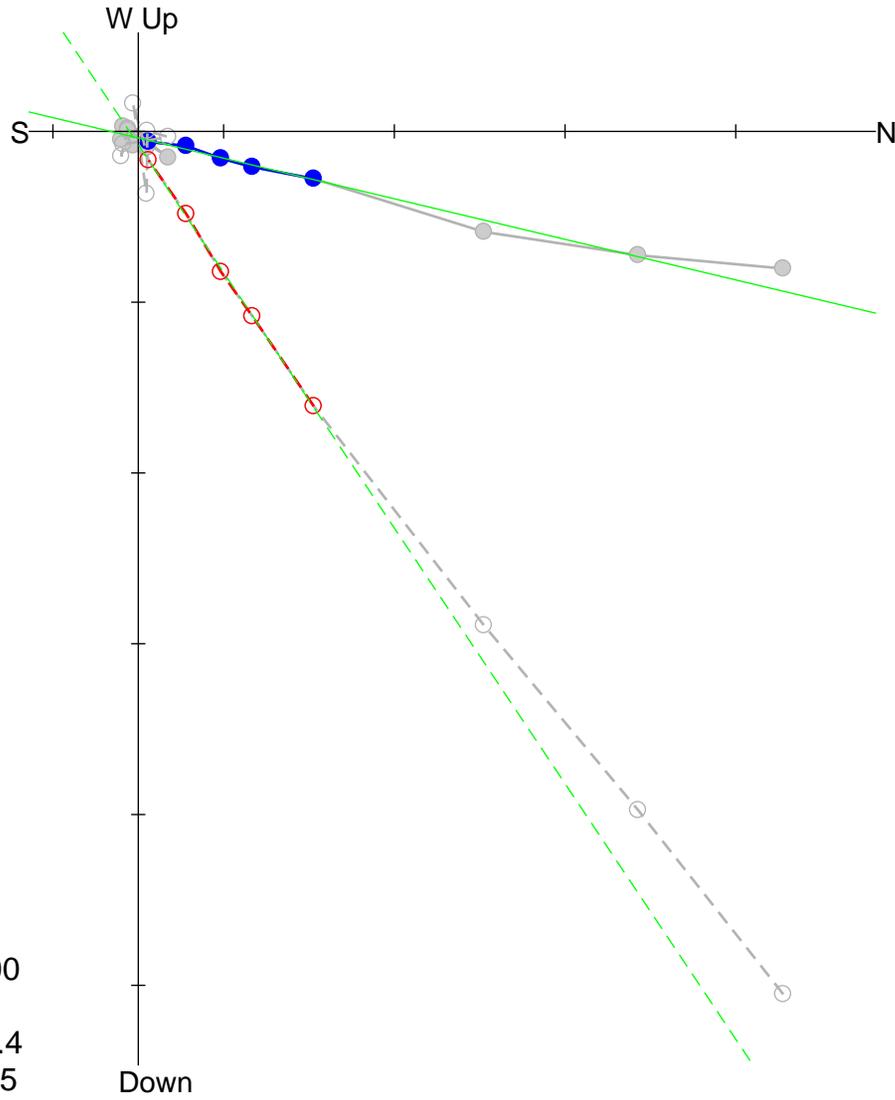
始良カルテラ噴出物

垂水火砕流: TM1

TM1AA

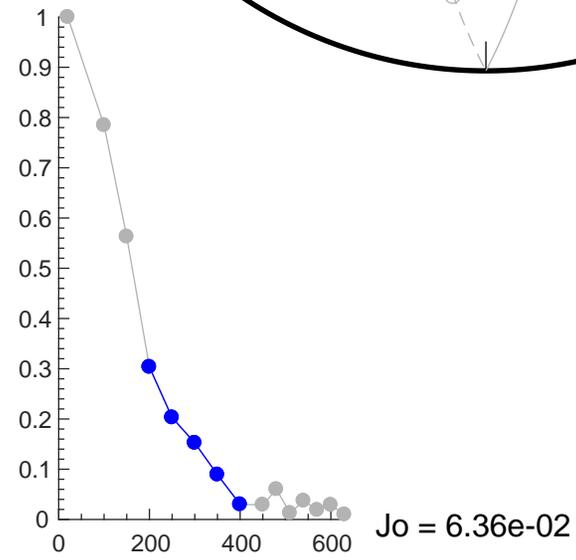
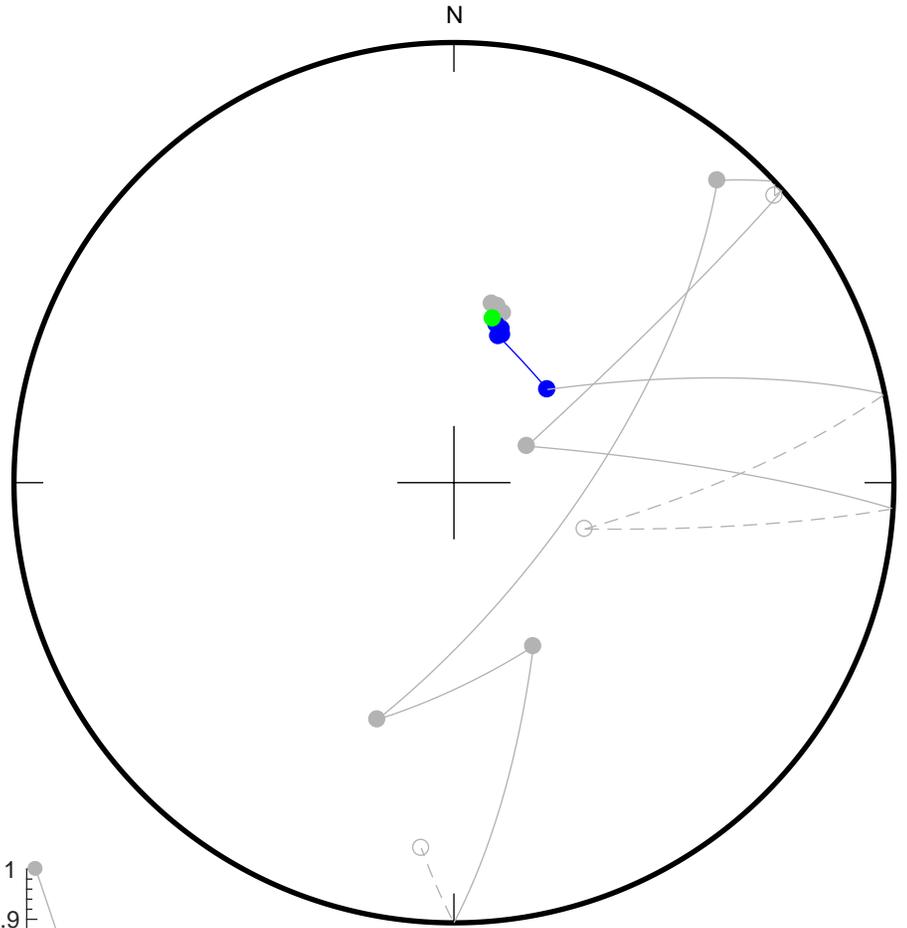
55

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

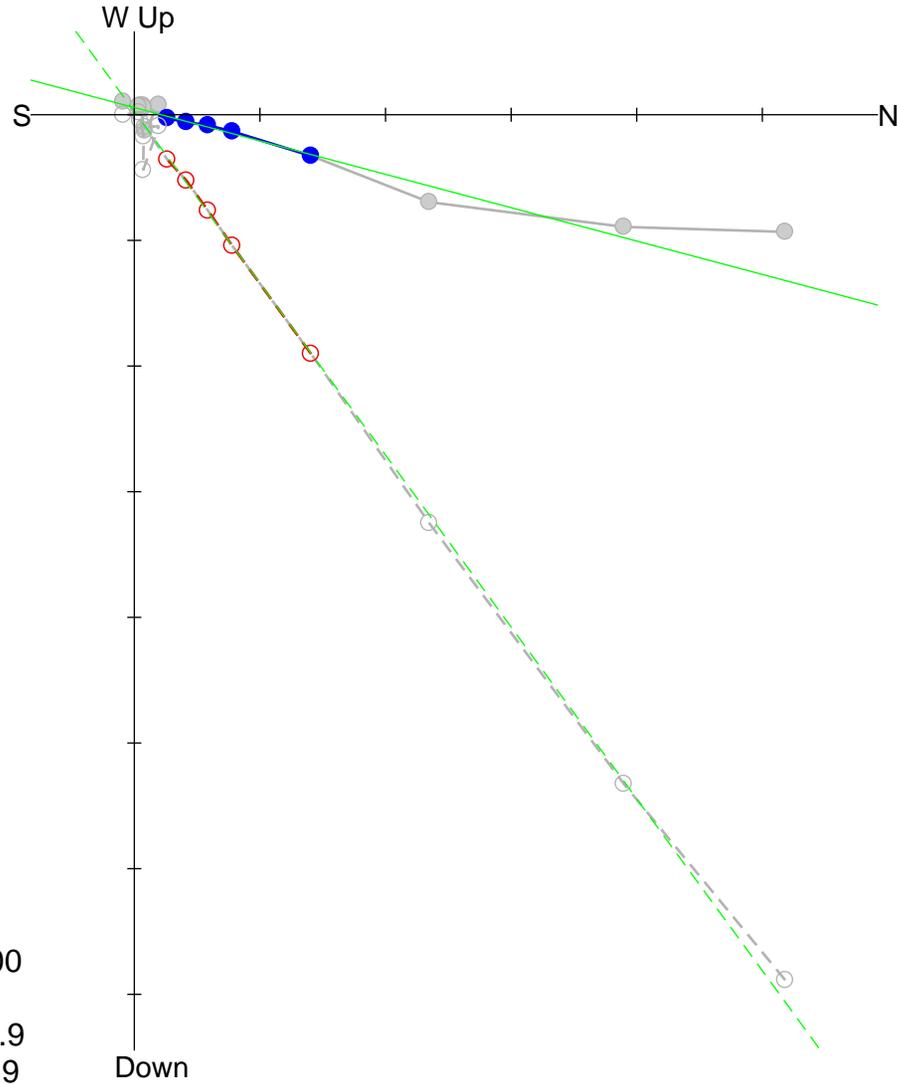


Fit from 200
to 400
Dec = 13.4
Inc = 55.5
MAD = 1.2

Div. = 1.0e-02

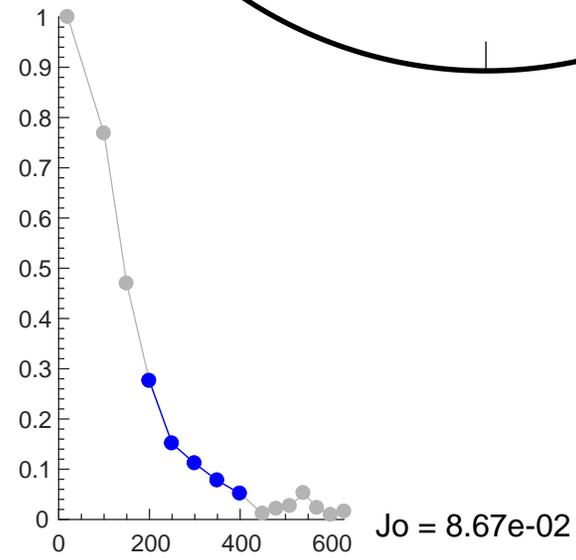
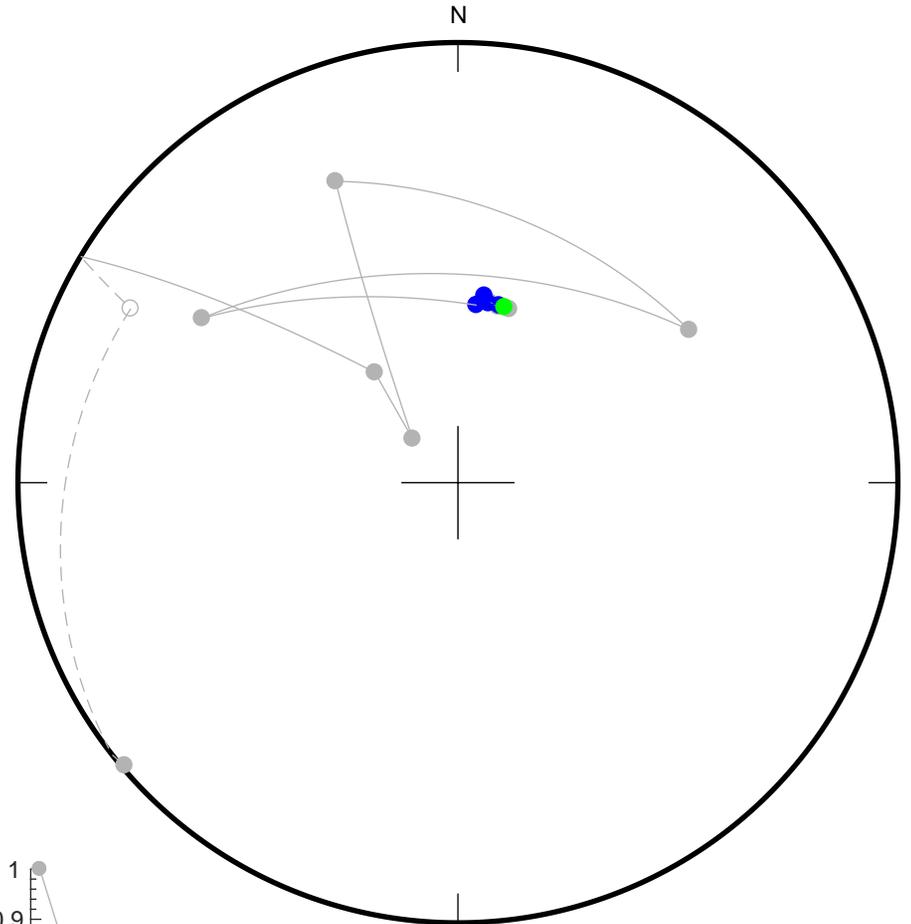


20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

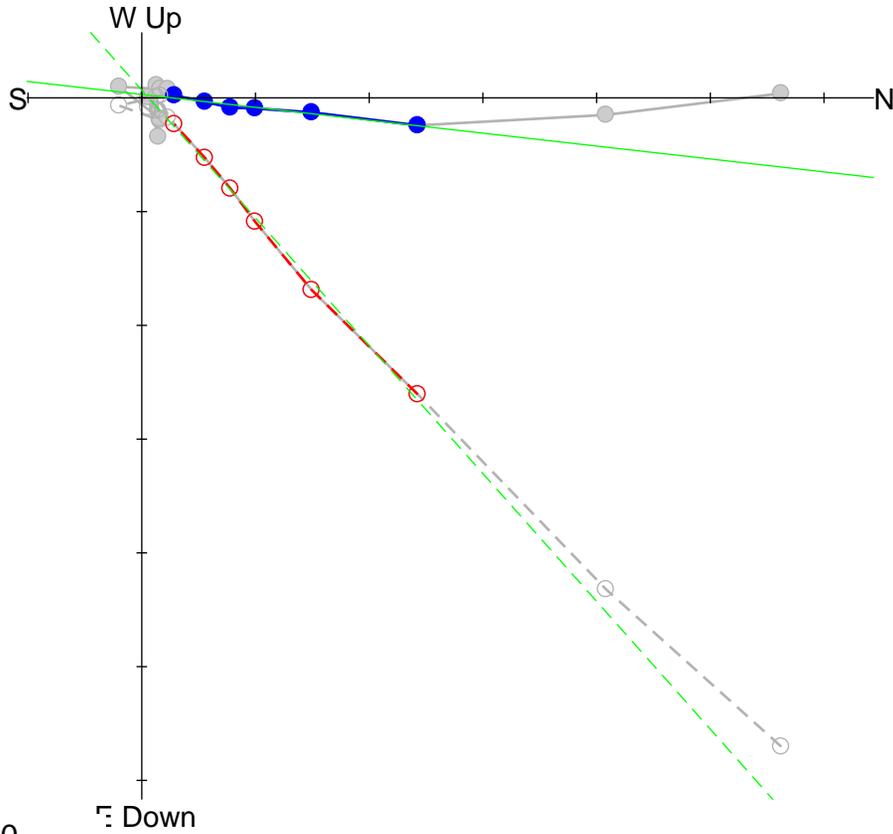


Fit from 200
to 400
Dec = 14.9
Inc = 52.9
MAD = 1.2

Div. = 1.0e-02

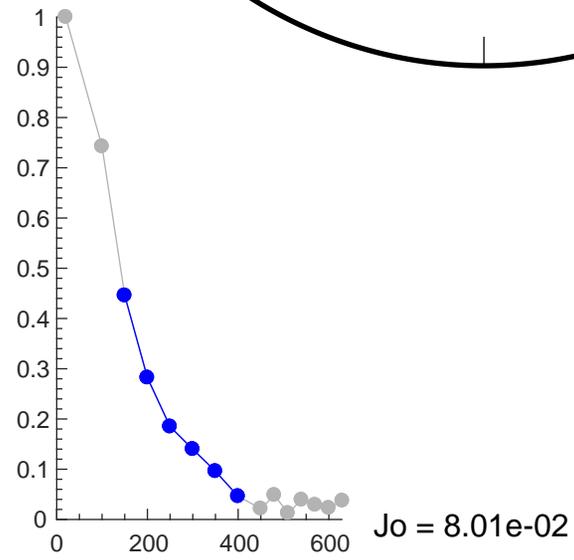
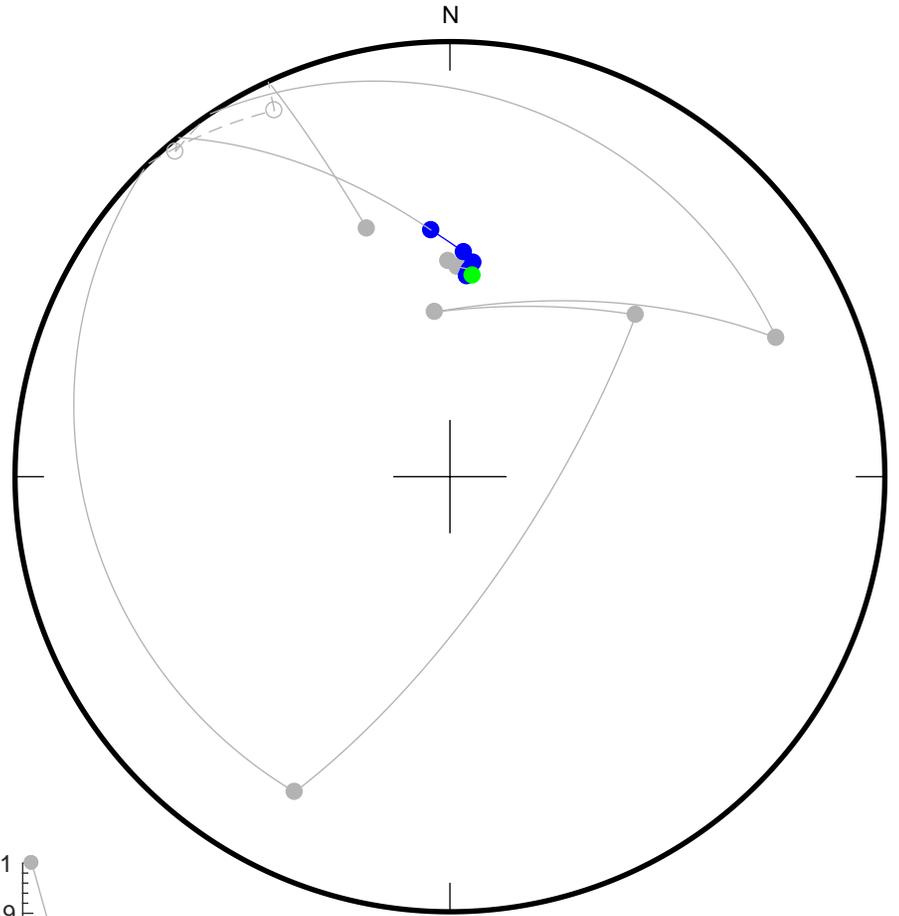


20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

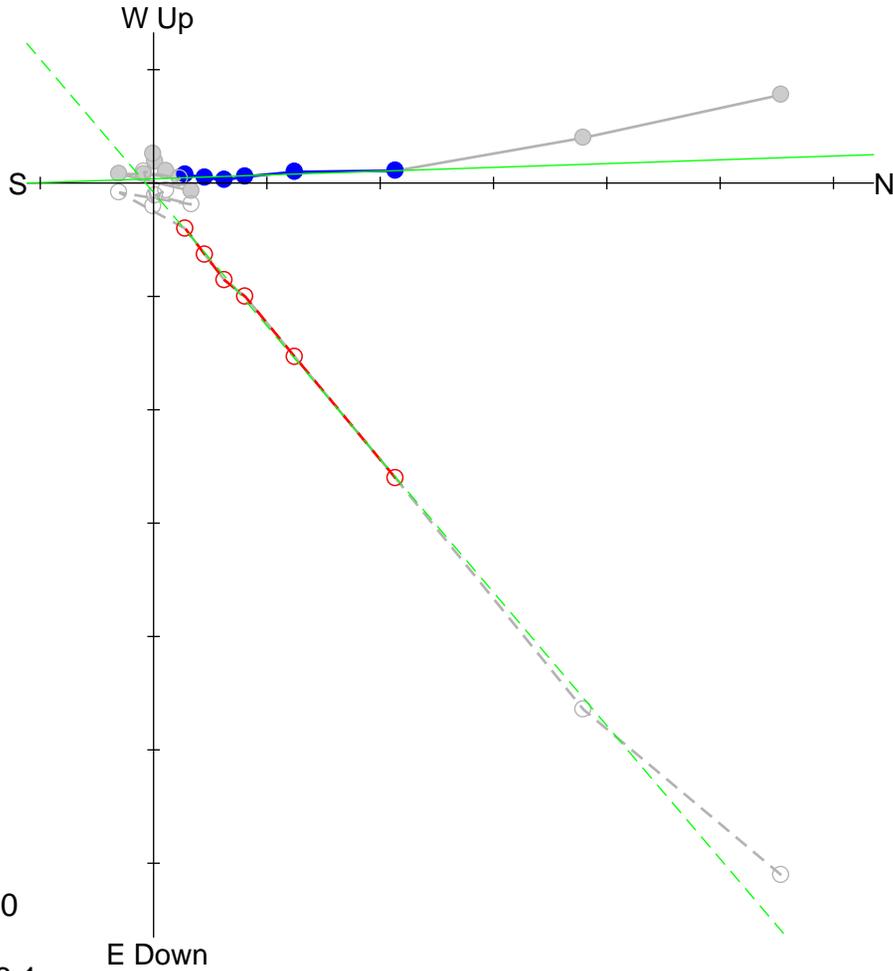


Fit from 150
to 400
Dec = 6.5
Inc = 48.1
MAD = 1.8

Div. = 1.0e-02

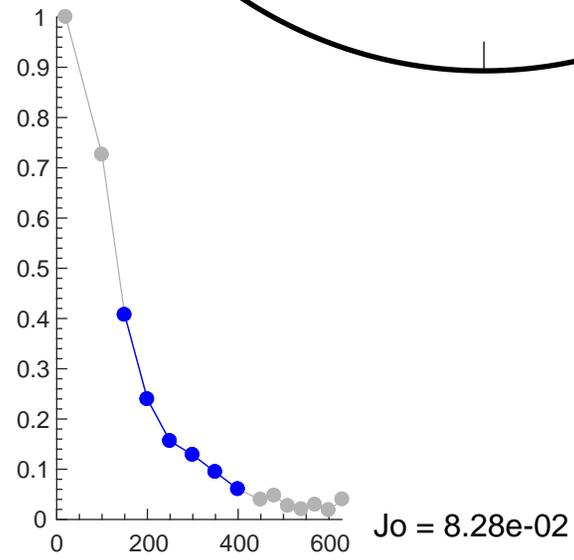
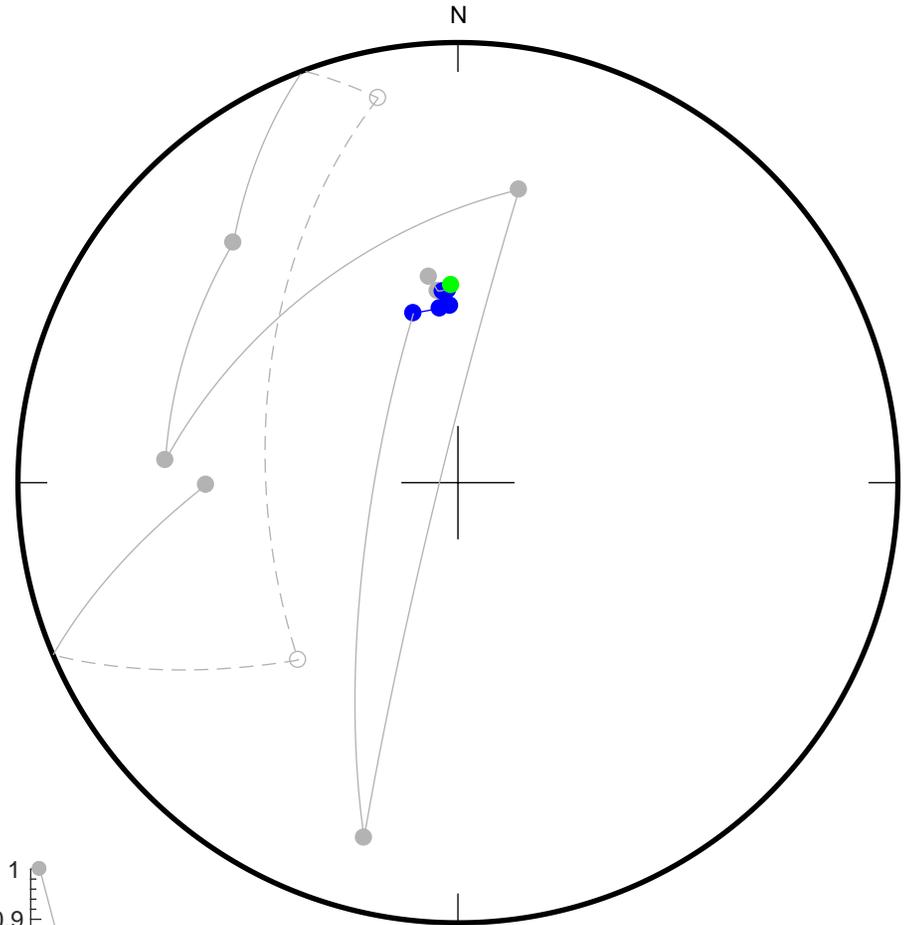


20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

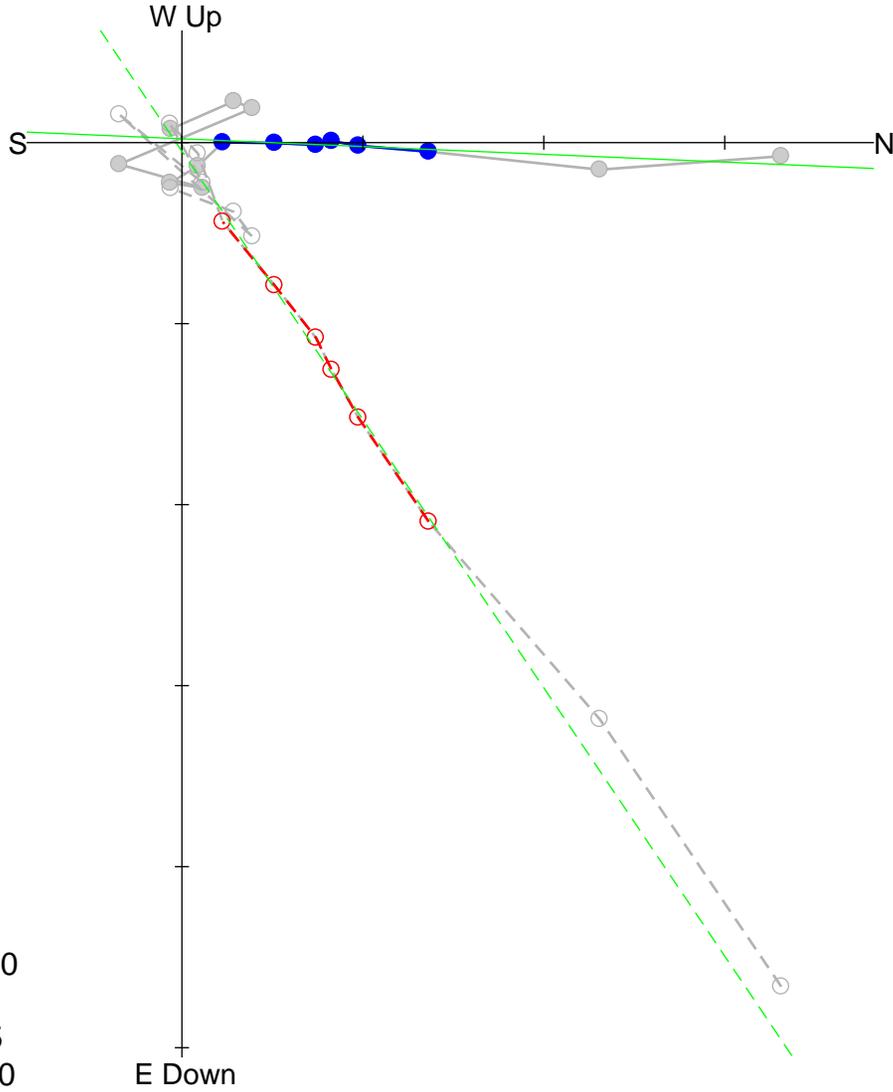


Fit from 150
to 400
Dec = 358.1
Inc = 49.6
MAD = 1.4

Div. = 1.0e-02

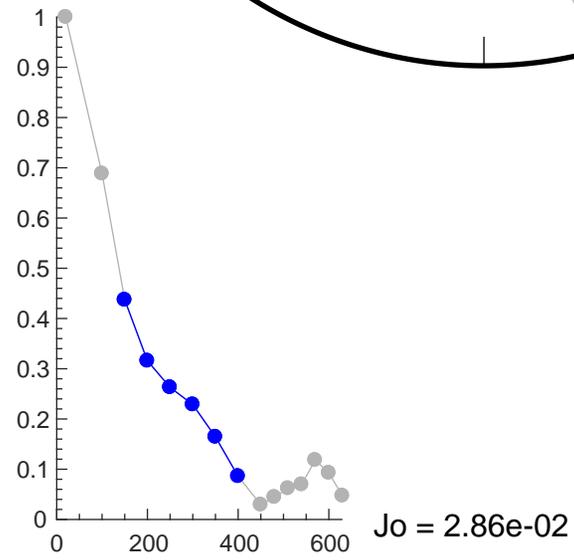
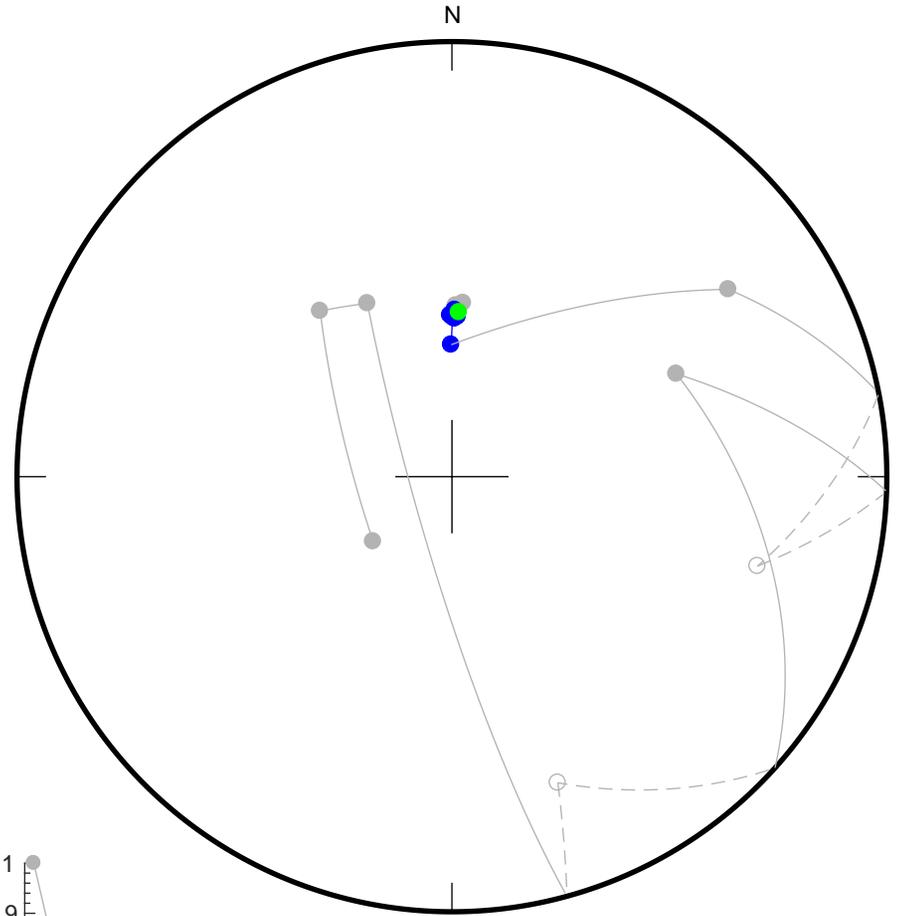


20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
600
630



Fit from 150
to 400
Dec = 2.5
Inc = 56.0
MAD = 2.3

Div. = 5.0e-03

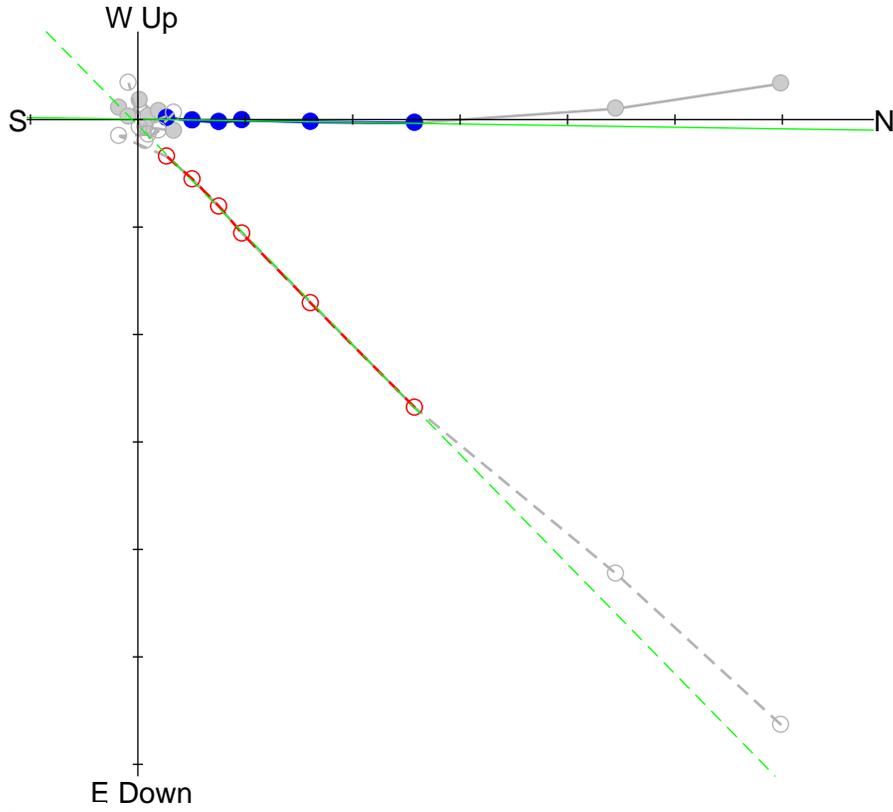


Jo = 2.86e-02

TM1FA

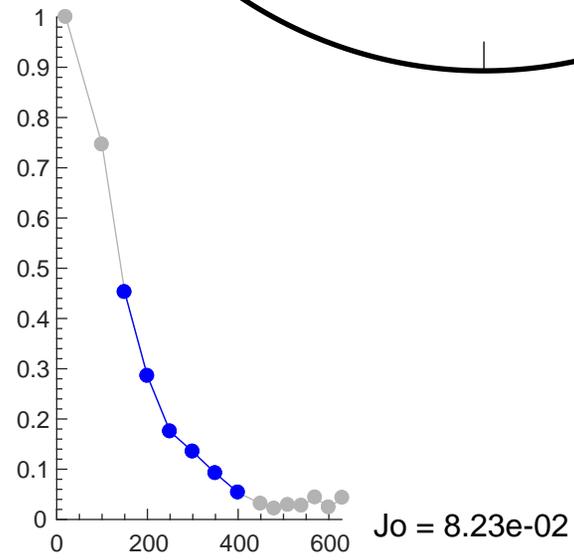
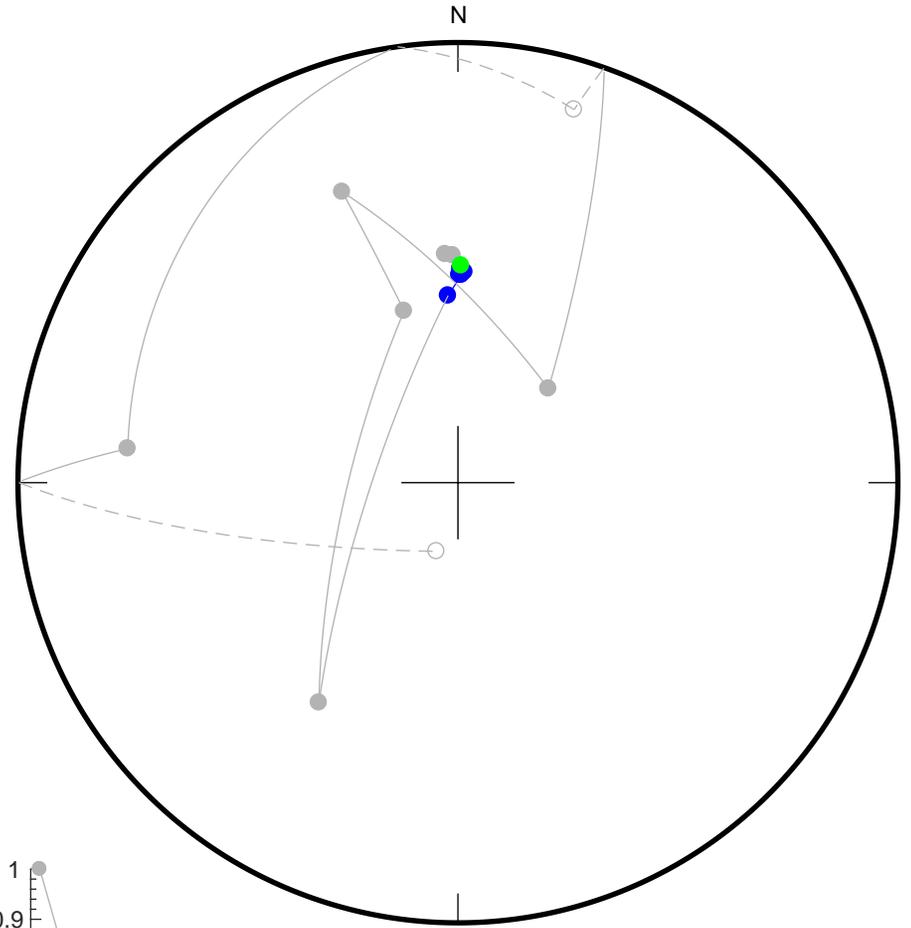
60

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



Fit from 150
to 400
Dec = 0.9
Inc = 45.6
MAD = 0.7

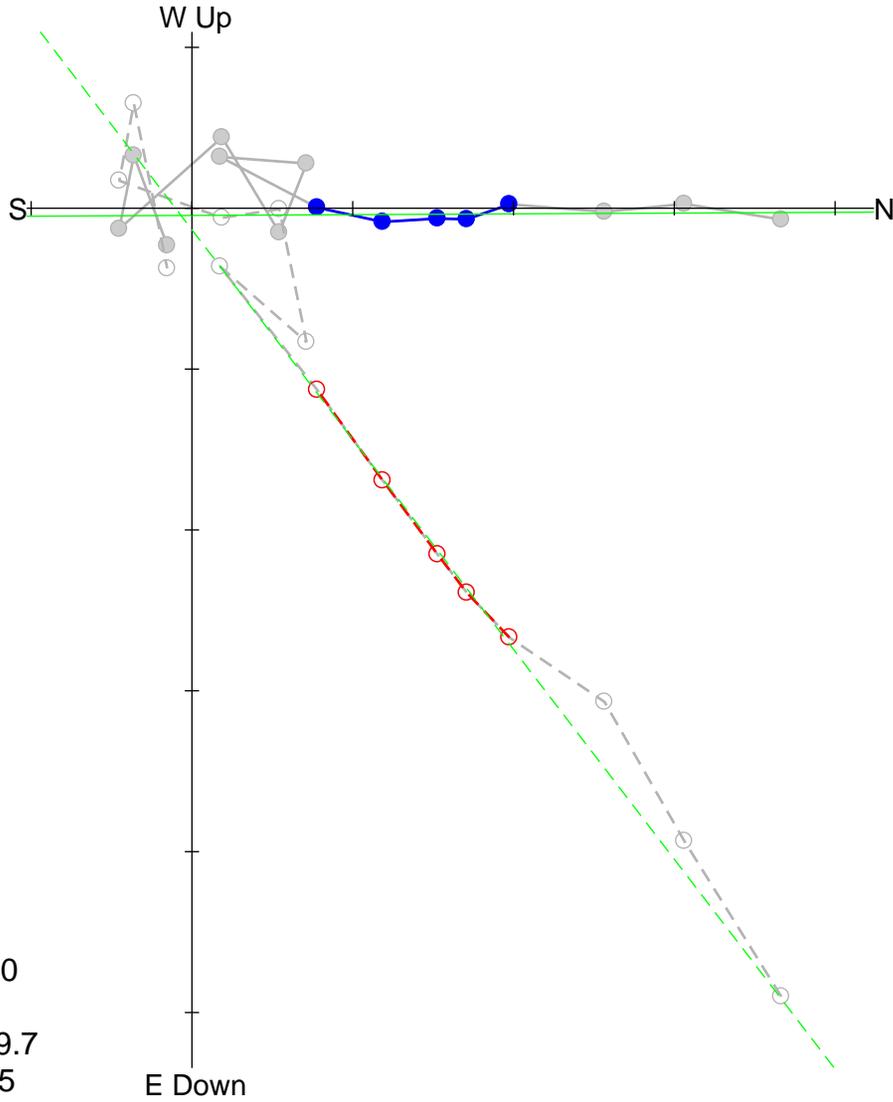
Div. = 1.0e-02



TM1GA

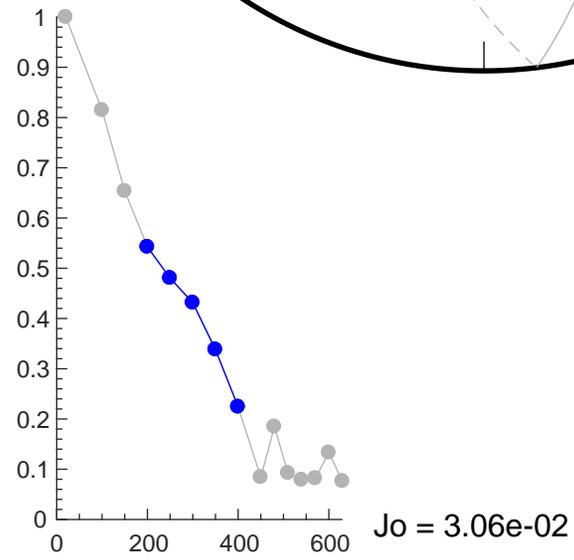
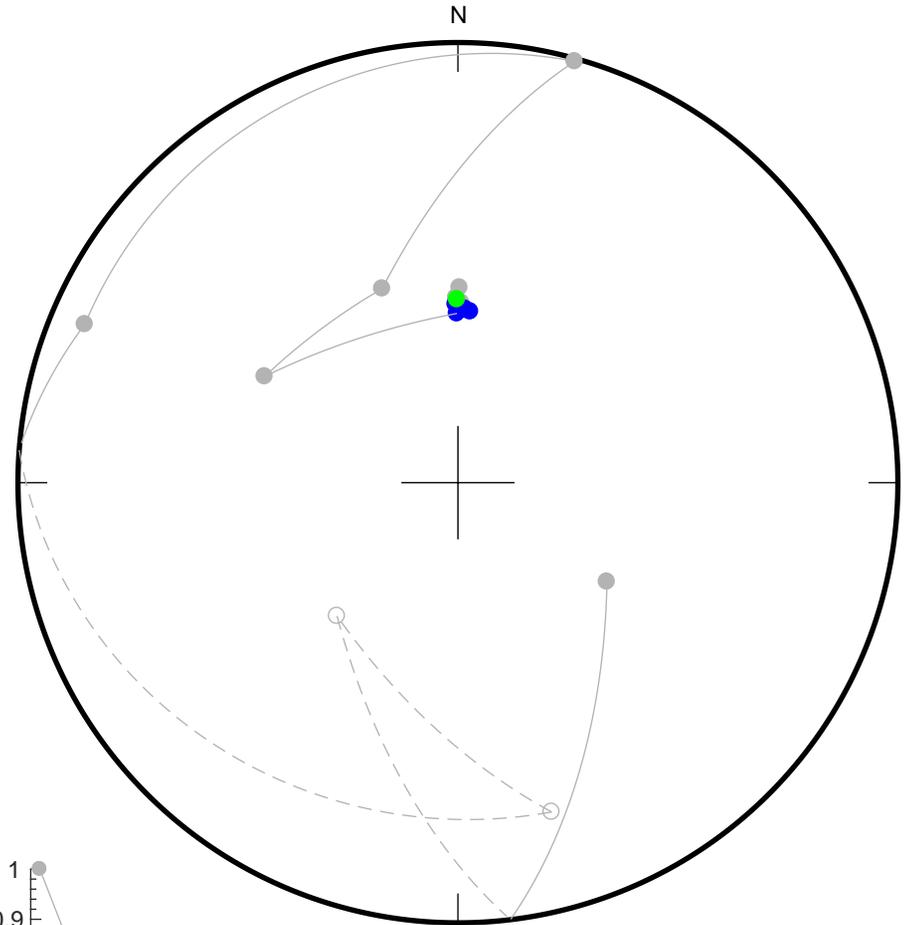
61

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



Fit from 200
to 400
Dec = 359.7
Inc = 52.5
MAD = 3.9

Div. = 5.0e-03



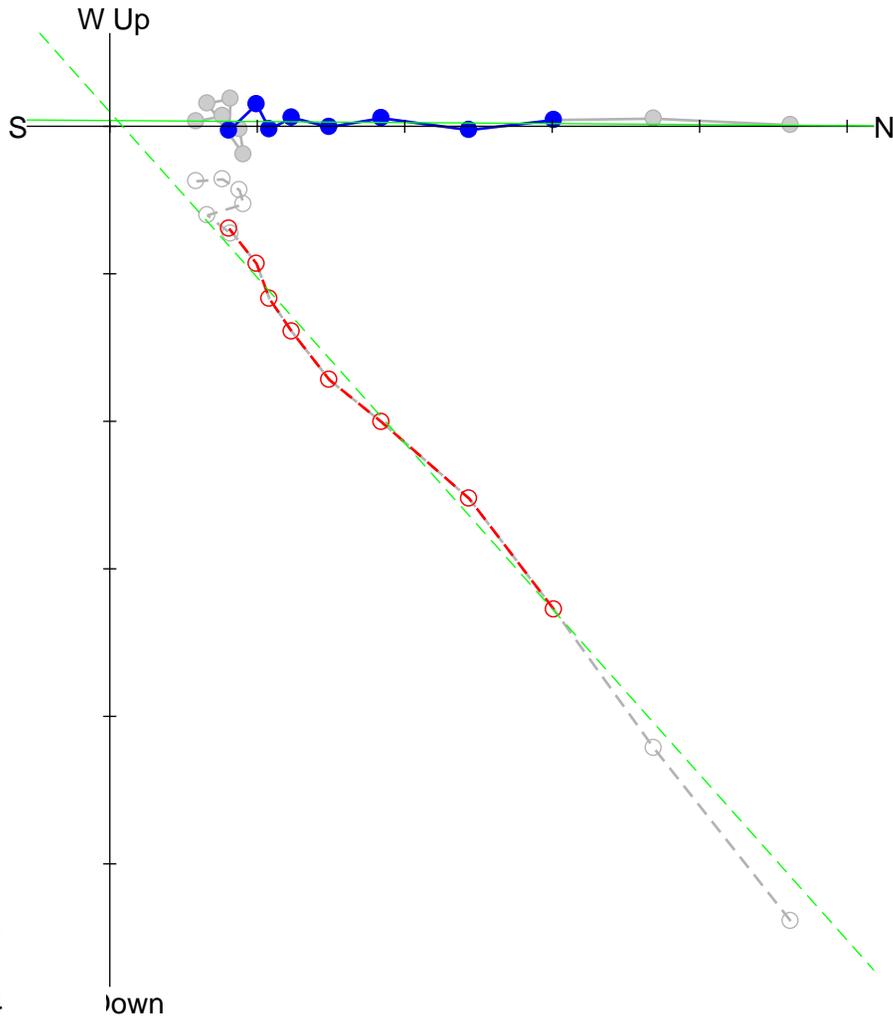
始良カルデラ噴出物

妻屋火砕流：TU1

TU1-10

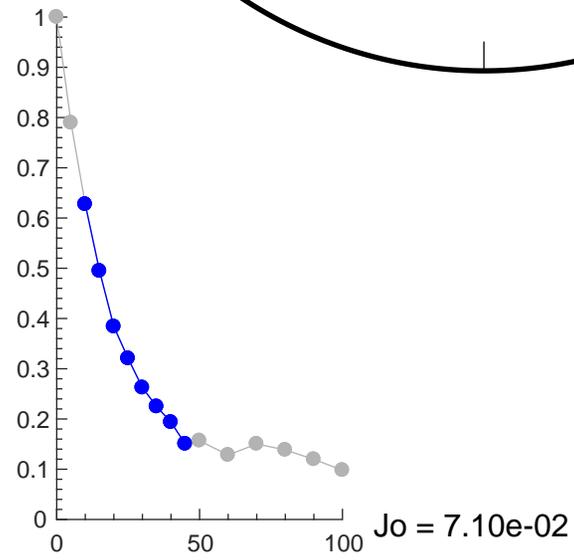
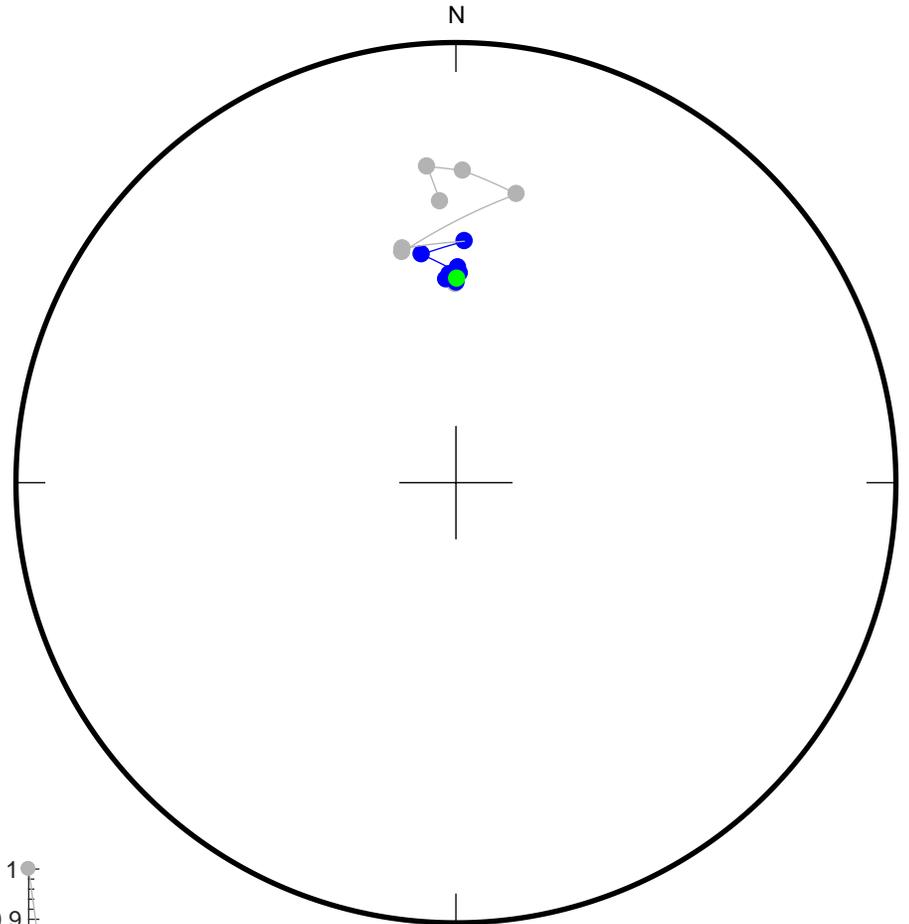
63

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 10
to 45
Dec = 0.4
Inc = 48.3
MAD = 4.5

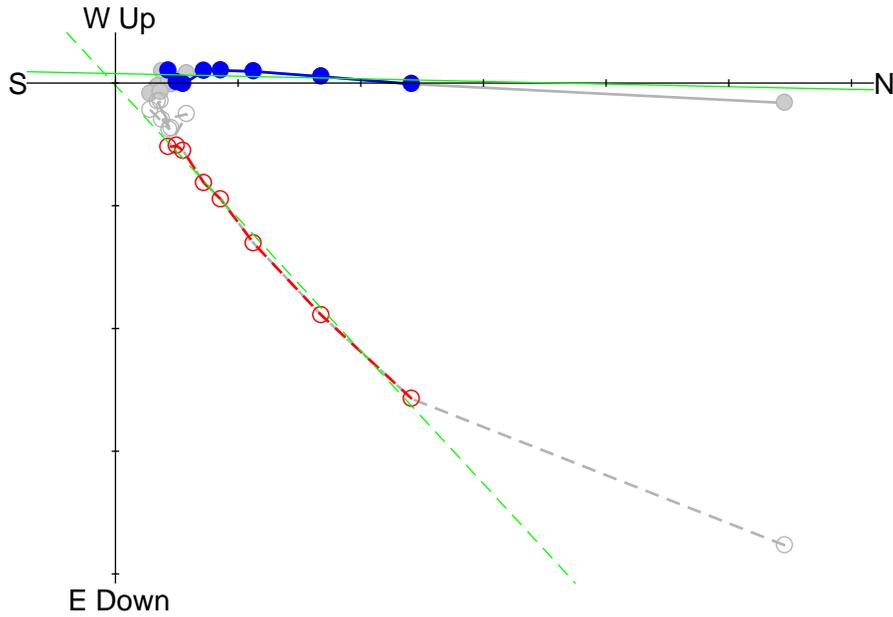
Div. = 1.0e-02



TU1-11

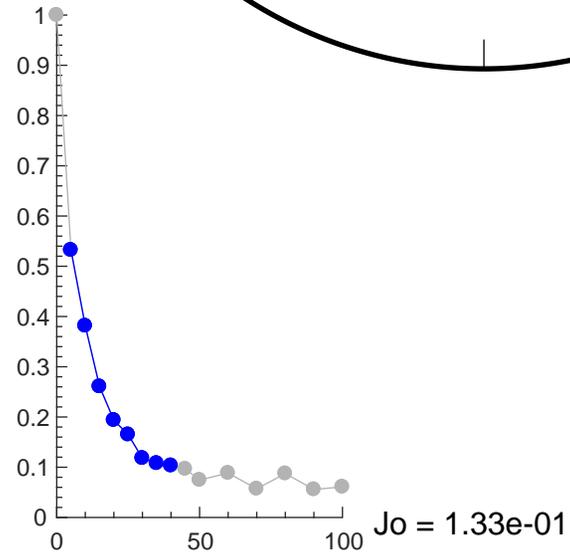
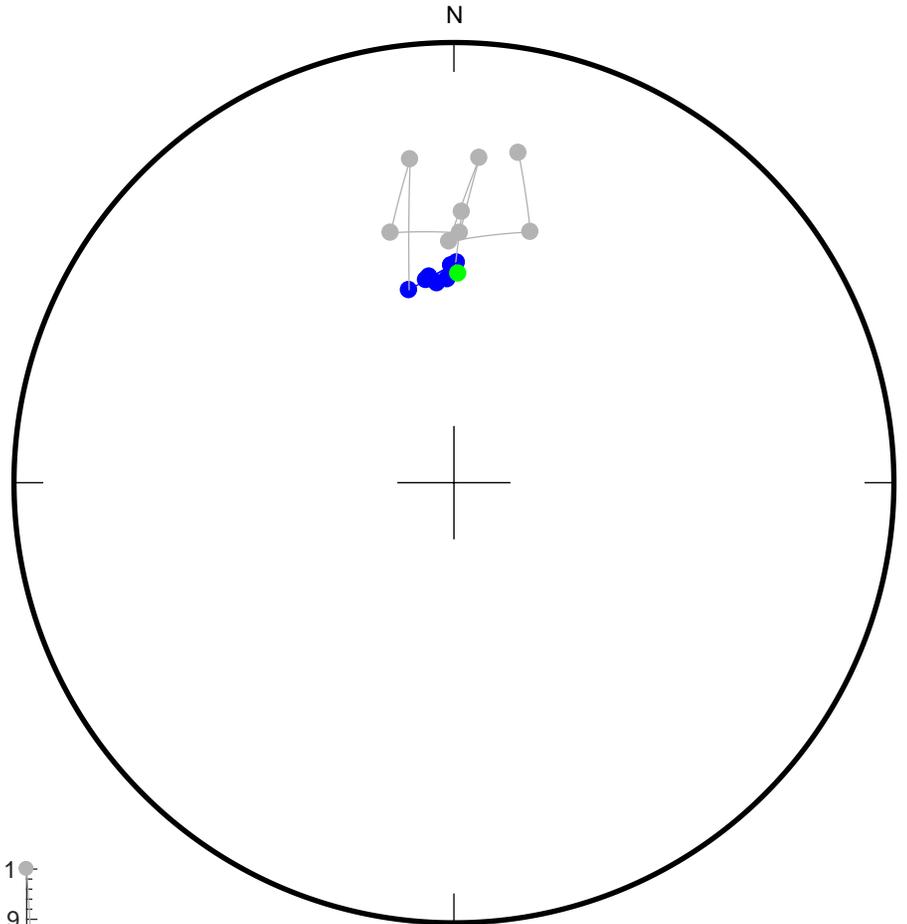
64

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 5
to 40
Dec = 1.2
Inc = 47.3
MAD = 3.4

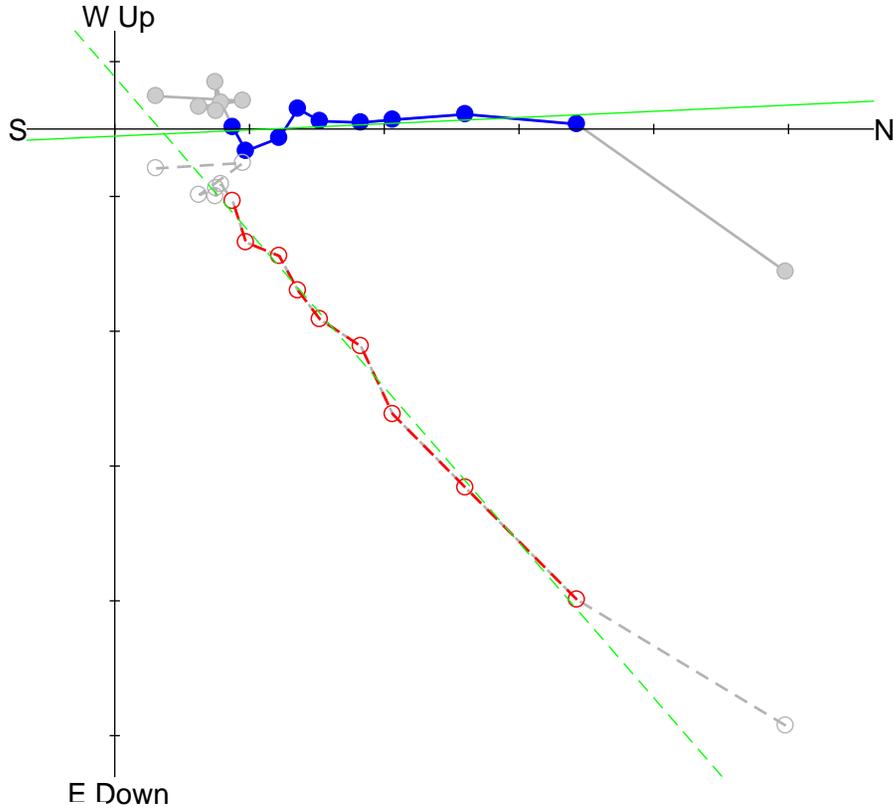
Div. = 2.0e-02



TU1-12

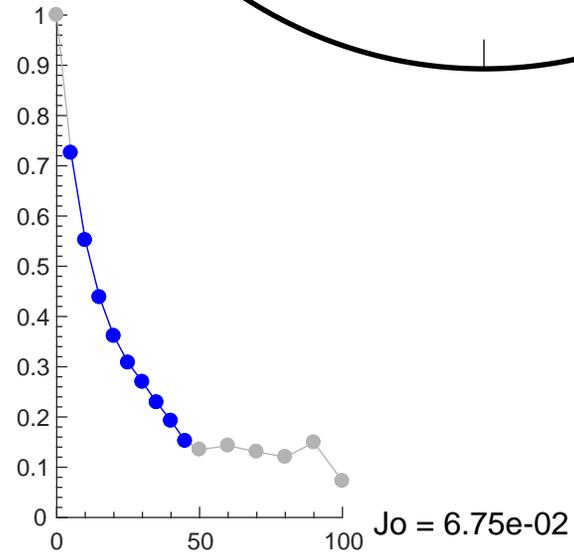
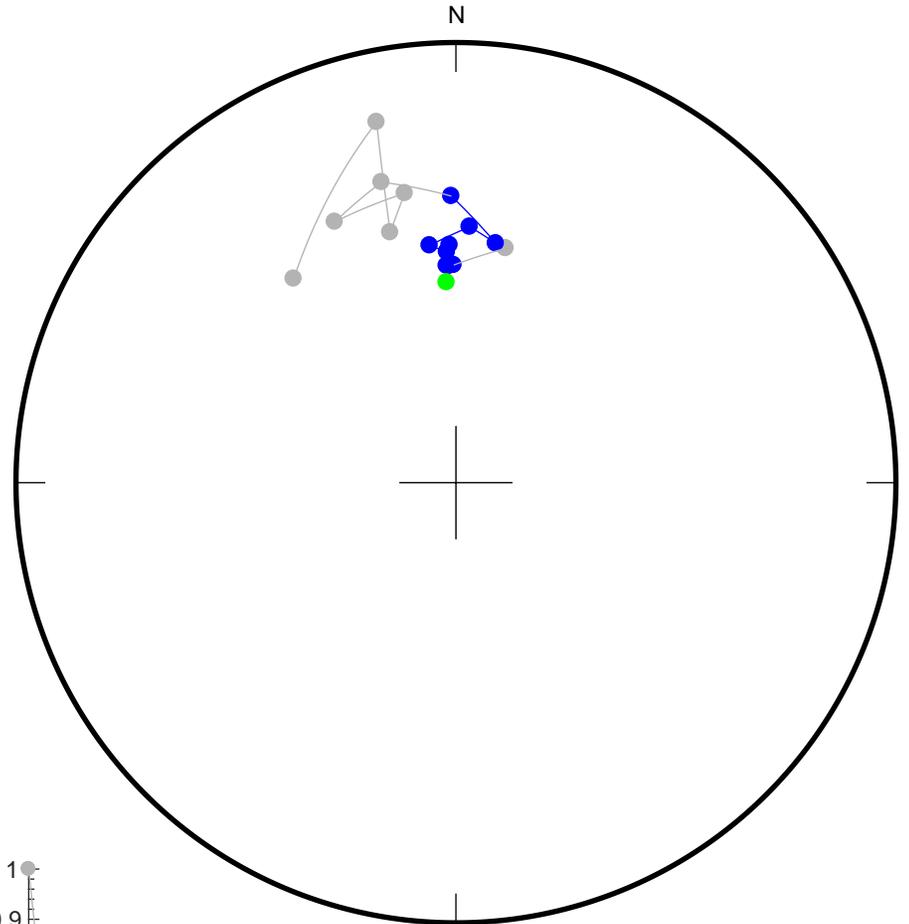
65

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 5
to 45
Dec = 357.4
Inc = 49.0
MAD = 4.7

Div. = 1.0e-02



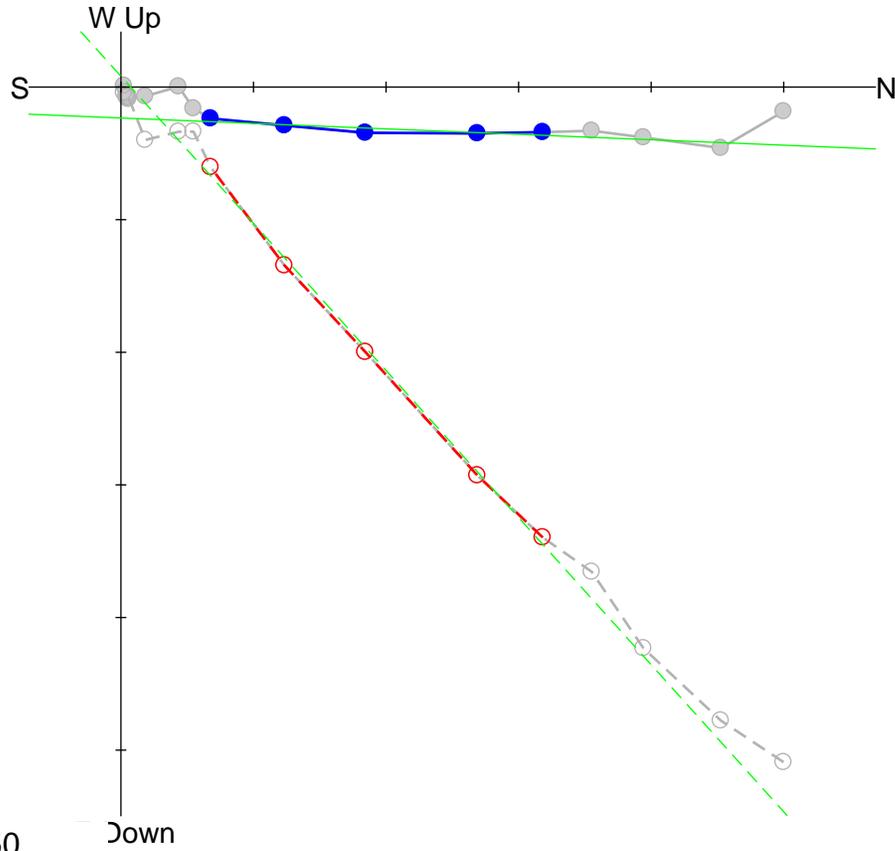
始良カルデラ噴出物

入戸火砕流:IT1

IT1-1

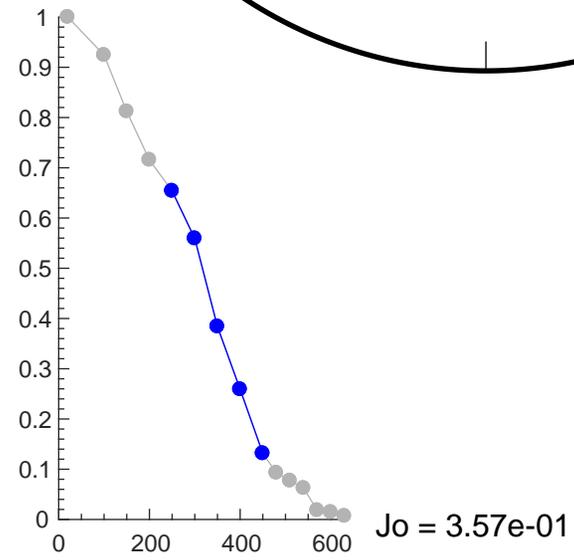
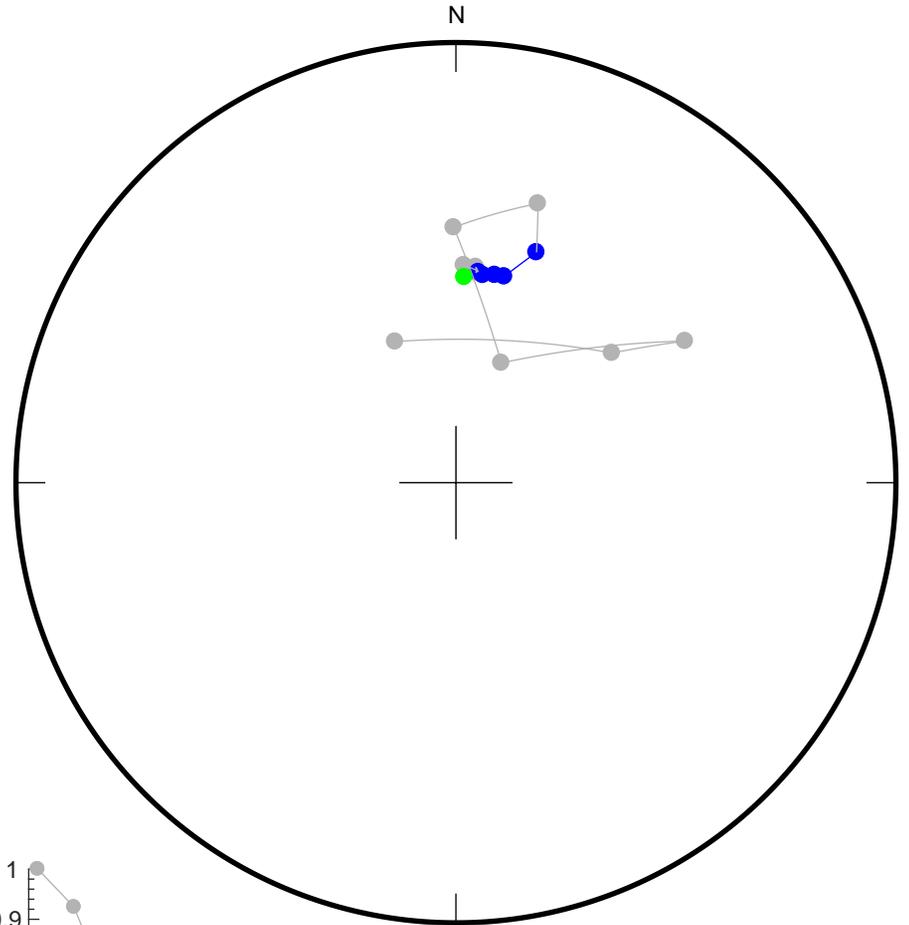
67

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



Fit from 250
to 450
Dec = 2.3
Inc = 47.9
MAD = 1.7

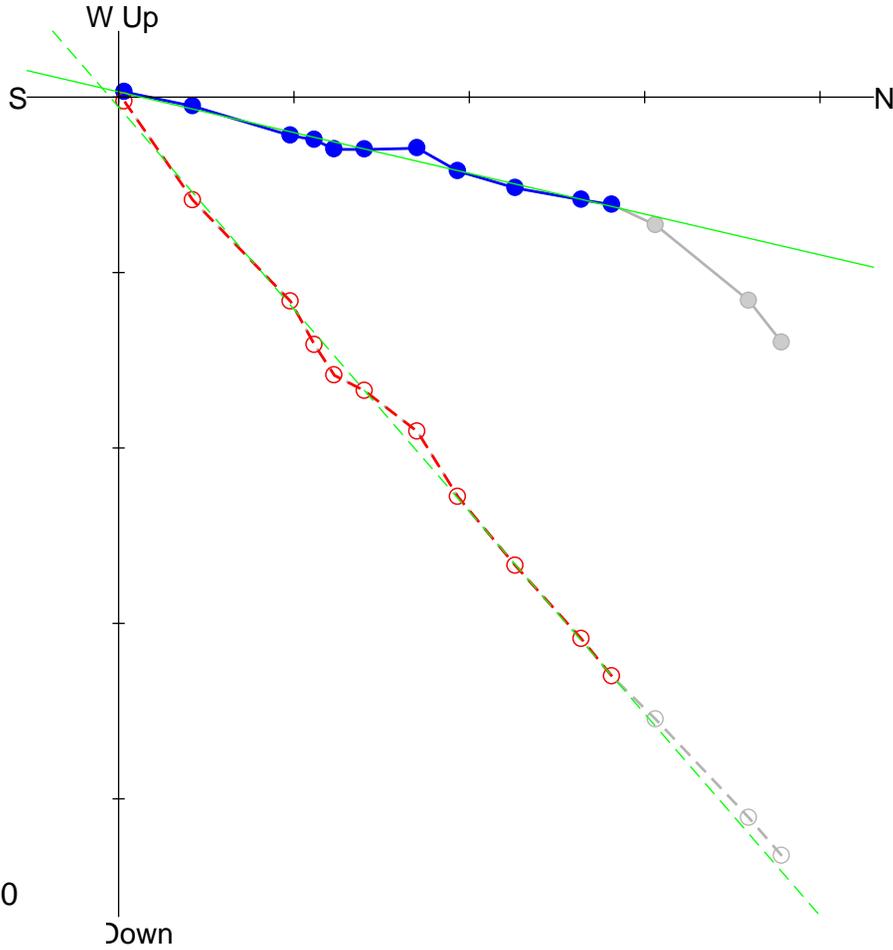
Div. = 5.0e-02



IT1-2

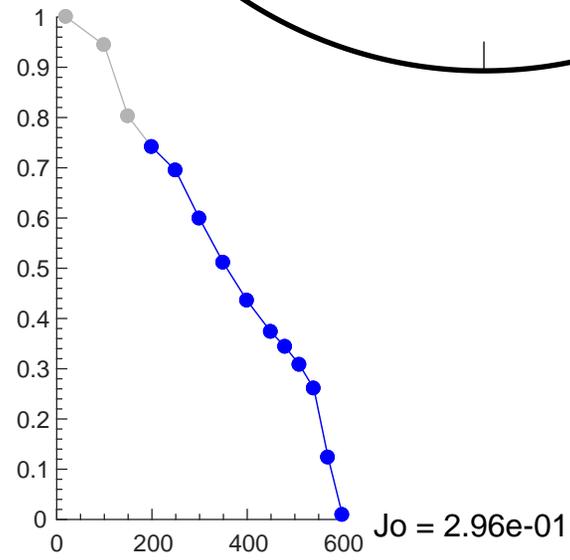
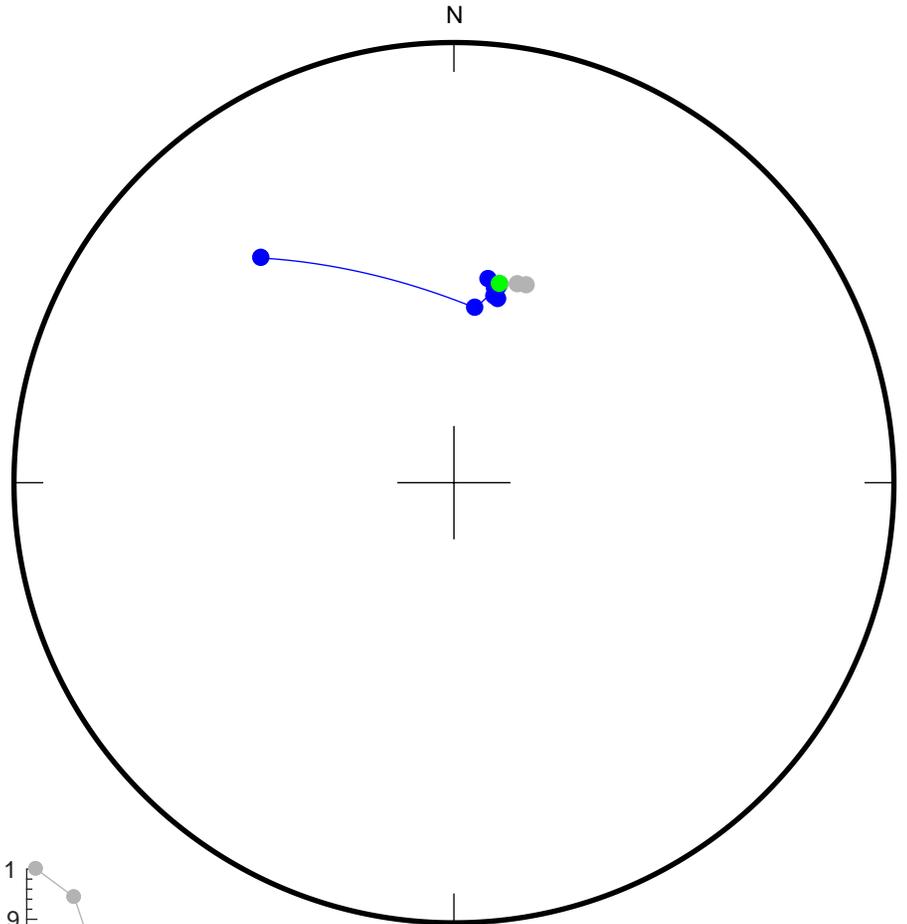
68

