

DATARAPPORT

Bearbetning av helikopterburen TEM-data i delar av Östergötland och Västergötland

Cecilia Brolin, Virginie Leroux & Peter Dahlqvist

juni 2020

SGU-rapport 2020:23



Omslagsbild: Kalkstensbrott vid Borghamn.
Fotograf: Peter Dahlqvist.

Författare: Cecilia Brolin, Virginie Leroux & Peter Dahlqvist

Granskad av: Mehrdad Bastani

Ansvarig enhetschef: Jakob Levén

Redaktör: Johan Sporrang

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Inledning.....	4
Syfte.....	4
Undersökningsområde	5
Västergötland	5
Östergötland.....	6
Metodbeskrivning TEM.....	8
SkyTEM	8
Bearbetning.....	11
Flyghöjdsdata.....	12
Sonderingsdata.....	12
Störningar.....	12
Signalförstärkning.....	12
Inversion.....	13
Resultat	14
Datakvalitet	14
Antal datapunkter.....	14
Dataresidual.....	14
Flyghöjd	15
Kanaler (Channel number)	15
Djupkänning (DOI).....	15
Västergötland	15
Östergötland.....	15
Referenser.....	16
Bilaga 1. Inversionsinställningar.....	17
Bilaga 2. Flyglinjer och resistivitetsmodeller.....	19
Bilaga 3. Antal datapunkter	25
Bilaga 4. Residual	31
Bilaga 5. Skillnad i flyghöjd	37
Bilaga 6. Kanaler	43
Bilaga 7. Djupkänning (DOI)	49

INLEDNING

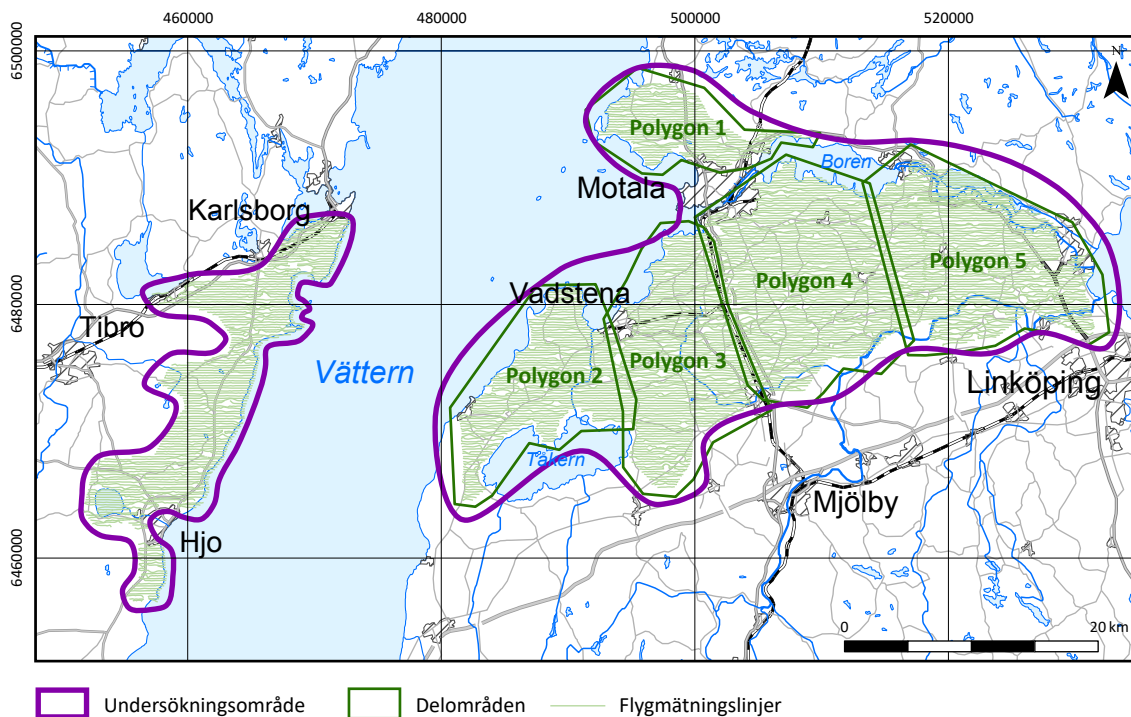
Under maj till juni 2018 utfördes helikopterburna transient elektromagnetiska mätningar (TEM) i ett område i Östergötland respektive Västergötland (fig. 1). Syftet med mätningarna är att kartlägga markens resistivitetsfördelning på djupet för att använda som underlag till geologisk och hydrogeologisk tolkning inom områdena. Insamling har skett av företaget Sky-TEM Surveys ApS på uppdrag av Sveriges geologiska undersökning (SGU).

Denna rapport är en första delrapport av projektet som helhet och fokuserar på databearbetning och geofysiska resultat. Rapporten innehåller en kortfattad beskrivning av själva mätmetoden och hur bearbetning från rådata till resistivitetsmodeller går till.

SYFTE

Syftet med mätningarna är att genom kartläggning av markens resistivitetsfördelning vid olika djup öka den geologiska förståelsen för att därigenom identifiera intressanta områden med avseende på större grundvattenuttag. Insamlade data syftar också till att utgöra ett underlag för upprättande av geologiska 3D-modeller över området.

Denna rapport presenterar arbetsgången från bearbetning av rådata till byggande av resistivitetsmodeller genom en iterativ metodik som kallas inversion. Rapporten utgör inte en komplett beskrivning av alla bearbetningsparametrar utan beskriver processen översiktligt. Syftet med rapporten är att utgöra ett referensunderlag för användare av dessa insamlade data, som till exempel kommuner, konsulter, universitet och högskolor. För geologisk och hydrogeologisk tolkning kommer en rapport för vardera område att publiceras under 2020. För området i Västergötland, se Dahlqvist m.fl. (2020).



Figur 1. Undersökningsområden i Västergötland och Östergötland samt indelningen i mindre delområden i Östergötland.

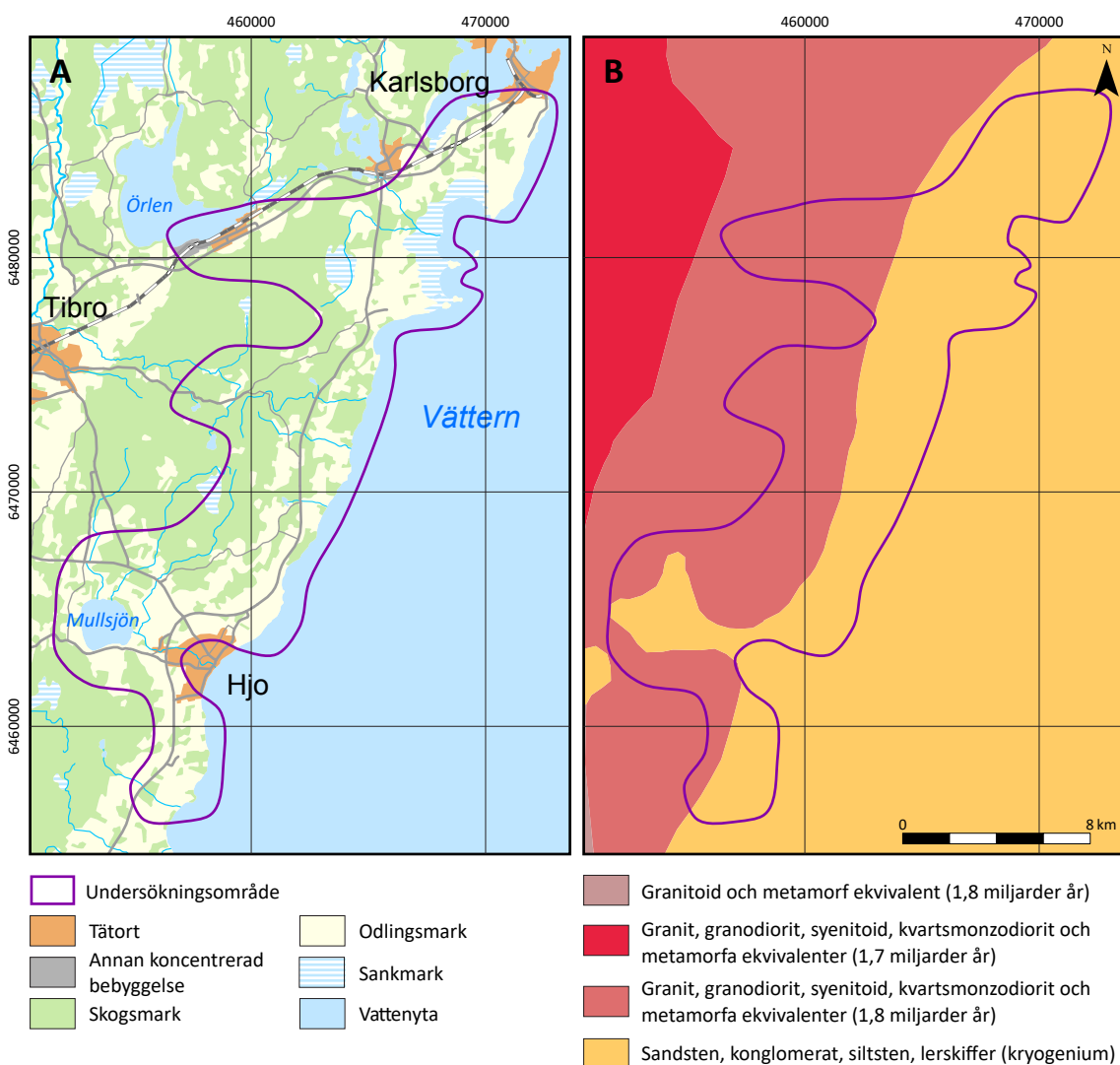
UNDERSÖKNINGSOMRÅDE

Insamling av data har skett i två områden, ett i Västergötland och ett i Östergötland (fig. 1).

Västergötland

Området i Västergötland är lokaliserat mellan Hjo och Karlsborg, längs Vätterns nordvästra strand (fig. 2). Området är cirka 170 km² stort och ligger i Karlsborg, Tibro och Hjos kommun. Mätningar är utförda längs flyglinjer och omfattar cirka 804 km. Ansvarig för bearbetning och inversion för området i Västergötland är Virginie Leroux.

Undersökningsområdet karakteriseras av ett skogbeväxt höjdområde i de västra delarna som sluttar åt alla väderstreck och avslutas med flackare område som, framförallt västerut mot Vättern, domineras av jordbruksmark (fig. 2A). Vättern som breder ut sig öster om området utgör ett tydligt inslag i landskapsbilden. I sydväst och nordväst ligger sjöarna Mullsjön respektive Örlen. I höjdområdet finns det gott om hållar som utgörs av granit. Där består jordlager mestadels av morän i regel 5 till 10 m mäktig men det förekommer också isälvsavlagringar med



Figur 2. A. Översichts- och markanvändningskarta för undersökningsområdet i Västergötland.

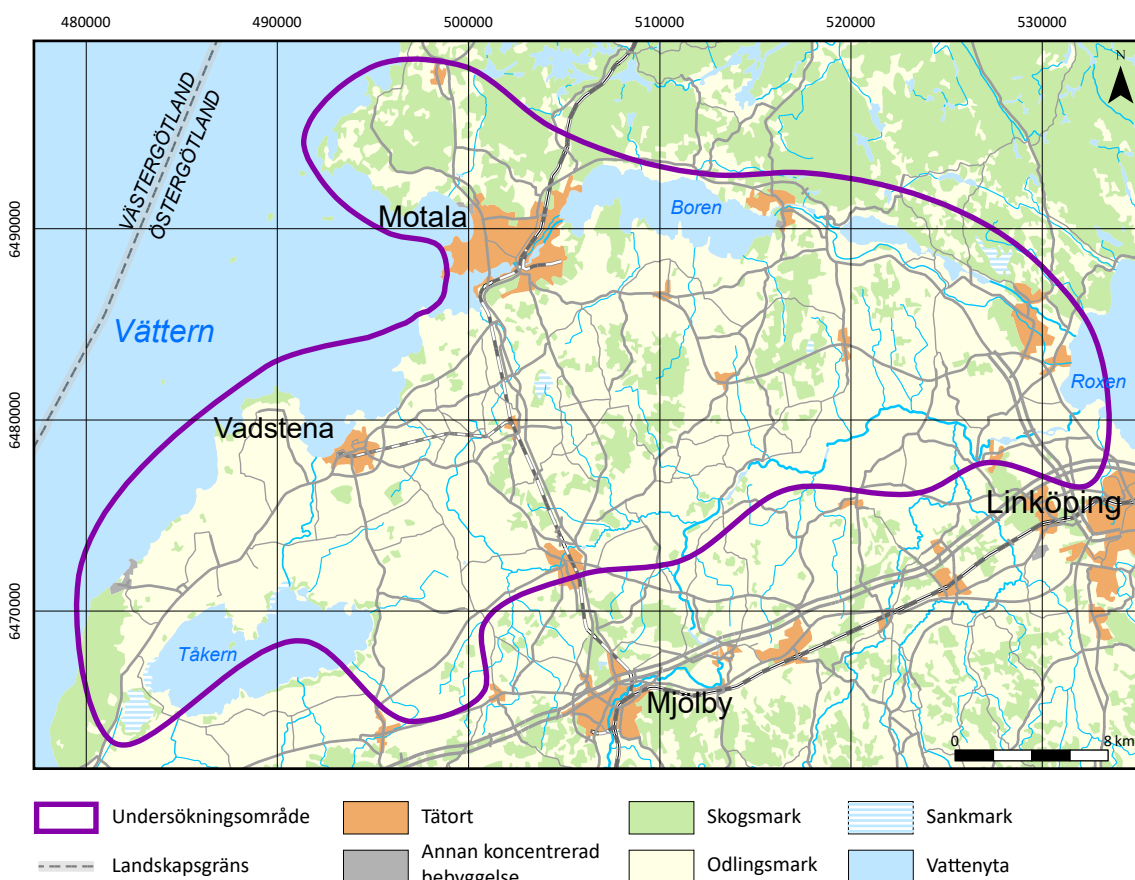
B. Förenklad berggrundskarta från SGUs databas Berggrund 1:1 miljon.

mäktighet på 10 till 30 m. Närmare Vättern samt vid Mullsjön i söder överlagras urberget av sedimentär berggrund (fig. 2B), bestående av Visingsösandstenen som ligger i nedförkastade block i den så kallade Vätternsänkan. Sandstenen är kvartsrik och de översta delarna är relativt löst sammansatta.

Sandstenen överlagras av i medeltal 20 till 30 mäktiga jordlager i form av isälvsmaterial, svallsand, morän samt i de lägre liggande områdena lera och organogena jordarter. De största jorddjupen inom området är nästan 50 m (uppgifter från SGUs jorddjupsdatabas, Daniels & Thunholm 2014). Isälvsaterialet uppvisar ofta karakteristiska åsar som ytformer eller deltan men kan på många platser överlagras av ett tunt lager morän. Ett flertal vattendrag men även källflöden har sin begynnelse i området mellan höjdområdet och de flackare partierna. De grundvattenmagasin som finns i området är knutna till de mäktiga sand- och grusavlagringar som ibland ligger ytligt och ibland överlagras av morän och lera, samt Visingsösandstenen.

Östergötland

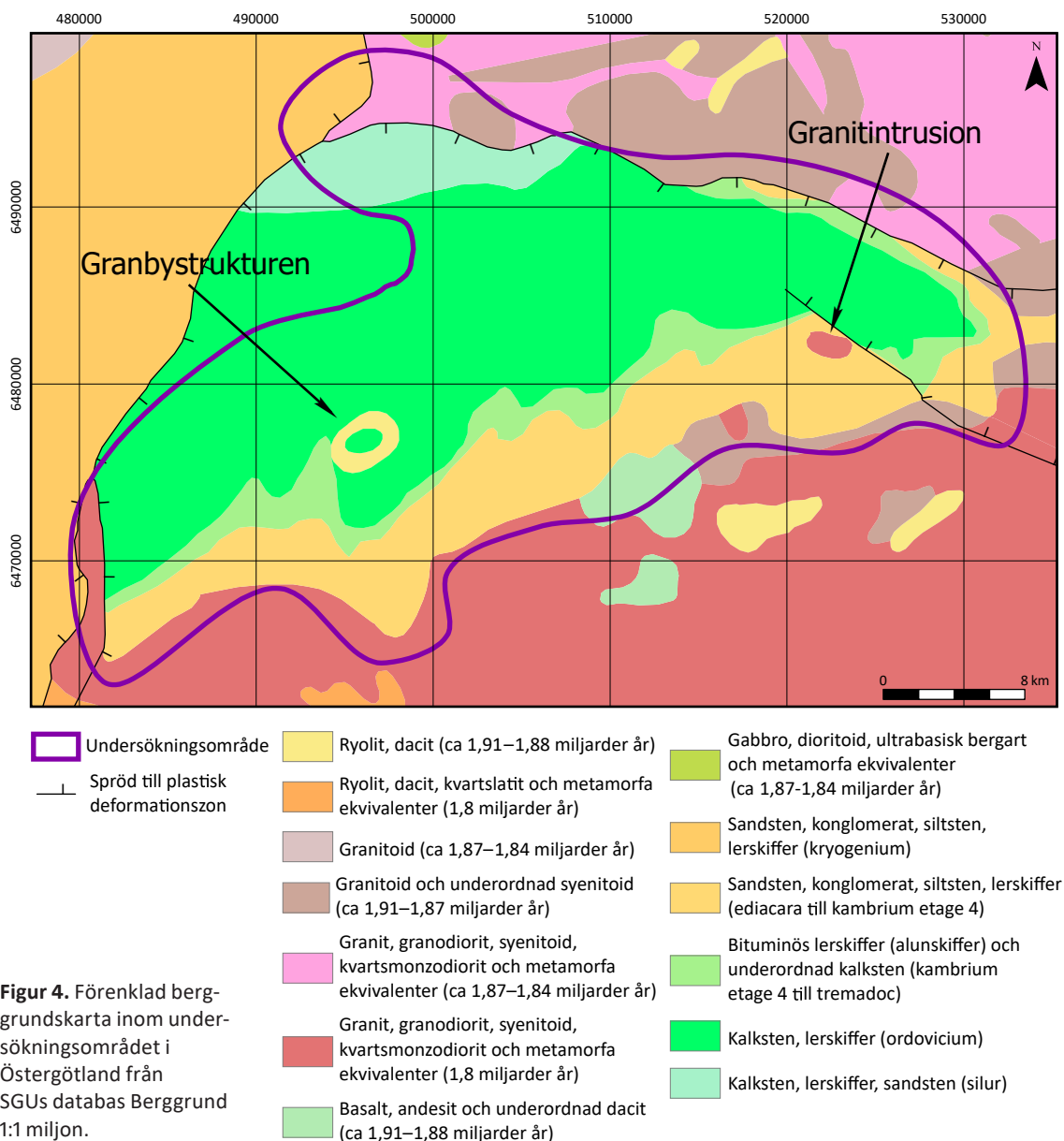
Undersökningsområdet i Östergötland sträcker sig längs Vätterns nordöstra strand och österut till sjön Roxen (fig.3). Undersökningsområdet omfattar cirka 670 km² och innefattar delar av kommunerna Motala, Vadstena, Linköping och Mjölby samt en mycket liten del av Ödeshögs kommun. Flyglinjernas längd utgör cirka 3 237 km. Östergötlandsområdet har delats in i ett mindre delområde för att ge hanterbara datamängder i de olika programvaror som används till bearbetning och modellering. Indelningen baseras främst på flyglinjernas placering (fig. 1). Huvudansvarig för bearbetning och modellering i Östergötland är Cecilia Brolin men har utförts med hjälp av Carl-Axel Triumf (konsult) och Virginie Leroux.



Figur 3. Orienteringskarta för undersökningsområdet i Östergötland.

Undersökningsområdet består i huvudsak av den så kallade östgötaslätten och domineras av odlingsmark. Vättern breder ut sig väster om undersökningsområdet. I de norra delarna ligger Göta kanal med sjöarna, Boren, Norrbysjön och Roxen, och i söder den grunda fågelsjön Tåkern. Området är flackt och höjdområden finns framförallt norr om området samt vid Omberg i den sydvästra avgränsningen. Jordlagren i området är oftast mellan 5 och 20 m mäktiga men jorddjup på upp mot 60 m finns. Den vanligaste jordarten är morän som bland annat bildar stora komplexa moränryggar som kan vara mäktiga. Sand- och grusavlagringar finns som tydliga isälvsavlagringar med åsformer med huvudsaklig riktning nord-syd med svallsediment i utkanterna. Finkorniga jordarter i form av lera och silt förekommer i de låglänta delarna av området.

Den ytliga berggrunden består av sedimentära bergarter (fig. 4). Den sedimentära sekvensen består av: sandsten, lerskiffer, alunskiffer, kalksten och skiffer med en sammanlagd mäktighet på som mest 250 m (Wikman m.fl. 1980). I norr där dessa bergarter är som mäktigast avgränsas



de mot den kristallina berggrunden av en markant förkastning och hela sekvensen stupar mot nord–nordväst. Mäktigheten och ingående berglager avtar söderut vilket betyder att det längst i söder endast finns tunn sandsten på urberget medan man i norr har hela lagerföljden. Norr och söder om slättlandskapet ligger urbergsområden med hållar och relativt tunna jordlager. Det kristallina urberget består främst av granit. I området norr om Motala finns dessutom Visingsösandstenen som här är relativt lerig. Huvudsakliga grundvattenmagasin finns framförallt i de mäktiga sand- och grusavlagringar som på vissa ställen ligger ytligt men ibland överlagras av andra jordarter, samt i den sedimentära berggrunden.

METODBESKRIVNING TEM

Transient elektromagnetiska (TEM) mätningar är en geofysisk mätmetod som kartlägger den elektriska ledningsförmågan i marken. Metoden är känslig för konduktiva enheter. TEM-mätningar kan utföras direkt på marken eller via olika fordon. Metoden har använts sedan mitten av 1980-talet och är ursprungligen utvecklad för kartläggning av mineraliseringar. Flygburen TEM (eller ATEM, Airborne Transient Electromagnetic) för hydrogeologiska undersökningar har utvecklats senare då förutsättningarna kräver data med hög precision och hög rumslig fördelning. Med ett flygburet system erhålls stora datamängder som kräver stor processorkapacitet för hantering, korrektioner och inversion. Den stora datamängd som samlas in möjliggör också en pålitlig kvalitetsgranskning genom jämförelser mellan intilliggande mätningar. SkyTEM är benämningen på det specifika system som har använts vid mätningarna i Östergötland och Västergötland och är utvecklat vid Aarhus universitet.

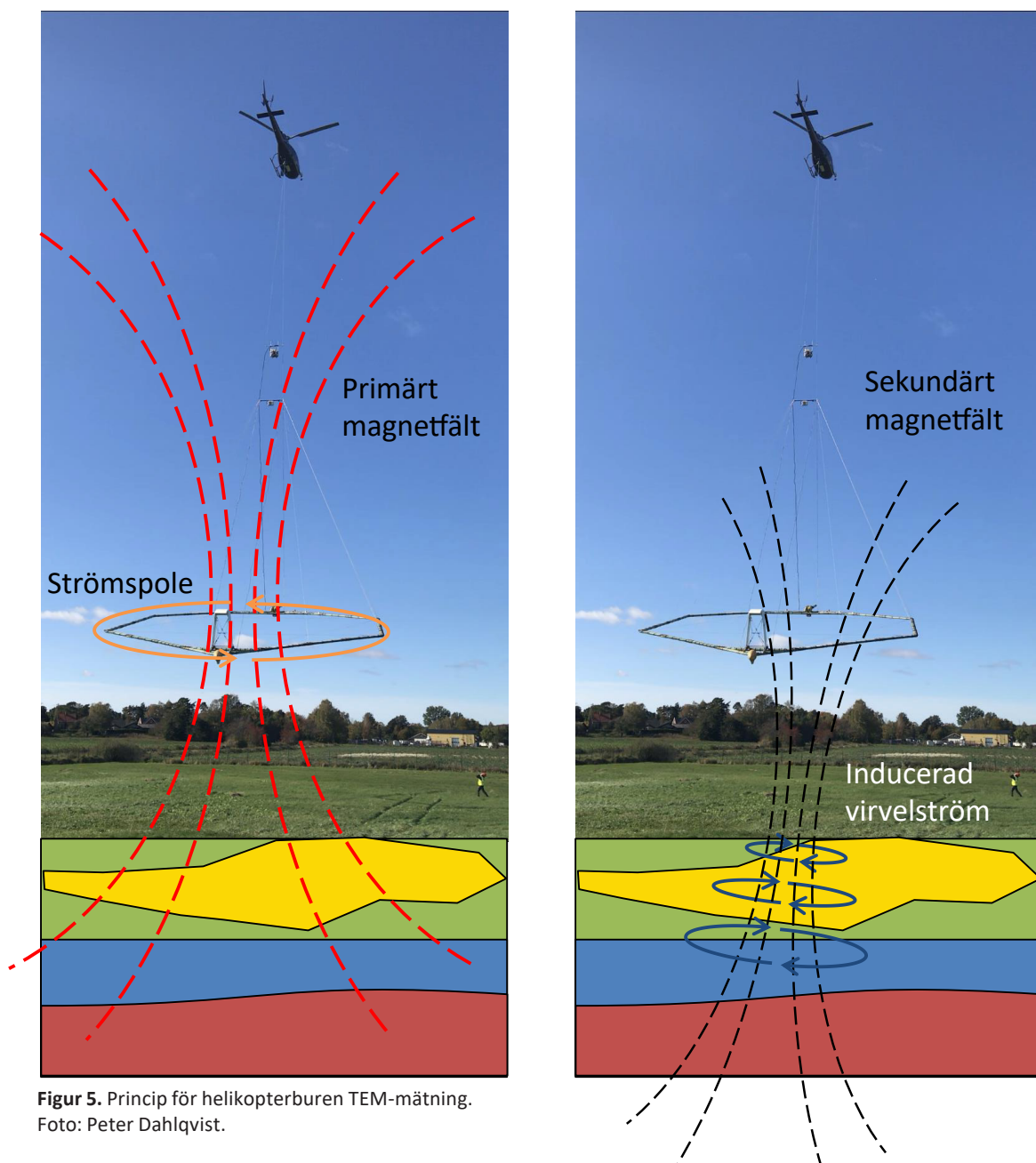
Helikopterburen TEM kan förenklat förklaras genom bildserien i figur 5. Genom en kabelslinga fastsittande på en ram under helikoptern skickas en kraftig strömpuls. Den genererar ett varierande magnetfält som ger upphov till ett inducerat elektriskt fält i marken som utbreder sig koncentriskt (nedåt och utåt). Detta varierande elektriska fält ger i sin tur upphov till ett sekundärt inducerat magnetfält, ”markens respons”, som mäts av en mottagarpole, även den hängande under helikoptern. Signalstyrkan i mottagarspolen beror på markens elektriska ledningsförmåga samt den primära strömmen i kabelslingan. Resistivitet är inversen av elektrisk ledningsförmåga och vanligen den enhet man presenterar mätresultat i.

