

Tilrettelegging av geologiske og geotekniske data for samfunnets behov

- med grunnvarme i Trondheim kommune
som eksempel

Merethe Weiseth Mork

Geofag og petroleumsteknologi

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Bjørge Brattli, IGB

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk

OPPGAVETEKST

BAKGRUNN

Grunnvarme hentet fra borebrønner i fjell (såkalte energibrønner) blir i økende grad tatt i bruk både i offentlige bygg, næringsbygg og boliger. Tykke løsmasseavsetninger over fast fjell øker borekostnadene og ved tykke marine avsetninger må en i tillegg vurdere risikoen for setningsskader eller kvikkleireskred før arbeidet starter. Bedre og lettere tilgjengelig informasjon om dybde til fjell samt om marine leirer, kan ofte være viktig som beslutningsgrunnlag for valg av grunnvarme som energiløsning og for riktig dimensjonering av energibrønner.

OPPGAVE

Innen masteroppgaven skal følgende forhold belyses:

- Gi en kort oversiktlig beskrivelse av den geologiske og urbane utvikling av Trondheim kommune fra slutten av istiden til i dag som gir en innføring i sannsynlig lagfølge og utbredelse av løsmasseavsetninger og fyllmasser.
- Komme frem til beste metode for å framstille sannsynlig dyp til fjell i arealutstrekning innenfor en bykommune (Trondheim), herunder vurdere metoden utviklet av Asplan Viak for NVE og metoden utviklet av Bioforsk/UMB for Vegvesenet for å beregne dyp til fjell.
- Foreslå hvordan innsamling, bearbeiding og presentasjon av enkle grunnboringsdata kan gjøres på kommunalt og nasjonalt nivå.
- Lage digitale "dybde til fjell"-kart over Trondheim kommune i en hensiktsmessig målestokk som fremstiller beregnet/anslått og reell (målt) dybde til fjell, det vil si både punktdata, flatedata og beregnede flater. Digitale kart som gir informasjon om områder med marin leire, faresoner for kvikkleireskred og borepunkt med påvist kvikkleire skal også lages. Kartene skal være brukervennlig og ha god lesbarhet.
- Vurdere tilgjengeligheten av informasjon om infrastruktur i grunnen som kan skades av energiboringer, så som veg- og jernbanetunneler, tilfluktsrom, vann- og avløpssystemer. Foreslå hvordan slike data kan gjøres lettere tilgjengelig for publikum.
- For et område med høy tetthet av boringer med angitt fjellkontakt, skal det lages et 3D-kart som viser terrengoverflaten og fjelloverflaten.

Data gjøres tilgjengelig fra Trondheim kommunes grunnboringsdatabase. Fra NGU stilles NGUs brønndatabase, NGUs kvartærgeologiske kart, samt geofysiske rapporter til disposisjon.

Det er viktig at det tas hensyn til nasjonale og internasjonale plattformer og standarder for geodataforvaltning (Norge digital, SOSI, INSPIRE) slik at arbeidet kan bli en byggestein på

veien mot et system der all informasjon om grunnen i Norge gjøres lett tilgjengelig for offentligheten.

SAMARBEIDSPARTNERE

Norges geologiske undersøkelse (NGU) har lang erfaring med å etablere, drifte og videreutvikle nasjonale databaser med geologiske tema. De mest relevante blant disse i denne sammenhengen er Granada nasjonal grunnvannsdatabase (inneholder informasjon om nærmere 60 000 fjellbrønner og løsmassebrønner), Nasjonal løsmassedatabase og Skrednett. I tillegg besitter NGU data fra geofysiske undersøkelser.

Som et av landets største konsulentselskaper jobber Asplan Viak mye med både arealplanlegging, prosjektering av infrastruktur og bygg, uttak av grunnvann til vannforsyning, samt utnyttelse av grunnvarme til oppvarming og kjøling av norske bygninger. Alle disse arbeidsområdene involverer bruk av geologiske og geotekniske data.

Trondheim kommune er blant de kommunene i landet som er kommet lengst når det gjelder å tilgjengeliggjøre data om grunnforholdene. Trondheim har store løsmassemektigheter og områder med marin leire. Det finnes også en god del infrastruktur i grunnen. På bakgrunn av dette er det derfor naturlig å bruke Trondheim kommune som eksempel.

Oppgaven er gjennomført i tidsrommet januar-juni 2012.

Sivilingeniørstudiet innen miljø og hydrogeologi ved studieprogram for geofag og petroleumsteknologi, studieretning miljø- og naturressursteknikk.

Hovedveileder: Professor Bjørge Brattli.

Biveiledere: Bjørn Syvert Frengstad, Randi Kalskin Ramstad og førsteamanuensis Steinar Løve Ellefmo.