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 200
to 600
Dec = 13.1
Inc = 48.3
MAD = 2.0

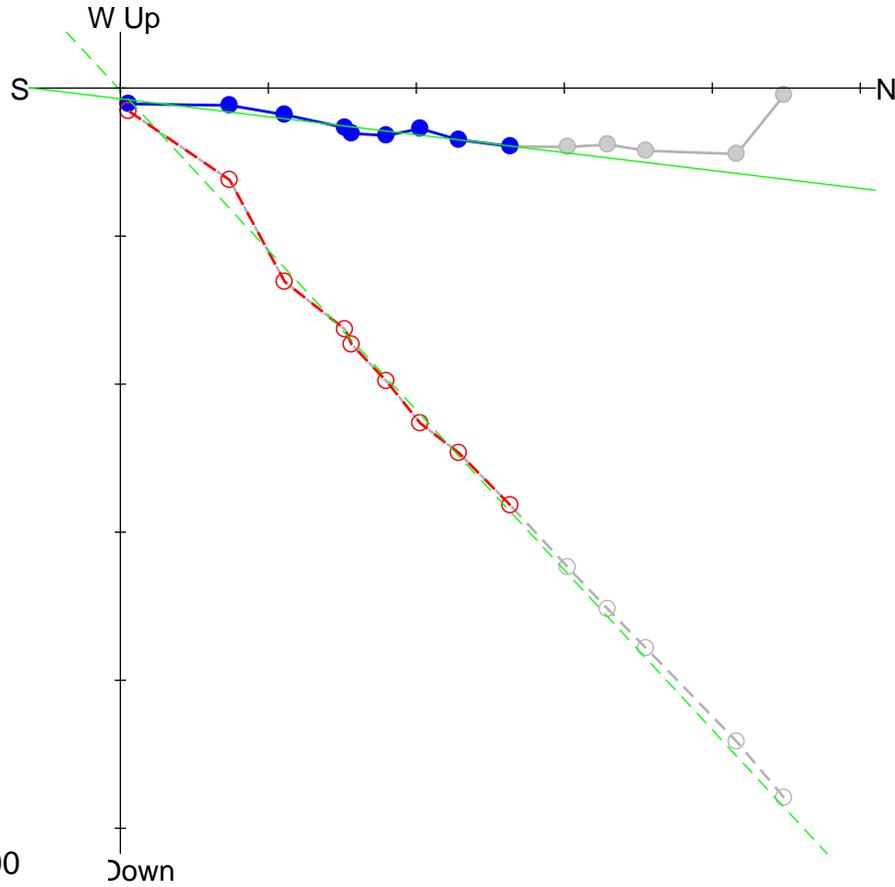
Div. = 5.0e-02



IT1-3

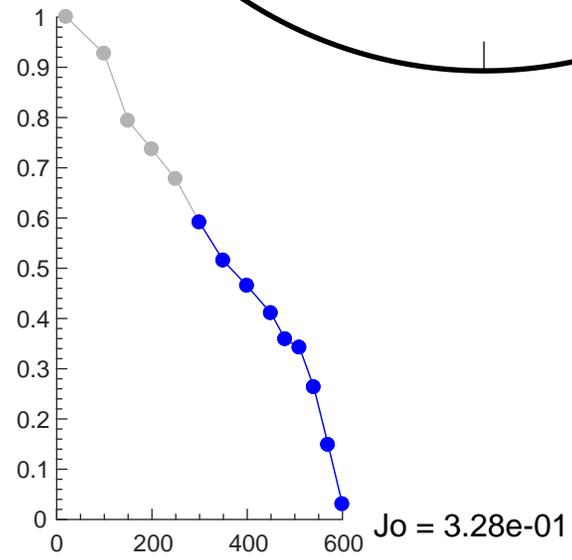
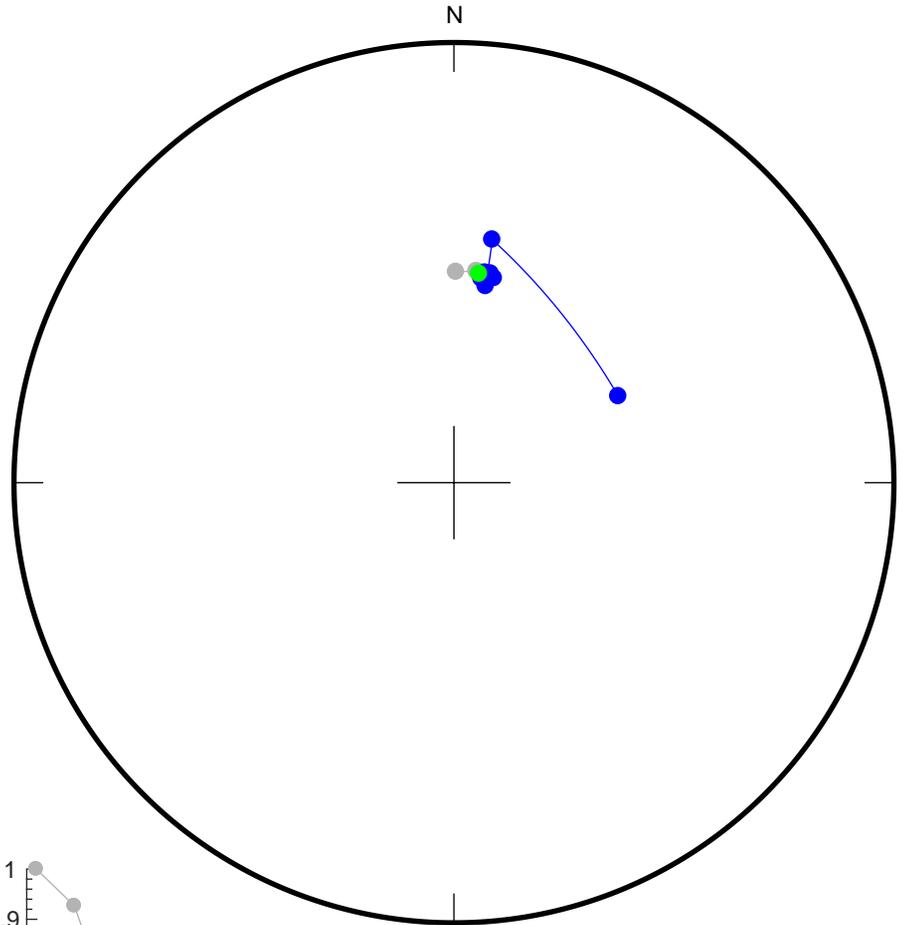
69

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 300
to 600
Dec = 6.9
Inc = 47.0
MAD = 3.2

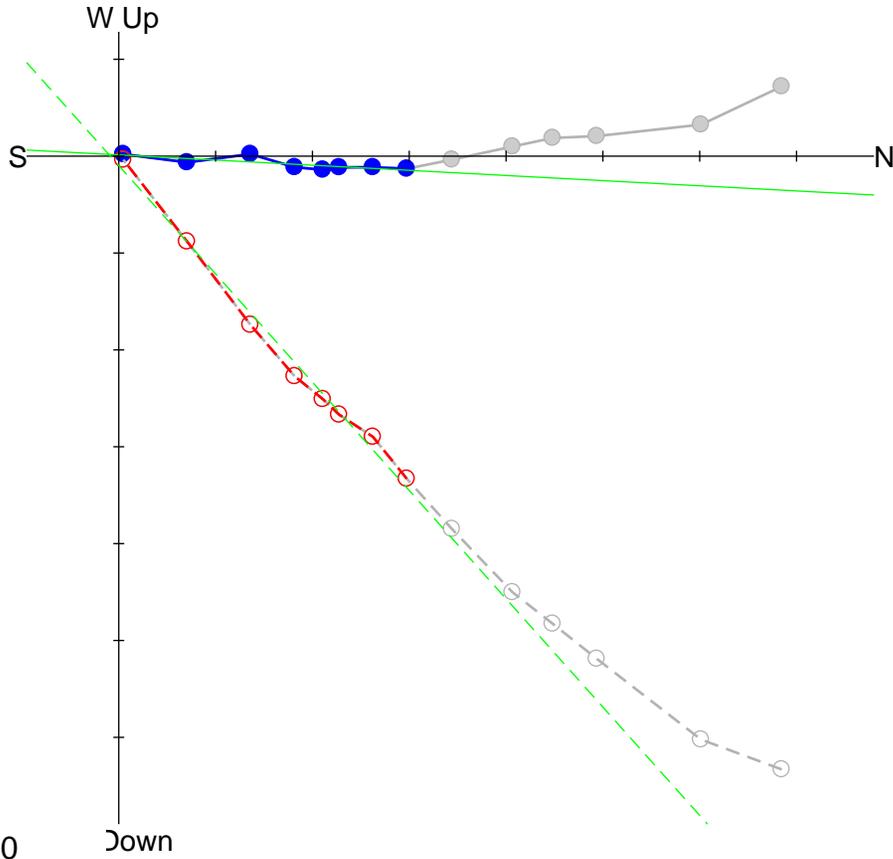
Div. = 5.0e-02



IT1-4

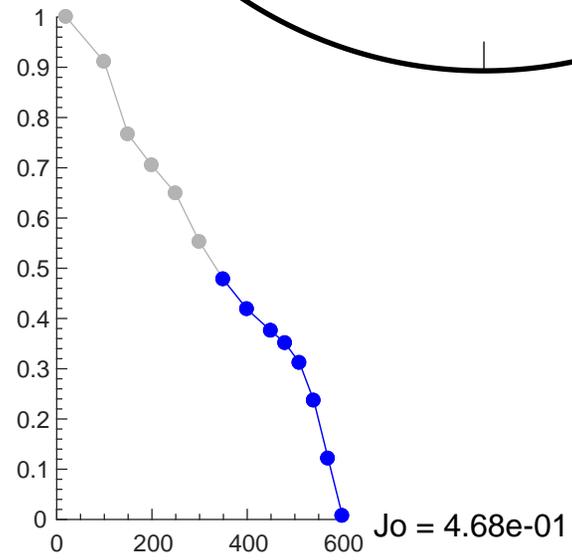
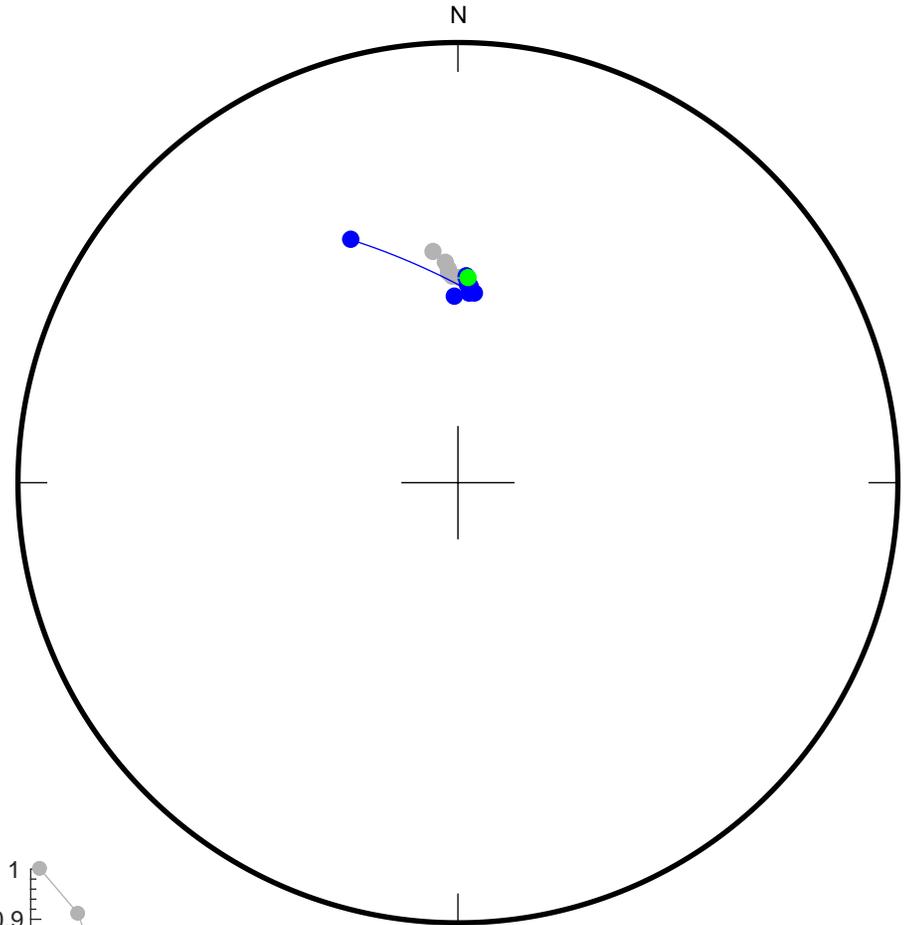
70

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 350
to 600
Dec = 3.0
Inc = 48.2
MAD = 3.1

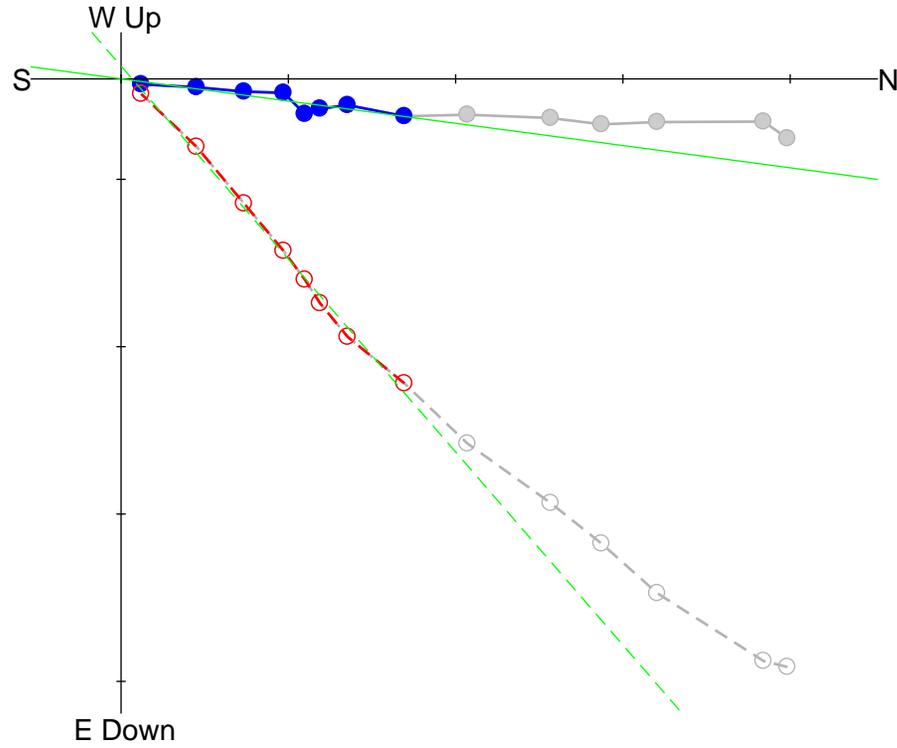
Div. = 5.0e-02



IT1-5

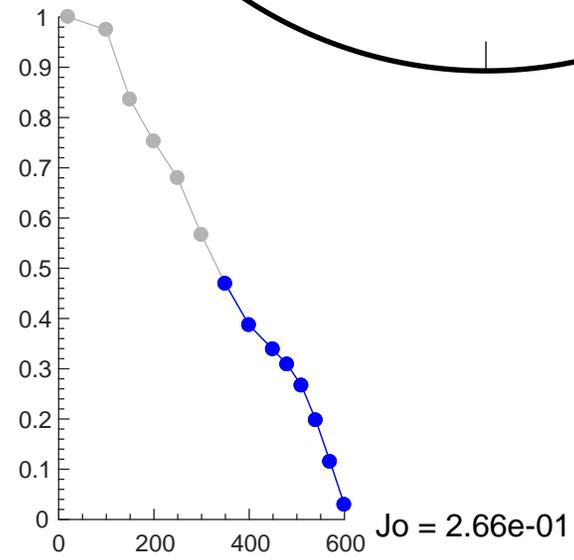
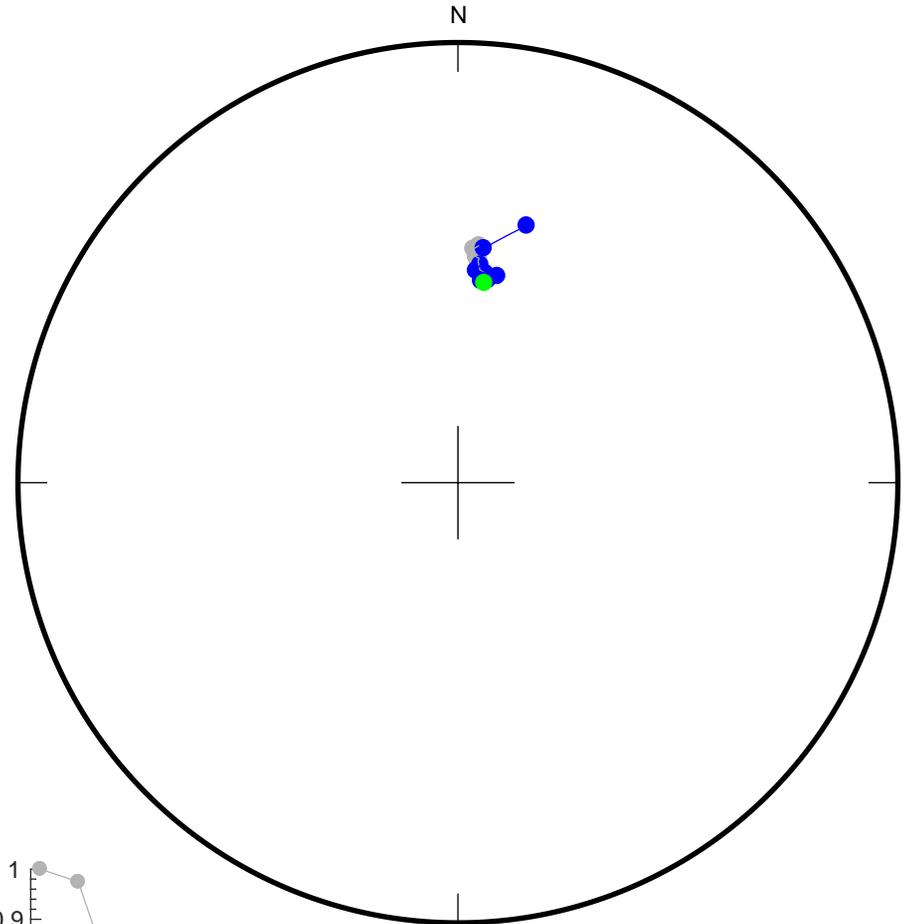
71

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 350
to 600
Dec = 7.6
Inc = 48.8
MAD = 3.1

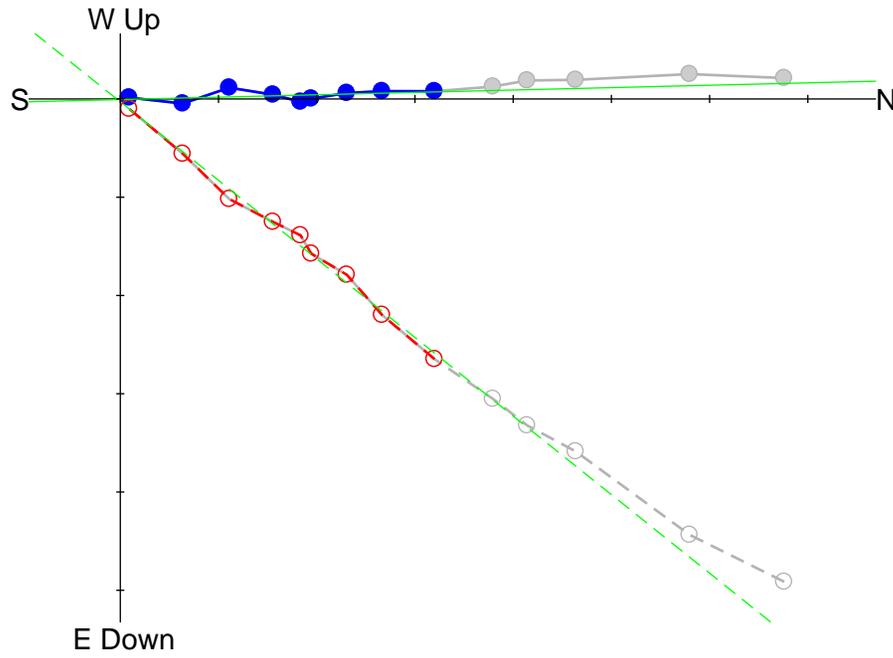
Div. = 5.0e-02



IT1-6

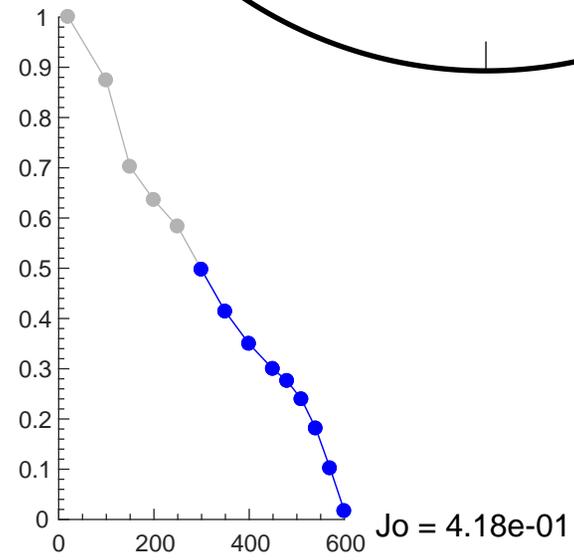
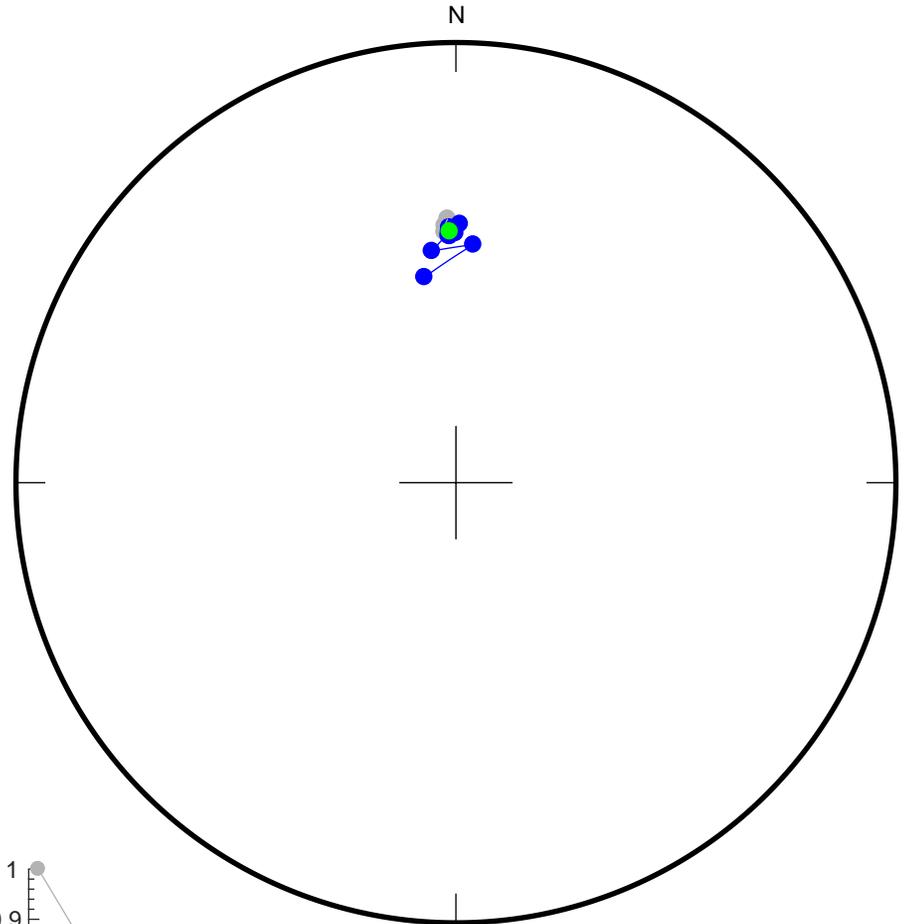
72

20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600



Fit from 300
 to 600
 Dec = 358.6
 Inc = 38.6
 MAD = 3.2

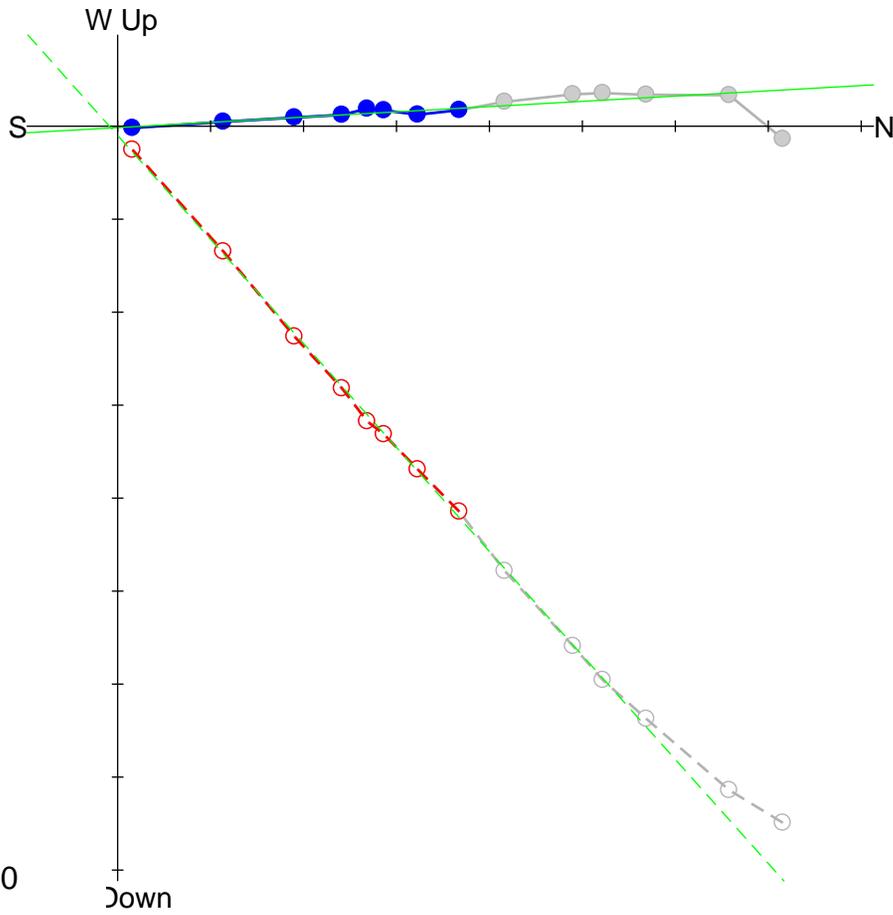
Div. = 5.0e-02



IT1-7

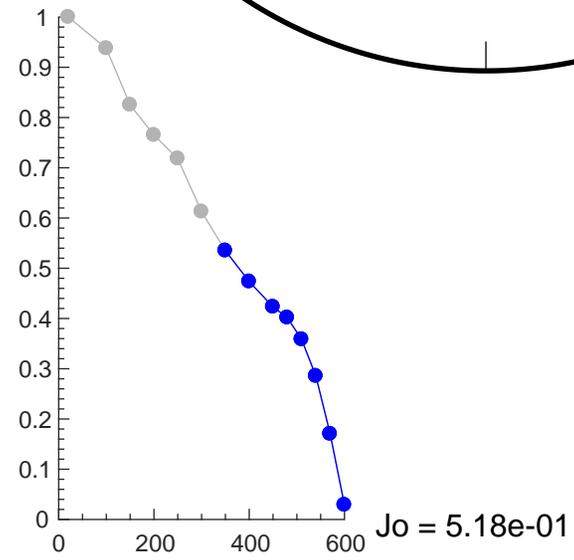
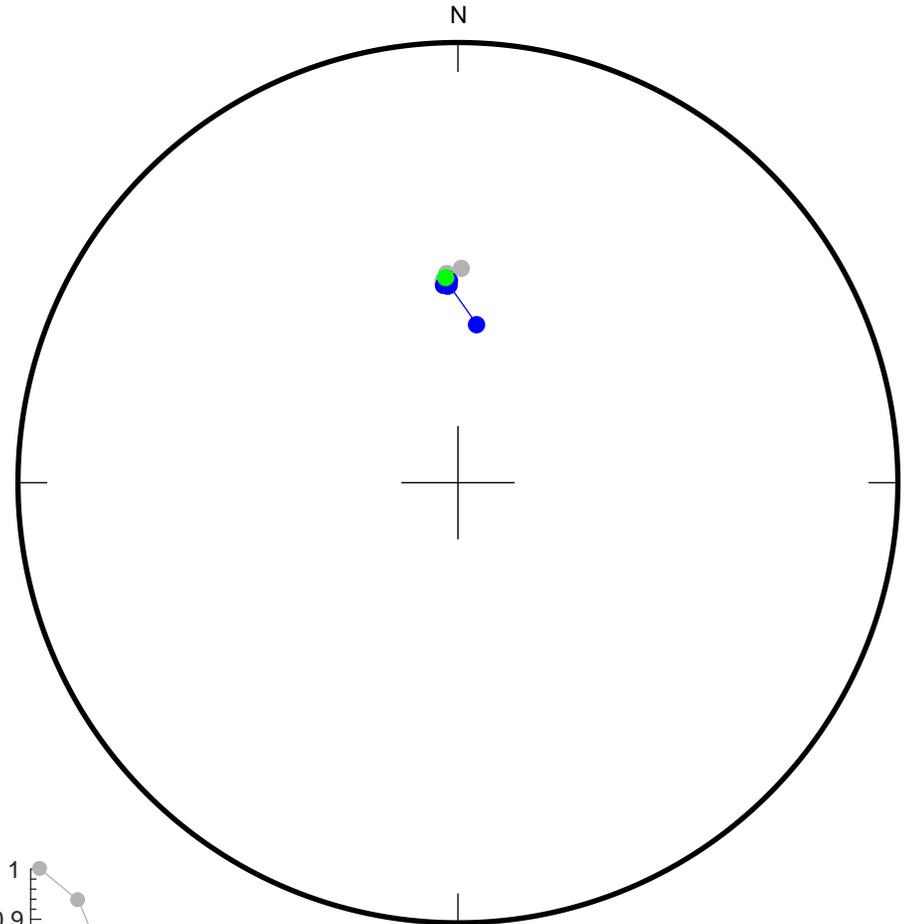
73

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 350
to 600
Dec = 356.8
Inc = 48.2
MAD = 1.3

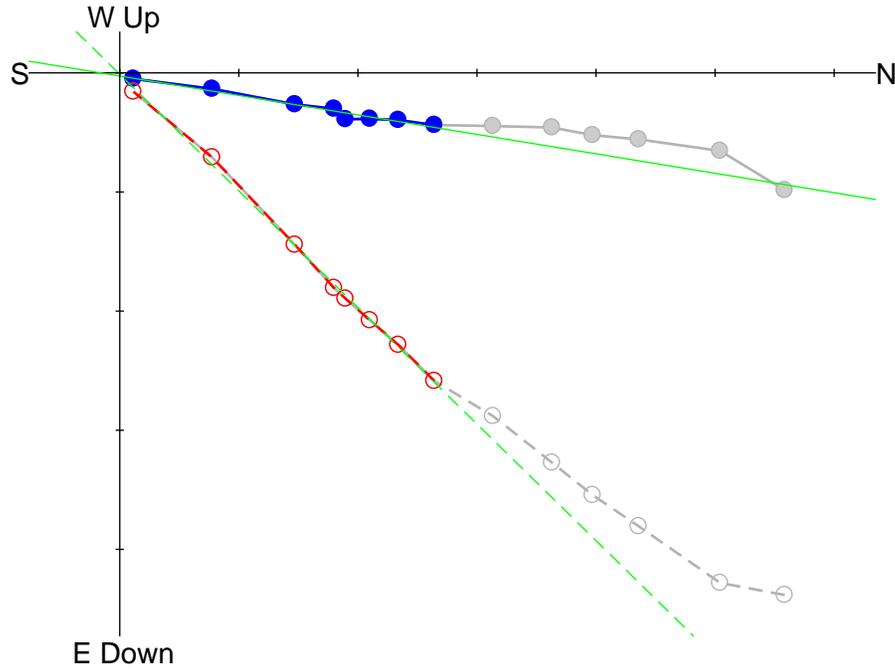
Div. = 5.0e-02



IT1-8

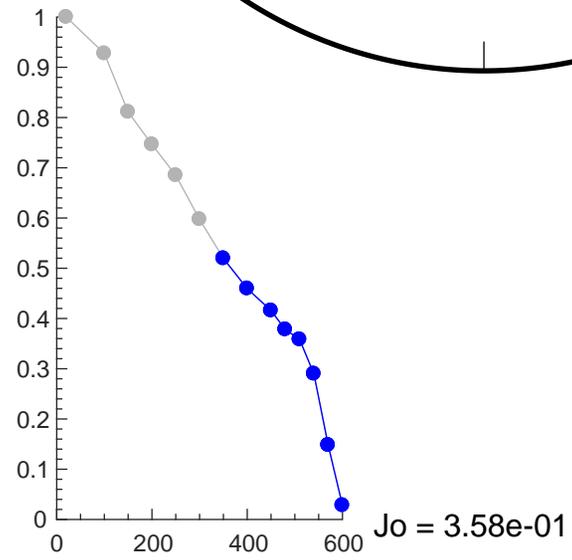
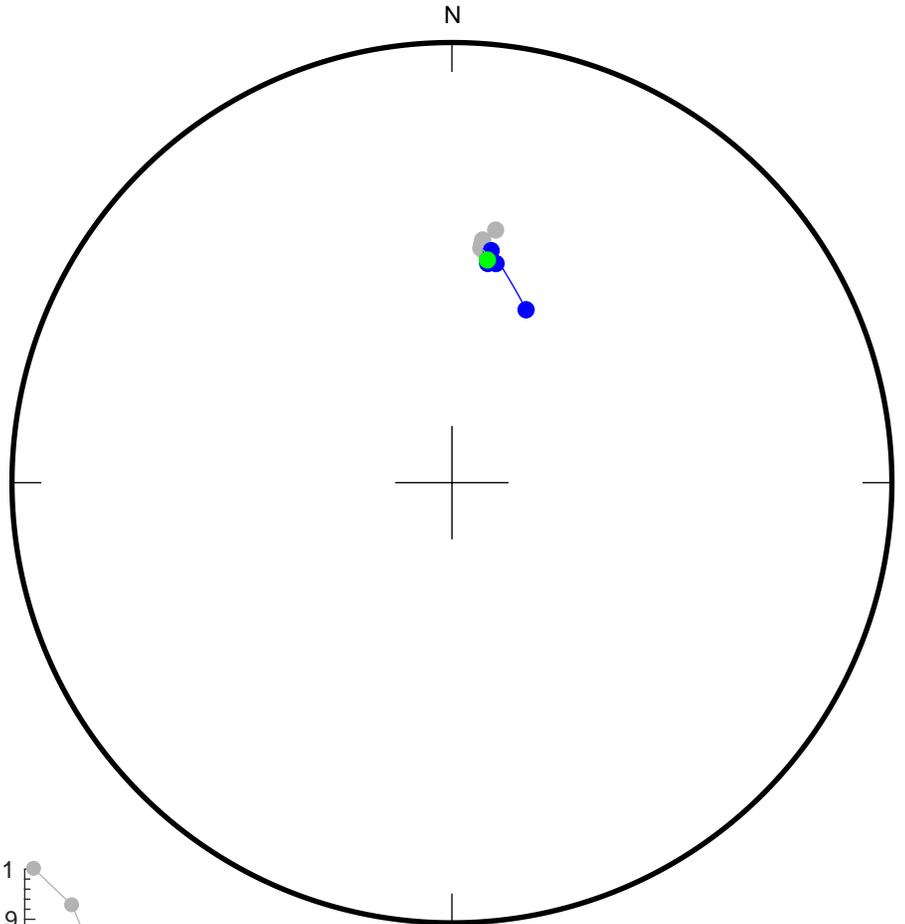
74

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 350
to 600
Dec = 9.3
Inc = 44.0
MAD = 1.6

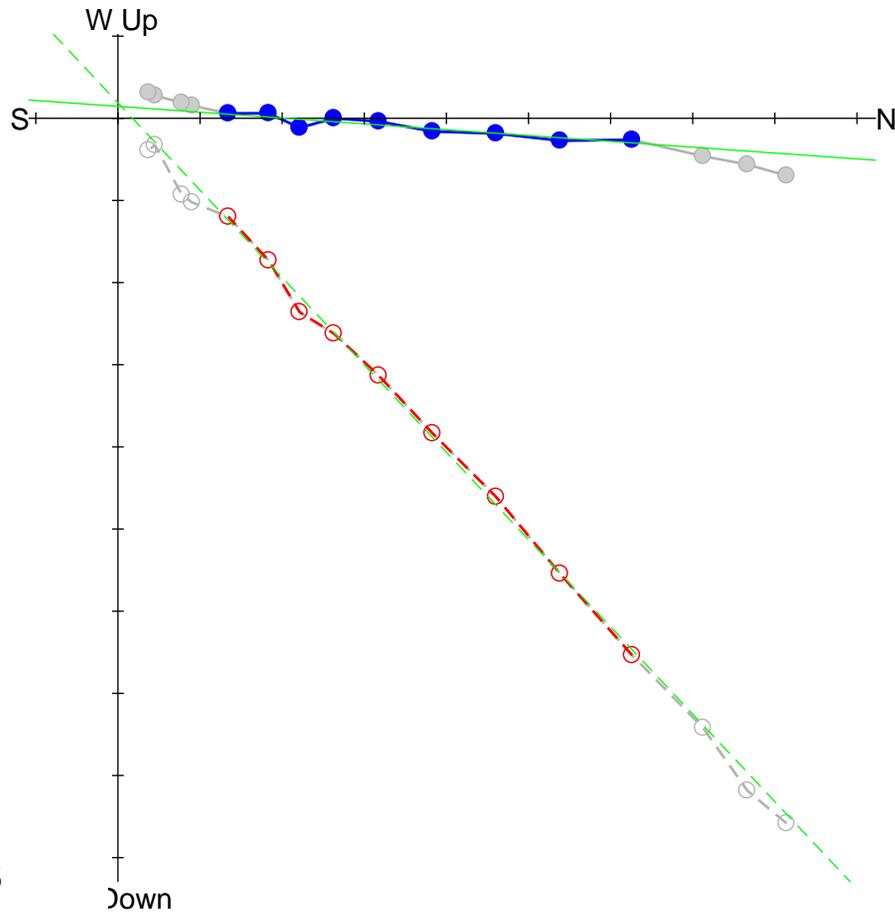
Div. = 5.0e-02



IT1-9

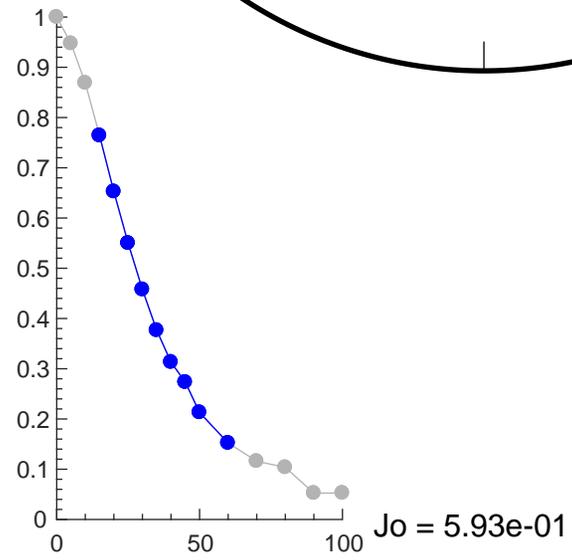
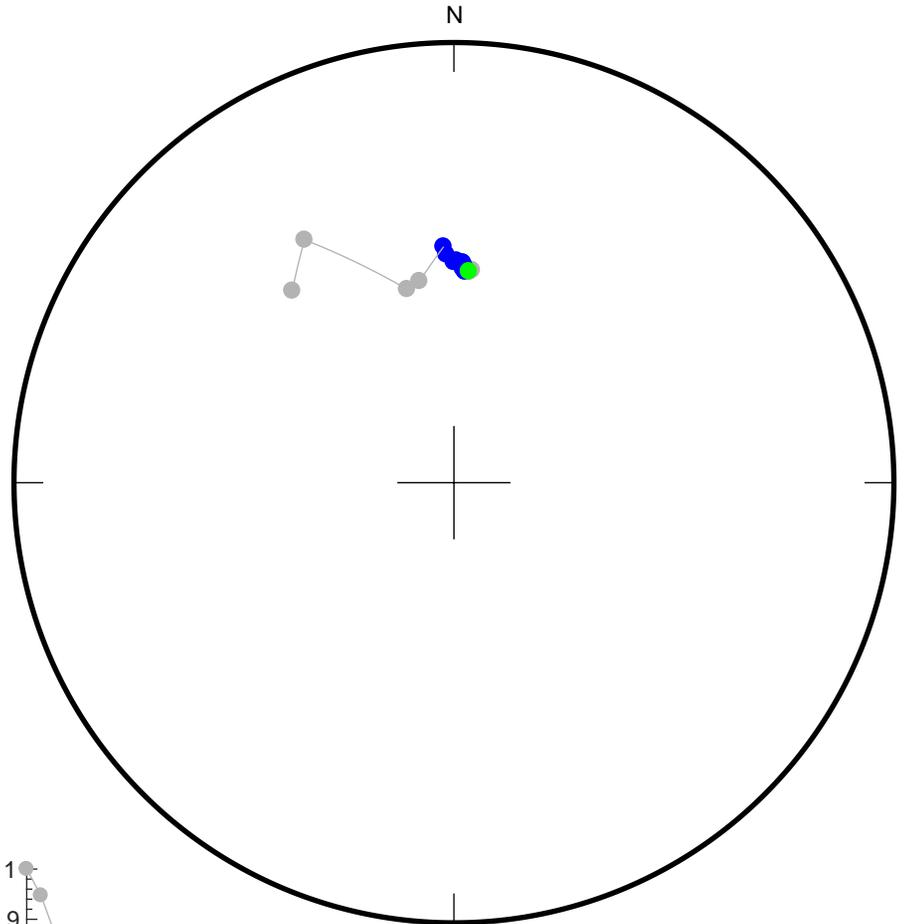
75

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 15
to 60
Dec = 4.1
Inc = 46.7
MAD = 1.8

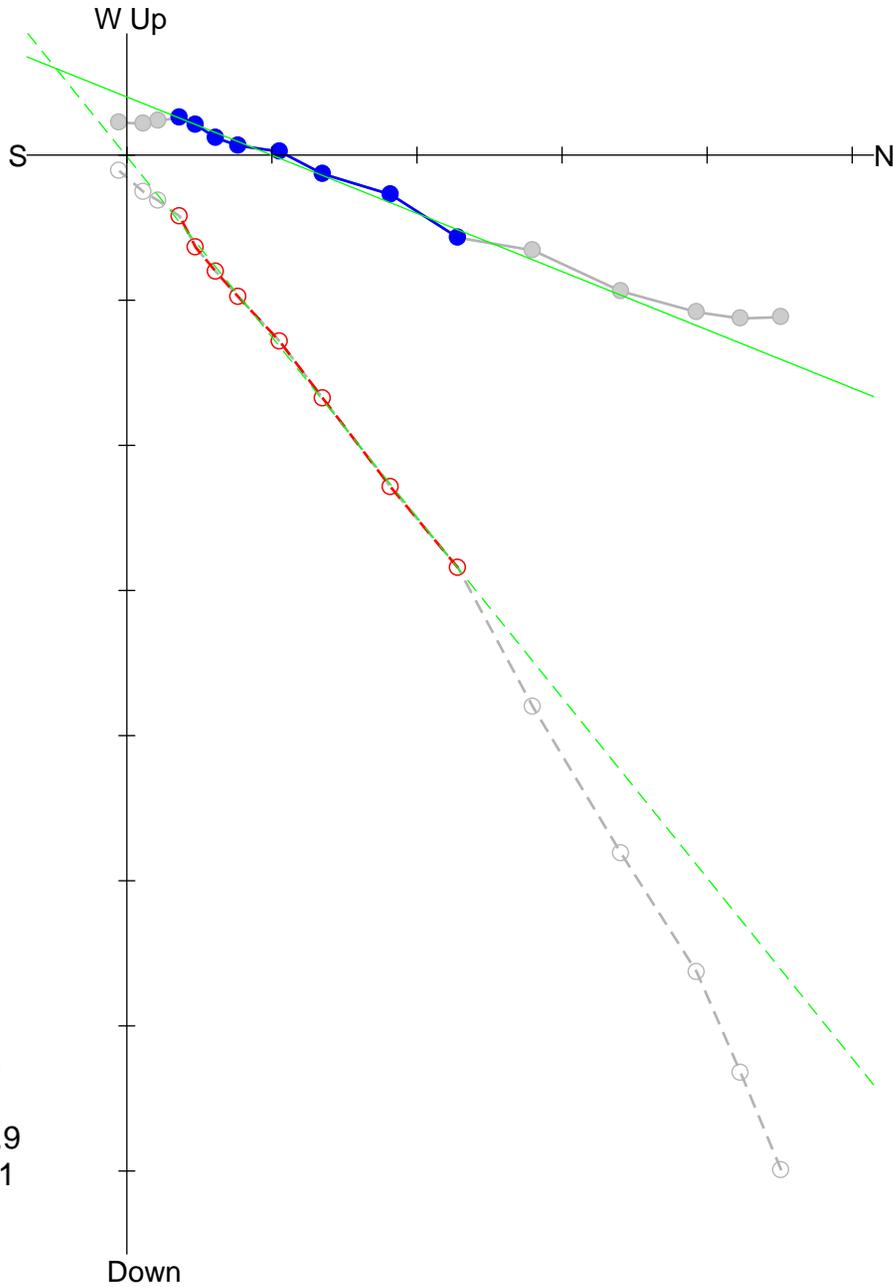
Div. = 5.0e-02



IT1-10

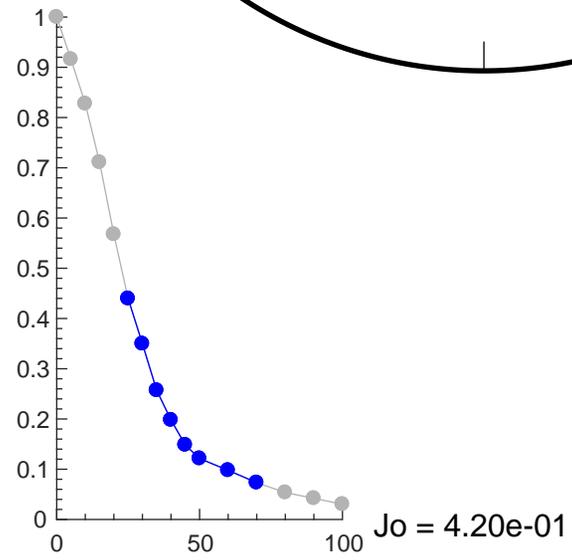
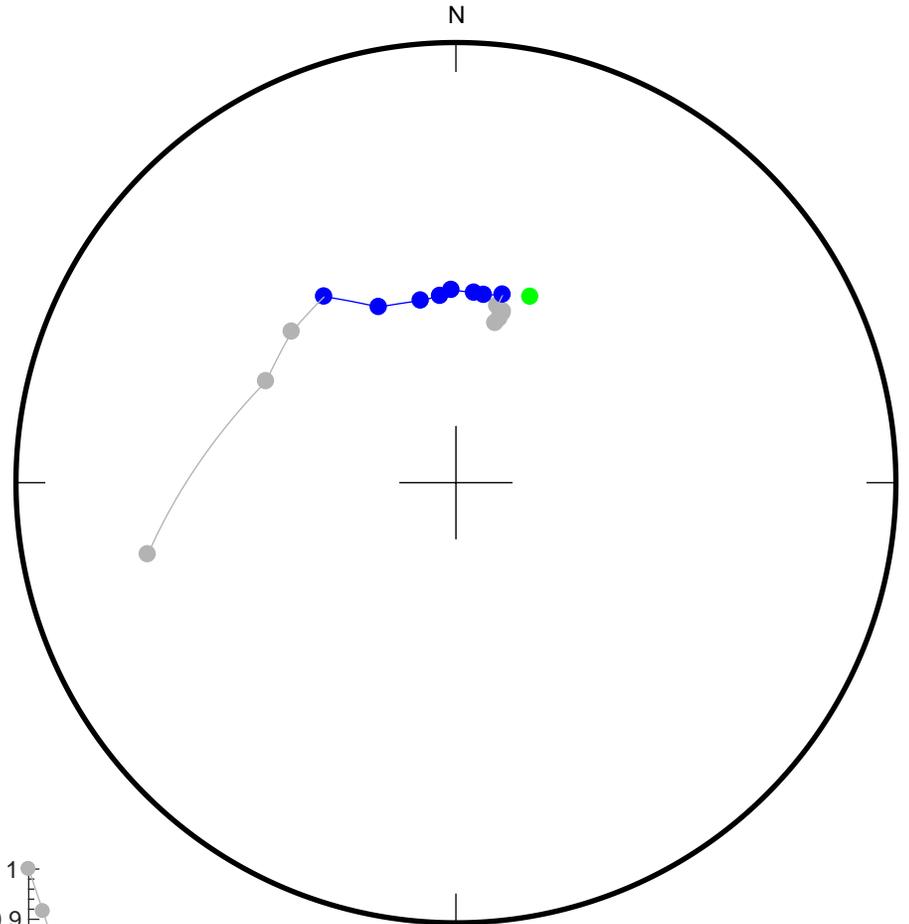
76

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 25
to 70
Dec = 21.9
Inc = 49.1
MAD = 2.1

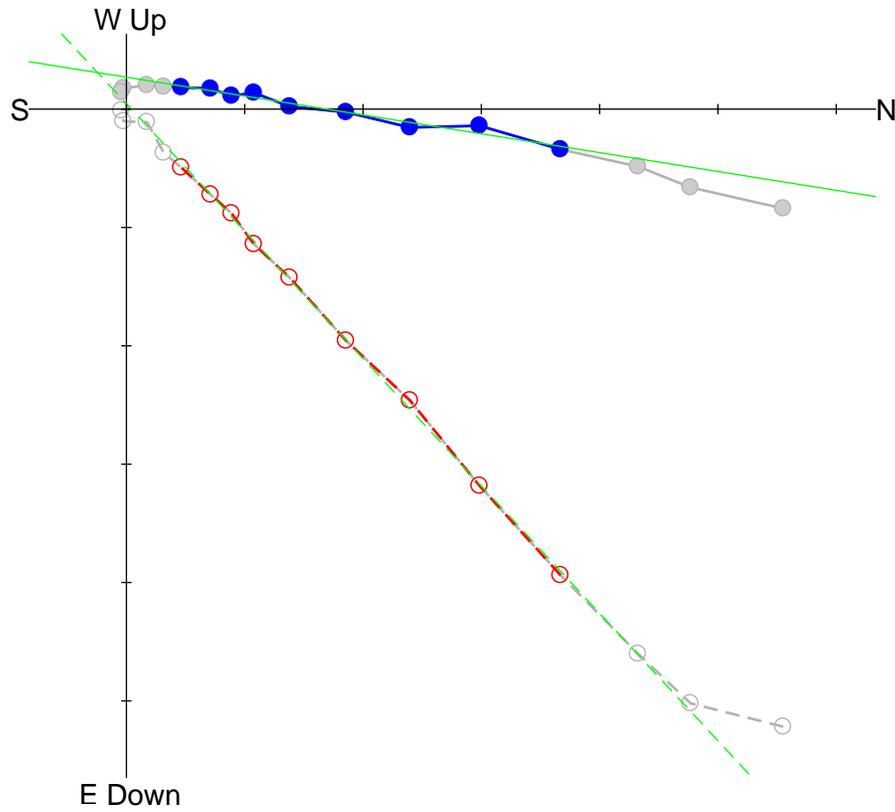
Div. = 5.0e-02



IT1-11

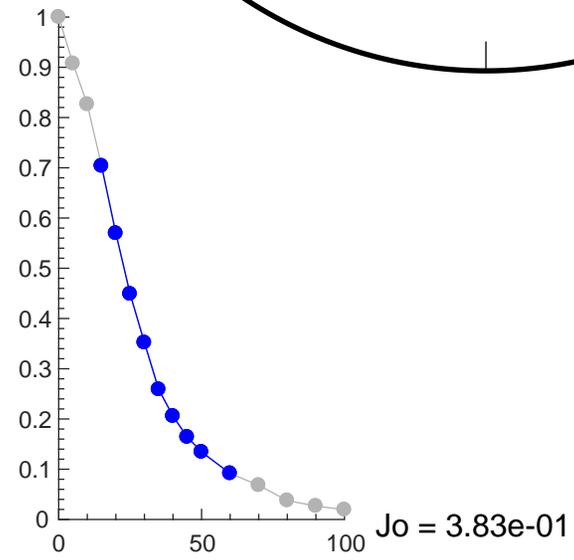
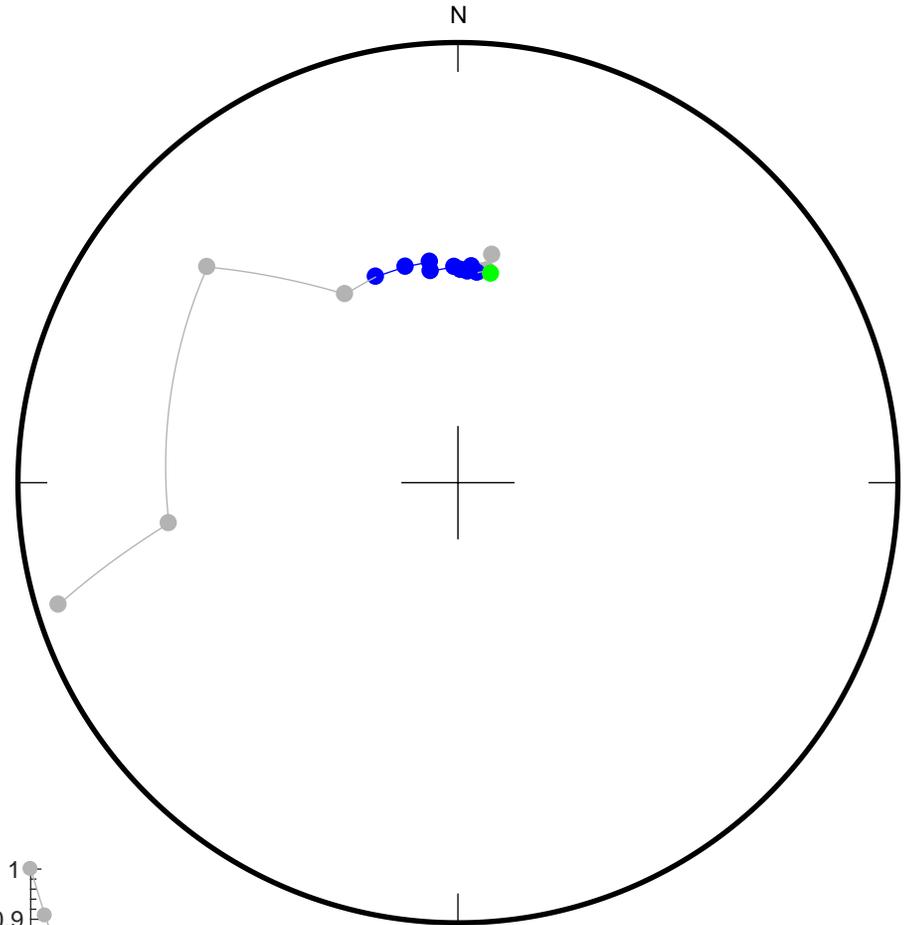
77

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 15
to 60
Dec = 9.1
Inc = 46.8
MAD = 1.5

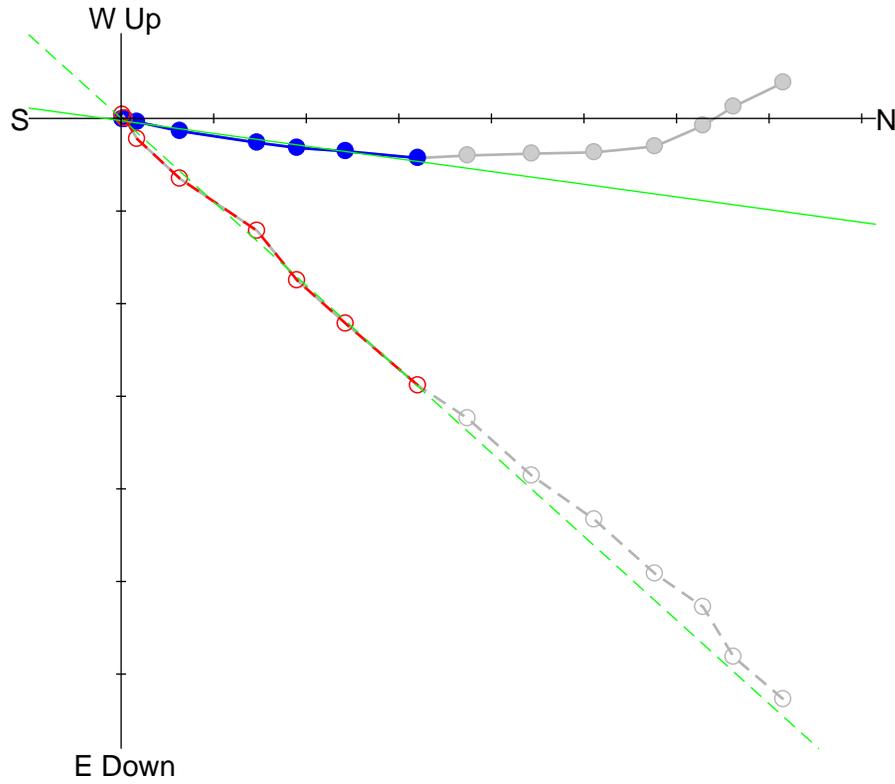
Div. = 5.0e-02



始良カルテラ噴出物

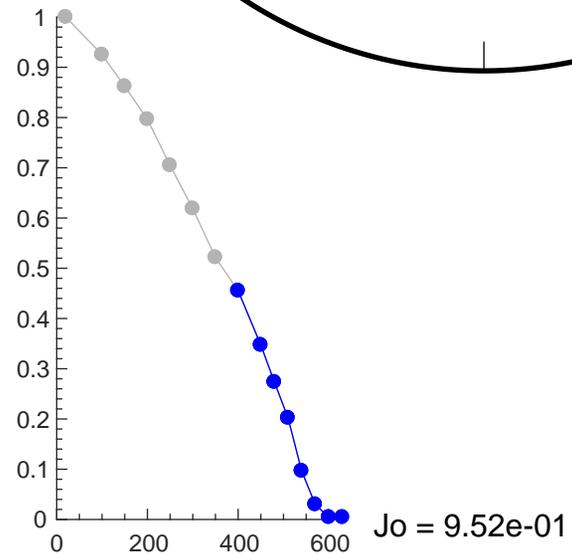
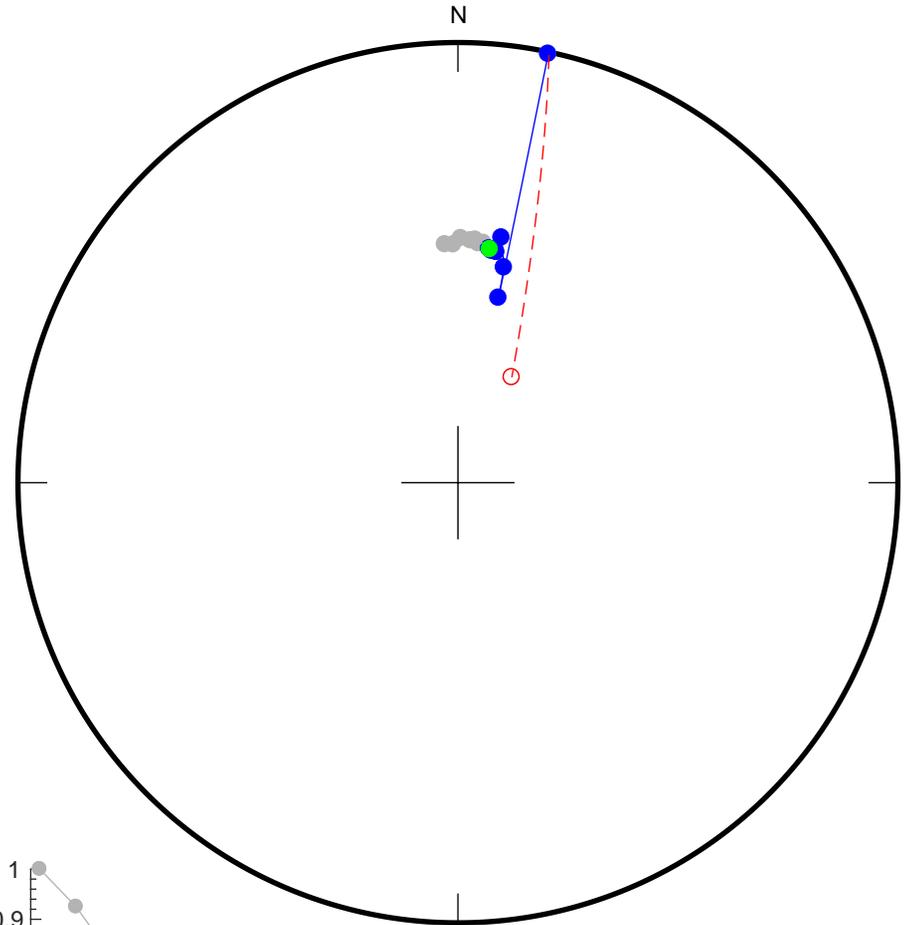
入戸火碎流:IT2

20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



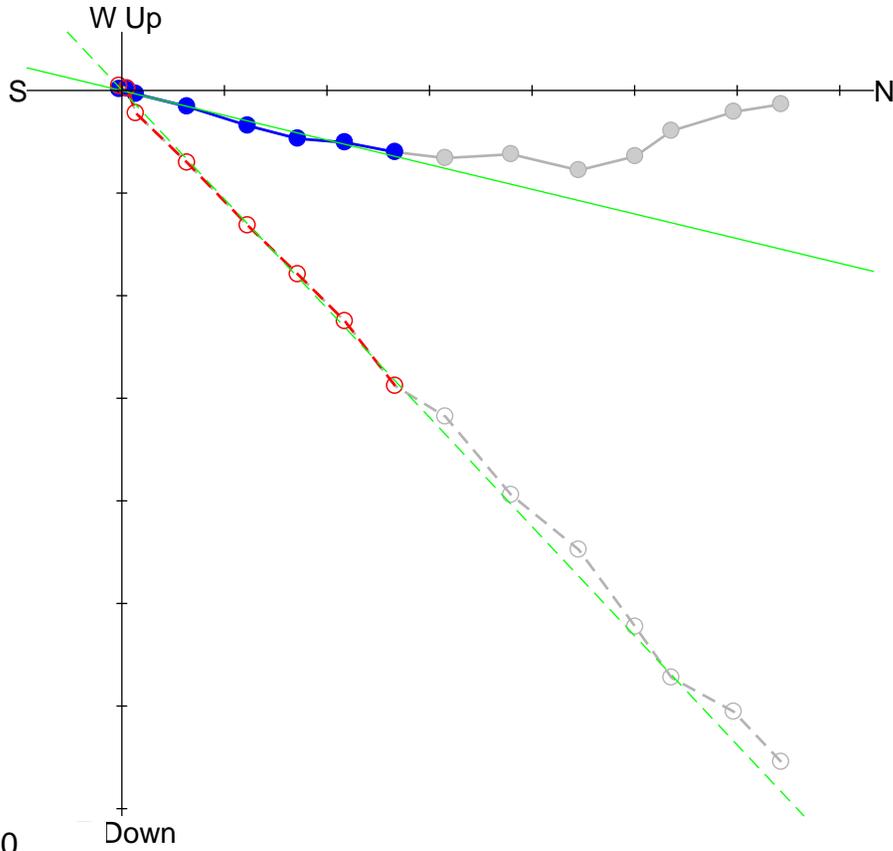
Fit from 400
 to 630
 Dec = 7.8
 Inc = 41.8
 MAD = 1.9

Div. = 1.0e-01



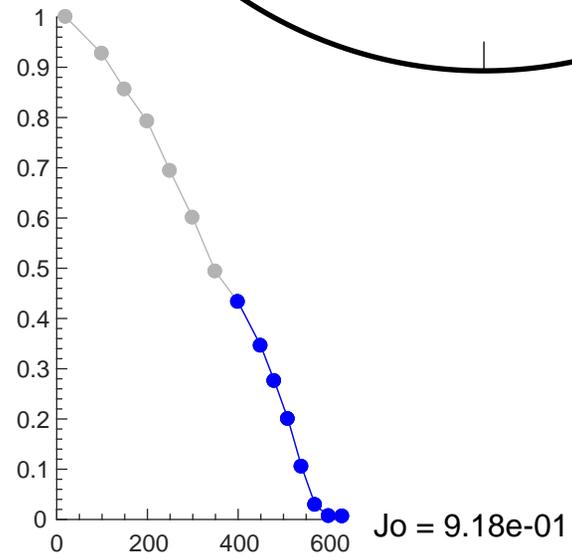
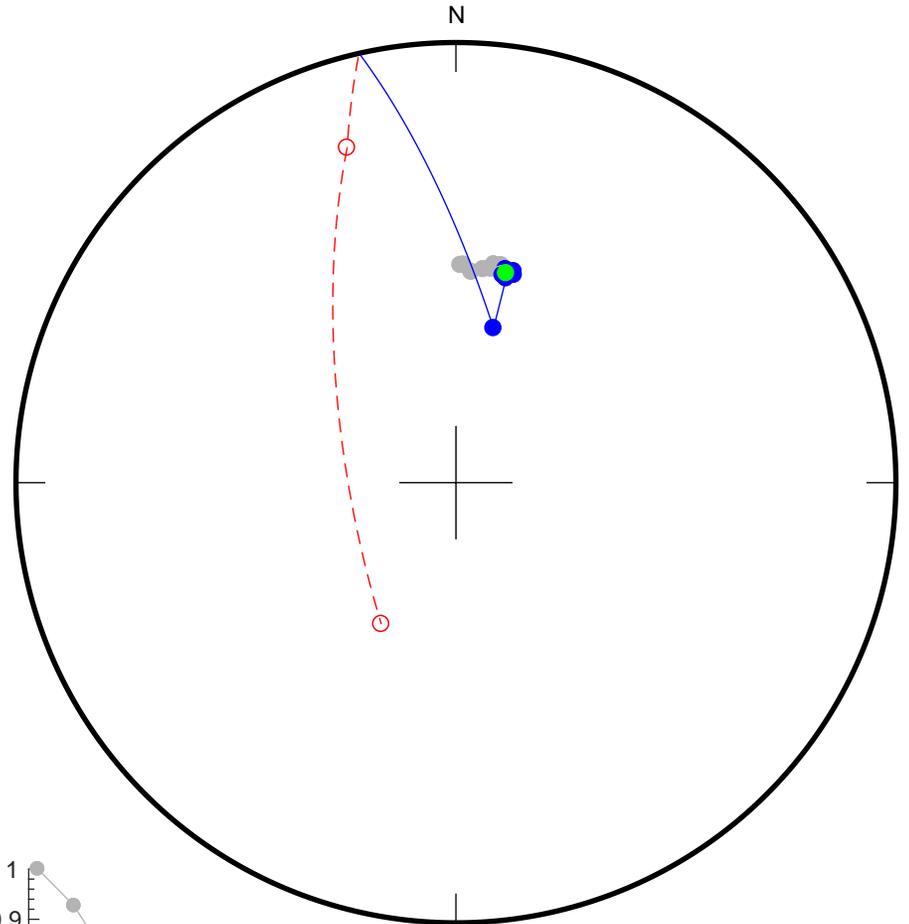
Jo = 9.52e-01

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

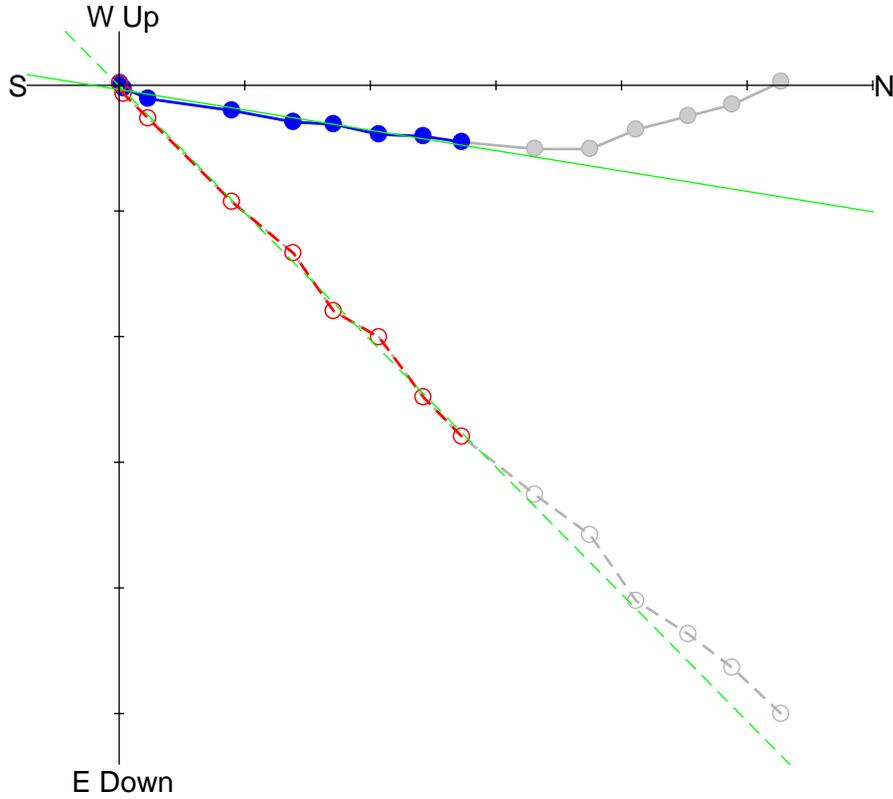


Fit from 400
to 630
Dec = 13.5
Inc = 46.0
MAD = 1.9

Div. = 1.0e-01

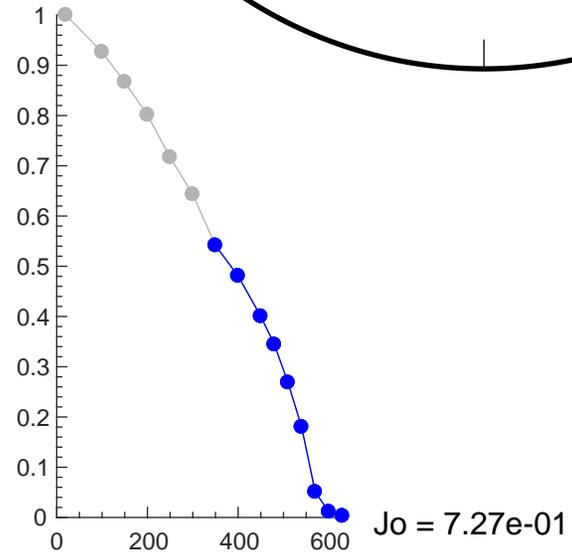
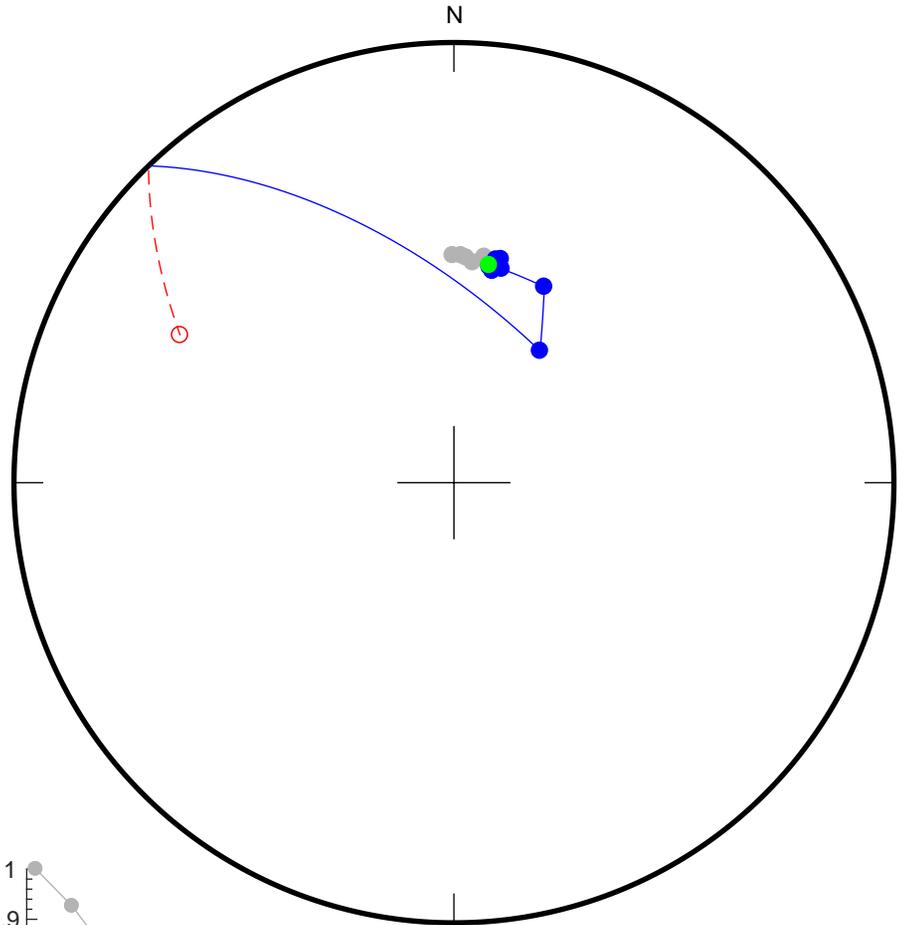