Det varierande sekundära magnetfältet mäts efter att strömmen stängts av, i avsaknad av primärt fält. Fältets styrka klingar av väldigt fort och därför anger man den i tidsfönster (också kallade gates) vars bredd ökar med tiden. Mätningarna sker väldigt snabbt och även med en helikopter är dessa i praktiken punktvis. För varje ”mät punkt” får man en kurva över det sekundära magnetfältet, en TEM-sondering, vars amplitud och avklingning beror på primärfältets styrka och markens resistivitet, men även på flyghöjden och utrustningens egenskaper. Mätsekvensen illustreras i figur 6.

Mätningar med SkyTEM-systemet består av ”dual moment” (två-kanal-system) vilket innebär att en mätsekvens består av en strömpuls med hög ström och därmed kraftigare primärt magnetfält, High Moment (HM), och en strömpuls med lägre ström och därmed svagare primärt magnetfält, Low Moment (LM). HM medger större djupkänning medan LM ger bättre upplösning i de ytnära marklagerna.

SkyTEM

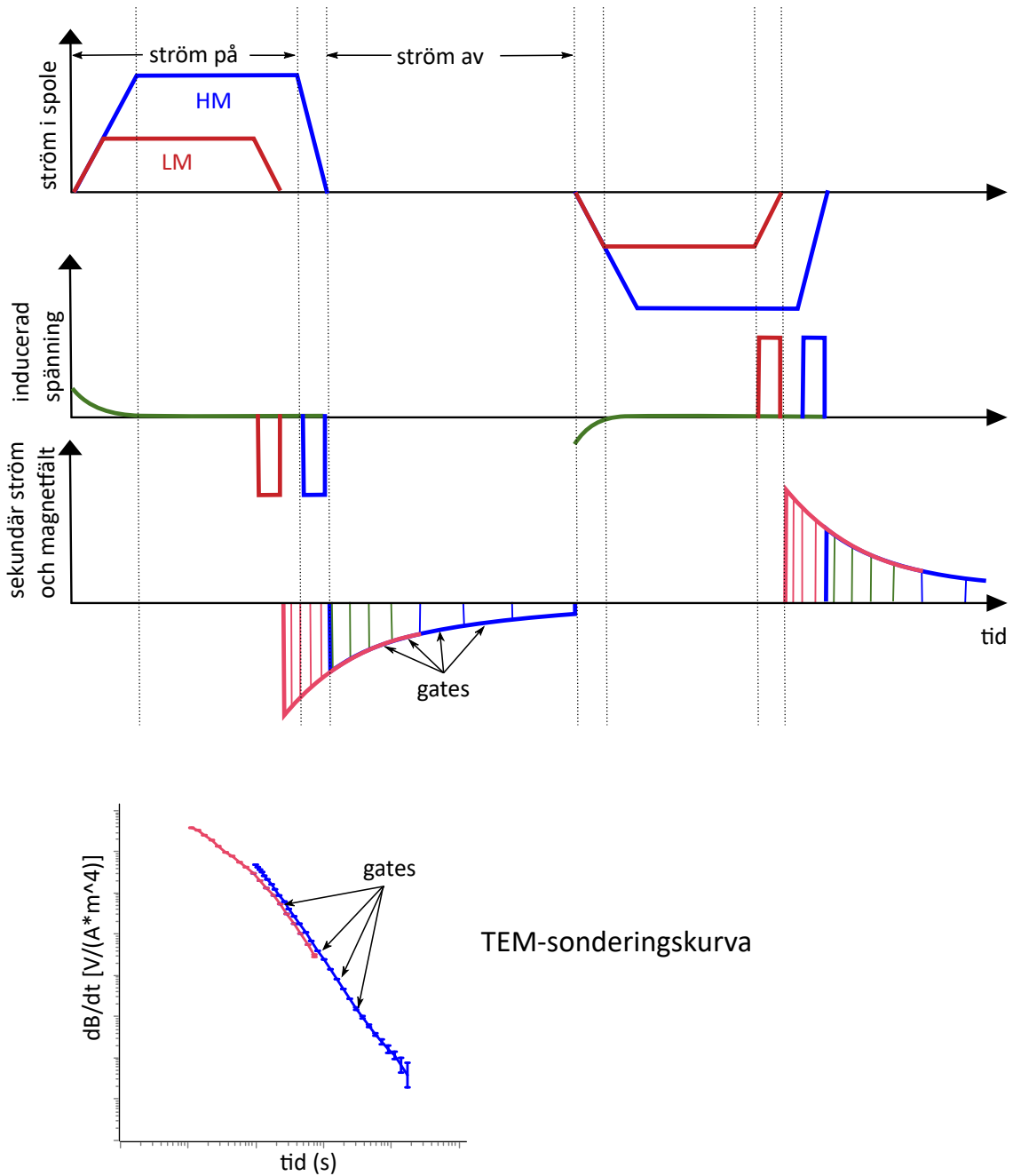
Mätssystemet som användes vid mätningarna i Östergötland och Västergötland betecknas SkyTEM304M och är anpassat för hydrogeologiska undersökningar. Företaget SkyTEM Surveys ApS har stått för datainsamlingen och har avrapporterat undersökningen genom en rådata-rapport som beskriver mätsystemet, kvalitetskontroller och levererat material. Mätssystemet



Figur 5. Princip för helikopterburen TEM-mätning.
Foto: Peter Dahlqvist.

består förutom av sändar- och mottagarspole också av två laserscannrar, två inklinometrar och två GPS:er. Dessa instrument är till för att med hög noggrannhet mäta positionen för ramen och dess avstånd till marken kontinuerligt. På ramen finns också en magnetometer som mäter jordens magnetfält. Detta är en datamängd som inte används av SGU inom nuvarande projekt då SGU har flygmagnetiska data från egna flygmätningar i områdena sedan tidigare.

Datainsamling har skett längs parallella flyglinjer i öst–västlig riktning med cirka 200 m mellanrum (fig. 1). Optimal position för ramen är mellan 30 och 40 m ovanför marken, men mestadels är höjden drygt 50 m. Detta beroende på variationer i topografi och infrastruktur. Helikoptern flyger ej över tätbefolkade områden, väjer för enskilda hus och går upp i höjd för olika hinder eller störningar. Några parametrar från flygningarna presenteras i tabell 1.



Figur 6. TEM strömpulser och sondering. Figuren är modifierad efter Christiansen m.fl. (2009).

Tabell 1. Utvalda parametrar från flygmätning.

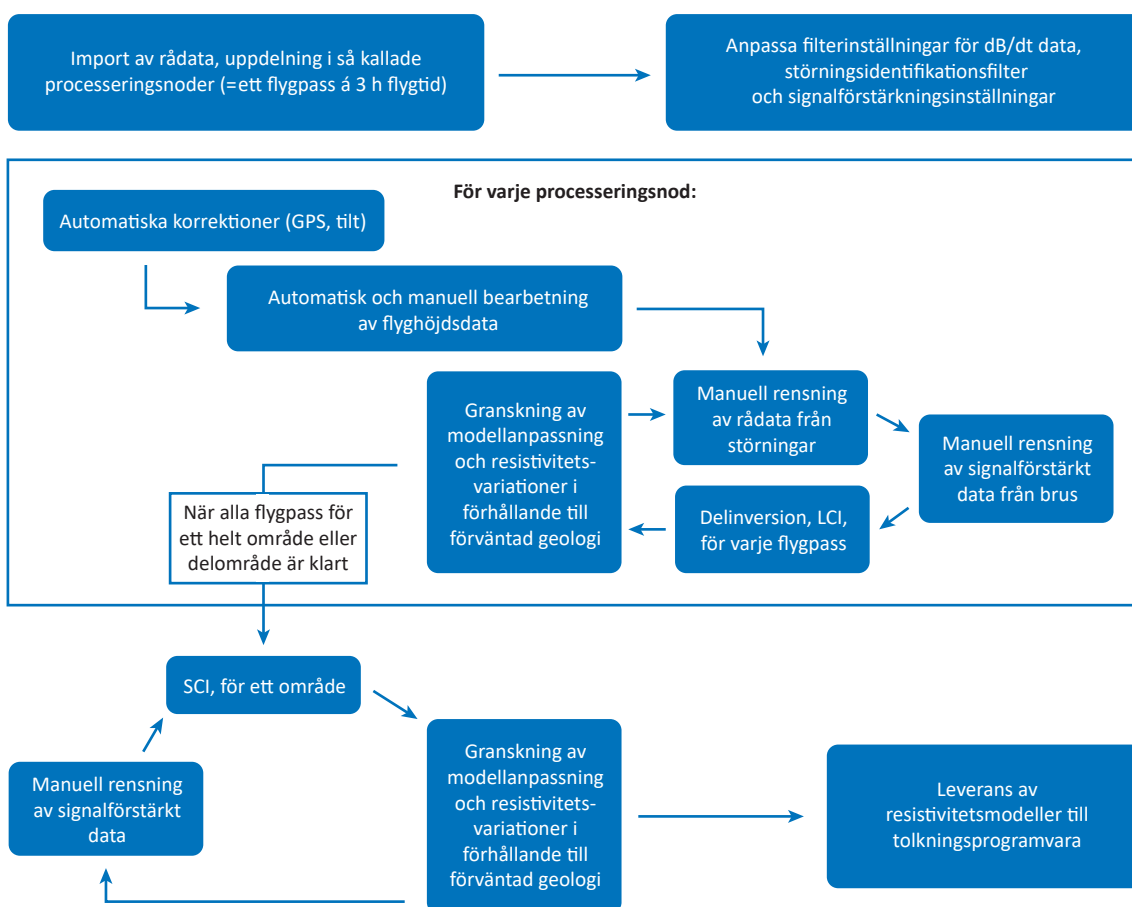
Parameter	Medelvärde	Standardavvikelse
Markhastighet	81,7 km/h	11,1 km/h
Flyghöjd	56,6 m	18,8 m
Lutningsvinkel	X -0,9°	3,5°
	Y 1,6°	2,3°
Low moment ström	7,7 A	0,04 A
High moment ström	110,8 A	1,4 A

SkyTEM levererar också resistivitetsmodeller från egna utförda inversioner. Data rensas här från störningar med automatiserade processer och ingen manuell granskning ingår. Inversion sker över stora områden och resultaten ger en bra översiktlig bild av geologin. SGU bearbetar data och gör egna inversioner men SkyTEMs producerade resistivitetsmodeller används också som stöd i tolkningen.

BEARBETNING

Bearbetning av data är en omfattande och tidskrävande process och syftar till att gå från rådata som mäts med systemet till resistivitetsmodeller som kan kopplas till geologiska variationer i marken. Första steget består av import av rådata till ett bearbetningsprogram. Denna import inkluderar korrektioner som tar hänsyn till geometrier, systemet som används samt andra mätinställningar bestämda av SkyTEM Aps. Detta sker automatiskt genom informationsfiler. Nästa steg består i att identifiera och plocka bort data som är påverkat av störningar (infrastruktur med mera) för att kunna tolkas geologiskt på ett pålitligt sätt. Detta sker med hjälp av automatiska inställningar och beräkningar, men till största delen manuellt då en visuell kvalitativ granskning behövs. Till processen tillhör även en preliminär inversion och granskning, vilket kan behövas upprepas flera gånger för att finjustera databearbetningen. All bearbetning och inversion av data har skett i programvaran Aarhus Workbench (AWB) version 6.1.0.0 och 6.2.0.0 från Aarhus GeoSoftware. Arbetsgången visualiseras i figur 7.

Slutligen utförs en eller flera inversioner över hela området från vilka resistivitetsmodellerna levereras till ett tolkningsprogram, inom detta projekt har det varit Geoscene 3D från I-GIS.



Figur 7. Flödesschema för bearbetning.

Flyghöjdsdata

Dataset som granskas manuellt i AWB är flyghöjdsdata och TEM-sonderingar (dB/dt). Flyghöjdsdata består av mätningar av ramens avstånd till marken från två laserscannrar. Denna data korrigeras baserat på tilt-data från två inklinometrar. Detta så att det vinkelräta avståndet till marken erhålls även om ramen lutar. Vid flygningar över tät skog kommer många av laserreflektionerna att komma från trädkronorna, detta ger ett resultat av ett mindre avstånd till marken. För att korrigera för detta appliceras ett så kallat ”trädtopsfilter”. Man kan ställa in detta filter för att anpassa till situationen i sitt mätområde. En fullständig korrektion uppnås nästan aldrig och manuell editering sker också.

Sonderingsdata

Bearbetning av sonderingsdata (dB/dt) består i princip av två delar, den första är att rensa data från olika störningar och den andra delen består av att brusreducera data genom medelvärdesbildning. Att identifiera och plocka bort data med störningar sker både genom en automatiserad och en manuell process och den är till viss del iterativ. Den automatiska delen består i att man sätter upp filter som identifierar för snabba variationer i data inom ett tidsintervall där brusnivån antas vara låg.

Störningar

Den manuella bearbetningen innebär att man jämför närliggande sonderingskurvor och identifierar avvikande mönster i dessa. Samtida visualisering på en plankarta hjälper till att hitta orsaker till olika störningar som till exempel infrastruktur. Ibland förekommer det störningar utan att någon uppenbar orsak kan identifieras och ibland förekommer det ”ostörda” data där man vanligtvis förväntar en störning. Detta sker oftast vid vägar och anledningen till detta kan vara många. Det inte själva vägarna som utgör en störning utan eventuella ledningar eller metallstaket längs dessa. En samlad bedömning från flera olika kvalitetsparametrar och visuell granskning av data avgör vilka som sparas. Vid bearbetning i Östergötland och Västergötland har synsättet varit att data inte tas bort i det första steget om den ser ostörd ut även om flyglinjen går över en struktur som i andra flyglinjer gett upphov till störningar. Bedömning av dessa data sker alltid också via inversion innan beslut om dessa data ska ingå eller ej i slutgiltig inversion.

Signalförstärkning

Brusreducering av data sker efter att störningar har rensats bort. Brusreducering innebär att medelvärdesbilda data med ett så kallat trapetsfilter. Bredden på filtret är litet för tidiga gates men ökar sedan i två steg för senare gates och inkluderar fler datapunkter, detta för att bevara upplösningen i de ytliga delarna/tidiga tiderna men samtidigt brusreducera så att användbar signal kan fås från de djupare delarna/senare tiderna. Detta korresponderar också till ett större ”avtryck” hos de senare tiderna och därför bör också ett större område ingå i medelvärdet. Den optimala bredden för dessa filter kan variera inom ett och samma mätområde men anpassas så att det blir så bra som möjligt för så stora områden som möjligt. Speciellt svårt med medelvärdet blir det när responsen varierar snabbt i styrka som till exempel vid snabba flyghöjdsförändringar. Efter brusreducering granskas den medelvärdesbildade datan och de delar i sonderingsdatan (sena tidsfönster) som nu anses endast bestå av brus tas bort. Använda bredder för medelvärdesfilter i de olika områdena anges i tabell 2.

En del i bearbetningen är att göra preliminära inversioner. Dessa underlättar granskning av förväntat resultat och identifiera problemområden för vidare granskning. Dessa inversioner görs genom Laterally Constrained Inversion (LCI) och beskrivs mer ingående i avsnittet *Inversion*.

Tabell 2. Använda trapetsfilter i undersökningsområdena.

LM			HM		
Östergötland		Västergötland	Östergötland		Västergötland
Tid (s)	Bredd (s)	Bredd (s)	Tid (s)	Bredd (s)	Bredd (s)
1×10^{-5}	5	2	1×10^{-4}	8	3
1×10^{-4}	10	4	1×10^{-3}	16	6
1×10^{-3}	15	12	1×10^{-2}	24	18

INVERSION

Med termen inversion menas modellanpassning för att lösa inversa problem som innebär att man mäter eller studerar en effekt och sedan beräknar orsaken. För TEM-metoden mäter man det avklingande sekundära magnetfältet som är markens respons till det varierande primära magnetfältet, och modellerar vilken möjlig resistivitetsfördelningen marken kan ha för att ge upphov till denna respons. Här används en iterativ inversionsteknik. En startmodell för marken ansätts med ett antal lager och dess resistivitet, dess respons beräknas och jämförs med den uppmätta responsen (dB/dt). Modifiering av resistivitetsmodellen (automatiskt inom inversionen) görs till det att en tillfredsställande anpassning fås mellan modellerad och uppmätt respons.

Vid beräkning av responsen från den ansatta modellen antas här endast en variation av resistiviteten på djupet, modellen är på så vis endimensionell. Detta betyder att man antar att marken är uppbyggd av plana parallella horisontella och homogena lager. Dessa modeller är väletablerade och används för att beräkningarna ska bli hanterbara. Olika ”begränsningar” (eng. *constrains*) kan sättas så att de endimensionella modellernas resistivitet ej tillåts variera för mycket mellan intilliggande modeller. Vid användandet av LCI är modellerna bundna längs med flyglinjerna och vid SCI är modellerna både bundna längs med och över flyglinjerna. SCI-metoden är därmed att betrakta som kvasi-3D (Viezzoli m.fl. 2008). LCI-metoden används inom bearbetningsprocessen och inledande tolkning medan SCI används för att ta fram slutgiltiga resistivitetsmodeller.

Inversionsmetodiken som har använts i områdena är en så kallad ”*smooth*” inversion vilket ger kontinuerliga och långsamma resistivitetsvariationer mellan olika lager som modellen är uppbyggd av. Fördelen med denna inversion är att modellen är relativt enkel att sätta upp och ger ett bra resultat trots olika förutsättningar inom mätområdet, antagandena för modellen är ”lösa”. I detta fall har marken delats upp i 30 lager med logaritmiskt ökande tjocklek på djupet ned till ett bestämt djup. Det enda som tillåts variera under inversion är resistiviteten för varje lager. För alla delområden inom Östergötland har det översta lagrets tjocklek ansatts till 2 m och modellen har gått till 300 m djup. För Västergötland har två olika inversioner använts vid tolkning där de översta lagerna har haft en tjocklek på 1 och 4 m och gått till ett djup på 250 och 200 m respektive. För Västergötland presenteras kvalitetsparametrar och inställningar från inversionen med 1 m lager tjocklek för det första lagret. Kompletta lagerindelning och utvalda inversionsparametrar redovisas i bilaga 1.

Jämförelse mellan flyglinjer och täckning av resistivitetsmodeller ger en bild av hur mycket störda data som har rensats bort i området och visas i bilaga 2. Det totala antalet resistivitetsmodeller för varje område presenteras i tabell 3.

Tabell 3. Antal resistivitetsmodeller för varje delområde. Observera att summan av delområdena i Östergötland blir större än den totala summan för hela området då polygonerna överlappar varandra (fig. 1).

Område	Flyglinjer (km)	Antal resistivitetsmodeller
Västergötland	804	15 633
Östergötland (hela)	3 237	58 152
Polygon 1		4 077
Polygon 2		10 168
Polygon 3		12 868
Polygon 4		17 177
Polygon 5		15 617

RESULTAT

Datakvalitet

Kvaliteten på resistivitetsmodellerna beror på flera olika saker. I detta avsnitt redogörs några olika parametrar som ger anvisning till modellernas kvalitet. Syfte och mål med projektet inom vilken datainsamling och bearbetning har gjorts är att peka ut intressanta områden för vattenförsörjning i ett regionalt perspektiv. Inversion är utförd över stora områden med varierande geologi. Detta föranleder att vissa generaliseringar görs och acceptans av mindre bra kvalitetsparametrar i vissa områden. Synsättet inom detta projekt är att ha en hög kvalitet på datarensning för att underlätta framtida kompletterande inversioner för mindre delområden med ytterligare ”begränsningar” i startmodeller eller med nya inversionstekniker. Nedan beskrivna kvalitetsparametrar redovisas i bilaga 3 till 7 för alla delområden inom mätområdet Östergötland och för mätområdet Västergötland.

Antal datapunkter

Antal datapunkter som används vid inversionen är ett mått på underlaget till inversion. Fler punkter till varje modellberäkning ger ett bättre underlag till modellenpassningen och därmed en säkrare modell. Det maximala antalet punkter beror på hur många gates för LM och HM som har använts. Detta varierar något mellan olika mätområden beroende på vilka gates man väljer att ha med i inversionen. För Östergötland är det maximala antalet gates 48 och för Västergötlandsområdet 36 gates.

Dataresidual

Dataresidual beräknas genom att jämföra uppmätt data med modellerade data som den modellerade resistivitetsfördelningen skulle ge upphov till. Värdet omkring 1 innebär att anpassningen mellan uppmätta och modellerade data är, i medeltal, i samma storleksordning som brus. Om residualen är högre kan det bero på flera faktorer, men det är en indikation på lägre säkerhet i modellen. Det finns flera skäl till en högre residual som inte behöver betyda en sämre modell, bland annat en högre brusnivå än vad modellen antar eller att man har så kallade 2D- och 3D-effekter. 2D- och 3D-effekter innebär att geologin inte kan beskrivas med plana, horisontella och homogena lager, vanligen vid olika slags strukturer så som förkastningar, intrusioner, impaktstrukturer med flera. Olika nivåer av ”accepterad” residual gäller för olika mätområden och är delvis beroende på geologi.

Flyghöjd

Vid inversion är flyghöjden för mätsystemet en parameter som är med i modellanpassningen. Både automatisk och manuell bearbetning sker för att få en så hög noggrannhet av denna som möjligt, viss osäkerhet kvarstår dock och flyghöjden tillåts att variera i inversionen. Om skillnaden mellan uppmätt och beräknad flyghöjd är stor indikerar det dålig modellpassning och lägre kvalitet på data eller inversion.

Kanaler (Channel number)

Automatisk och manuell bearbetning sker av HM och LM separat men granskas också tillsammans. Störningar kan förekomma i båda dataset var för sig eller samtidigt. I punkter där HM är bortplockad på grund av störningar, så kommer djupkänningen, Depth Of Investigation (DOI), i dessa punkter att vara begränsad jämfört med punkter med både LM och HM. När störningar förekommer i LM men inte i HM blir situationen lite mer komplex. Information finns fortfarande för de ytligare lagerna men är inte lika detaljerad eller pålitlig som i de resistivitetsmodeller som inkluderar både LM och HM. Detta ska beaktas i tolkning.

Djupkänning (DOI)

För varje resistivitetsmodell beräknas en djupkänning, (DOI), som anger till vilket ungefärligt djup modellen är tillförlitlig. Under denna punkt styrs modellen av begränsningar angivna för modellanpassningen mer än själva data. Det finns två angivelser för DOI, en DOI-konservativ (eller DOI övre) och en DOI-standard (eller DOI undre). De två skiljer sig genom olika satta gränser för ackumulerad känslighet i beräkningen av DOI. För en mer teknisk beskrivning hänvisas till Christiansen och Auken (2012).

Västergötland

I flygområdet för Västergötland har ganska stora datamängder rensats bort och ej kunnat inkluderas i inversion (bilaga 2.6). Den huvudsakliga anledningen till detta är att flygningen har utförts över områden med enbart högresistiva jord- och berglager. En indirekt tolkning av dessa områden är att här finns inga lågresistiva lager av någon avsevärd mäktighet (för metoden möjlig att upplösa). Med avsevärd menas här en mäktighet på cirka 4 m vid ytan och sedan succesivt ökande mot djupet. I de områden där inversion har utförts är kvaliteten på data god men med en ganska begränsande djupkänning (bilaga 7.6.1 och 7.6.2). Detta beror på att jordlagerna i största delen av området underlagras av högresistiv berggrund i form av urberg. Viss problematik har också observerats i områden med sedimentär berggrund då denna sandsten också uppvisar en hög resistivitet. En hel del infrastruktur i området har också lett till att mycket data har rensats bort.

Östergötland

För flygområdet i Östergötland har data främst rensats bort kring olika infrastrukturer. Stora vägar och kraftledningars position syns tydligt som hål i data (bilaga 2.1–2.5). I allmänhet har stora delar av data sparats till inversion och en hög kvalitet på denna har erhållits. Det finns dock några områden som är problematiska. Ett sådant område är kring den så kallade Granbystrukturen (fig. 4) som är en impaktstruktur. Här förekommer 2D- och 3D-effekter som en 1D-inversion inte kan redovisa på ett strukturmässigt korrekt sätt. 2D-effekter förekommer också tydligt längs förkastningszonen i nordöstra delen av området i synnerhet över Norrbysjön (fig. 4). Området med en granit-intrusion är också problematiskt, detta då här

finns högresistiva enheter ytligt men också dess form ger upphov till 2D- och 3D-effekter. Höga residualer, få datapunkter och mindre nedträningsdjup syns överallt där man närmar sig urberg (låg signalstyrka) och det är som väntat lägre kvalitet i modellerna här.

En generell trend i djupkänningen kan urskiljas för hela Östergötlandsområdet (exklusive polygon 1,) med en maximal djupnedträngning i nordväst som sedan successivt minskar mot sydost (bilaga 7.2.1–7.5.2). Detta antas vara direkt kopplat till den lågresistiva lerskifferns position i området som i sin tur är direkt kopplat till en stupande urbergsyta.

REFERENSER

- Christiansen A.V., Auken E., Sørensen K., 2009: *The transient electromagnetic method*. I Kirsch R. (eds) *Groundwater Geophysics*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Christiansen, A. V. & Auken, E., 2012: A global measure for depth of investigation, *Geophysics* 77, WB171-WB177.
- Dahlqvist, P., Henriksson, O., Pile, O., Lång, L-O., Lindh, Å., Gustafsson, M., Leroux, V. & Andersson, J., 2020: Helikopterburna TEM-mätningar vid Vätterns nordvästra strand – geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning. *SGU-rapport 2020:24*. Sveriges geologiska undersökning.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Rikstäckande jorrdjupsmodell. *SGU-rapport 2014:14*. Sveriges geologiska undersökning.
- HydroGeophysics Group, Department of Earth Sciences University of Aarhus, Denmark, 2011: Guideline and standards for SkyTEM measurements, processing and inversion, v 2.5.
- Viezzoli A., Christiansen A.V., Auken E. & Sørensen K.I., 2008: Quasi-3D modelling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* 73 (3), F105–F113.
- Wikman, H., Bruun, Å. & Dahlman, B., 1980: Beskrivning till berggrundskartan Linköping NV. *Sveriges geologiska undersökning Af 119*.