Signatur student

Signatur hovedveileder

SAMMENDRAG

I denne masteroppgaven ble følgende problemstillinger besvart:

- Hvordan er den sannsynlige utbredelsen av løsmasseavsetninger og fyllmasser i Trondheim kommune gitt den geologiske og urbane utvikling av kommunen fra slutten av istiden til i dag?
- Hva er den beste metoden for å fremstille sannsynlig dybde til fjell innenfor en kommune?
- Hvordan kan innsamling, bearbeiding og presentasjon av enkle grunnboringsdata gjøres på kommunalt og nasjonalt nivå?
- Hvordan kan informasjon om infrastruktur i grunnen gjøres lettere tilgjengelig for publikum?

Trondheim kommune består av flere ulike løsmasseavsetninger. De deler av kommunen som ligger mer enn 160 m over havet har for det meste et tynt lag av forvitringssedimenter eller morene (Byåsen og Estenstadmarka), mens de deler som ligger under denne grensen har et til tider tykt lag av leire. Grus og sand, avsatt som breavsetninger og breelvavsetninger, finnes blant annet ved Kvenild, Heimdal, Ekle og Tiller. Områder langs Nidelvens nåværende eller tidligere løp har fått tilført lag av grus og sand avsatt som elveavsetninger. Kulturlag skapt av mennesker ligger i Midtbyen. Utfylling av masser har funnet sted i Sluppen-området og i havneområdet.

Når det vurderes å bore en energibrønn er det viktig å vite sannsynlig dybde til fjell fordi det medfører ekstra kostnader å installere føringsrør av stål i løsmasser for å stabilisere borehullet. To illustrasjonskart og tre estimeringsmodeller for dybde til fjell har blitt laget basert på informasjon om dybde til fjell fra grunnboringsdatabasen til Trondheim kommune, kvartærgeologisk kart og brønndatabasen til Norges geologiske undersøkelse. Å estimere dybde til fjell i to dimensjoner med ordinær kriging fungerer bra hvis man kun baserer modellen på boringer som har nådd fjell. Hvis boringer som ikke har nådd fjell også inkluderes er indikatorkriging en god metode.

Geologiske og geotekniske data er viktige informasjonskilder både for publikum, og offentlige og private bedrifter. Innsamling av grunnboringsdata kan gjøres ved at kommunene samler inn alle data fra grunnboringer utført kommunalt og i samarbeid med konsulentselskaper i en database. Nasjonalt kan data samles inn fra hver enkelt kommune. Data kan bearbeides ved å sortere relevante parametre i kolonner og presenteres ved å vise punkter med ulike alternativer av en parameter ved farger eller ulike størrelser på symbol.

Alle undergrunnsinstallasjoner i Trondheim kommune er ikke fullstendig registrert i et offentlig tilgjengelig digitalisert kart per i dag, men et slikt kart hadde gjort informasjonen lettere tilgjengelig for publikum.

SUMMARY

The problems which will be addressed are:

- How is the probable distribution of sediment deposition in Trondheim municipality based on the geological and urban development of the municipality from the end of the ice age until today?
- What is the best method to describe the probable depth to bedrock within a municipality?
- How can the collection, preparation and presentation of shallow drillings be conducted at a municipal and a national level?
- How can information regarding infrastructure in the underground be made easier accessible for the general public?

Trondheim municipality consists of various sediment types. The parts of the municipality which are located higher than 160 meters above sea level have a thin layer of weathered sediments or moraine (Byåsen and Estenstadmarka), while the parts which are located below this limit have a layer of clay. Gravel and sand, deposited as glacial deposits and glacial river deposits, exists at Kvenild, Heimdal, Ekle and Tiller. The areas along the present and previous river course of Nidelven have been supplied with layers of gravel and sand deposited as river deposits. Cultural layers made by humans are present in Midtbyen. Sediments have been filled in at the Sluppen area and in the harbor area.

It is important to know the likely depth to bedrock when one is considering establishing an energy well. An extra cost is involved due to the installation of a steel pipe to stabilize the borehole in the sediments. Two illustration maps and three estimation models for depth to bedrock have been made based on shallow drillings from the Trondheim municipality's "grunnboringsdatabase", and the Norwegian geological survey's quaternary geological map and well database. To estimate depth to bedrock in two dimensions with ordinary kriging works well if the model is based on drillings which have reached the bedrock. If one also includes drillings which have not reached the bedrock, indicator kriging is a good method.

Geological and geotechnical data are important sources for information for the general public, and public and private companies. Collection of shallow borehole data can be done by the municipality. The municipality can collect all the shallow drillings conducted by them and in cooperation with consulting companies in a database. Nationally the data can be collected from each municipality. The data can be prepared by sorting relevant parameters into columns and it can be presented by showing different alternatives of one parameter by different colors or sizes of the symbols. Today all the underground installations in Trondheim municipality are not registered in a publicly available map, but this type of map would have made the information easier available for the general public.