20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630

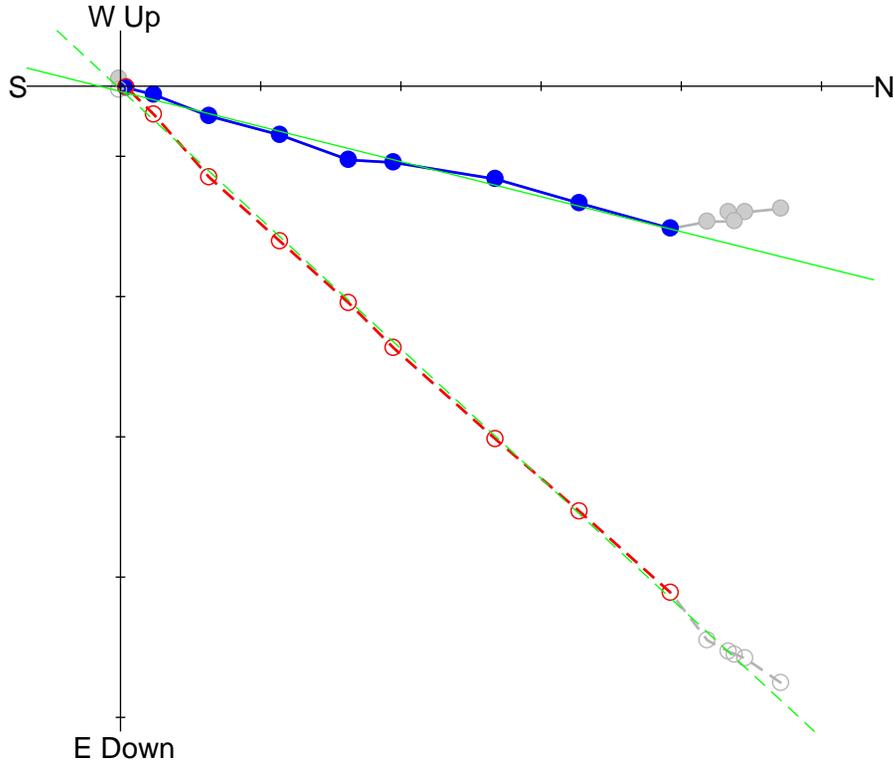


Fit from 350
 to 630
 Dec = 9.2
 Inc = 44.9
 MAD = 1.9

Div. = 1.0e-01

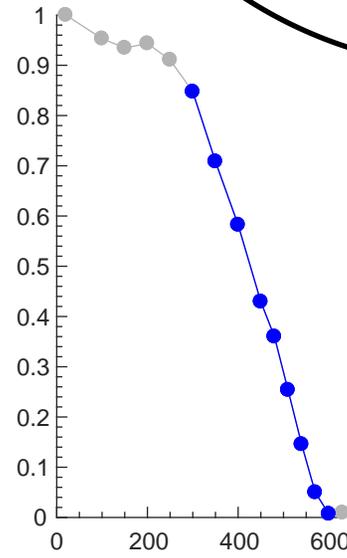
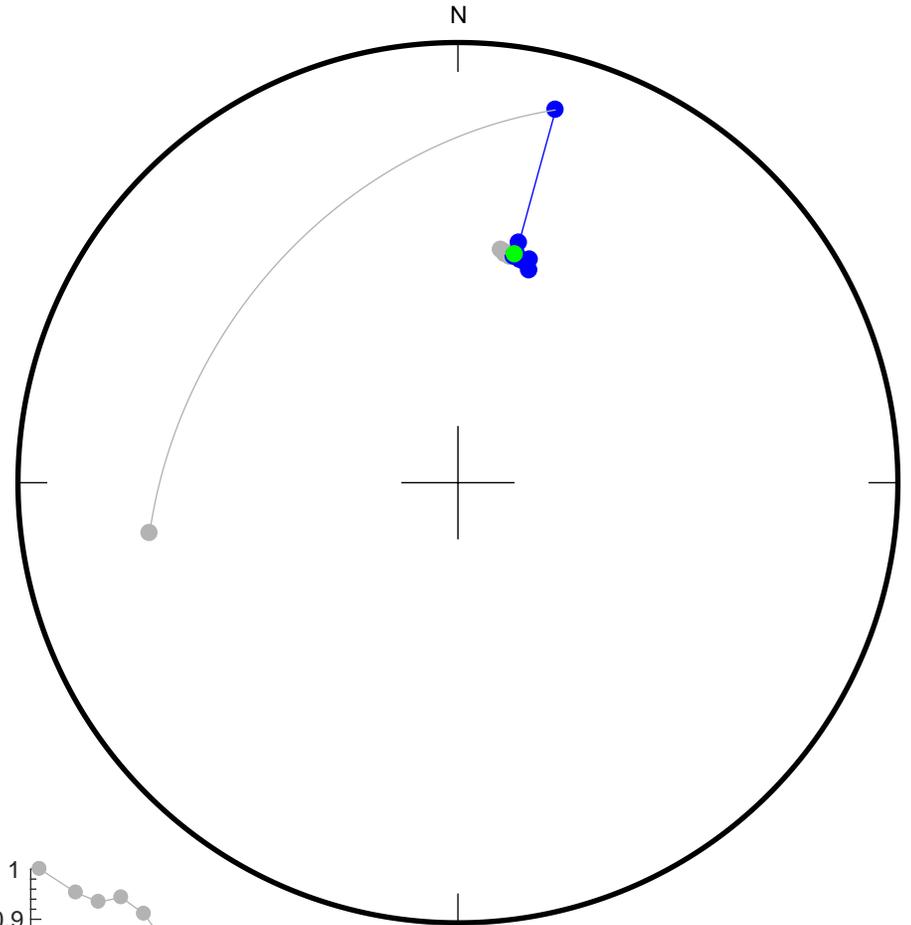


20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



Fit from 300
 to 600
 Dec = 14.0
 Inc = 41.9
 MAD = 1.4

Div. = 1.0e-01

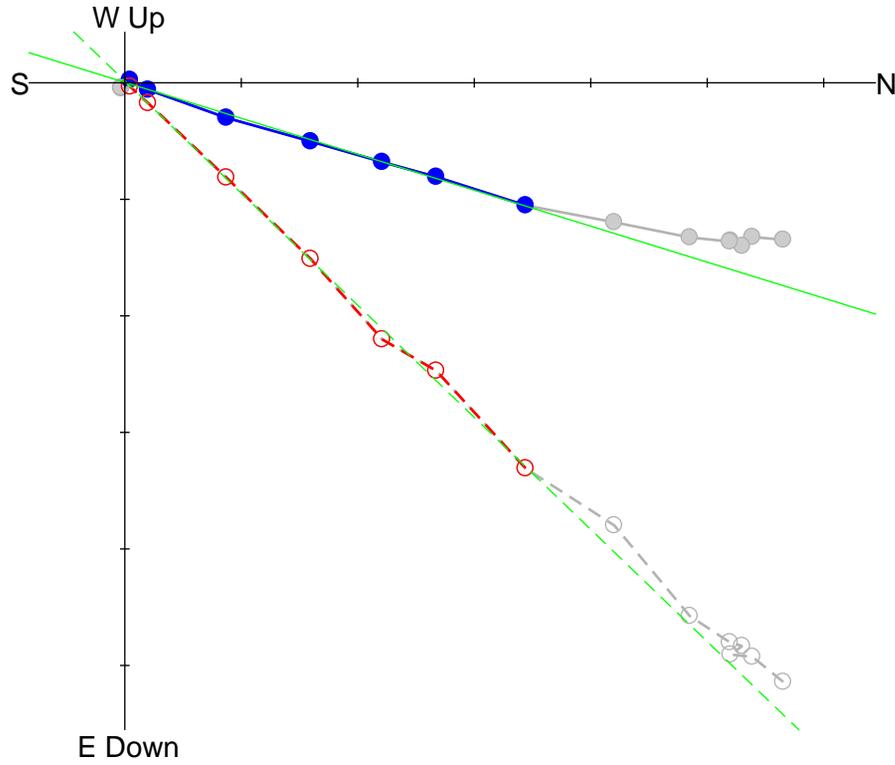


Jo = 6.41e-01

IT2-5A

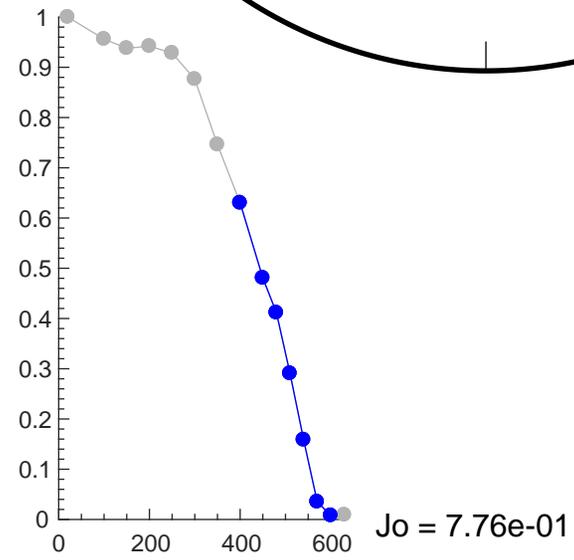
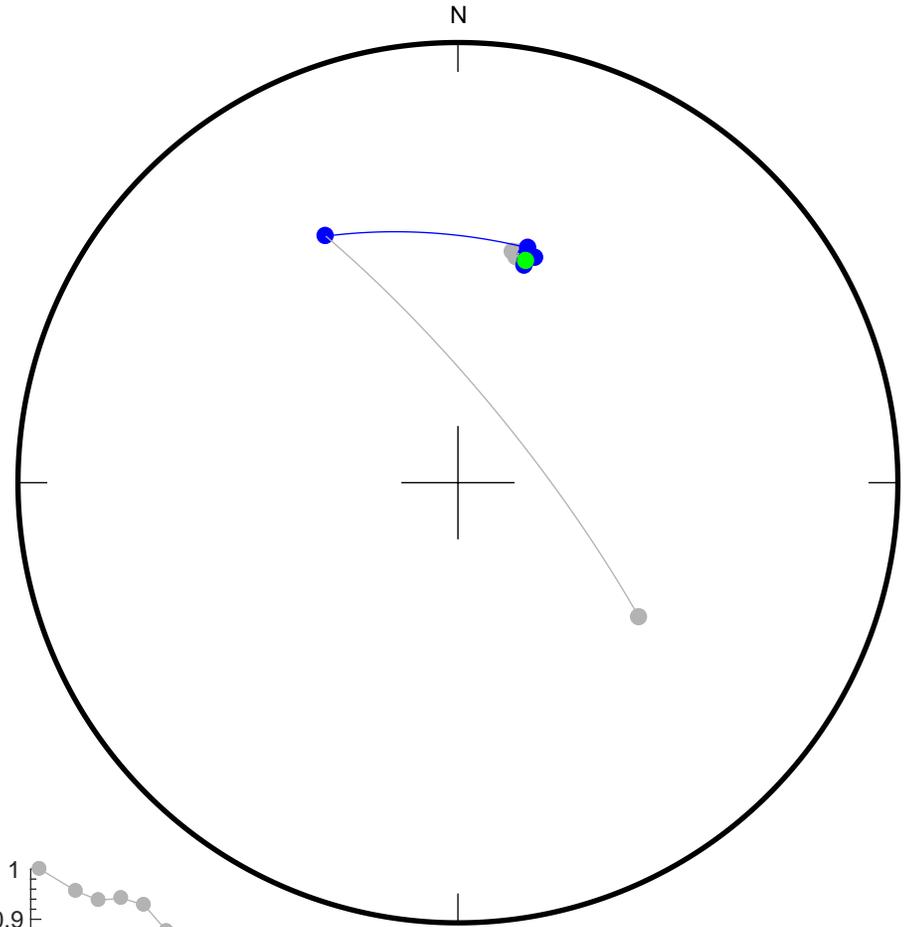
83

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

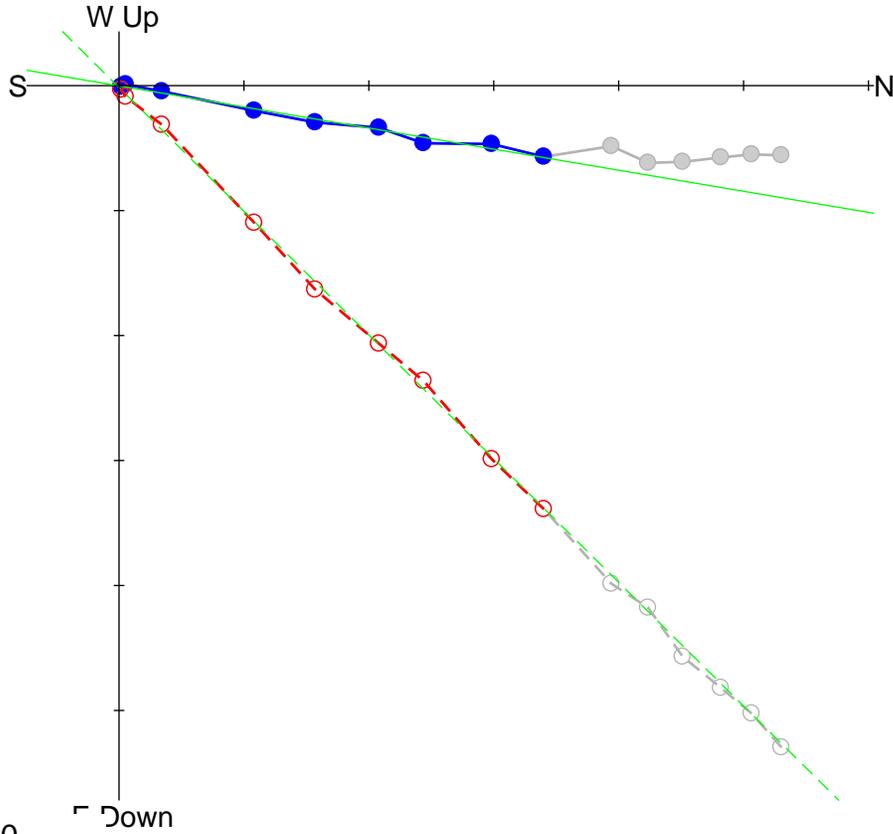


Fit from 400
to 600
Dec = 17.2
Inc = 42.6
MAD = 1.4

Div. = 1.0e-01

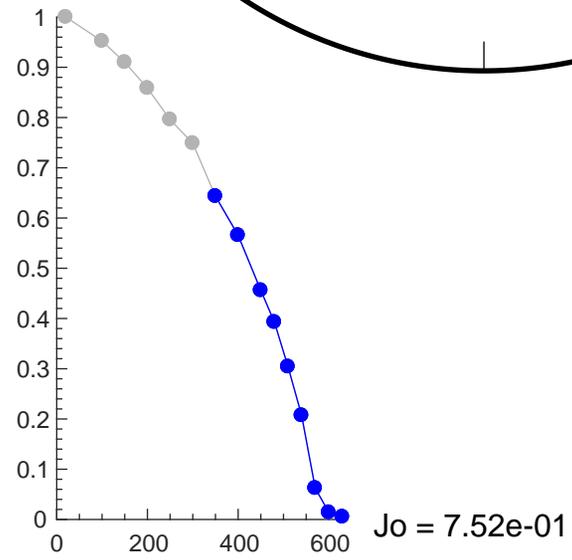
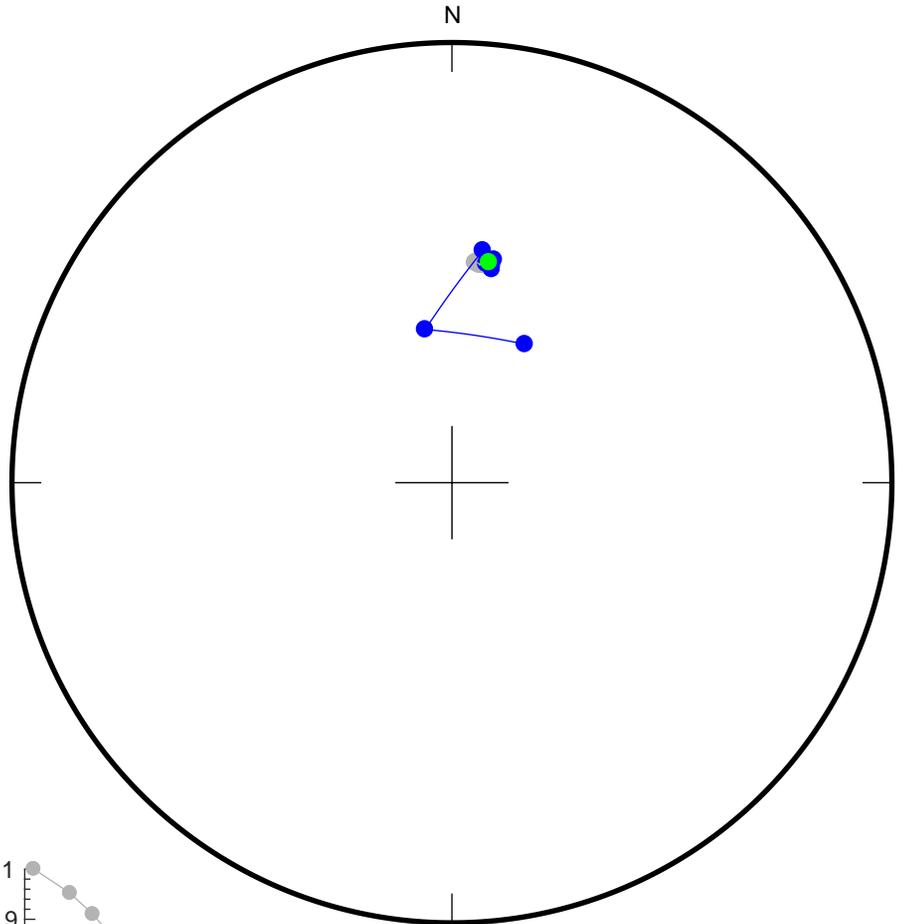


20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

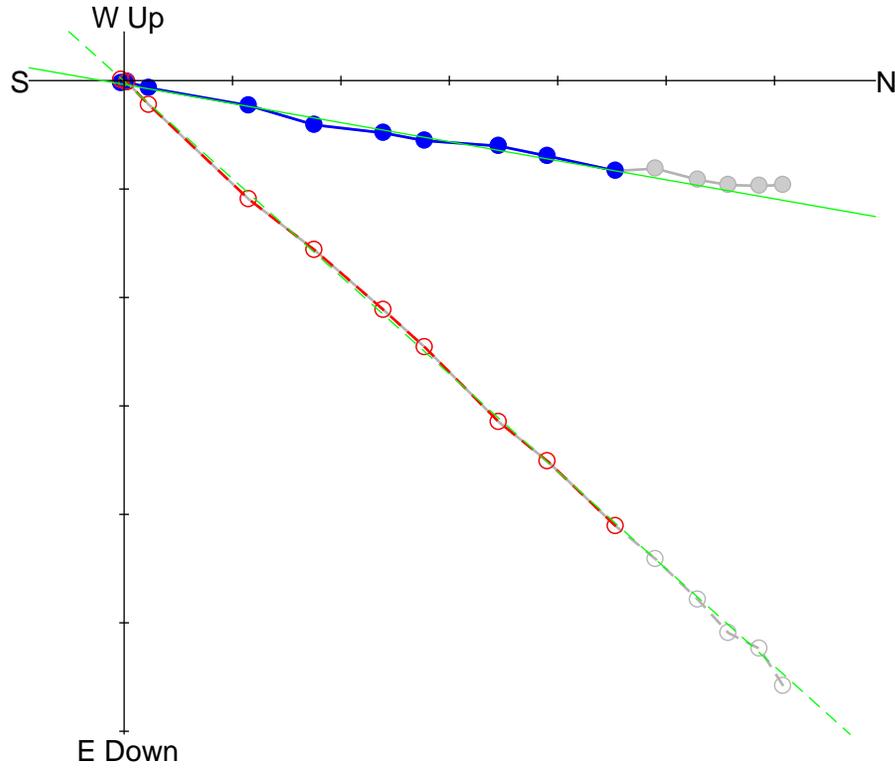


Fit from 350
to 630
Dec = 9.6
Inc = 44.3
MAD = 1.2

Div. = 1.0e-01

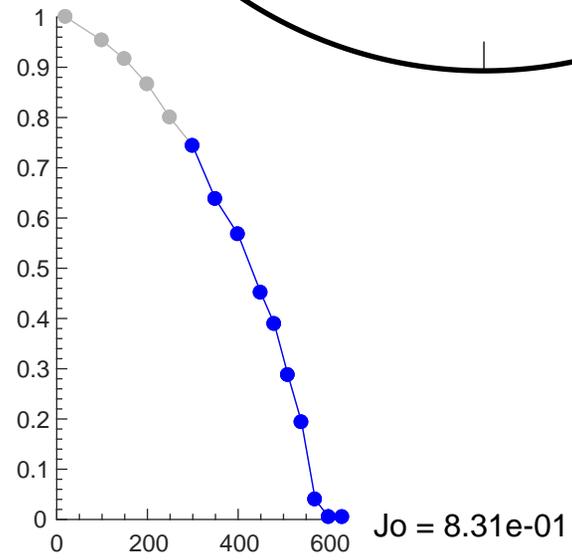
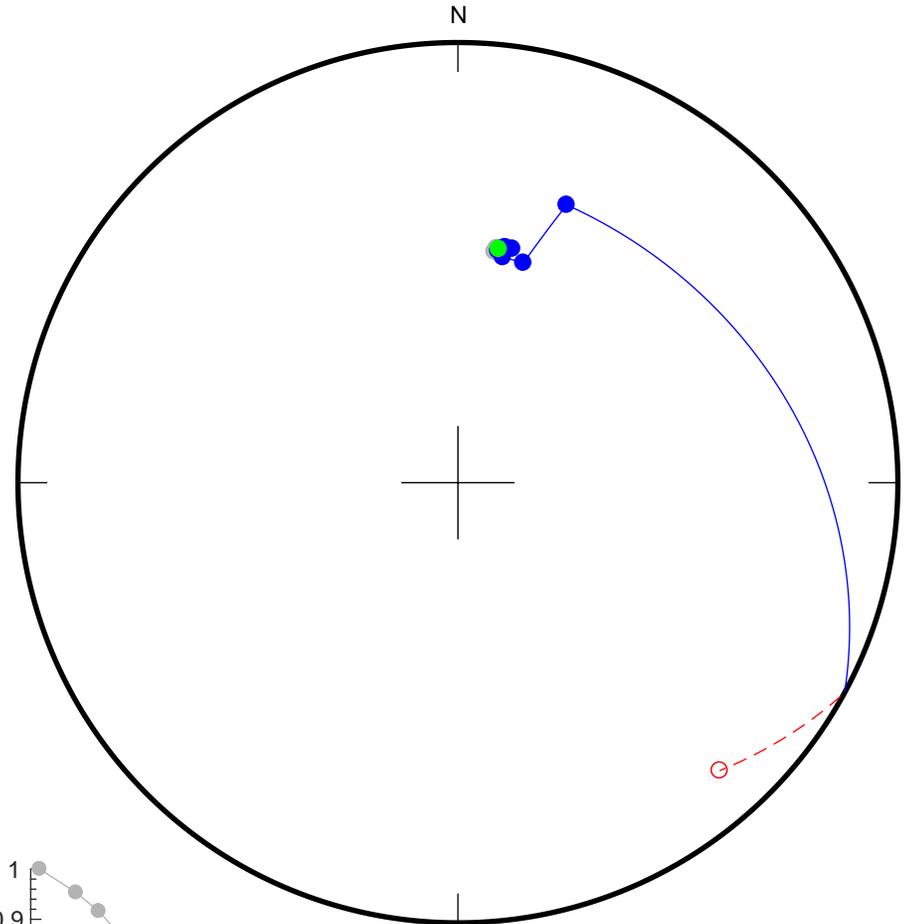


20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



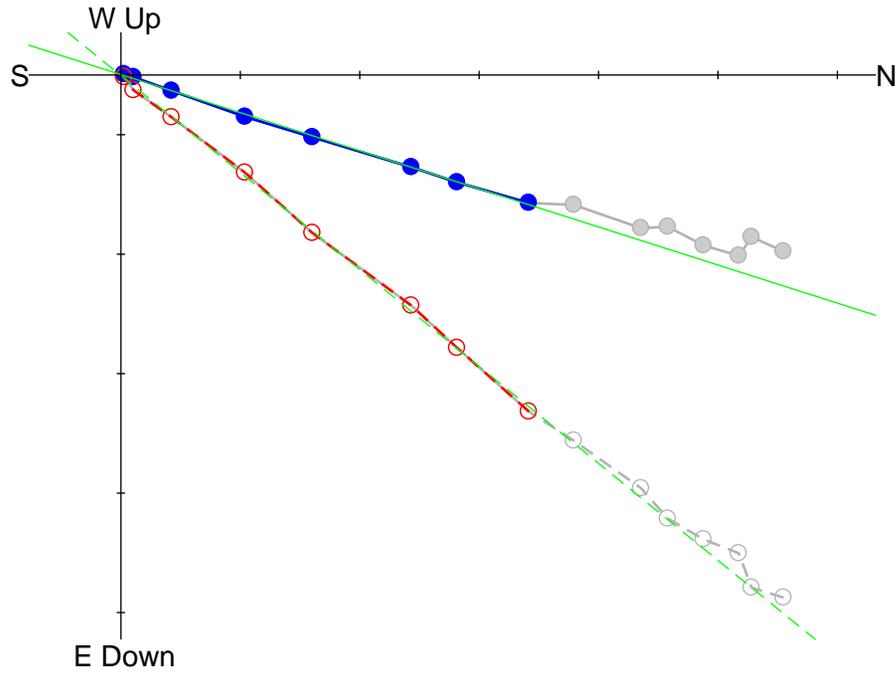
Fit from 300
 to 630
 Dec = 10.0
 Inc = 41.5
 MAD = 1.0

Div. = 1.0e-01



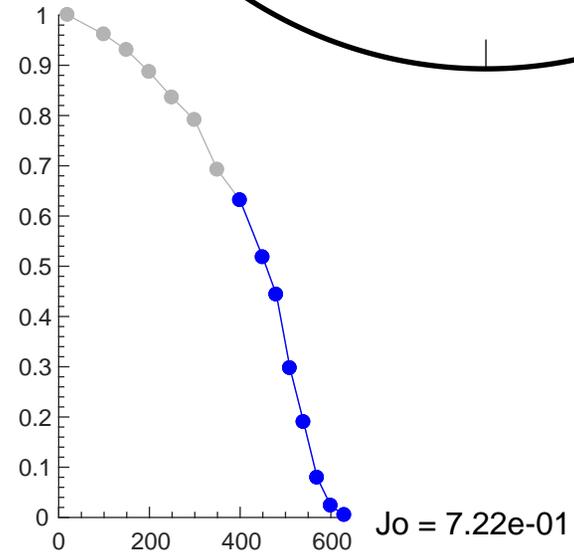
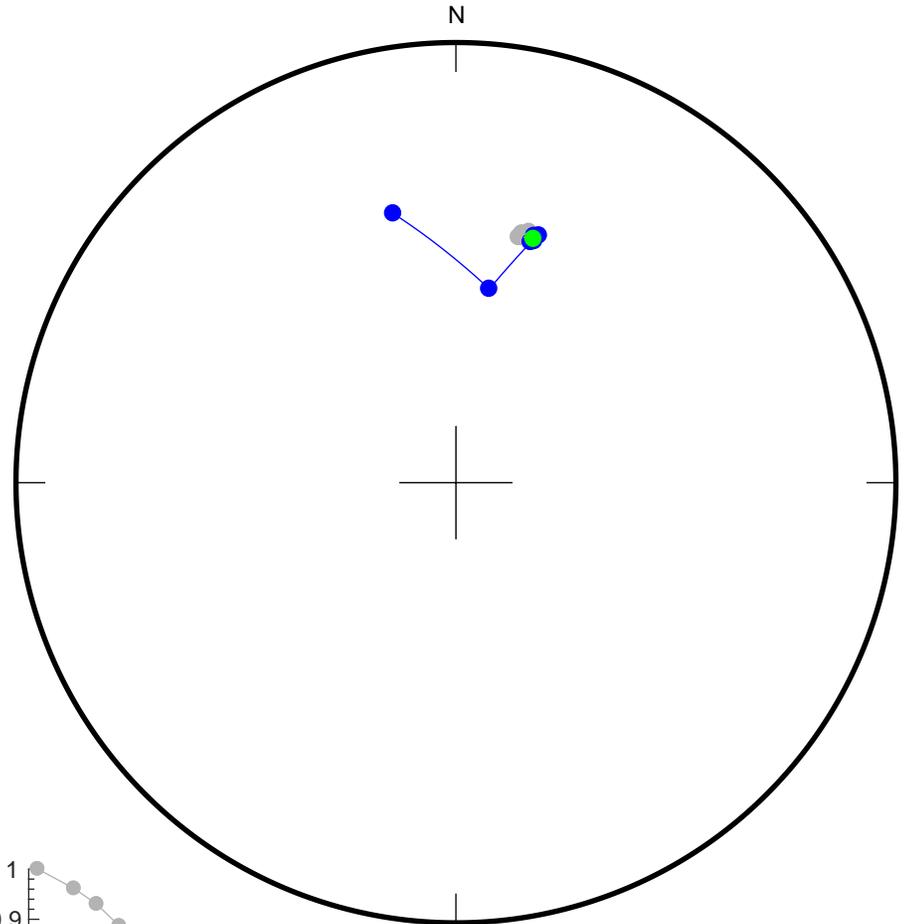
Jo = 8.31e-01

20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630

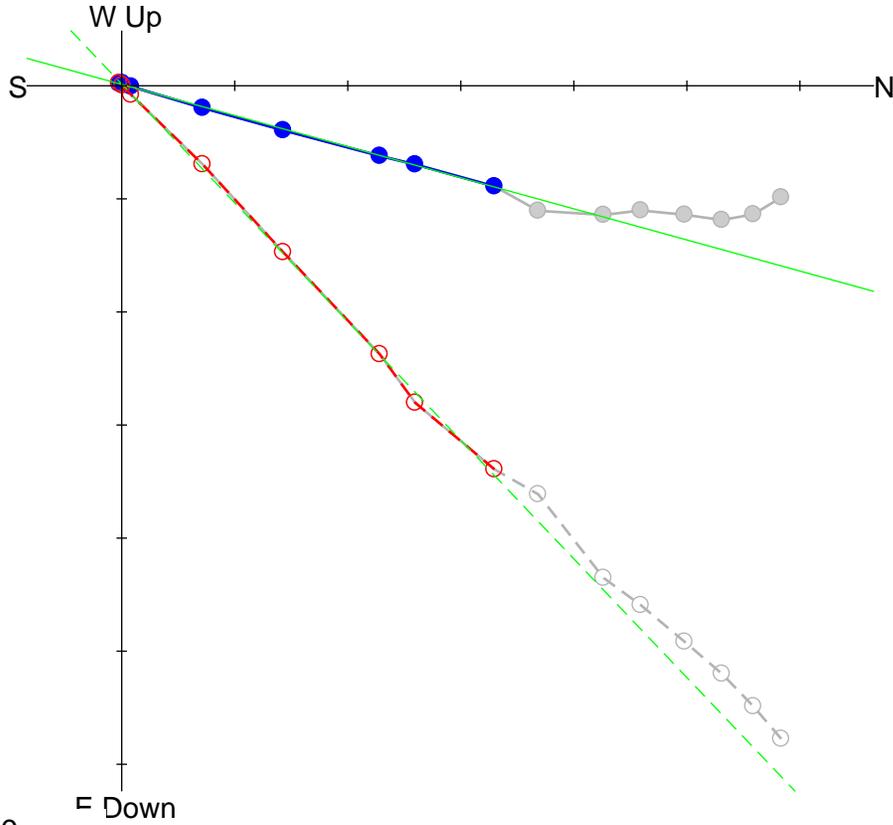


Fit from 400
 to 630
 Dec = 17.7
 Inc = 37.7
 MAD = 0.9

Div. = 1.0e-01

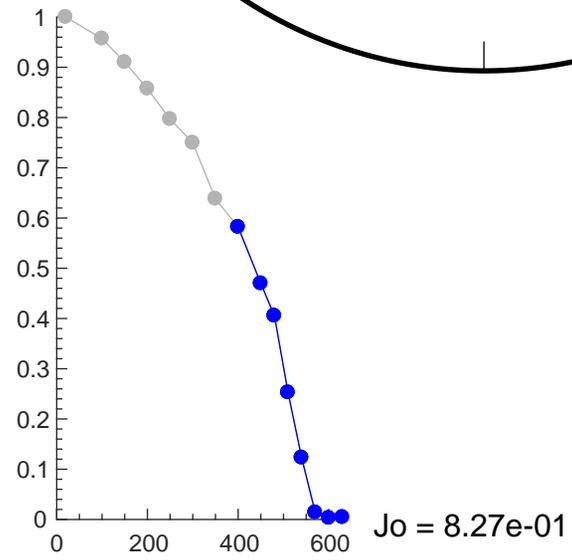
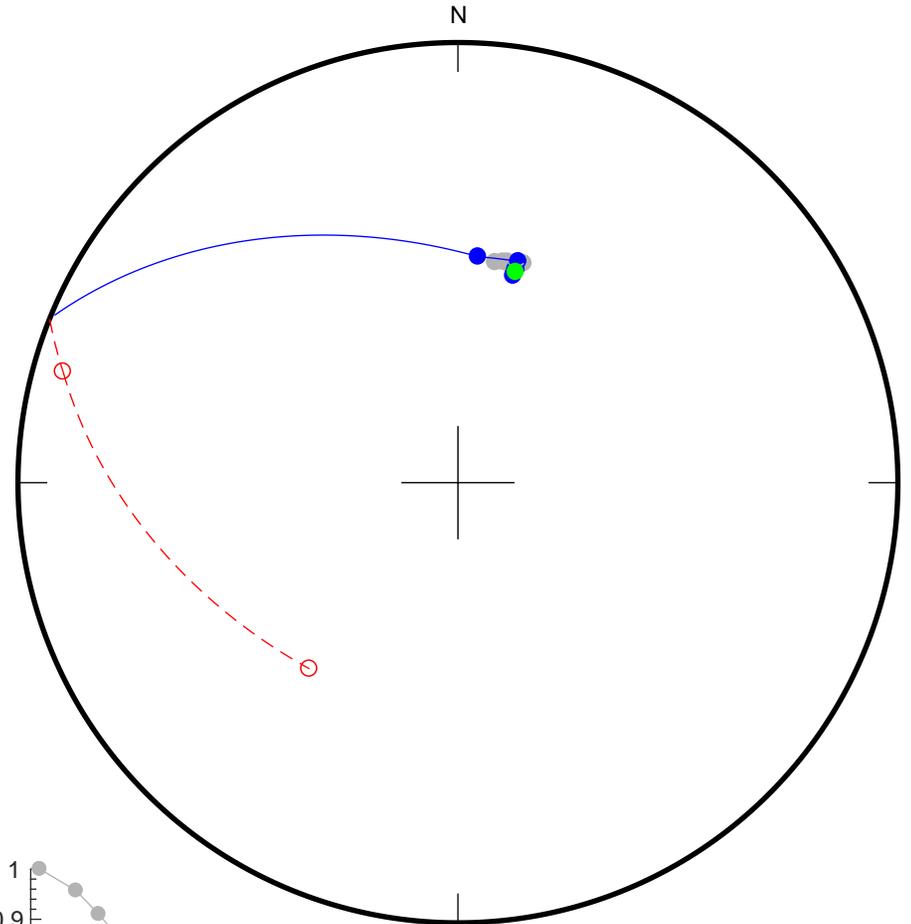


20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630

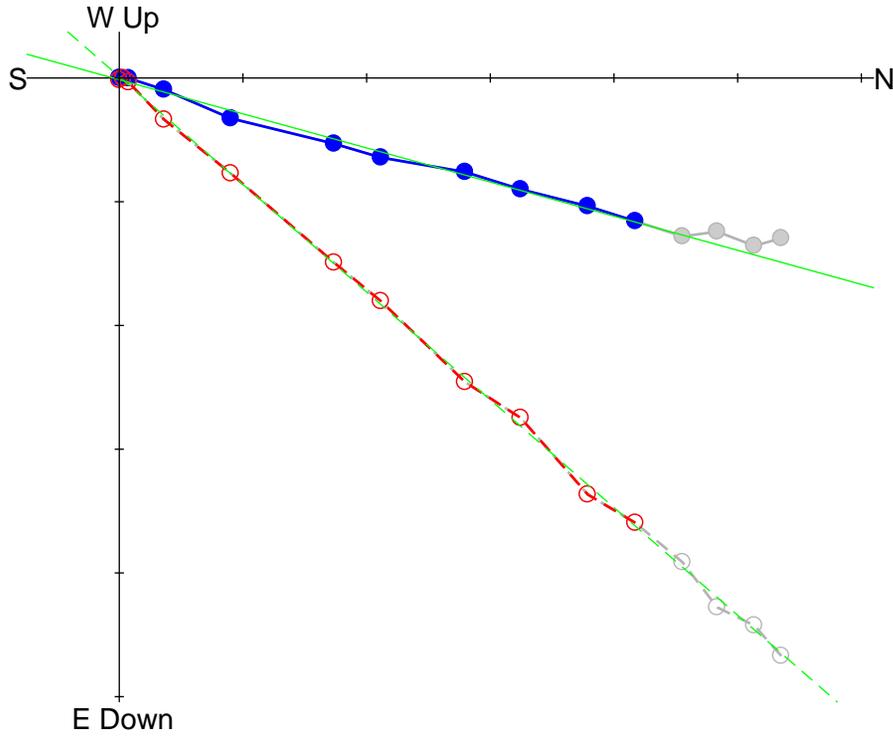


Fit from 400
 to 630
 Dec = 15.4
 Inc = 45.3
 MAD = 1.0

Div. = 1.0e-01

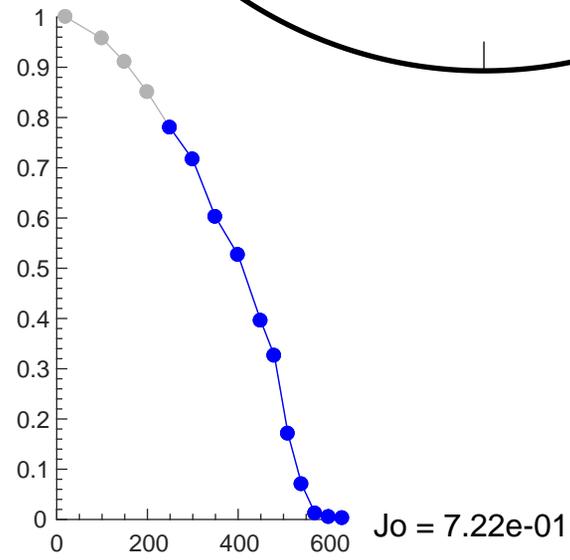
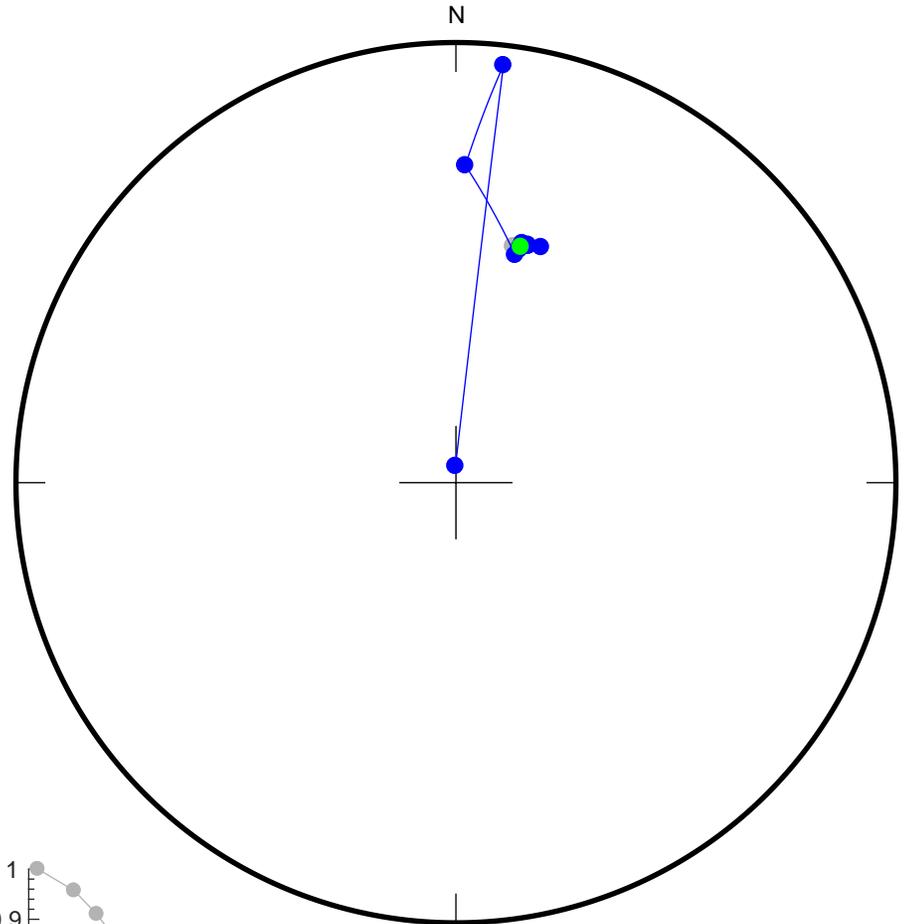


20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



Fit from 250
 to 630
 Dec = 15.4
 Inc = 40.0
 MAD = 1.2

Div. = 1.0e-01



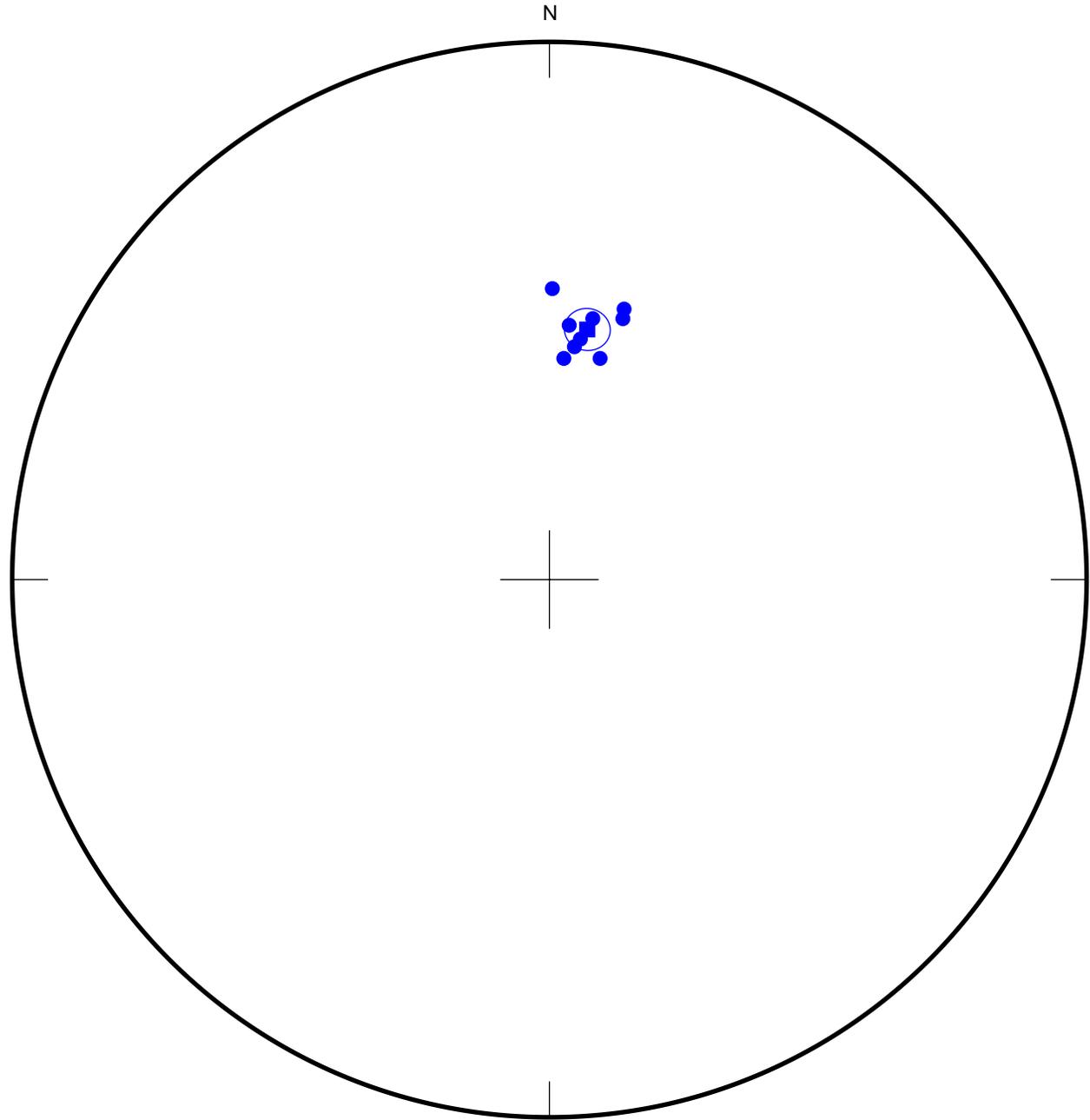
始良カルデラ噴出物

Site mean

OS1 mean

90

OS1AA
OS1CA
OS1EA
OS1IA
OS1JA
OS1KA
OS1LA
OS1MA
OS1NA

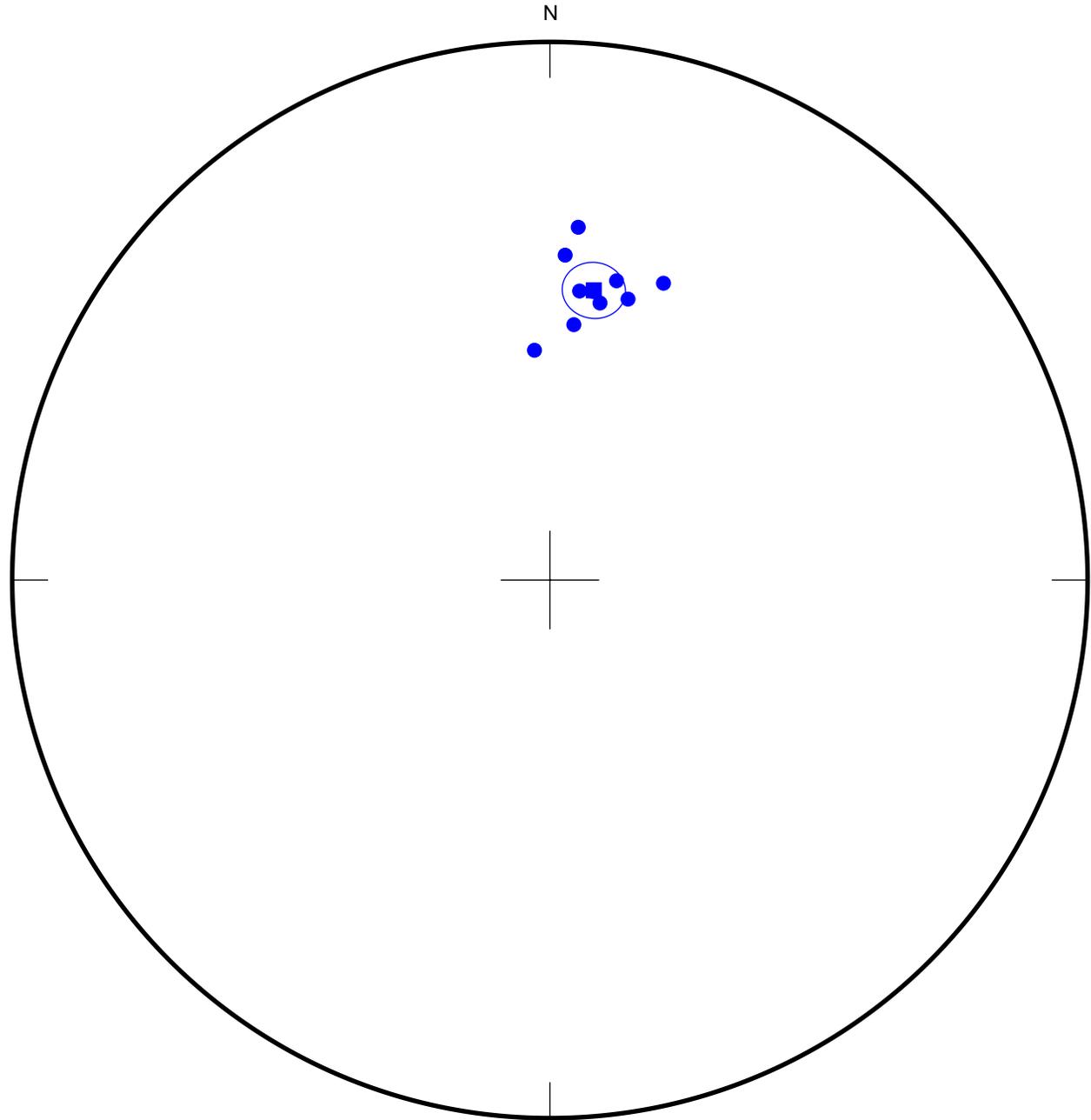


Dm = 8.6
Im = 47.7
a95 = 3.5
k = 216.0
R = 9.0
N = 9

TM2 mean

91

- TM2-1
- TM2-2
- TM2-3
- TM2-4
- TM2-5
- TM2-6
- TM2-8
- TM2-9
- TM2-10
- TM2-11

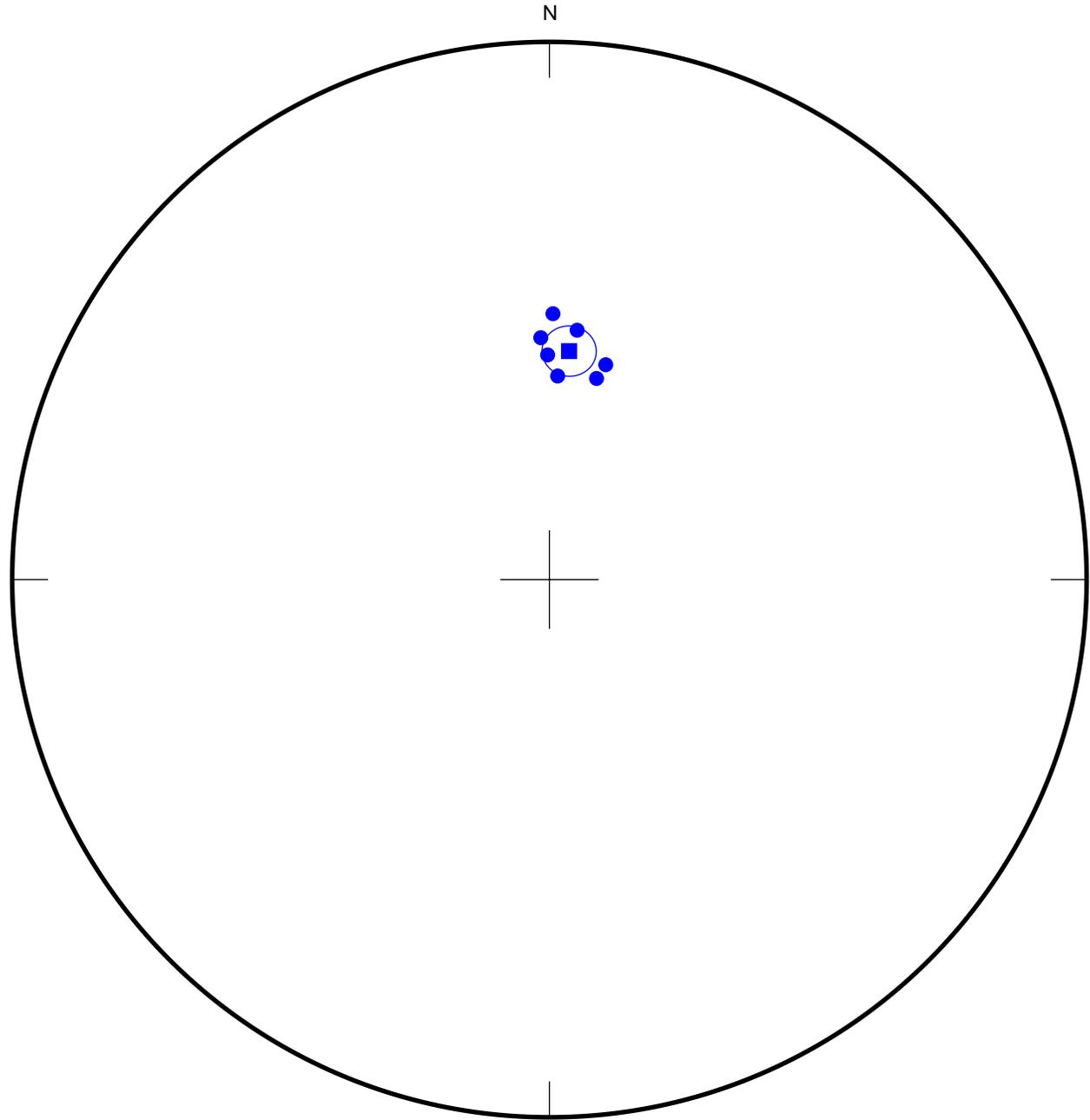


Dm = 8.6
Im = 41.0
a95 = 4.7
k = 107.4
R = 9.9
N = 10

TM1 mean

92

TM1AA
TM1BA
TM1CA
TM1DA
TM1EA
TM1FA
TM1GA



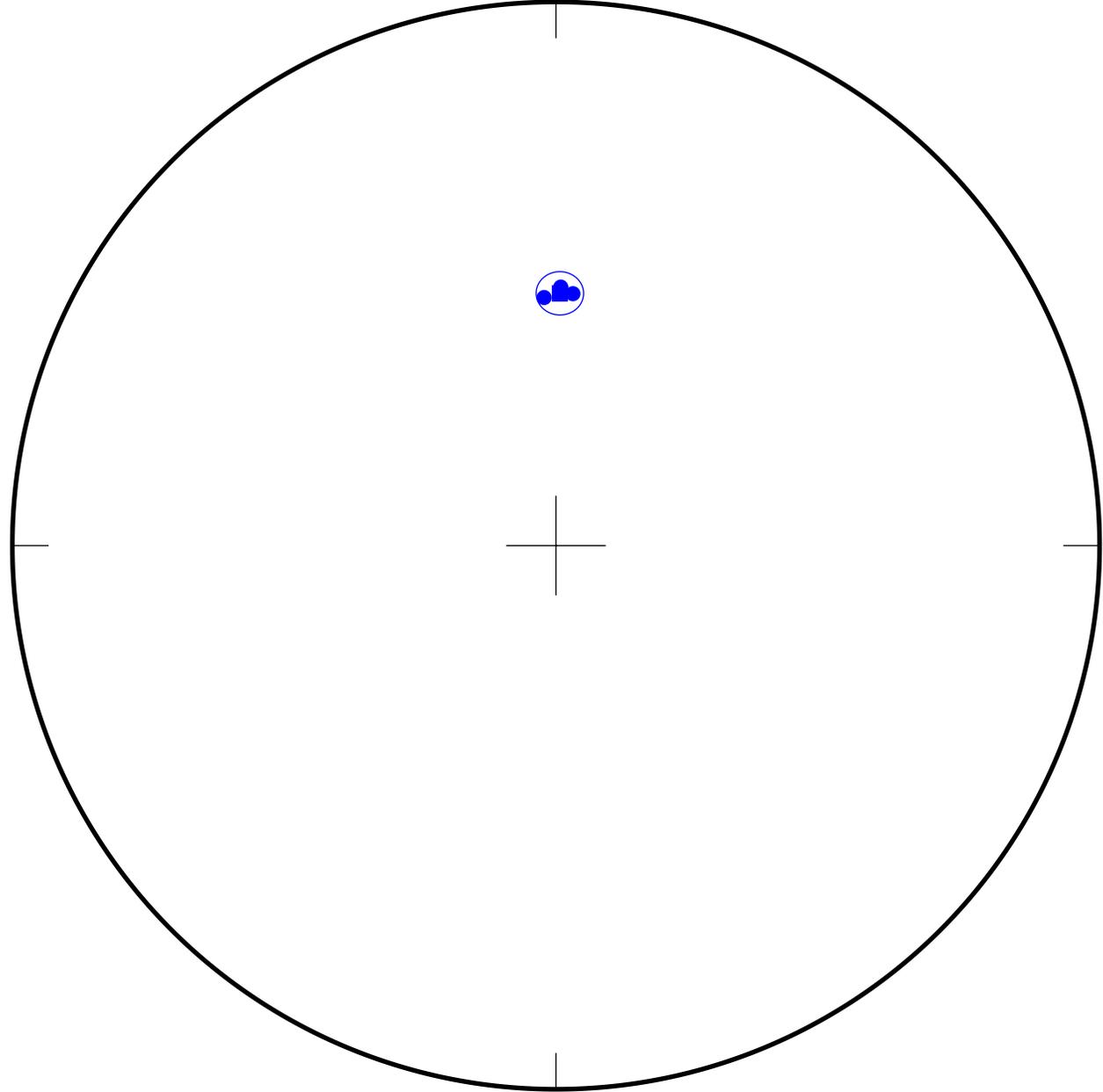
Dm = 4.9
Im = 51.6
a95 = 4.2
k = 206.4
R = 7.0
N = 7

TU1 mean

93

TU1-10
TU1-11
TU1-12

N

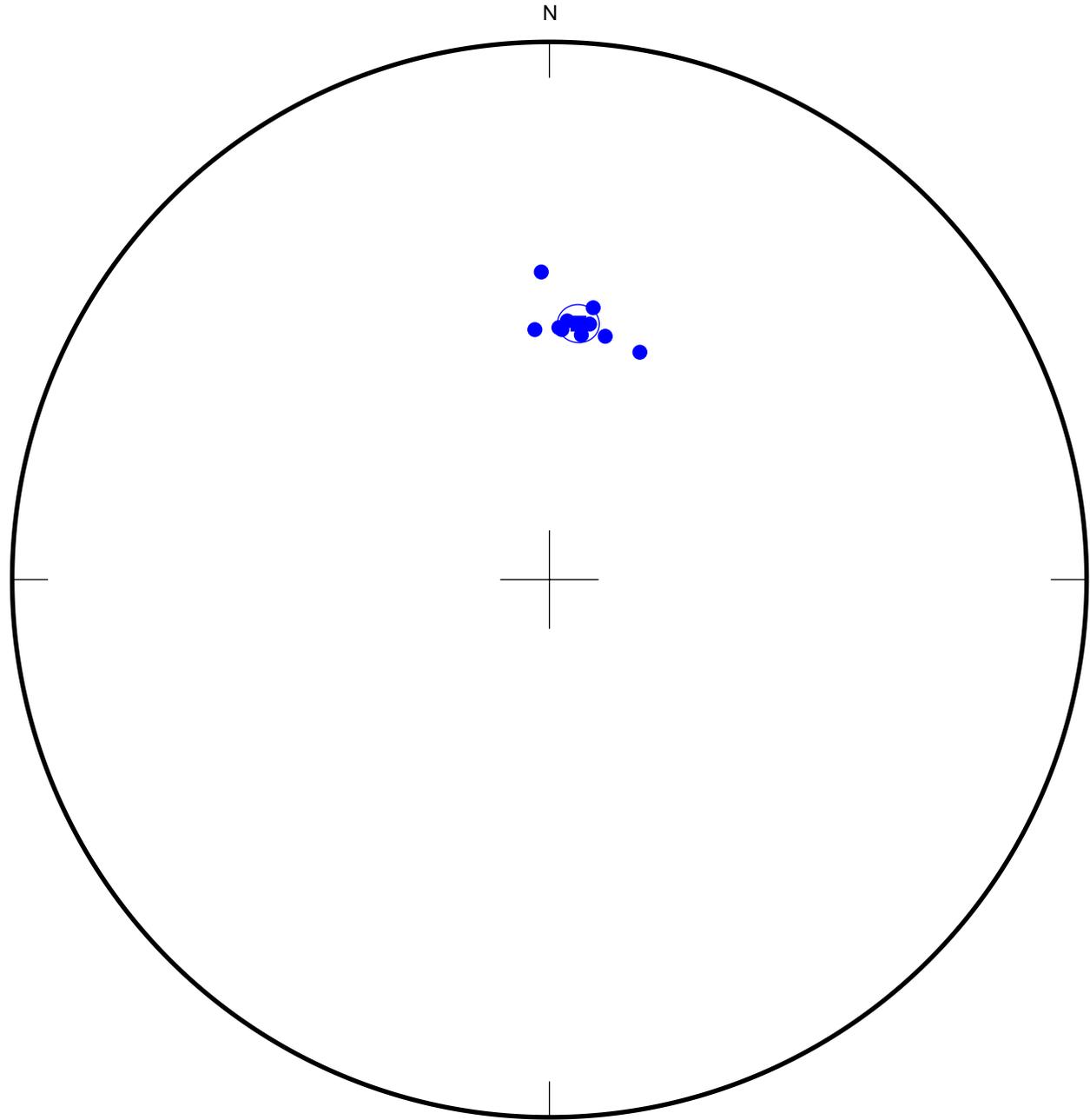


Dm = 0.9
Im = 48.2
a95 = 3.6
k = 1181.7
R = 3.0
N = 3

IT1 mean

94

- IT1-1
- IT1-2
- IT1-3
- IT1-4
- IT1-5
- IT1-6
- IT1-7
- IT1-8
- IT1-9
- IT1-10
- IT1-11

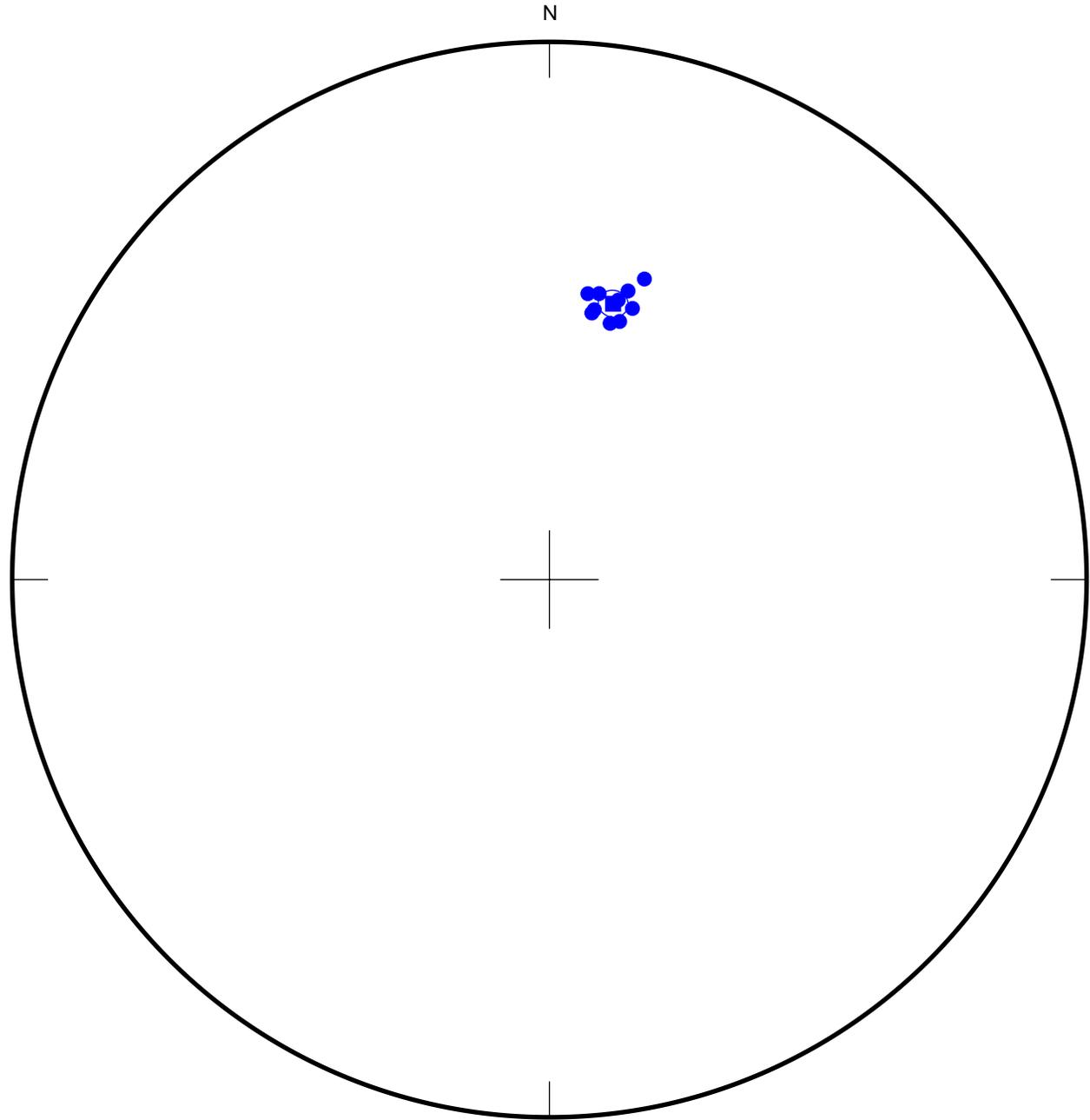


Dm = 6.5
Im = 46.9
a95 = 3.2
k = 206.9
R = 11.0
N = 11

IT2 mean

95

- IT2-1A
- IT2-2A
- IT2-3A
- IT2-4A
- IT2-5A
- IT2-6A
- IT2-7A
- IT2-8A
- IT2-9A
- IT2-10A



Dm = 13.0

Im = 42.6

a95 = 2.2

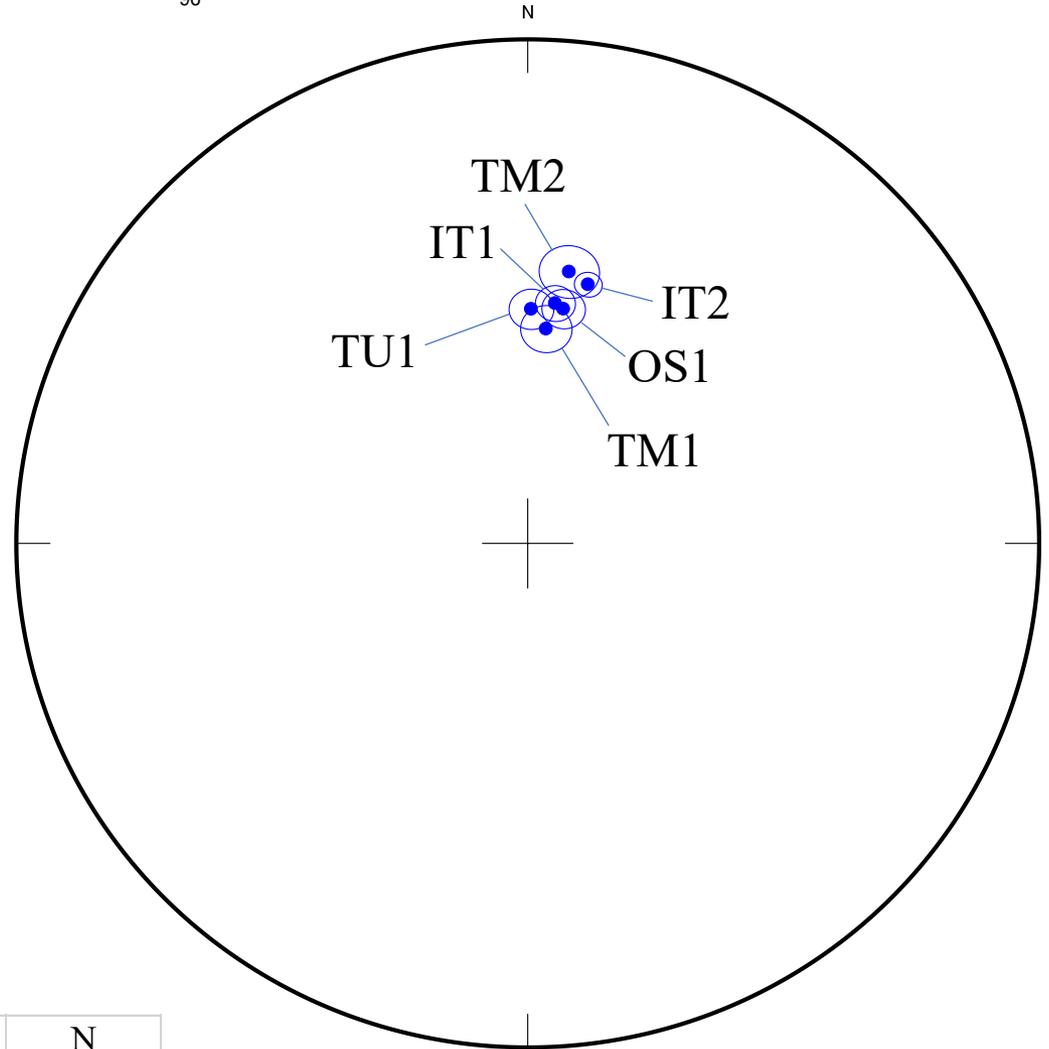
k = 465.4

R = 10.0

N = 10

Aira site mean

96



sample ID	Dm	Im	$\alpha 95$	k	N
IT2	13.0	42.6	2.2	465.4	10
IT1	6.5	46.9	3.2	206.9	11
TU1	0.9	48.2	3.6	1181.7	3
TM1	4.9	51.6	4.2	206.4	7
TM2	8.6	41.0	4.7	107.4	10
OS1	8.6	47.7	3.5	216.0	9

Mamaku/Ohakuri火砕流

Precursor : OH3-1

Oh3-1-1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

W Up

98

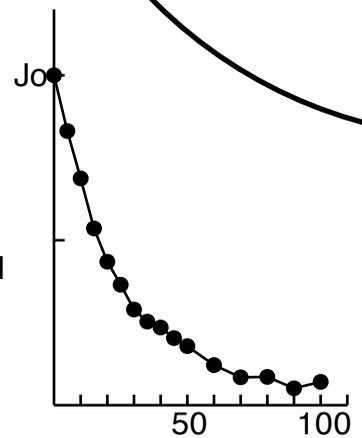
Fit from 20
to 100
Dec = 16.9
Inc = -66.0
d2 = 8.8
d3 = 3.3
MAD= 9.4

S

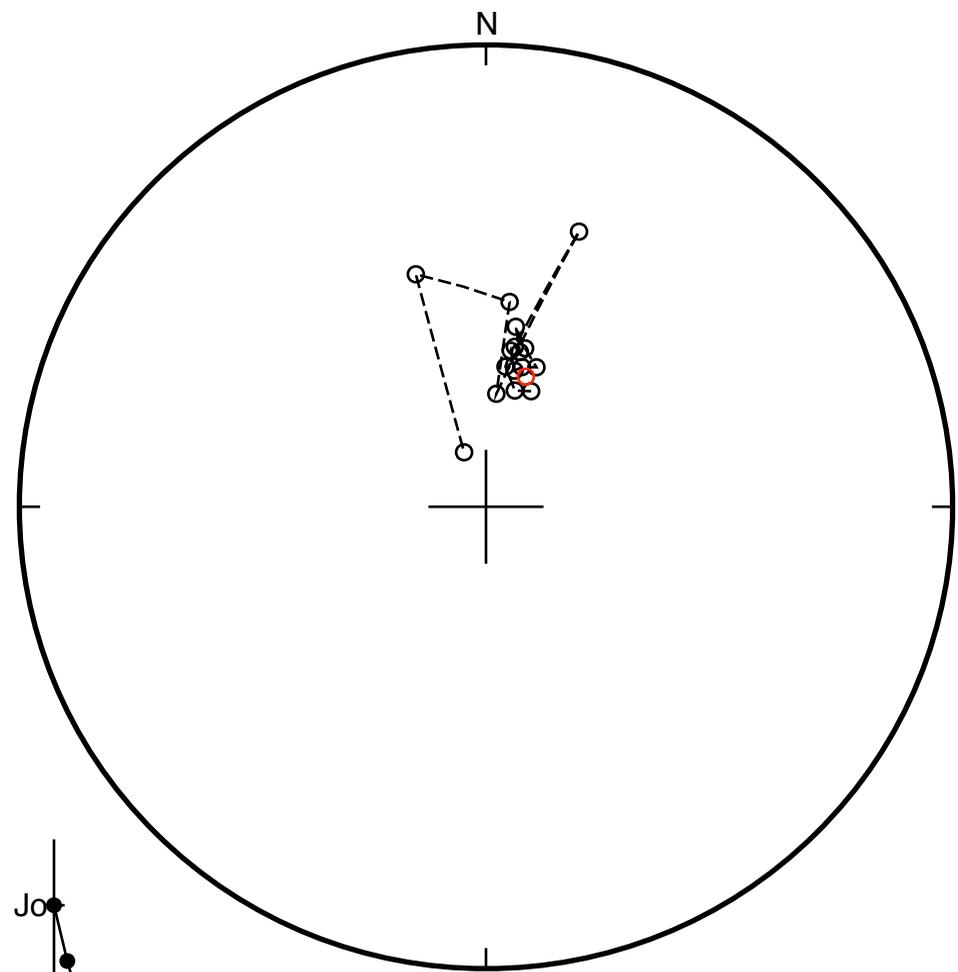
N

E Down

Div.= 1.0e-02

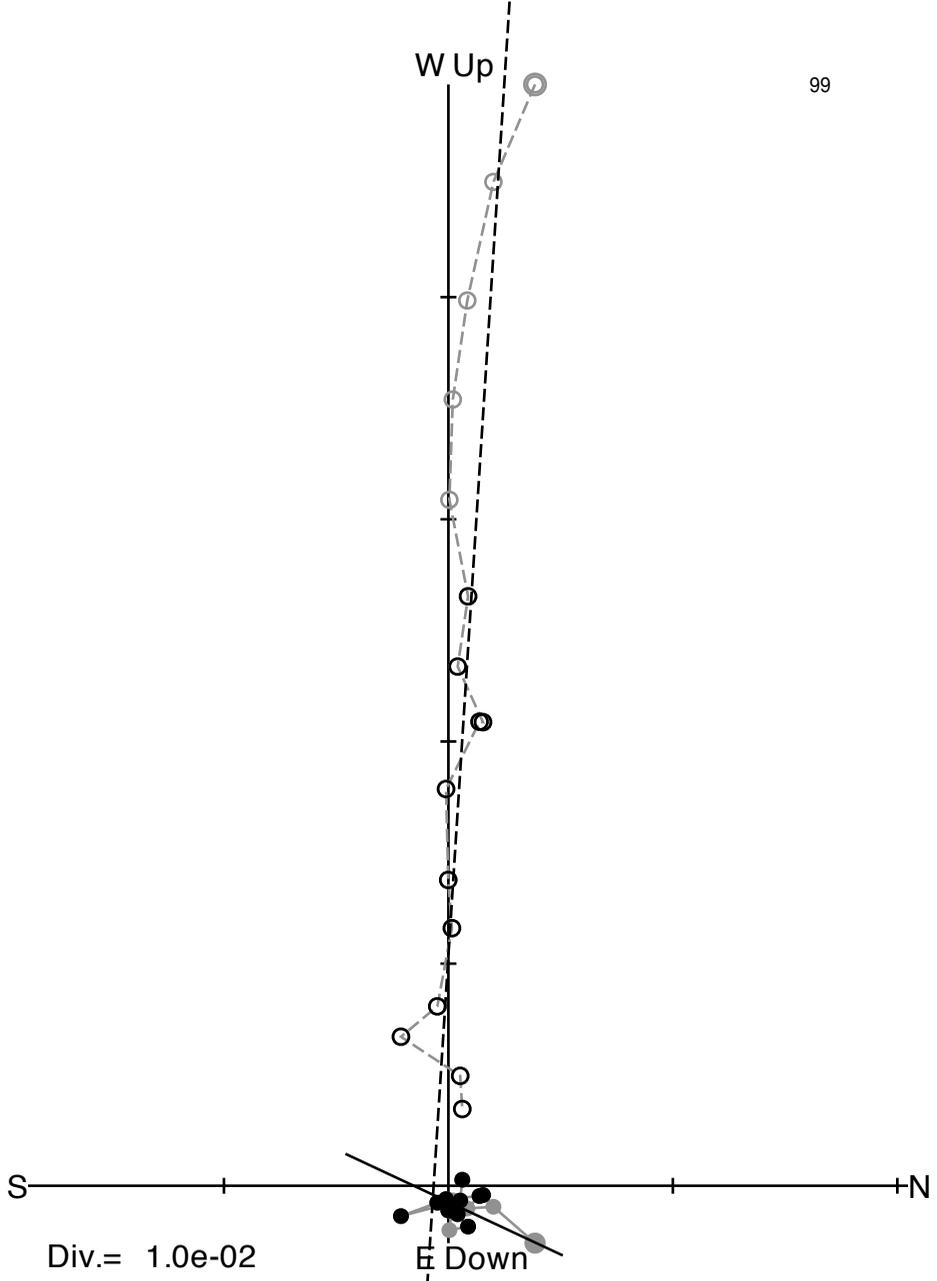


Jo= 4.75e-02

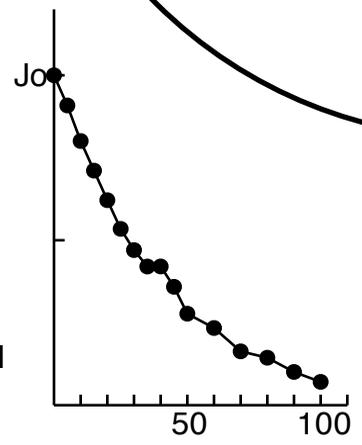
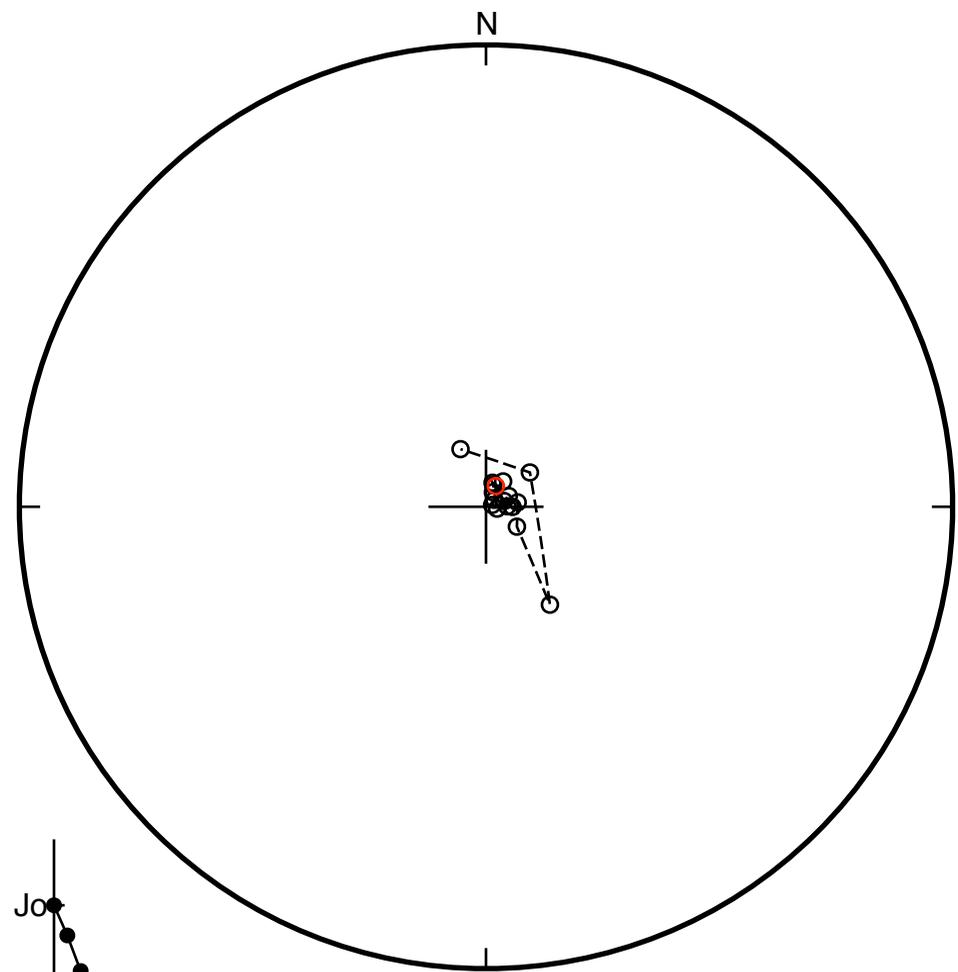