BILAGA 1. INVERSIONSINSTÄLLNINGAR

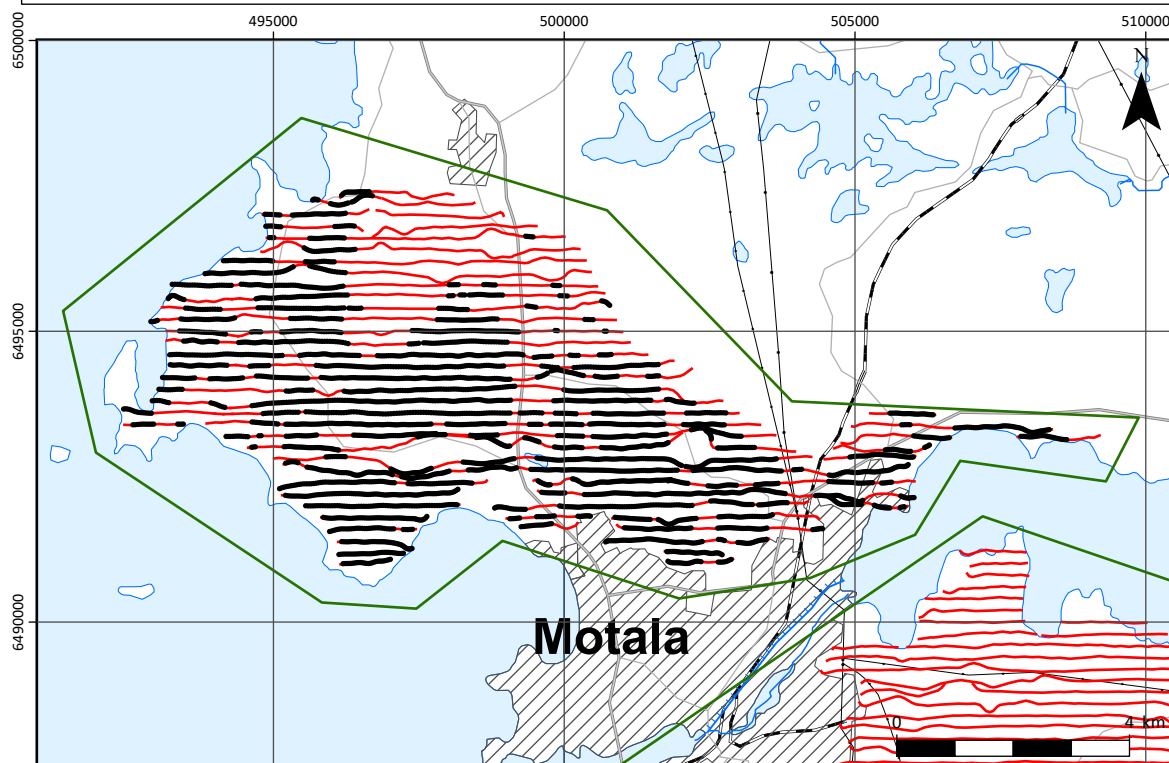
	Östergötland polygon 1	Östergötland polygon 2, 3, 4 och 5	Västergötland
Excluded gates LM	1 – 5	1 – 5	1 - 5
Excluded gated HM	1 – 8	1 – 8	1 - 8
Inversion type	Smooth (L2 norm)	Smooth (L2 norm)	Smooth (L2 norm)
No layers	30	30	30
Min number data points	4	3	3
Reference distance	25	25	25
Power law	0.75	0.75	0.75
Priori constrain (99 = none)	99	99	99
Altitude A-priori STD (m)	1	1	2
AltLatSTD	1.5	1.5	1.3
Altitude if not recorded (m)	50	50	50
ResVerSTD	4	4	2
ResLatSTD	3	3	1.5

Startmodell Östergötland				Startmodell Västergötland			
Lager	Resistivitet (Ohmm)	Tjocklek (m)	Djup (m)	Lager	Resistivitet (Ohmm)	Tjocklek (m)	Djup (m)
1	Auto	2,0	2,0	1	Auto	1,0	1,0
2	Auto	2,2	4,2	2	Auto	1,1	2,1
3	Auto	2,4	6,6	3	Auto	1,3	3,4
4	Auto	2,7	9,3	4	Auto	1,4	4,8
5	Auto	2,9	12,2	5	Auto	1,6	6,4
6	Auto	3,2	15,4	6	Auto	1,8	8,2
7	Auto	3,6	19,0	7	Auto	2,1	10,3
8	Auto	3,9	22,9	8	Auto	2,3	12,6
9	Auto	4,3	27,2	9	Auto	2,6	15,2
10	Auto	4,7	31,9	10	Auto	3,0	18,2
11	Auto	5,2	37,1	11	Auto	3,3	21,5
12	Auto	5,7	42,8	12	Auto	3,8	25,3
13	Auto	6,3	49,1	13	Auto	4,3	29,6
14	Auto	6,9	56,0	14	Auto	4,8	34,4
15	Auto	7,6	63,6	15	Auto	5,4	39,8
16	Auto	8,4	72,0	16	Auto	6,1	45,9
17	Auto	9,3	81,3	17	Auto	6,9	52,8
18	Auto	10,2	91,5	18	Auto	7,8	60,6
19	Auto	11,2	102,7	19	Auto	8,8	69,4
20	Auto	12,3	115,0	20	Auto	9,9	79,3
21	Auto	13,6	128,6	21	Auto	11,2	90,5
22	Auto	14,9	143,5	22	Auto	12,6	103,1
23	Auto	16,4	159,9	23	Auto	14,2	117,3
24	Auto	18,1	178,0	24	Auto	16,0	133,3
25	Auto	19,9	197,9	25	Auto	18,1	151,4
26	Auto	21,9	219,8	26	Auto	20,4	171,8
27	Auto	24,1	243,9	27	Auto	23,0	194,8
28	Auto	26,5	270,4	28	Auto	26,0	220,8
29	Auto	29,2	299,6	29	Auto	29,3	250,1
30	Auto	∞	∞	30	Auto	∞	∞

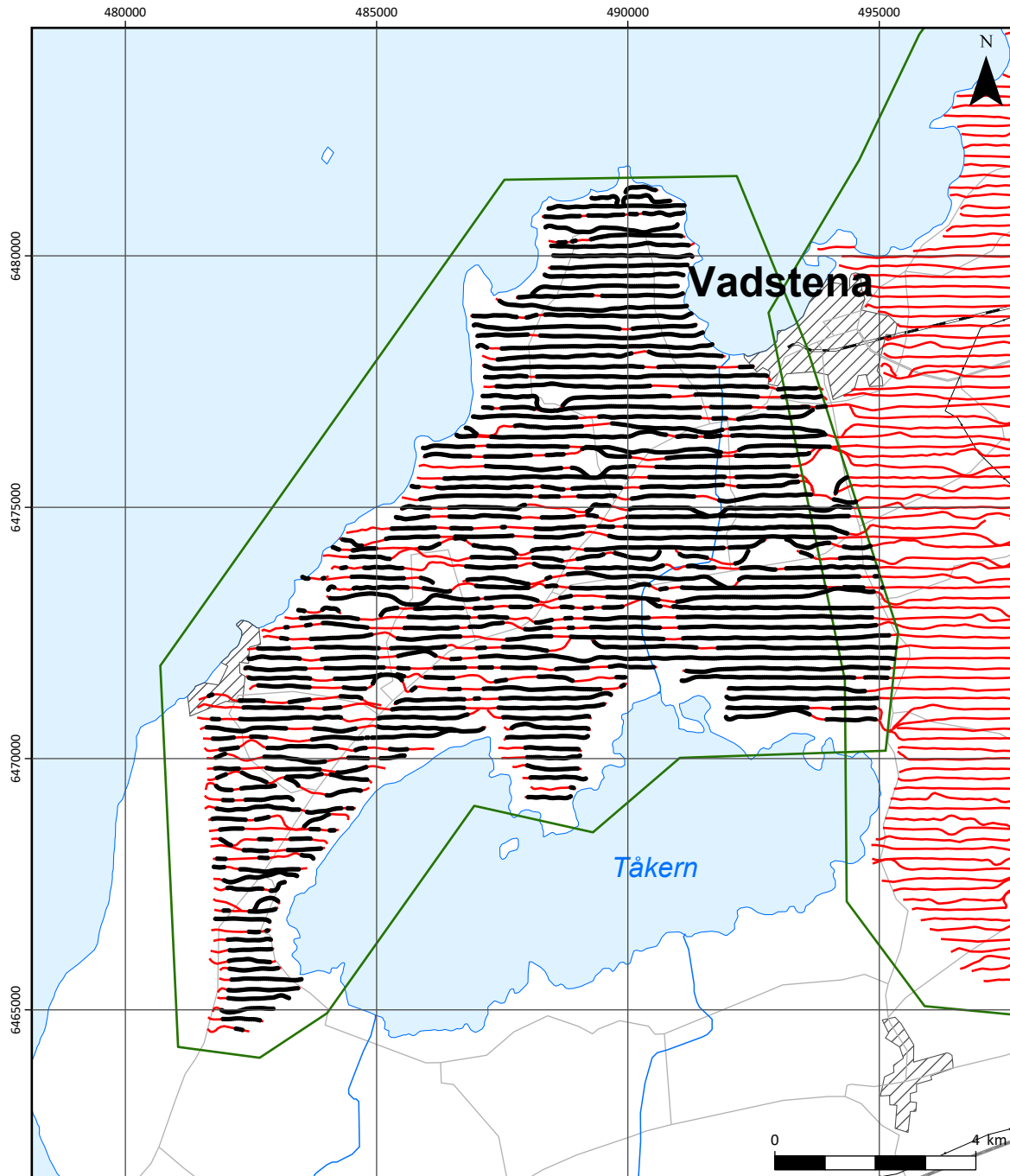
BILAGA 2. FLYGLINJER OCH RESISTIVITETSMODELLER

Bilaga 2.1
Polygon 1
Flyglinjer och resistivitetsmodeller

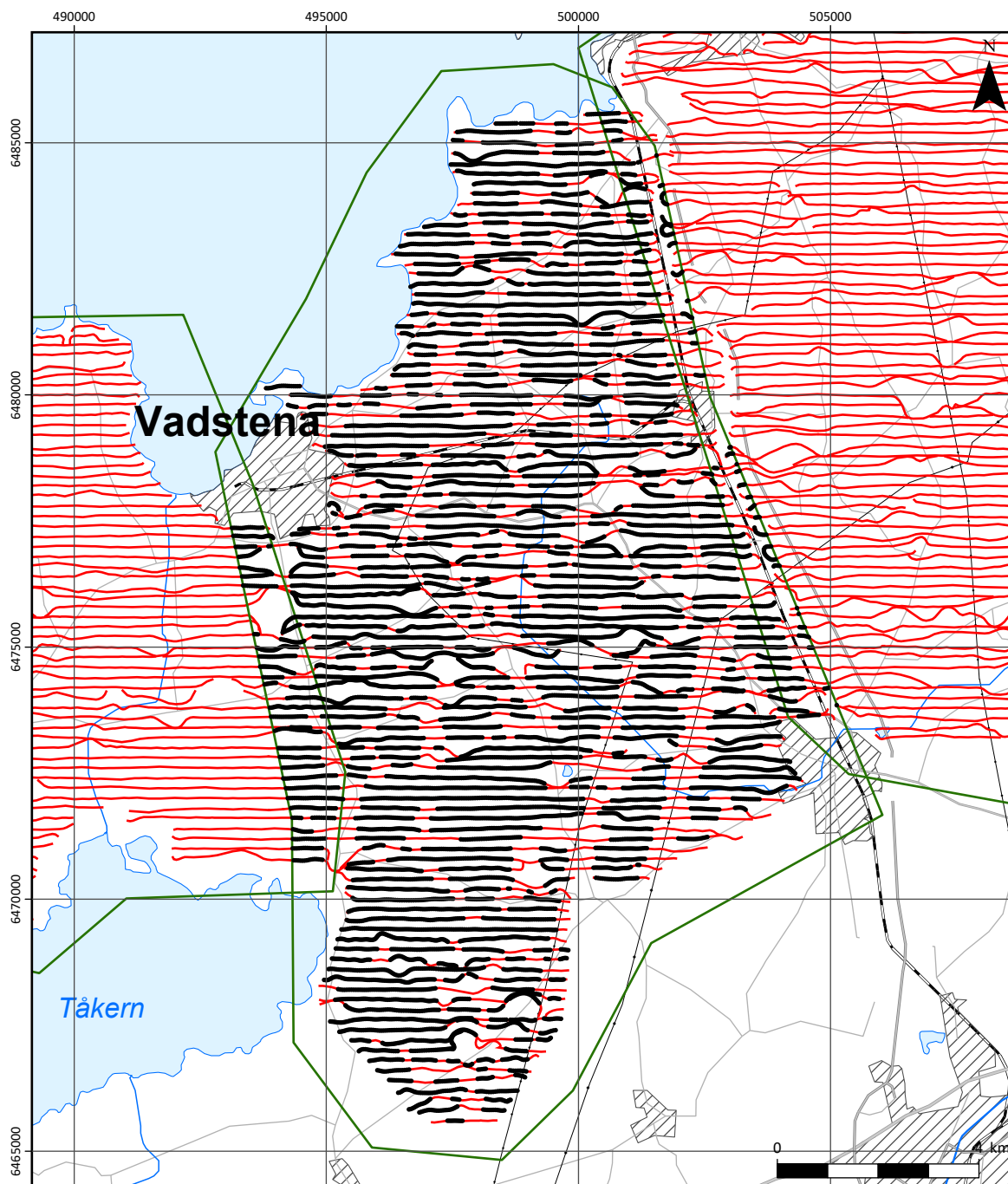
SGU Sveriges
geologiska
undersökning



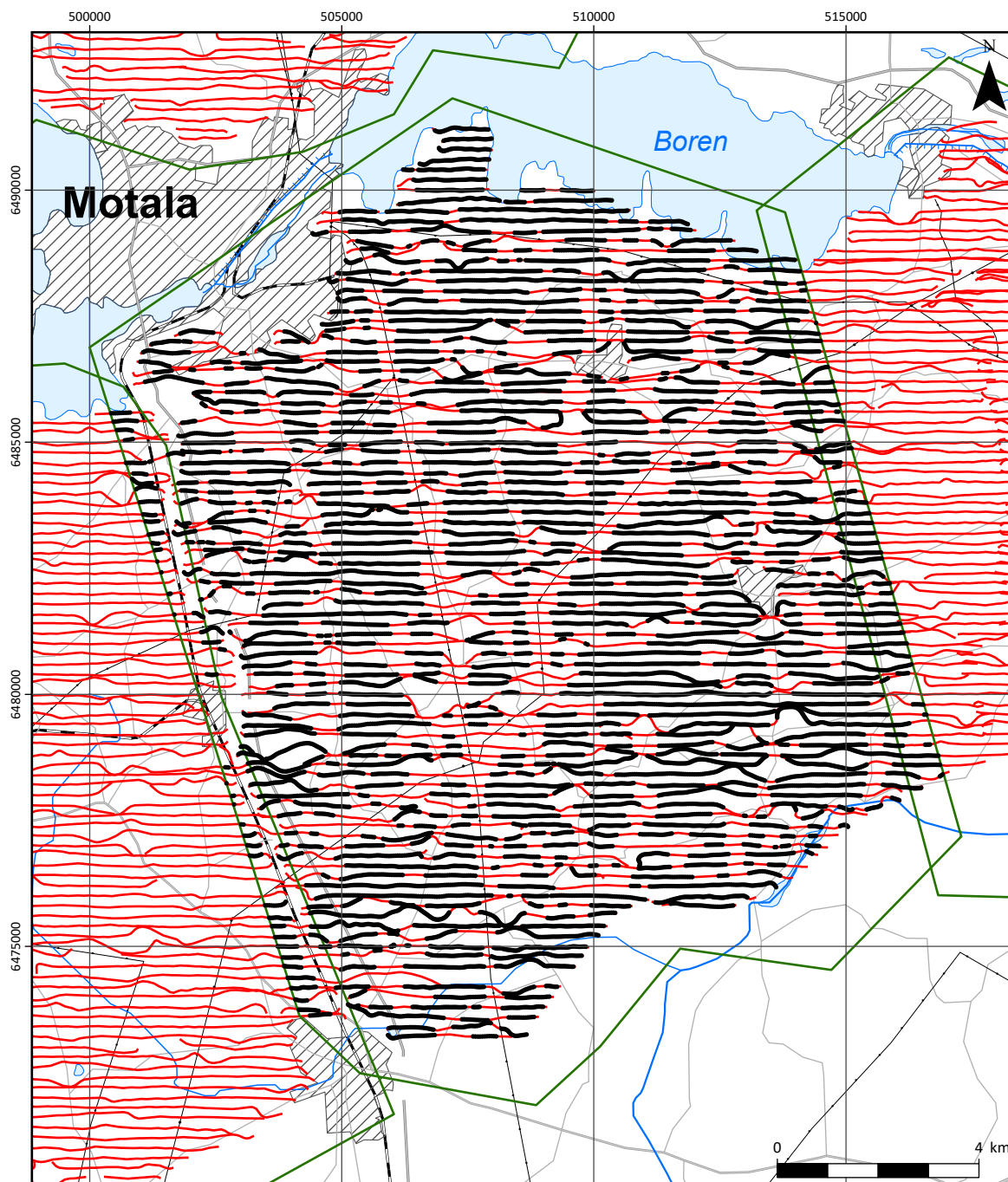
- Delområden
- Flygmättningslinjer
- Resistivitetsmodeller



- Delområden
- Flygmätninglinjer
- Resistivitetsmodeller

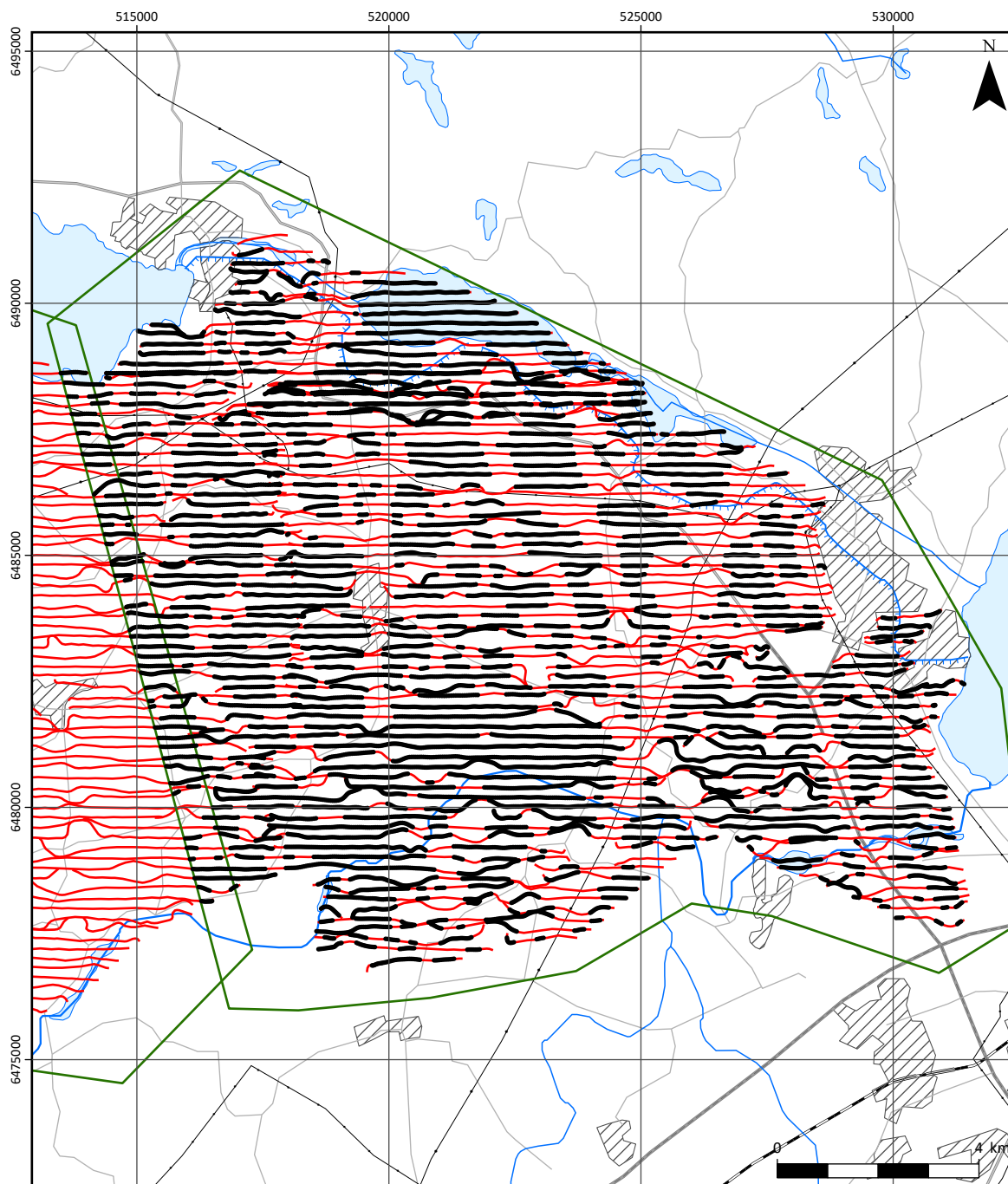


- Delområden
- Flygmätninglinjer
- Resistivitetsmodeller



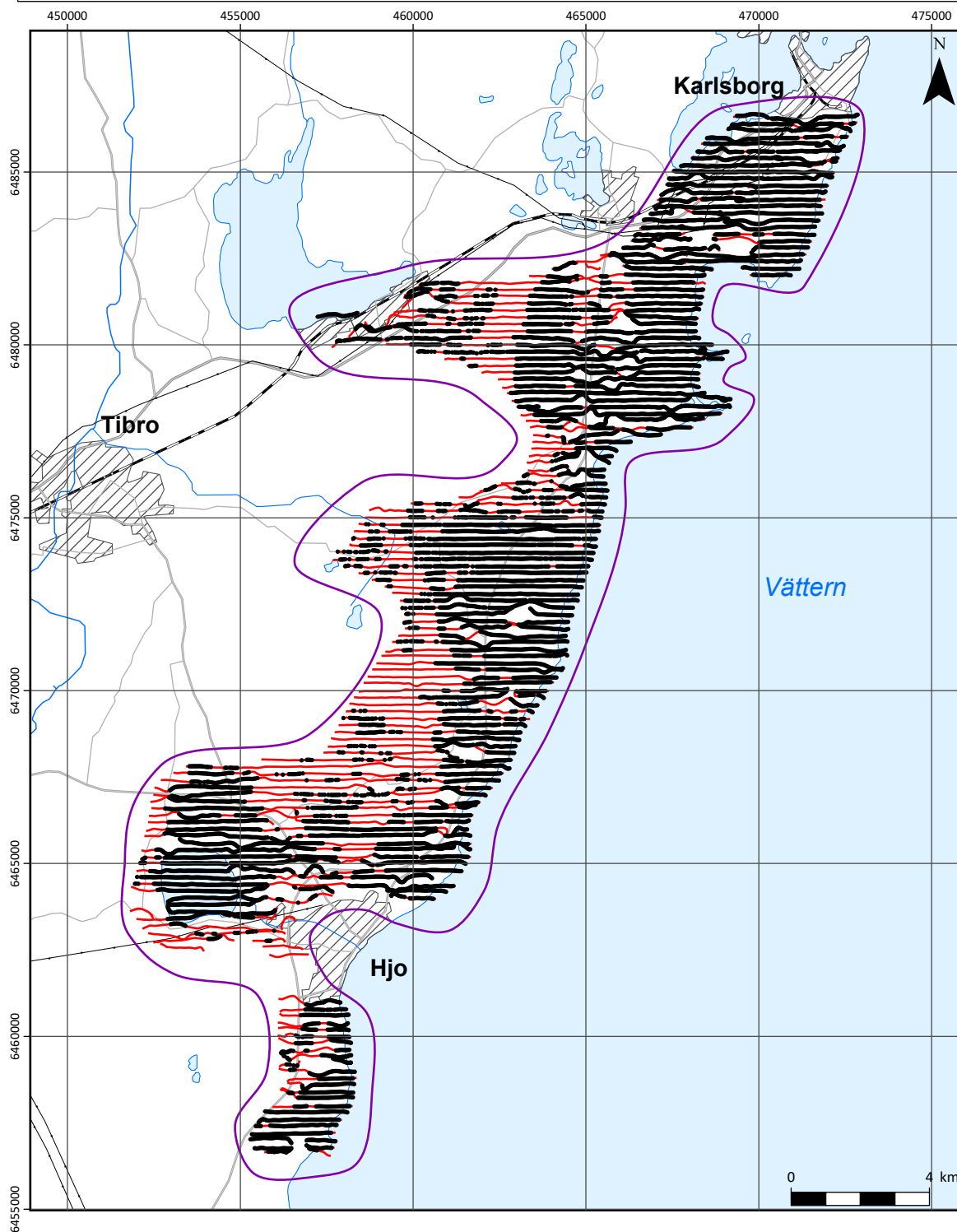
- Delområden
- Flygmätninglinjer
- Resistivitetsmodeller

Bilaga 2.5
Polygon 5
Flyglinjer och resistivitetsmodeller



- Delområden
- Flygmätninglinjer
- Resistivitetsmodeller

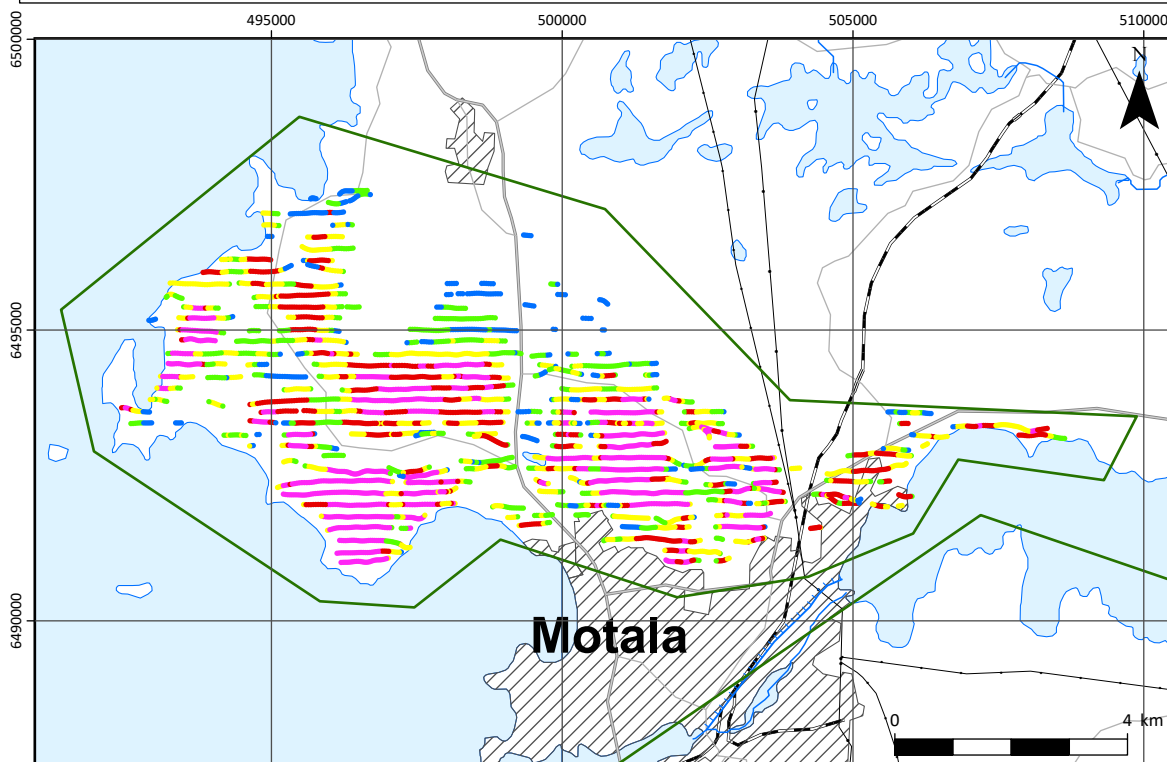
Bilaga 2.6
Västergötland undersökningsområde
Flyglinjer och resistivitetsmodeller