FORORD

Denne masteroppgaven ble definert av Bjørn Syvert Frengstad og Randi Kalskin Ramstad. Bakgrunnen for oppgaven er økende etterspørsel etter energibrønner og dermed økende interesse for å vite hvor langt det er ned til fjell i ulike områder. I denne oppgaven er det stilt spørsmålet: Hvordan kan dybde til fjell i et område best illustreres? Samarbeidspartnere er Norges geologiske undersøkelse (NGU), Asplan Viak og Trondheim kommune. Hovedveileder ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) er professor Bjørge Brattli. Jeg har også vært så heldig å få veiledning fra tre andre veiledere: Bjørn Frengstad ved NGU, Randi Kalskin Ramstad ved Asplan Viak og førsteamanuensis Steinar Løve Ellefmo ved NTNU. I oppgaven har jeg selv stått for konstruksjon av de todimensjonale modellene, mens den tredimensjonale modellen ble utviklet under veiledning fra Steinar Løve Ellefmo. Jeg vil takke Trondheim kommune og Norges geologiske undersøkelse for datagrunnlag. Data er mottatt fra Trondheim kommune i form av grunnboringsdatabasen, samt fra NGU i form av nasjonal grunnvannsdatabase, digitaliserte fjellblotninger i Trondheim kommune og digitalisert kvartærgeologisk kart over Trondheim kommune (1:50 000). Jeg vil også gjerne takke alle som har bidratt i oppgaveprosessen. Takk til Bjørge Brattli for veiledning omkring oppbygging og skriving av oppgaven, takk til Bjørn Syvert Frengstad for bra oppfølging og takk til Randi Kalskin Ramstad for gode tilbakemeldinger. Jeg vil uttrykke min takknemlighet til de som hjalp meg med dataprogrammene. Takk til Steinar Løve Ellefmo for hjelp til å lage den tredimensjonale modellen og takk til Kjersti Mølmann ved NGU for tips ved bearbeiding av grunnlagsdata i ArcGIS. Takk til alle på NGU som alltid er interessert i å hjelpe når jeg trenger svar på spørsmål eller behøver å låne en bok. Jeg vil også takke familien min for gjennomlesing og støtte.

INNHOLDSFORTEGNELSE

1.	Innledning	1
2.	Teori.....	3
	2.1 Energibrønn.....	3
	2.2 Løsmassetykkelse	4
	2.3 Forhold som bør vurderes ved etablering av Energibrønner	7
	2.4 Datagrunnlag.....	8
	2.5 Modelleringsverktøy	12
	2.5.1 Geostatistikk	12
	2.5.2 Implisitt modellering.....	16
	2.6 Kart	17
	2.6.1 “Dybde til fjell”-kart utviklet av Asplan Viak for NVE	18
	2.6.2 “Dybde til fjell”-kart laget av Bioforsk og UIB for Statens vegvesen	20
	2.6.3 “Dybde til fjell”-kart tatt i bruk av British geological survey	21
	2.6.4 Kart over grunnboringer med påvist kvikkleire.....	22
	2.6.5 kart med farsoner for kvikkleireskred.....	22
	2.7 Trondheims geologiske og urbane utvikling.....	23
3	Metode	27
	3.1 Tilrettelegging av Grunnlagsdata.....	27
	3.1.1 Punktdata til bruk i “dybde til fjell”-kart	29
	3.1.2 Flatedata til bruk i “dybde til fjell”-kart	29
	3.1.3 Punktdata til bruk i kvikkleirekart	32
	3.2 Modeller.....	32
	3.2.1 Beskrivende statistikk	32
	3.2.2 Modell 1 - Grunnlagsdata med fargegradering.....	32

3.2.3	Modell 2 - Rutenett	33
3.2.4	Modell 3 - Ordinær kriging.....	33
3.2.5	Modell 4 - 3D modell.....	38
3.2.6	Modell 5 - Indikatorkriging	41
3.2.7	Modell - Kvikkleirekart	42
4	Resultater	43
4.1	Modeller.....	43
4.1.1	Beskrivende statistikk	43
4.1.2	Modell 1 - Grunnlagsdata med fargegradering.....	46
4.1.3	Modell 2 - Rutenett	53
4.1.4	Modell 3 - Ordinær kriging.....	56
4.1.5	Modell 4 - 3D modell.....	60
4.1.6	Modell 5 - Indikatorkriging	66
4.1.7	Modell - Kvikkleirekart	73
4.1.8	Sammenligning av modell 3 og 5 med kvartærgeologisk kart og geofysiske undersøkelser	77
5	Diskusjon	87
5.1	Innsamling av geologiske og geotekniske data.....	87
5.2	Modeller.....	88
5.3	Sammenligning av modell 3 og 5 med kvartærgeologisk kart og geofysiske undersøkelser	93
5.4	Videre arbeid.....	94
6	Konklusjon.....	95
7	Referanser	97
8	Vedlegg.....	101