Oh3-1-2
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

Fit from 25
to 100
Dec = 25.3
Inc = -86.0
d2 = 6.7
d3 = 2.4
MAD= 7.1



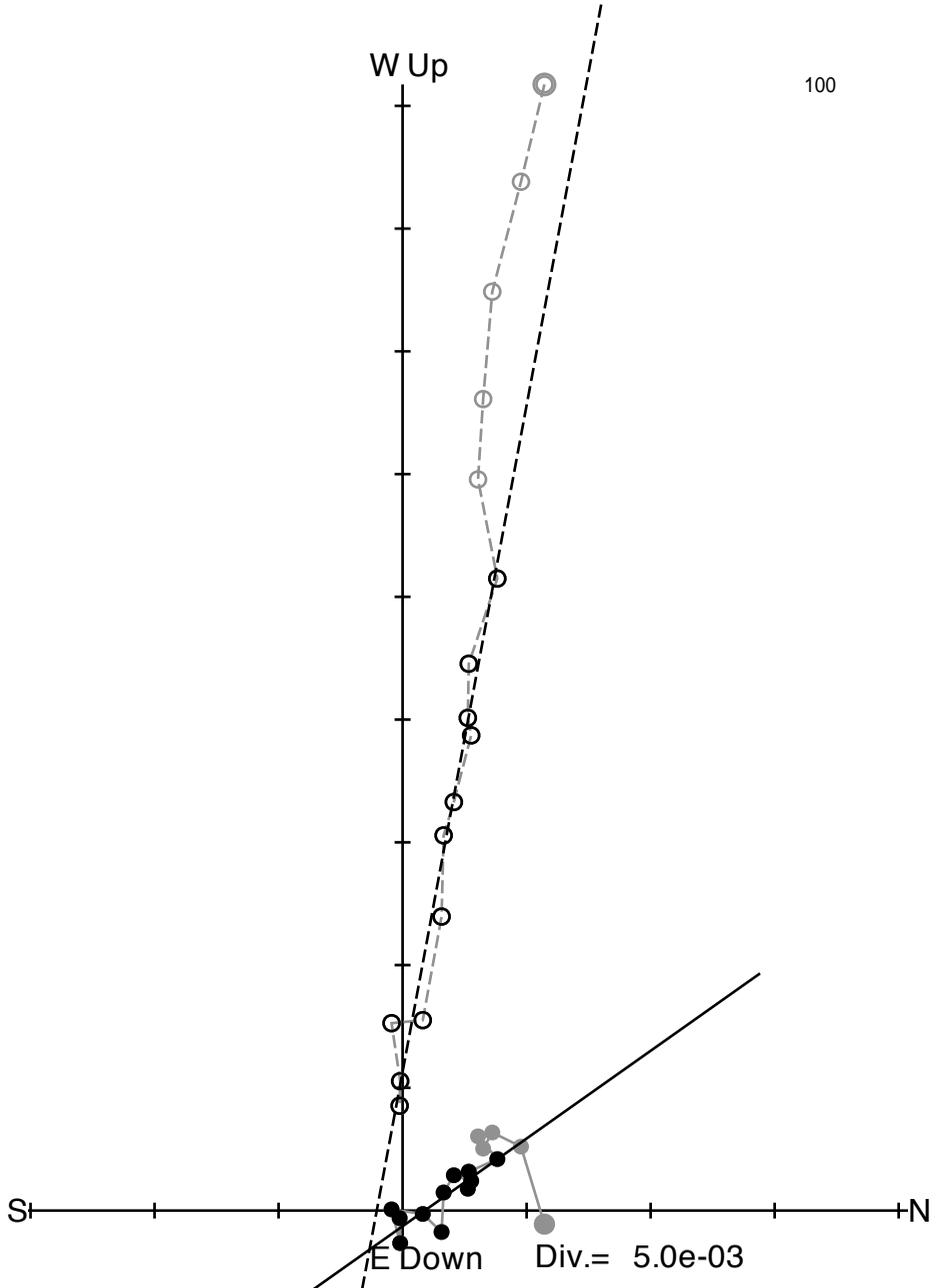
99



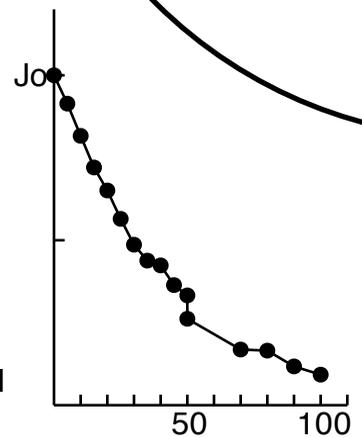
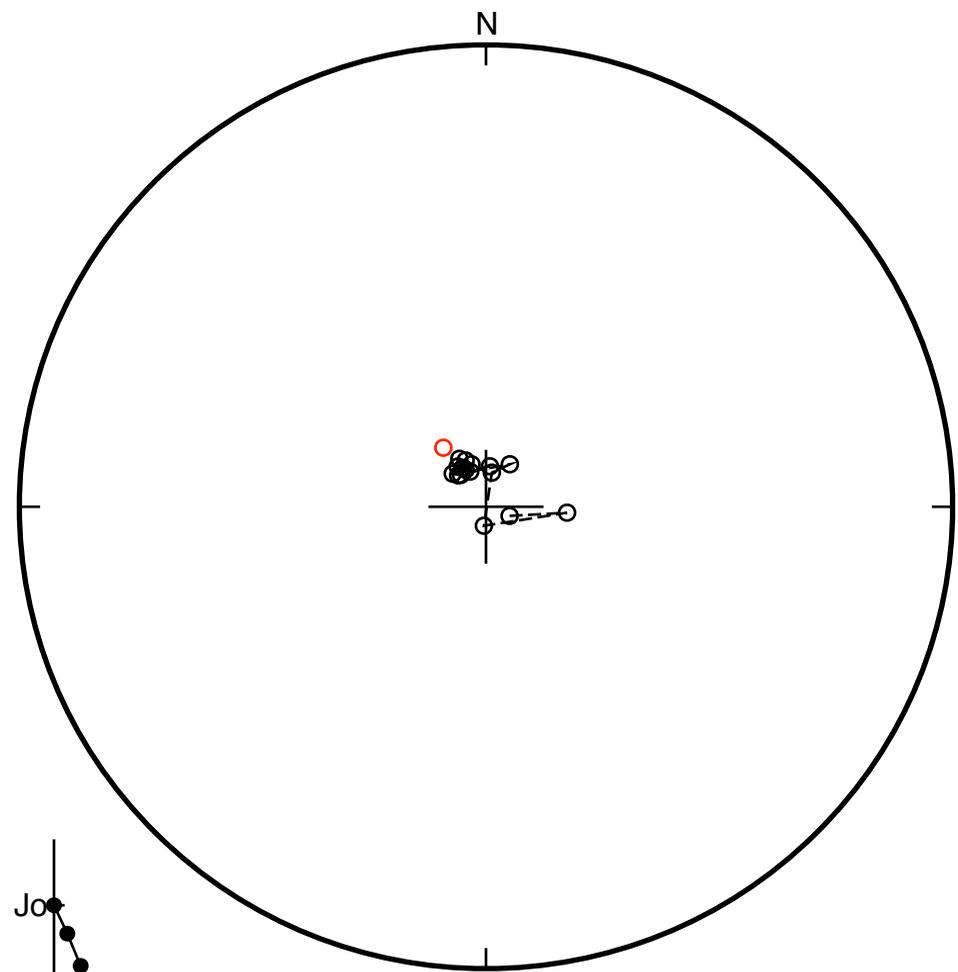
Jo= 4.98e-02

Oh3-1-3
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
50
70
80
90
100

Fit from 25
to 100
Dec = -35.6
Inc = -77.2
d2 = 4.0
d3 = 2.4
MAD= 4.7



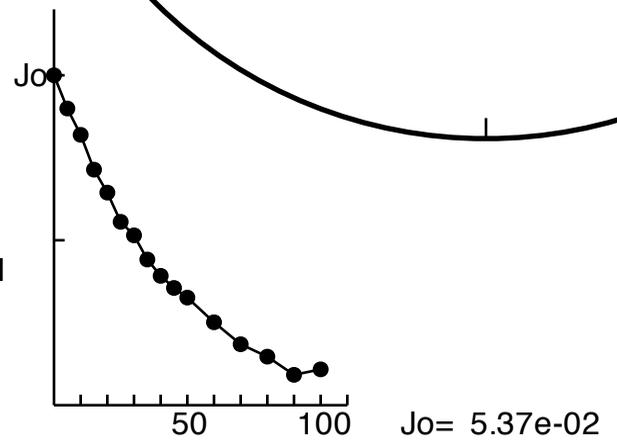
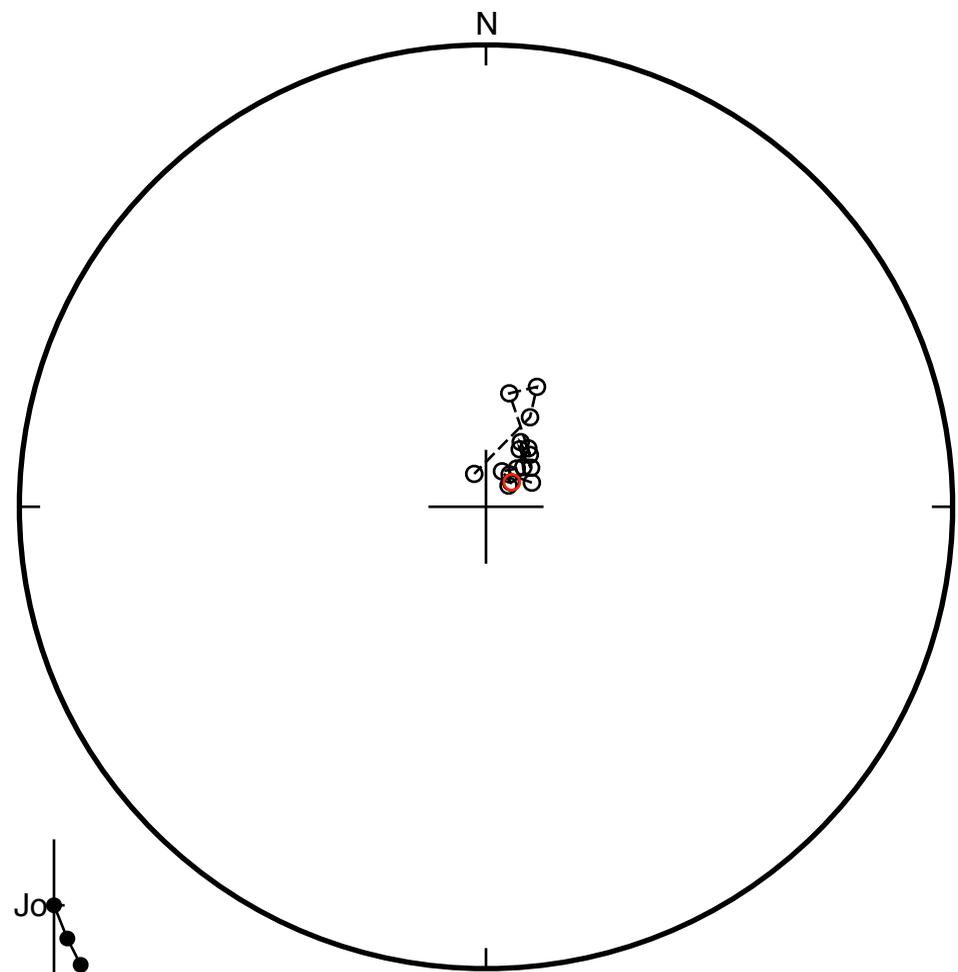
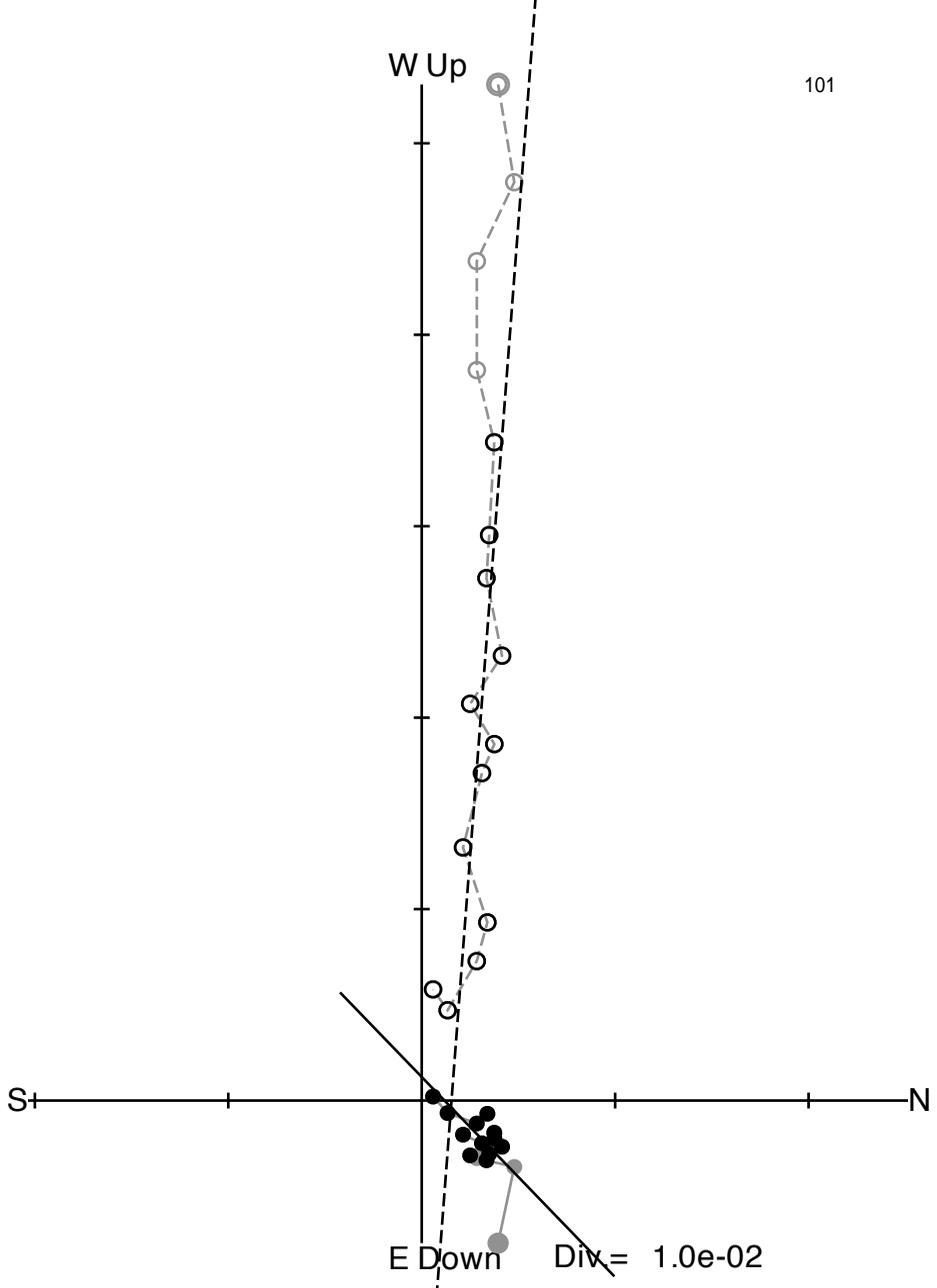
100



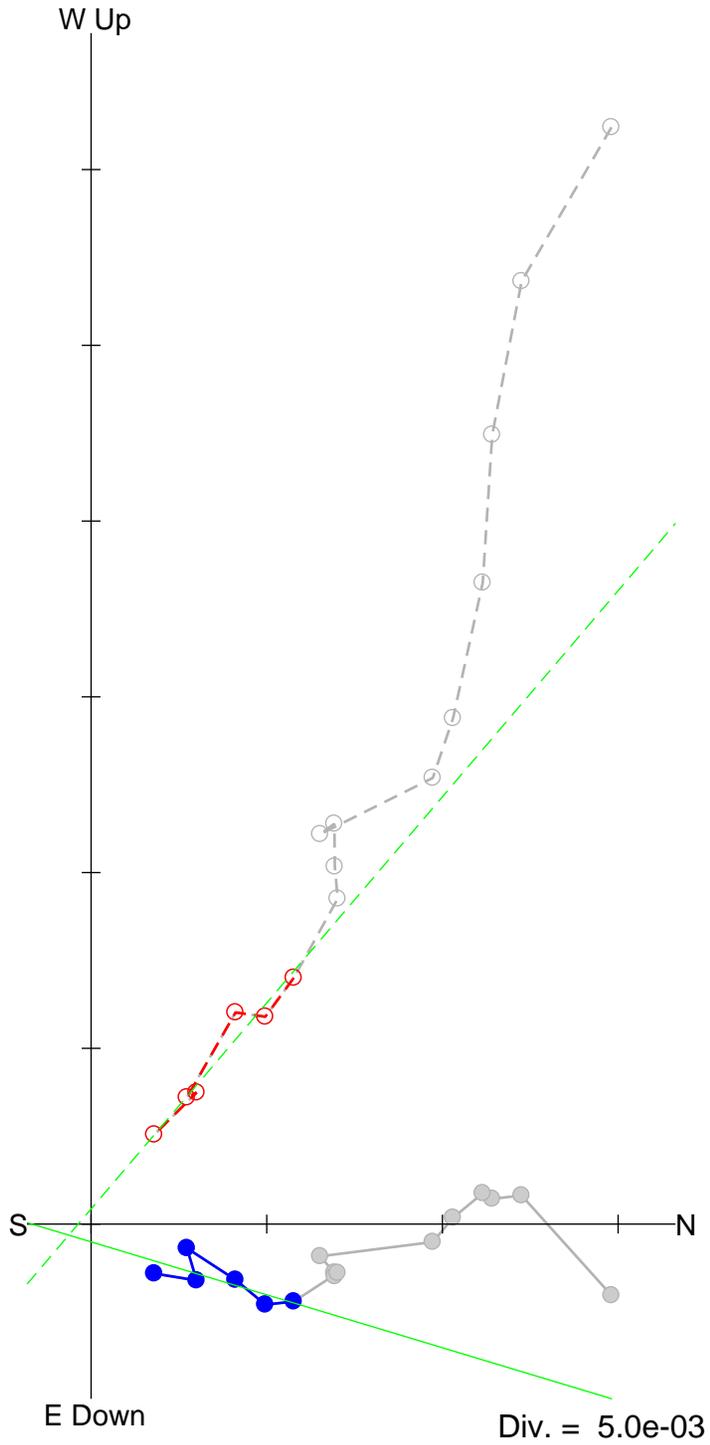
Jo = 4.62e-02

Oh3-1-4
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

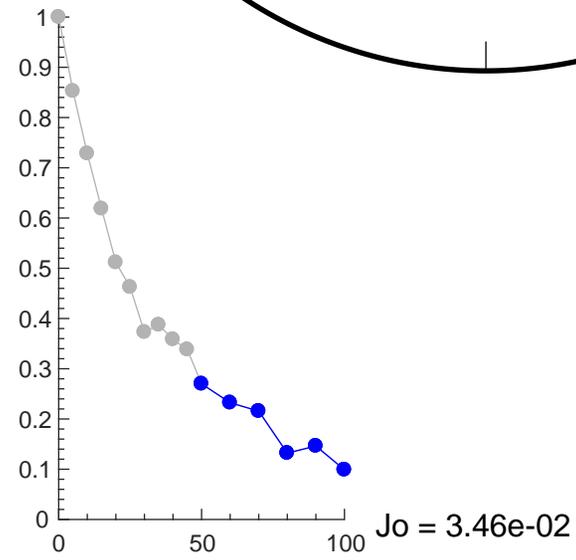
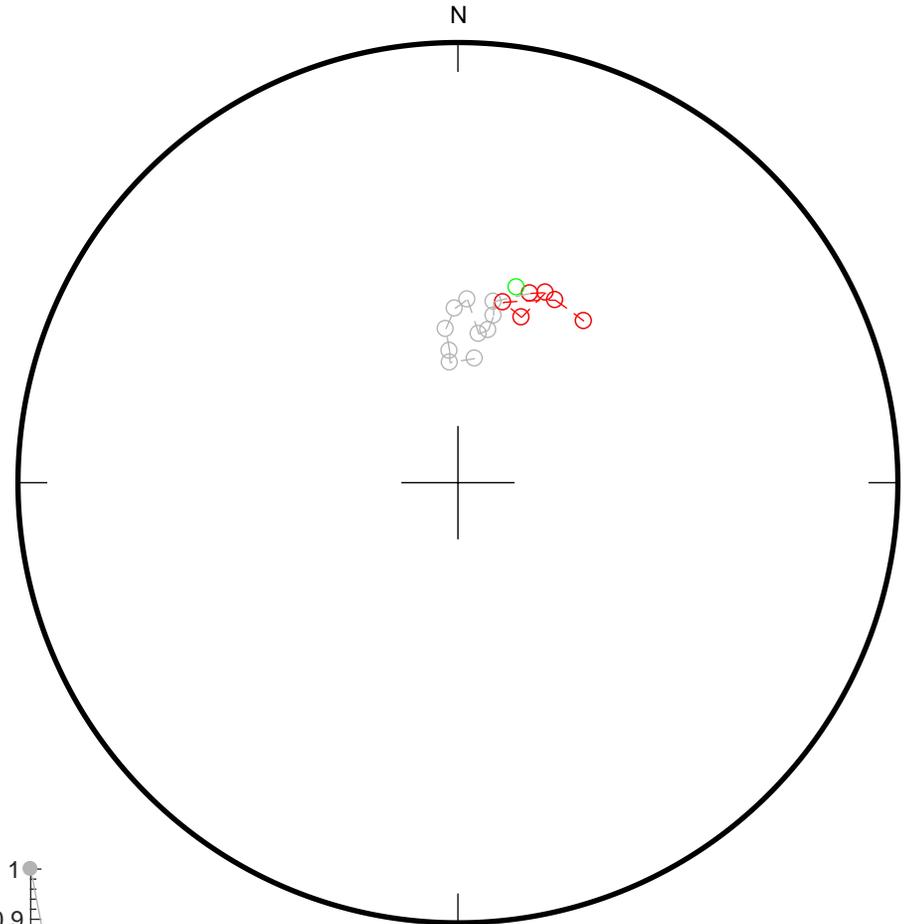
Fit from 20
to 100
Dec = 46.3
Inc = -83.8
d2 = 4.7
d3 = 3.5
MAD= 5.8



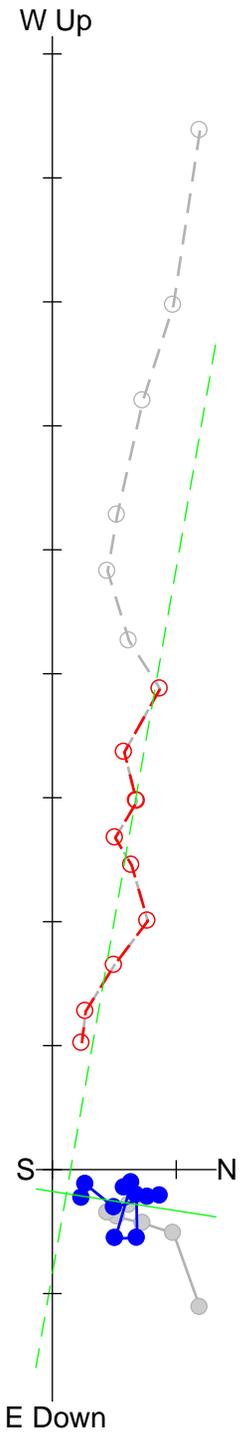
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 50
to 100
Dec = 16.8
Inc = -48.3
MAD = 11.3

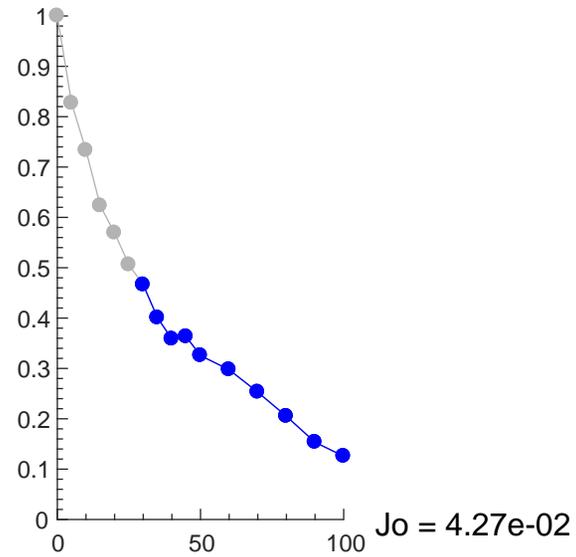
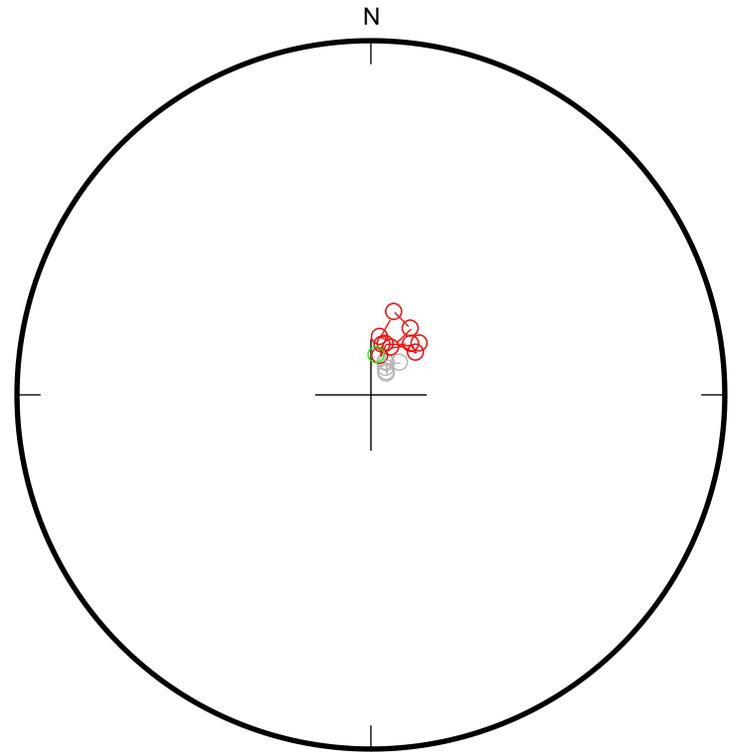


0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Div. = 5.0e-03

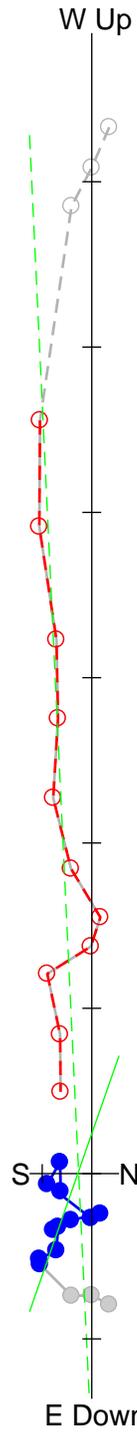
Fit from 30
to 100
Dec = 8.8
Inc = -79.9
MAD = 12.1



Oh3-1-7 (in situ)

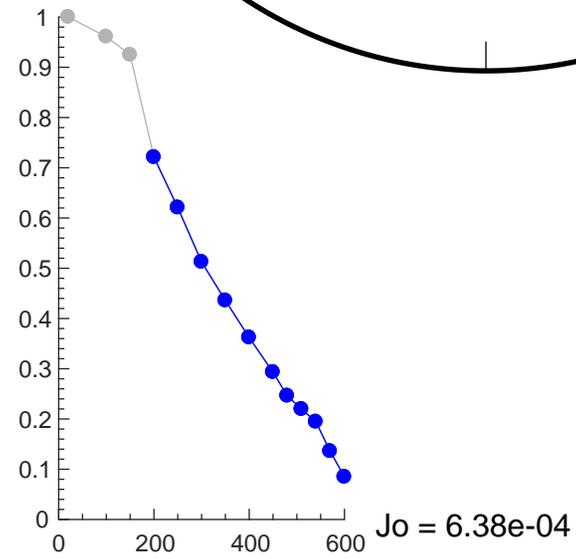
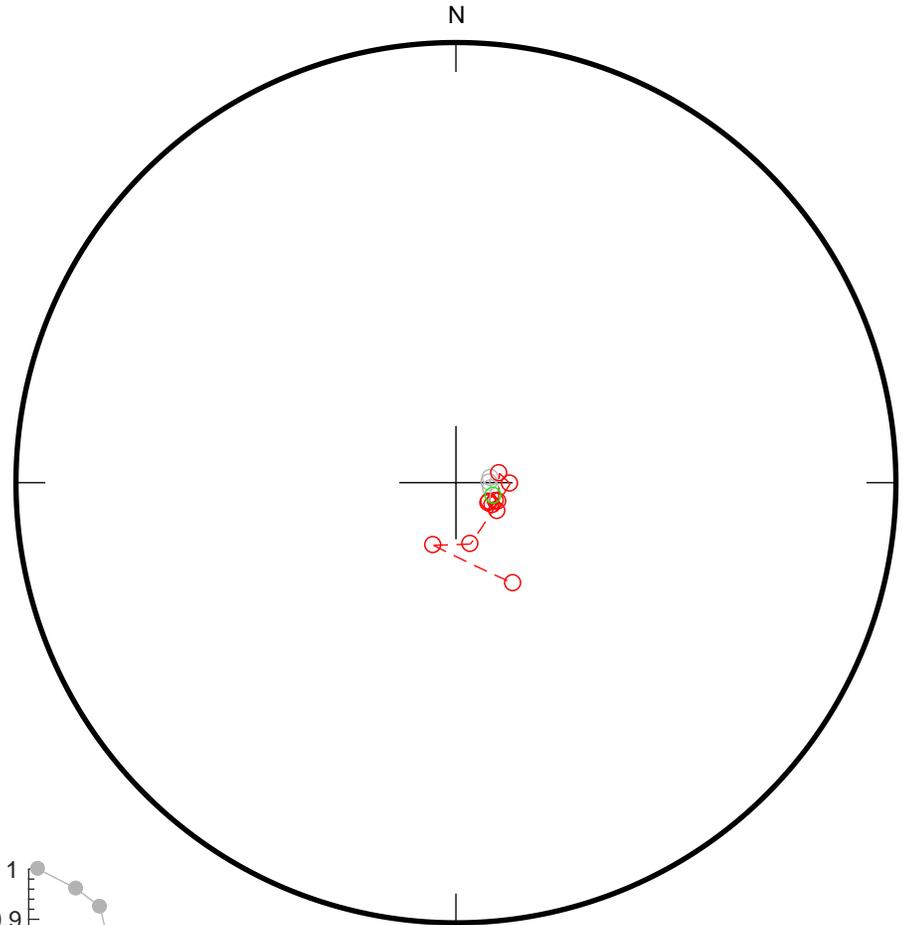
104

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600

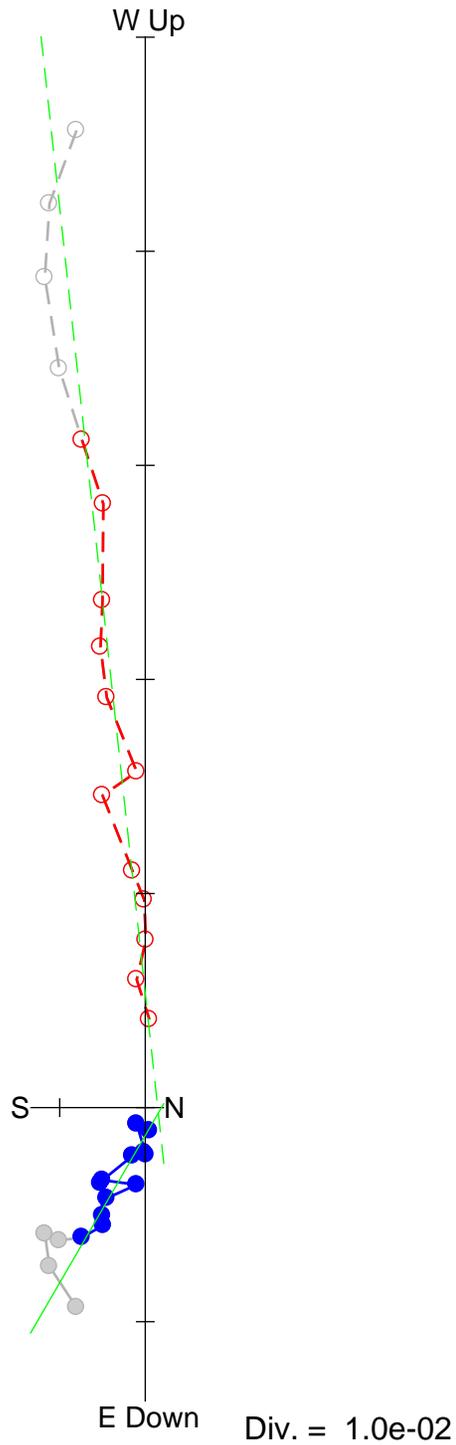


Fit from 200
to 600
Dec = 109.3
Inc = -81.8
MAD = 5.5

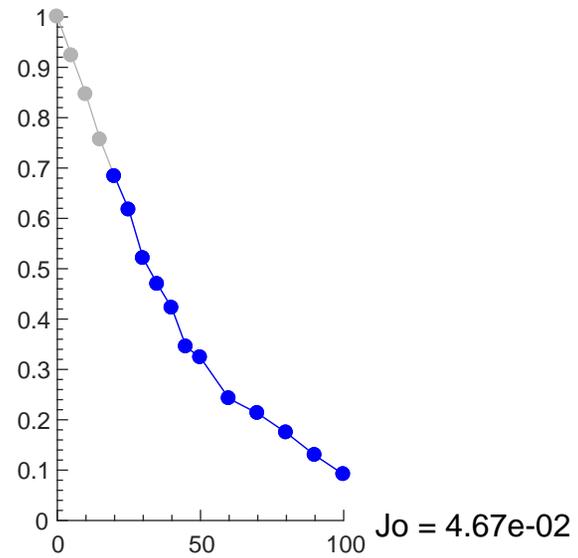
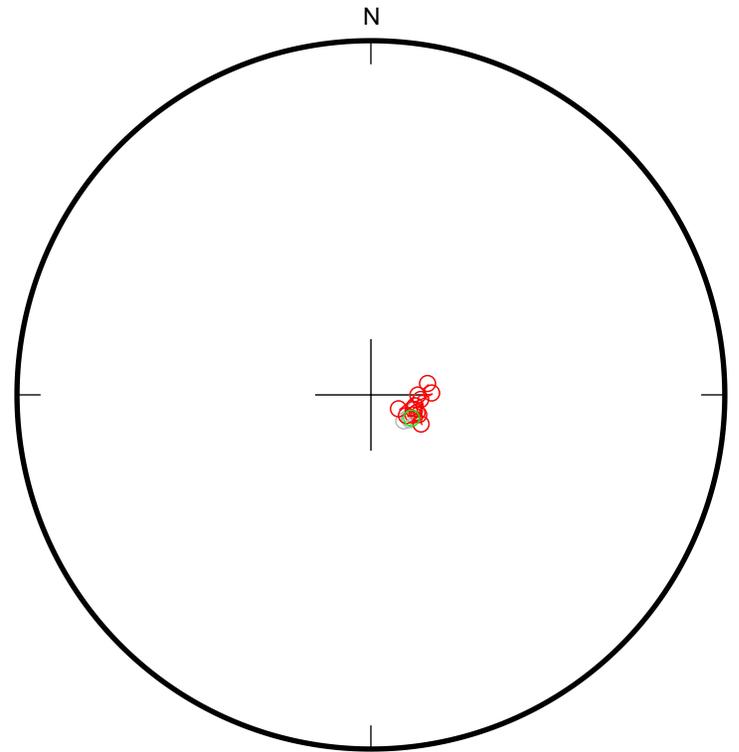
Div. = 1.0e-04



0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 20
to 100
Dec = 120.2
Inc = -77.8
MAD = 3.9

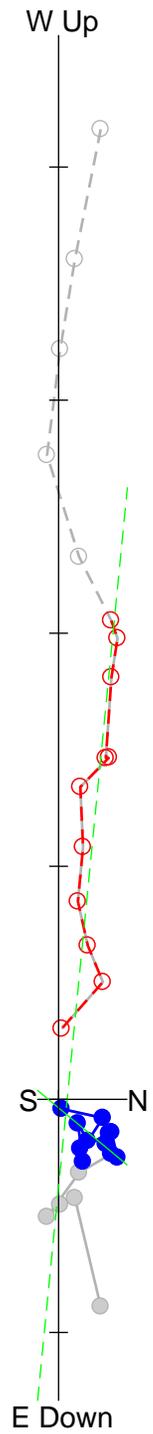


OH3-1-10

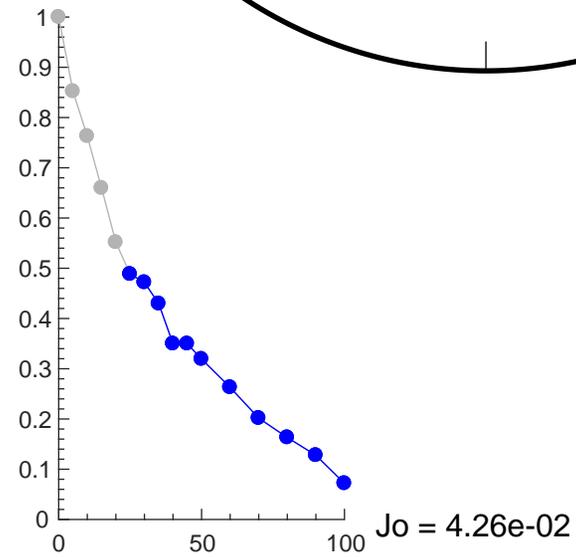
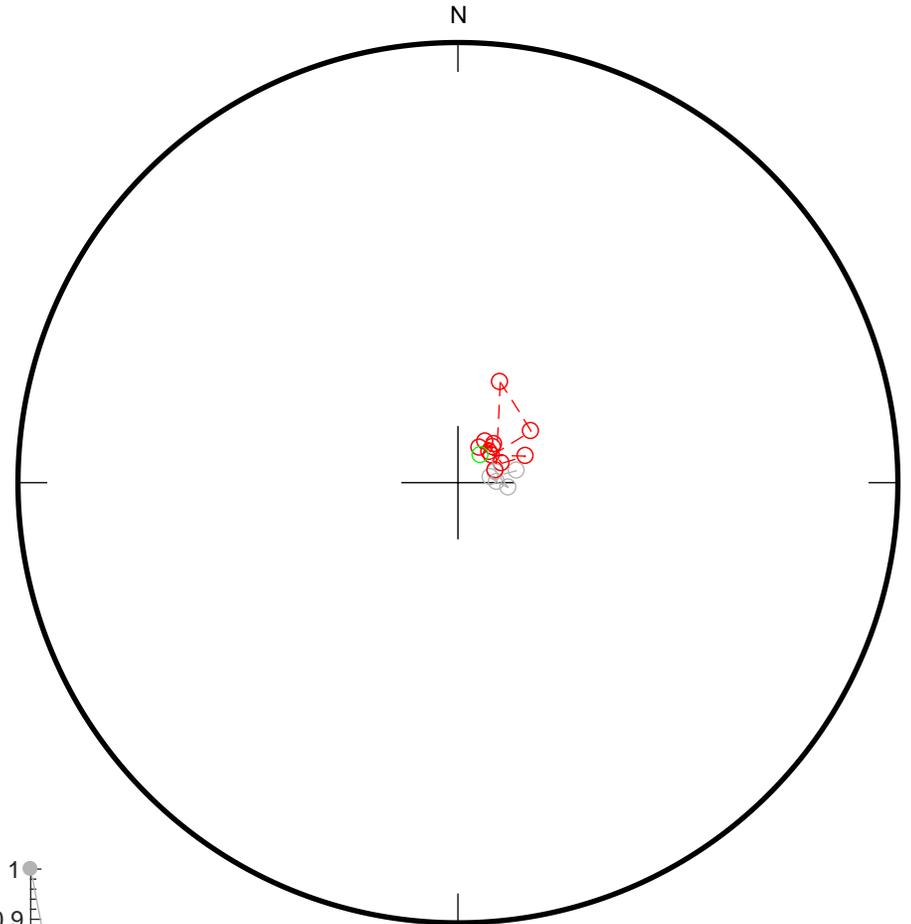
106

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

Fit from 25
to 100
Dec = 39.8
Inc = -82.7
MAD = 7.0



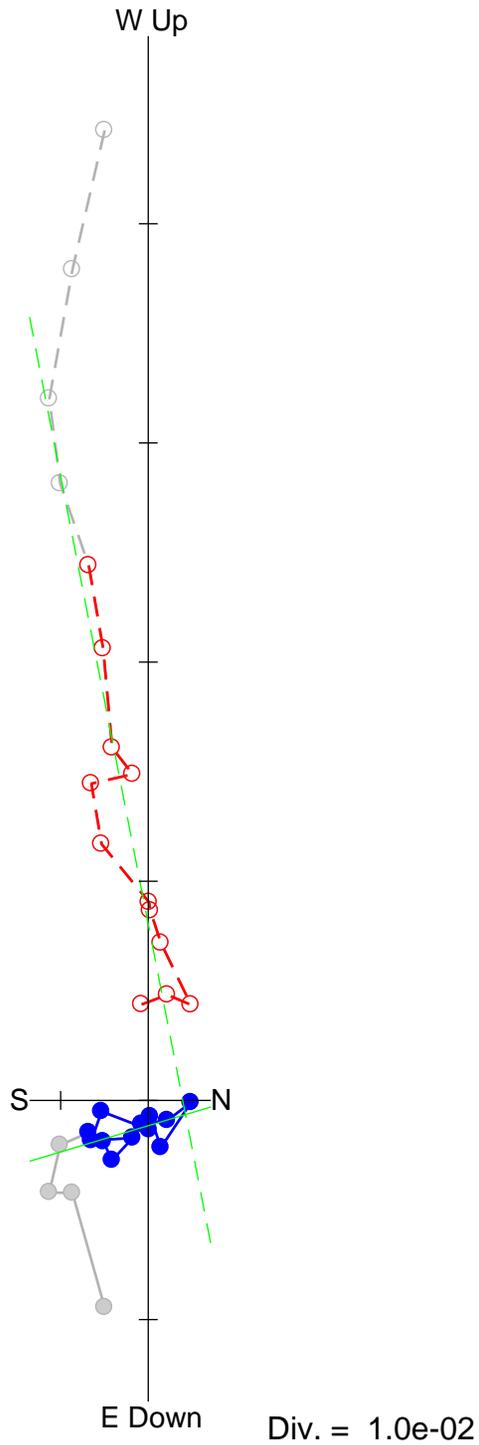
Div. = 1.0e-02



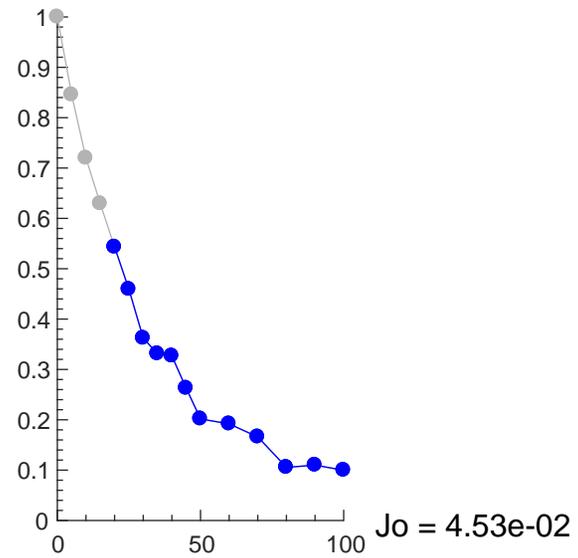
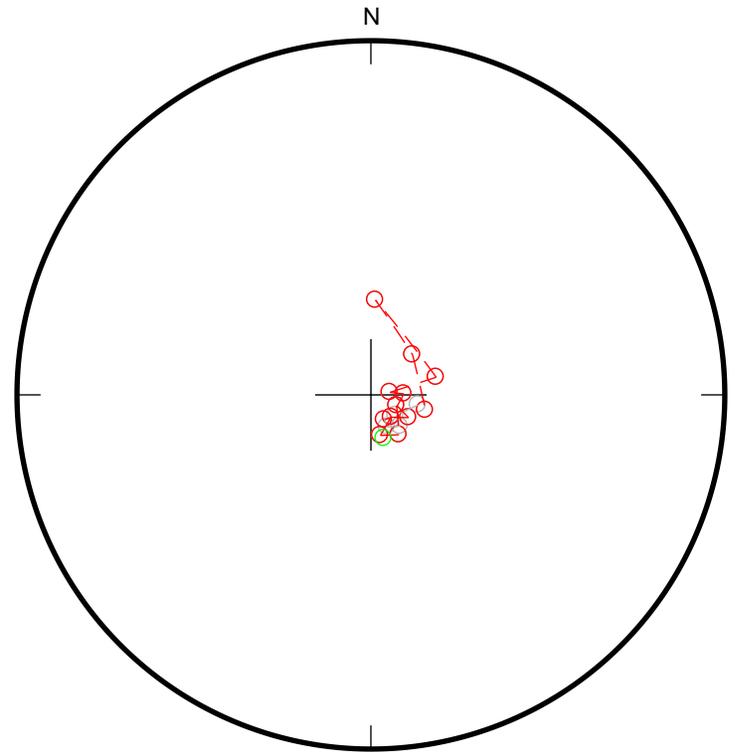
OH3-1-11

107

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

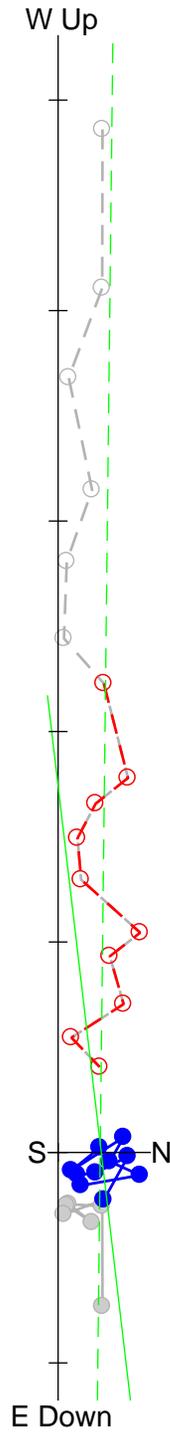


Fit from 20
to 100
Dec = 163.4
Inc = -78.5
MAD = 8.8

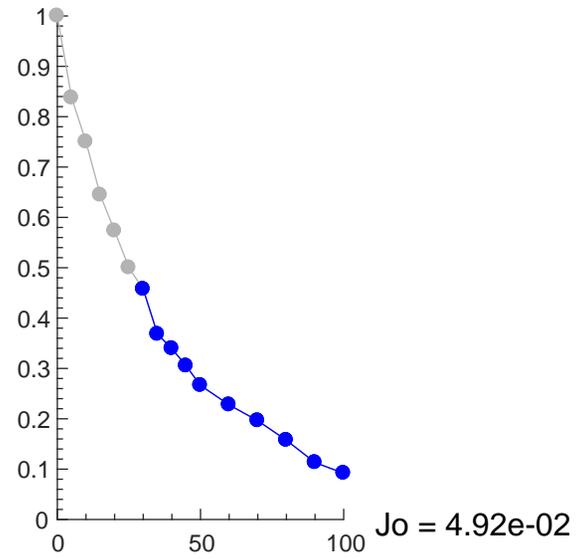
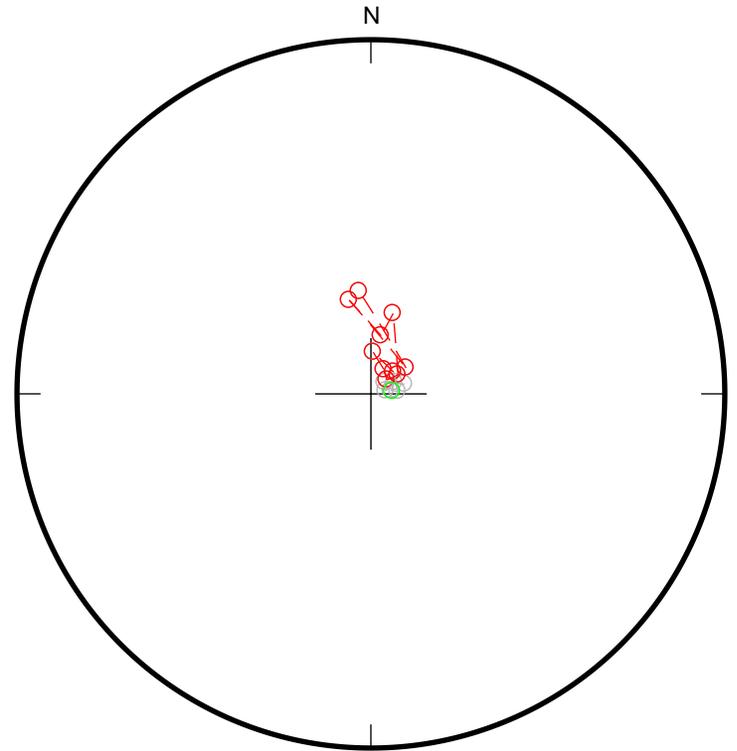


0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

Fit from 30
to 100
Dec = 83.3
Inc = -84.4
MAD = 12.1



Div. = 1.0e-02



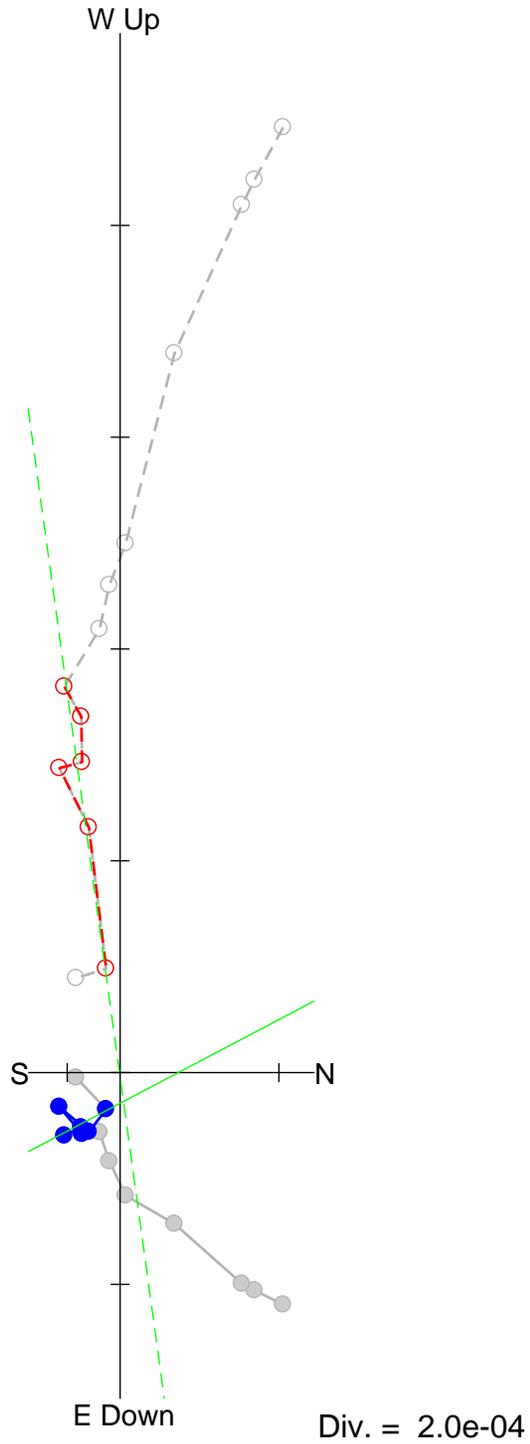
Mamaku/Ohakuri 火碎流

Unit 1 : OH3-2

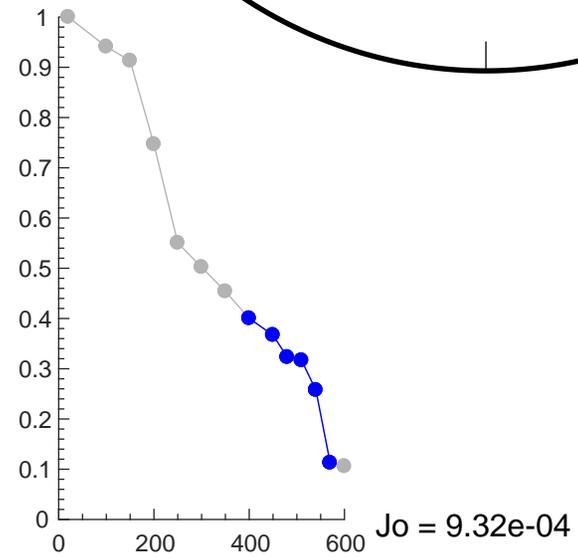
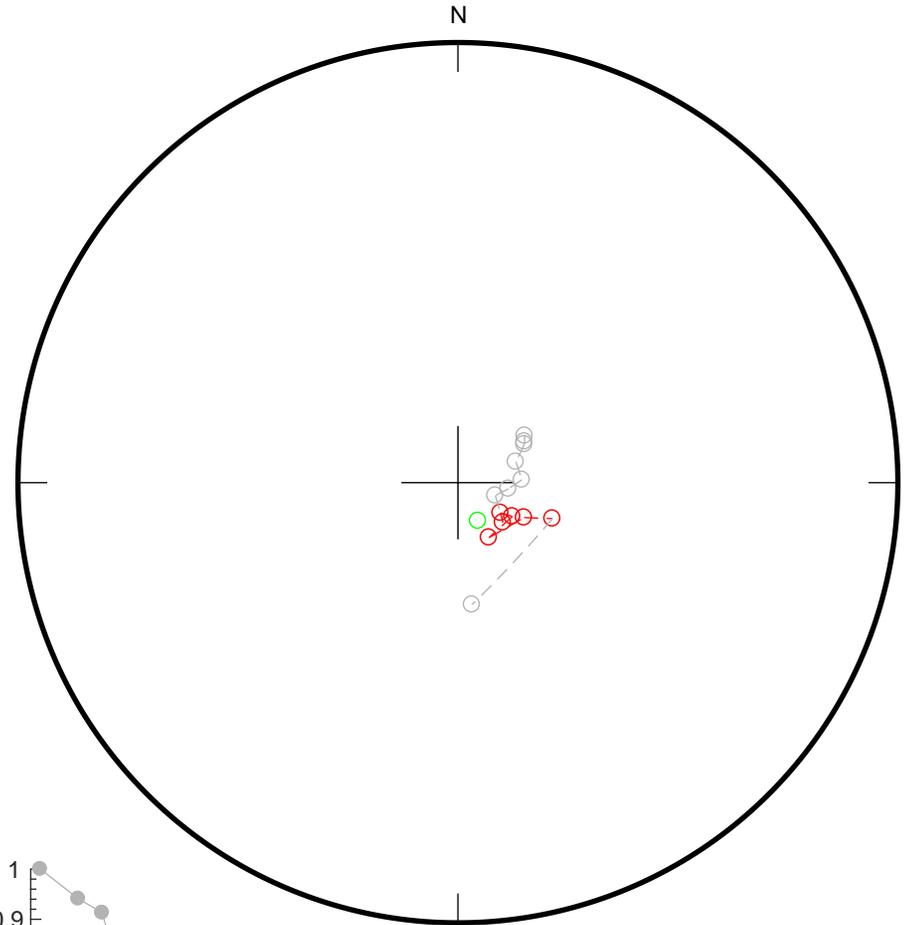
Oh3-2-1 (in situ)

110

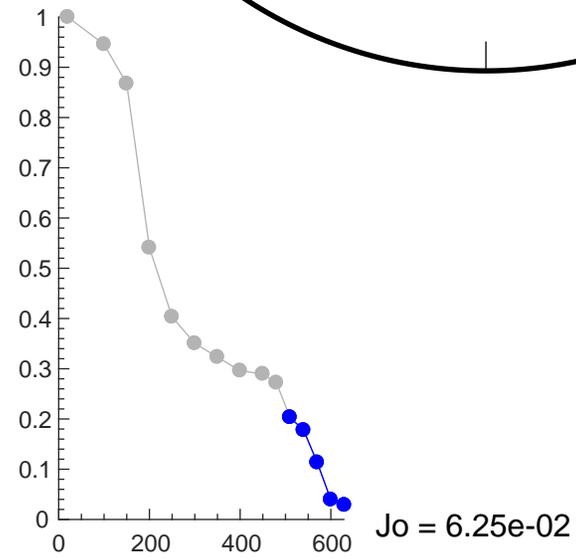
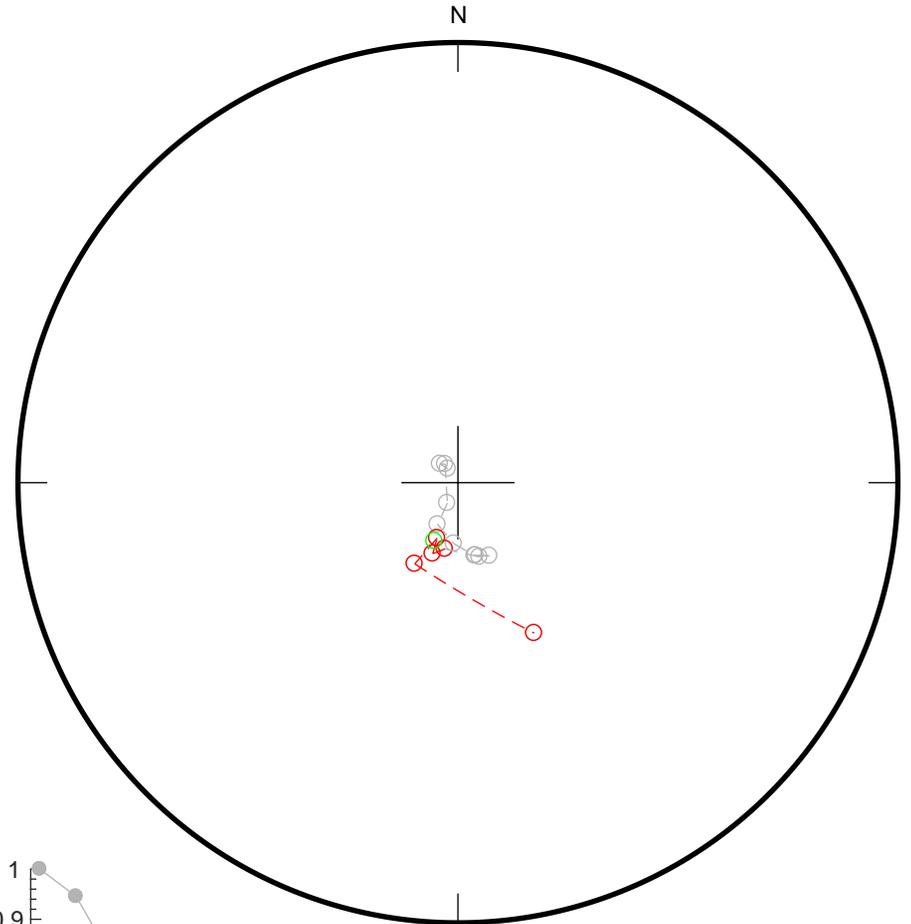
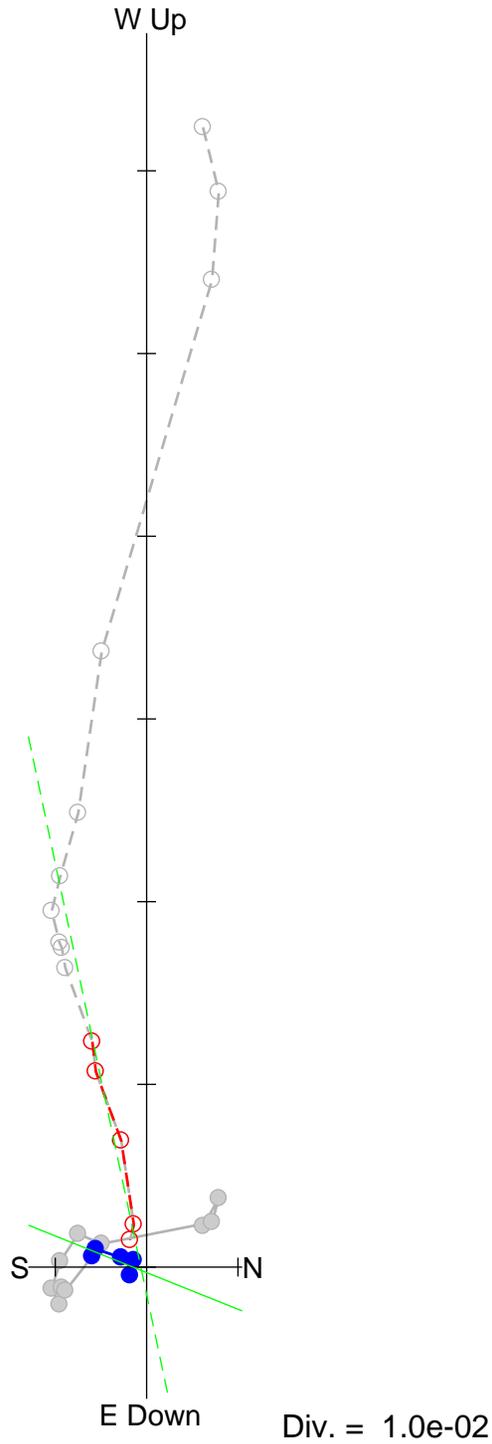
20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



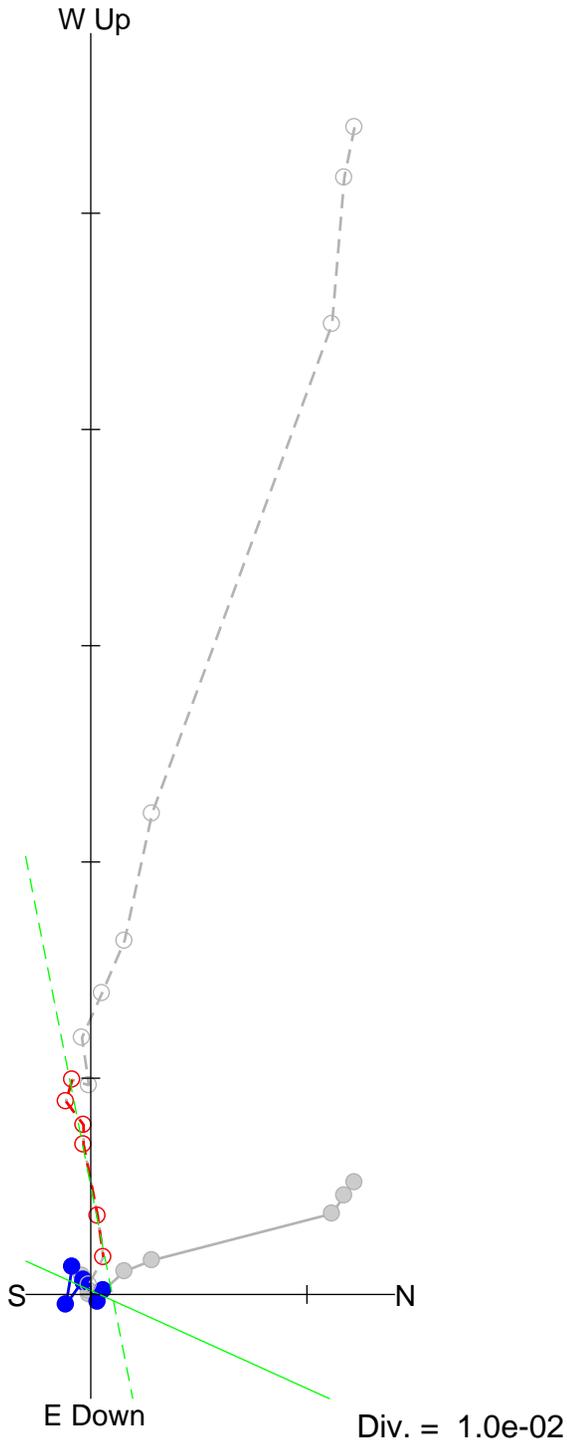
Fit from 400
to 570
Dec = 152.2
Inc = -81.2
MAD = 8.0



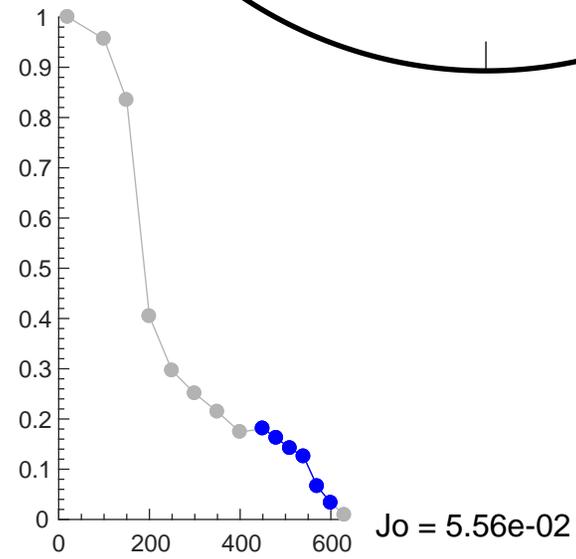
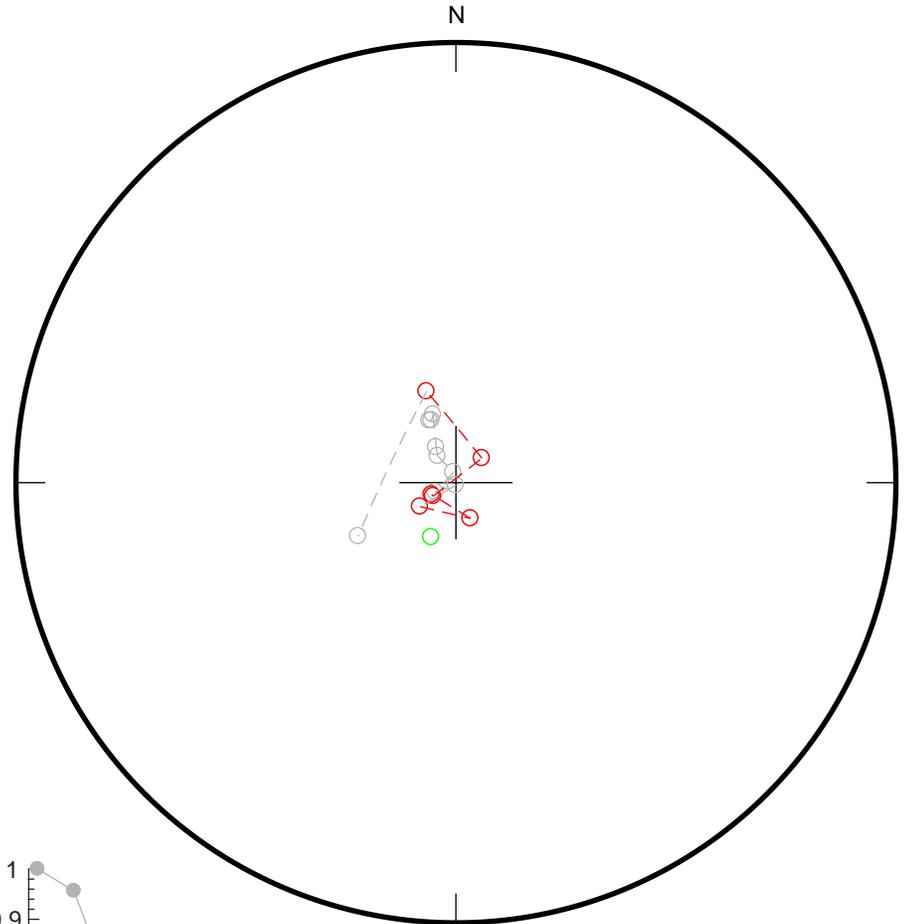
- 20
- 100
- 150
- 200
- 250
- 300
- 350
- 400
- 450
- 480
- 510
- 540
- 570
- 600
- 630



20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600
 630



Fit from 450
 to 600
 Dec = 204.4
 Inc = -77.8
 MAD = 11.0



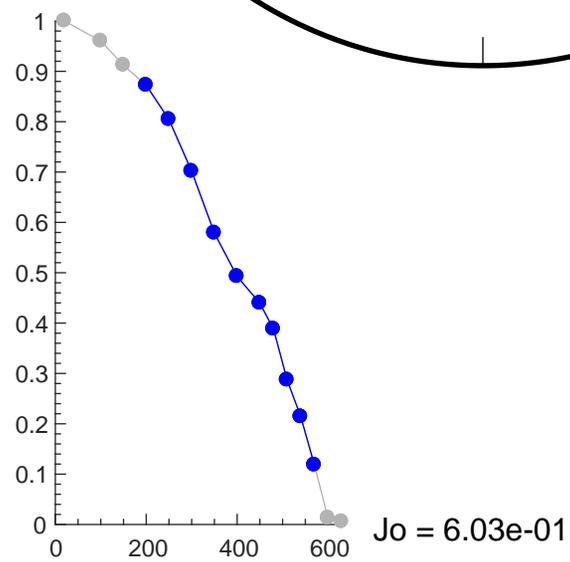
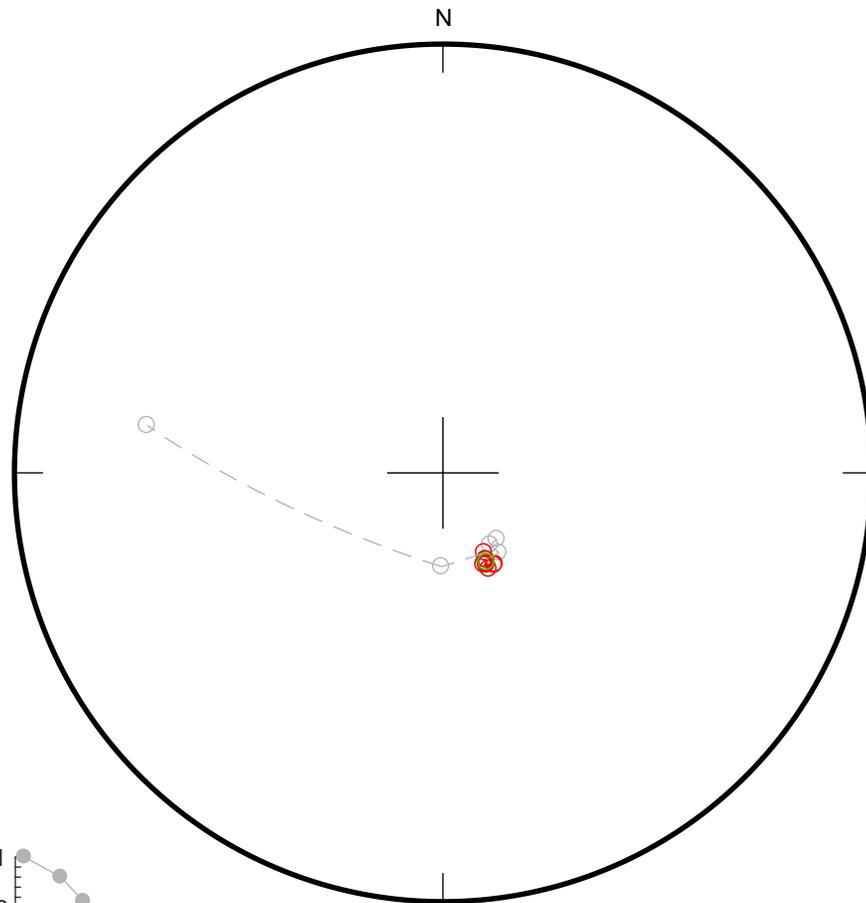
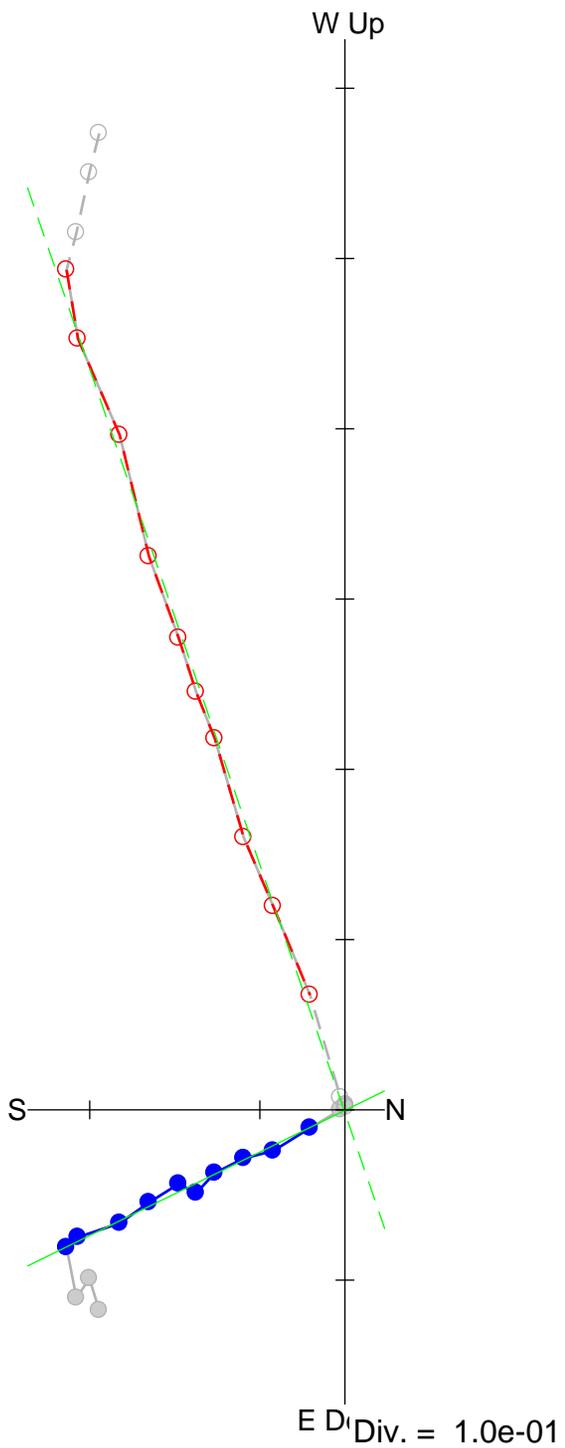
Mamaku/Ohakuri 火碎流

Unit 4 (welded) : OH4-1

OH4-1AB

114

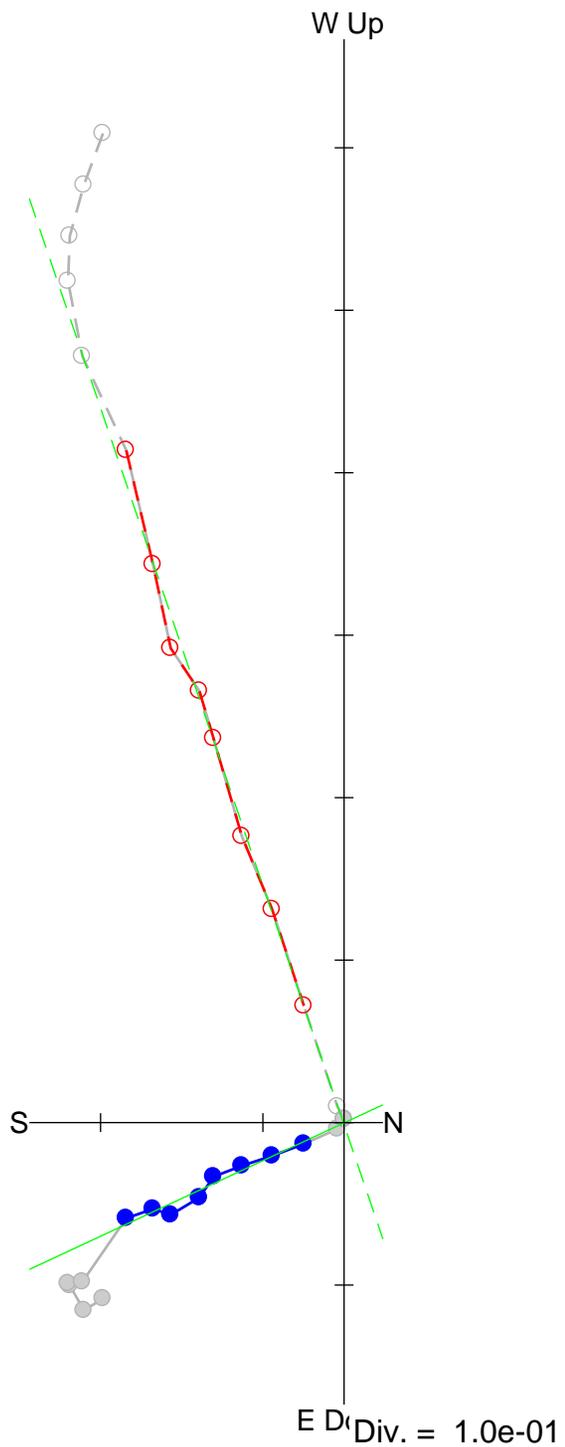
20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