- Flygområde
- Flygmätninglinjer
- Resistivitetsmodeller

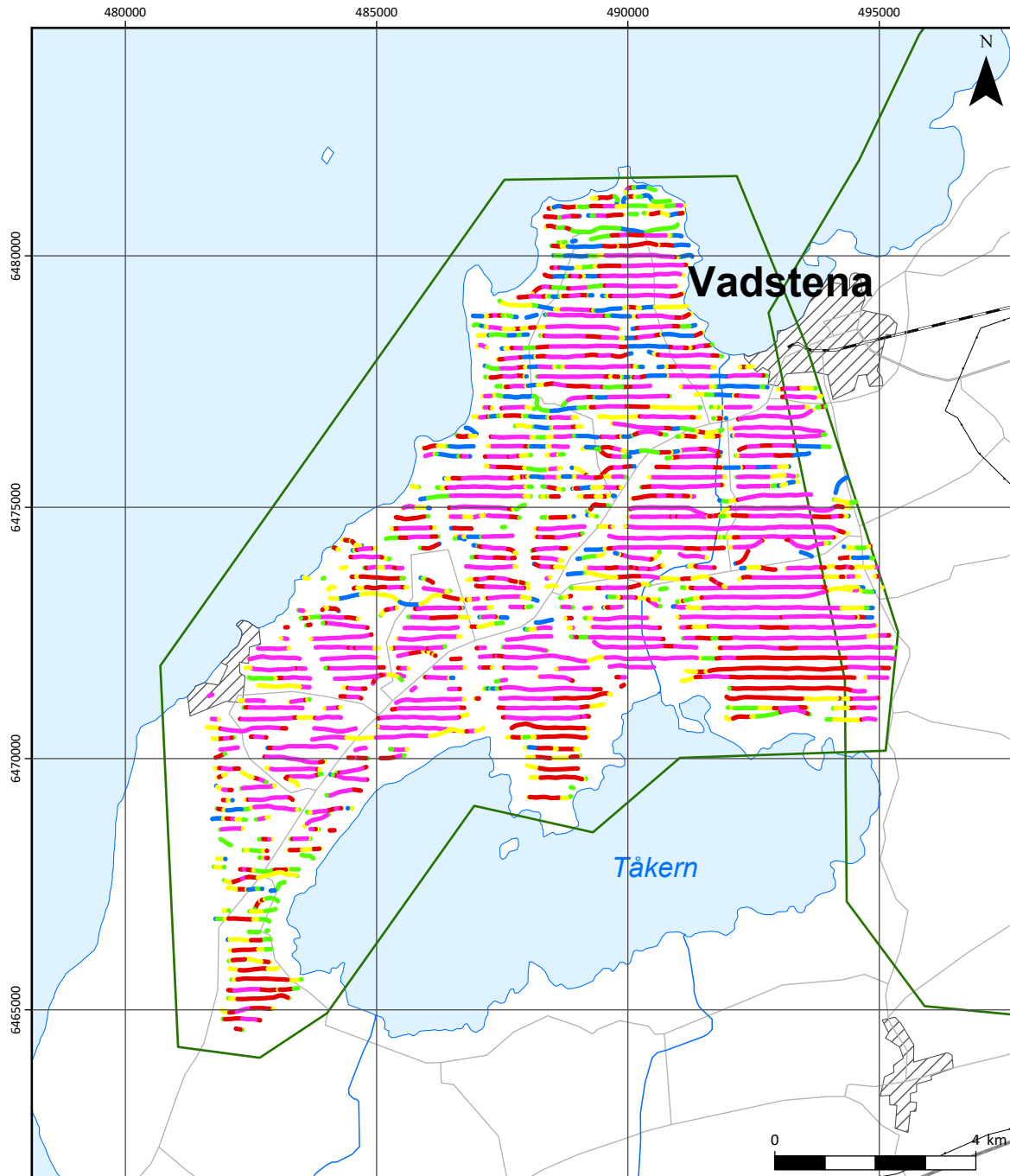
BILAGA 3. ANTAL DATAPUNKTER

Bilaga 3.1
Polygon 1
Antal datapunkter



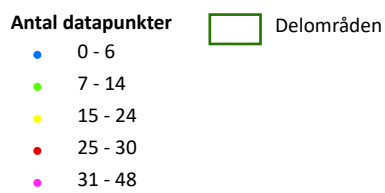
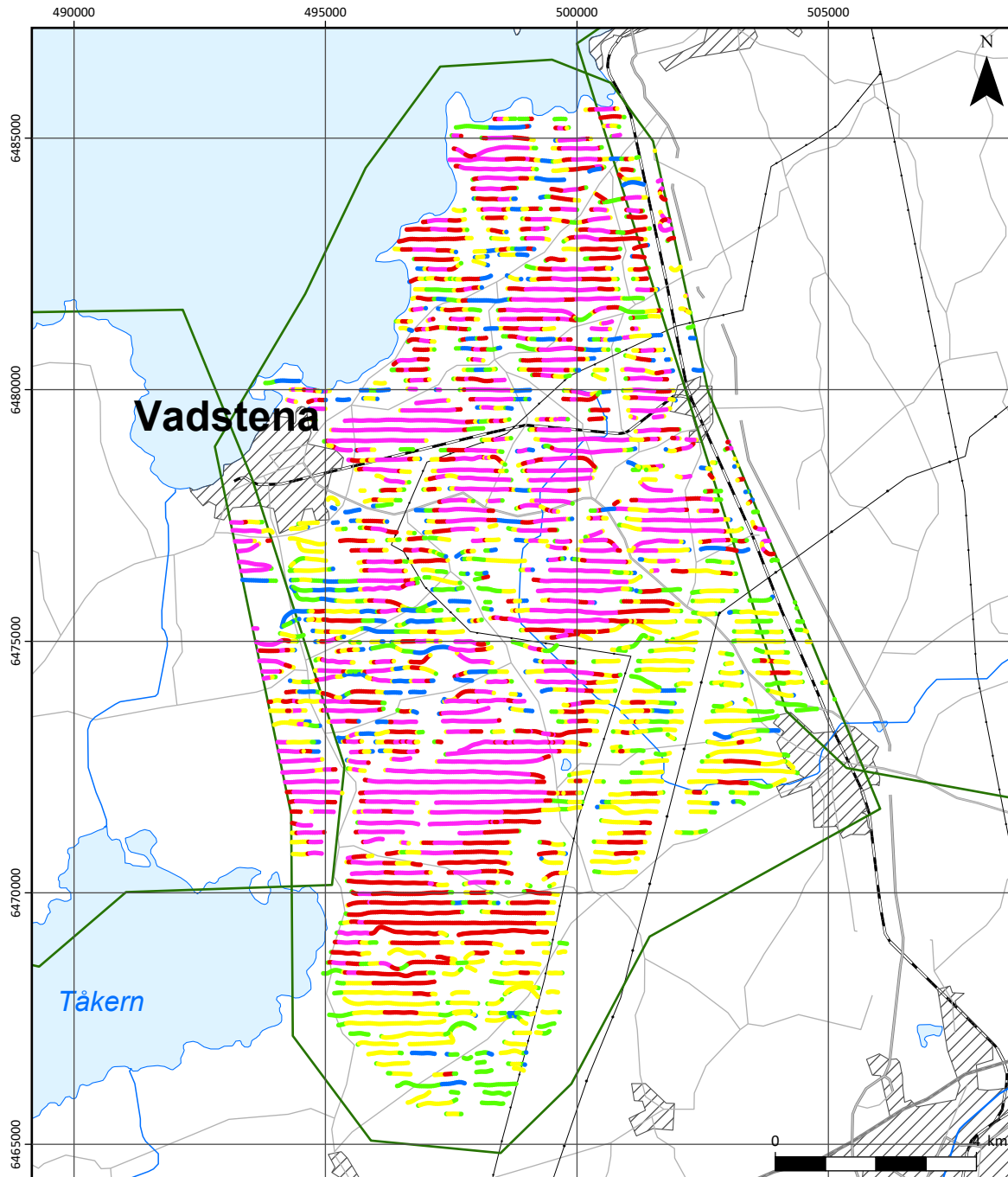
- Antal datapunkter**
- 0 - 6
 - 7 - 14
 - 15 - 24
 - 25 - 30
 - 31 - 48
- Delområden**
-

Bilaga 3.2
Polygon 2
Antal datapunkter

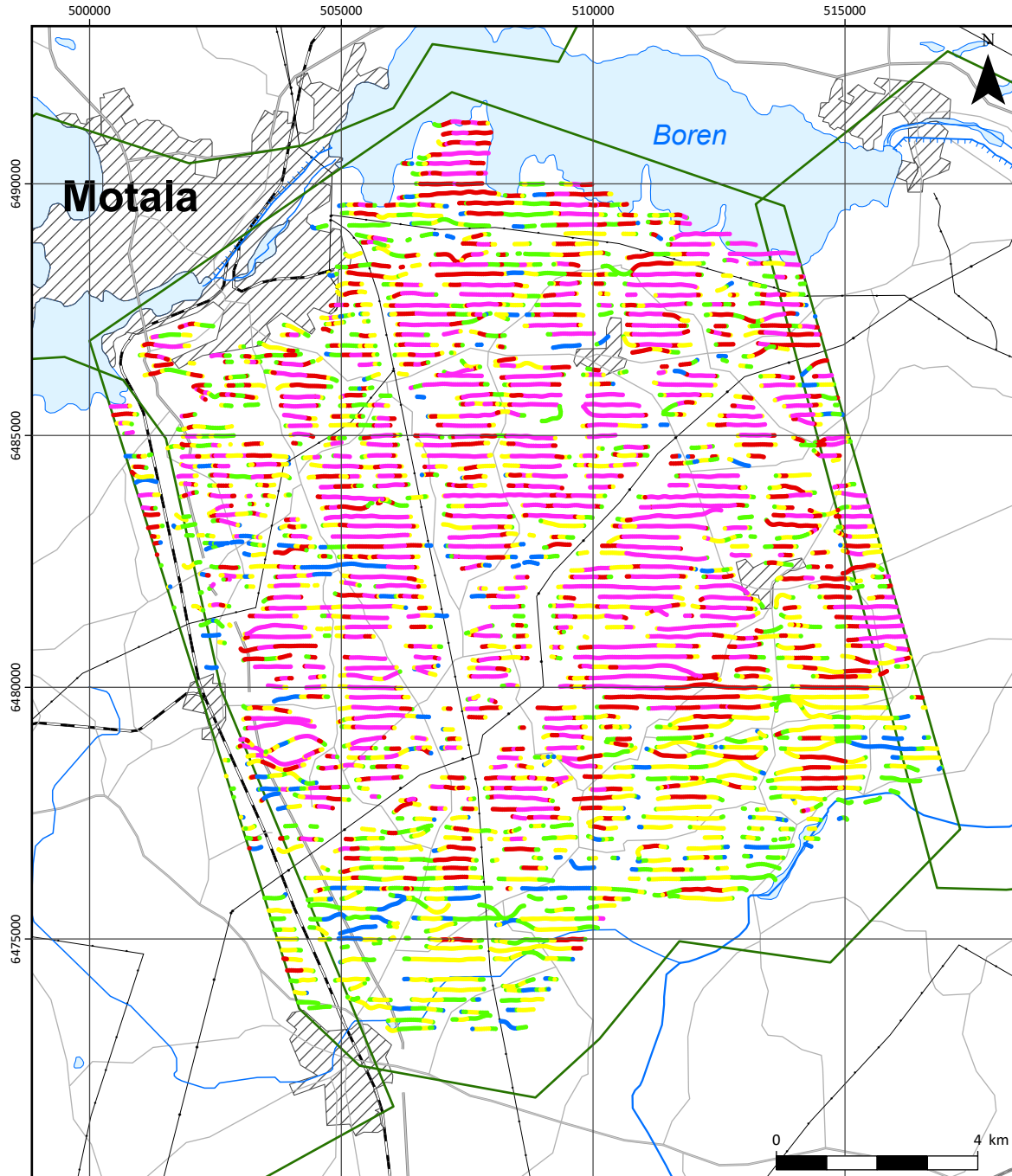



- Antal datapunkter**
- 0 - 6
 - 7 - 14
 - 15 - 24
 - 25 - 30
 - 31 - 48
- Delområden**

Bilaga 3.3
Polygon 3
Antal datapunkter

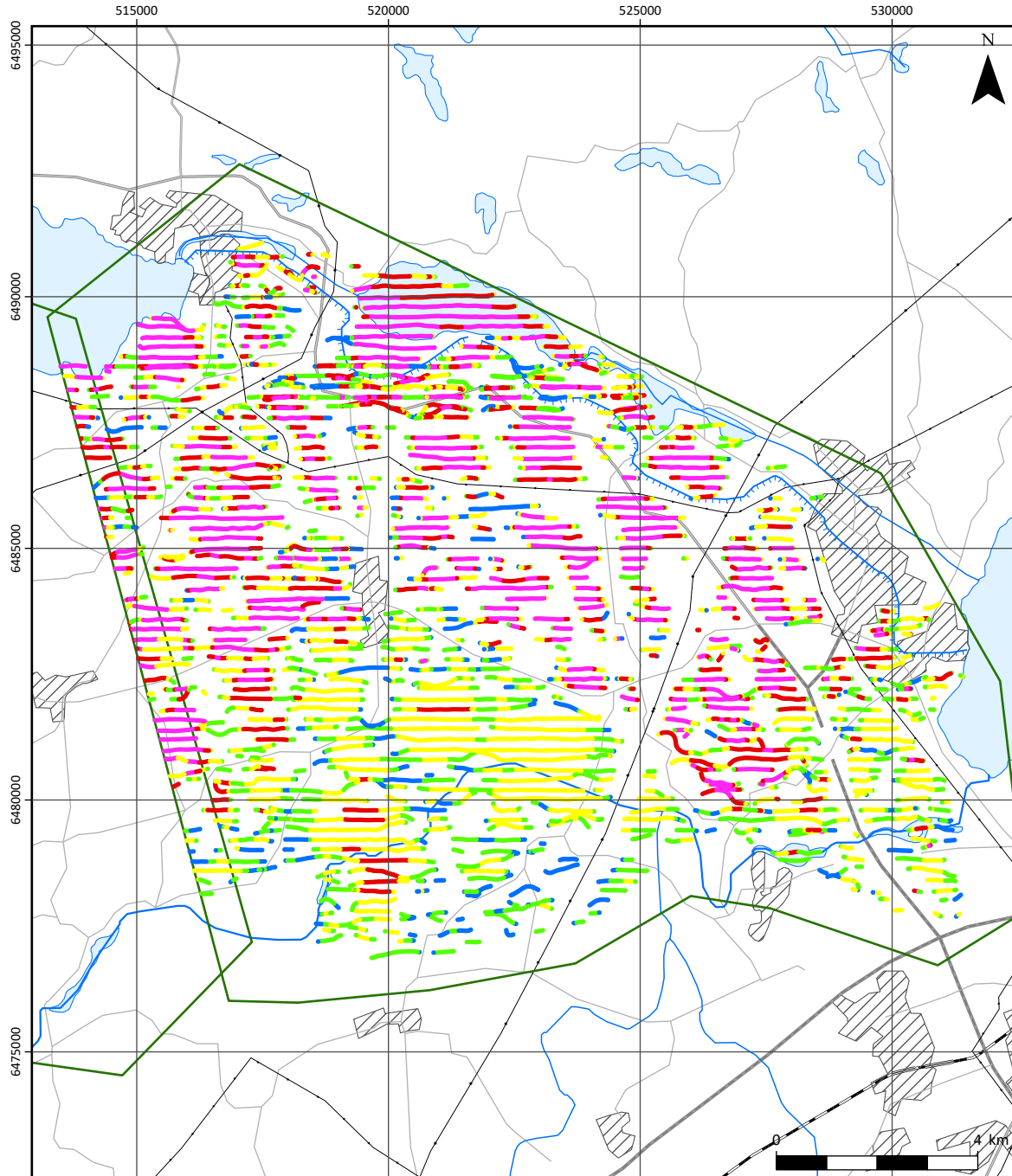


Bilaga 3.4
Polygon 4
Antal datapunkter



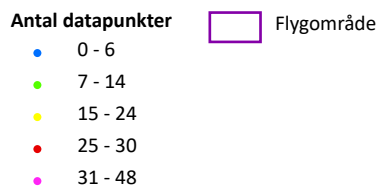
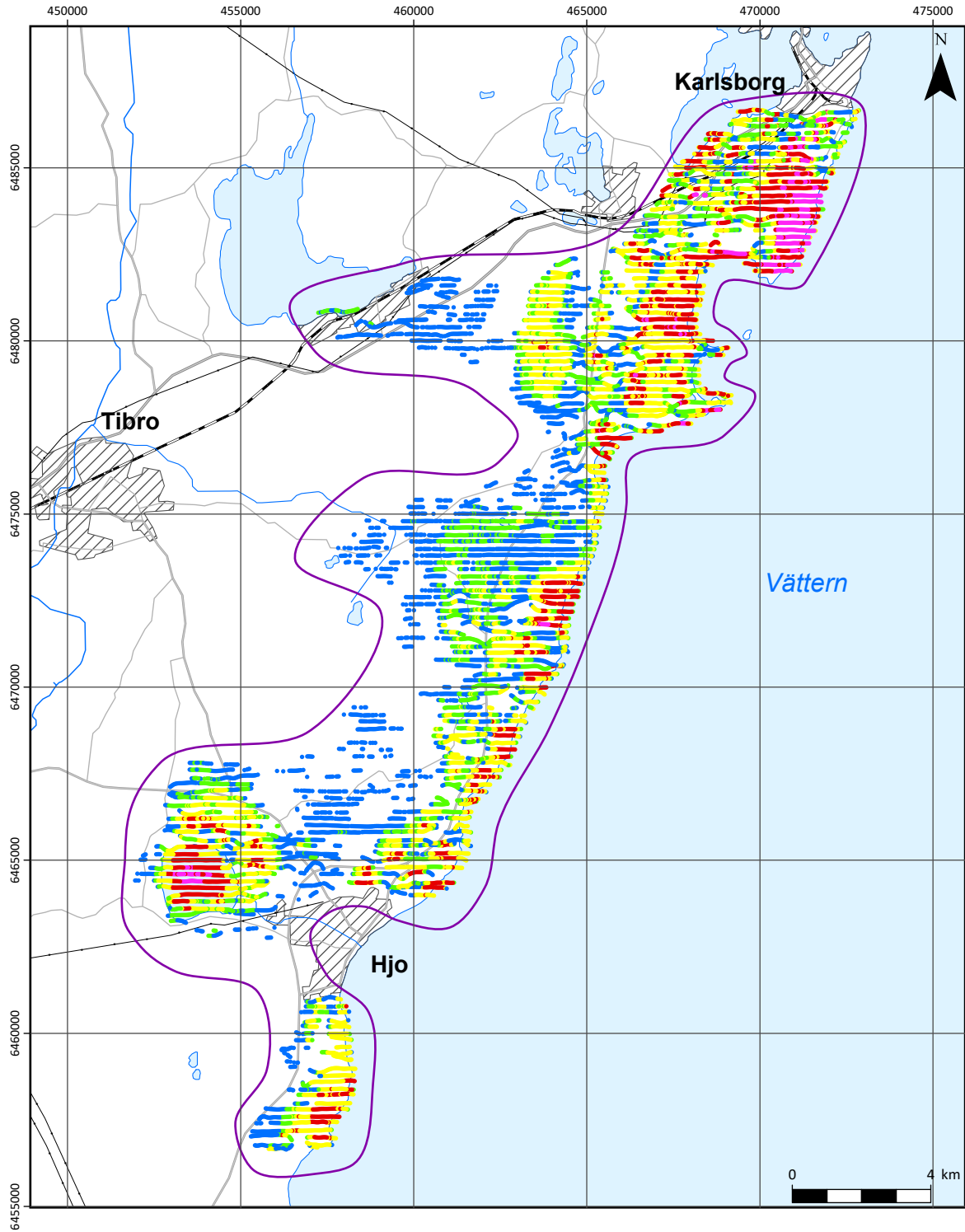
- Antal datapunkter**
- 0 - 6
 - 7 - 14
 - 15 - 24
 - 25 - 30
 - 31 - 48
-  Delområden

Bilaga 3.5
Polygon 5
Antal datapunkter



- Antal datapunkter**
- 0 - 6
 - 7 - 14
 - 15 - 24
 - 25 - 30
 - 31 - 48
- Delområden**

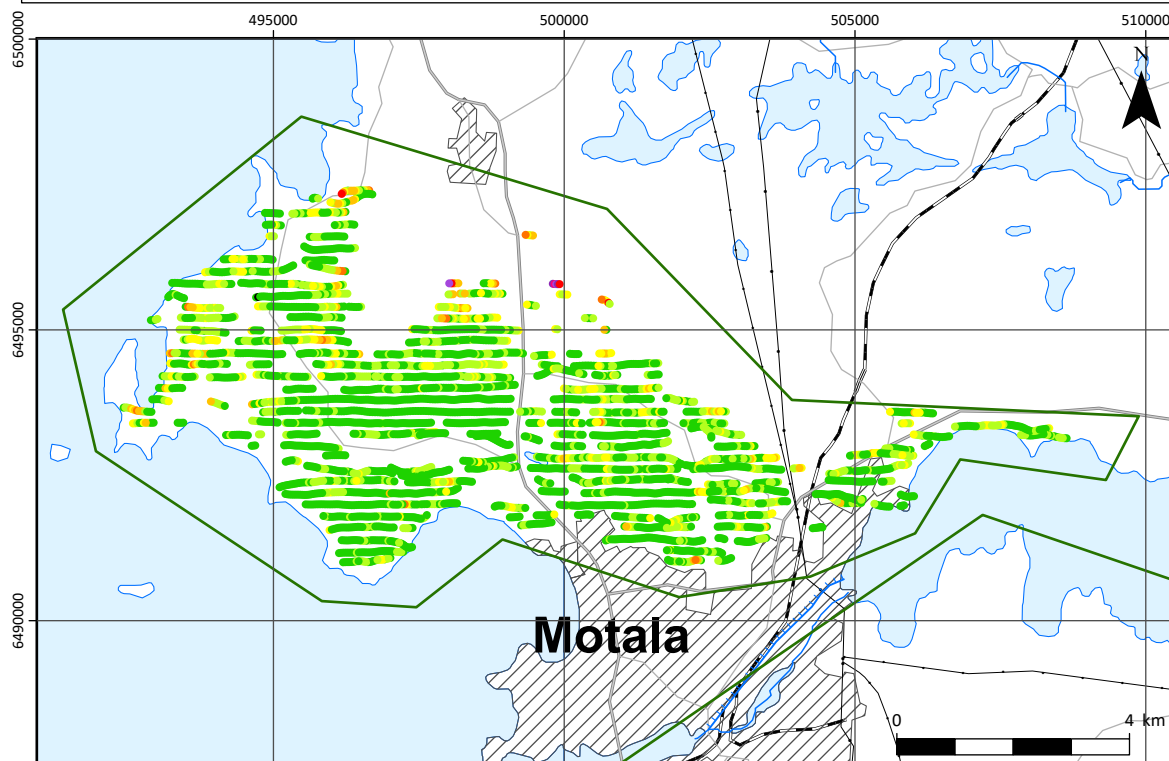
Bilaga 3.6
Västergötland undersökningsområde
Antal datapunkter