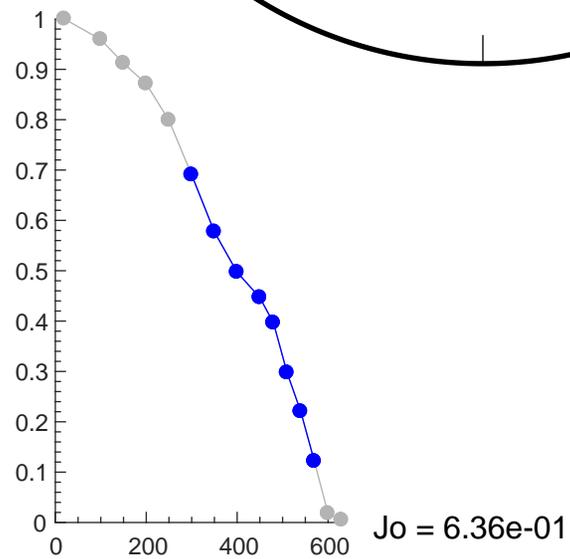
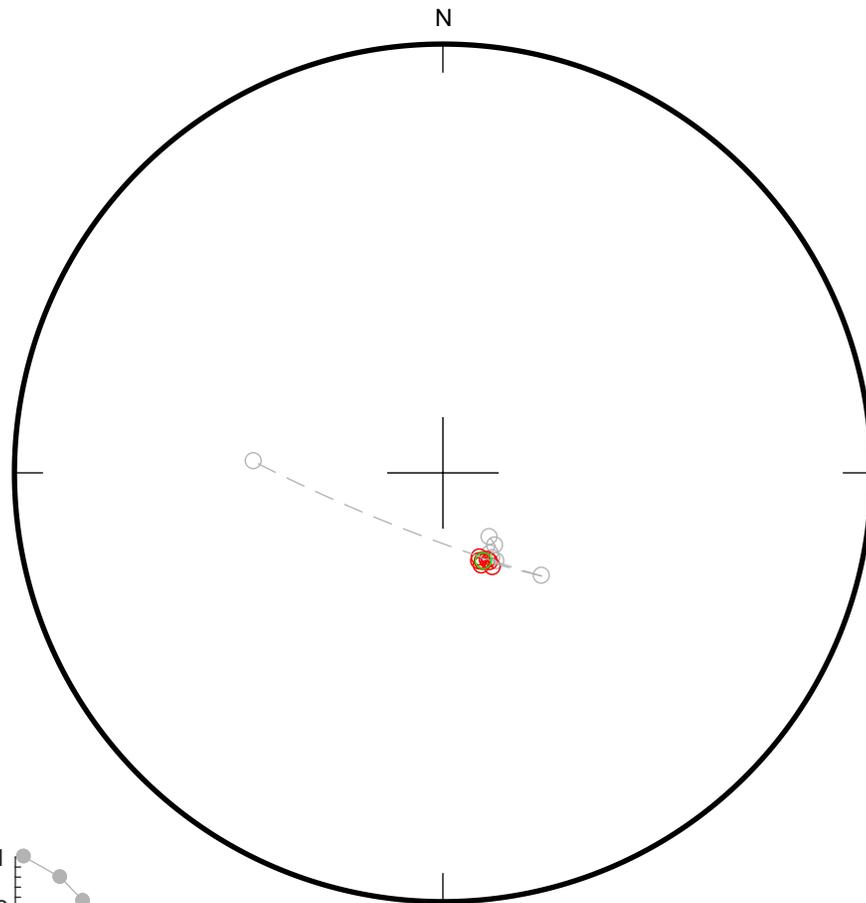
OH4-1BB

115

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

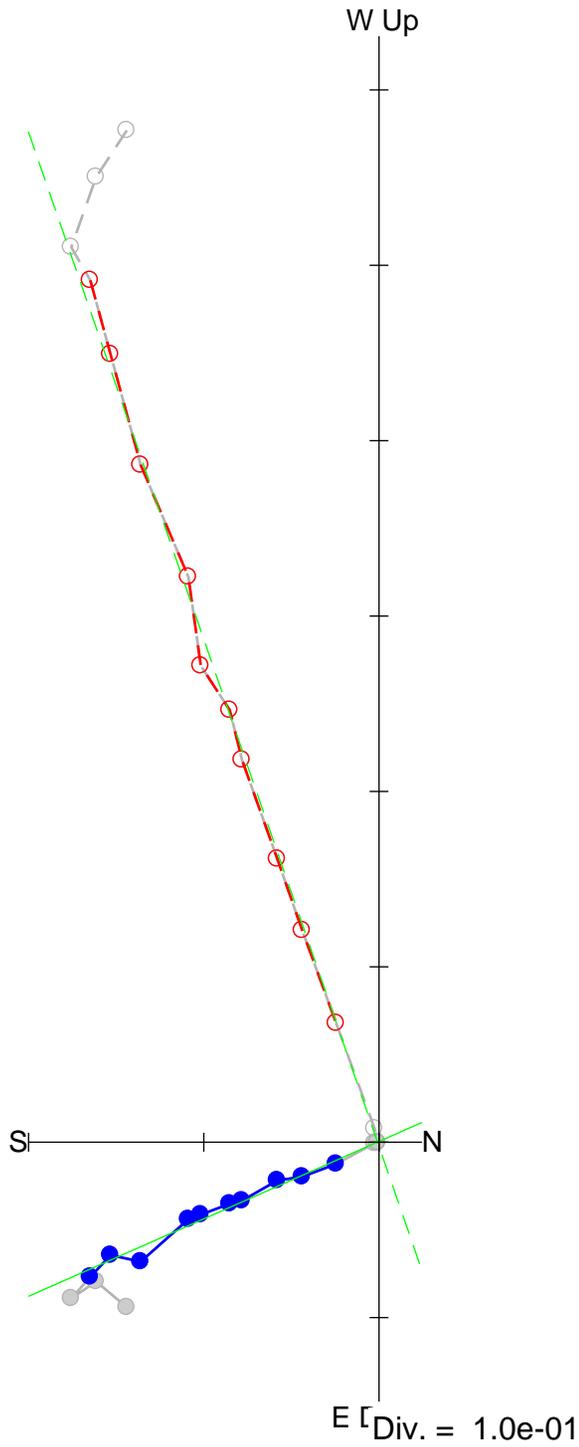


Fit from 300
to 570
[anchored]
Dec = 155.0
Inc = -69.4
MAD = 1.2

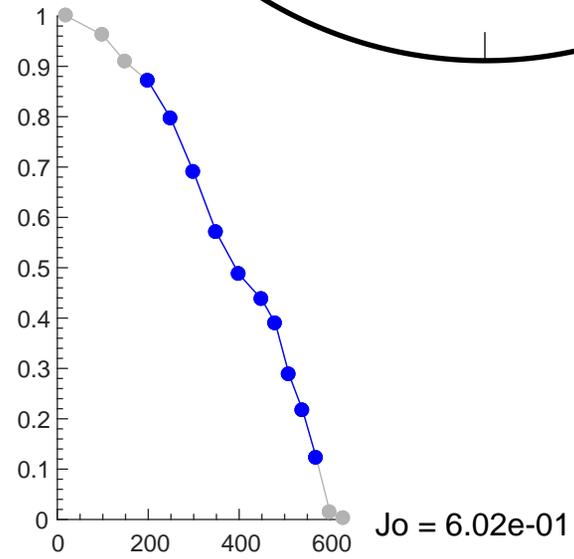
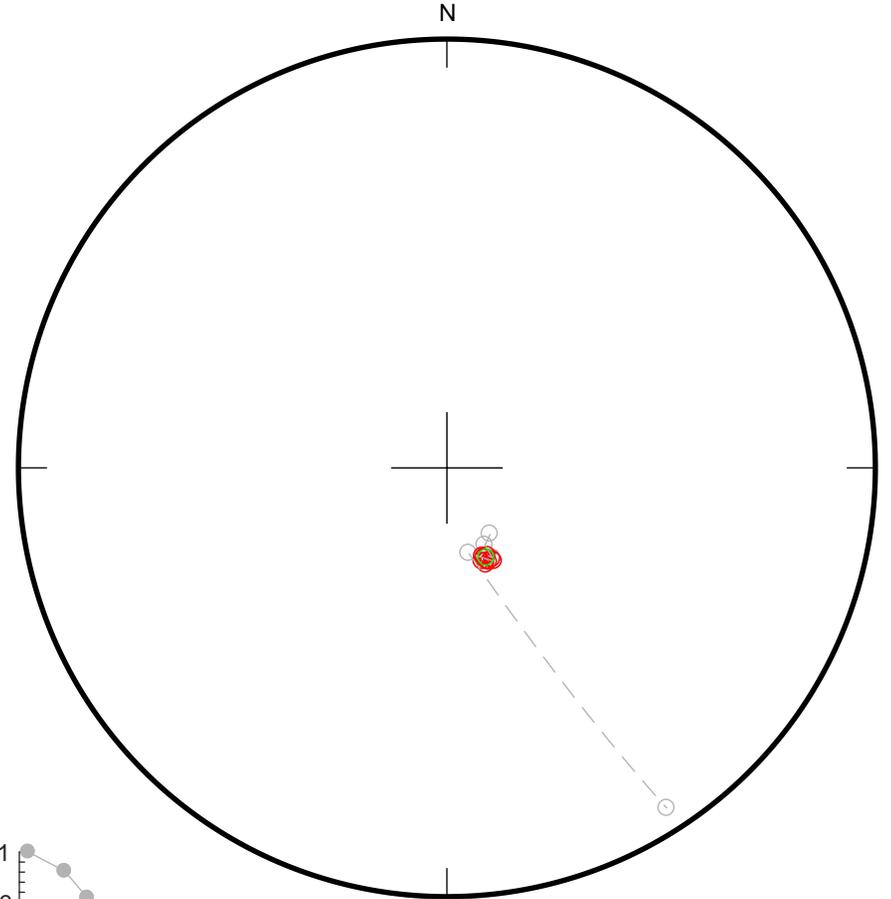


OH4-1CB

- 20
- 100
- 150
- 200
- 250
- 300
- 350
- 400
- 450
- 480
- 510
- 540
- 570
- 600
- 630



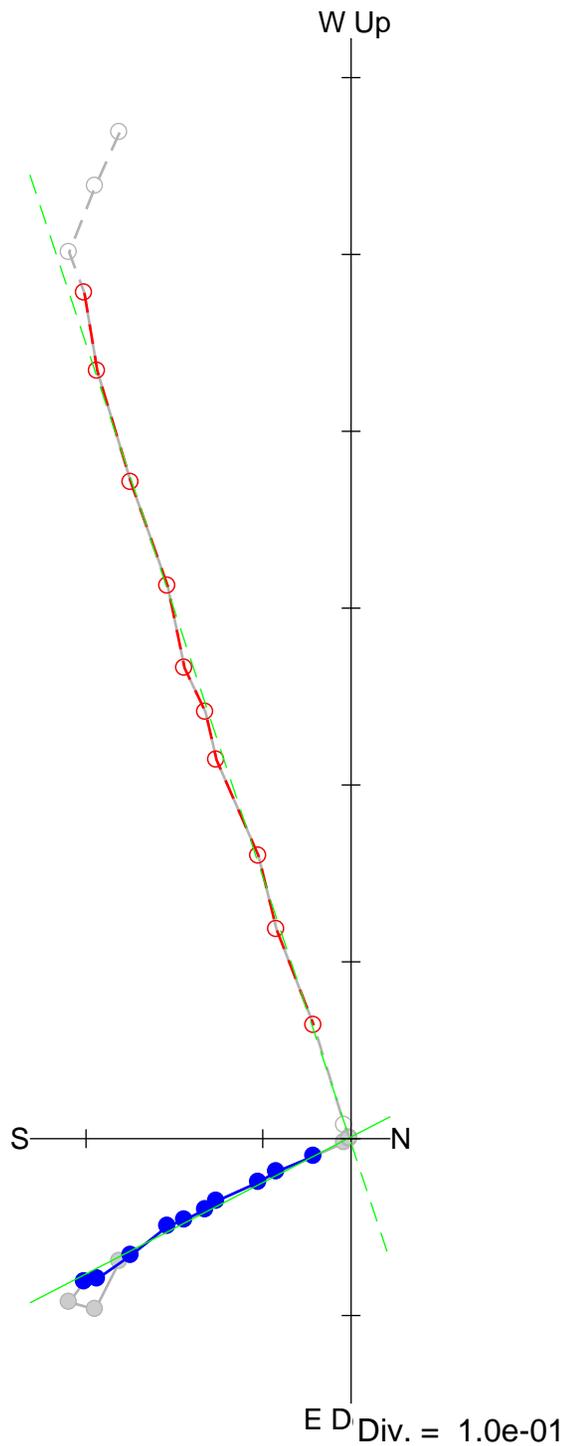
Fit from 200
to 570
[anchored]
Dec = 156.2
Inc = -69.3
MAD = 0.9



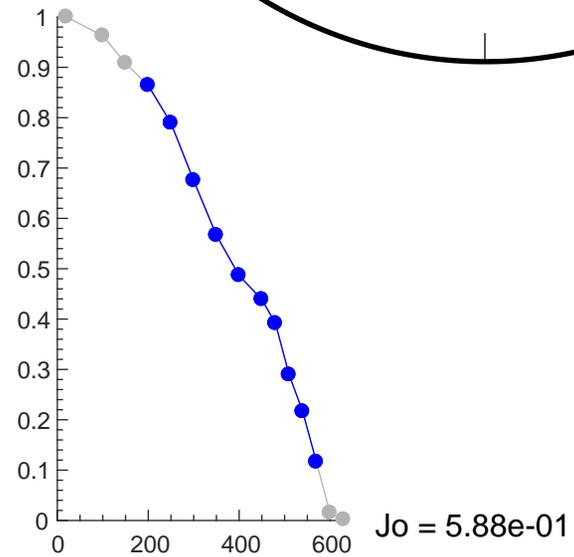
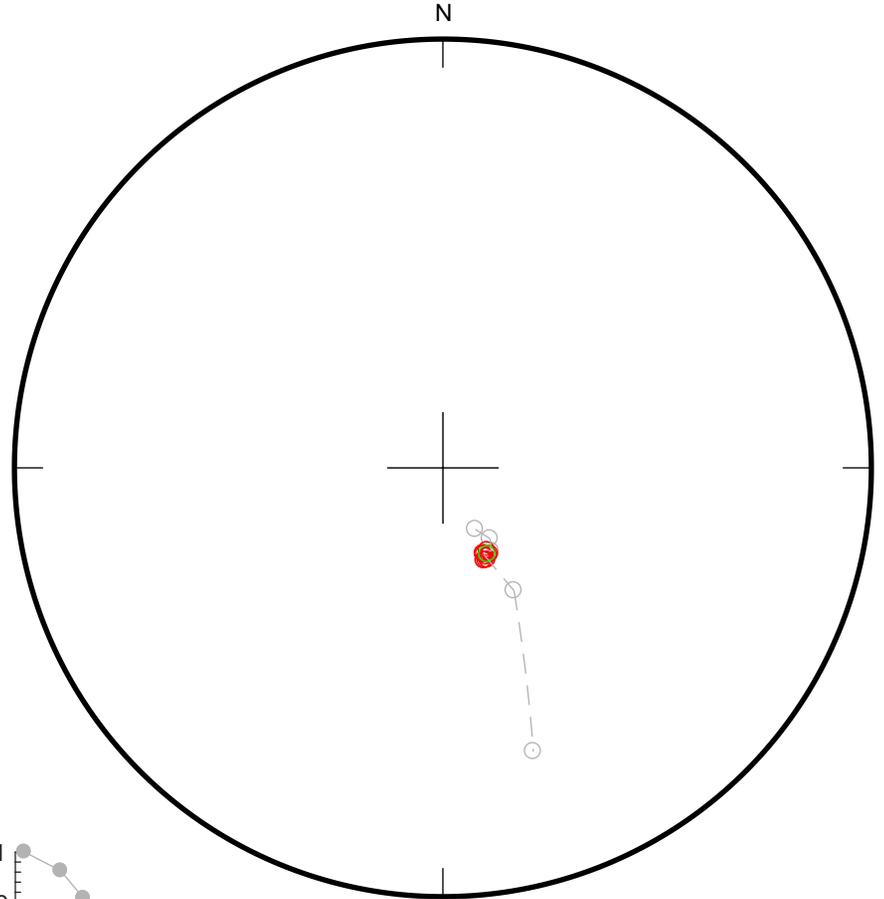
OH4-1DB

117

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

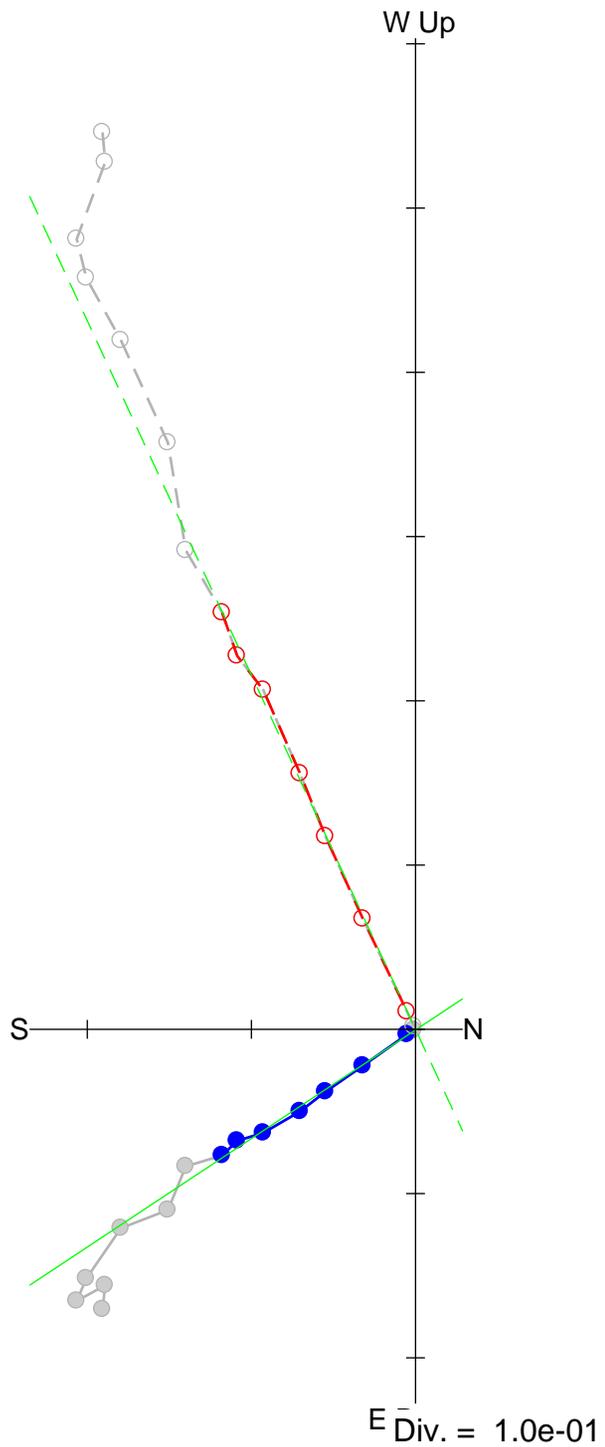


Fit from 200
to 570
[anchored]
Dec = 152.7
Inc = -69.5
MAD = 0.8

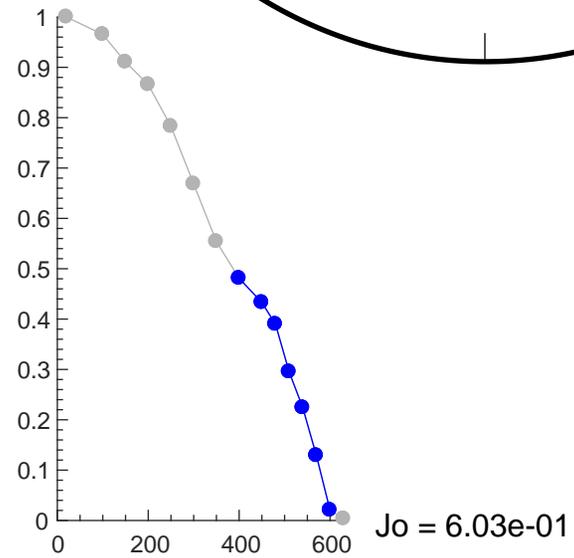
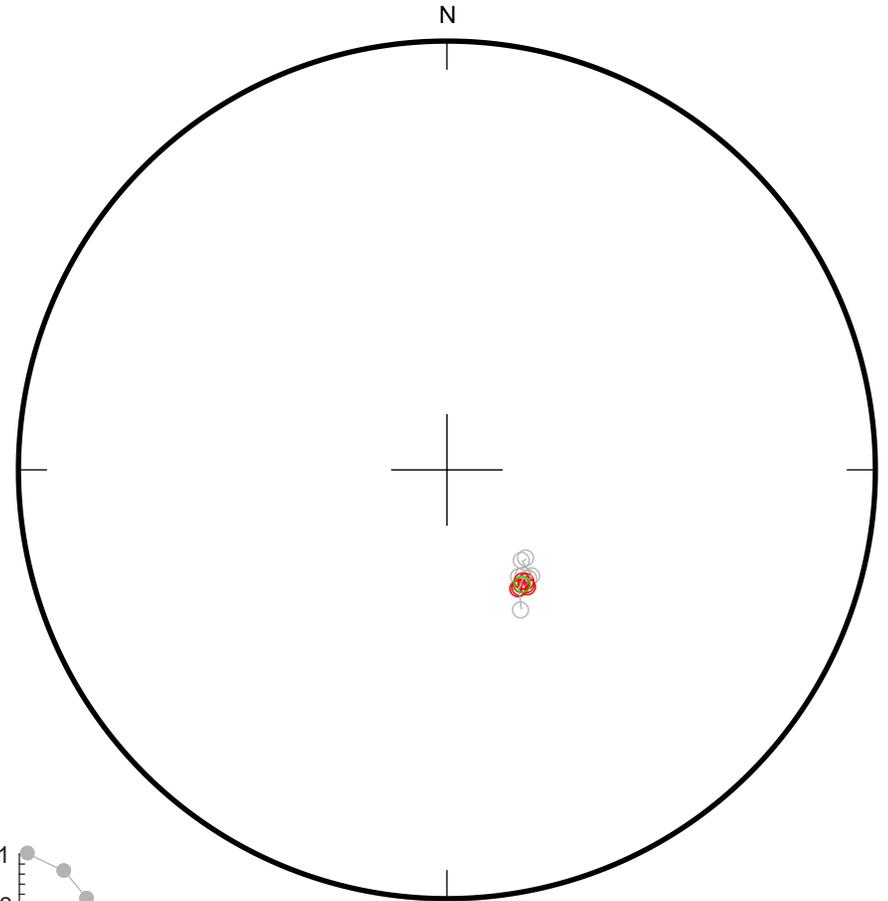


OH4-1FB

119



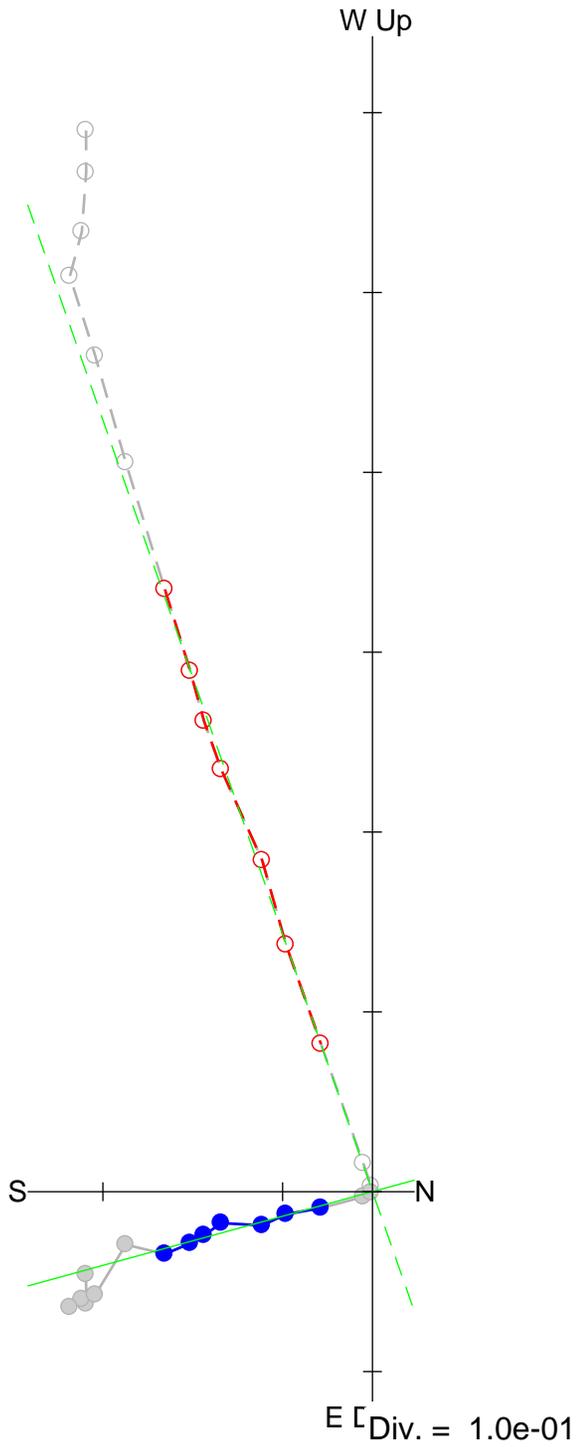
Fit from 400
to 600
[anchored]
Dec = 146.5
Inc = -60.9
MAD = 0.7



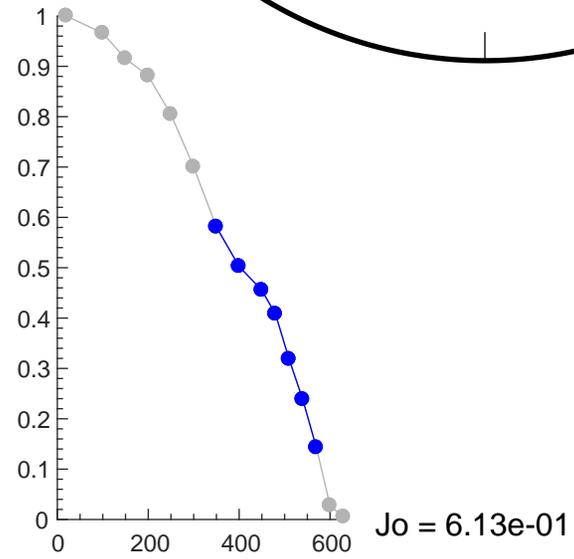
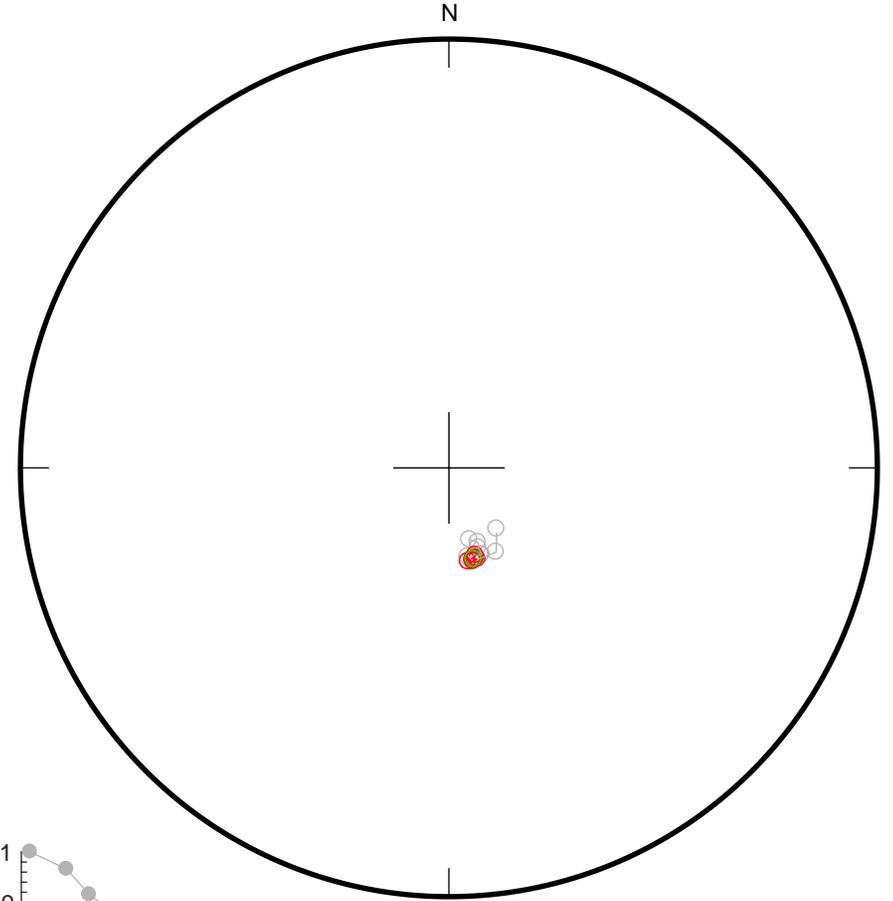
OH4-1GB

120

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



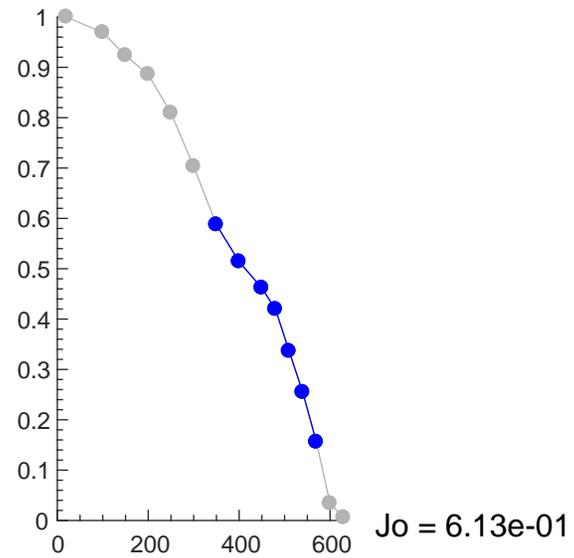
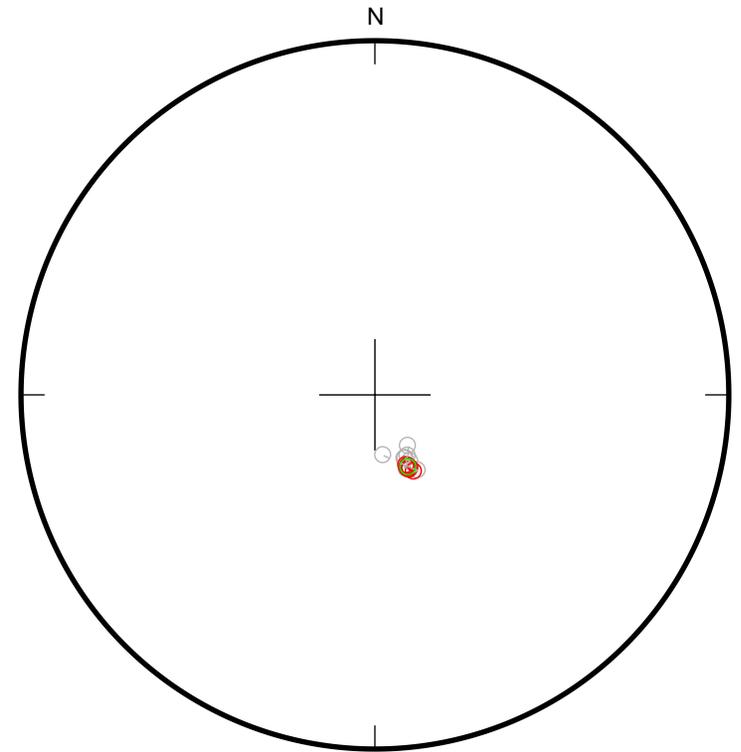
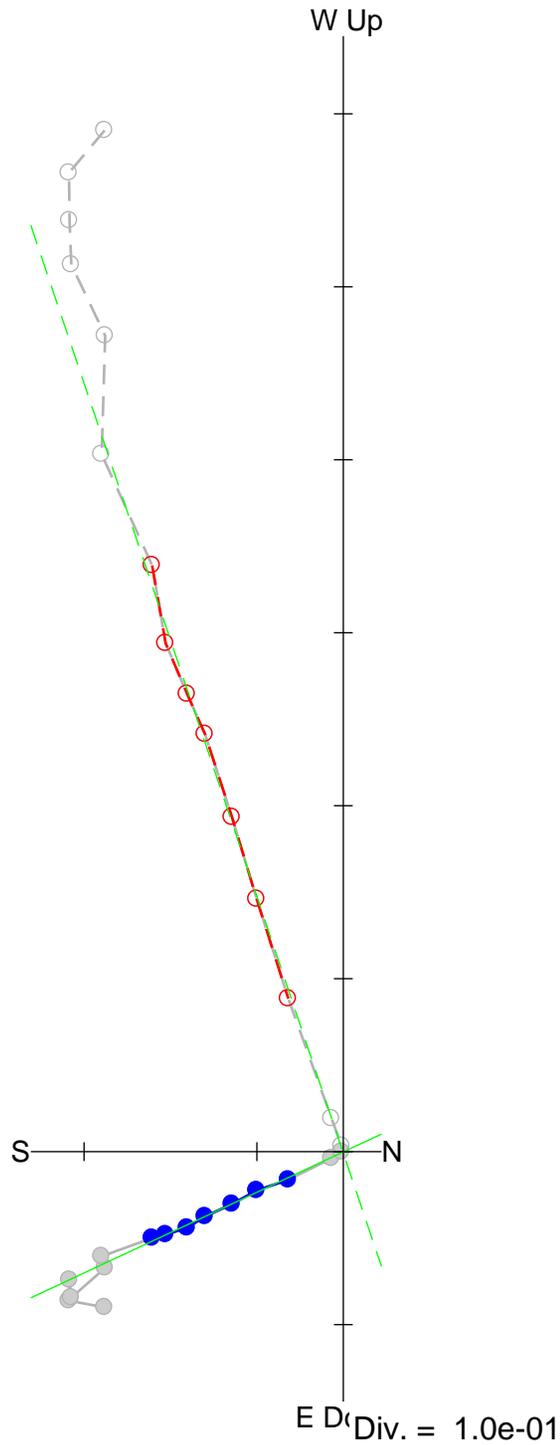
Fit from 350
to 570
[anchored]
Dec = 164.7
Inc = -70.1
MAD = 0.7



OH4-1HB

121

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630

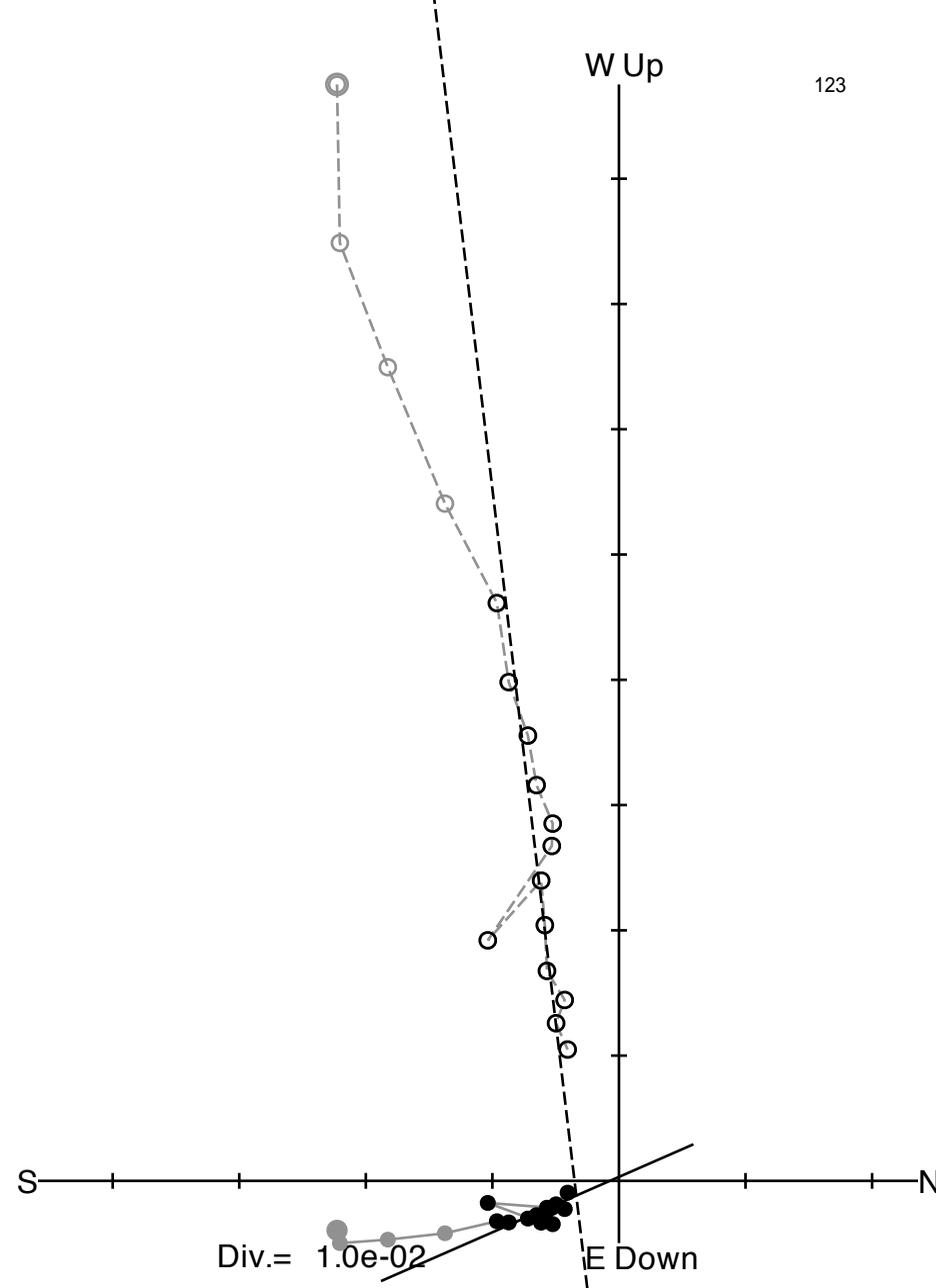


Mamaku/Ohakuri 火碎流

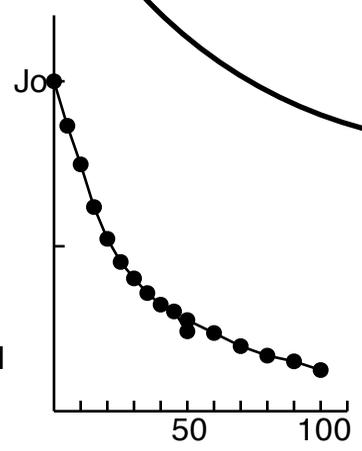
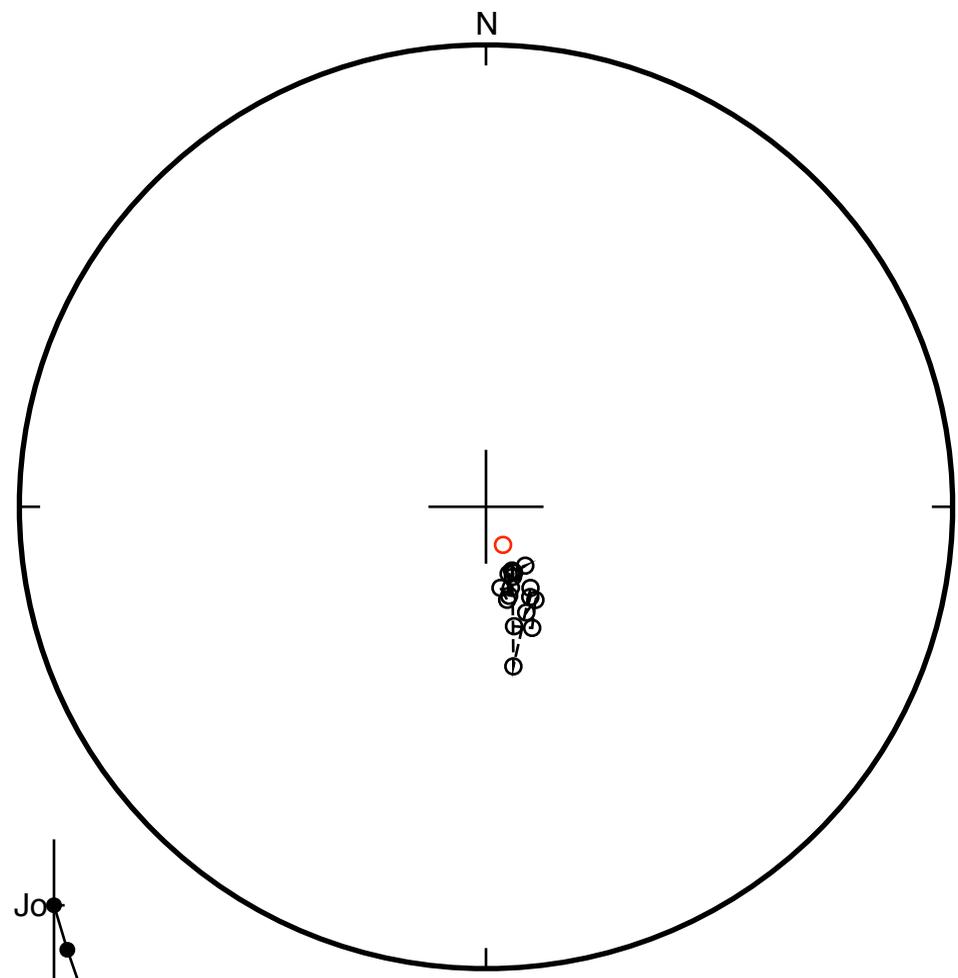
Unit 4 (non-welded) : OH1-3

Oh-3-1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
50
60
70
80
90
100

Fit from 20
to 100
Dec = 156.1
Inc = -82.7
d2 = 8.0
d3 = 2.5
MAD= 8.3



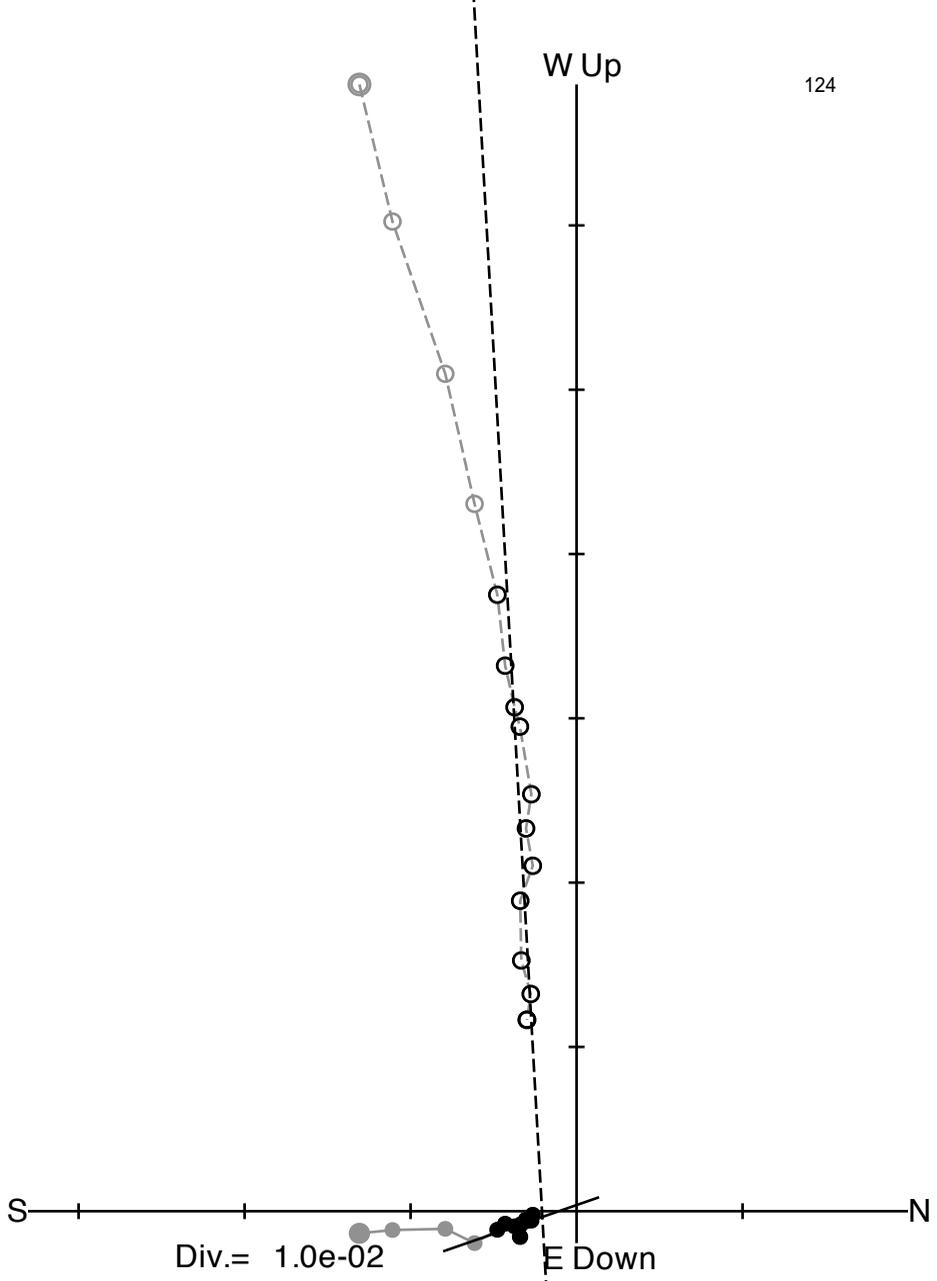
123



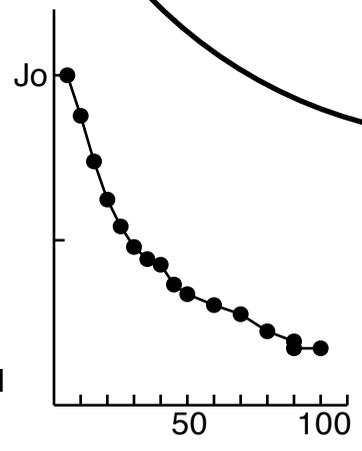
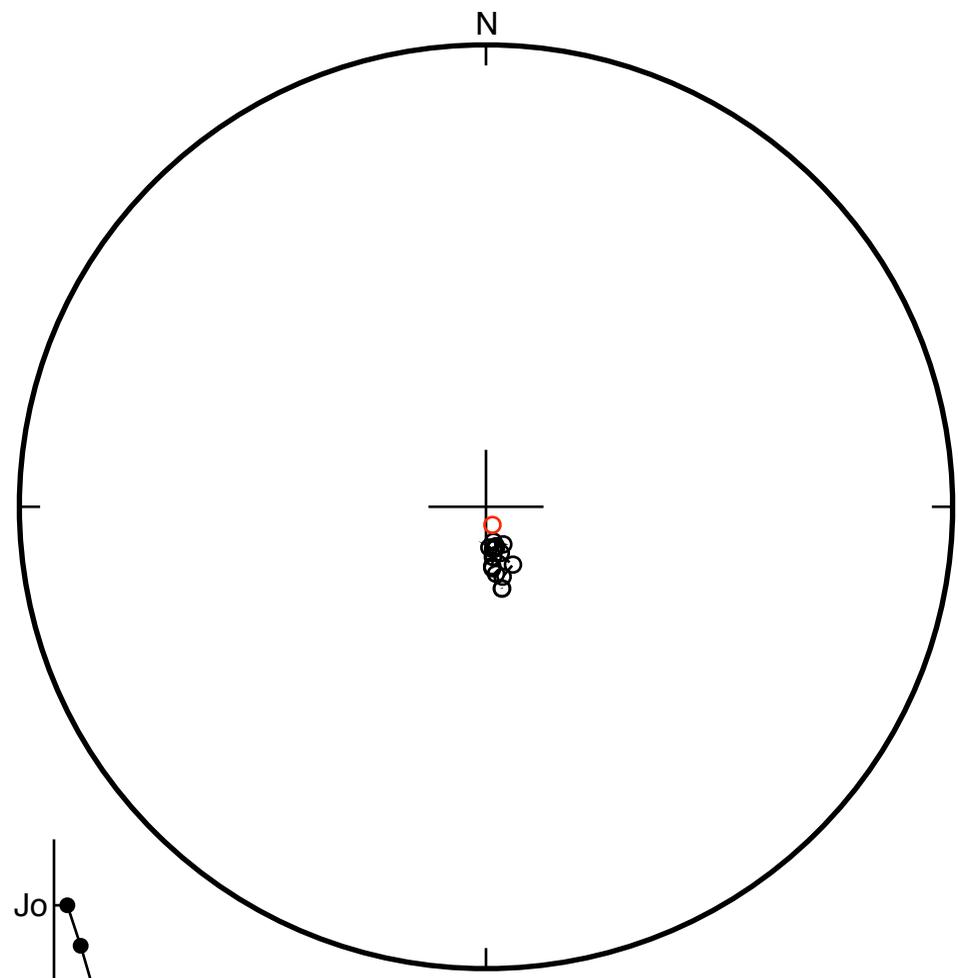
Jo= $9.04e-02$

Oh-3-2
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
90
100

Fit from 25
to 100
Dec = 160.7
Inc = -86.6
d2 = 3.1
d3 = 2.1
MAD= 3.8



124



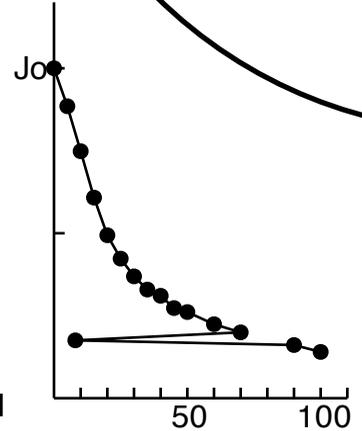
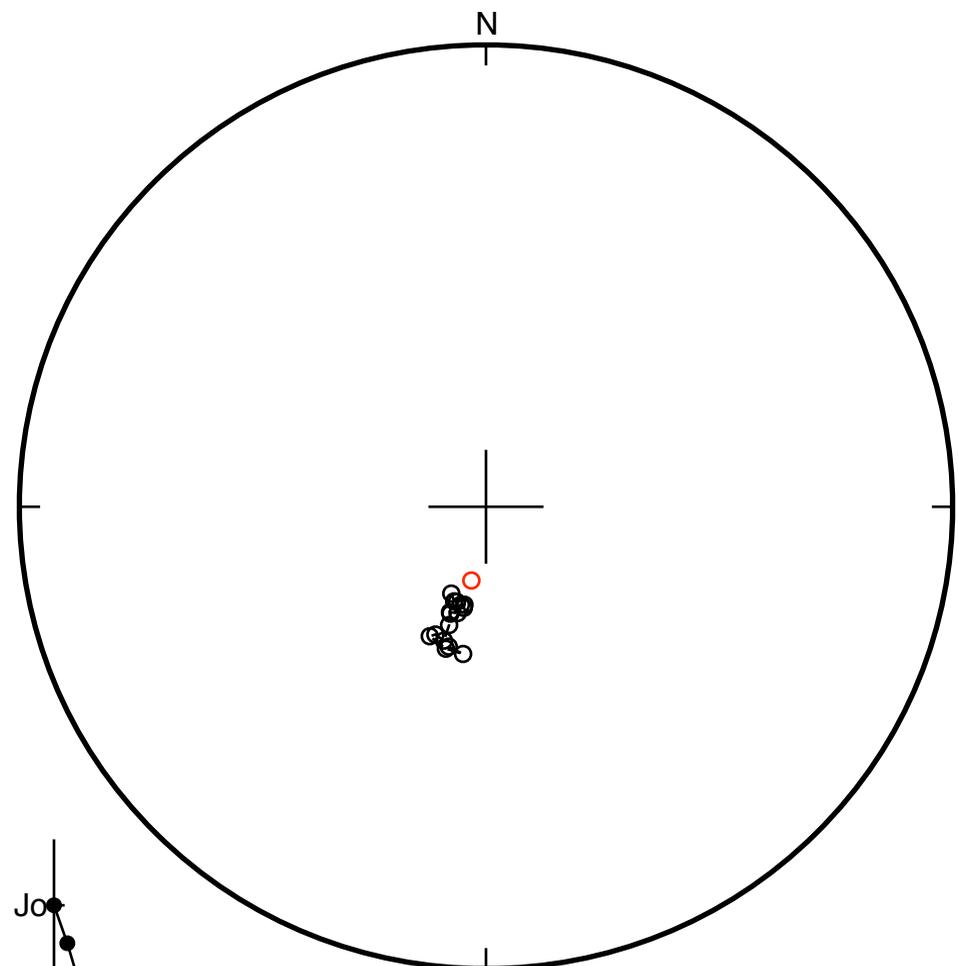
Jo= 6.98e-02

Oh-3-3
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
8
90
100

Fit from 20
to 100
Dec = -168.9
Inc = -76.8
d2 = 3.4
d3 = 2.4
MAD = 4.2



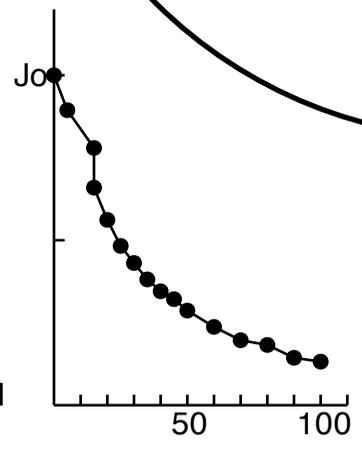
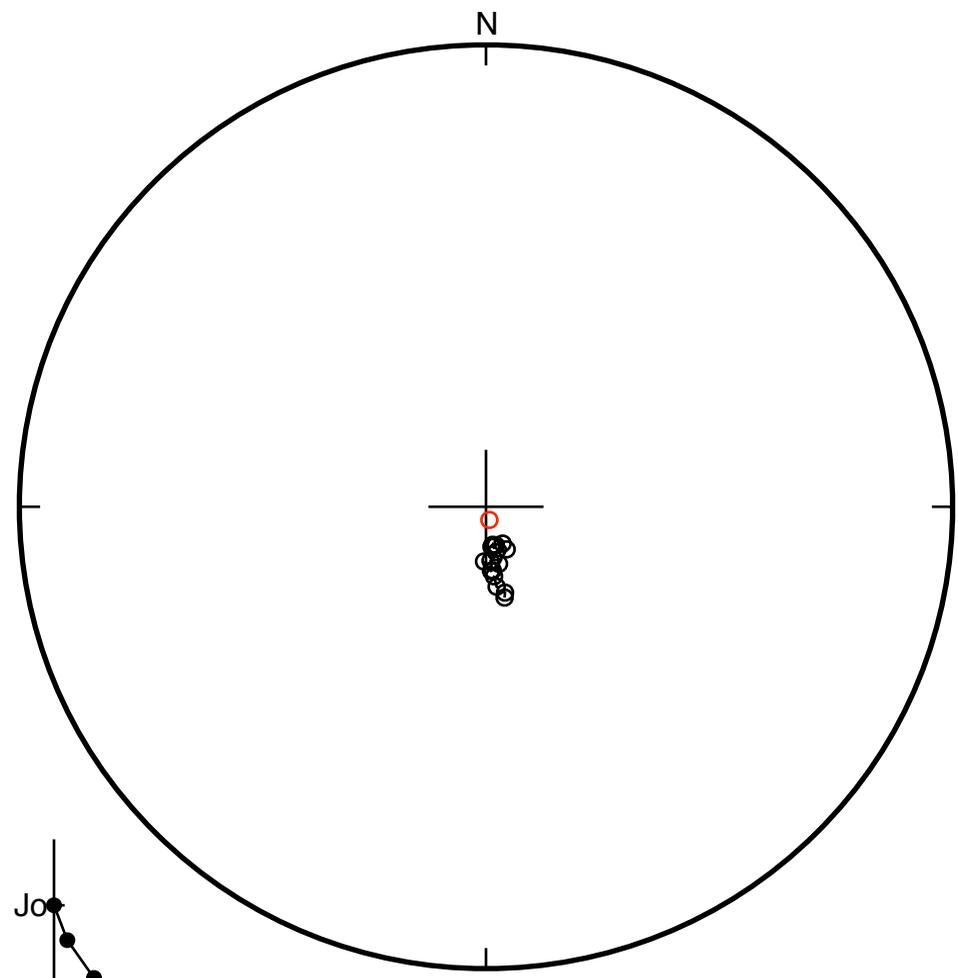
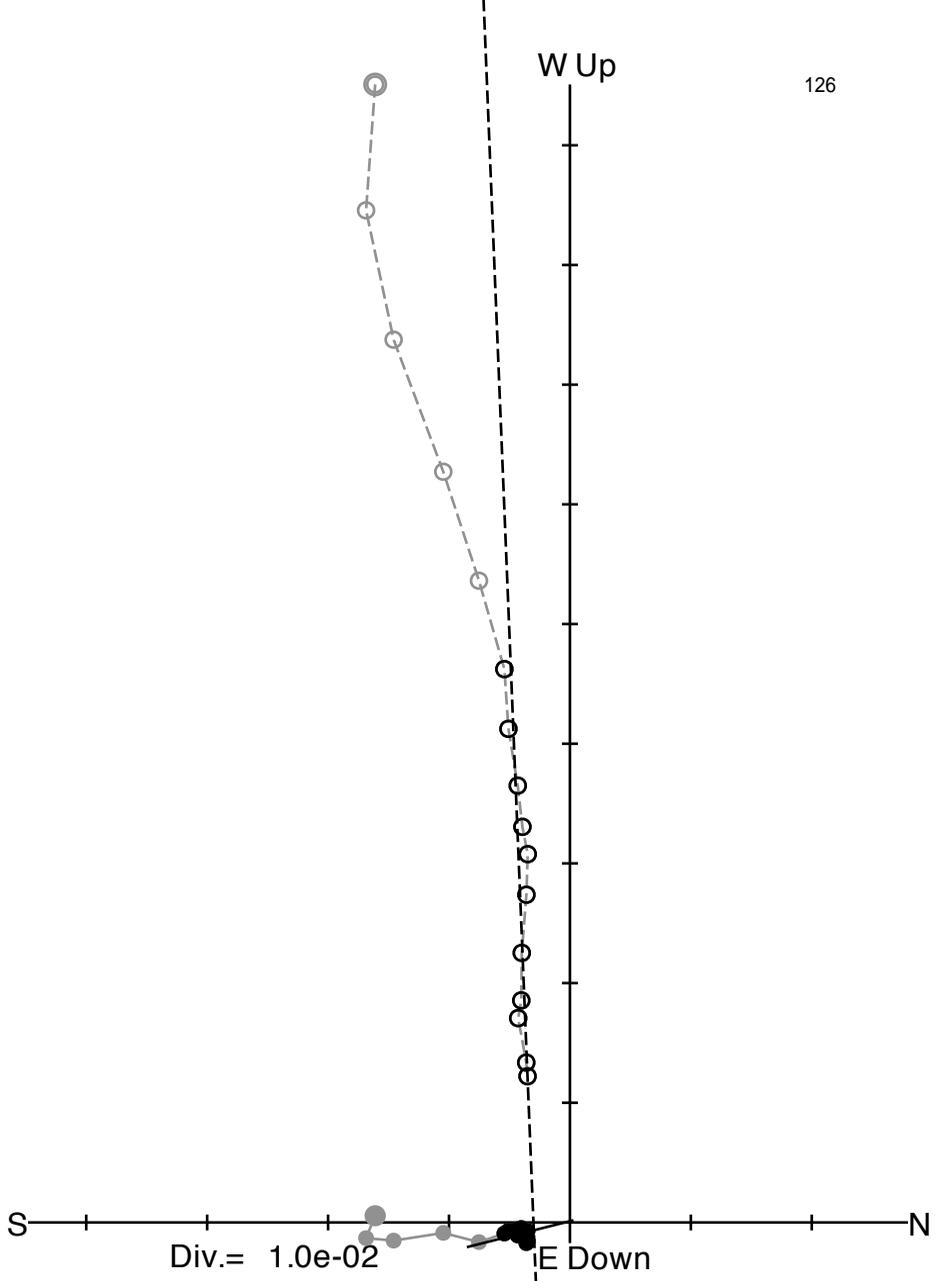
125



Jo = 5.72×10^{-2}

Oh-3-4
0
5
15
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

Fit from 25
to 100
Dec = 165.7
Inc = -87.6
d2 = 2.8
d3 = 0.8
MAD= 2.9

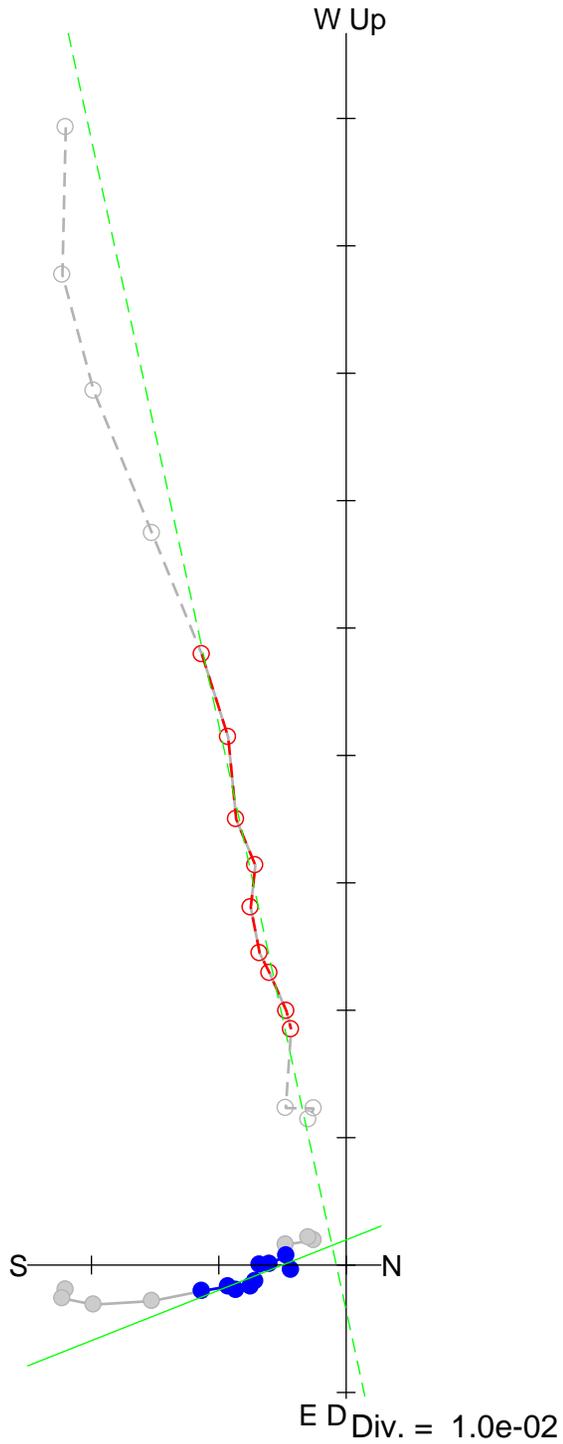


Jo= 9.64e-02

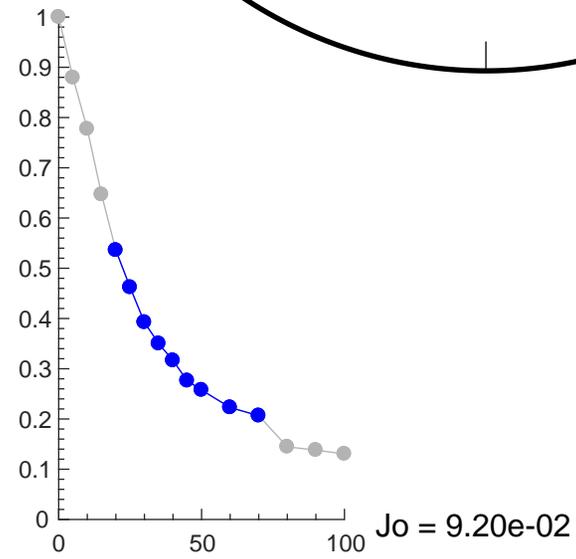
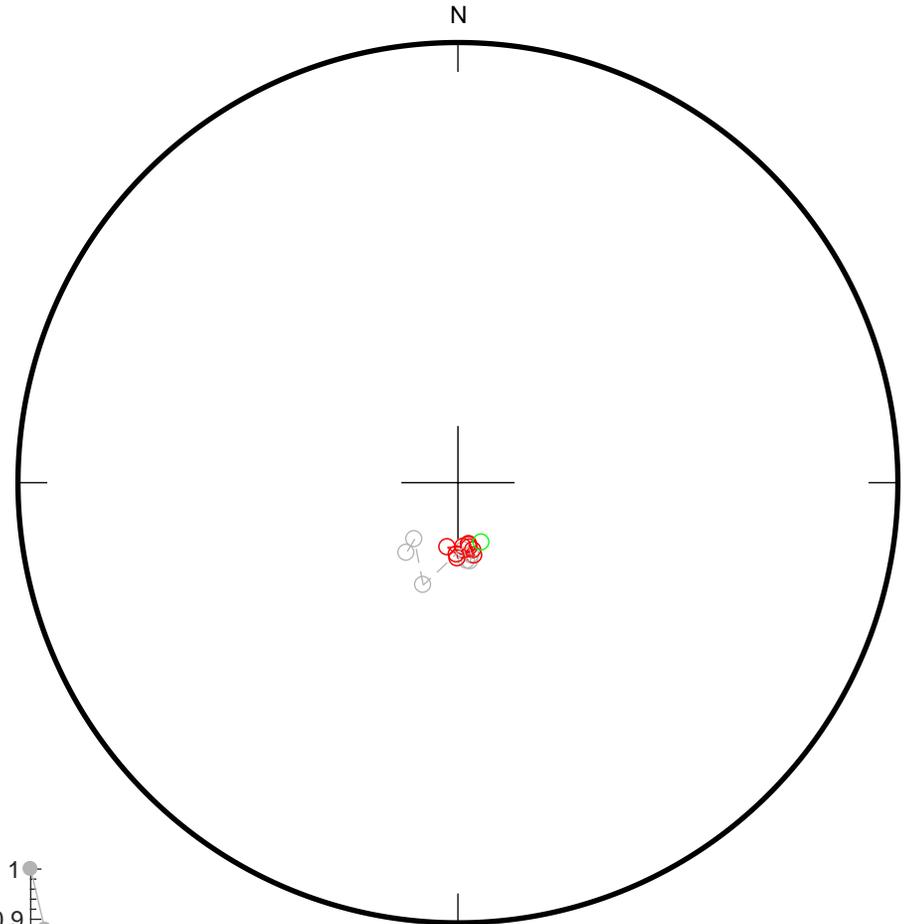
OH-3-5

127

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



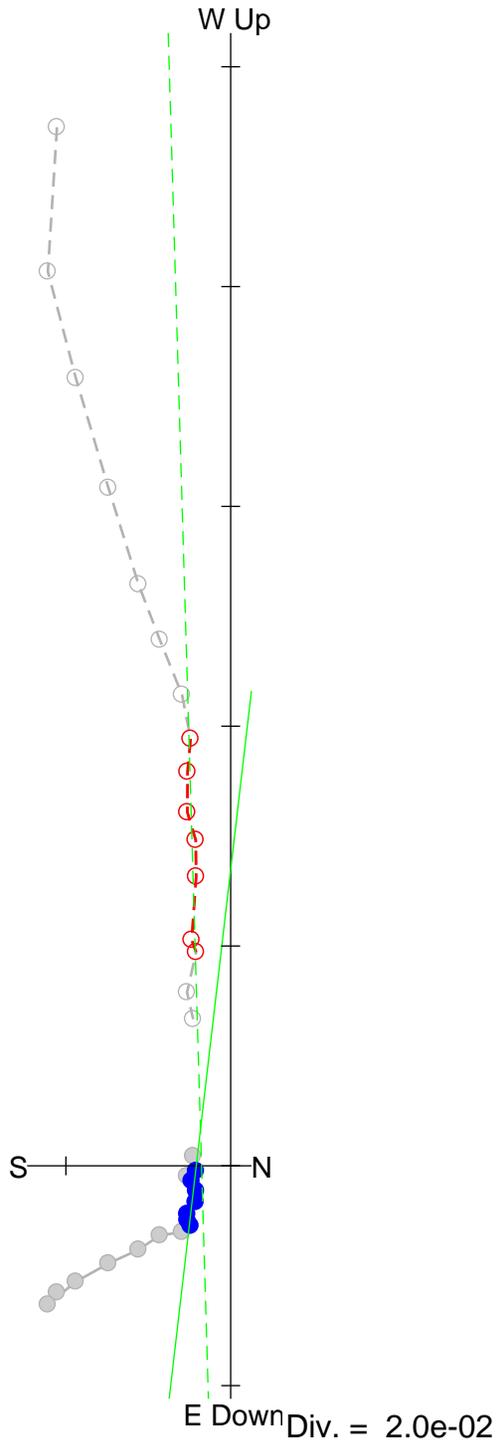
Fit from 20
to 70
Dec = 158.4
Inc = -76.8
MAD = 4.2



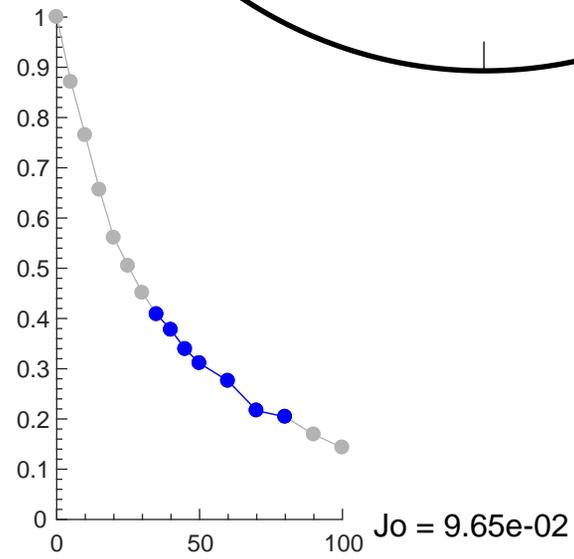
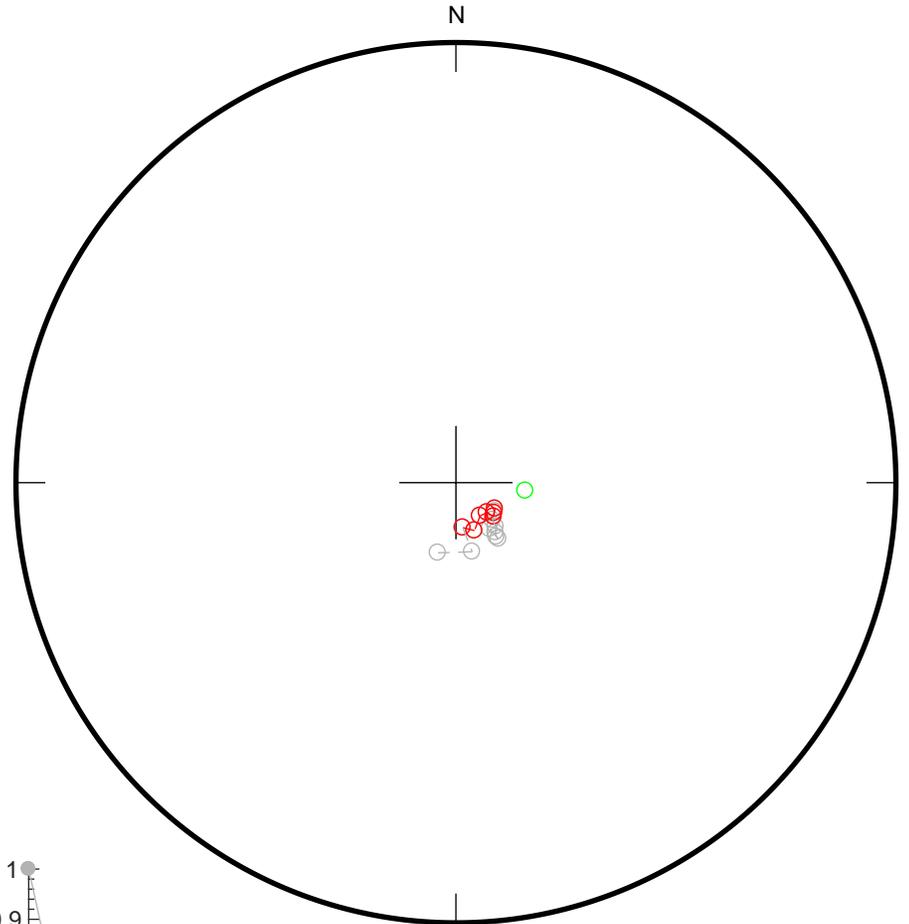
OH-3-6

128

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



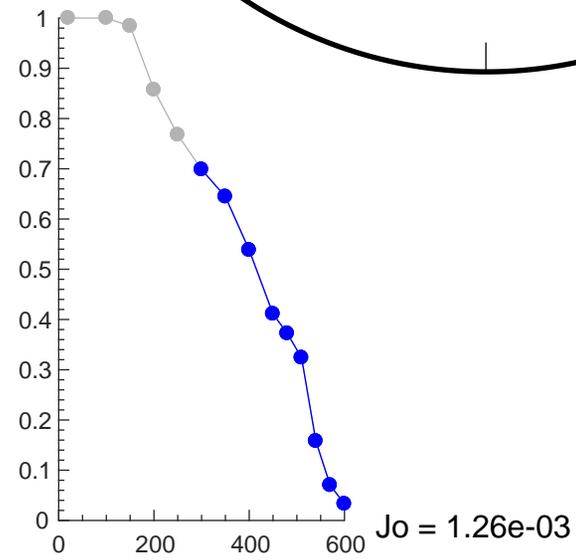
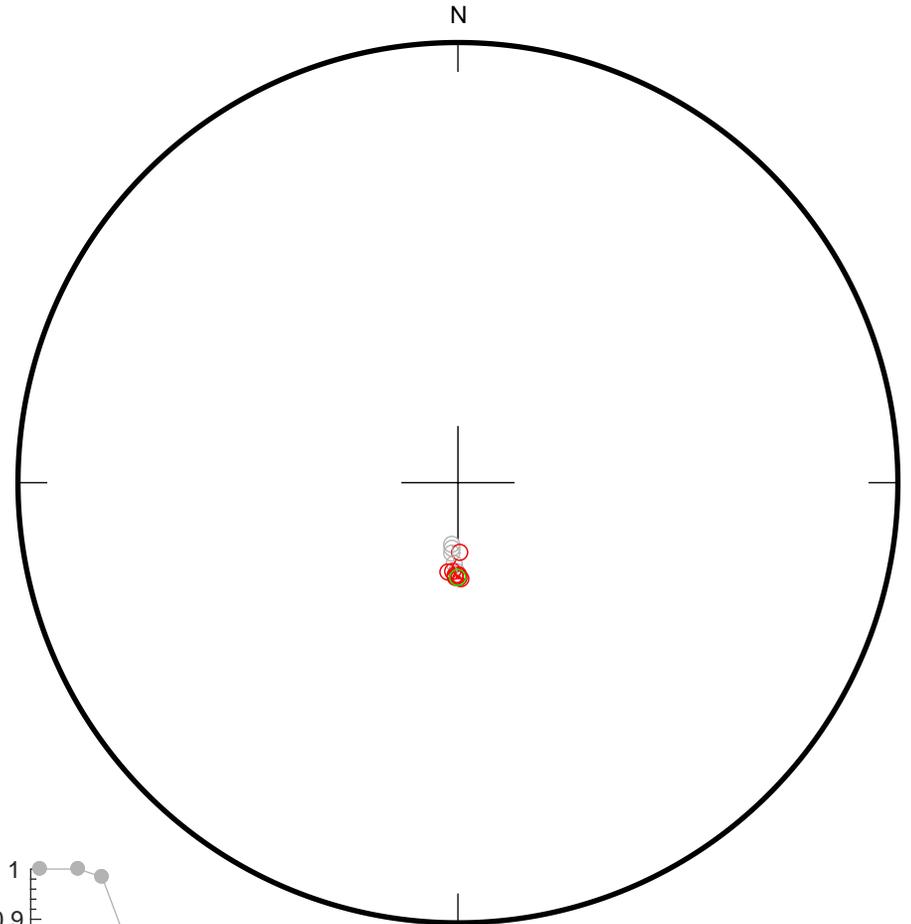
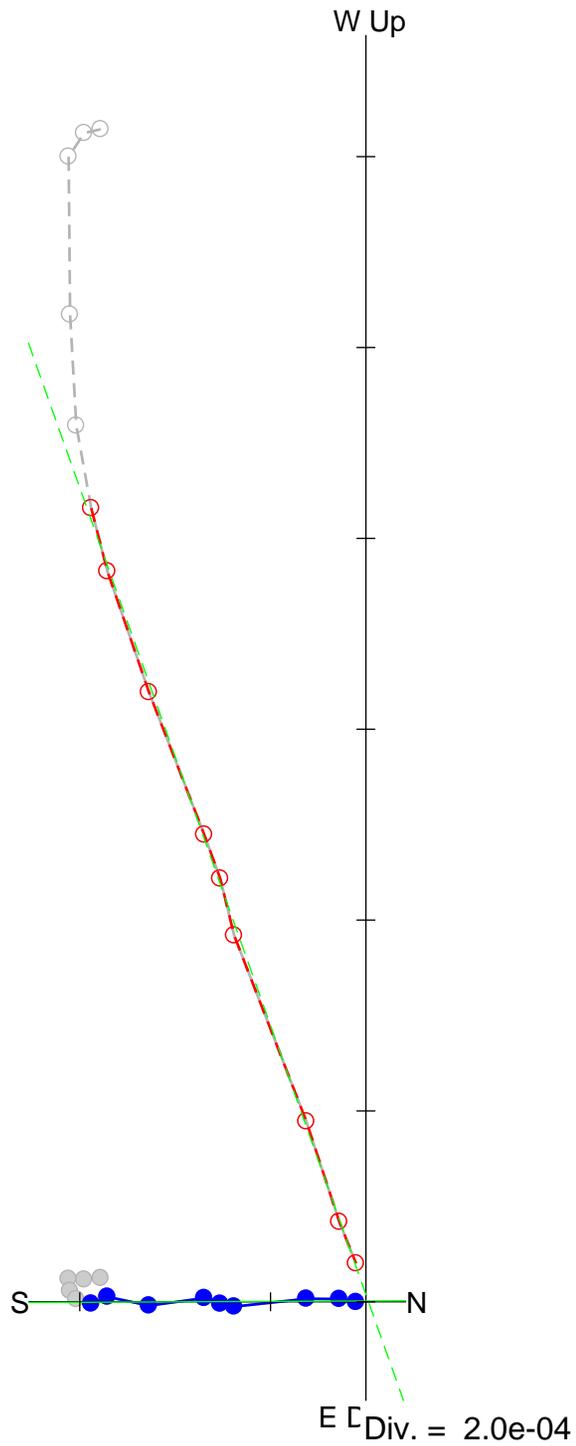
Fit from 35
to 80
Dec = 96.6
Inc = -75.7
MAD = 2.9



Oh1-3-7 (in situ)

129

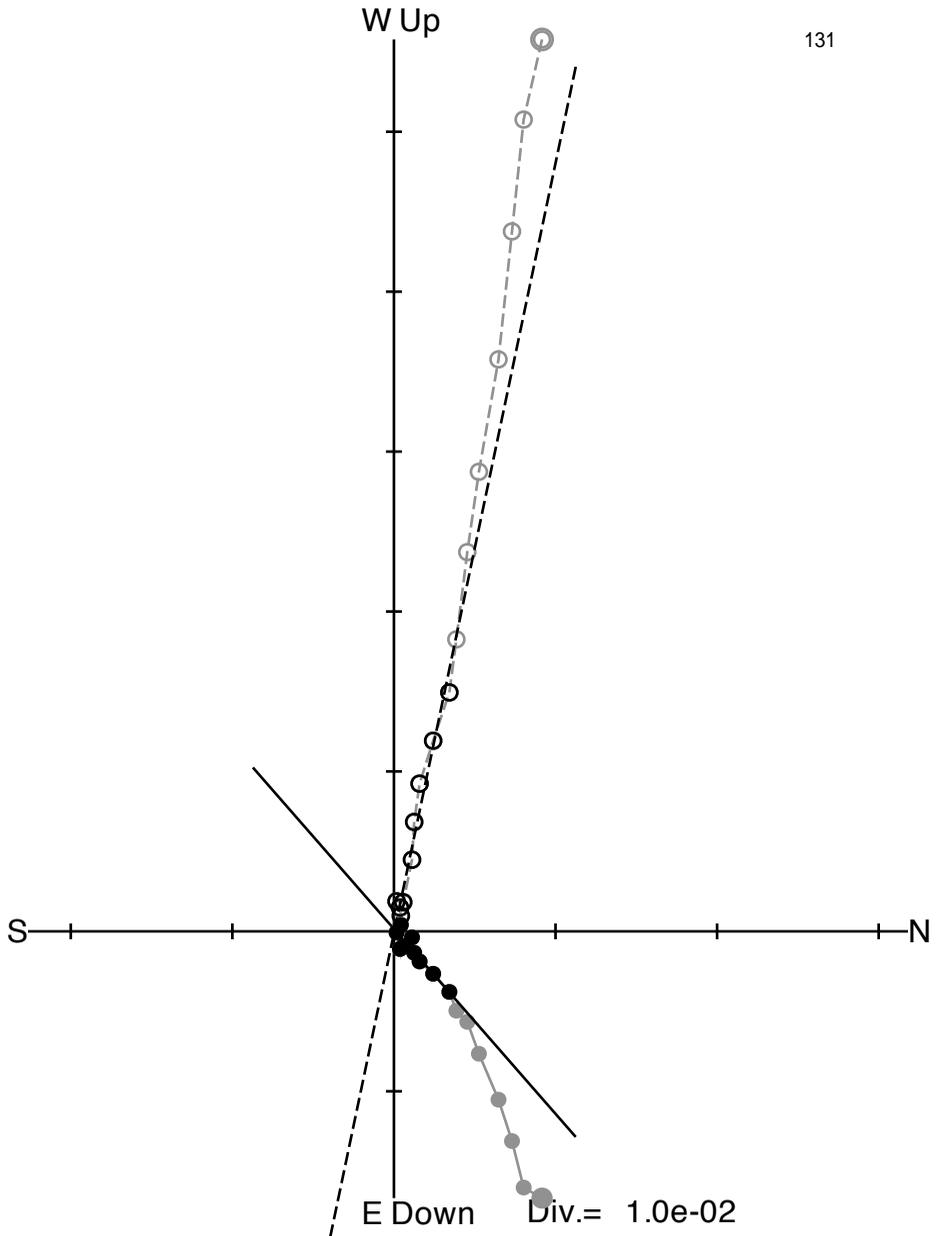
20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Mamaku/Ohakuri 火碎流

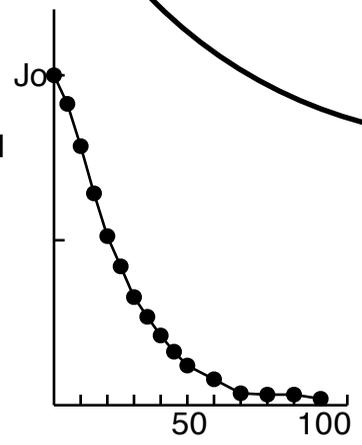
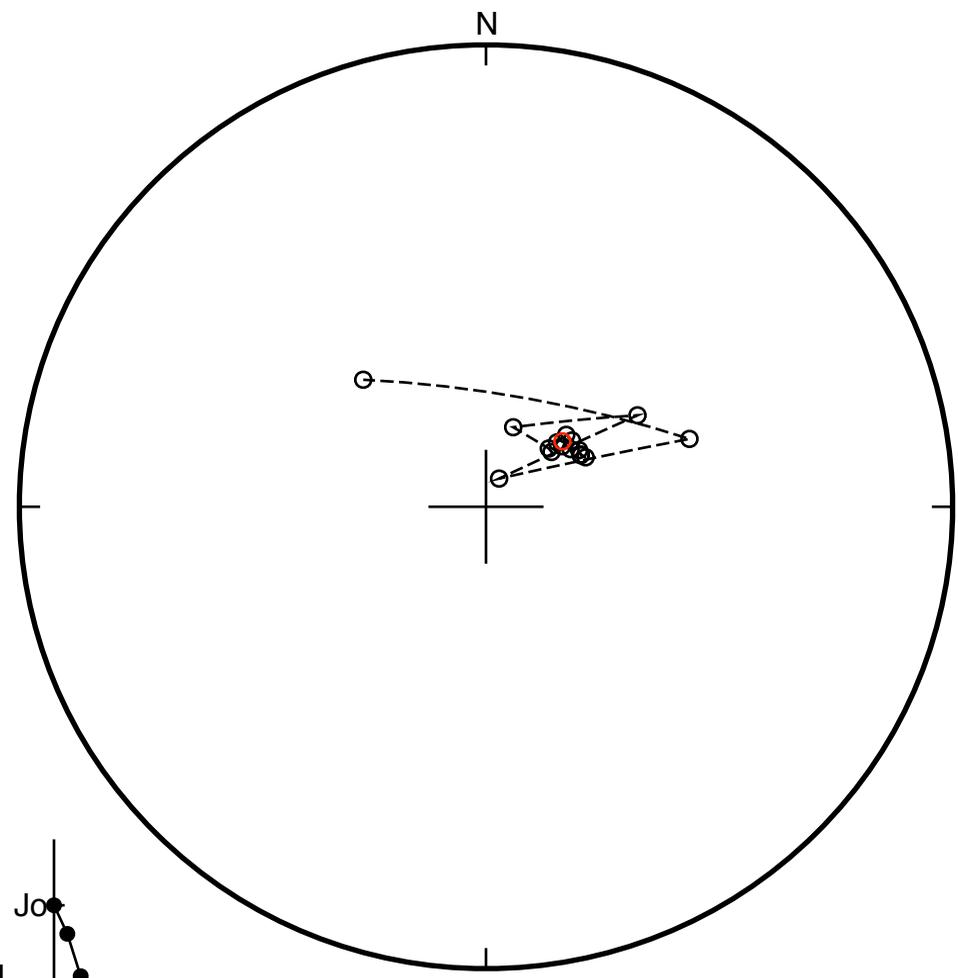
Unit 5L : OH1-1

Oh-1-1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 35
to 100
Dec = 49.1
Inc = -72.4
d2 = 5.2
d3 = 2.3
MAD= 5.7

131

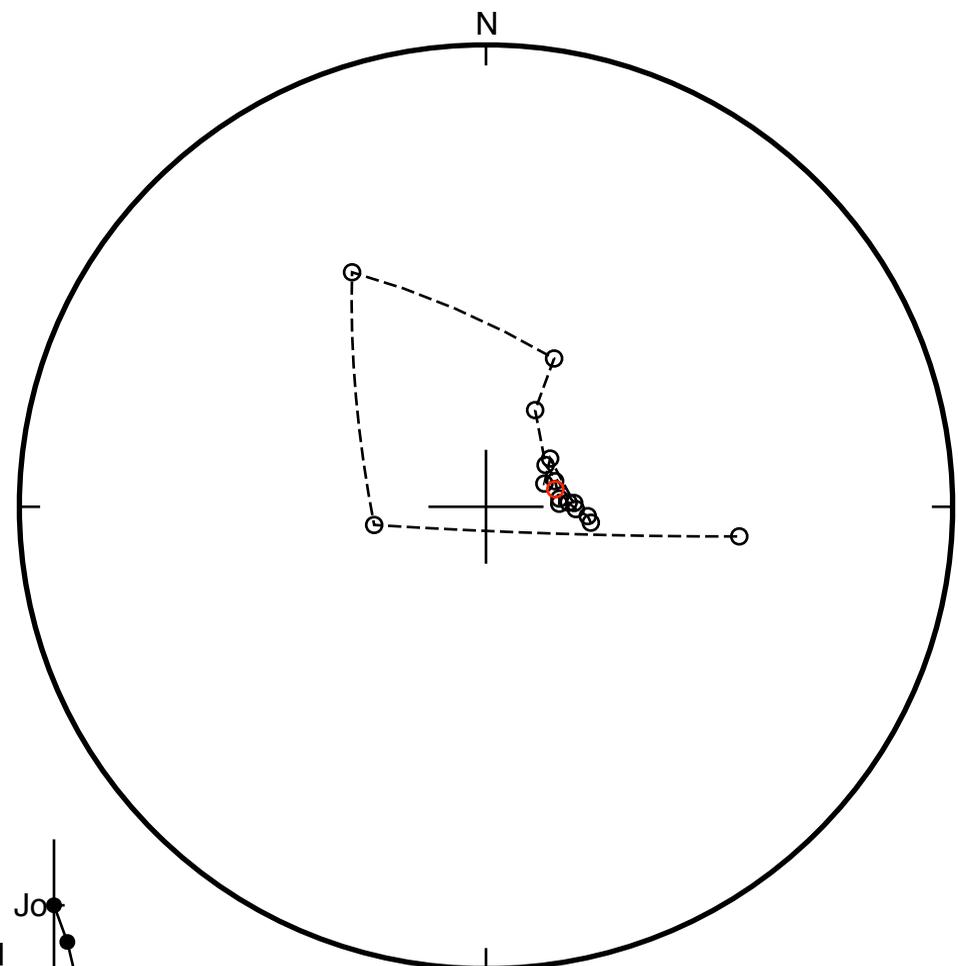


Jo= 5.89e-02

Oh-1-2
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

W Up

132

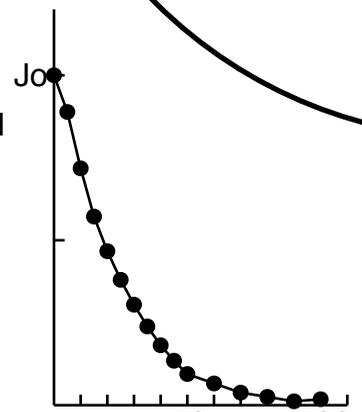


S N

Fit from 30
to 100
Dec = 75.7
Inc = -77.6
d2 = 5.3
d3 = 2.8
MAD= 6.0

Div.= 1.0e-02

E Down



Jo= 5.40e-02

Oh-1-3
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

W Up

133

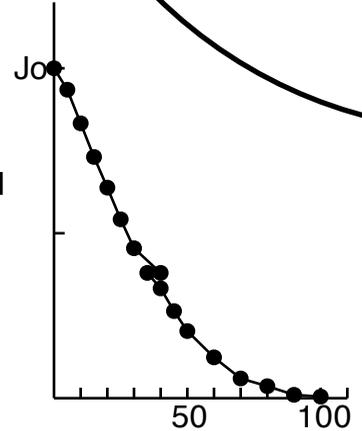
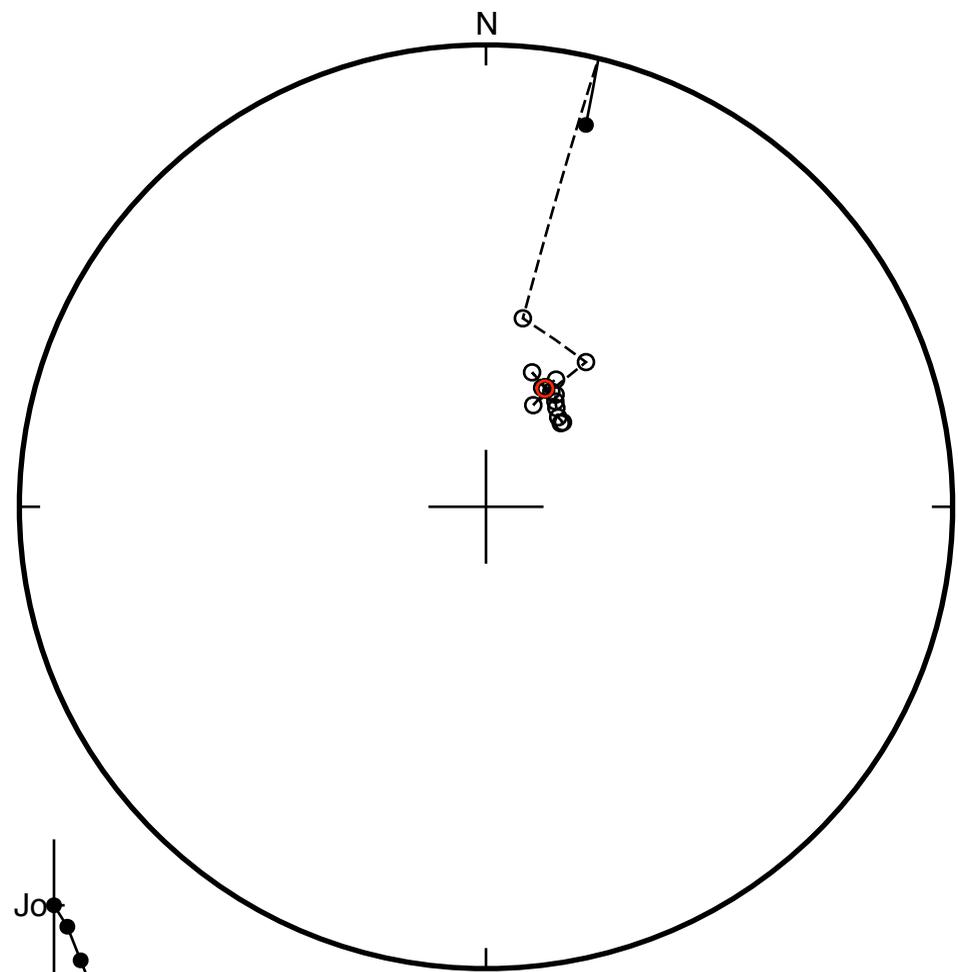
S

N

E Down

Div.= 1.0e-02

Fit from 30
to 100
Dec = 26.3
Inc = -66.7
d2 = 2.4
d3 = 0.9
MAD= 2.6



Jo= 5.73e-02

Oh-1-4
0
5
10
15
20
25
30
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

W Up

134

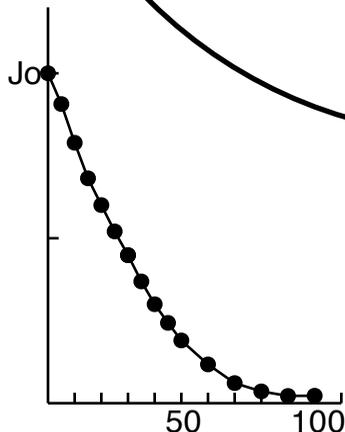
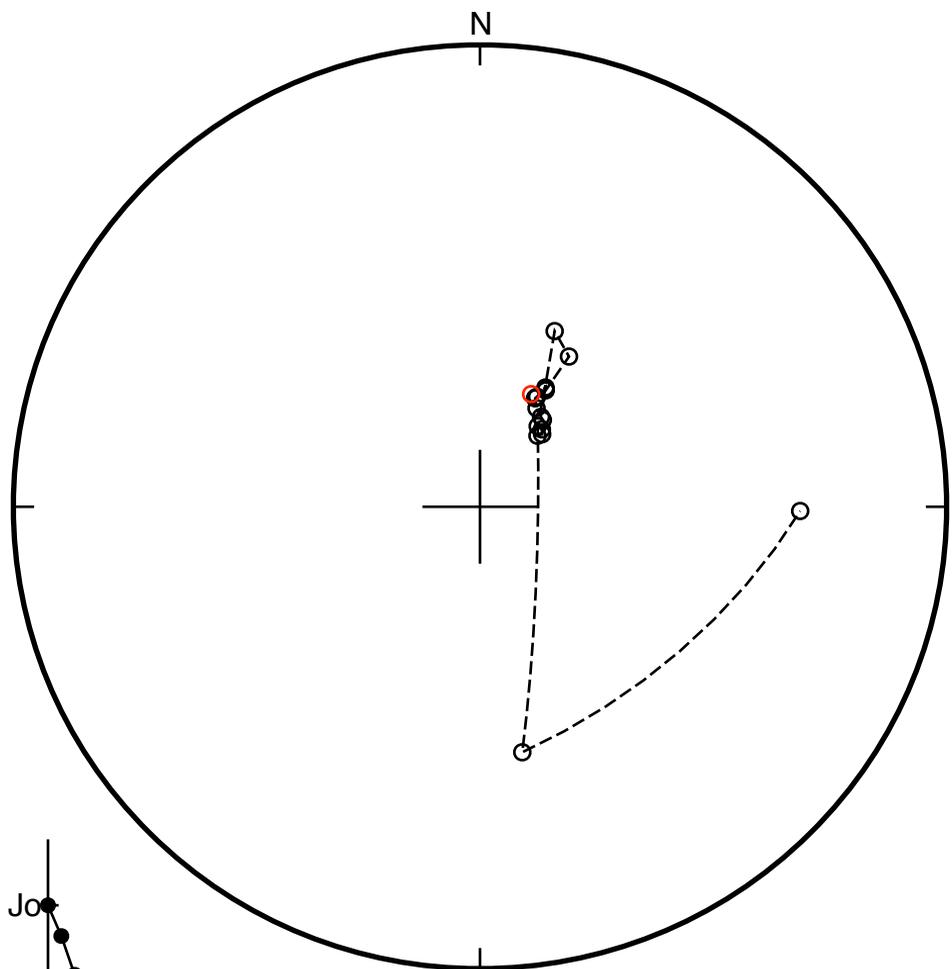
S

N

E Down

Div.= 1.0e-02

Fit from 30
to 100
Dec = 24.2
Inc = -68.2
d2 = 3.3
d3 = 1.5
MAD= 3.7

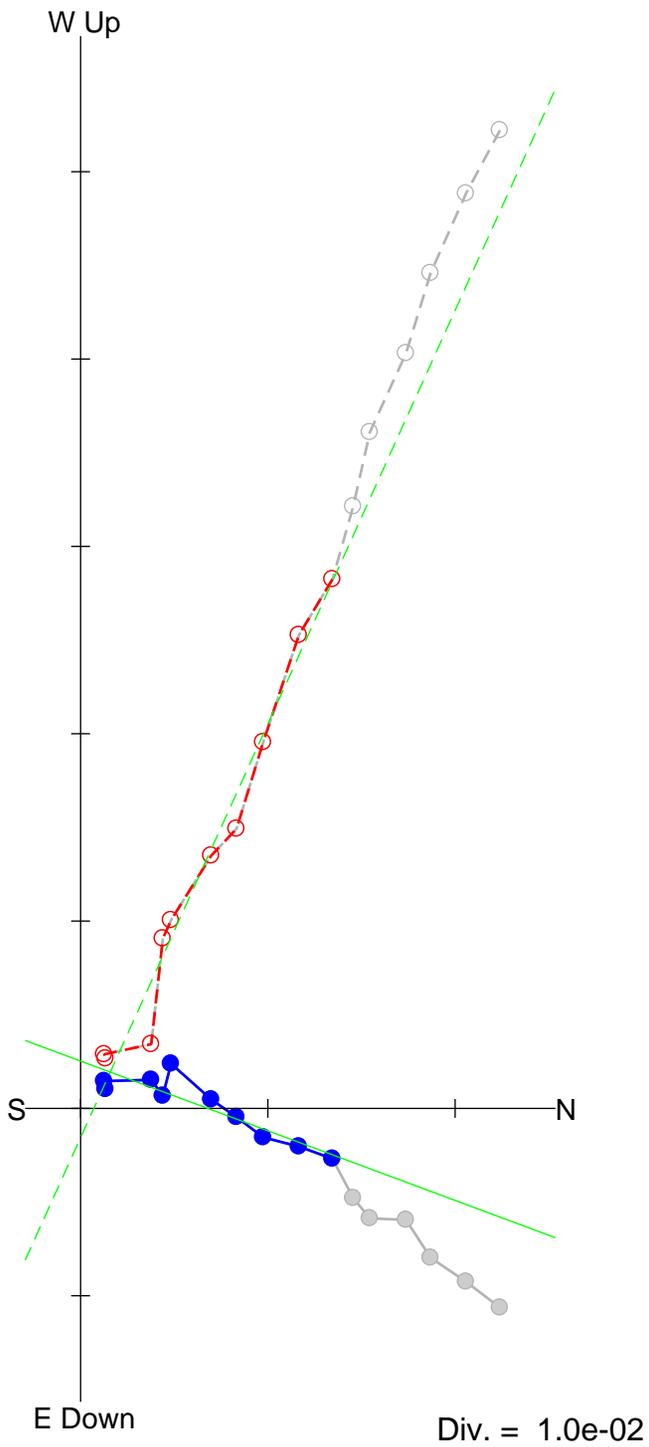


Jo= 4.47e-02

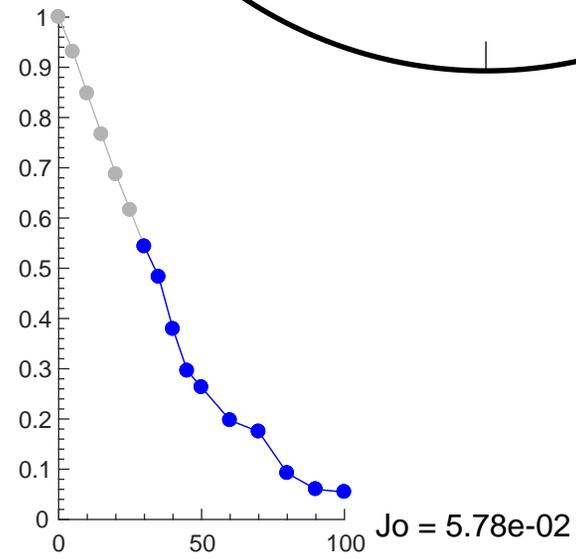
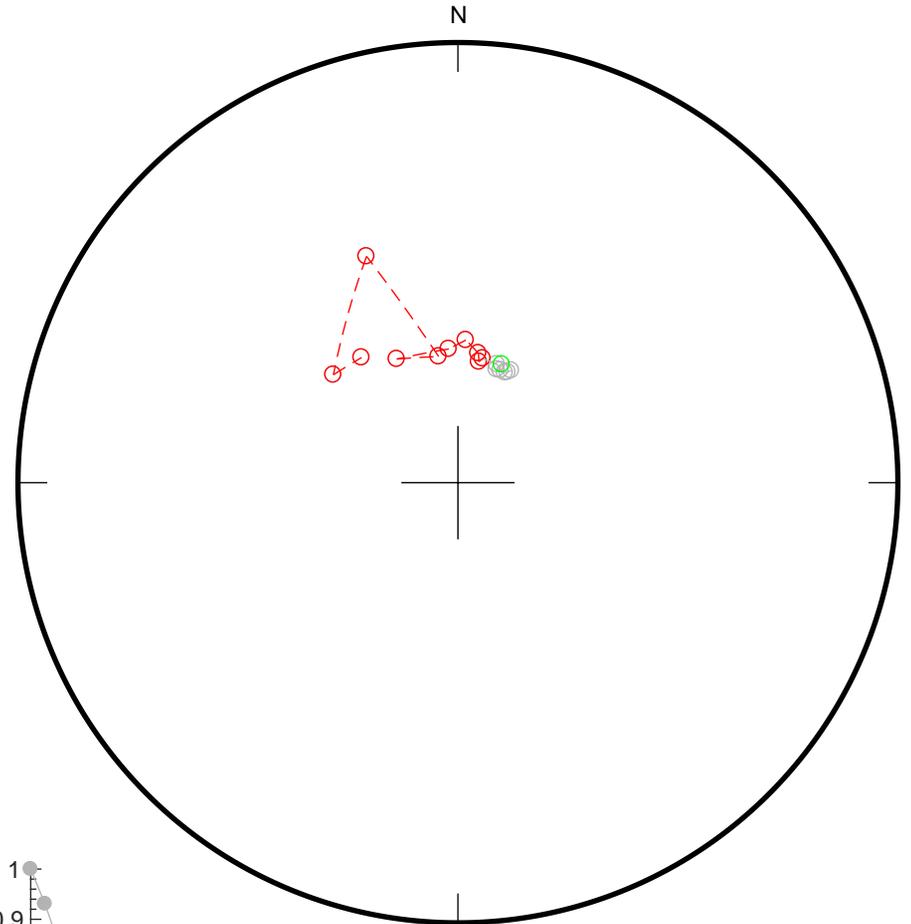
OH-1-5

135

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



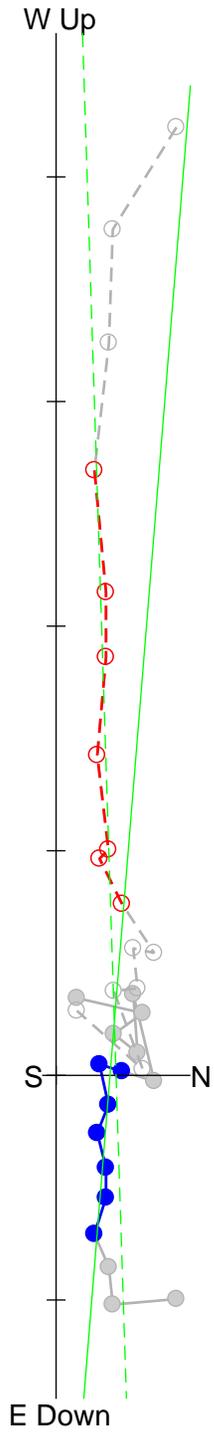
Fit from 30
to 100
Dec = 20.4
Inc = -64.2
MAD = 5.4



OH-1-6

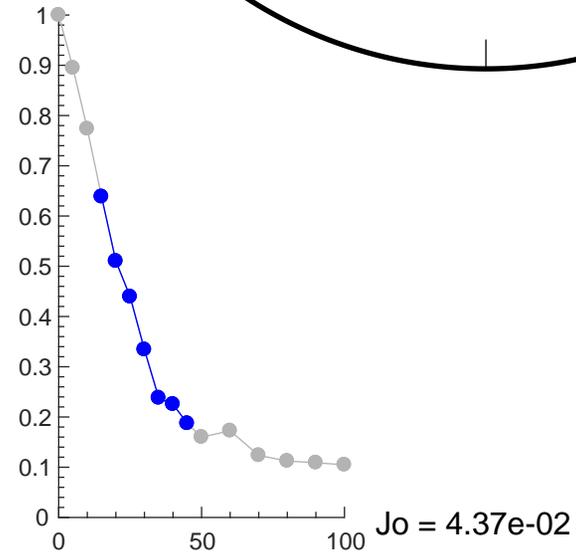
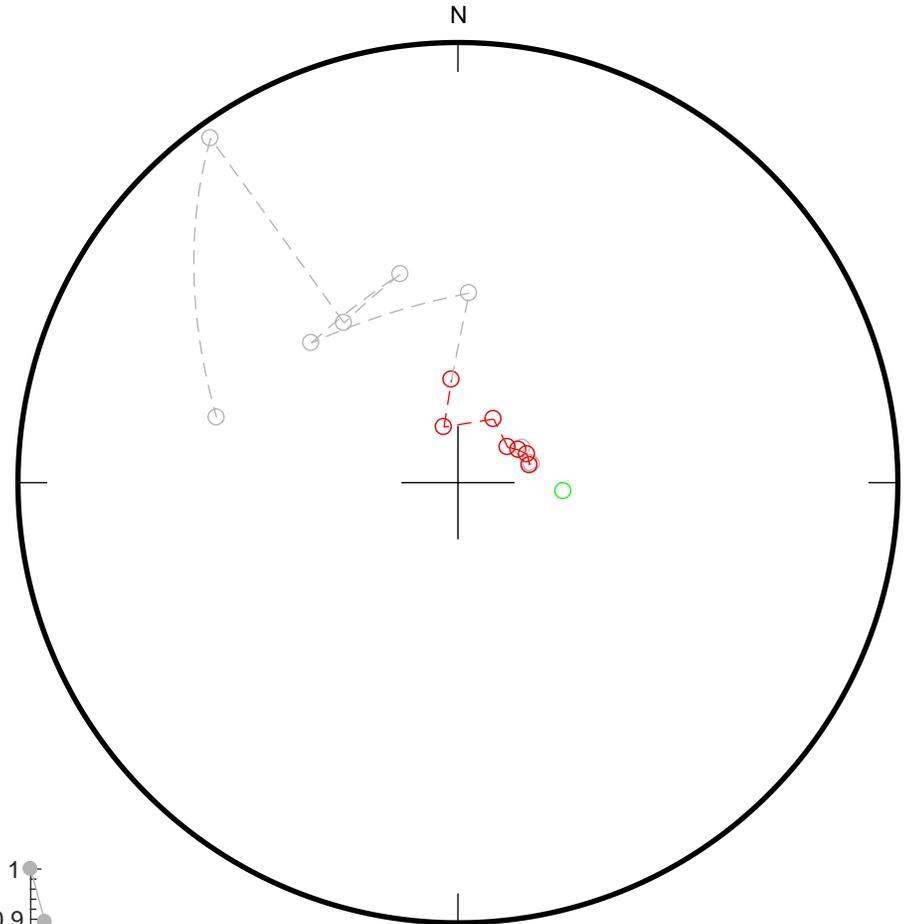
136

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 15
to 45
Dec = 94.6
Inc = -68.3
MAD = 4.4

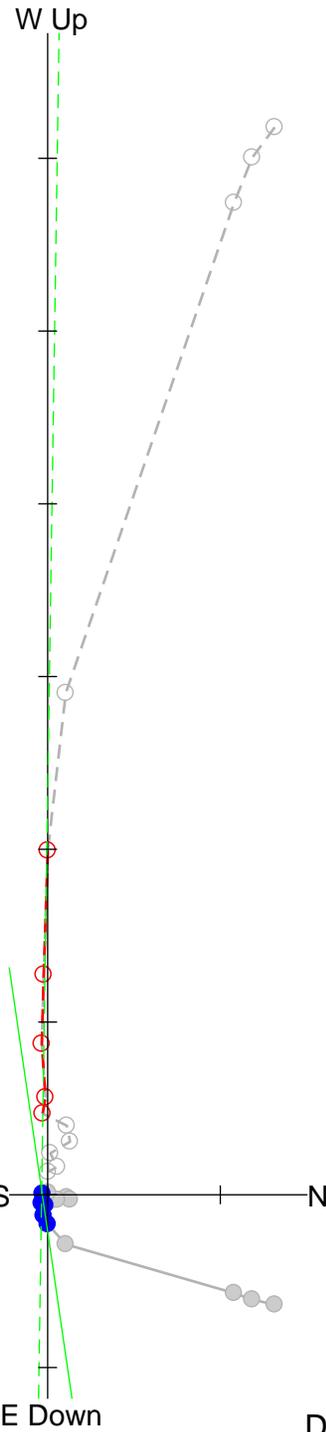
Div. = 1.0e-02



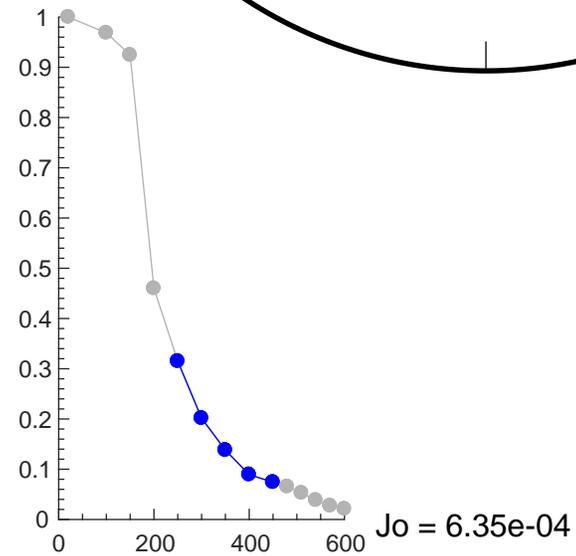
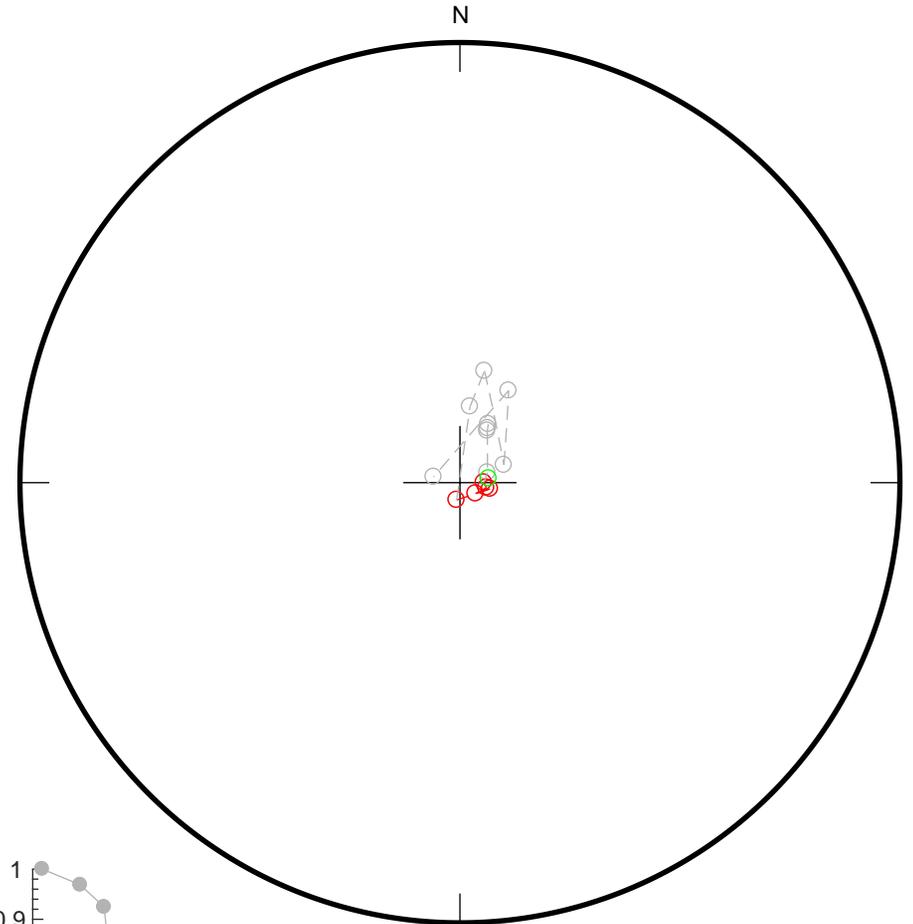
Oh-1-7 (in situ)

137

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



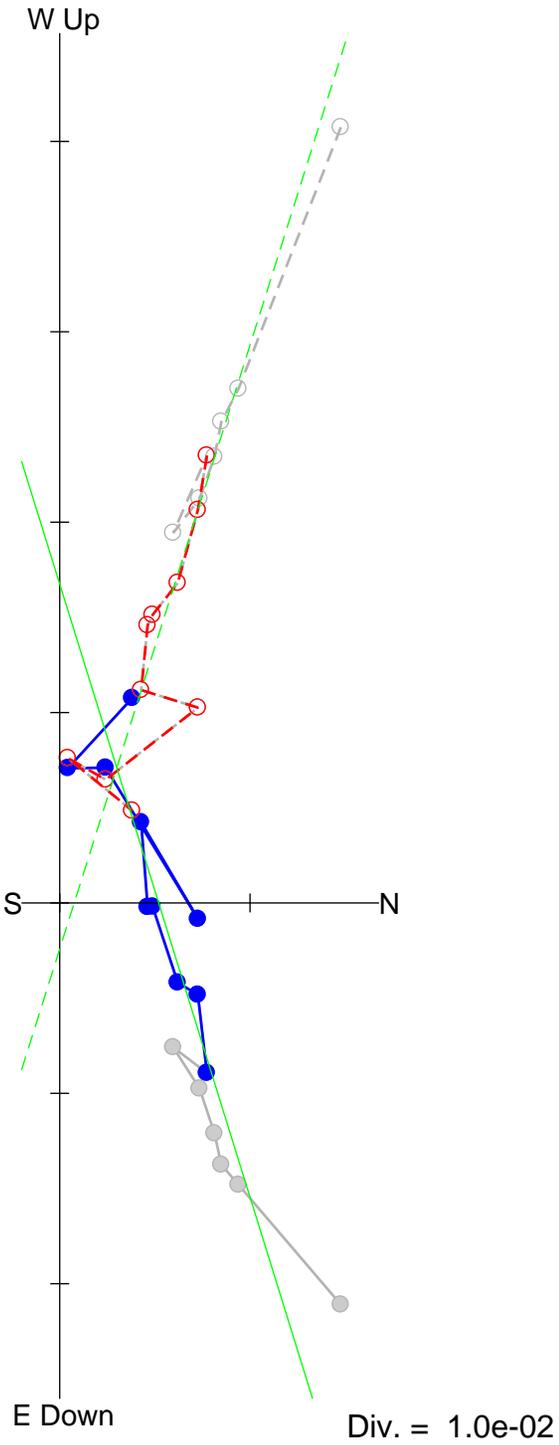
Fit from 250
to 450
Dec = 81.7
Inc = -84.0
MAD = 2.3



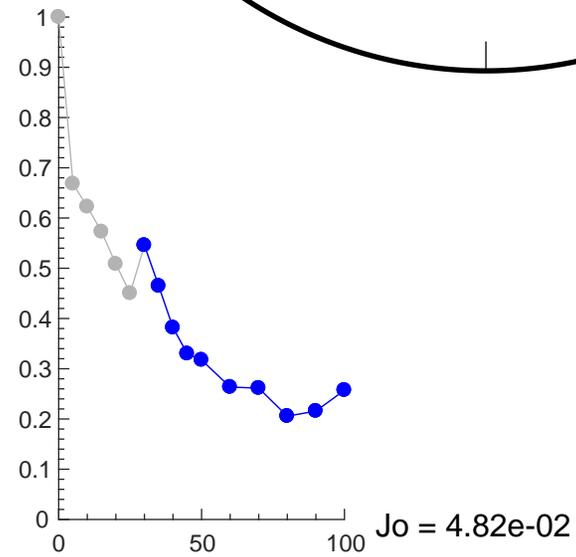
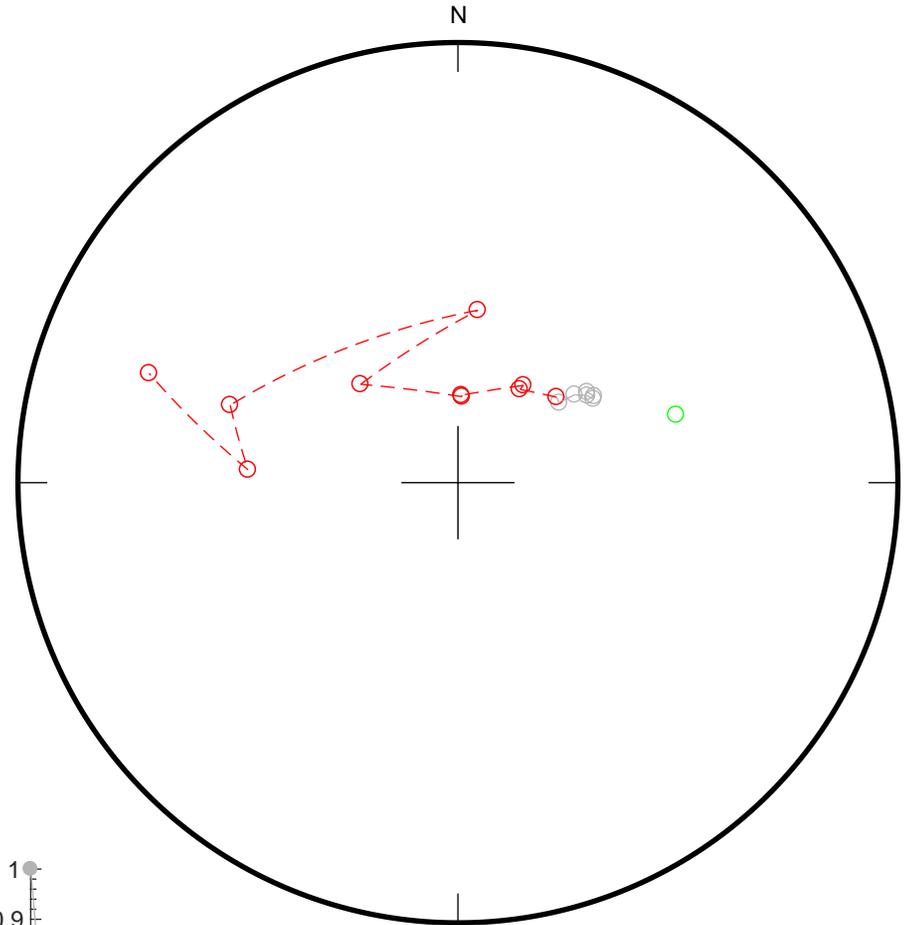
OH-1-10

138

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



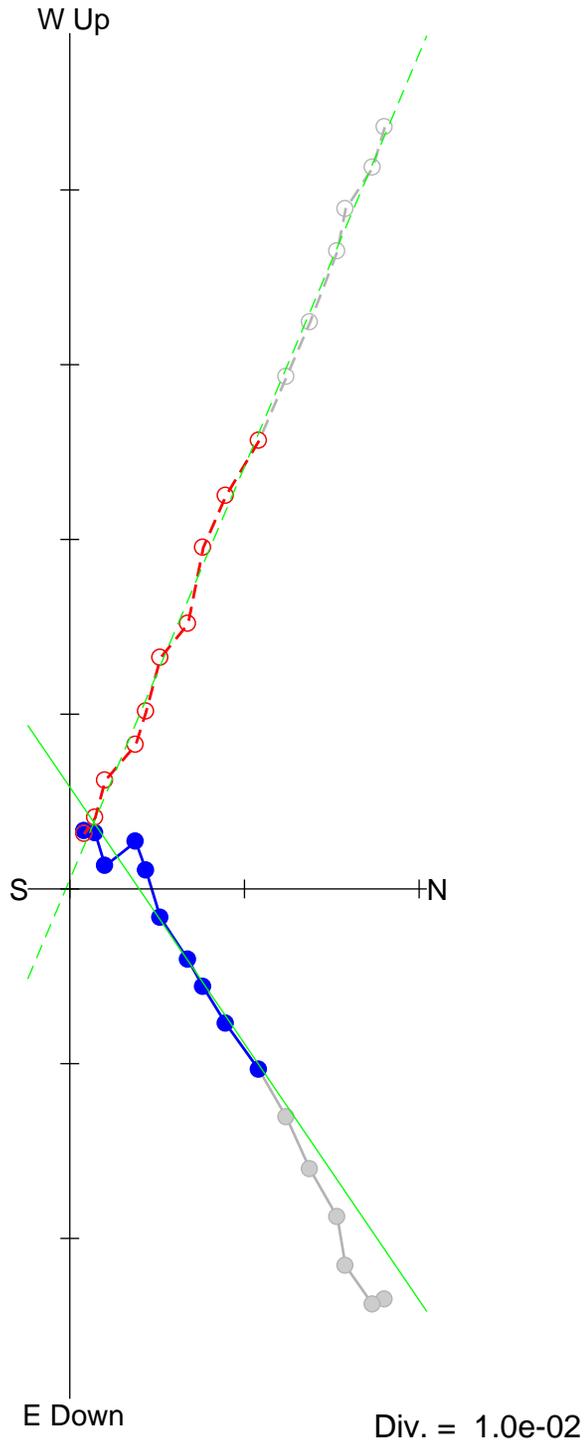
Fit from 30
to 100
Dec = 72.7
Inc = -43.2
MAD = 12.3



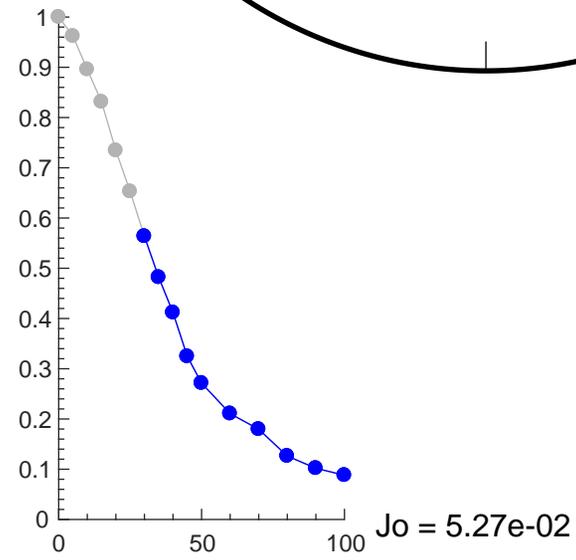
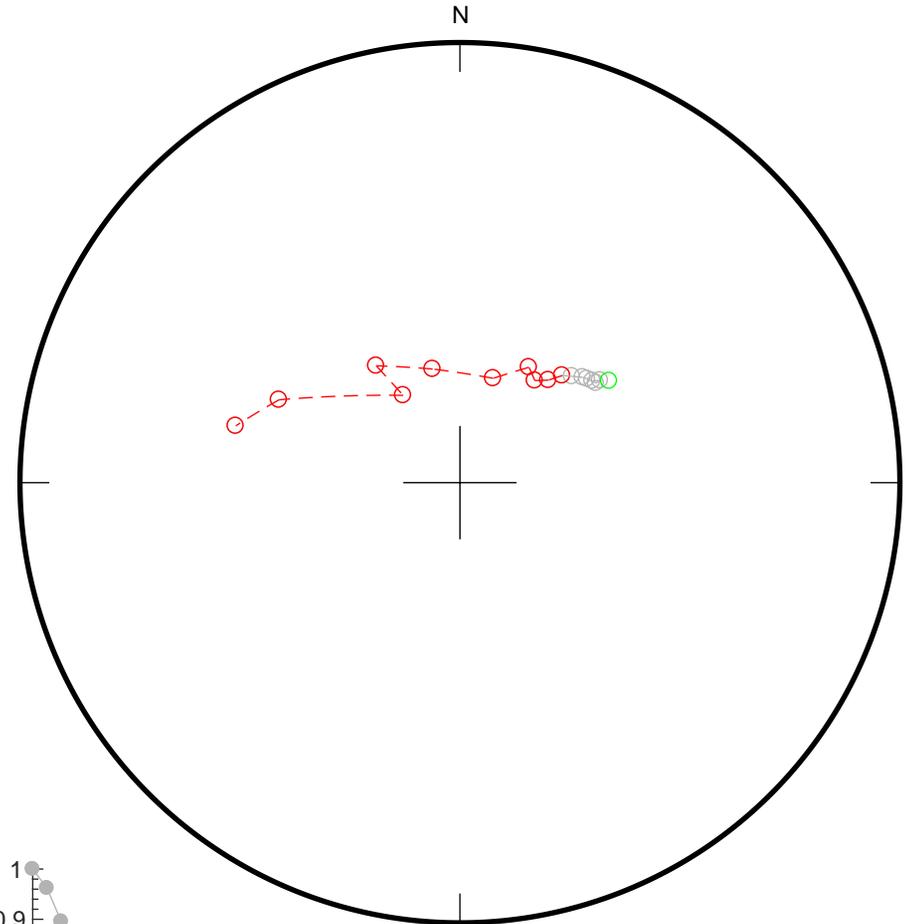
OH-1-11

139

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



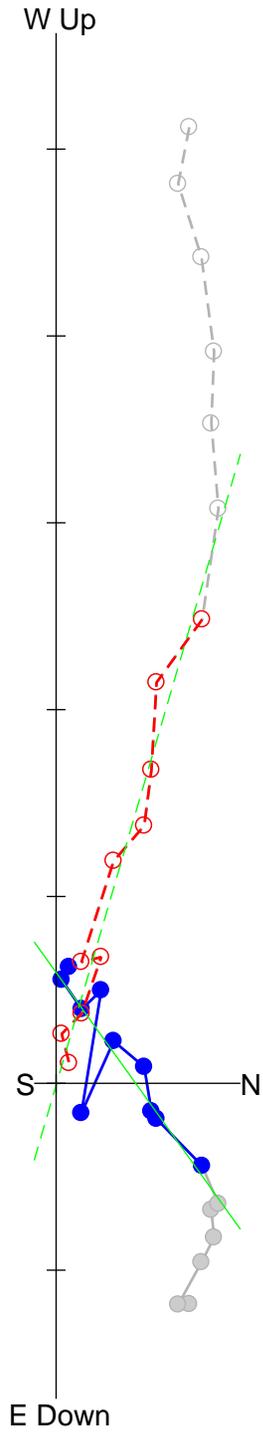
Fit from 30
to 100
Dec = 55.7
Inc = -53.1
MAD = 5.2



OH-1-12

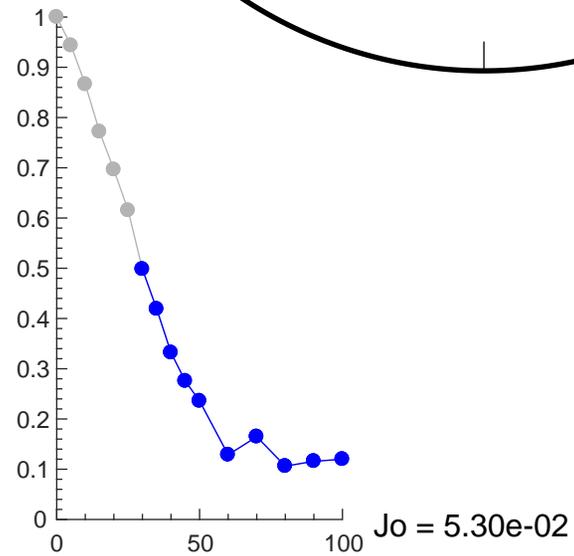
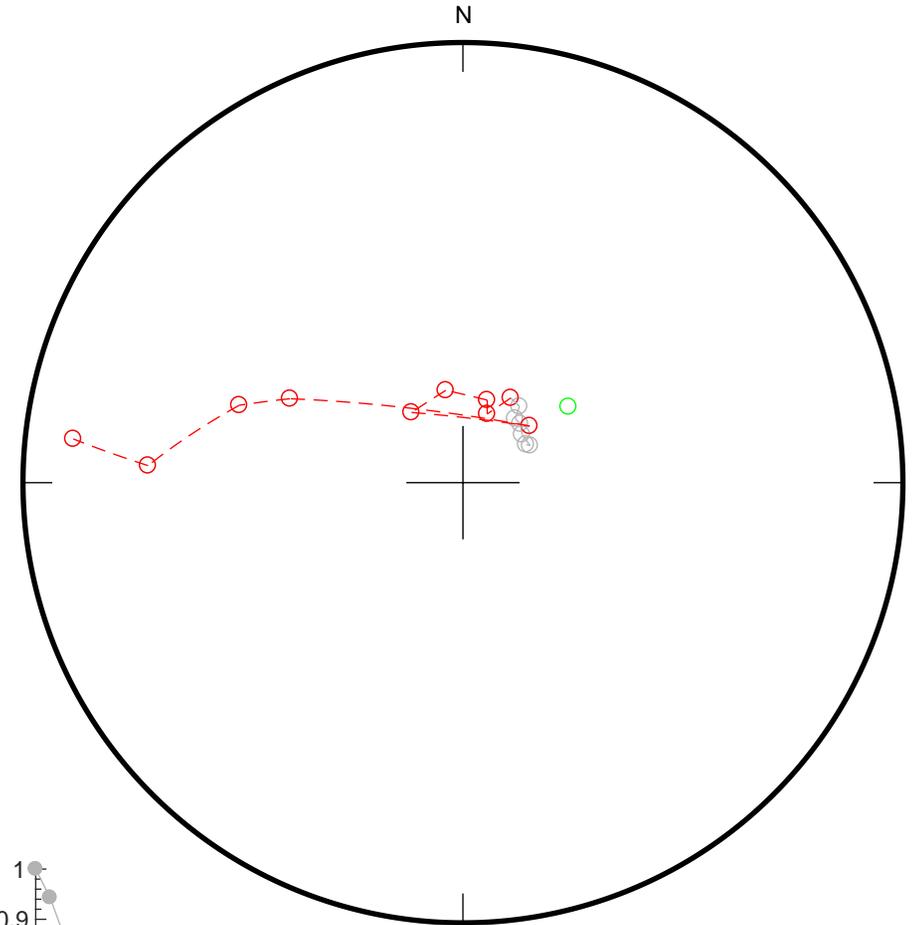
140

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 30
to 100
Dec = 54.3
Inc = -63.4
MAD = 11.3

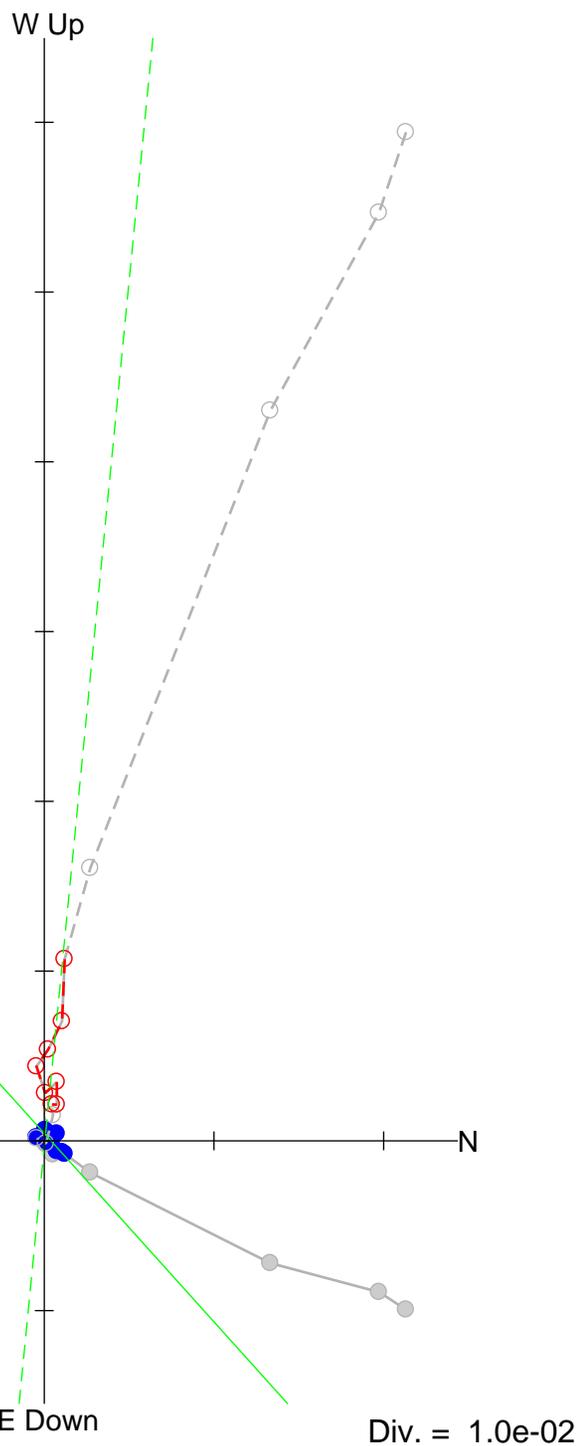
Div. = 1.0e-02



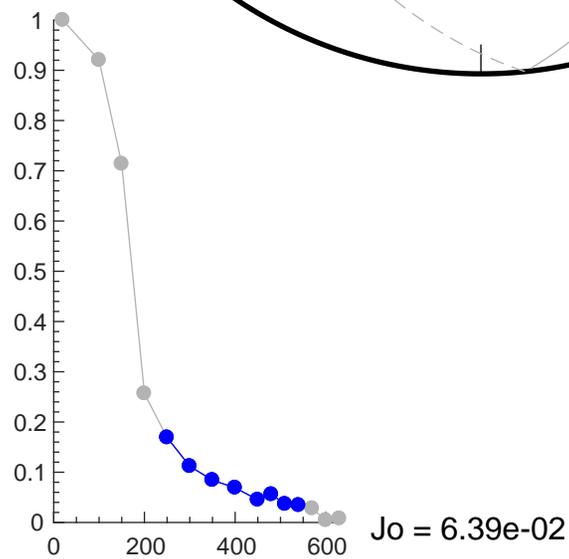
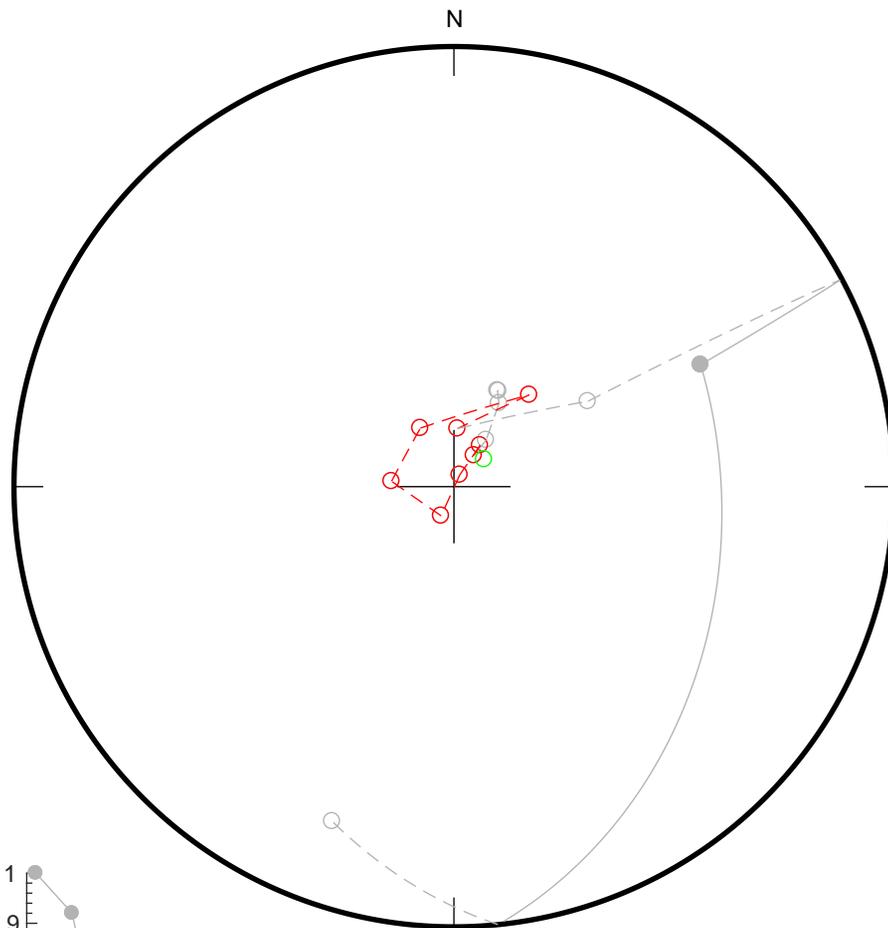
OH1-1-14

141

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600
630



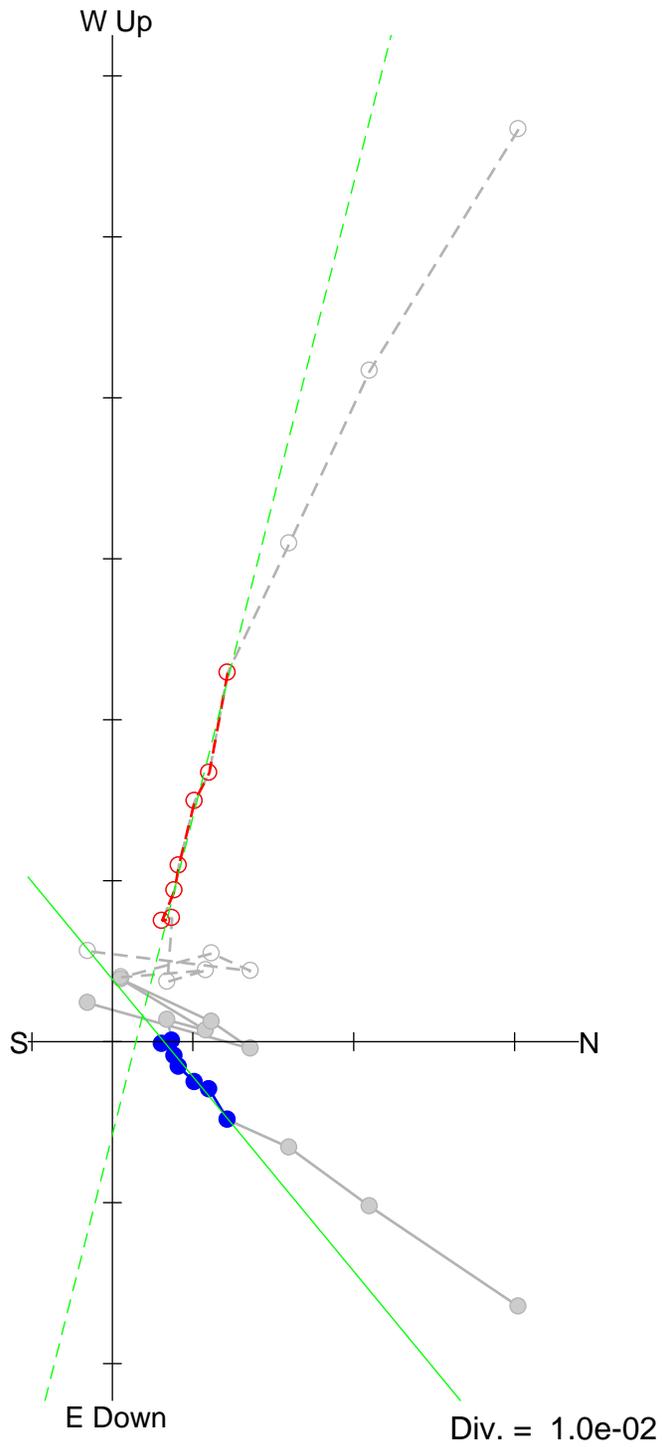
Fit from 250
to 540
Dec = 48.0
Inc = -81.7
MAD = 12.0



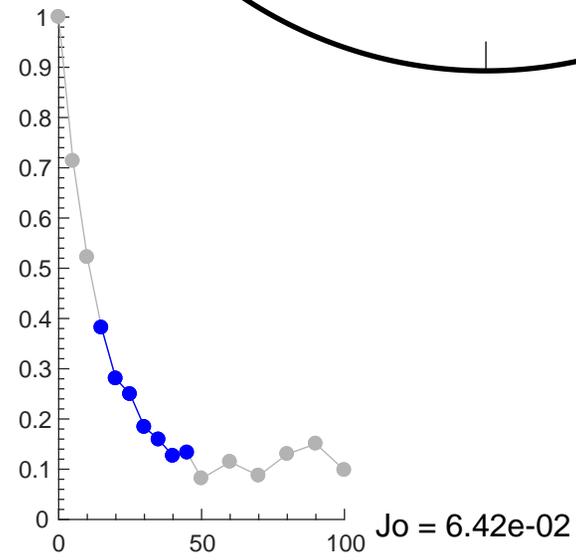
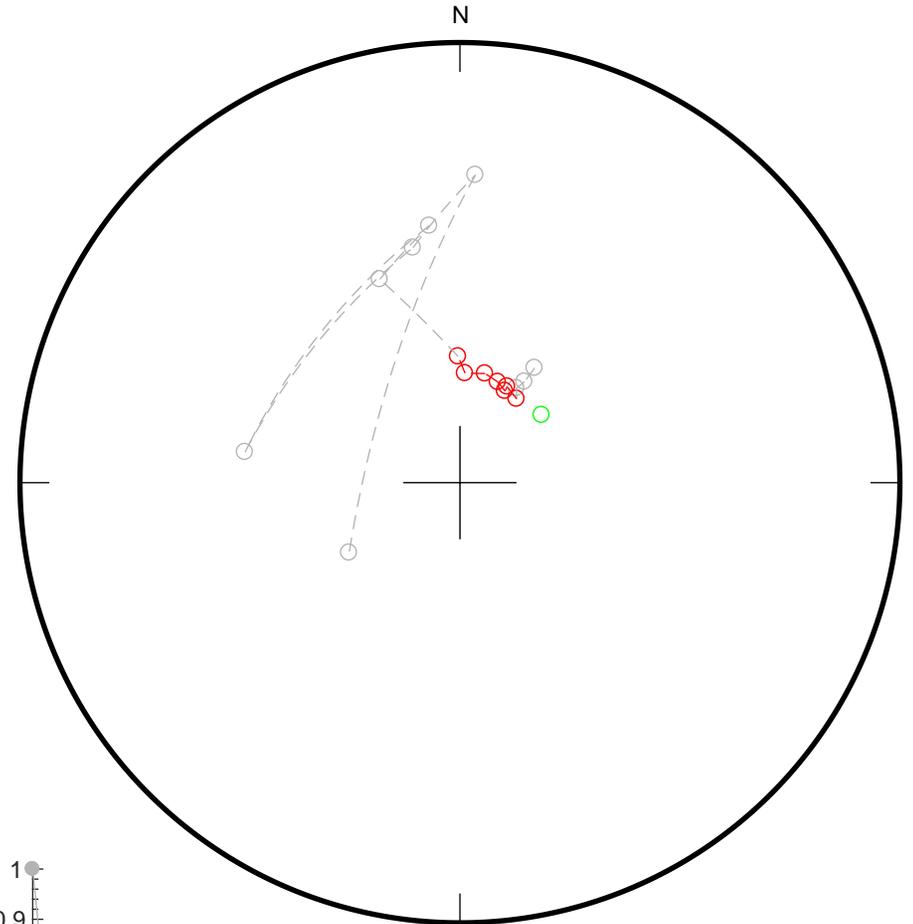
OH1-1-15

142

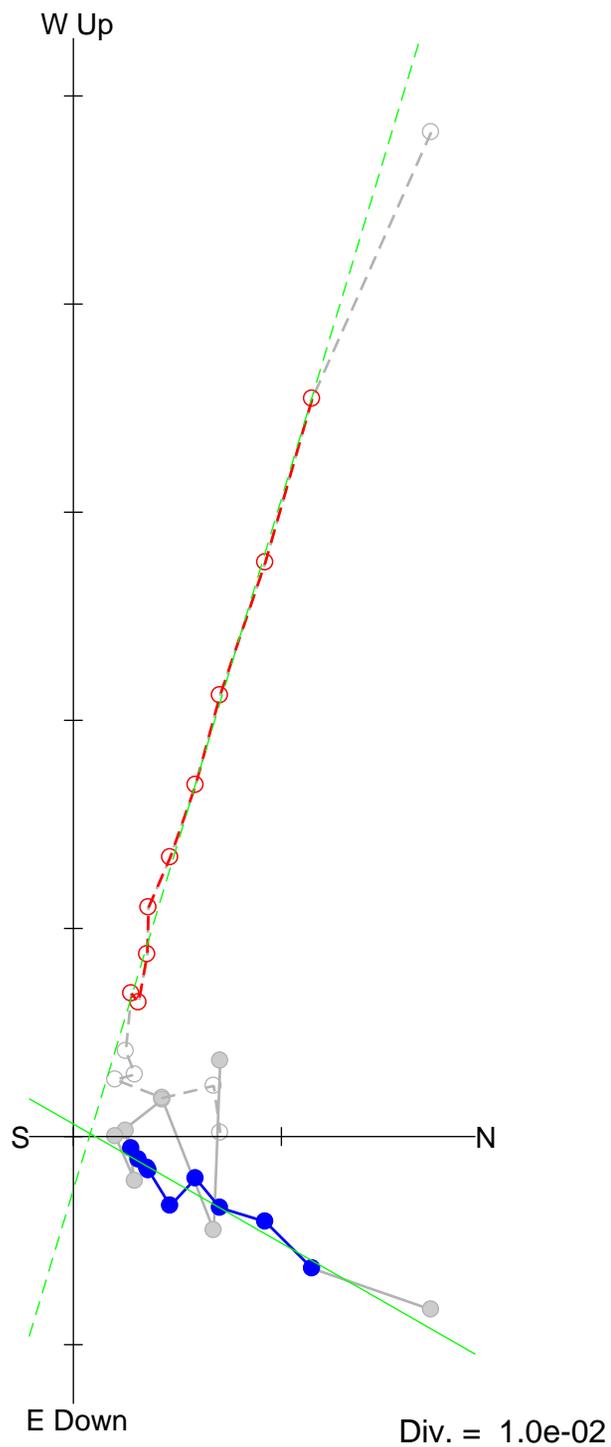
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



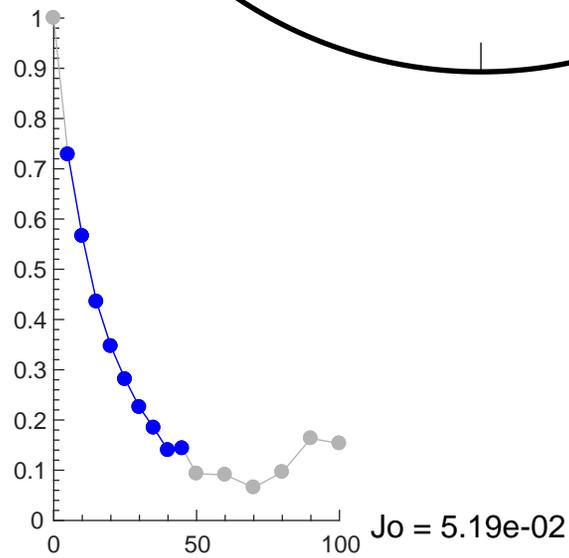
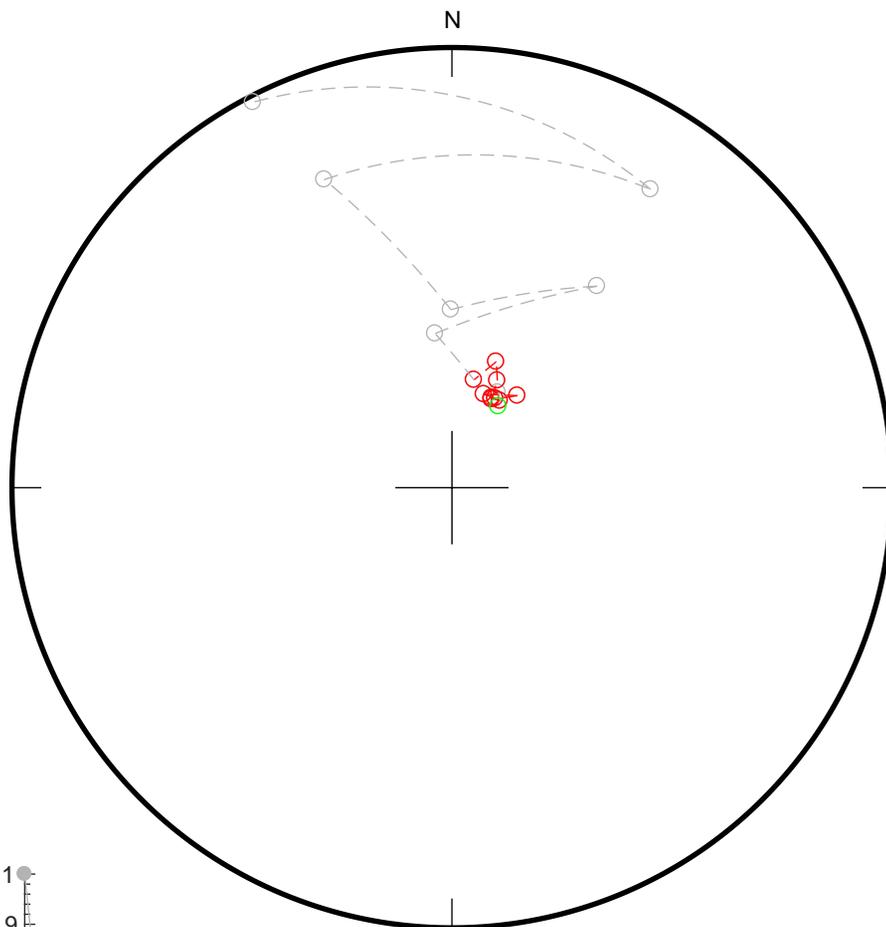
Fit from 15
to 45
Dec = 50.4
Inc = -68.3
MAD = 2.7