BILAGA 4. RESIDUAL

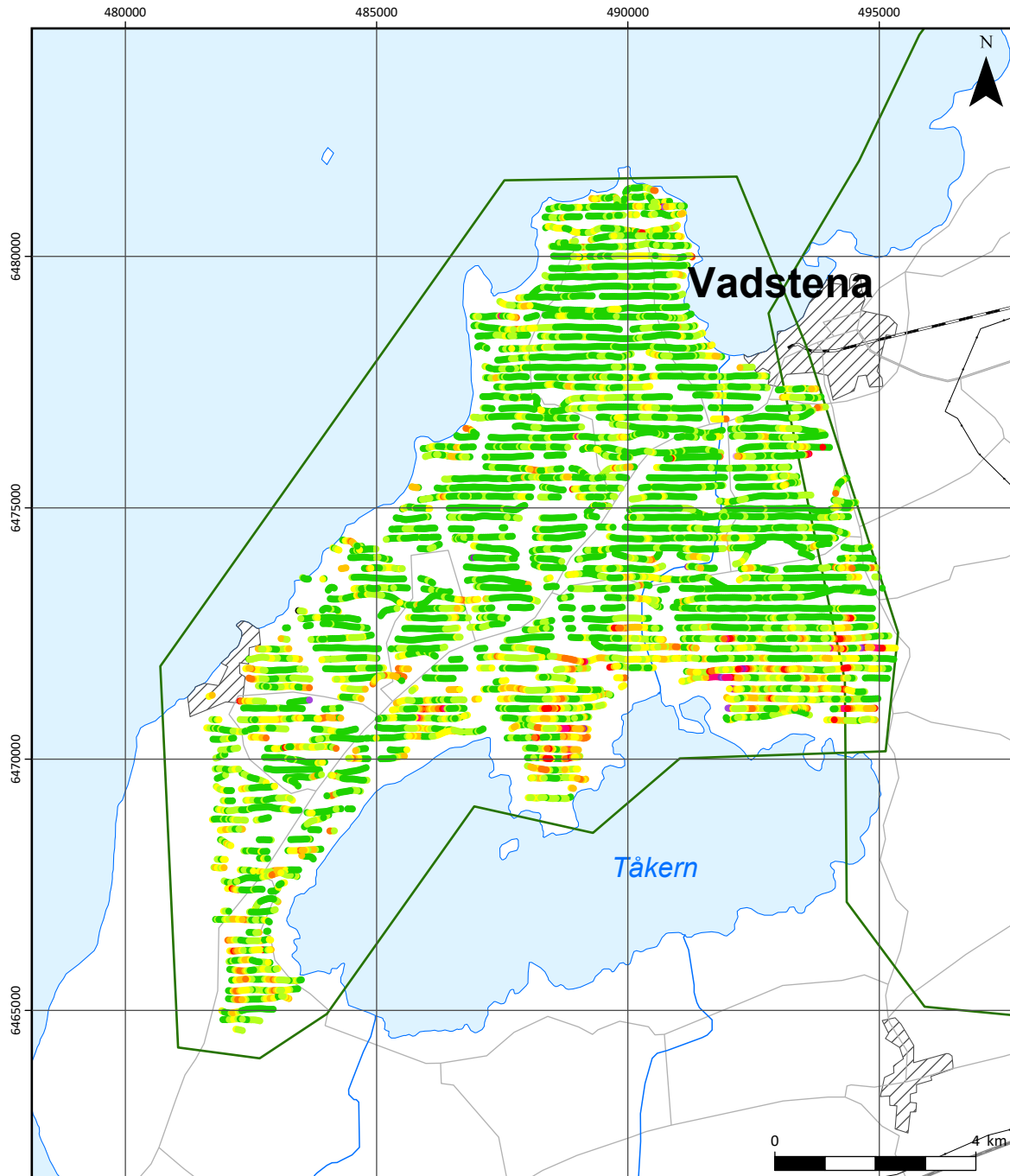
Bilaga 4.1
Polygon 1
Residual

SGU Sveriges
geologiska
undersökning



Residual

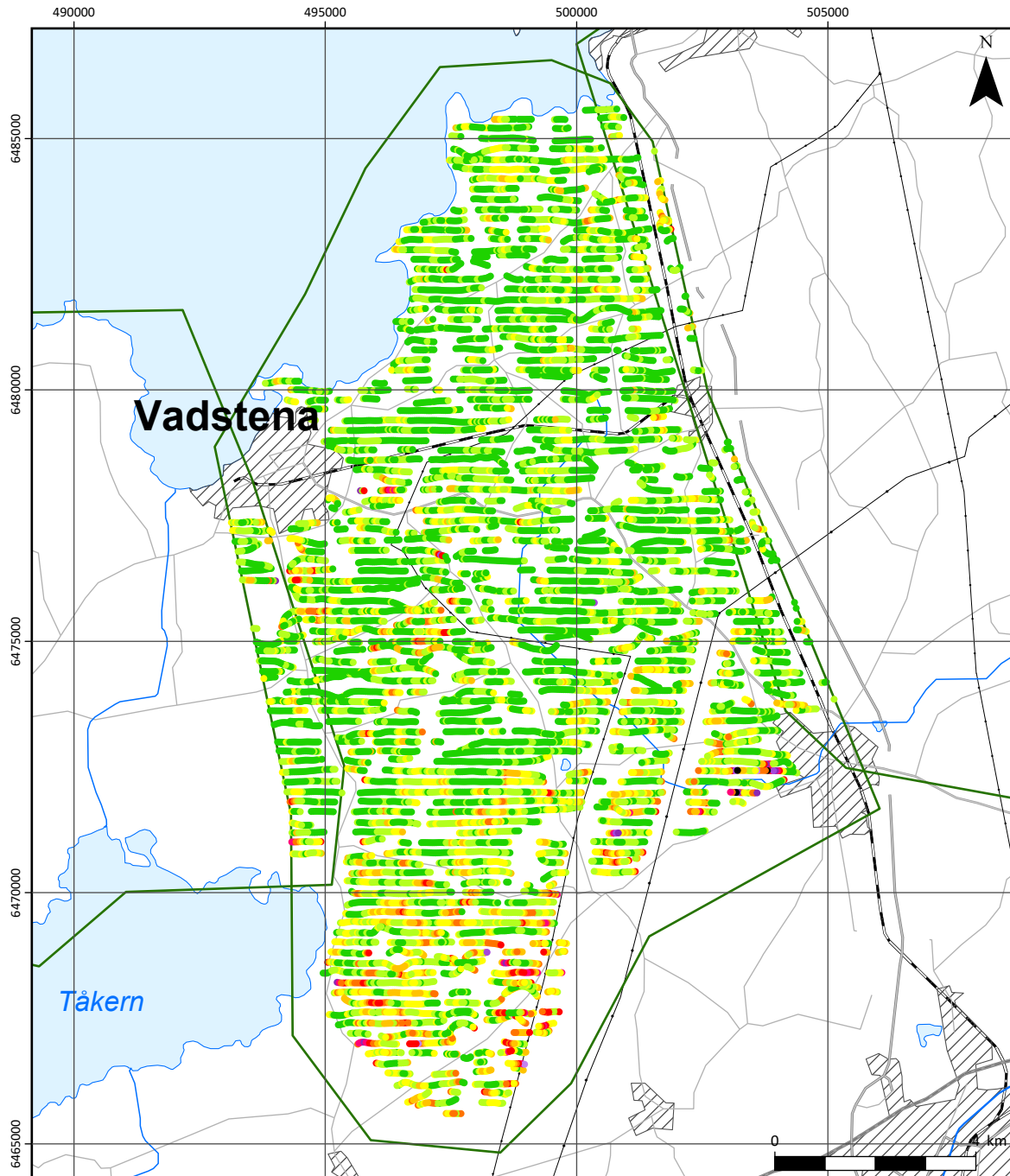
- ≤ 0,6
 - ≤ 0,8
 - ≤ 1,0
 - ≤ 1,2
 - ≤ 1,4
 - ≤ 1,6
 - ≤ 1,8
 - ≤ 2,0
 - ≤ 2,5
 - ≤ 3,5
 - > 3,5
- Delområden



Residual

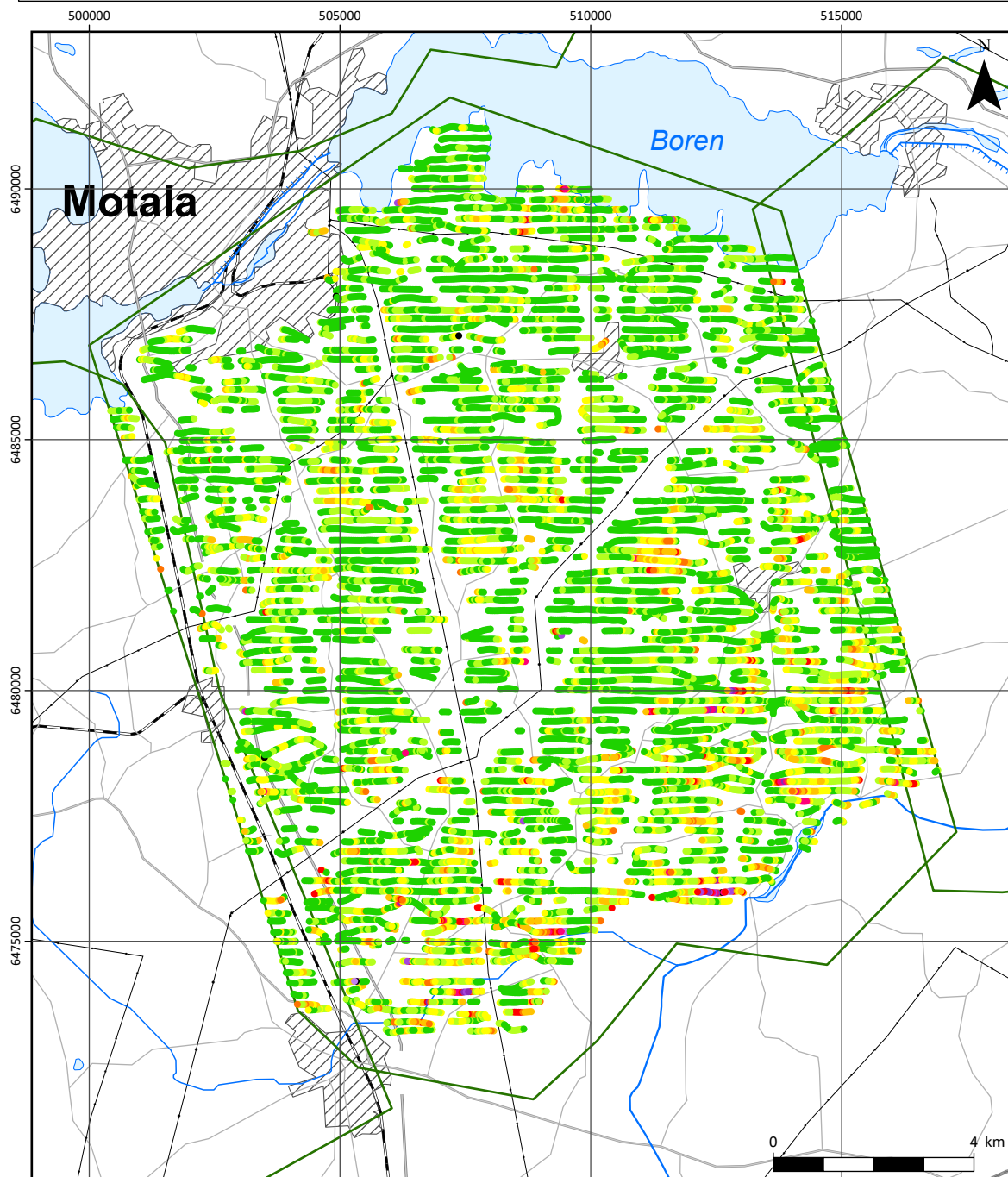
- ≤ 0,6
 - ≤ 0,8
 - ≤ 1,0
 - ≤ 1,2
 - ≤ 1,4
 - ≤ 1,6
 - ≤ 1,8
 - ≤ 2,0
 - ≤ 2,5
 - ≤ 3,5
 - > 3,5
- Delområden

Bilaga 4.3
Polygon 3
Residual



Residual

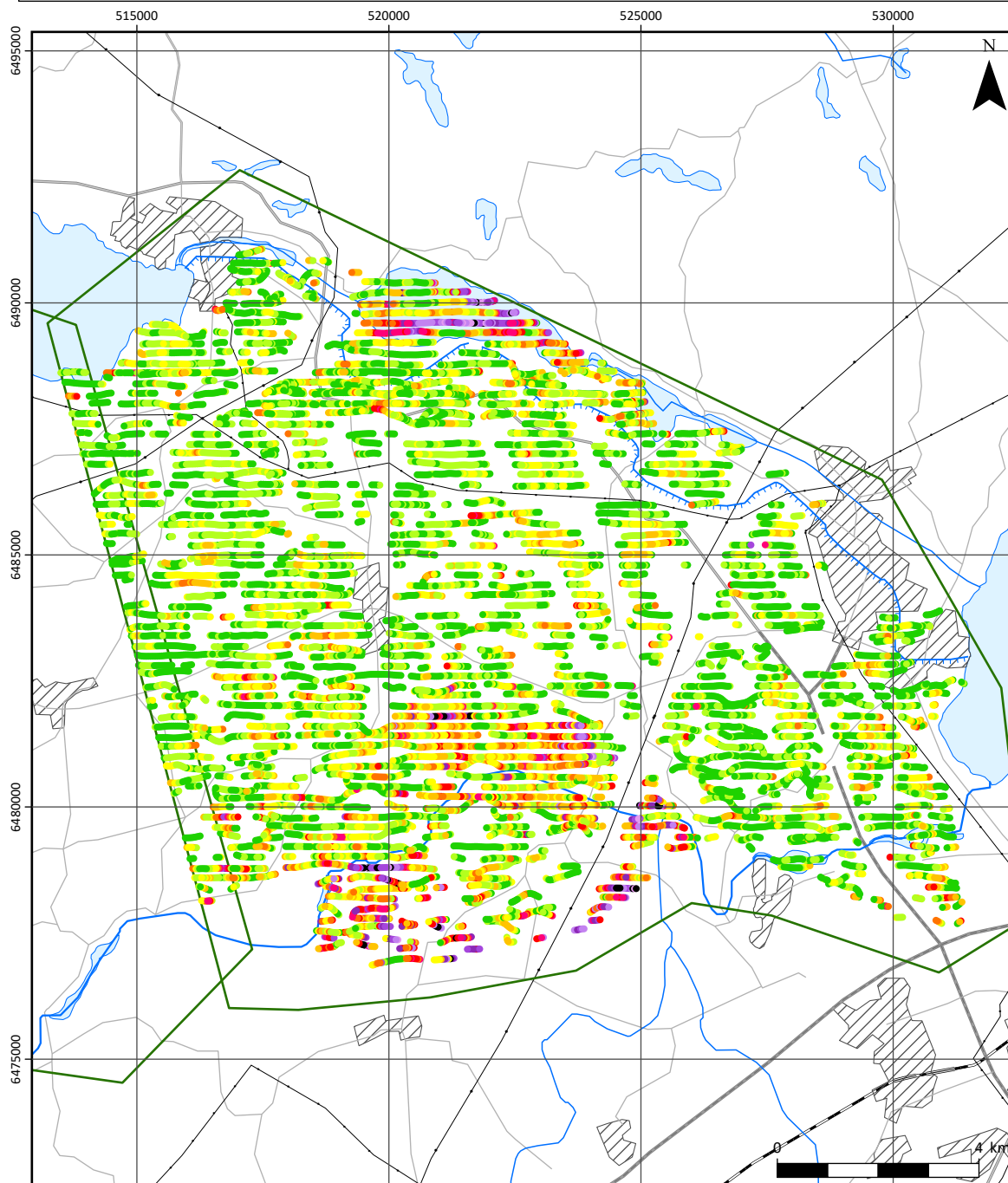
- ≤ 0,6
 - ≤ 0,8
 - ≤ 1,0
 - ≤ 1,2
 - ≤ 1,4
 - ≤ 1,6
 - ≤ 1,8
 - ≤ 2,0
 - ≤ 2,5
 - ≤ 3,5
 - > 3,5
- Delområden



Residual

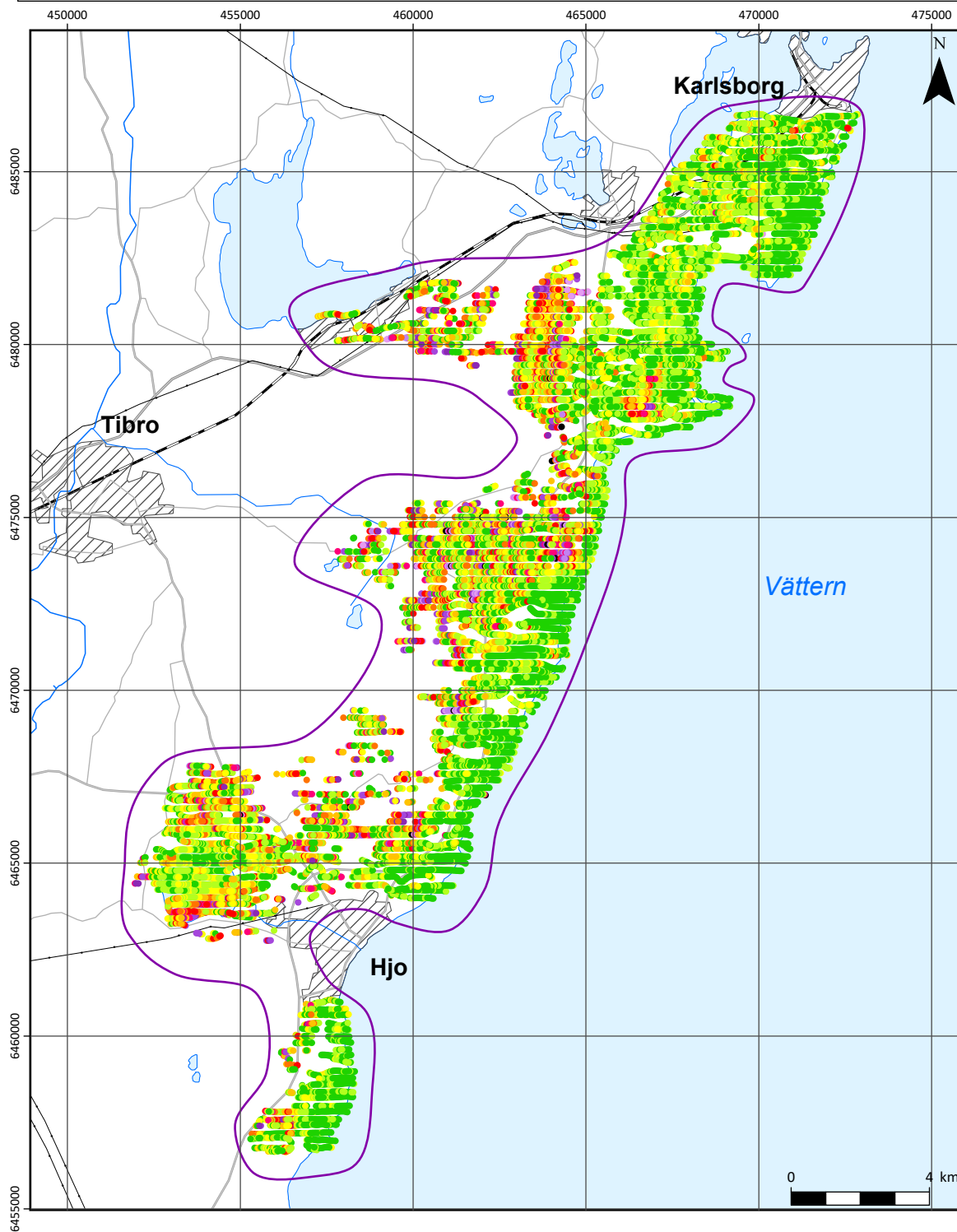
- ≤ 0,6
 - ≤ 0,8
 - ≤ 1,0
 - ≤ 1,2
 - ≤ 1,4
 - ≤ 1,6
 - ≤ 1,8
 - ≤ 2,0
 - ≤ 2,5
 - ≤ 3,5
 - > 3,5
- Delområden

Bilaga 4.5
Polygon 5
Residual

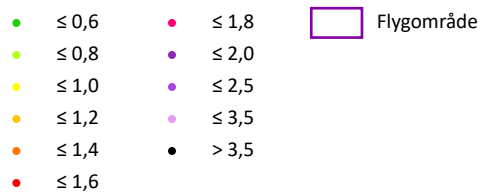


Residual

- ≤ 0,6
 - ≤ 0,8
 - ≤ 1,0
 - ≤ 1,2
 - ≤ 1,4
 - ≤ 1,6
 - ≤ 1,8
 - ≤ 2,0
 - ≤ 2,5
 - ≤ 3,5
 - > 3,5
- Delområden



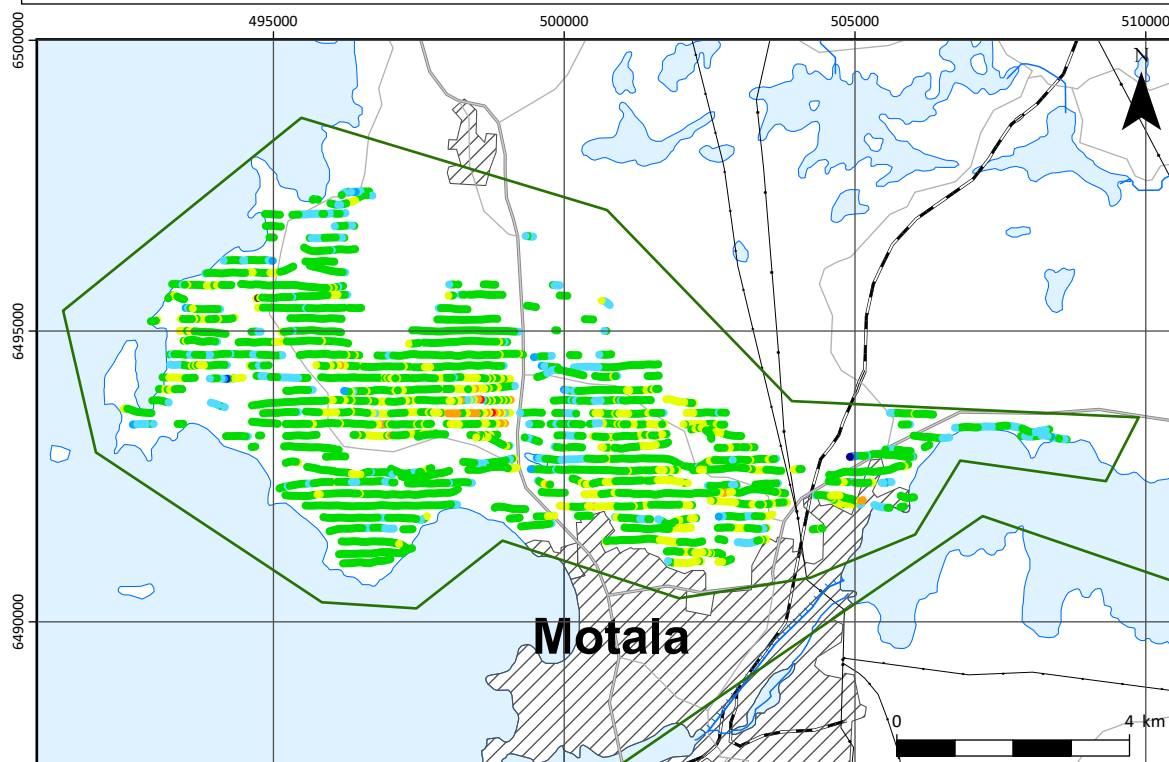
Residual



BILAGA 5. SKILLNAD I FLYGHÖJD

Bilaga 5.1
Polygon 1
Skillnad i flyghöjd

SGU Sveriges
geologiska
undersökning

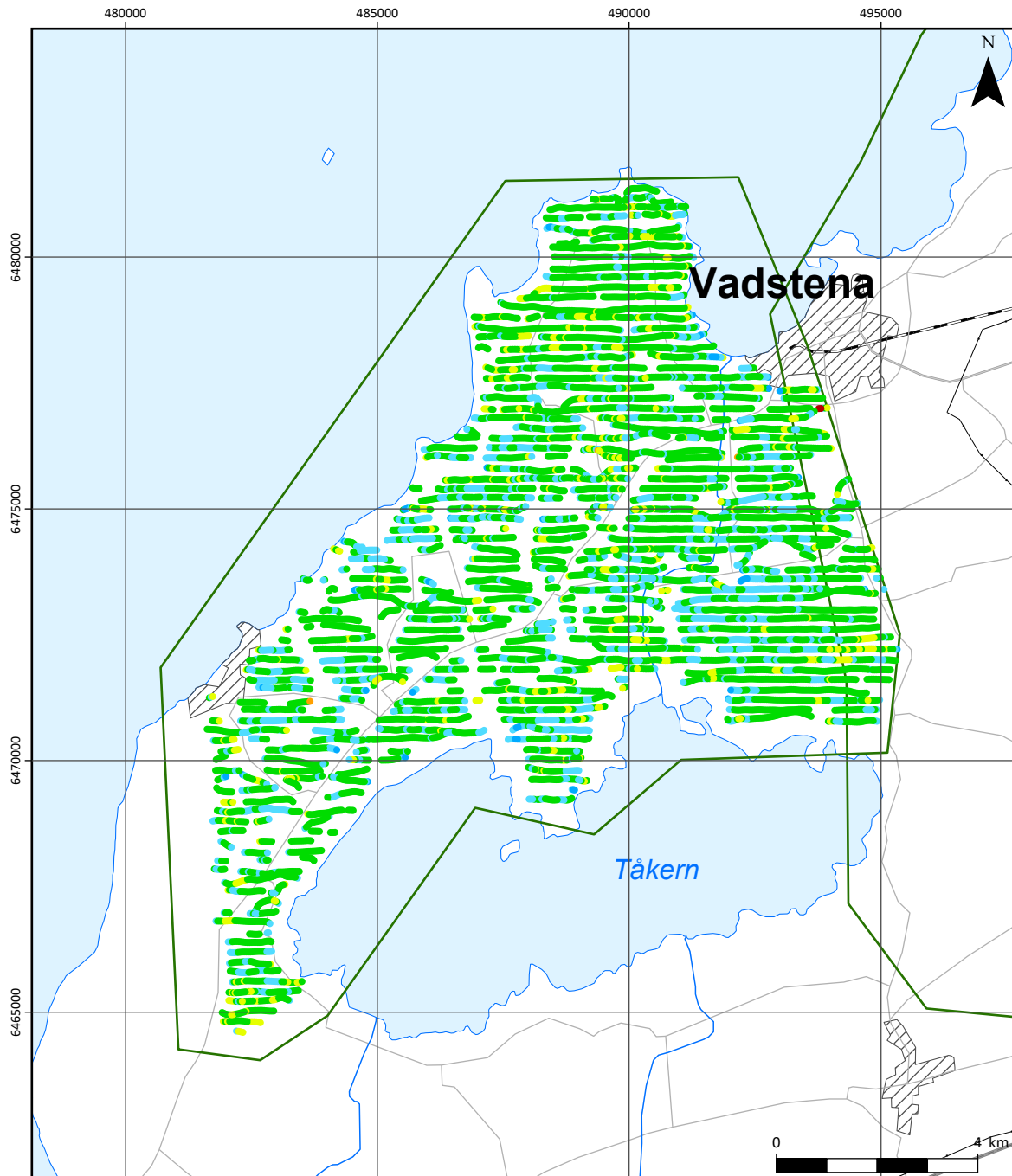


Skillnad i flyghöjd (m)

- $\leq -15,0$
- $\leq -10,0$
- $\leq -6,0$
- $\leq -2,5$
- $\leq -0,5$
- $\leq 0,5$
- $\leq 2,0$
- $\leq 6,0$
- $\leq 10,0$
- $\leq 15,0$
- $> 15,0$

Delområden

Bilaga 5.2
Polygon 2
Skillnad i flyghöjd

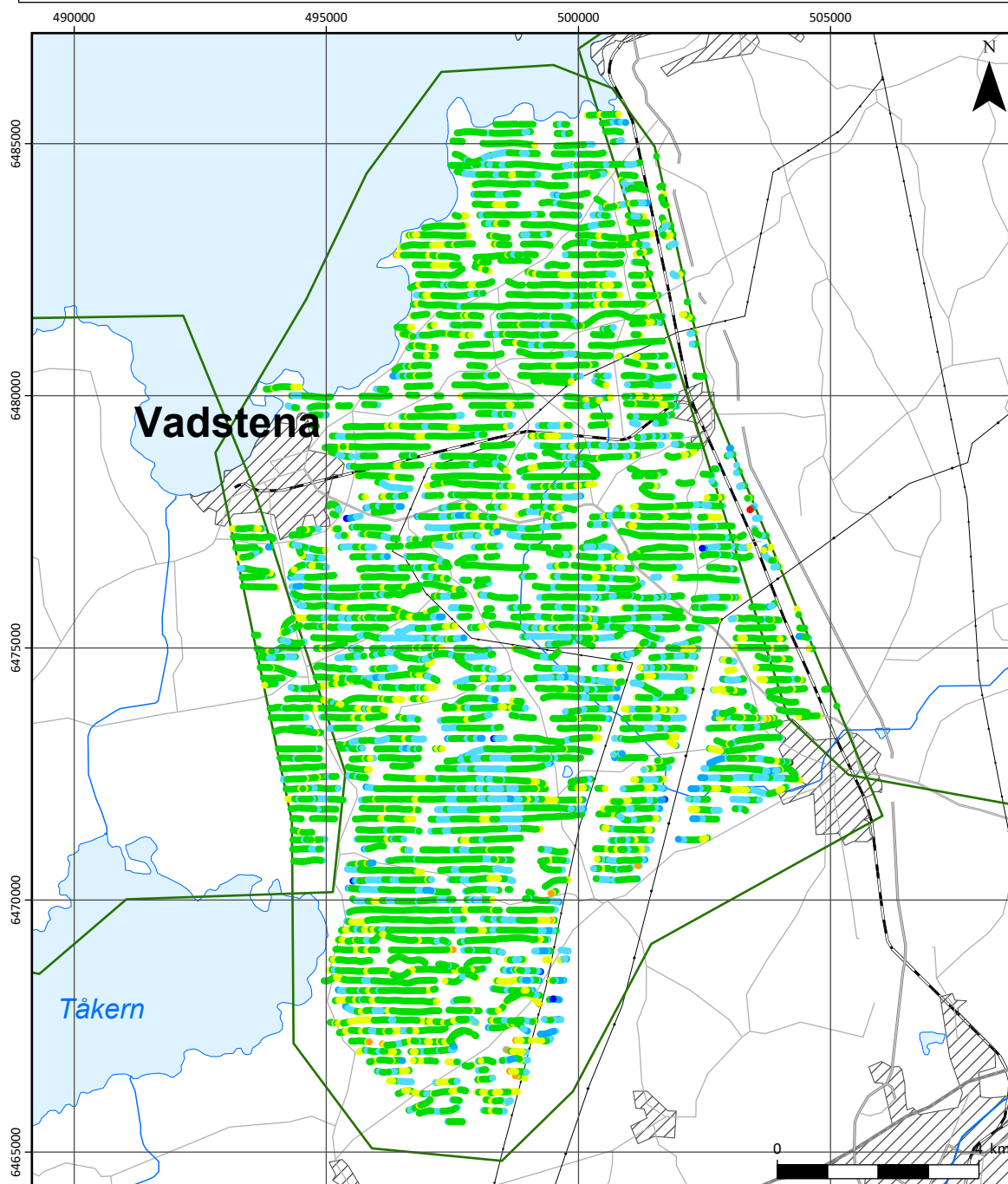


Skillnad i flyghöjd (m)