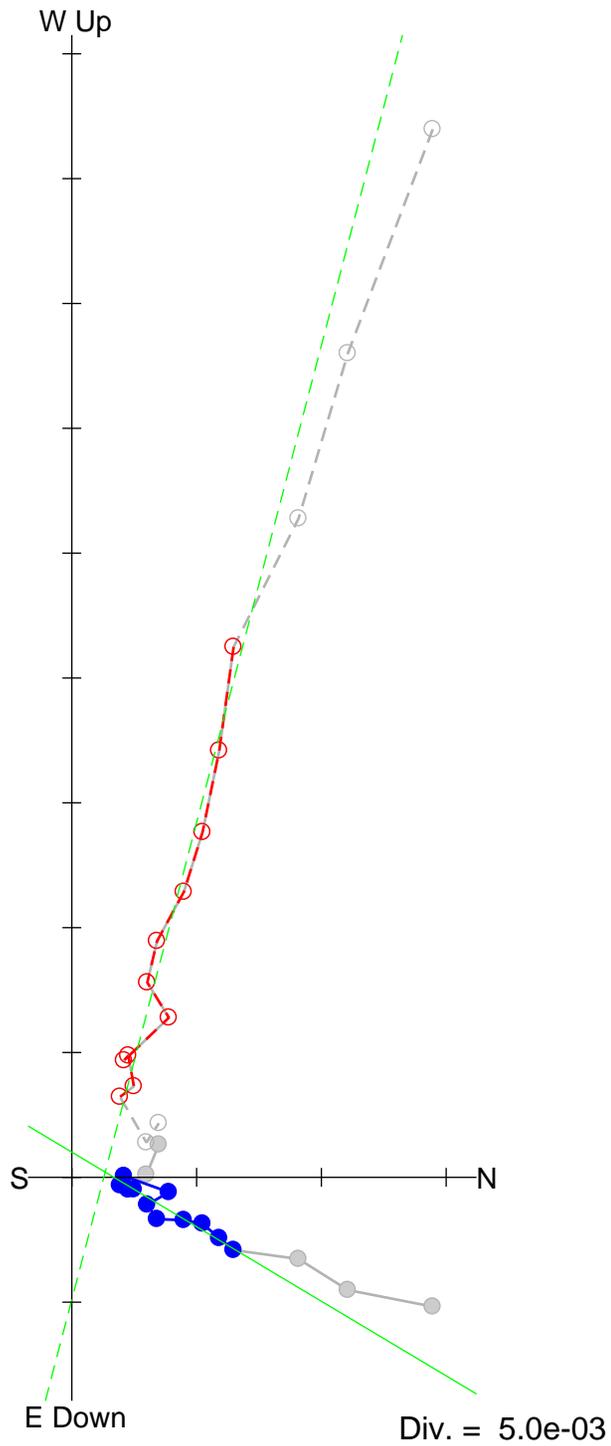
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



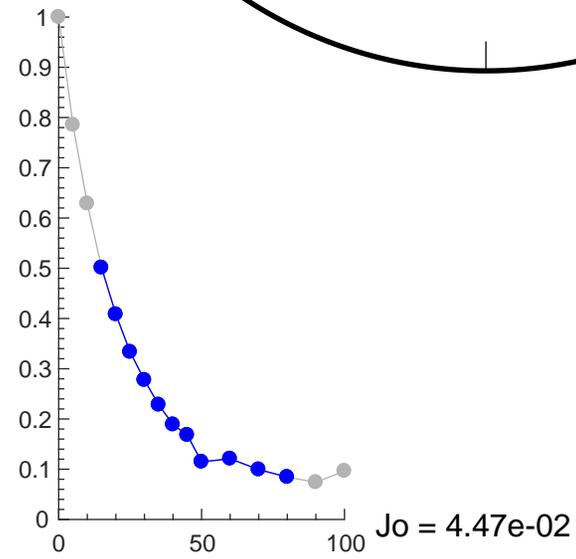
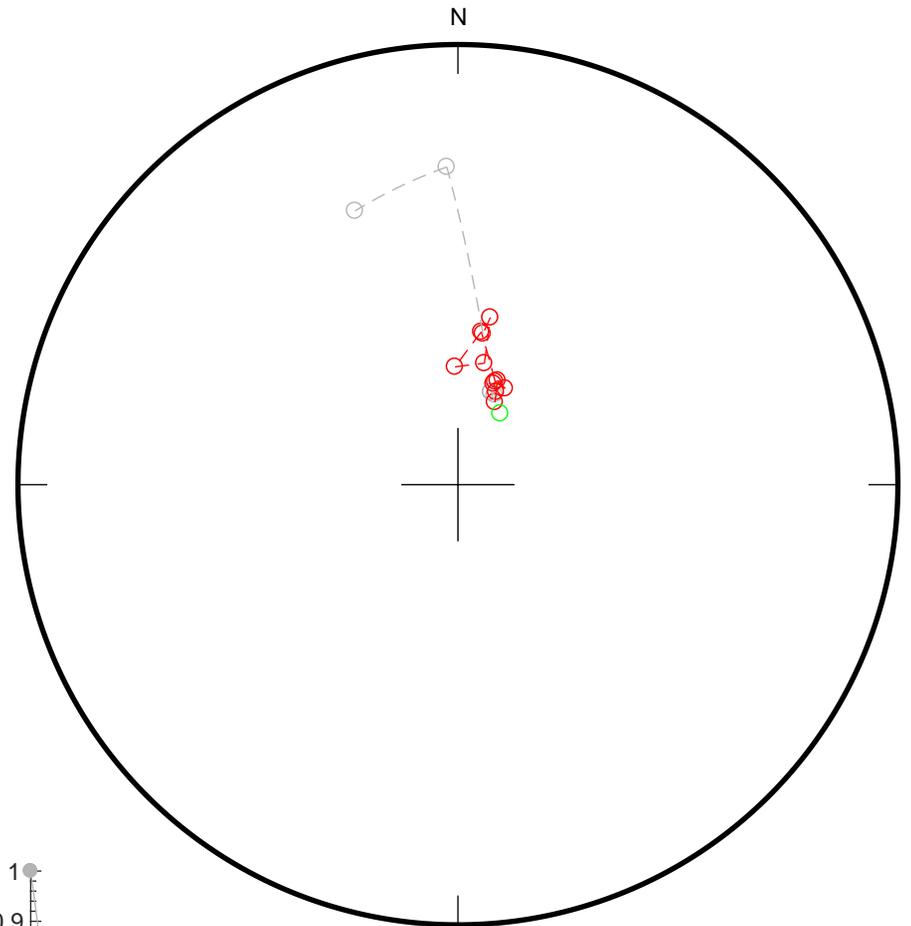
Fit from 5
to 45
Dec = 29.8
Inc = -70.9
MAD = 3.3



0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



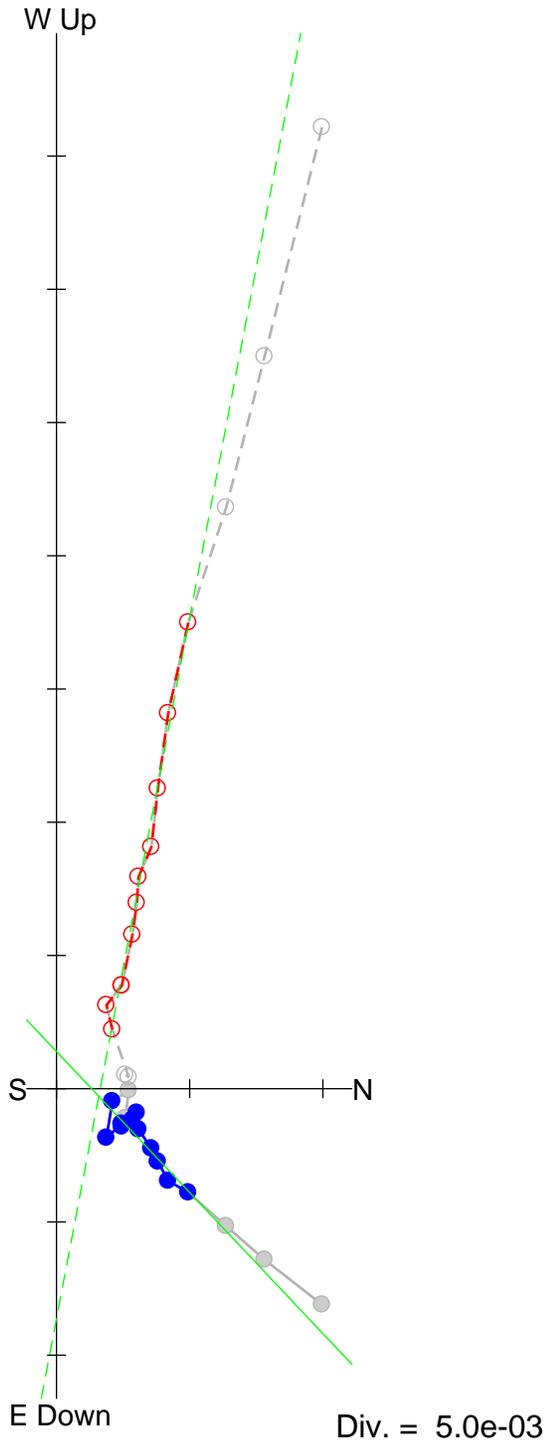
Fit from 15
to 80
Dec = 30.9
Inc = -73.1
MAD = 4.4



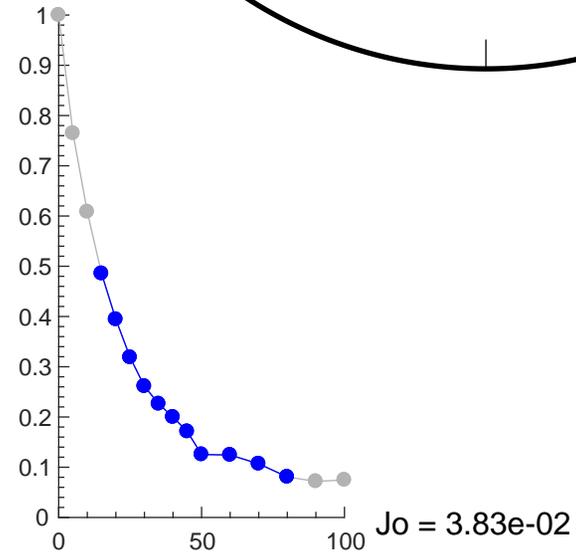
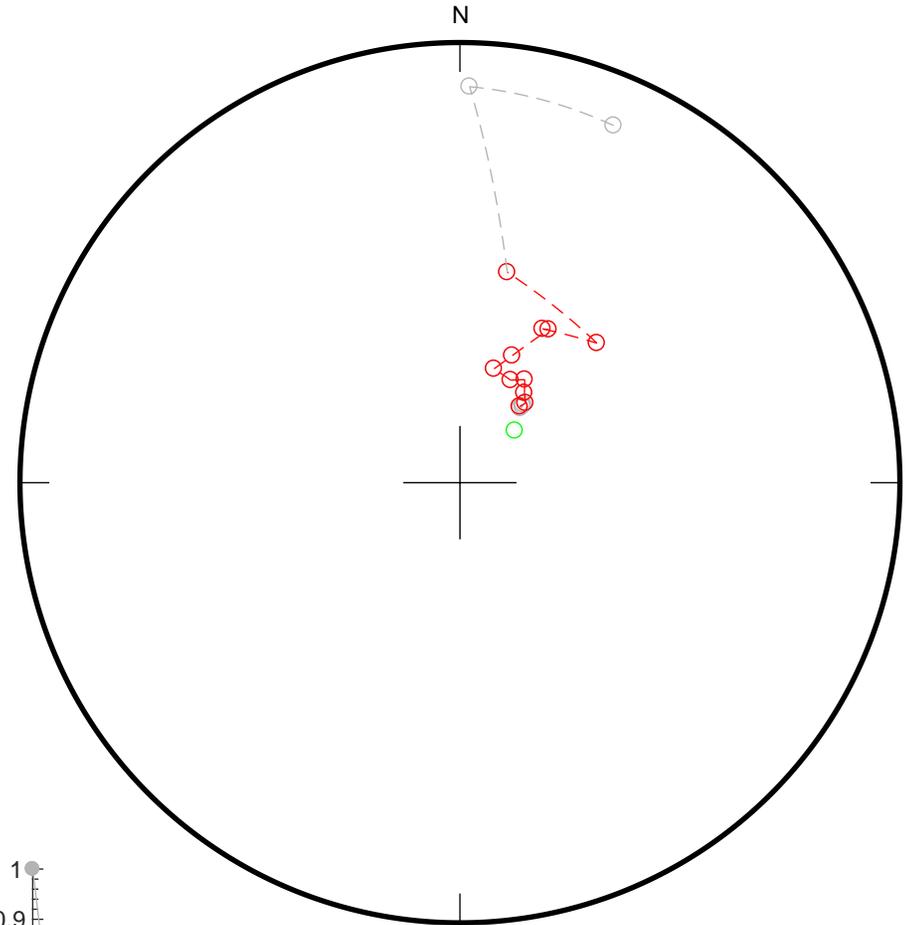
OH1-1-18

145

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 15
to 80
Dec = 46.6
Inc = -74.5
MAD = 5.4

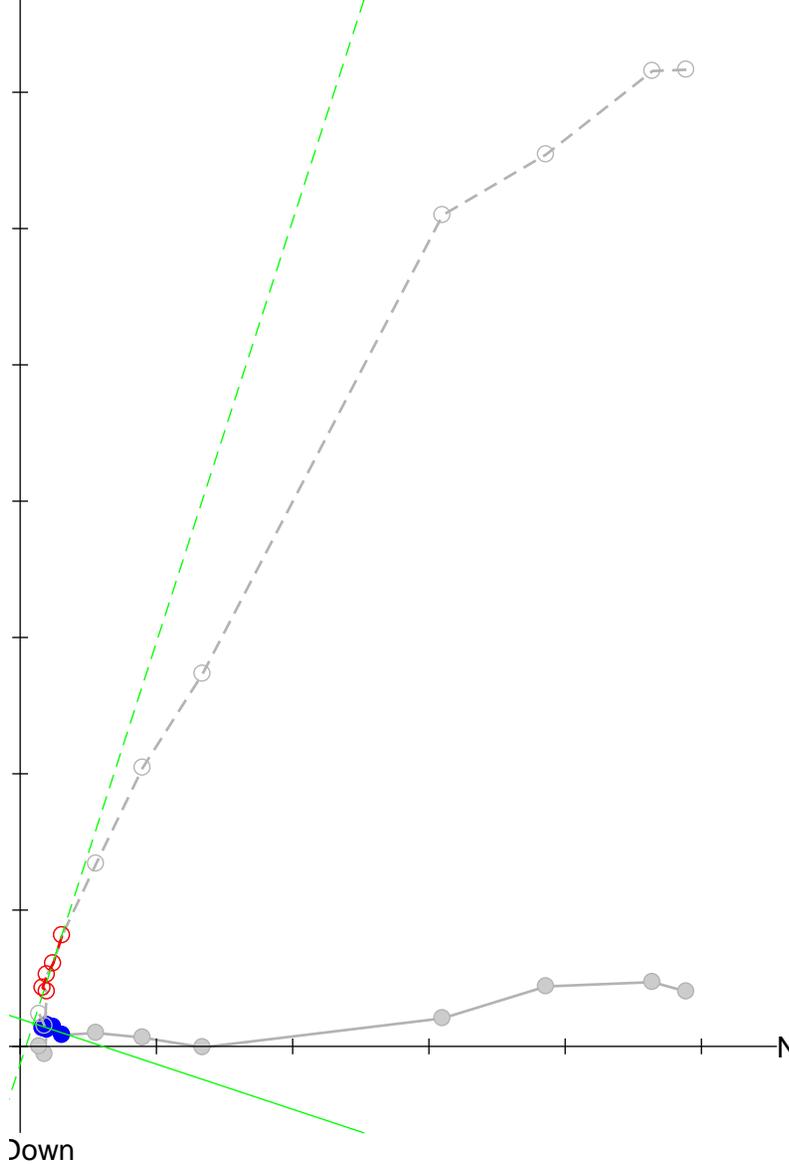


Mamaku/Ohakuri 火碎流

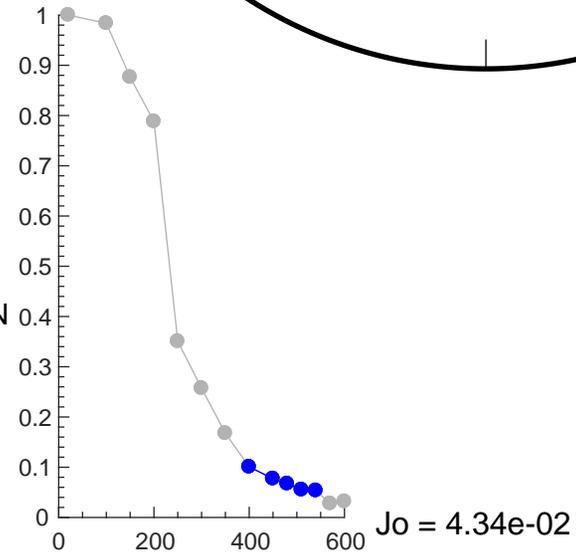
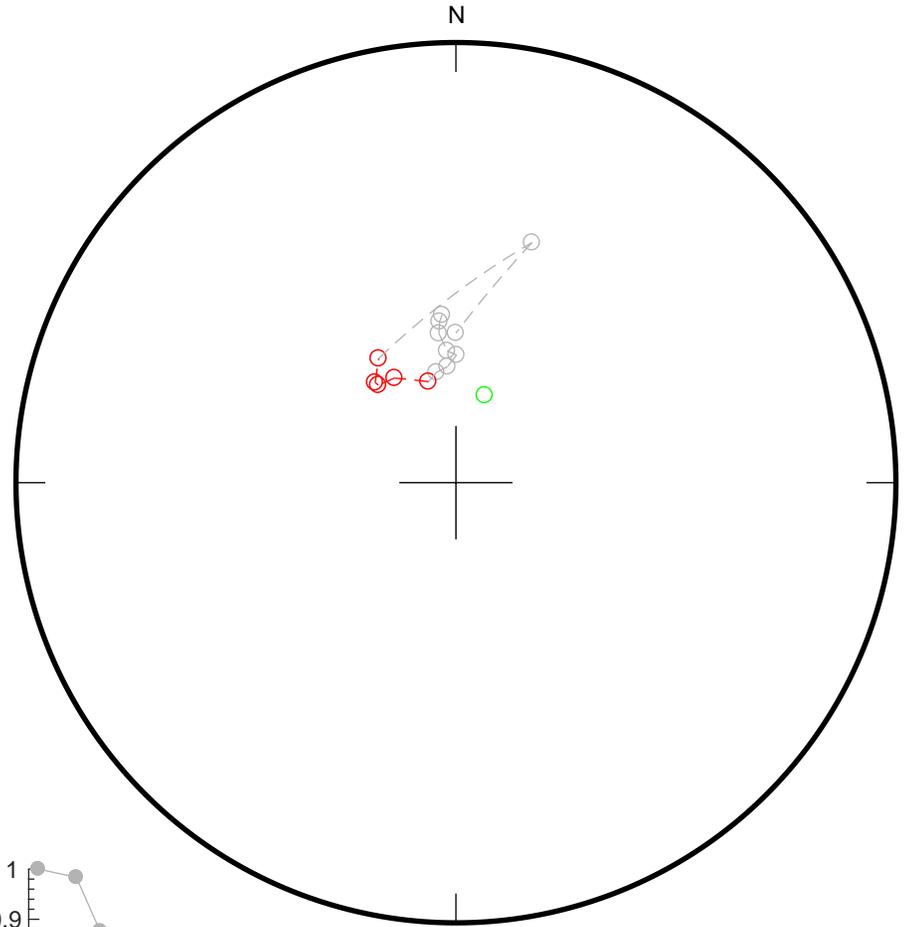
Unit 5U : OH1-4

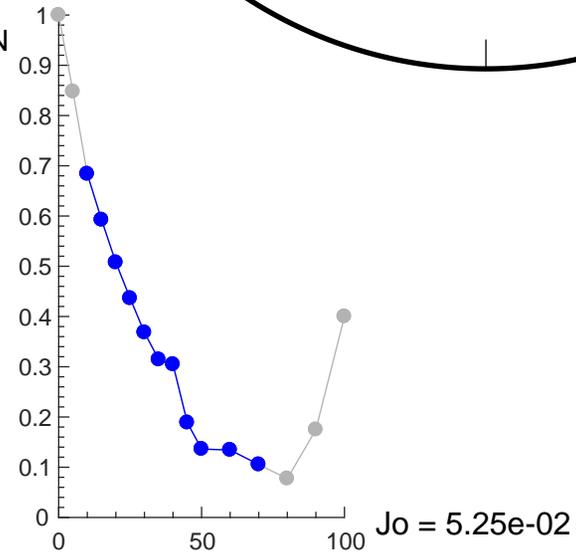
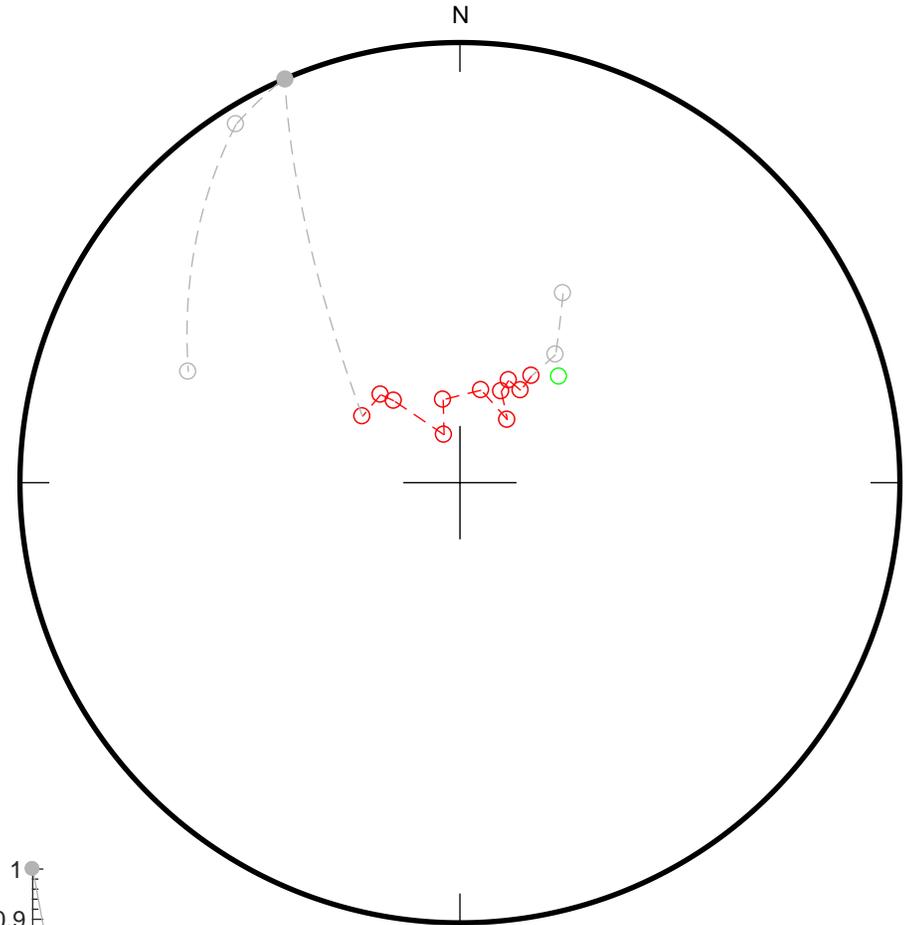
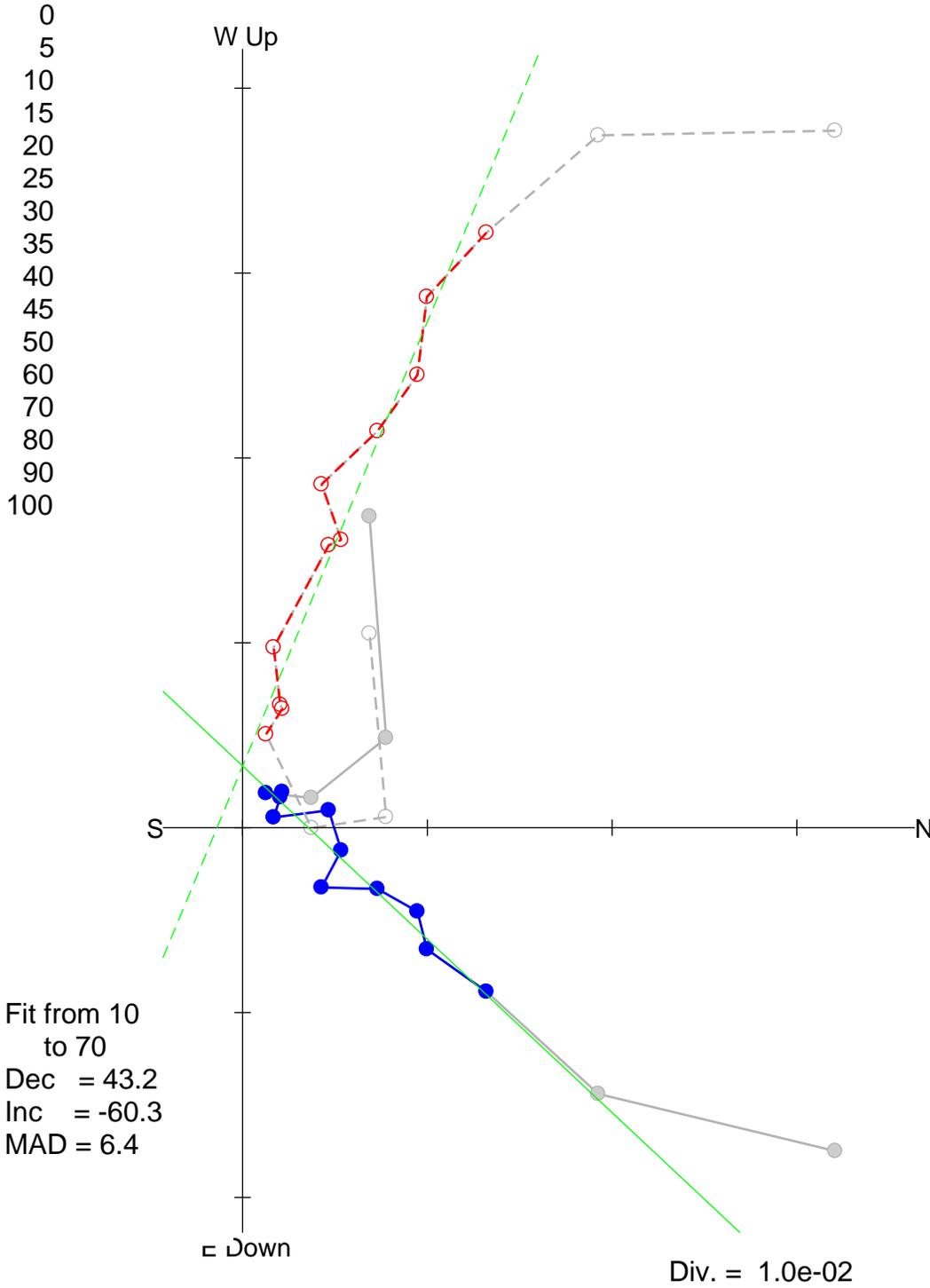
20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600

W Up

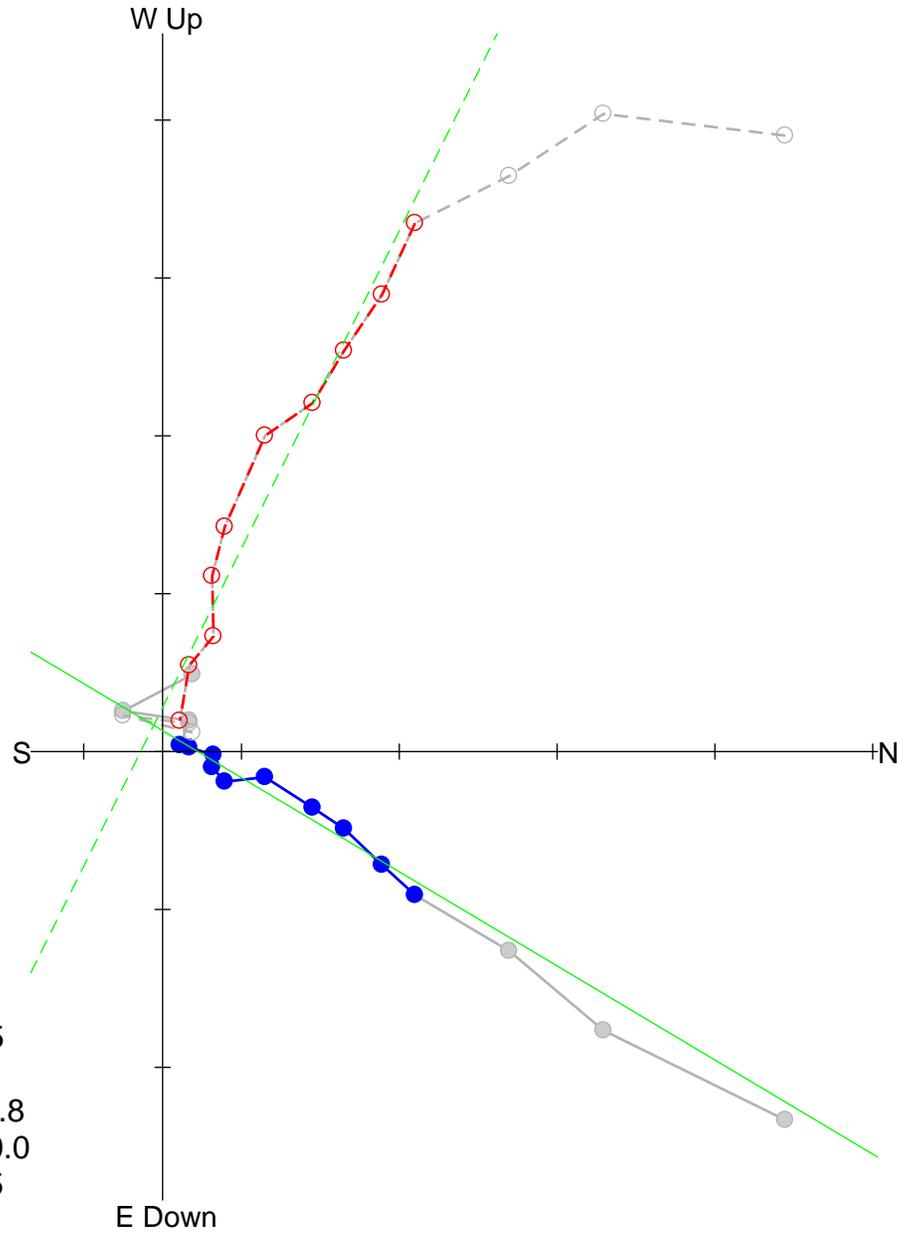


Fit from 400
to 540
Dec = 18.3
Inc = -71.2
MAD = 8.6



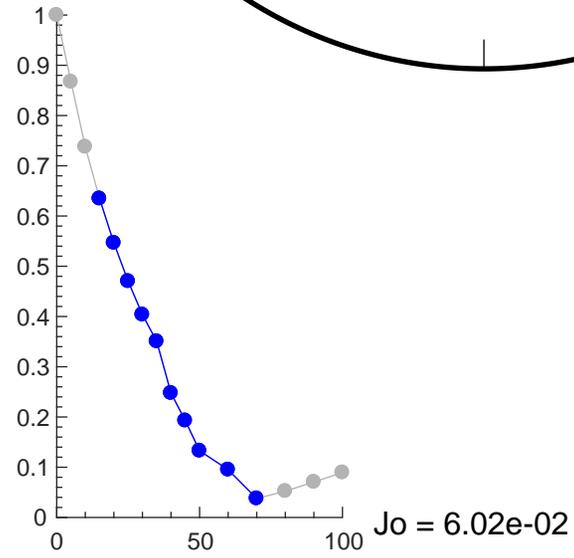
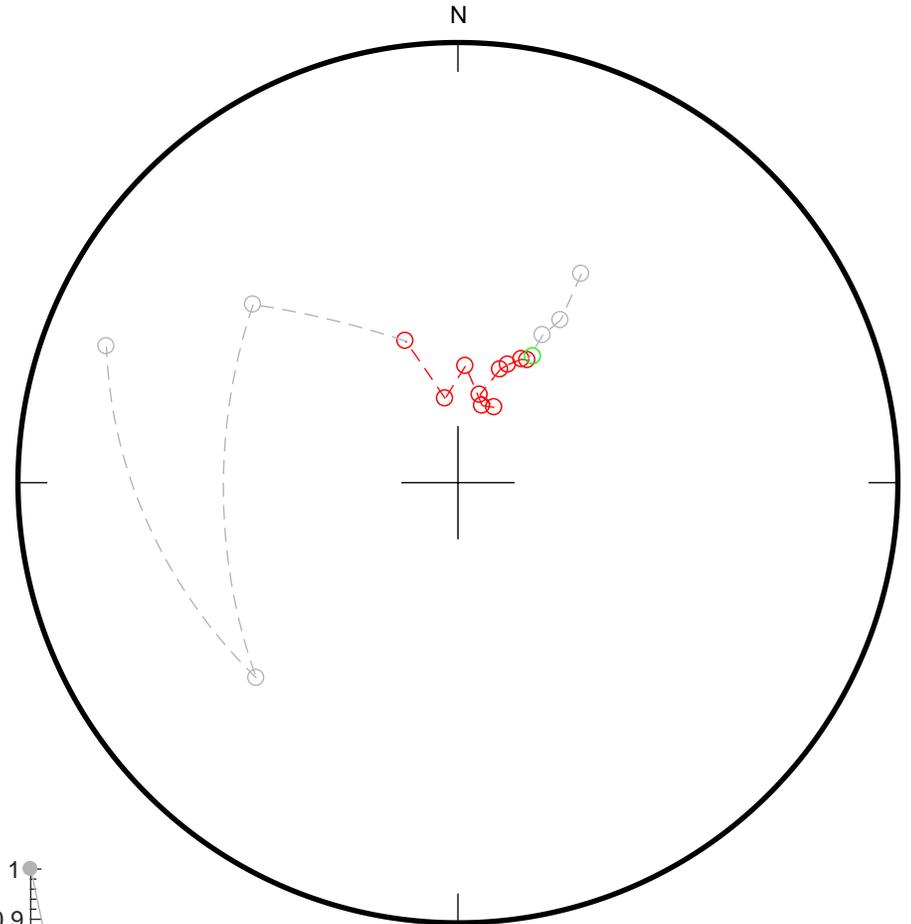


0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 15
to 70
Dec = 30.8
Inc = -60.0
MAD = 6.5

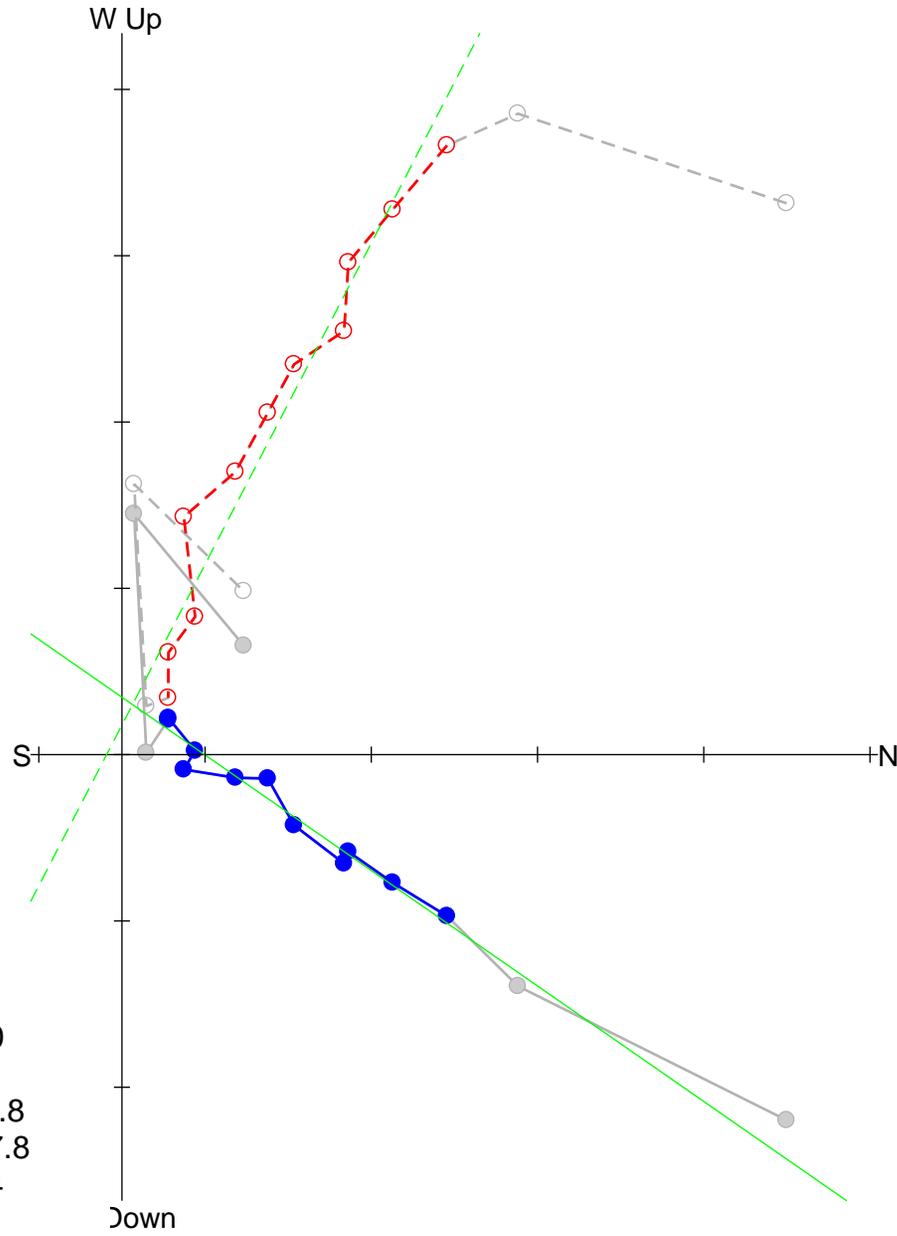
Div. = 1.0e-02



OH1-4-8

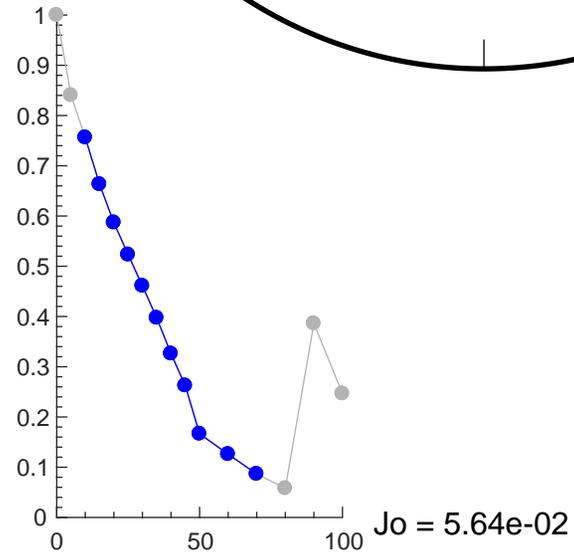
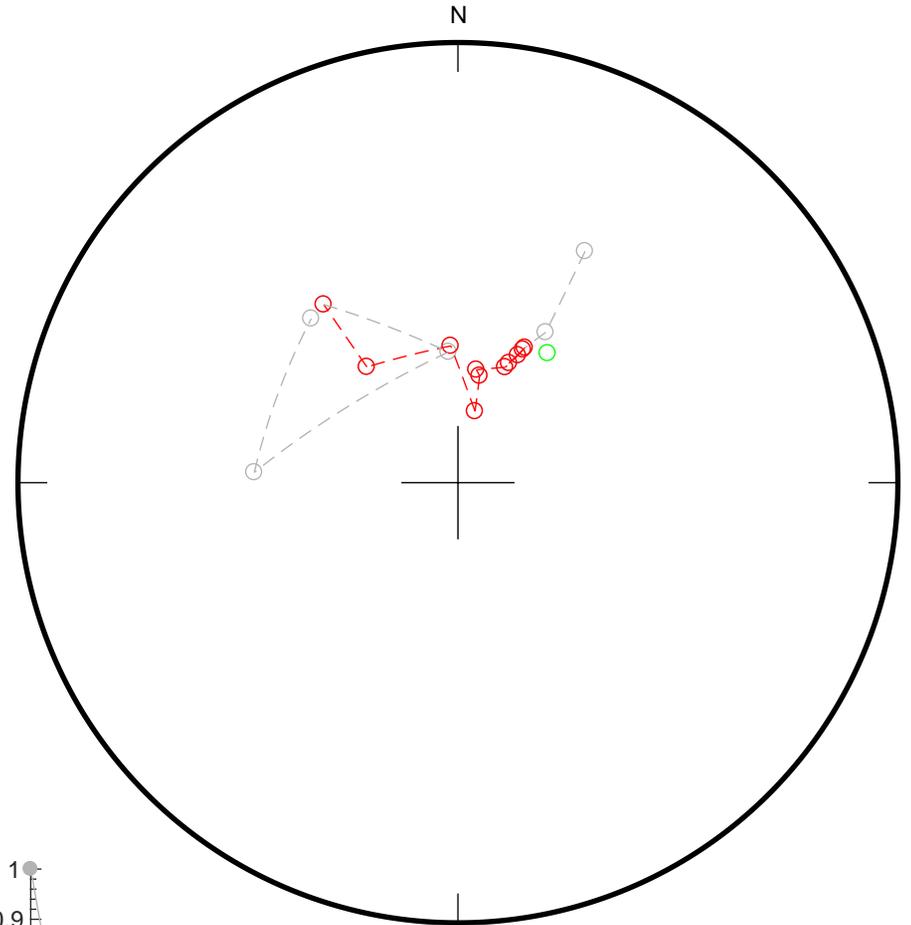
150

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 10
to 70
Dec = 34.8
Inc = -57.8
MAD = 6.4

Div. = 1.0e-02

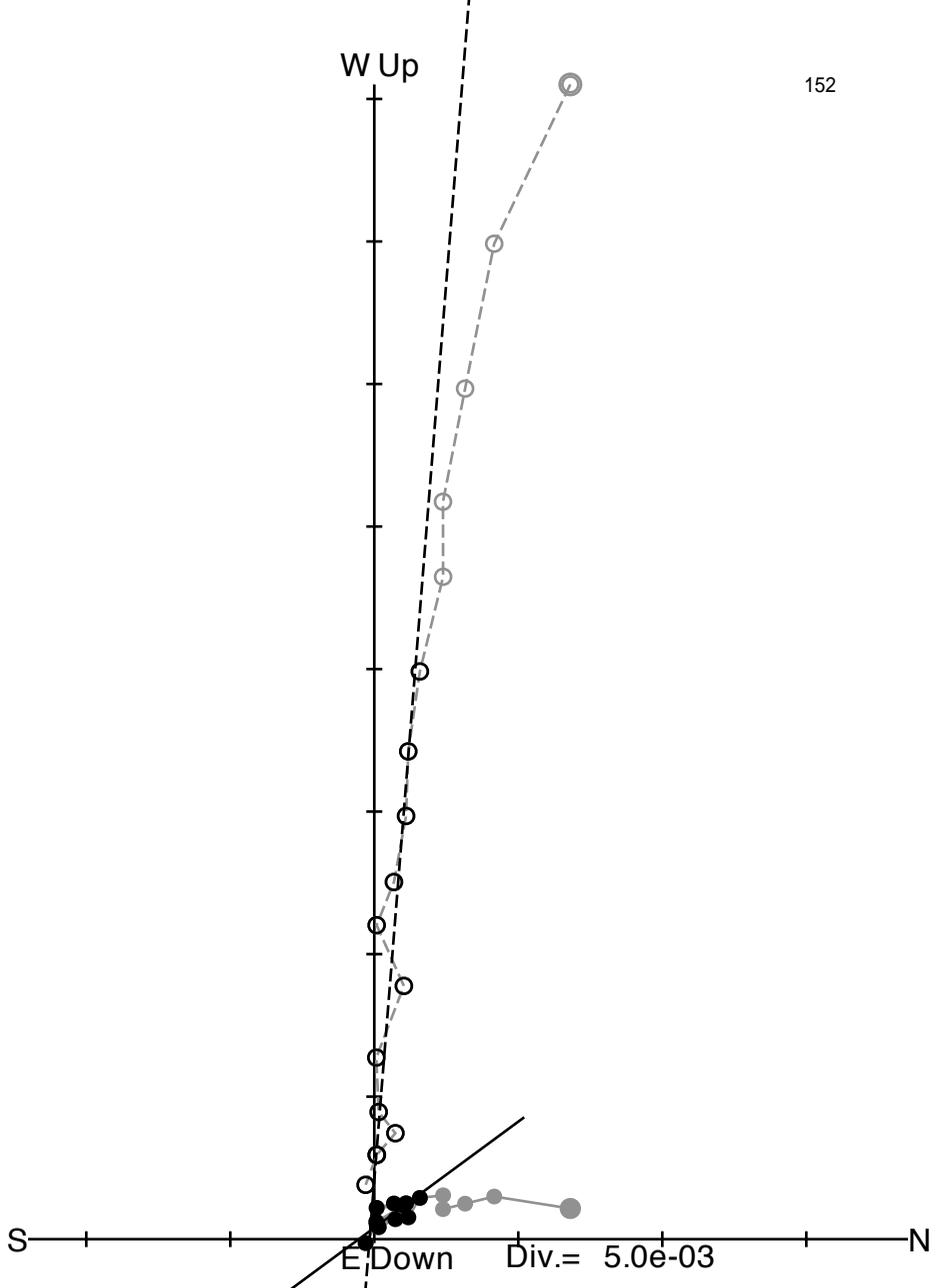


Mamaku/Ohakuri 火碎流

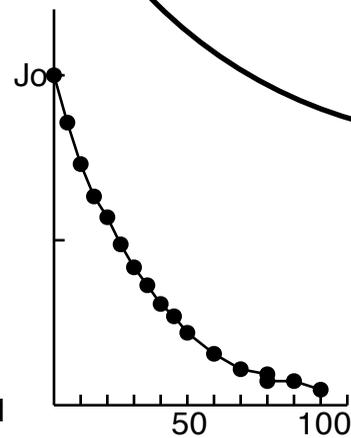
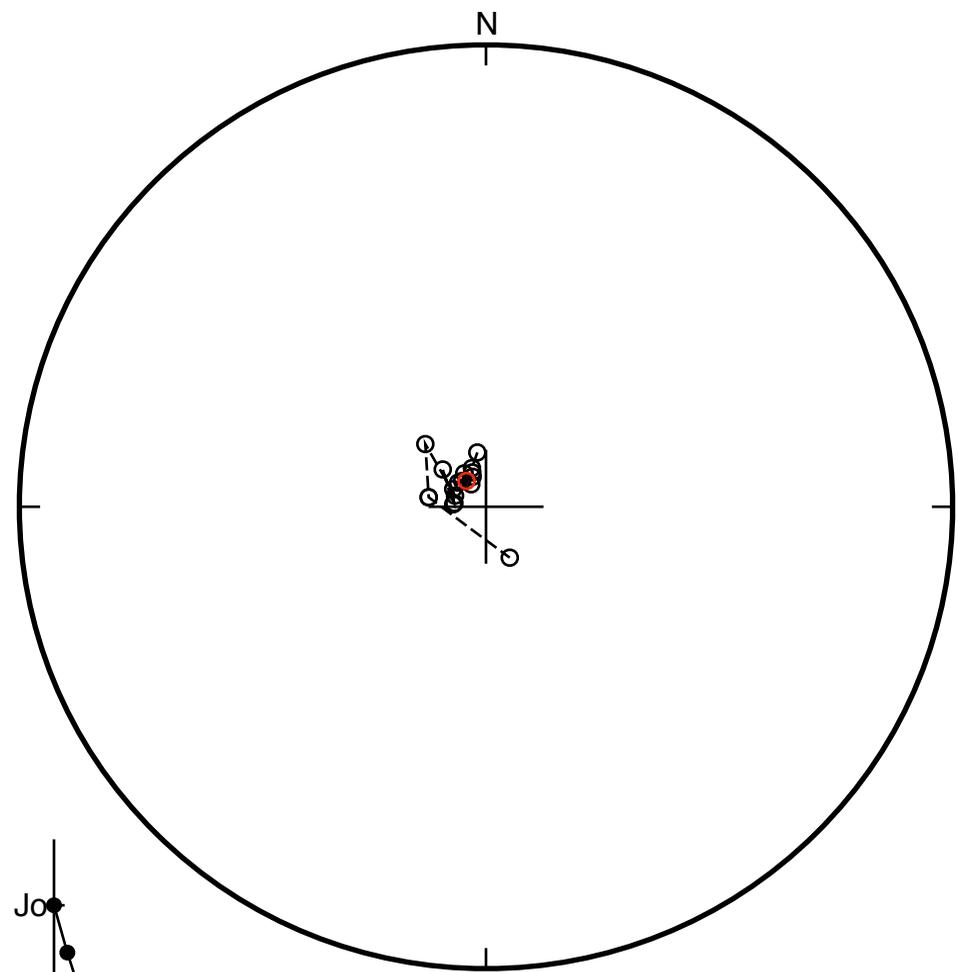
Unit 6 : OH1-2

Oh-2-1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
80
90
100

W Up

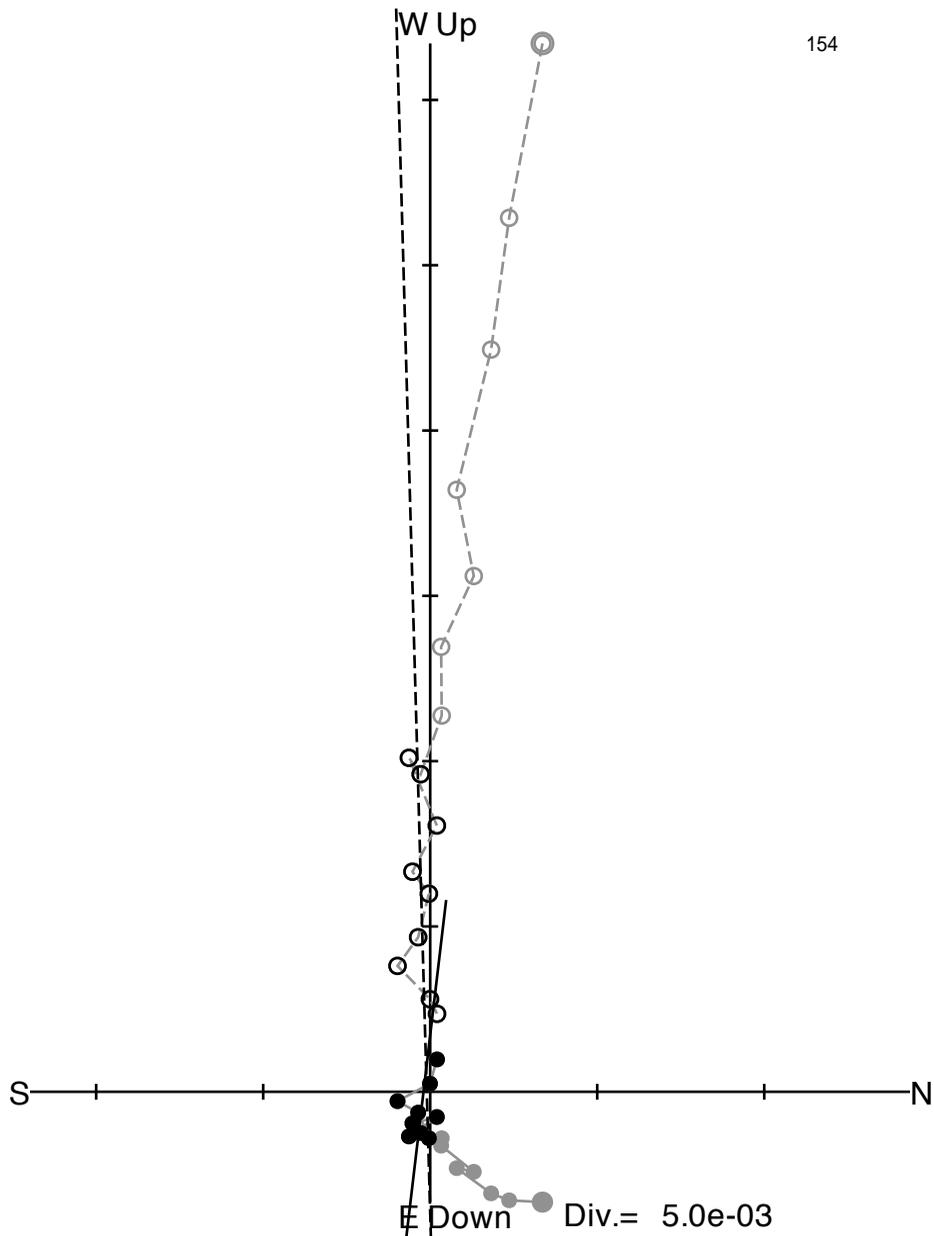


152

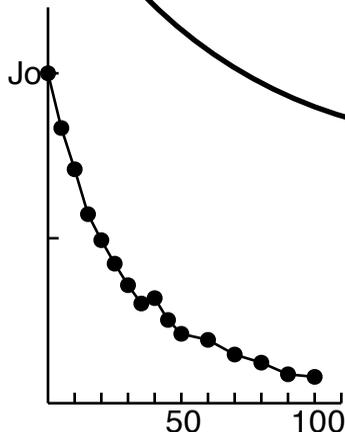
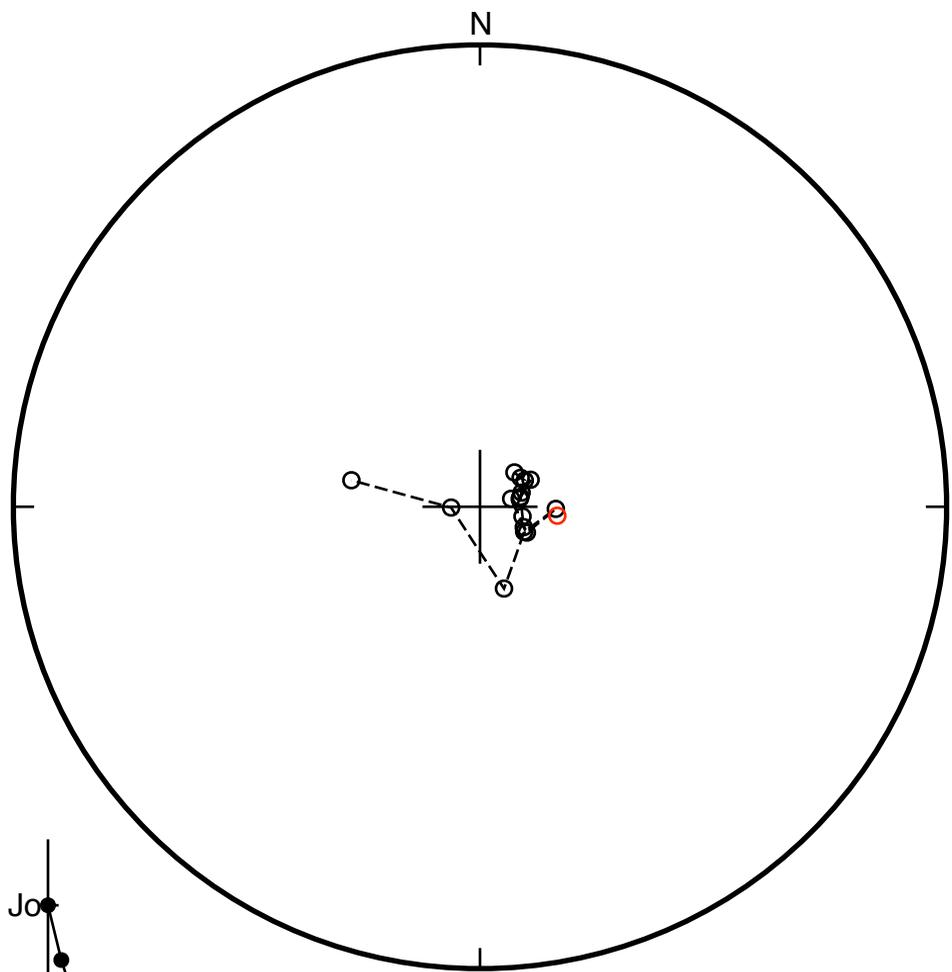


Oh-2-3
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

Fit from 35
to 100
Dec = 96.7
Inc = -76.5
d2 = 9.3
d3 = 6.5
MAD= 11.3



154

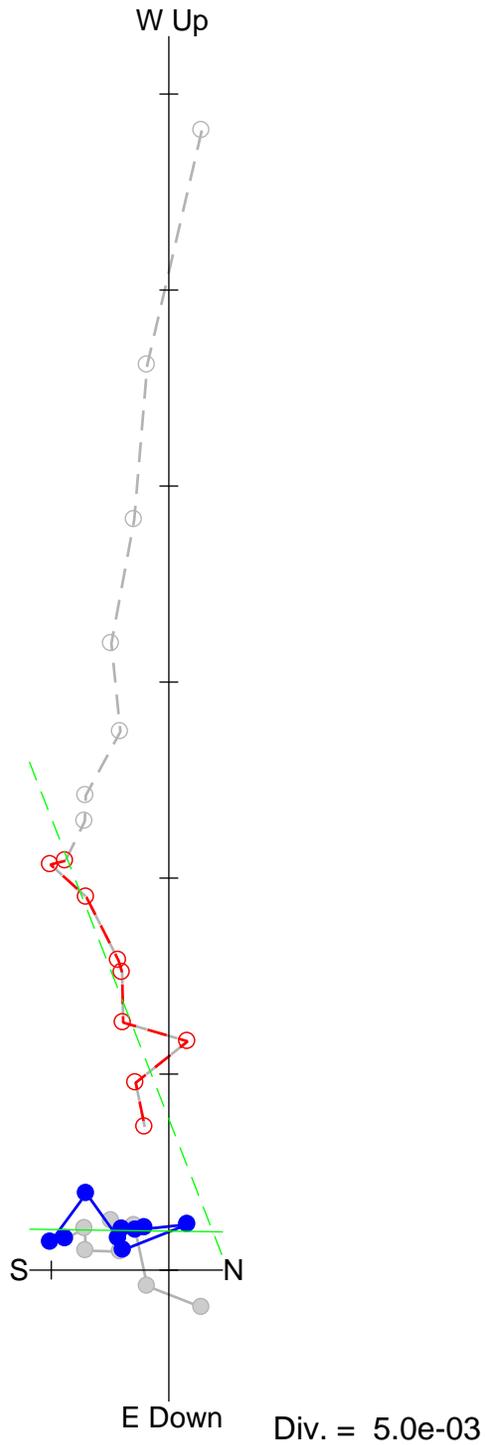


Jo= 3.21e-02

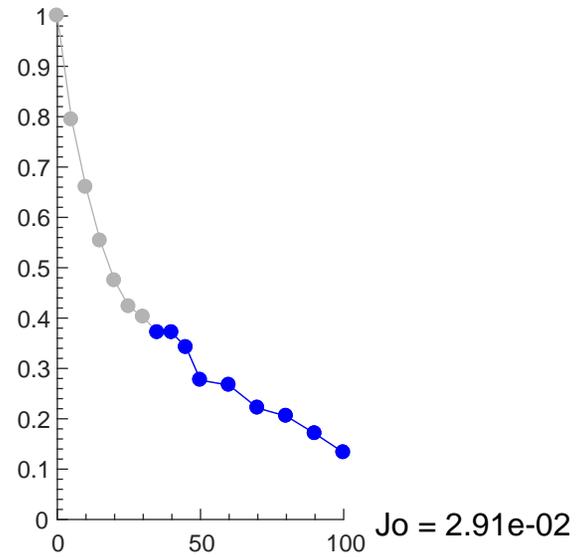
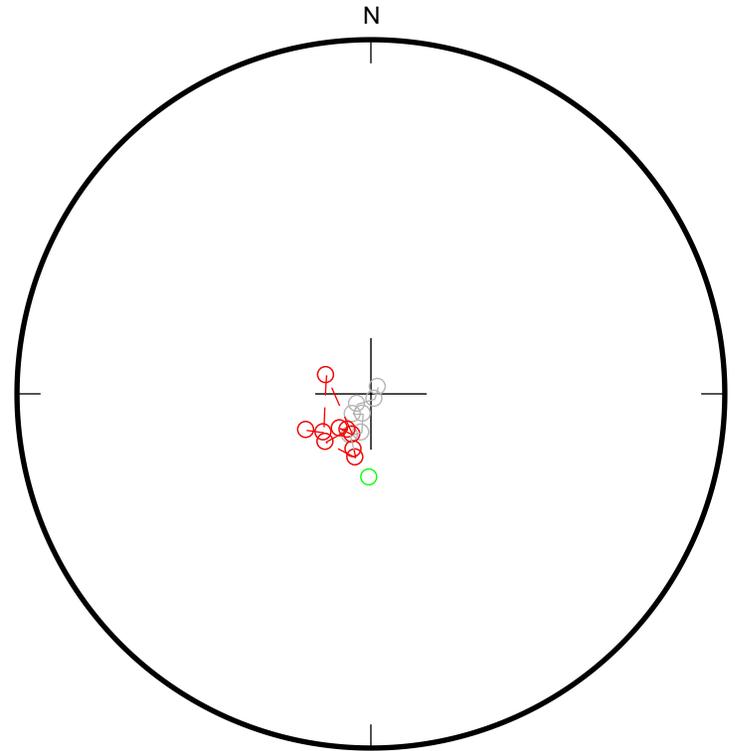
OH-2-4

155

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



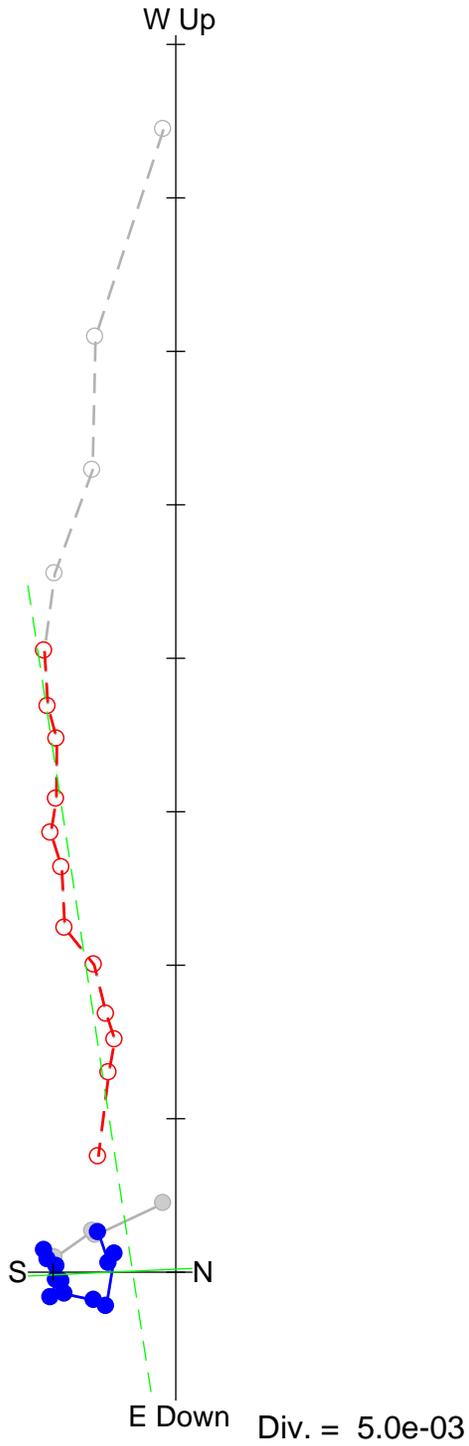
Fit from 35
to 100
Dec = 180.8
Inc = -68.7
MAD = 14.7



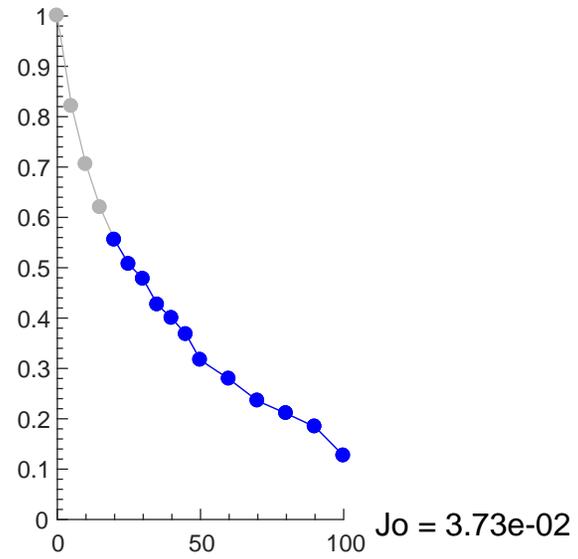
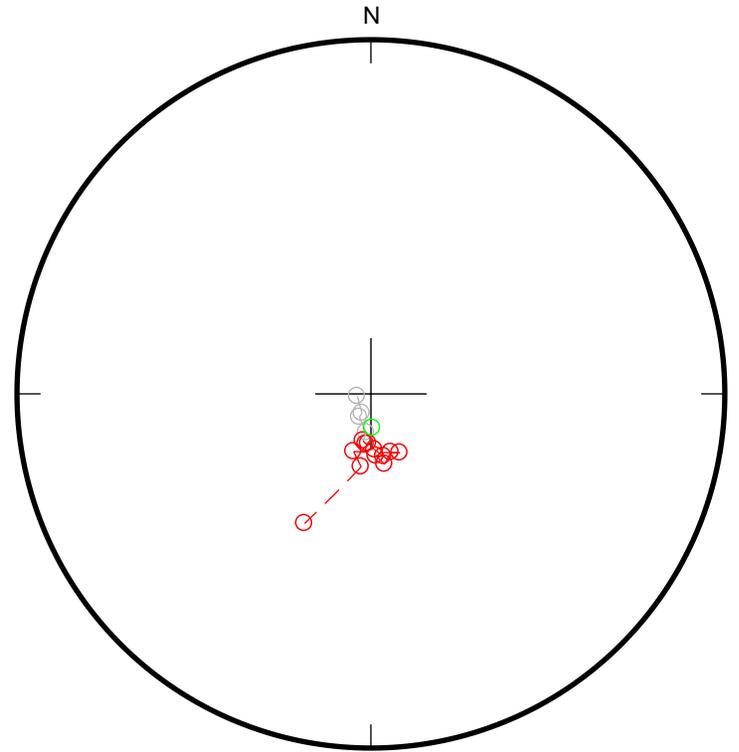
OH-2-5

156

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



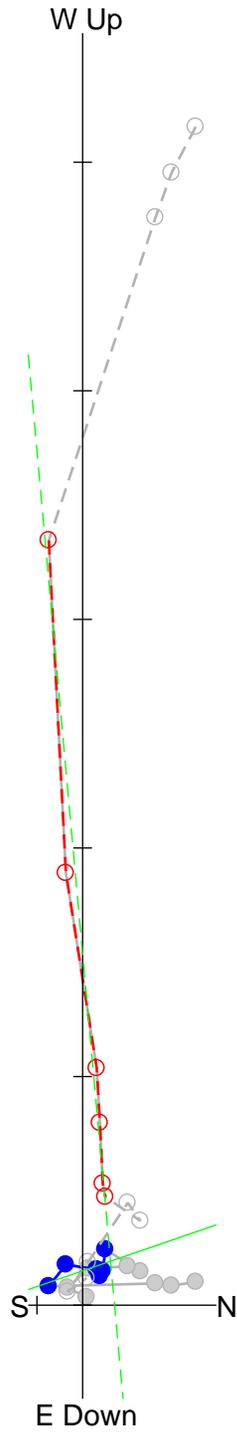
Fit from 20
to 100
Dec = 177.3
Inc = -81.3
MAD = 9.2



Oh1-2-8 (in situ)

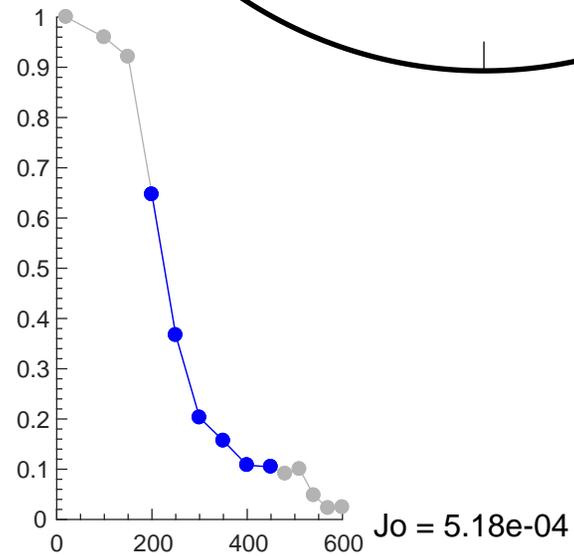
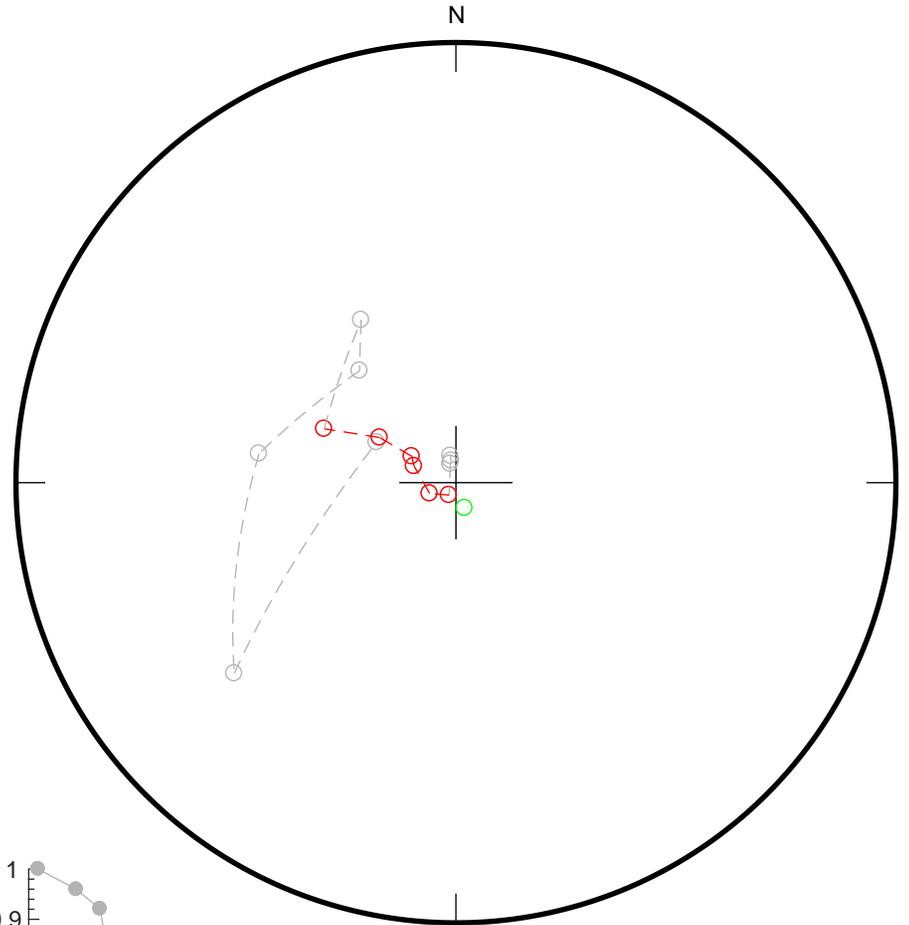
158

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600

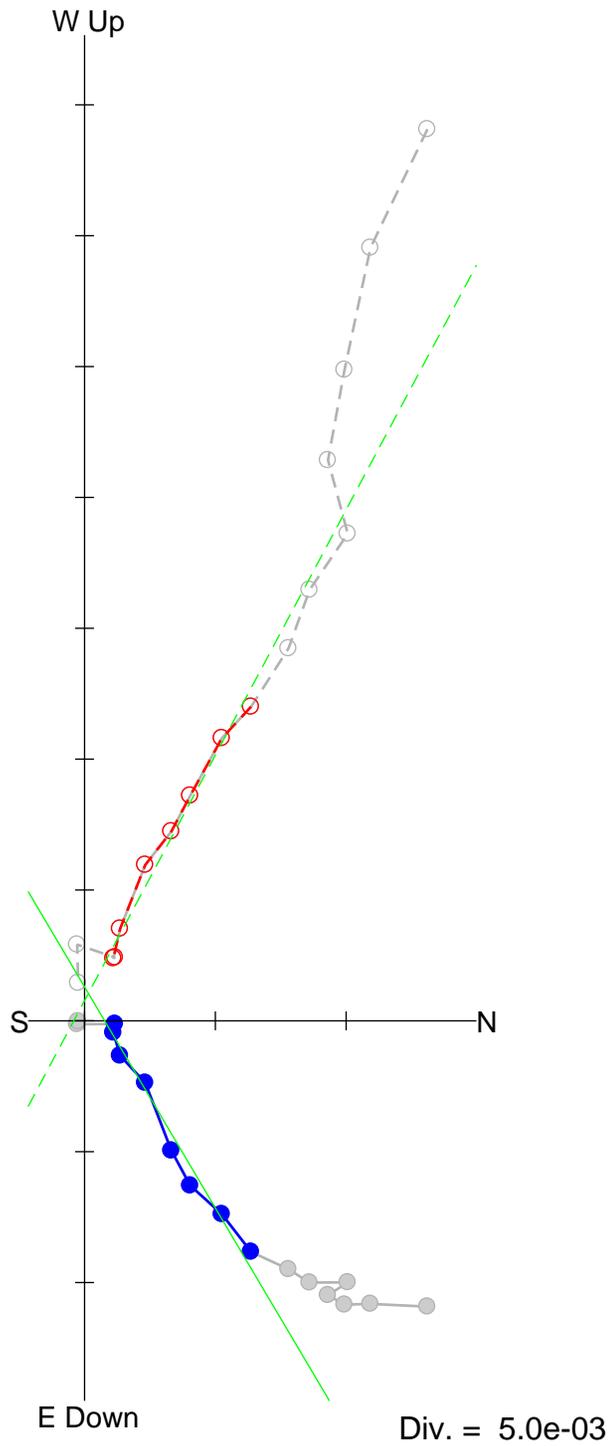


Fit from 200
to 450
Dec = 161.0
Inc = -84.5
MAD = 2.4

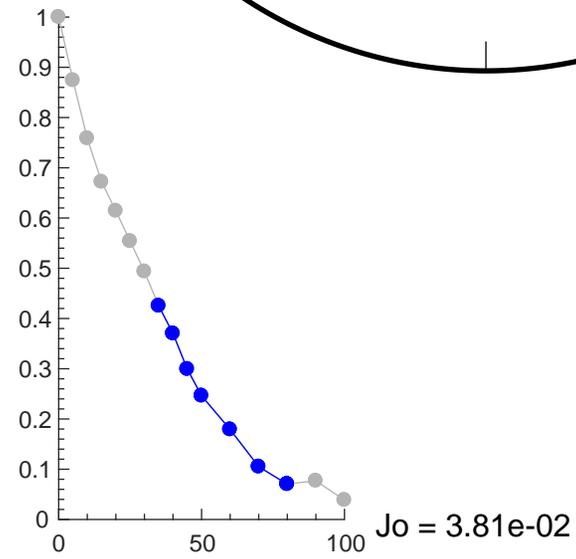
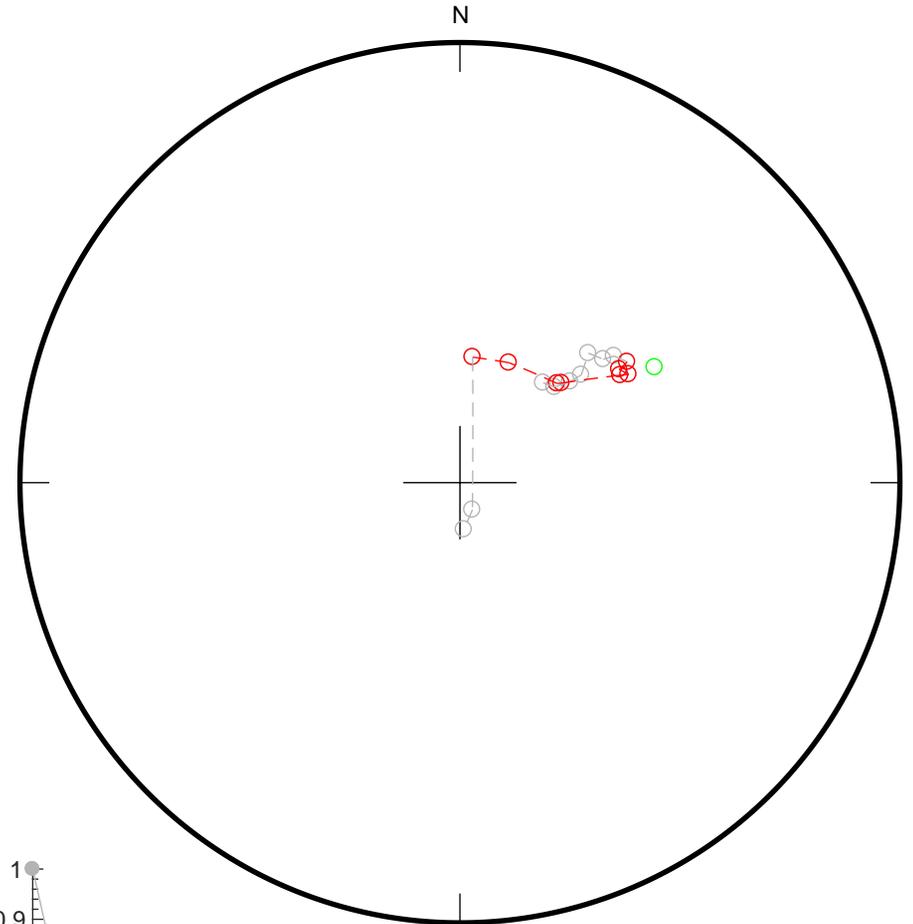
Div. = 1.0e-04