- ≤ -15,0
- ≤ -10,0
- ≤ -6,0
- ≤ -2,5
- ≤ -0,5
- ≤ 0,5
- ≤ 2,0
- ≤ 6,0
- ≤ 10,0
- ≤ 15,0
- > 15,0

 Delområden

Bilaga 5.3
Polygon 3
Skillnad i flyghöjd

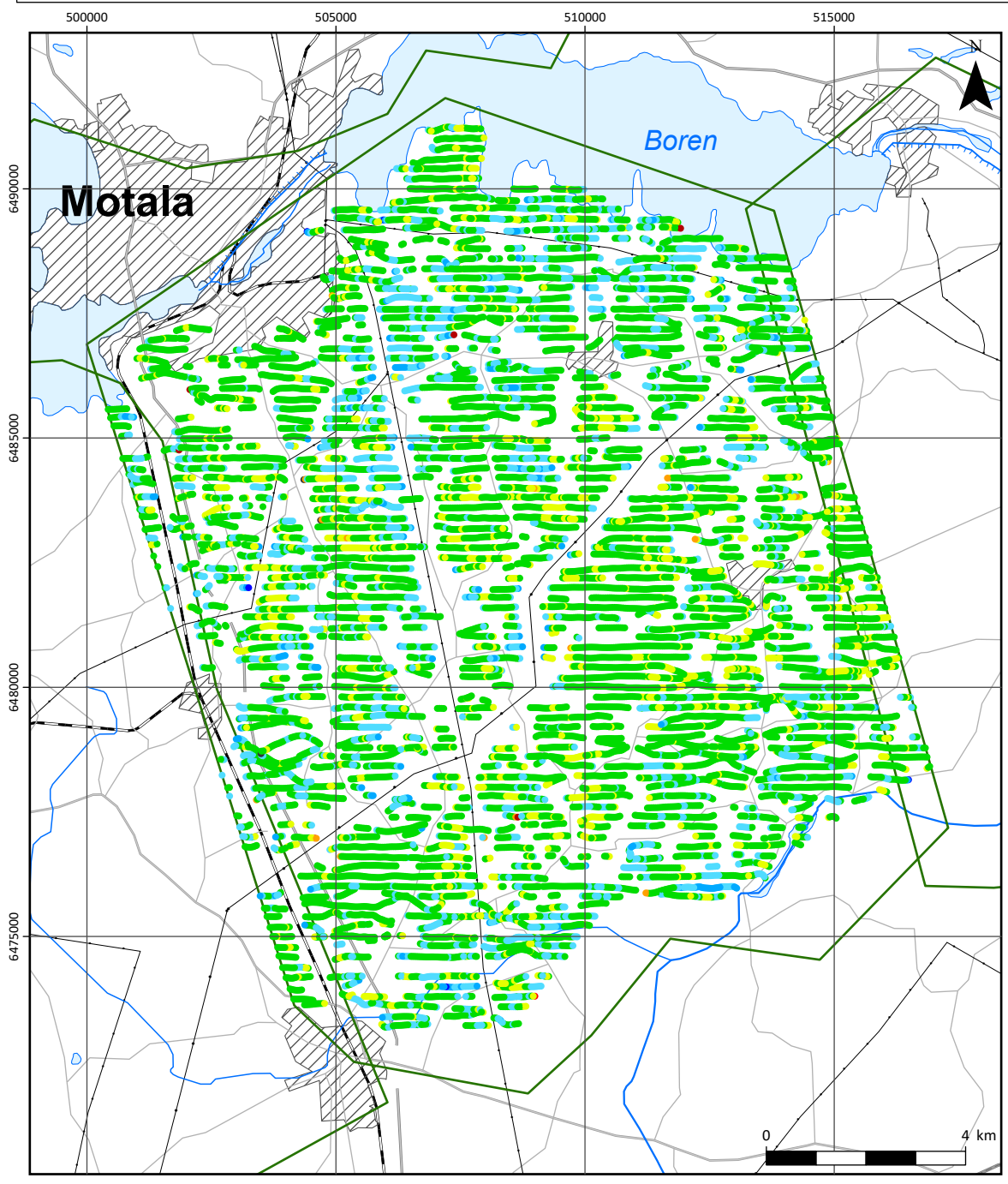


Skillnad i flyghöjd (m)

- ≤ -15,0
- ≤ -10,0
- ≤ -6,0
- ≤ -2,5
- ≤ -0,5
- ≤ 0,5
- ≤ 2,0
- ≤ 6,0
- ≤ 10,0
- ≤ 15,0
- > 15,0

 Delområden

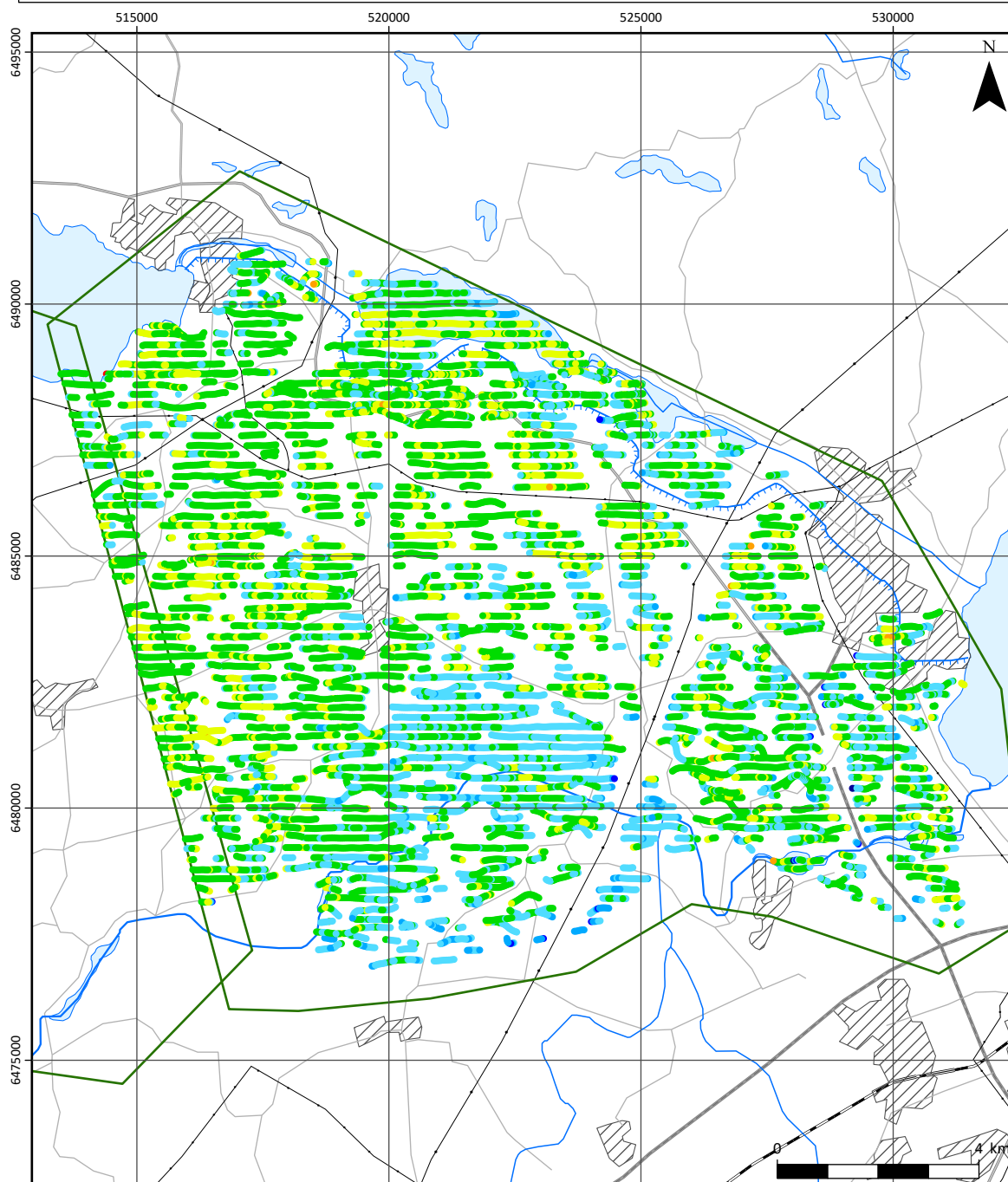
Bilaga 5.4
Polygon 4
Skillnad i flyghöjd



Skillnad i flyghöjd (m)

- ≤ -15,0
 - ≤ -10,0
 - ≤ -6,0
 - ≤ -2,5
 - ≤ -0,5
 - ≤ 0,5
 - ≤ 2,0
 - ≤ 6,0
 - ≤ 10,0
 - ≤ 15,0
 - > 15,0
- Delområden

Bilaga 5.5
Polygon 5
Skillnad i flyghöjd

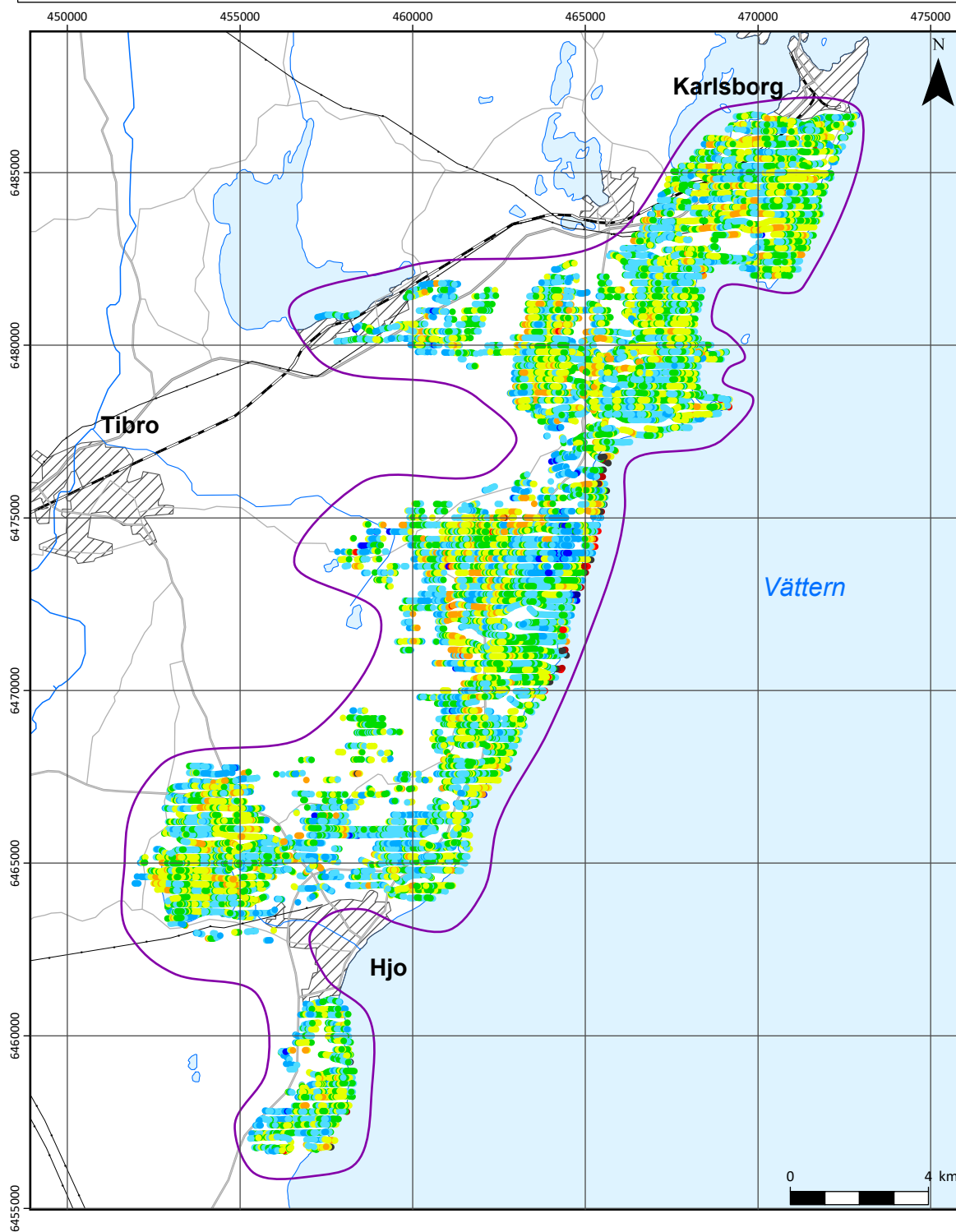


Skillnad i flyghöjd (m)

- ≤ -15,0
- ≤ -10,0
- ≤ -6,0
- ≤ -2,5
- ≤ -0,5
- ≤ 0,5
- ≤ 2,0
- ≤ 6,0
- ≤ 10,0
- ≤ 15,0
- > 15,0

 Delområden

Bilaga 5.6
Västergötland undersökningsområde
Skillnad i flyghöjd



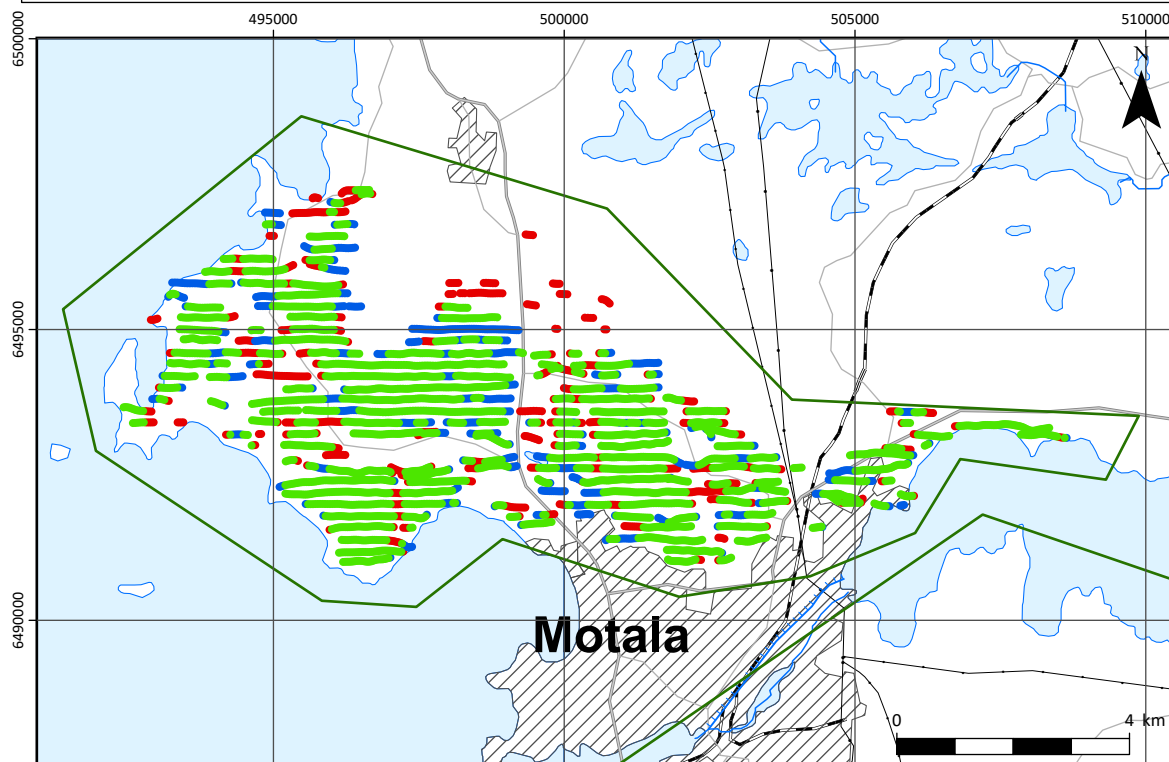
Skillnad i flyghöjd (m)

- | | | |
|-----------|----------|--------------|
| • ≤ -15,0 | • ≤ 2,0 | □ Flygområde |
| • ≤ -10,0 | • ≤ 6,0 | |
| • ≤ -6,0 | • ≤ 10,0 | |
| • ≤ -2,5 | • ≤ 15,0 | |
| • ≤ -0,5 | • > 15,0 | |
| • ≤ 0,5 | | |

BILAGA 6. KANALER

Bilaga 6.1
Polygon 1
Kanaler

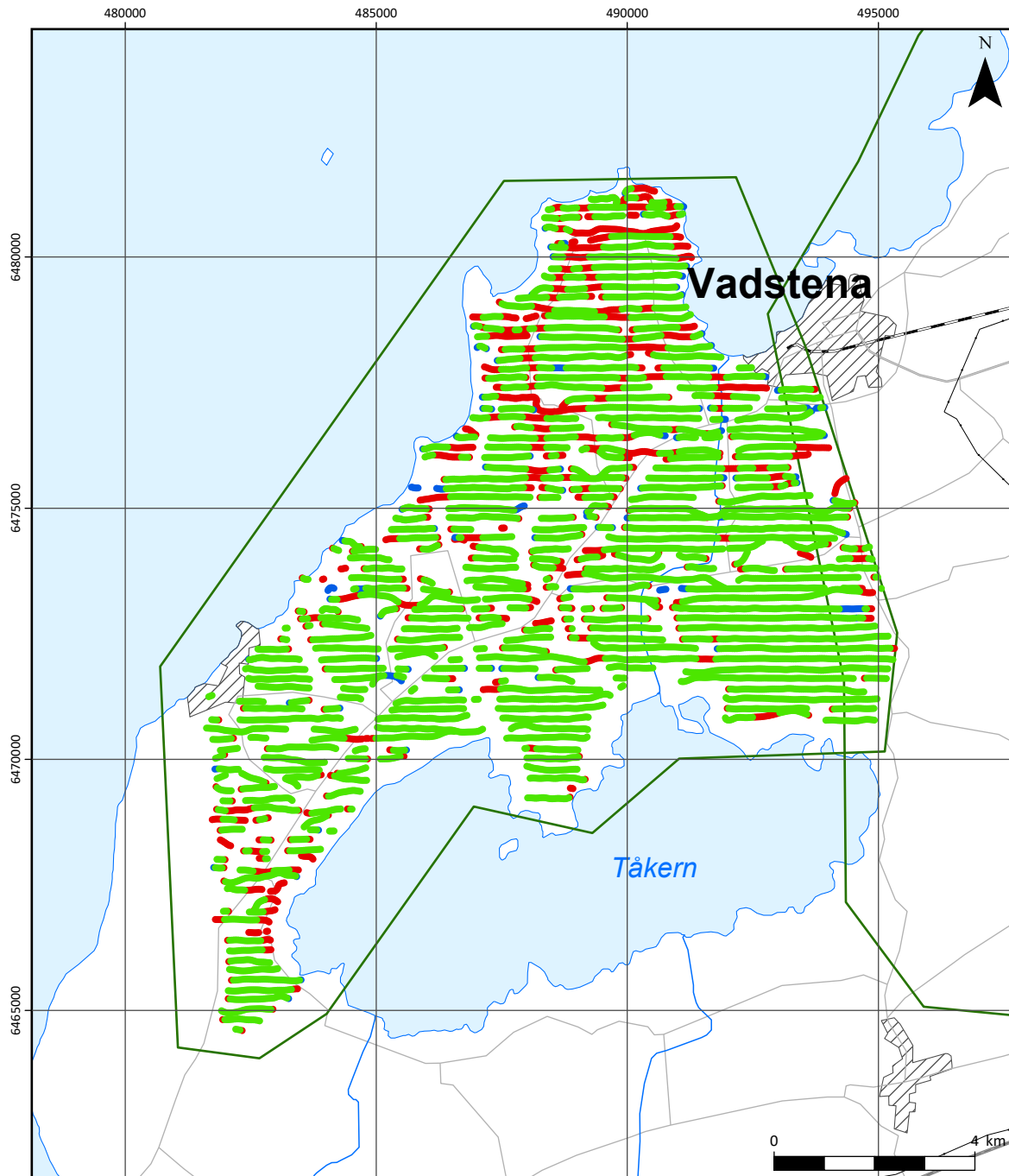
SGU Sveriges
geologiska
undersökning



Kanaler (channel number)

- LM
- HM
- LM & HM

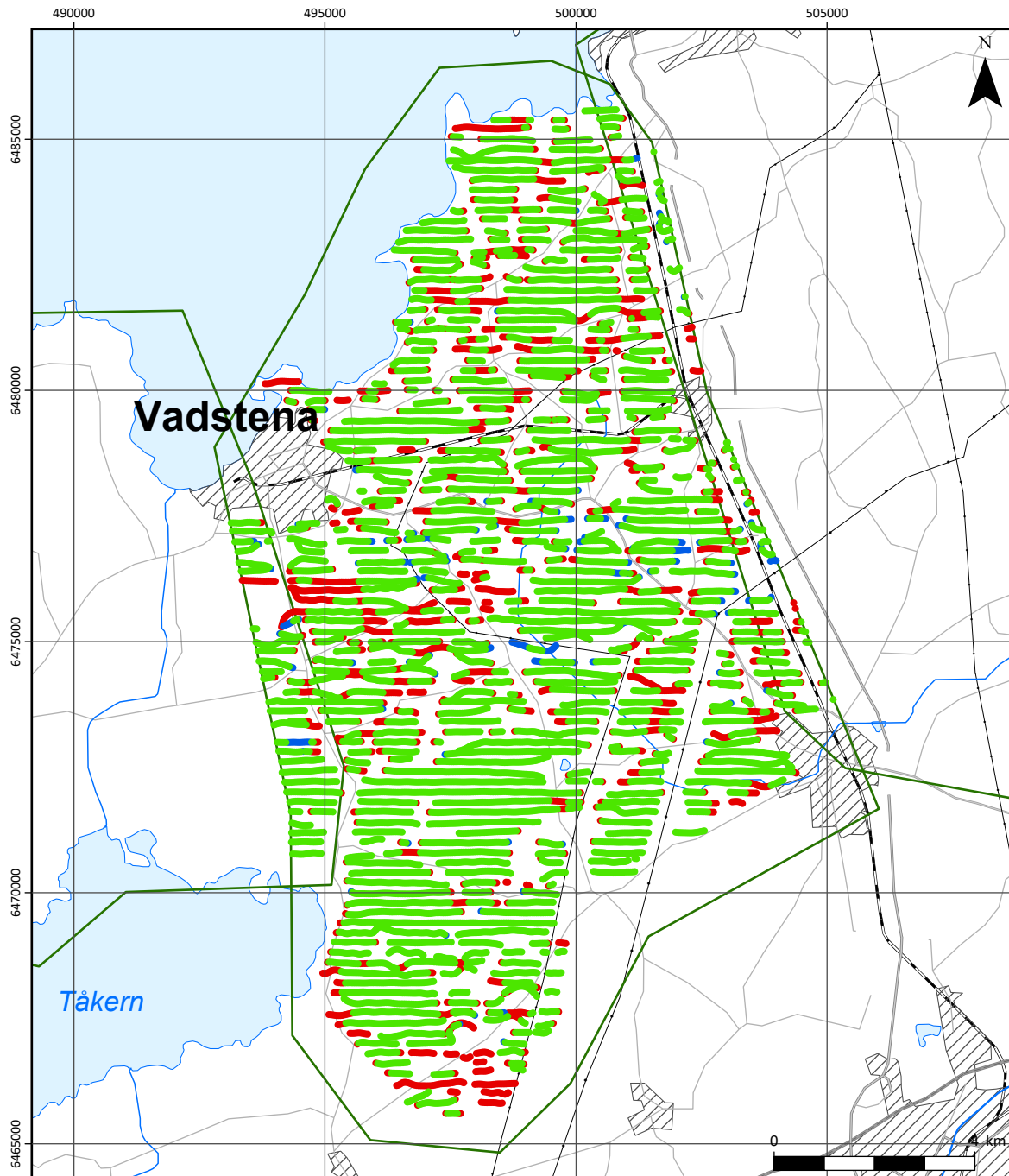
 Delområden



Kanaler (channel number)

- LM
- HM
- LM & HM

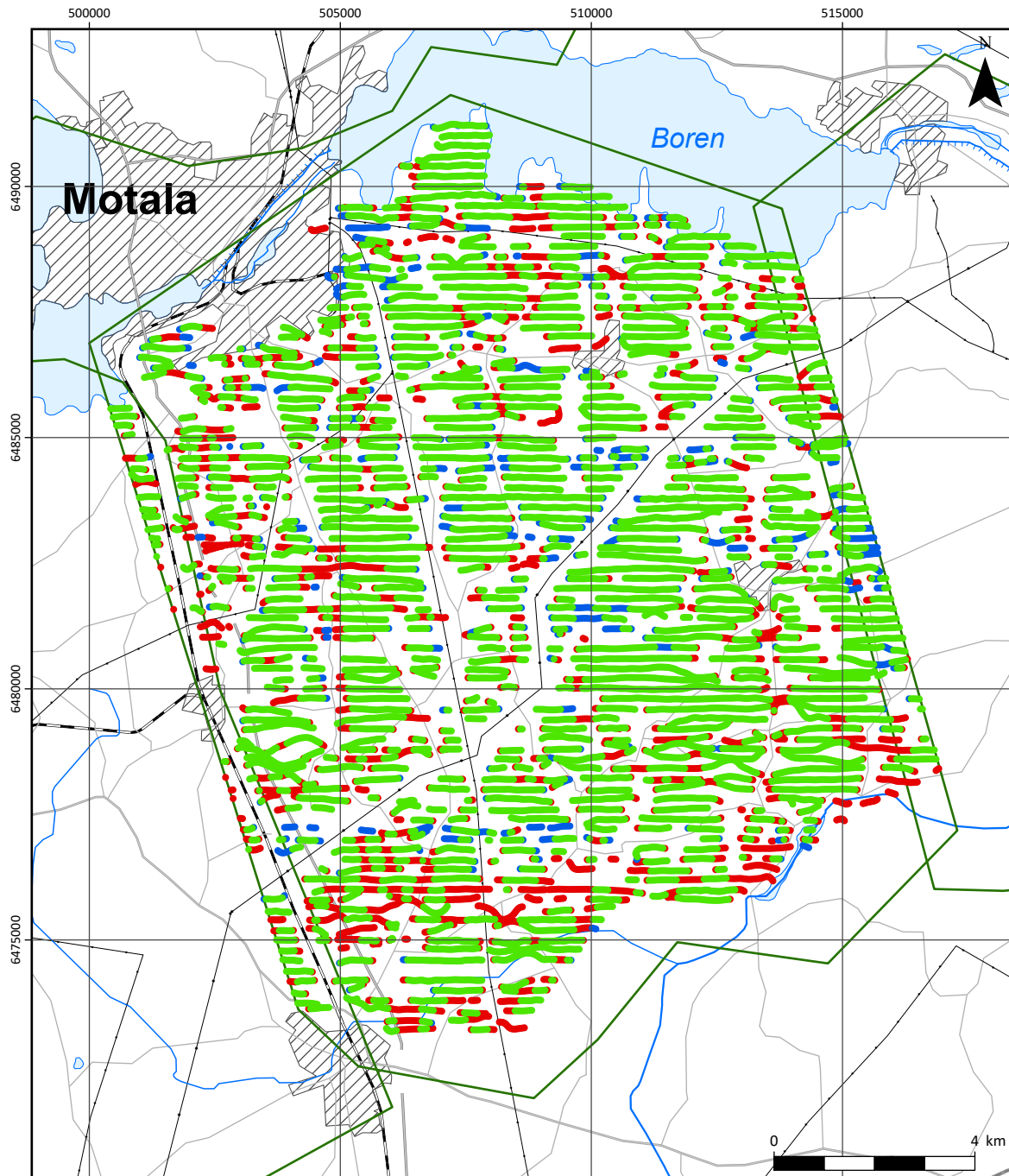
□ Delområden



Kanaler (channel number)