0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
80
90
100



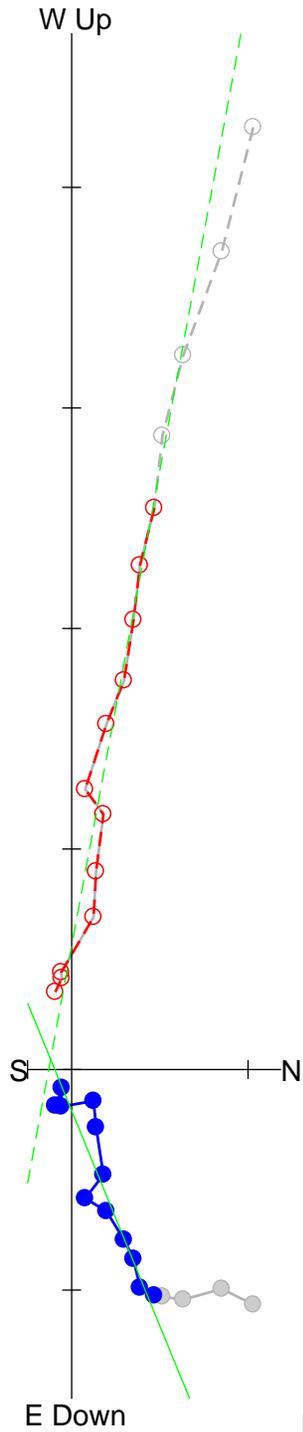
Fit from 35
to 80
Dec = 59.4
Inc = -43.7
MAD = 4.7



OH-2-11

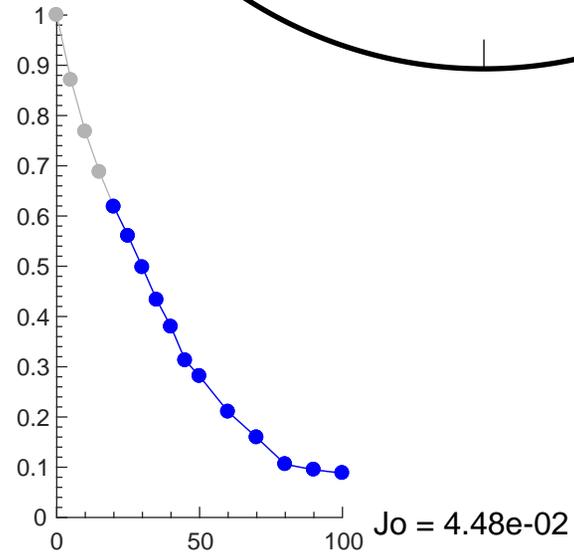
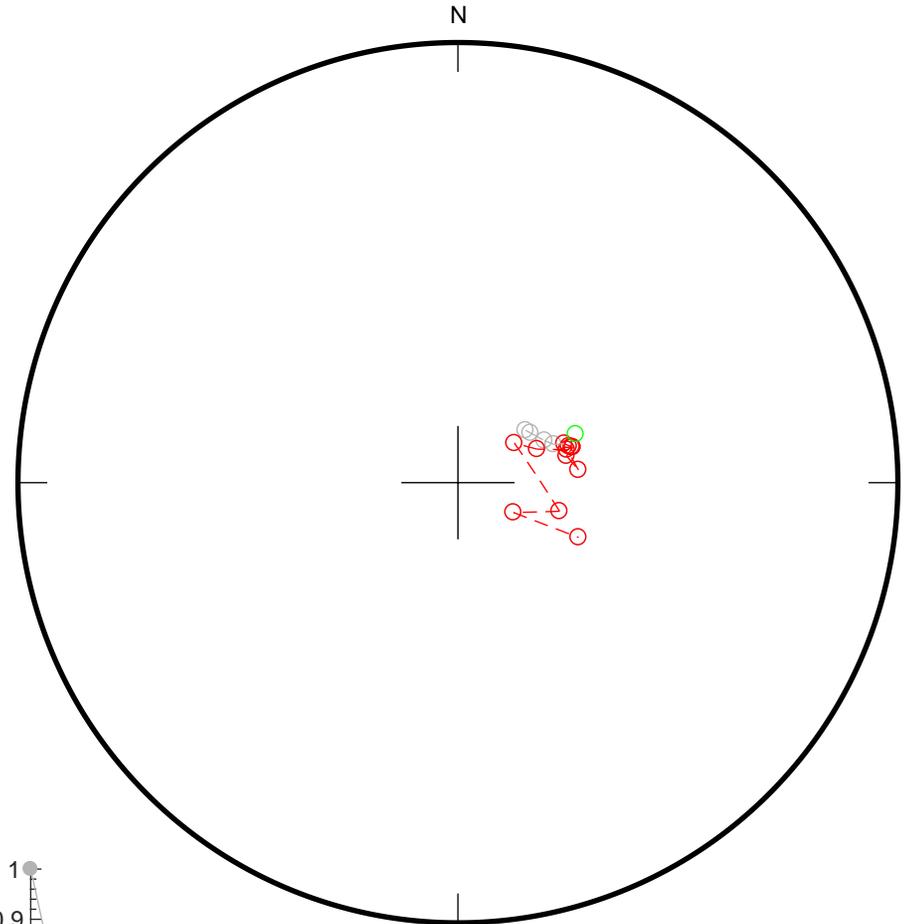
160

0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100

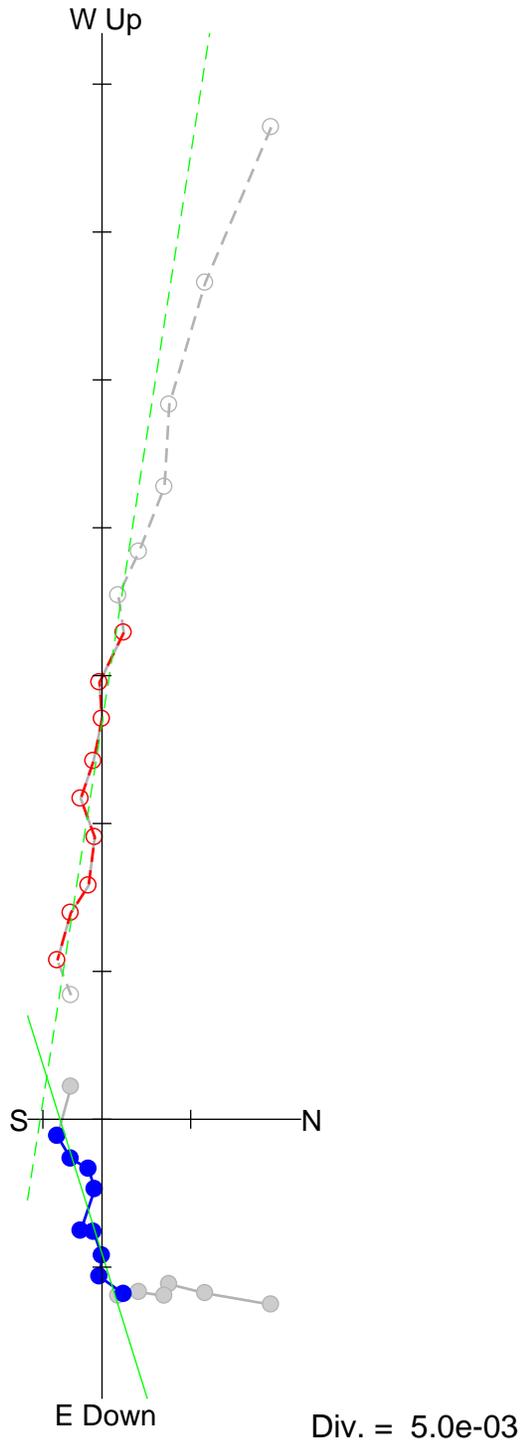


Fit from 20
to 100
Dec = 67.7
Inc = -63.9
MAD = 4.6

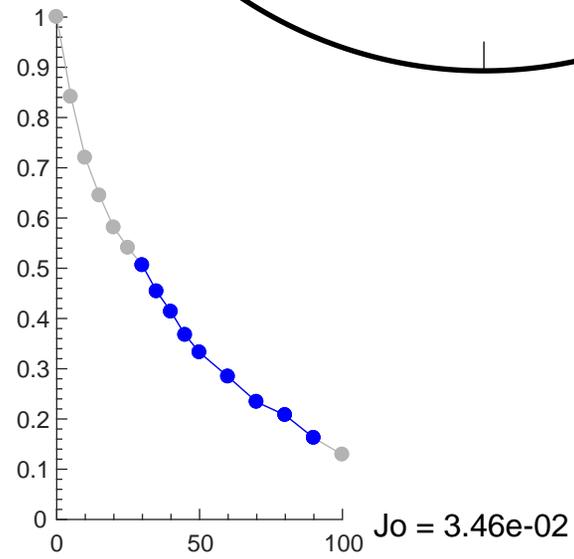
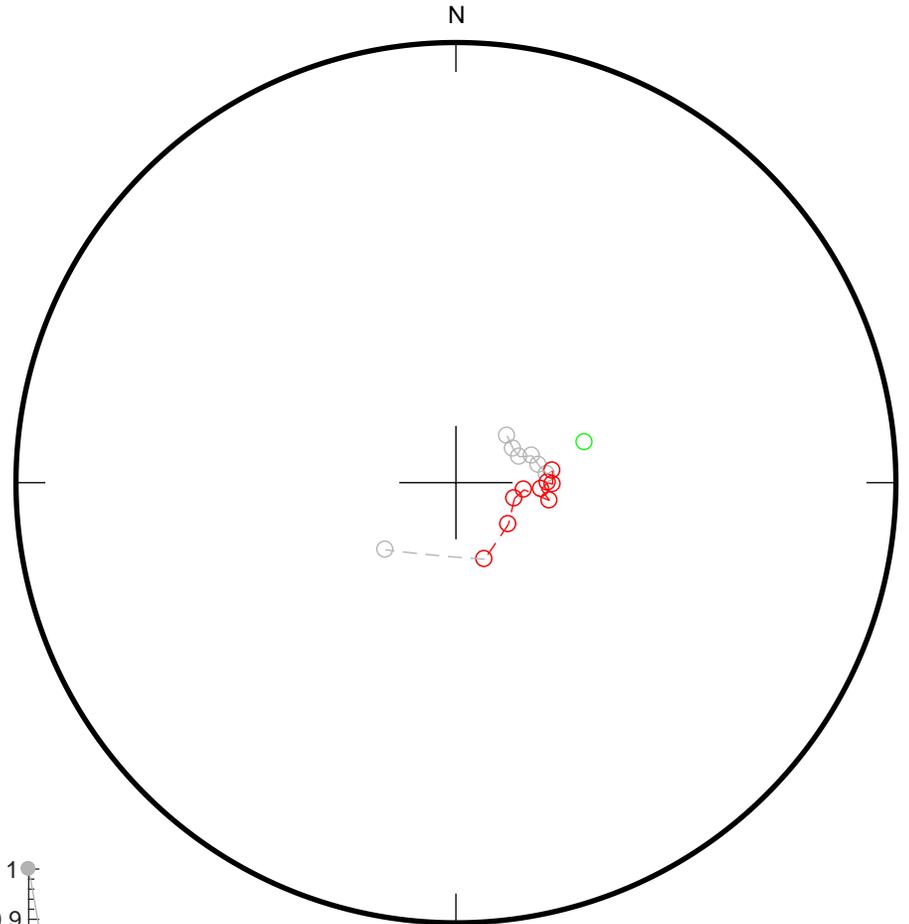
Div. = 1.0e-02



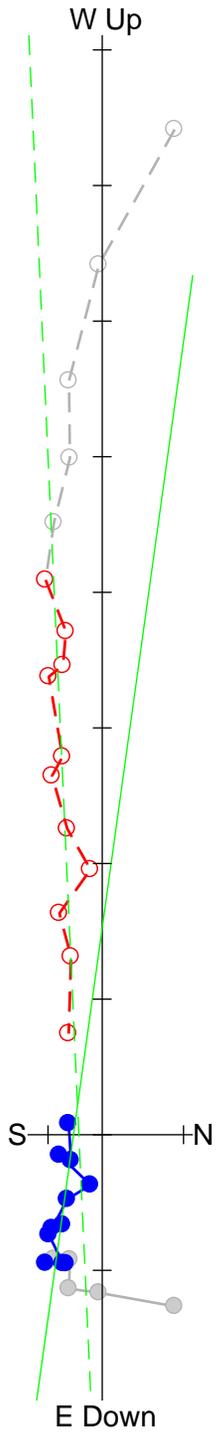
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 30
to 90
Dec = 72.6
Inc = -62.4
MAD = 4.7

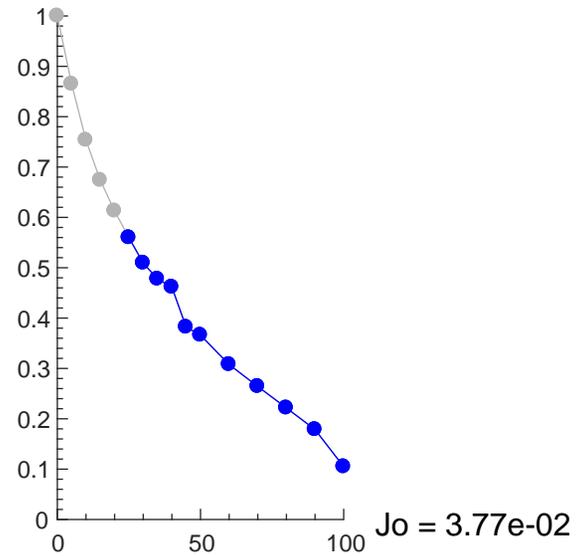
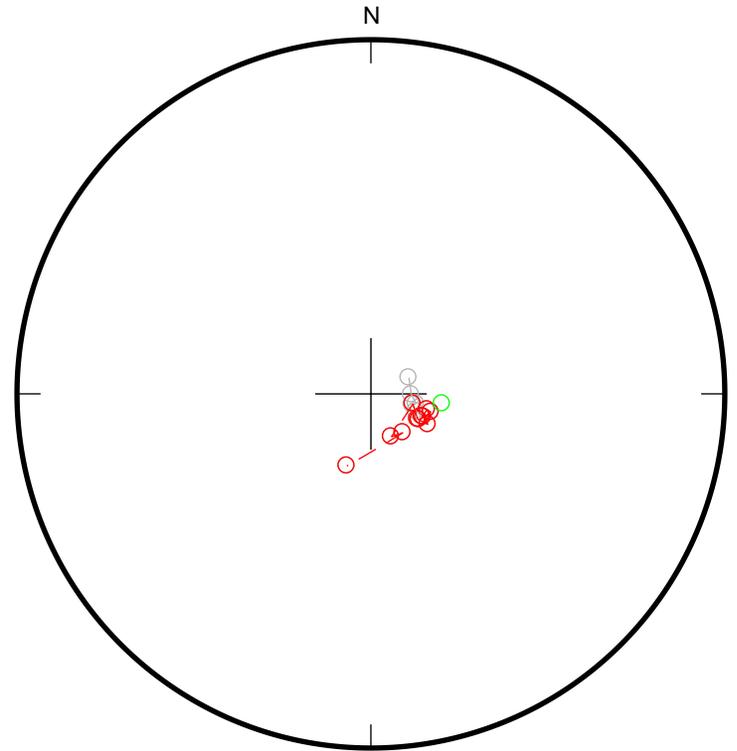


0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
60
70
80
90
100



Fit from 25
to 100
Dec = 97.9
Inc = -71.7
MAD = 5.3

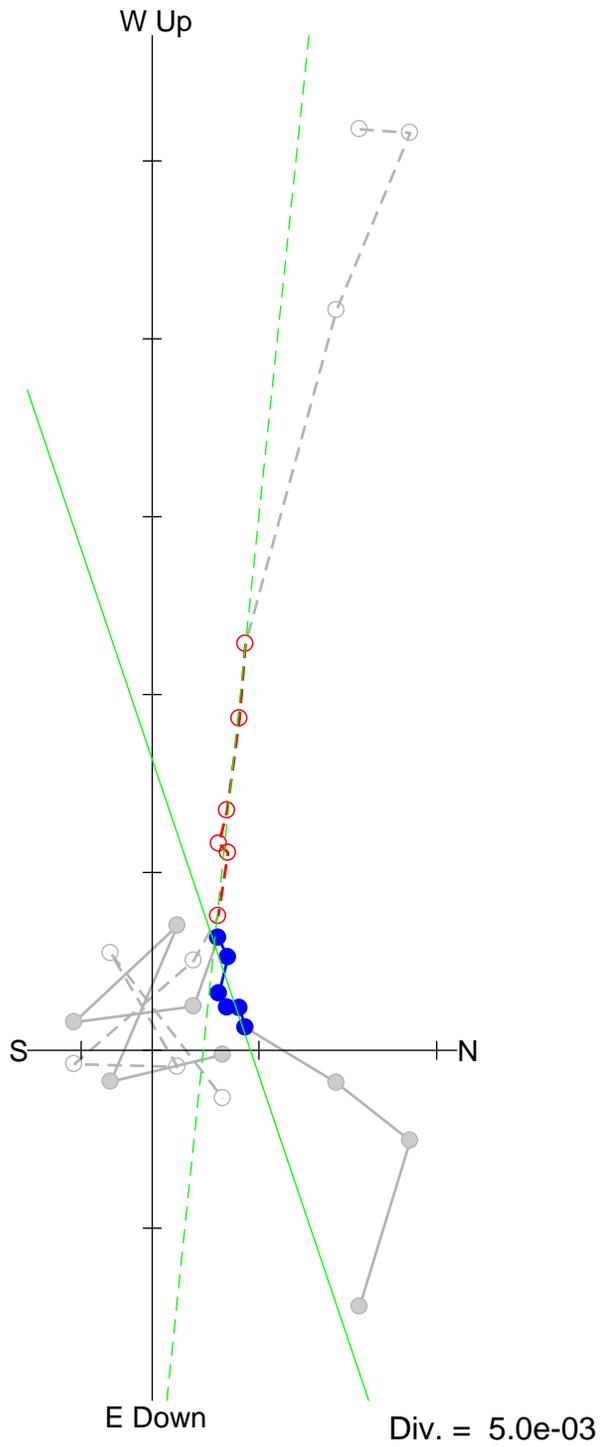
Div. = 5.0e-03



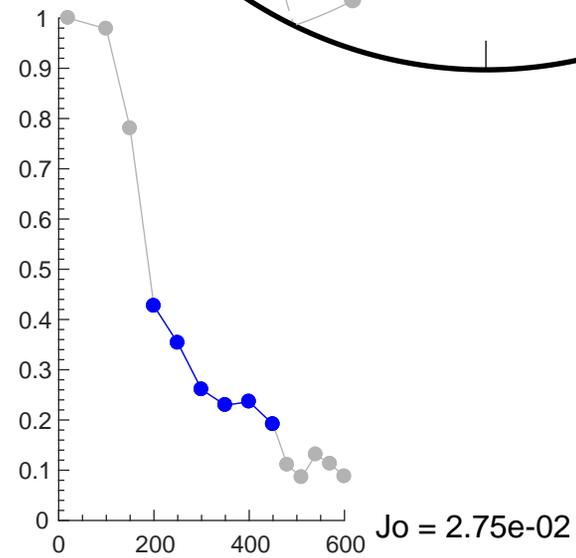
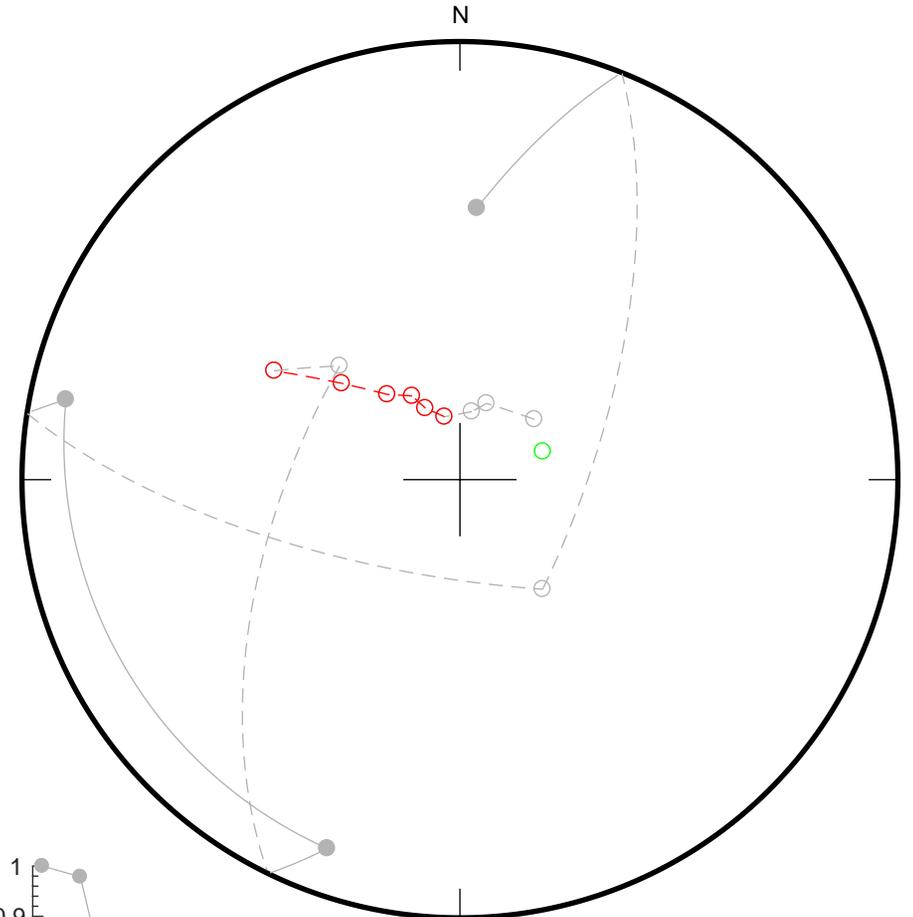
OH1-2-15

163

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



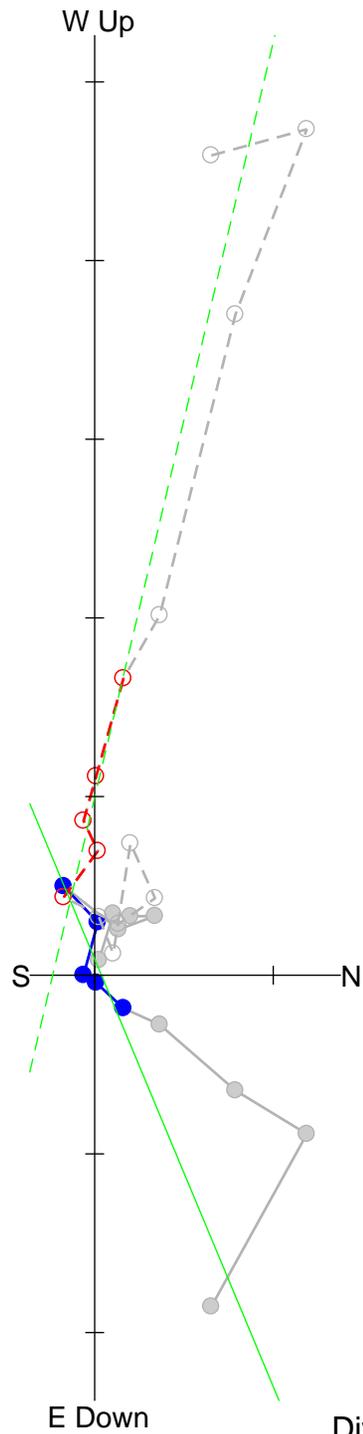
Fit from 200
to 450
Dec = 71.3
Inc = -72.0
MAD = 8.9



OH1-2-16

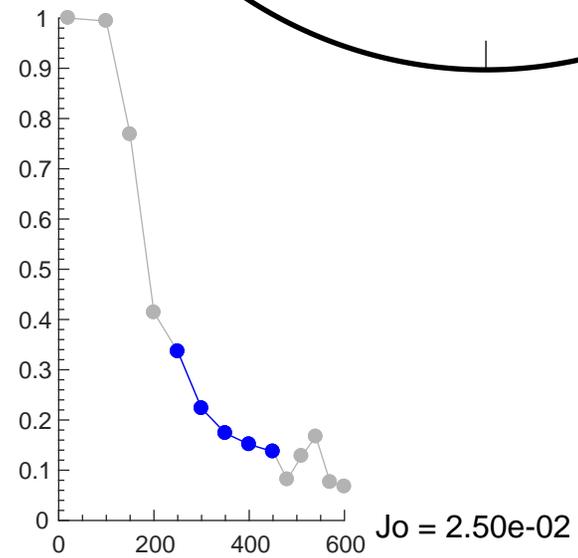
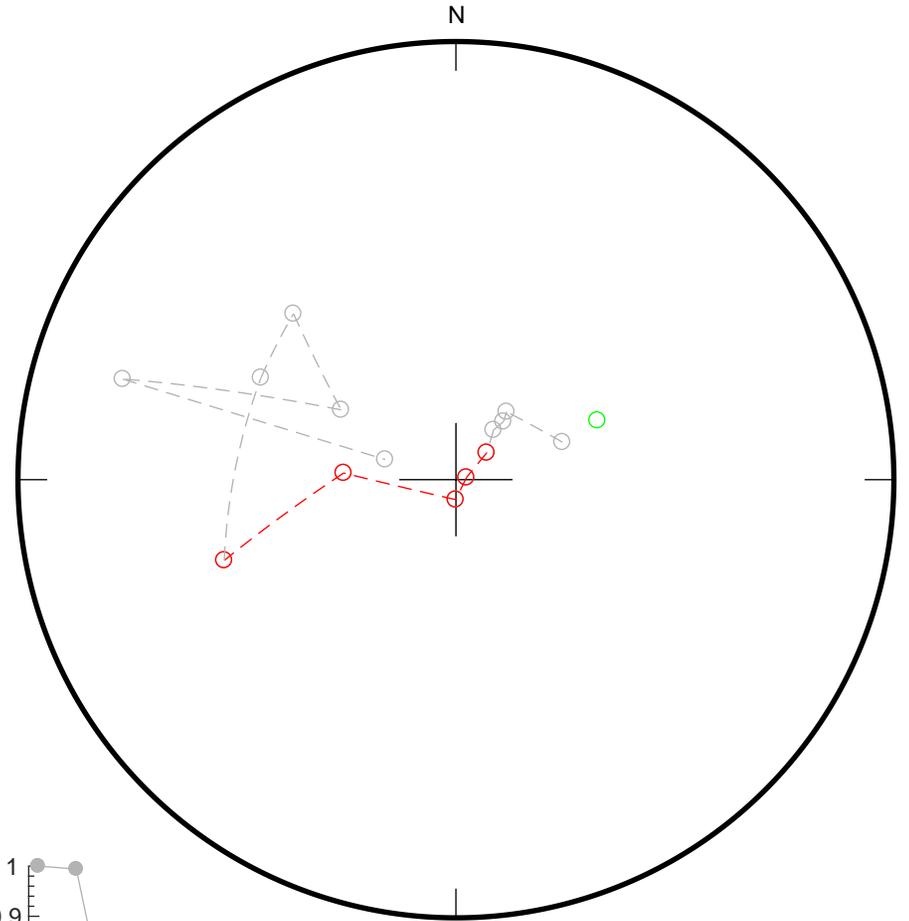
164

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 250
to 450
Dec = 67.3
Inc = -58.5
MAD = 11.7

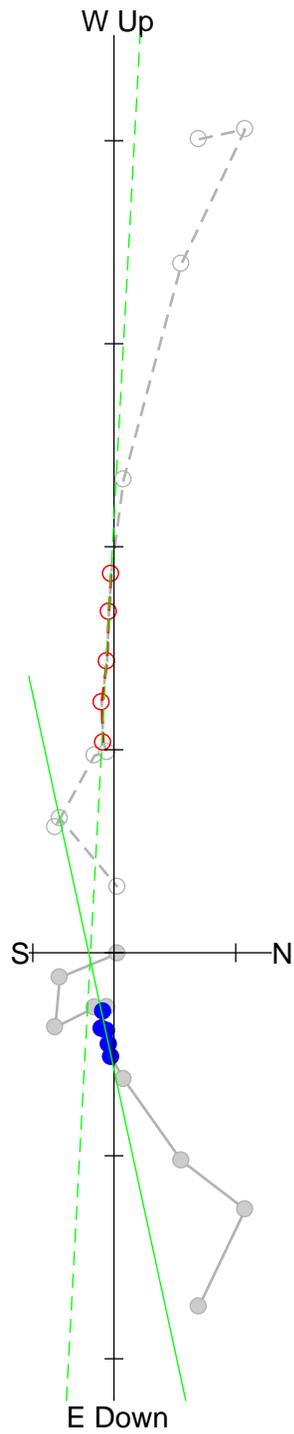
Div. = 5.0e-03



OH1-2-18

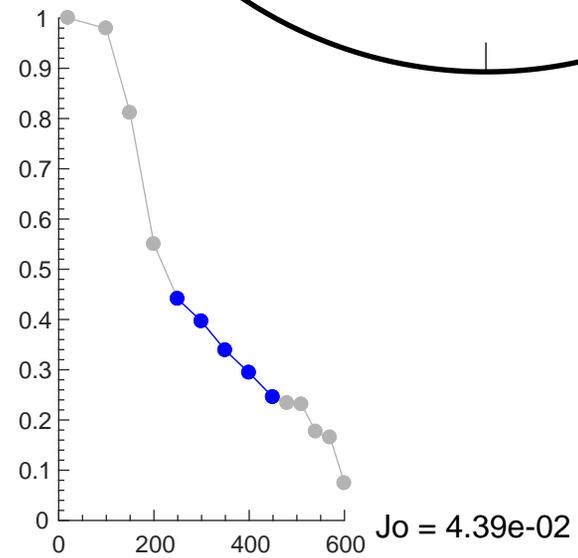
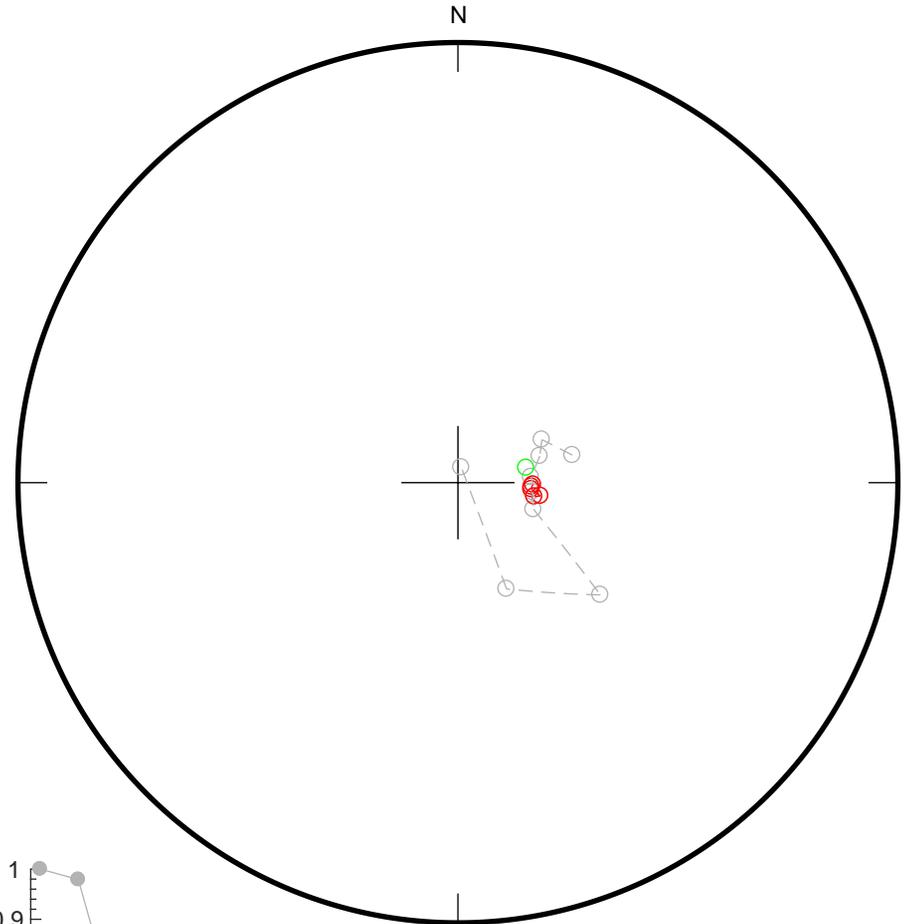
165

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600

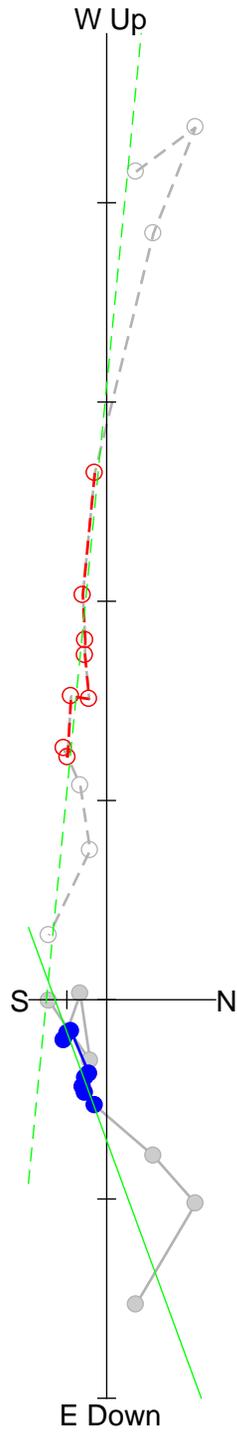


Fit from 250
to 450
Dec = 77.8
Inc = -75.7
MAD = 2.9

Div. = 1.0e-02

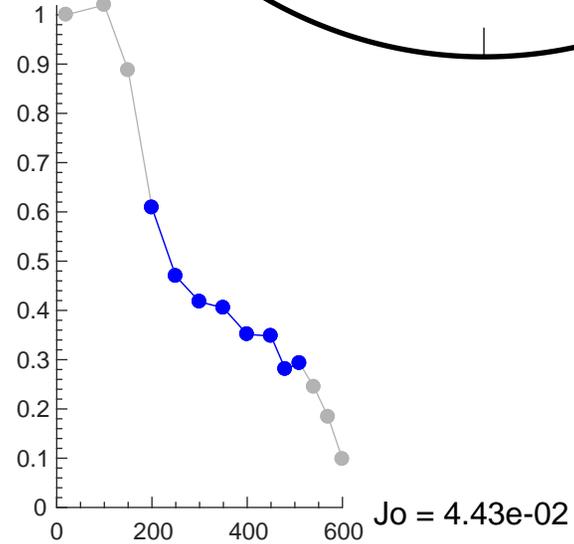
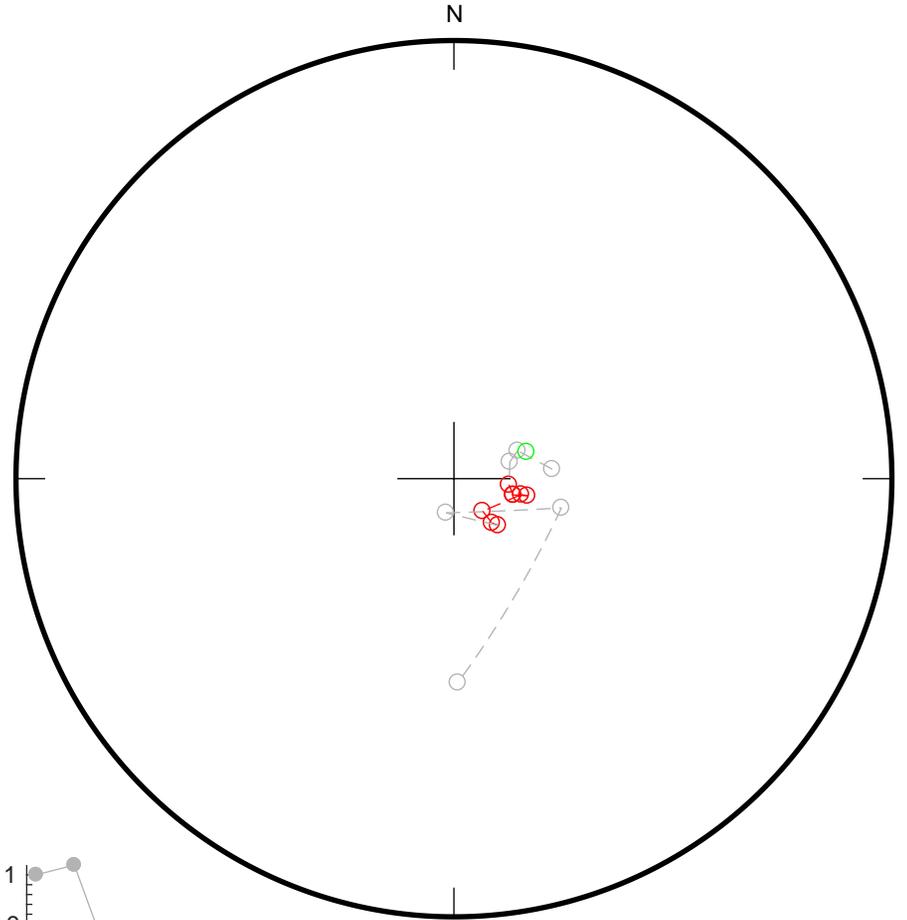


20
 100
 150
 200
 250
 300
 350
 400
 450
 480
 510
 540
 570
 600



Fit from 200
 to 510
 Dec = 69.8
 Inc = -74.1
 MAD = 10.0

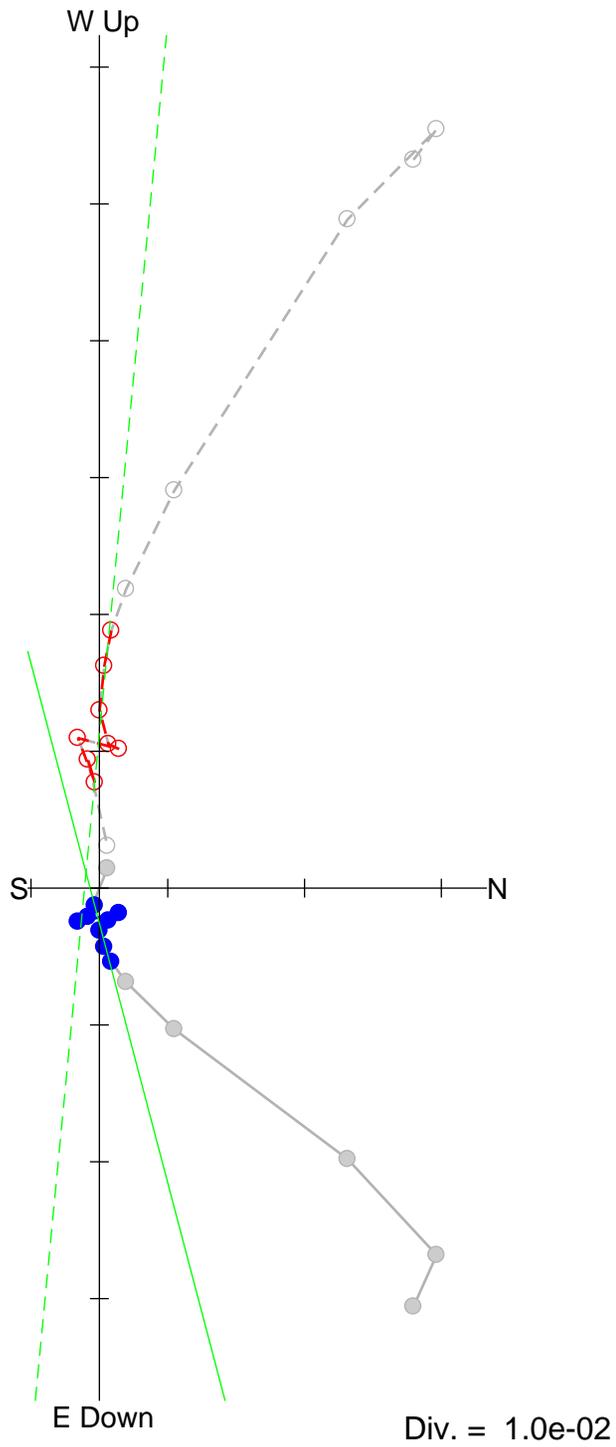
Div. = 1.0e-02



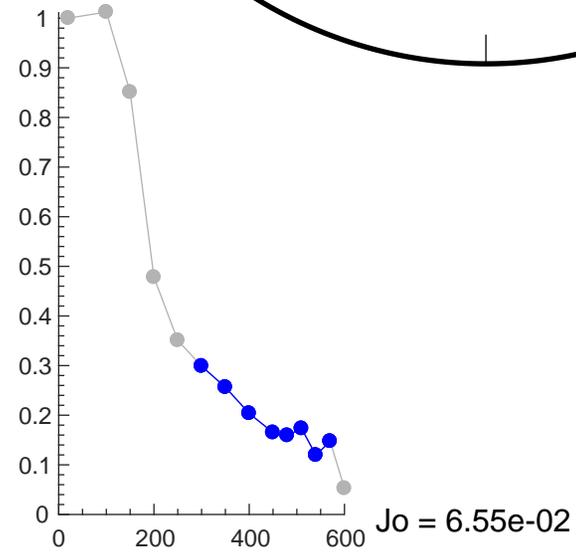
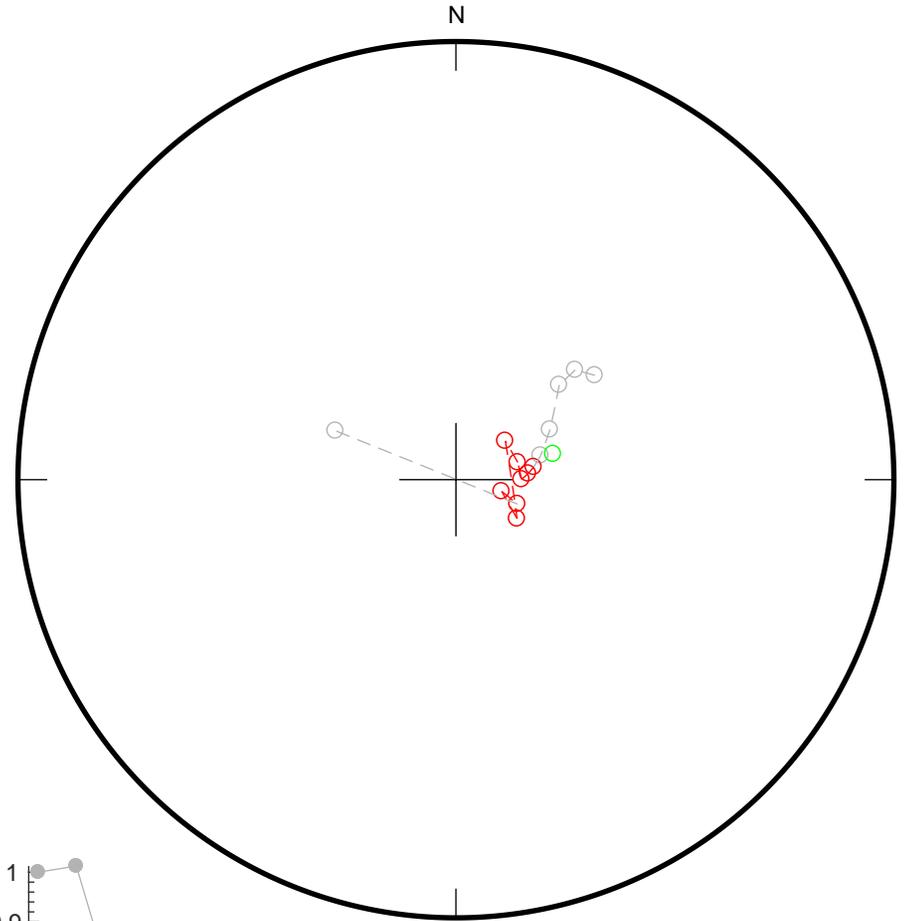
OH1-2-21

167

20
100
150
200
250
300
350
400
450
480
510
540
570
600



Fit from 300
to 570
Dec = 75.2
Inc = -69.3
MAD = 13.0



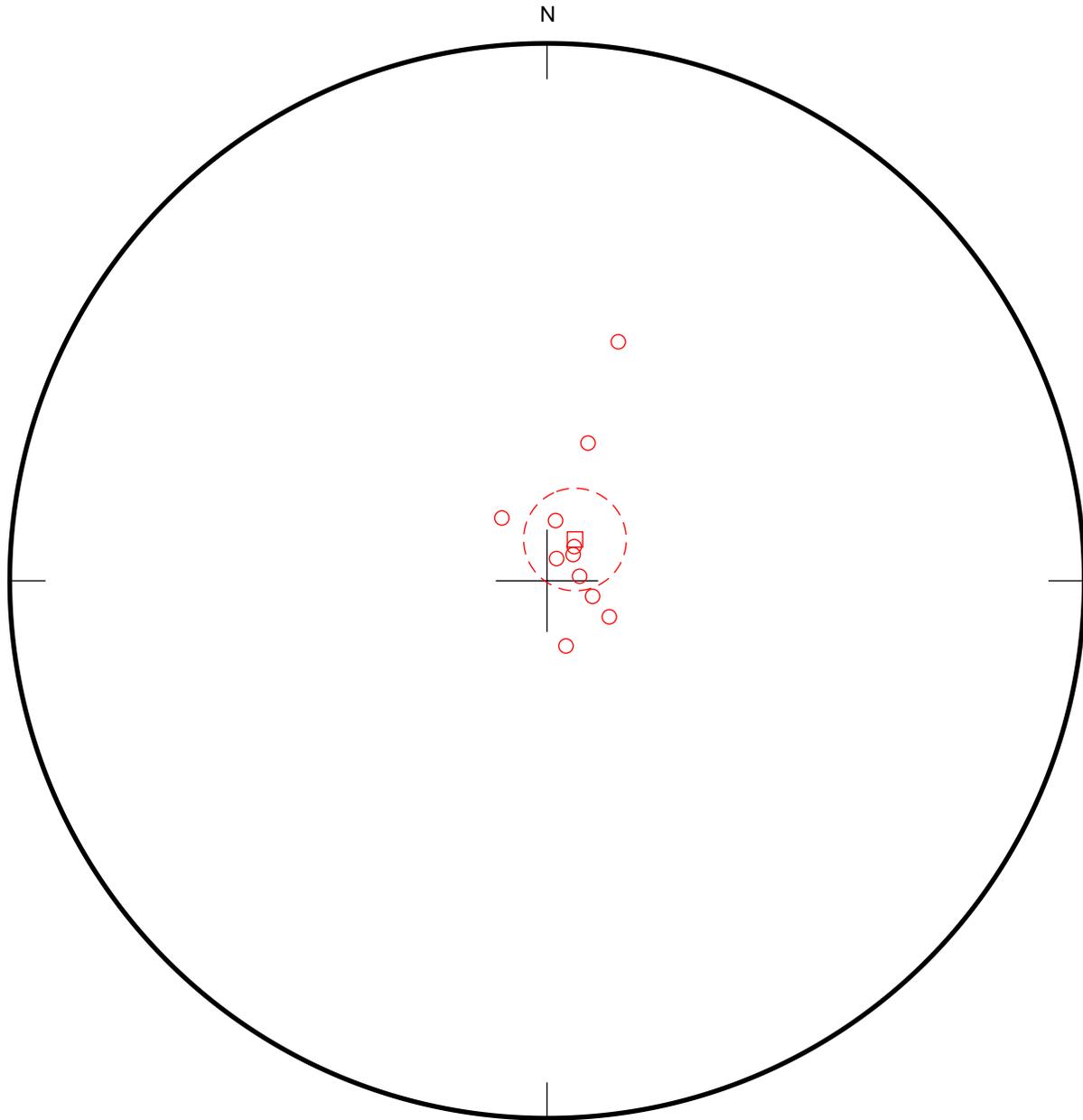
Mamaku/Ohakuri 火碎流

Site mean

OH3-1 mean (Precursor)

169

- OH3-1-1
- OH3-1-2
- OH3-1-3
- OH3-1-4
- OH3-1-5
- OH3-1-6
- OH3-1-7
- OH3-1-9
- OH3-1-10
- OH3-1-11
- OH3-1-12

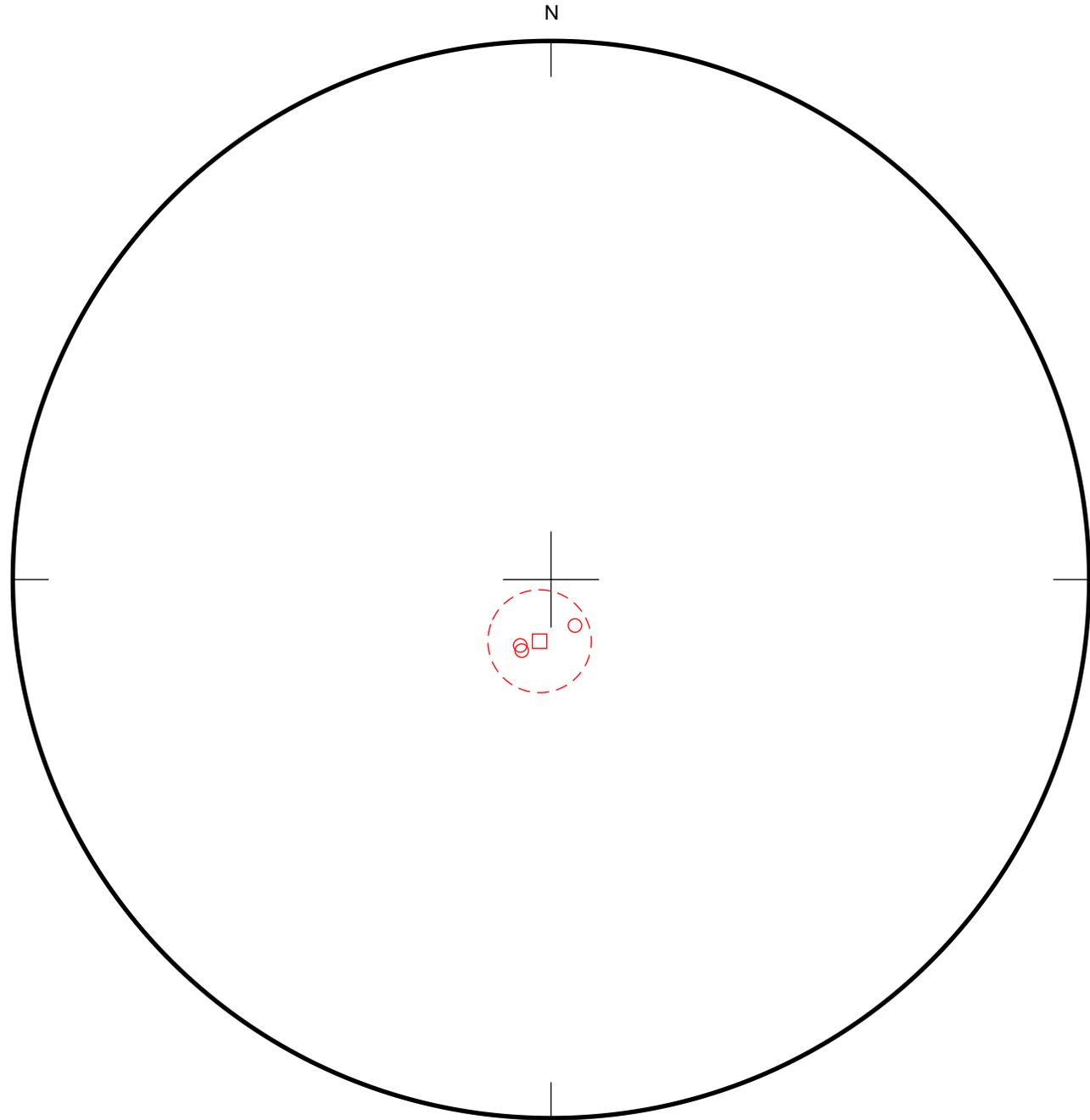


Dm = 34.1
Im = -81.6
a95 = 8.6
k = 29.3
R = 10.7
N = 11

OH3-2 mean (Unit 1)

170

OH3-2-1
OH3-2-9
OH3-2-10

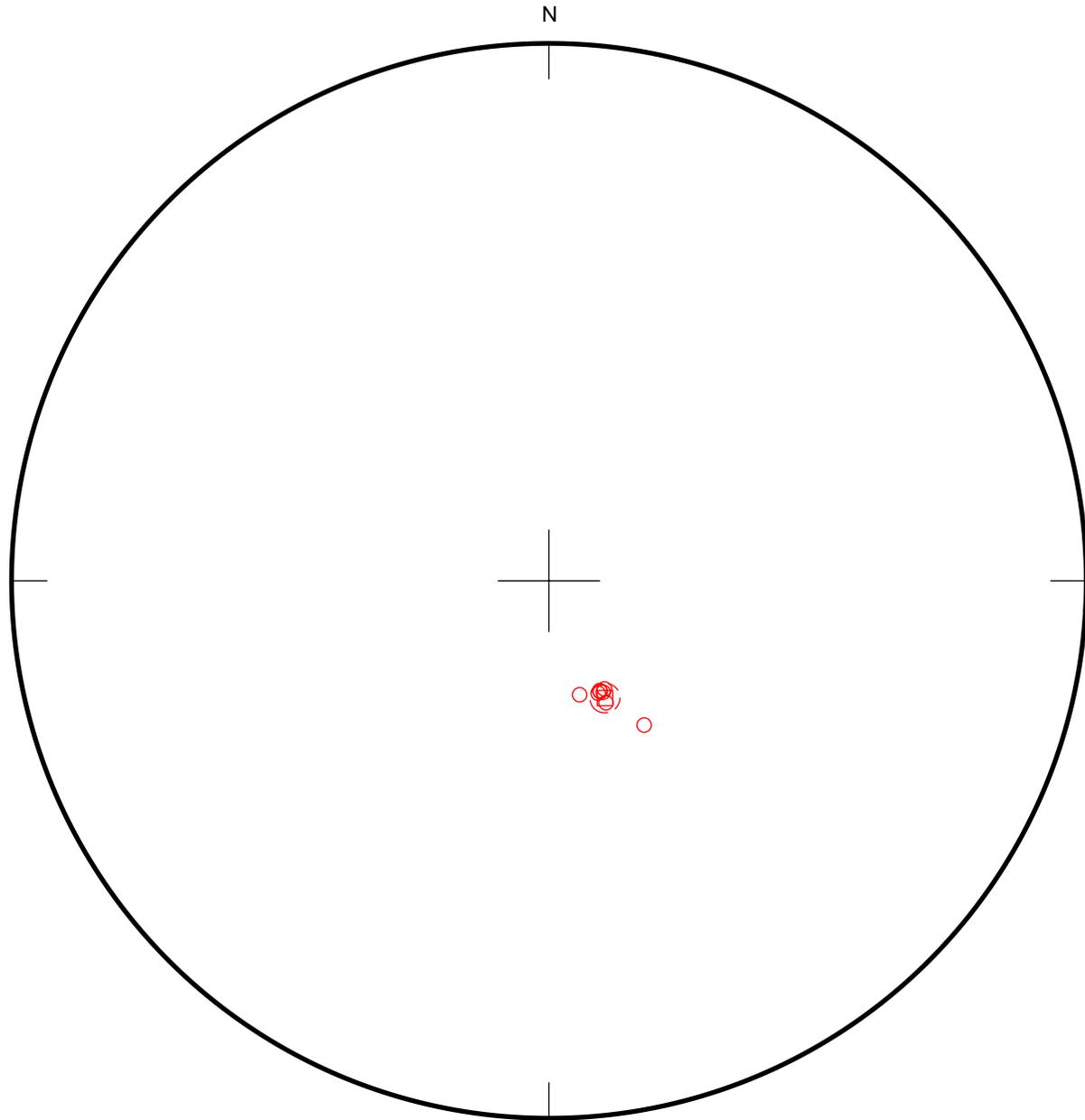


Dm = 190.5
Im = -79.5
a95 = 8.6
k = 206.7
R = 3.0
N = 3

OH4-1 mean (Unit 4_welded)

171

- OH4-1AB
- OH4-1BB
- OH4-1CB
- OH4-1DB
- OH4-1EB
- OH4-1FB
- OH4-1GB
- OH4-1HB

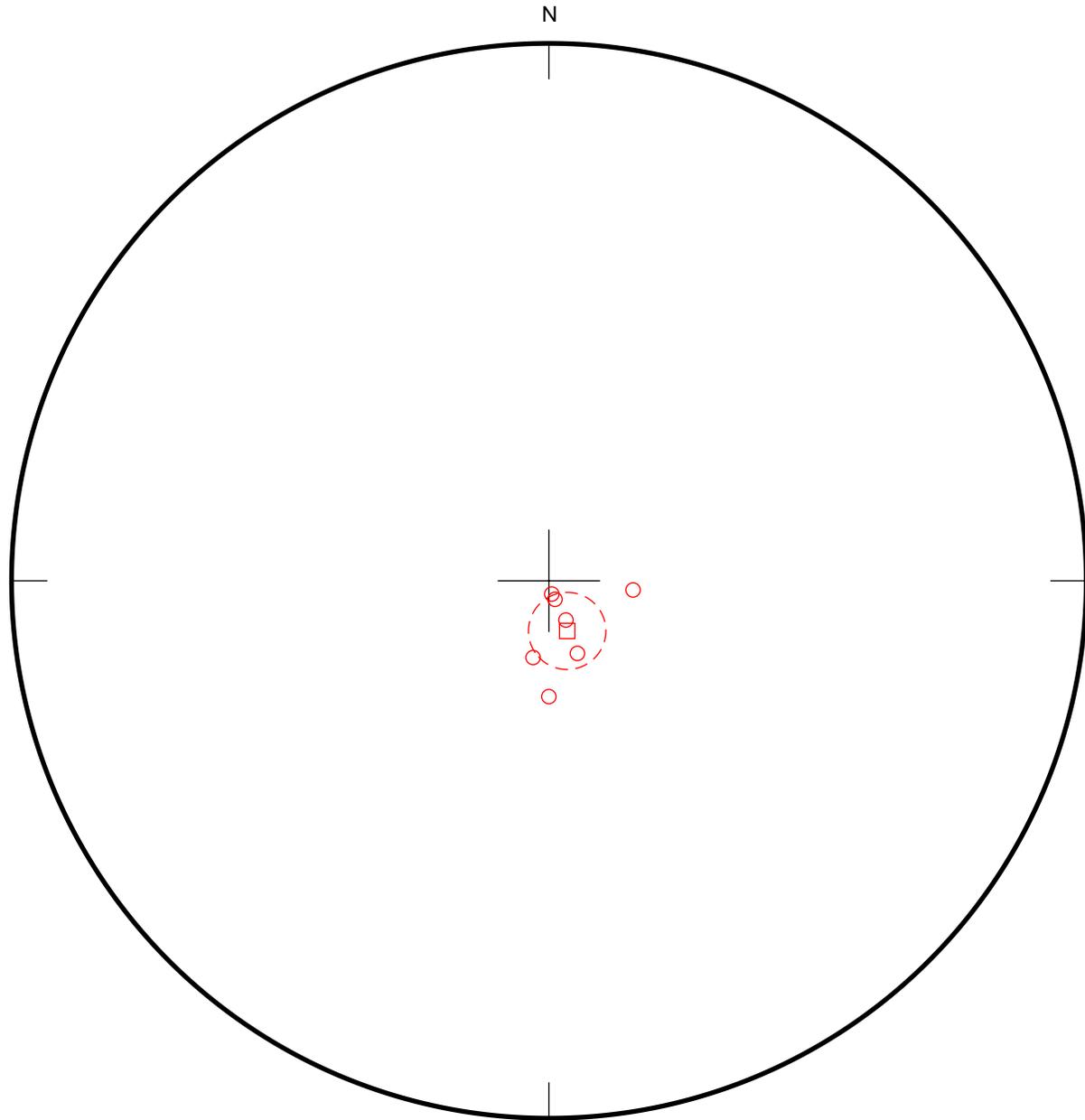


Dm = 154.4
Im = -68.2
a95 = 2.5
k = 508.8
R = 8.0
N = 8

OH1-3 mean (Unit 4_non-welded)

172

- OH1-3-1
- OH1-3-2
- OH1-3-3
- OH1-3-4
- OH1-3-5
- OH1-3-6
- OH1-3-7

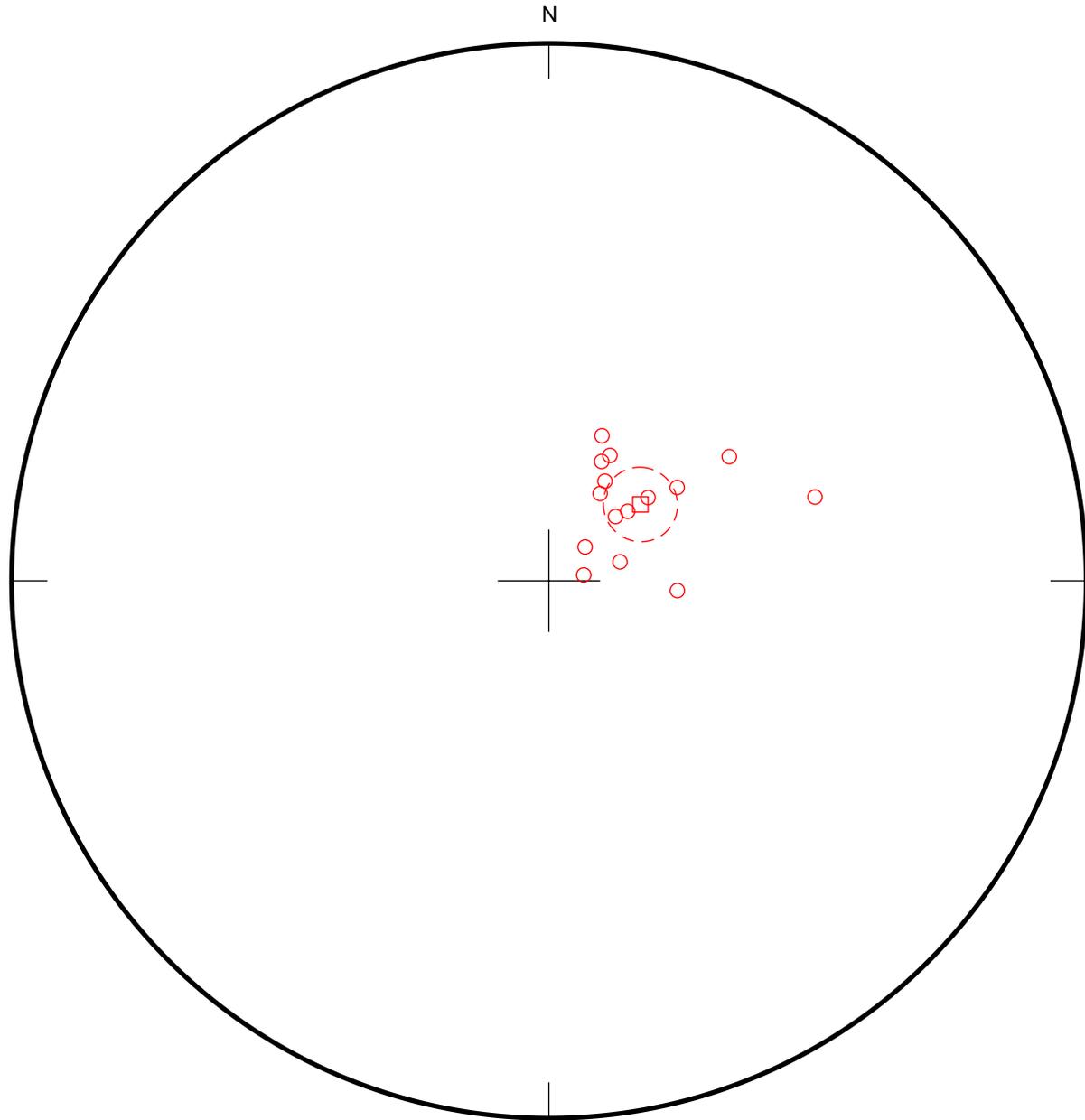


Dm = 160.0
Im = -81.1
a95 = 6.5
k = 88.4
R = 6.9
N = 7

OH1-1 mean (Unit 5L)

173

- OH1-1-1
- OH1-1-2
- OH1-1-3
- OH1-1-4
- OH1-1-5
- OH1-1-6
- OH1-1-7
- OH1-1-10
- OH1-1-11
- OH1-1-12
- OH1-1-14
- OH1-1-15
- OH1-1-16
- OH1-1-17
- OH1-1-18

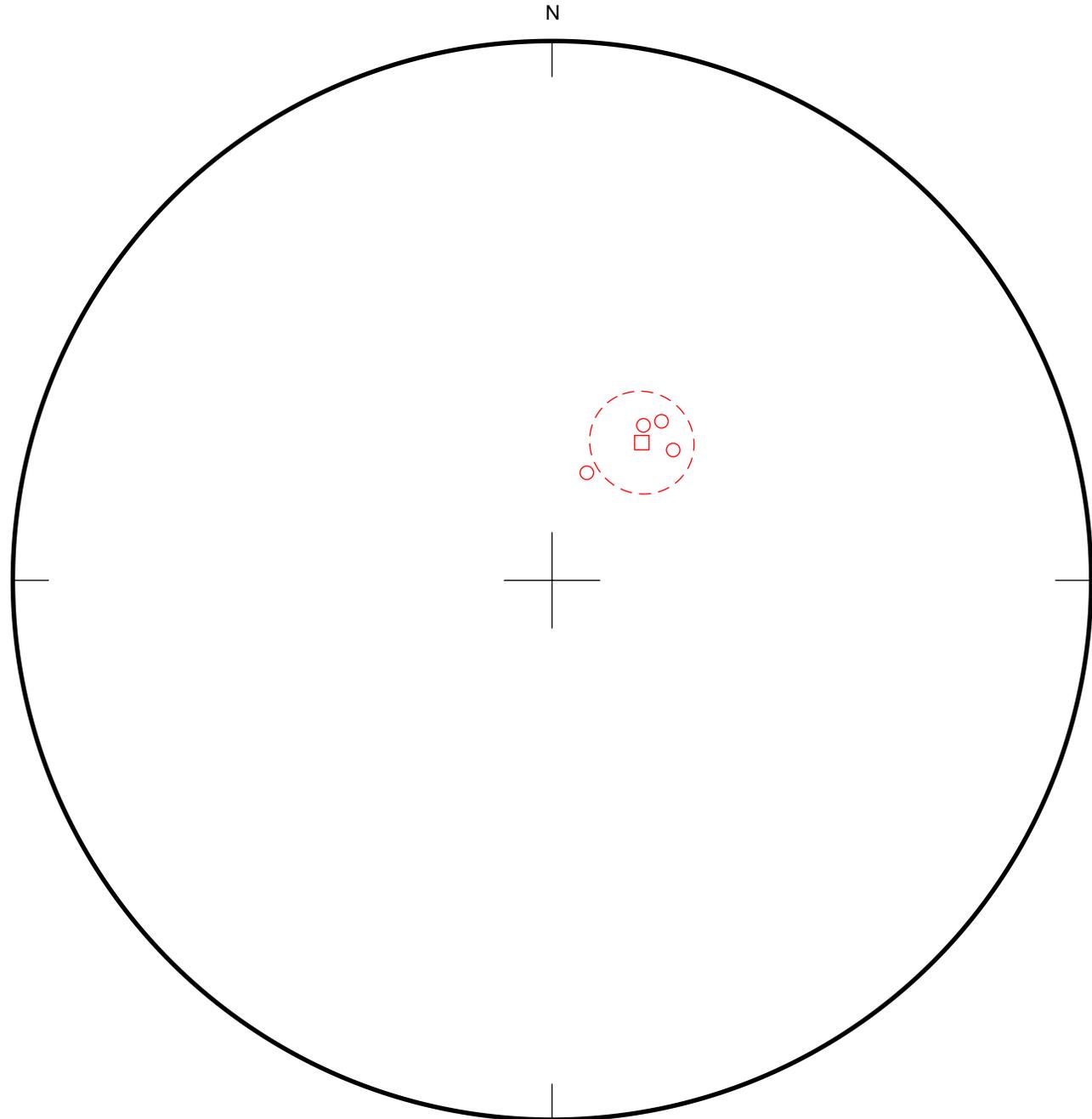


Dm = 50.2
Im = -70.0
a95 = 6.2
k = 39.4
R = 14.6
N = 15

OH1-4 mean (Unit 5U)

174

OH1-4-2
OH1-4-6
OH1-4-7
OH1-4-8

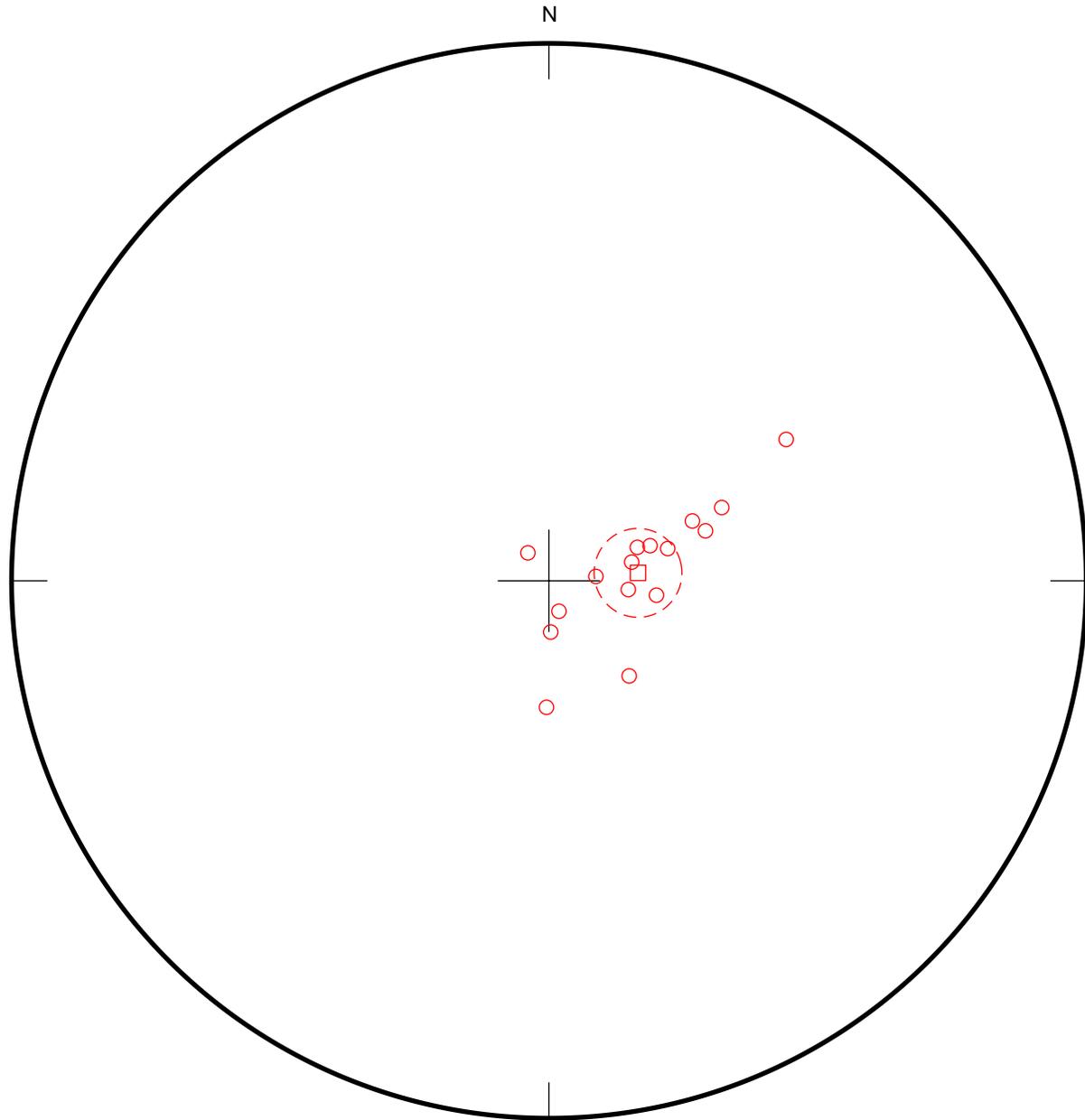


Dm = 33.1
Im = -62.6
a95 = 8.5
k = 118.4
R = 4.0
N = 4

OH1-2 mean (Unit 6)

175

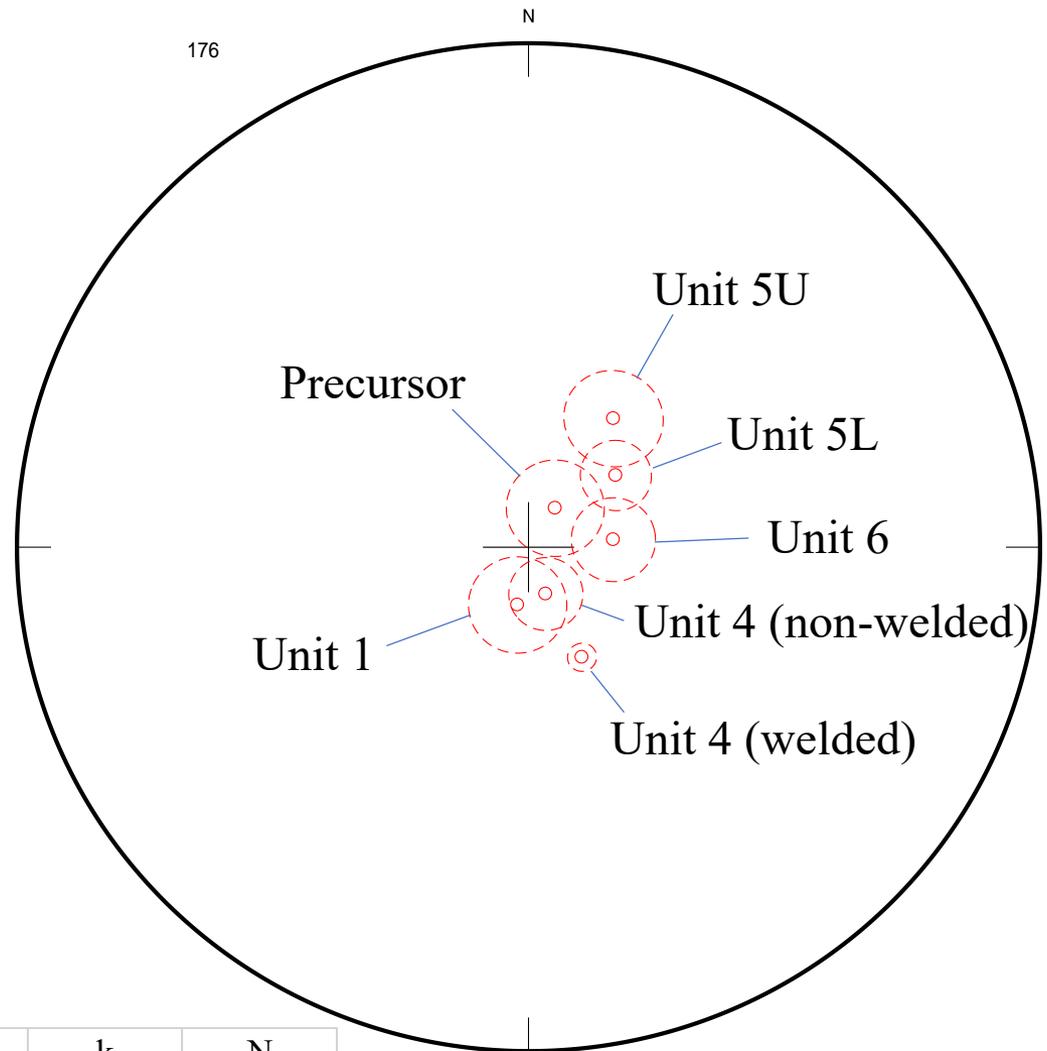
- OH1-2-1
- OH1-2-2
- OH1-2-3
- OH1-2-4
- OH1-2-5
- OH1-2-6
- OH1-2-8
- OH1-2-10
- OH1-2-11
- OH1-2-12
- OH1-2-13
- OH1-2-15
- OH1-2-16
- OH1-2-18
- OH1-2-20
- OH1-2-21



Dm = 84.9
Im = -75.0
a95 = 7.4
k = 26.1
R = 15.4
N = 16

Mamaku/Ohakuri site mean

176



site	Dm	Im	$\alpha 95$	k	N
Unit 6	84.9	-75.0	7.4	26.1	16
Unit 5U	33.1	-62.6	8.5	118.5	4
Unit 5L	50.2	-70.0	6.2	39.4	15
Unit 4 (non-welded)	160.0	-81.1	6.5	88.4	7
Unit 4 (welded)	154.4	-68.2	2.5	508.8	8
Unit 1	190.5	-79.5	8.6	206.7	3
Precursor	34.1	-81.6	8.6	29.3	11