- LM
- HM
- LM & HM

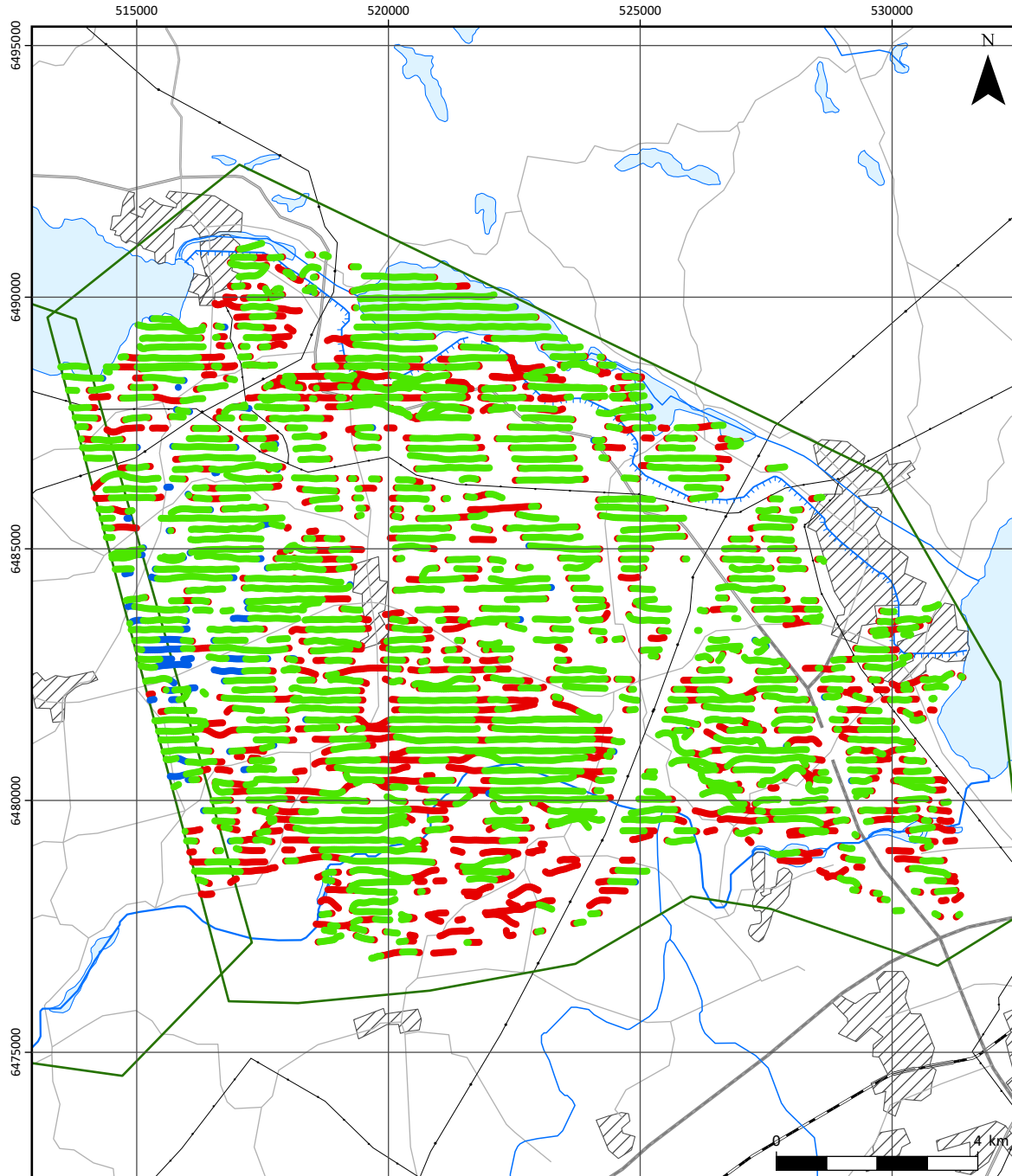
□ Delområden



Kanaler (channel number)

- LM
- HM
- LM & HM

□ Delområden

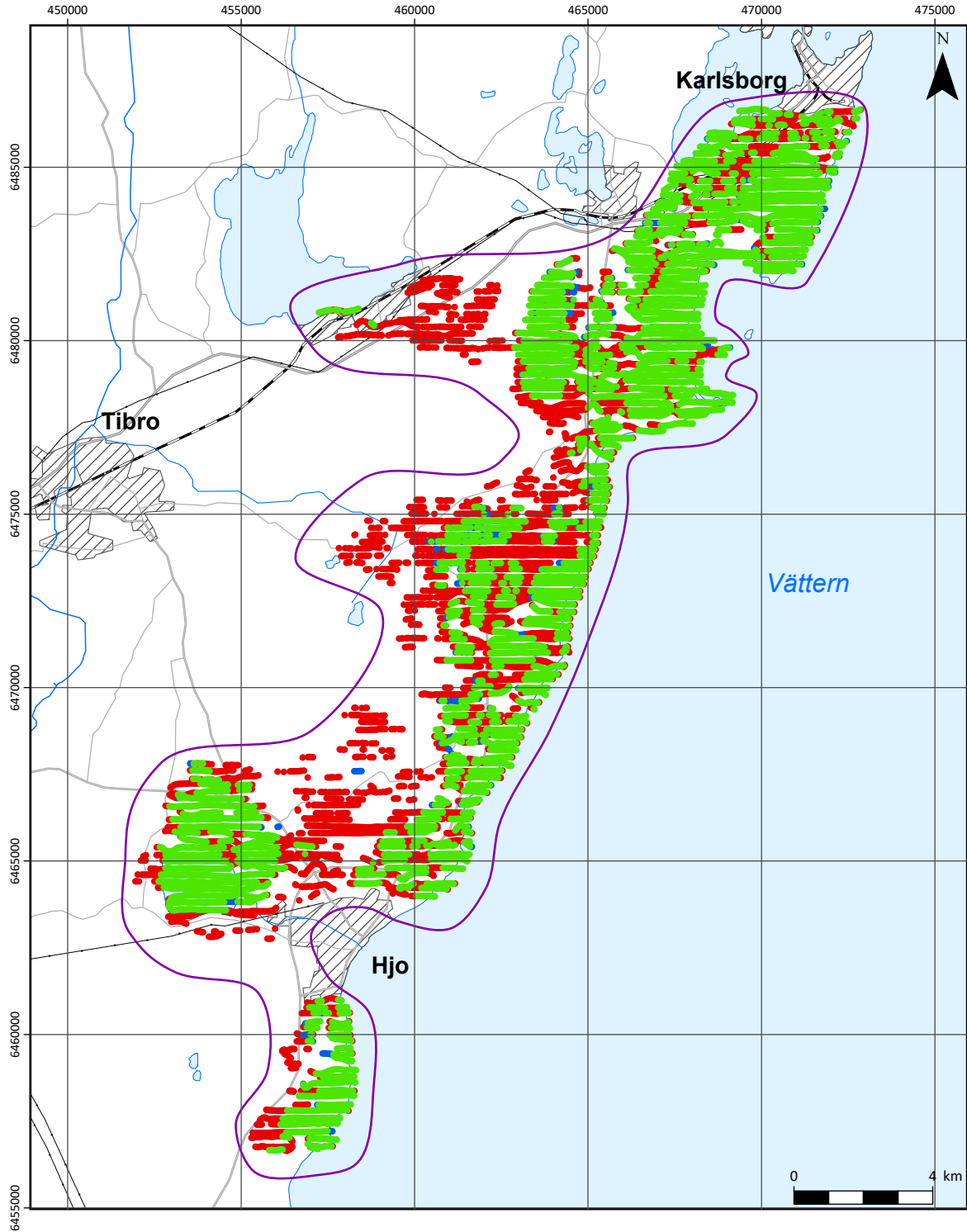


Kanaler (channel number)

- LM
- HM
- LM & HM

□ Delområden

Bilaga 6.6
Västergötland undersökningsområde
Kanaler



Kanaler (channel number)

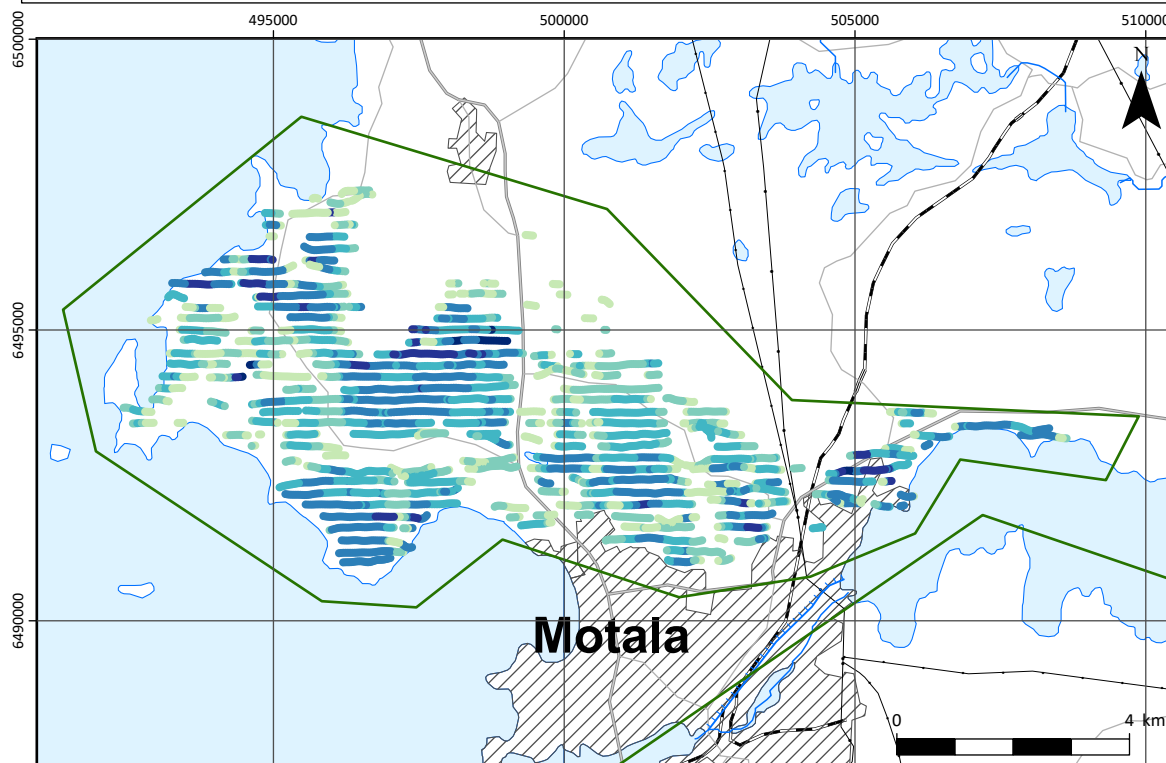
- LM
- HM
- LM & HM

□ Flygområde

BILAGA 7. DJUPKÄNNING (DOI)

Bilaga 7.1.1
Polygon 1
DOI konservativ

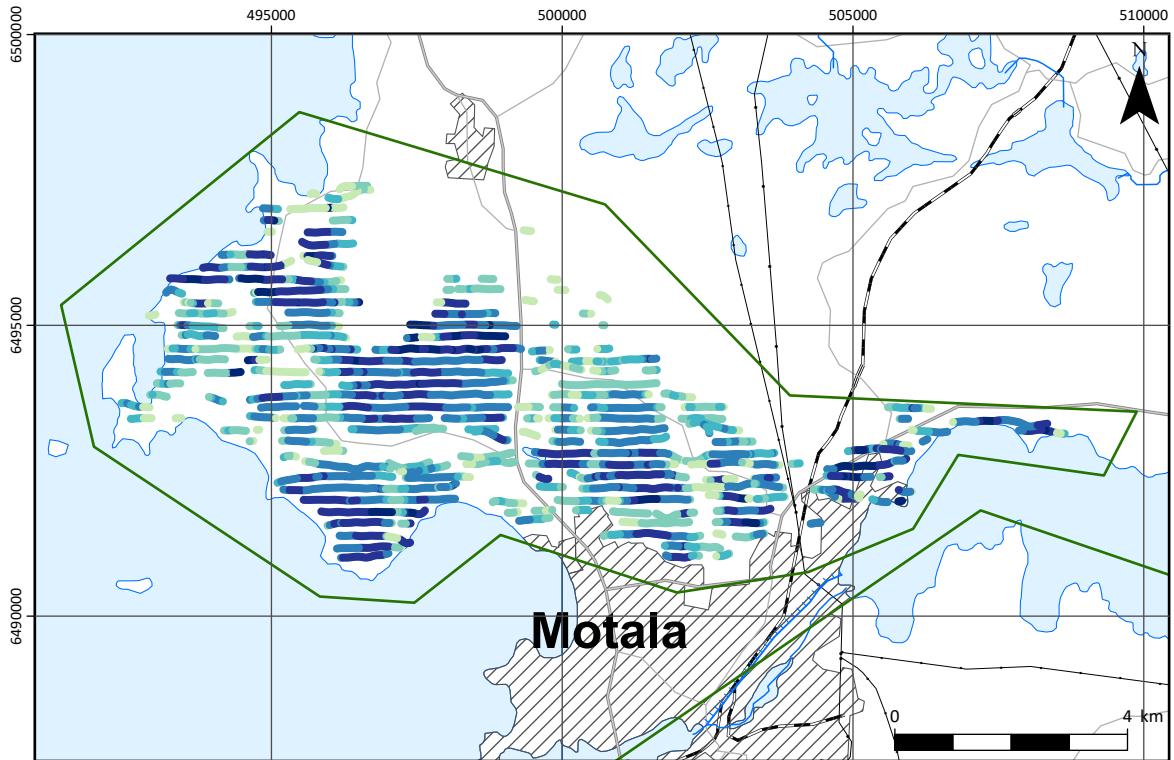
SGU Sveriges
geologiska
undersökning



DOI konservativ
(m under markytan)

- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250

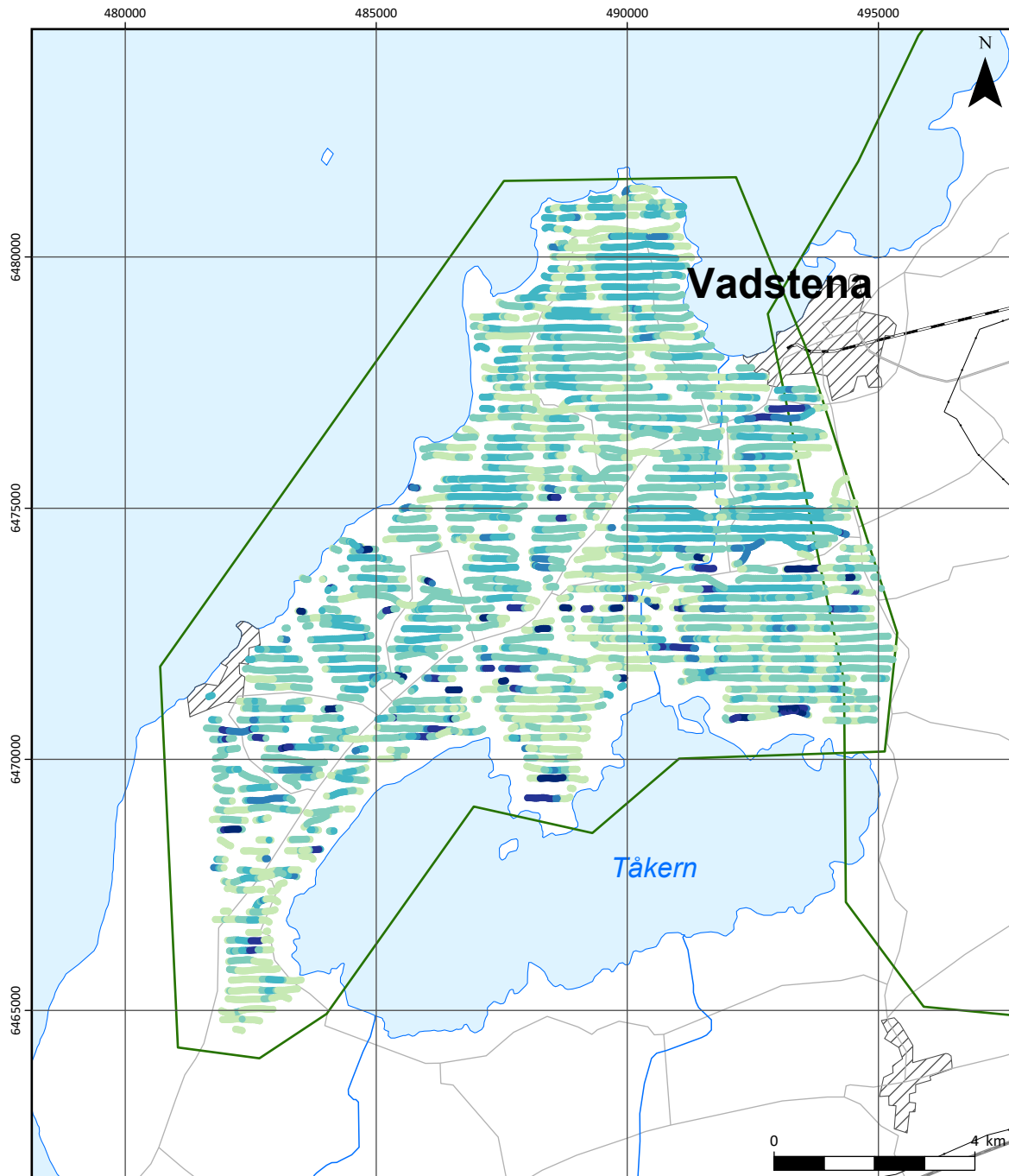
Delområden



**DOI konservativ
(m under markytan)**

- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250

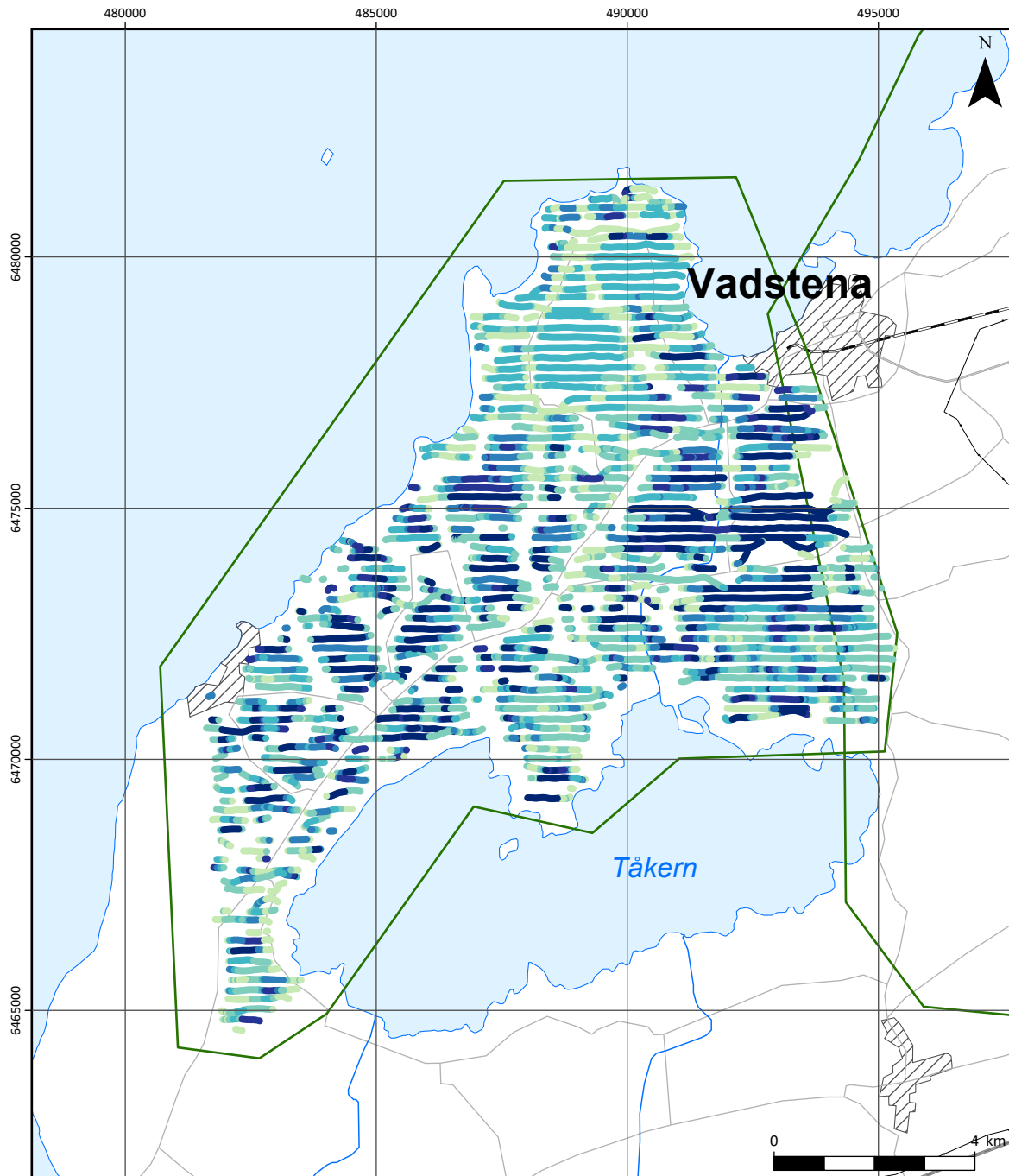
□ Delområden



DOI konservativ
(m under markytan)







Delområden

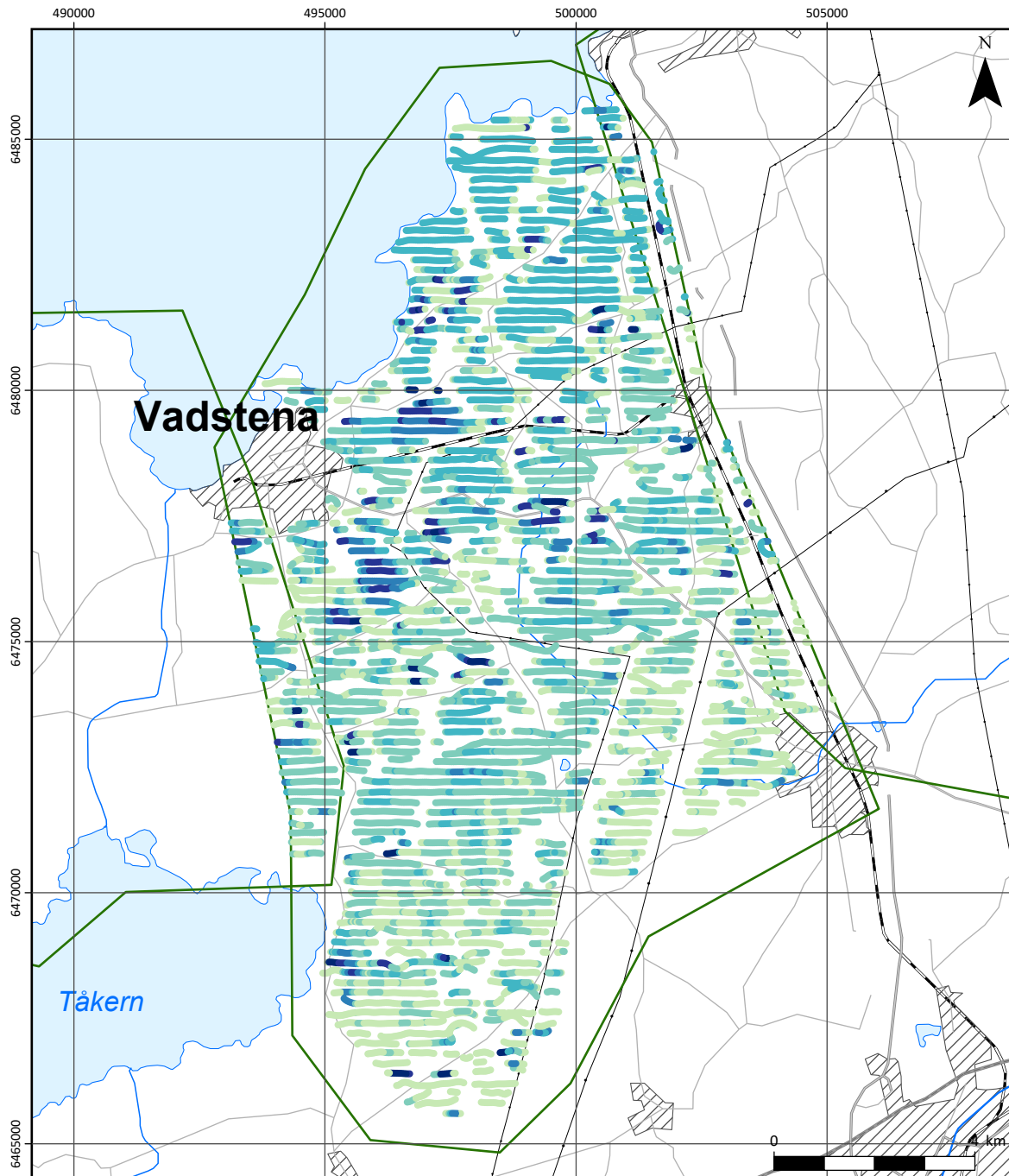
- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250



**DOI konservativ
(m under markytan)**

 Delområden

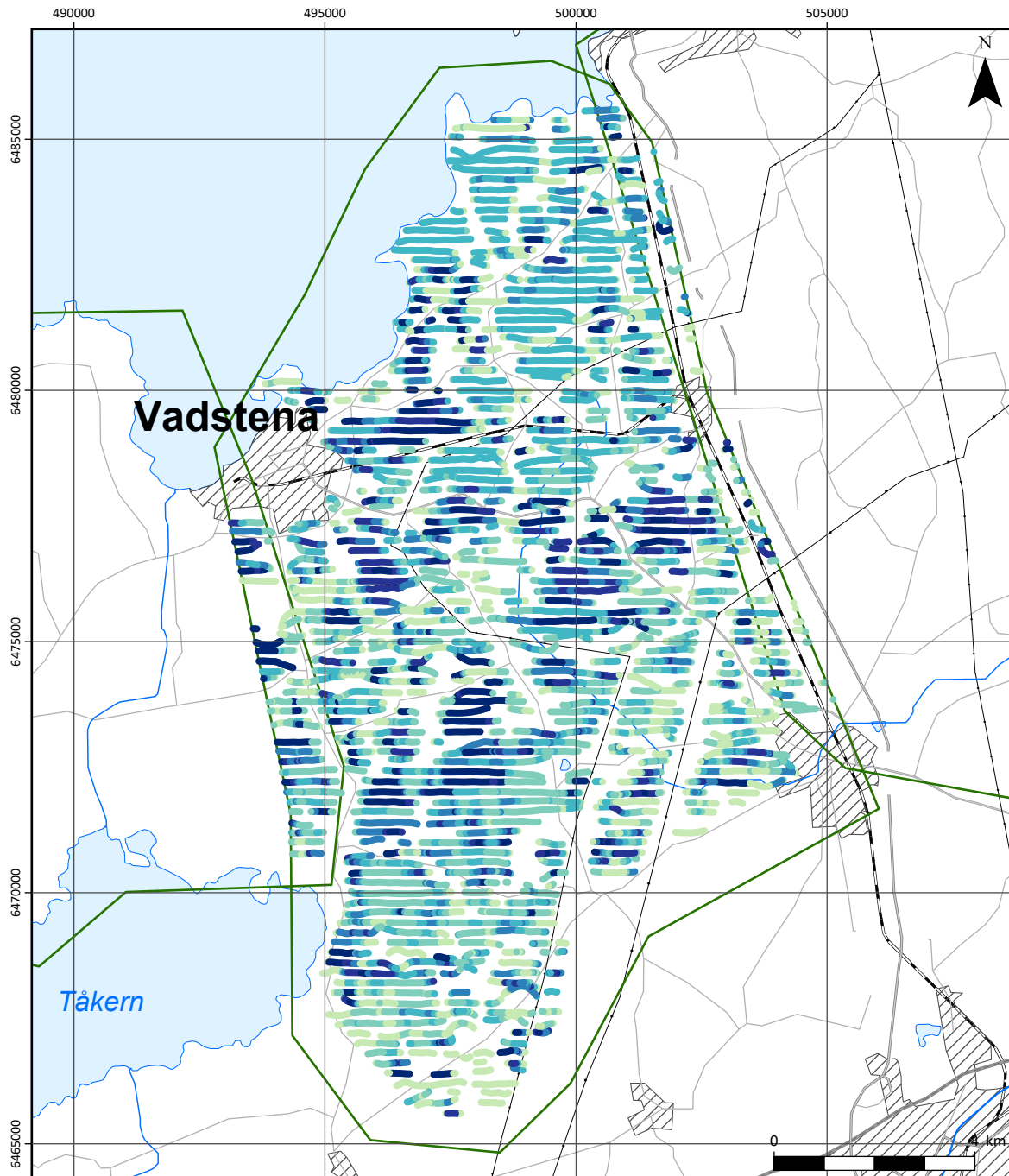
-  ≤ 50
-  ≤ 100
-  ≤ 150
-  ≤ 200
-  ≤ 250
-  > 250



DOI konservativ
(m under markytan)







Delområden

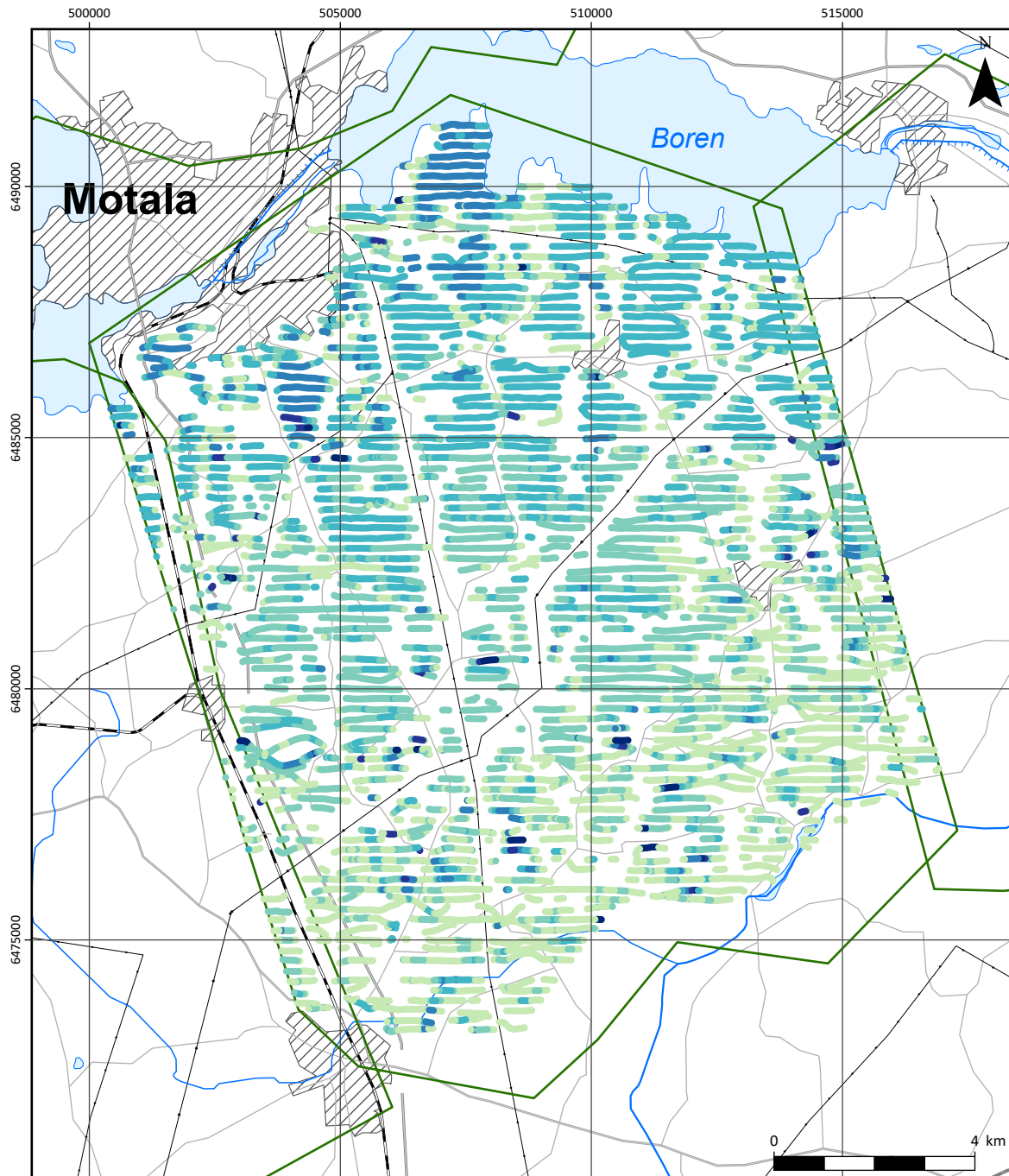
- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250



**DOI konservativ
(m under markytan)**

 Delområden

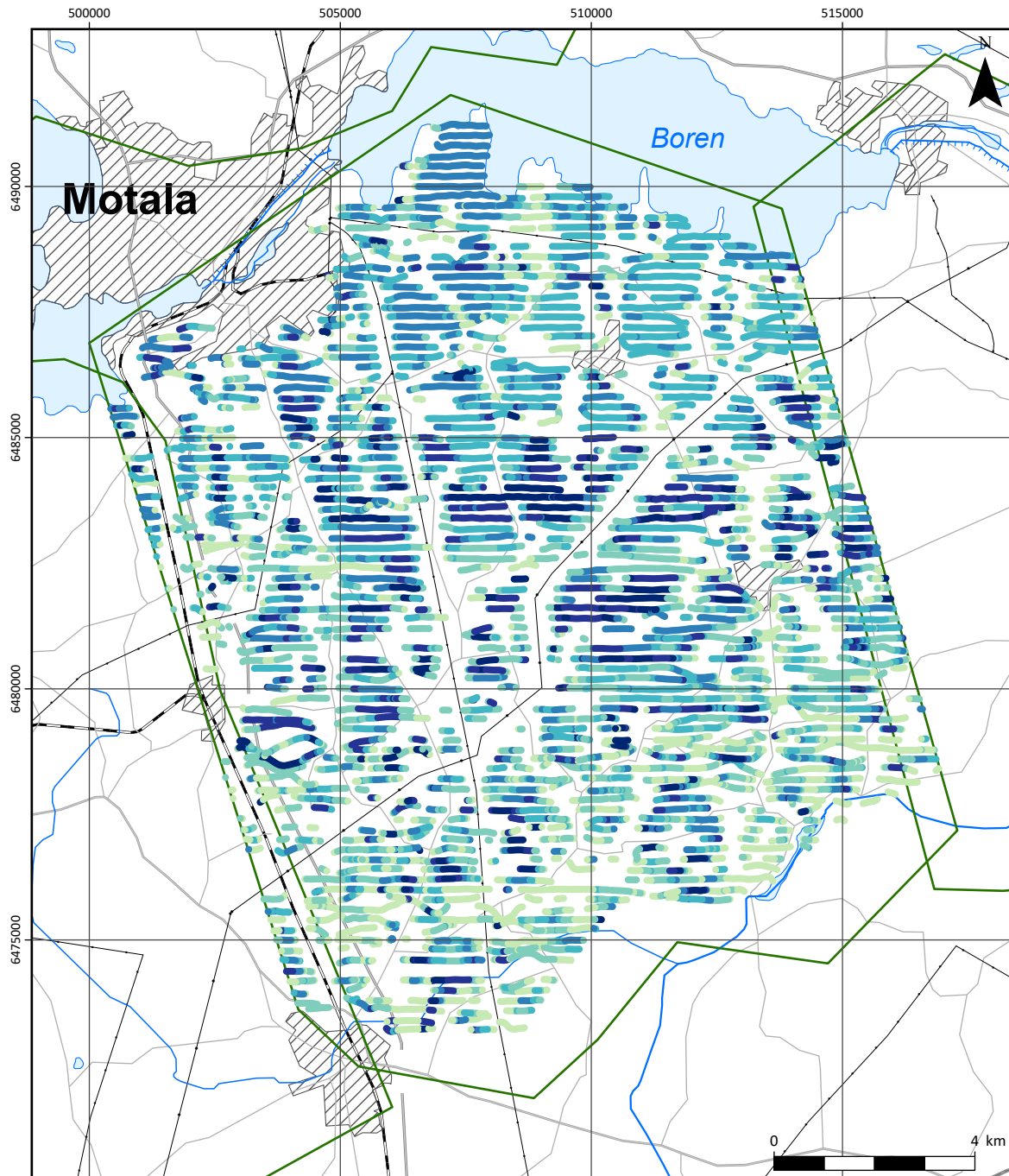
-  ≤ 50
-  ≤ 100
-  ≤ 150
-  ≤ 200
-  ≤ 250
-  > 250

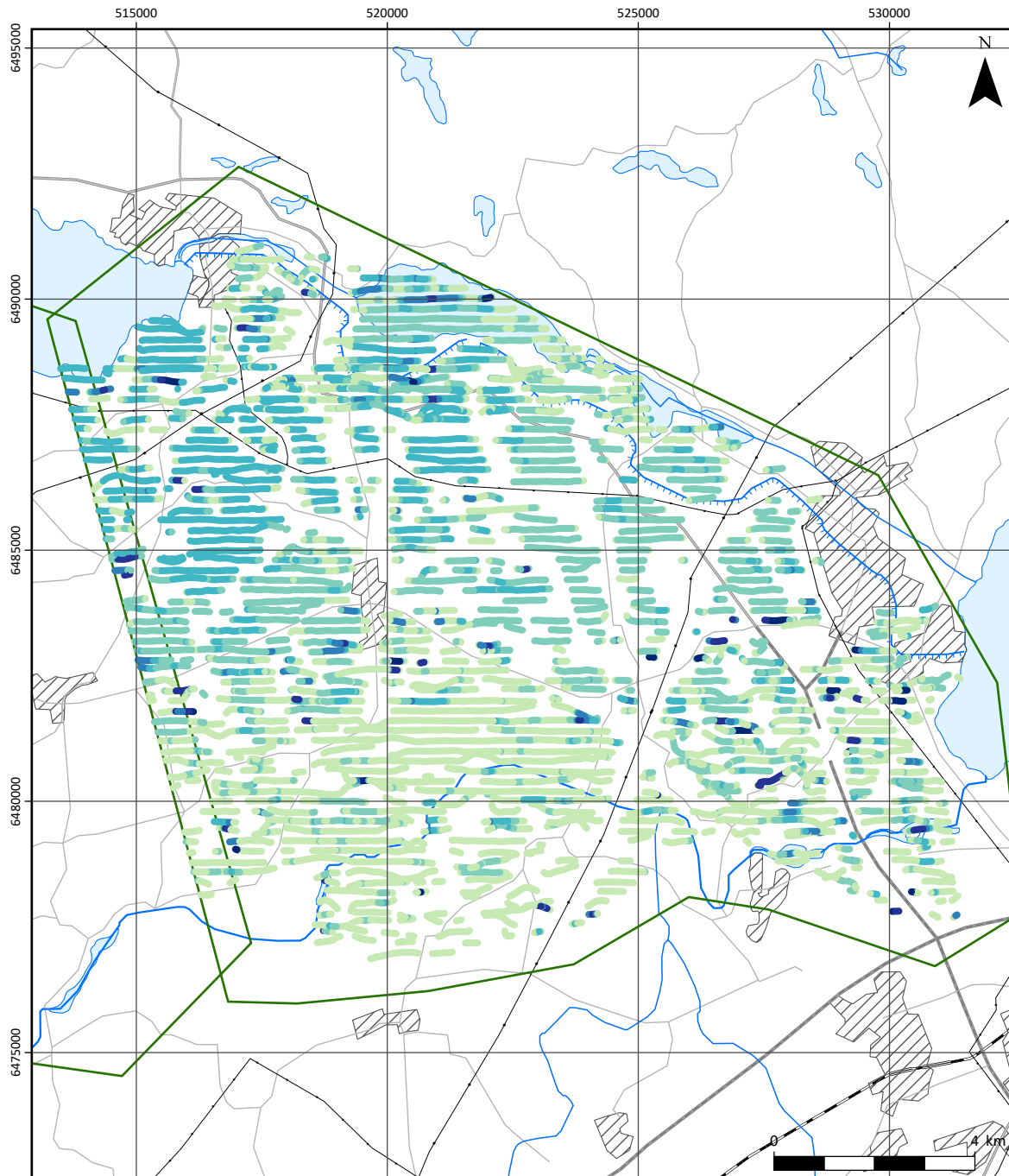


DOI konservativ
(m under markytan)

Delområden

- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250

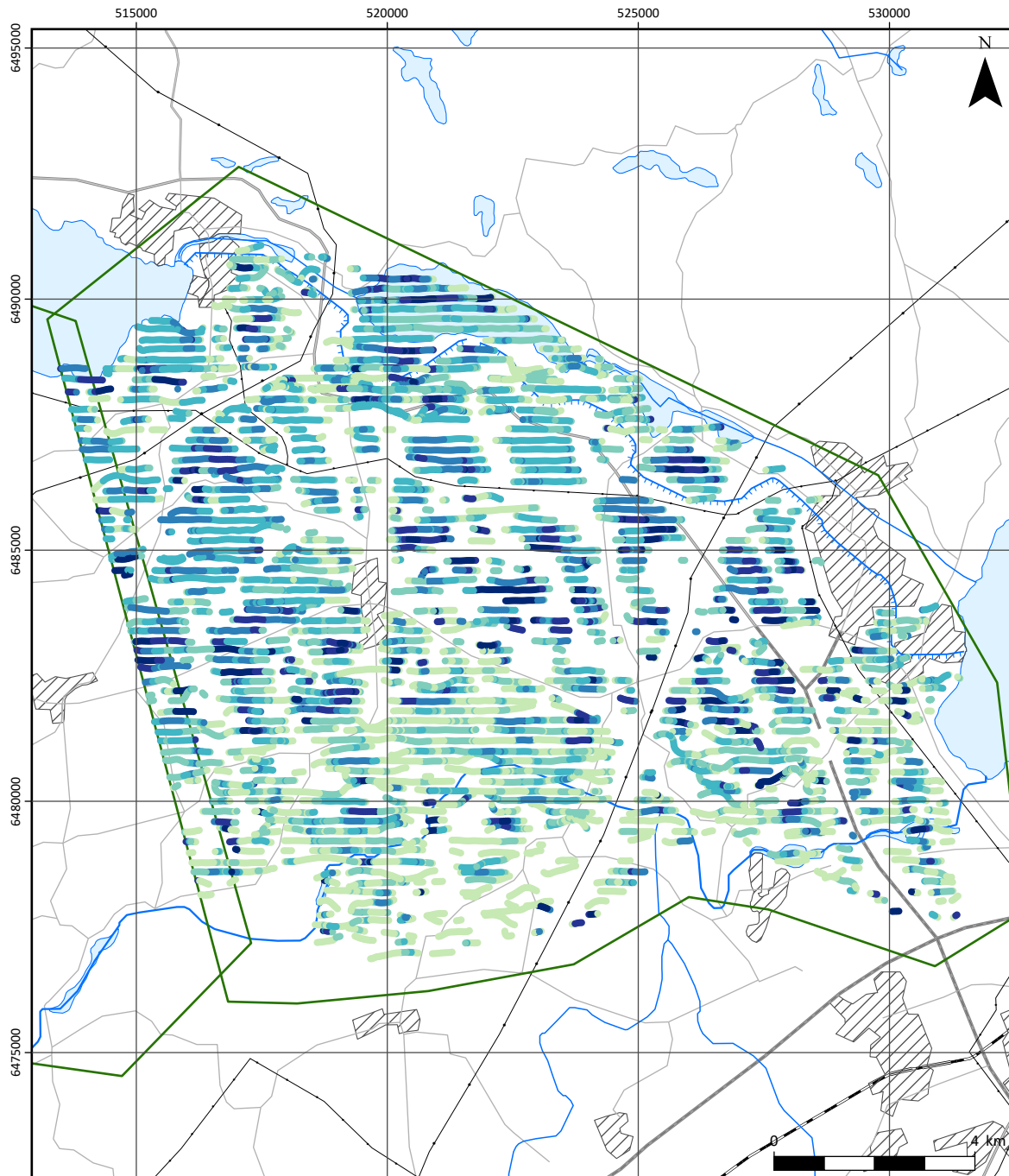




DOI konservativ
(m under markytan)

Delområden

- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250

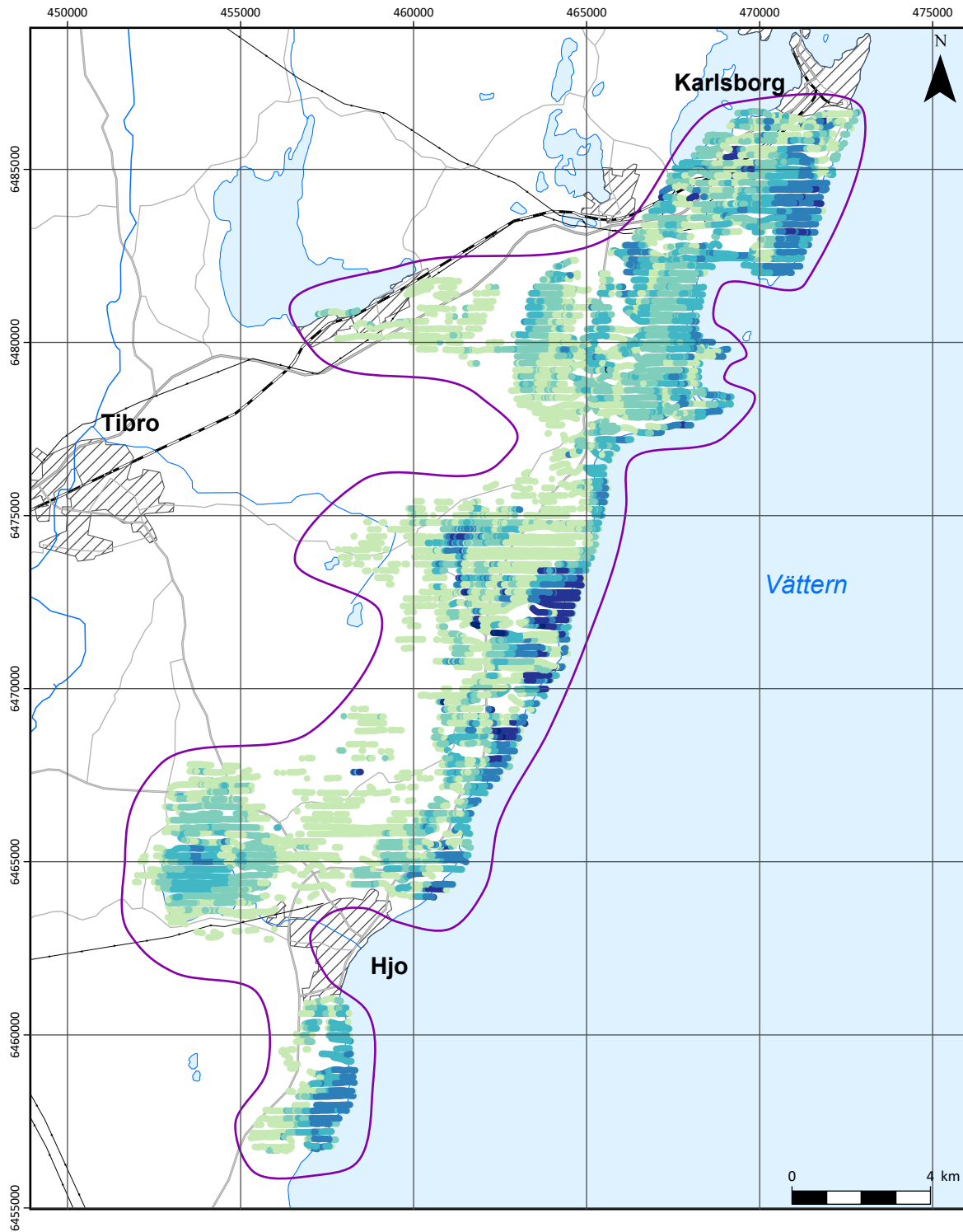


DOI konservativ
(m under markytan)

Delområden

- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250

Bilaga 7.6.1
Västergötland undersökningsområde
DOI konservativ

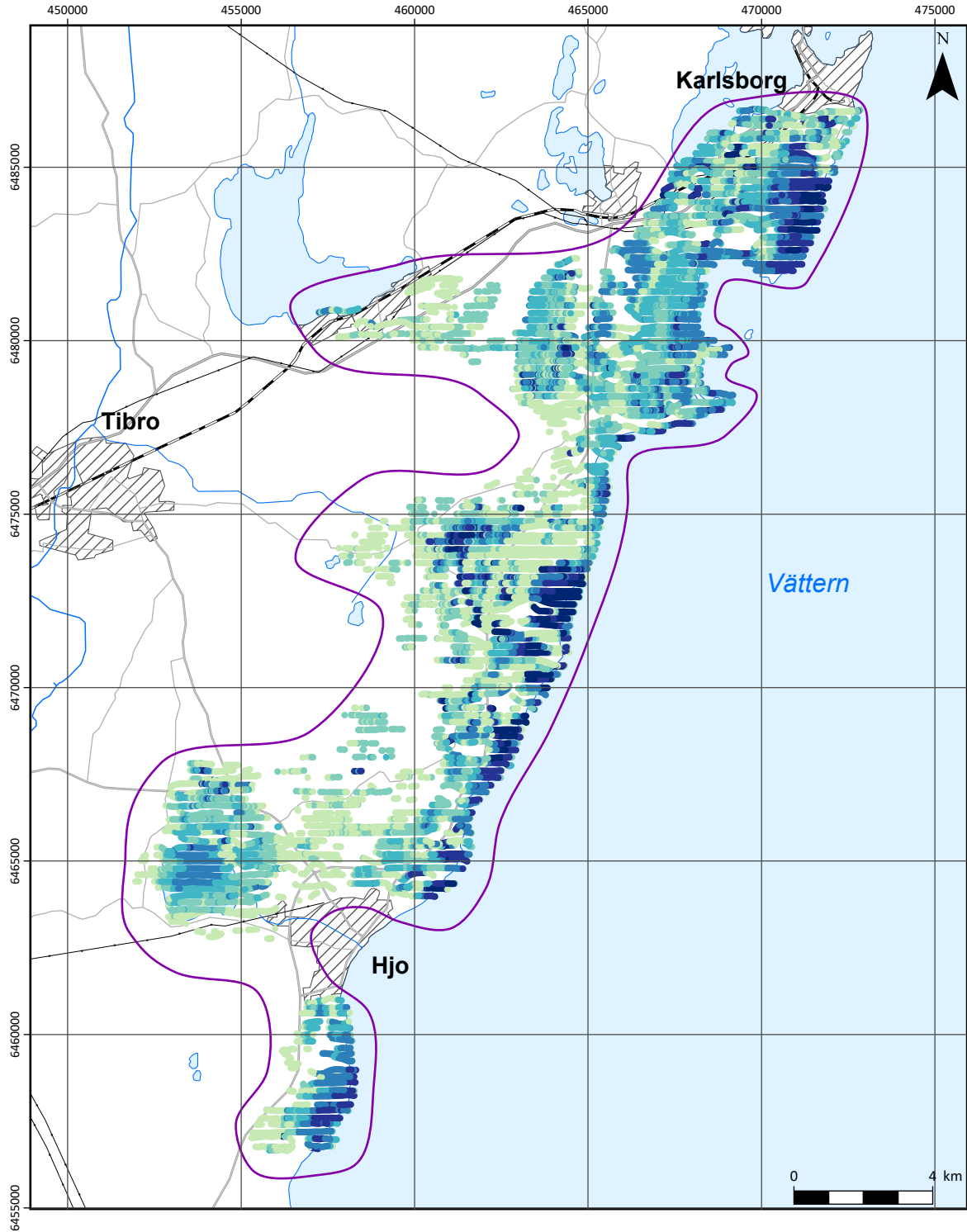


DOI konservativ
(m under markytan)

- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250

□ Flygområde

Bilaga 7.6.2
Västergötland undersökningsområde
DOI standard



DOI konservativ
(m under markytan)

- ≤ 50
- ≤ 100
- ≤ 150
- ≤ 200
- ≤ 250
- > 250

□ Flygområde