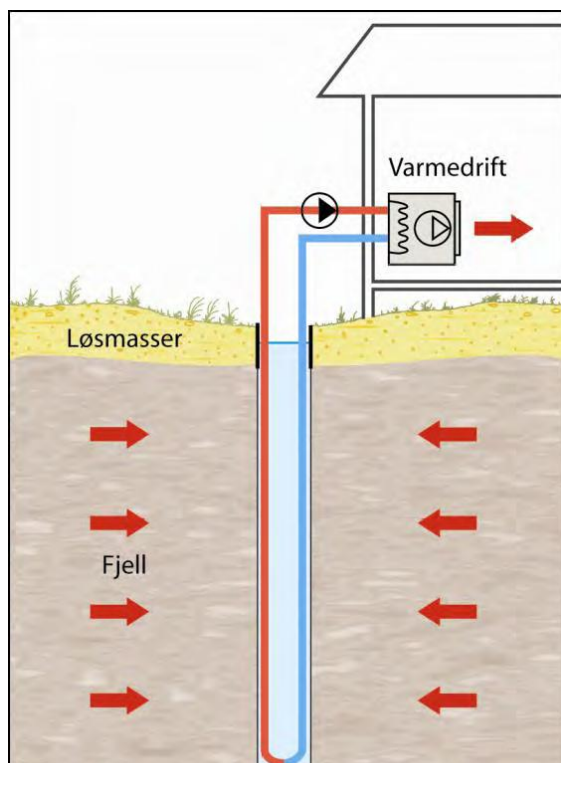
1. INNLEDNING

En informasjonskilde basert på innsamling, bearbeiding og presentasjon av geologiske og geotekniske data har nytteverdi både for publikum, offentlige og private bedrifter. Forslag for hvordan innsamling, bearbeiding og presentasjon av geologiske og geotekniske data kan gjøres enkelt beskrives i denne oppgaven. Eksempel på geologiske og geotekniske data er boringer med informasjon om dybde til fjell eller informasjon om påvist kvikkleire. Boringer med informasjon om dybde til fjell er nyttig informasjon ved installasjon av energibrønner fordi tykke løsmasseavsetninger over fjell øker kostnadene ved boring. Dette er tilfelle fordi fôringsrør må installeres i løsmassene for å stabilisere borehullet. God og lett tilgjengelig informasjon om dybde til fjell kan derfor i mange tilfeller være avgjørende for valg av grunnvarme som energiløsning. Uttesting av ulike metoder som illustrerer dybde til fjell, med Trondheim kommune som eksempel, har derfor vært hovedfokus i denne masteroppgaven. Trondheim kommune er brukt som et eksempel fordi kommunen har en brukervennlig, oppdatert og offentlig tilgjengelig grunnboringsdatabase. Det er også sett på løsmasseavsetningshistorien i Trondheim etter sist istid. Metodene brukt i kartmodellene er basert på data fra grunnboringsdatabasen til Trondheim kommune, kvartærgeologisk kart og brønndatabasen til Norges geologiske undersøkelse. I de to første modellene er grunnlagsdata fremstilt i kart med fargekoder for ulike dyp, mens de tre siste modellene er beregninger av dybde til fjell utført ved hjelp av kriging og radielle basisfunksjoner. Modell 3 og 5 sammenlignes med blotninger på kvartærgeologisk kart og med geofysiske undersøkelser. Det vurderes også hvordan informasjon om infrastruktur i grunnen kan gjøres lettere tilgjengelig for publikum. I sammenheng med forhold som bør vurderes ved etablering av en energibrønn er det laget kart over boringer med påvist kvikkleire registrert av Trondheim kommune og kvikkleirefasesoner i Trondheim utarbeidet av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

2. TEORI

2.1 ENERGIBRØNN

En energibrønn i form av et borehull i fjell med lukket kollektorslange (figur 1) er den vanligste måten å utnytte grunnvarme i Norge på. I denne oppgaven brukes derfor ordet ”energibrønn” i denne betydningen. Ordet ”energibrønn” kan i andre sammenhenger også brukes om borehullet og dets installasjoner for andre og sjeldnere varianter av grunnvarme. Et eksempel er uttak av grunnvann fra løsmassebrønner. Den sirkulerende og frostsikre væsken i kollektorslangen i



Figur 1. Energibrønn i fjell med kollektorslange (Ramstad 2011).

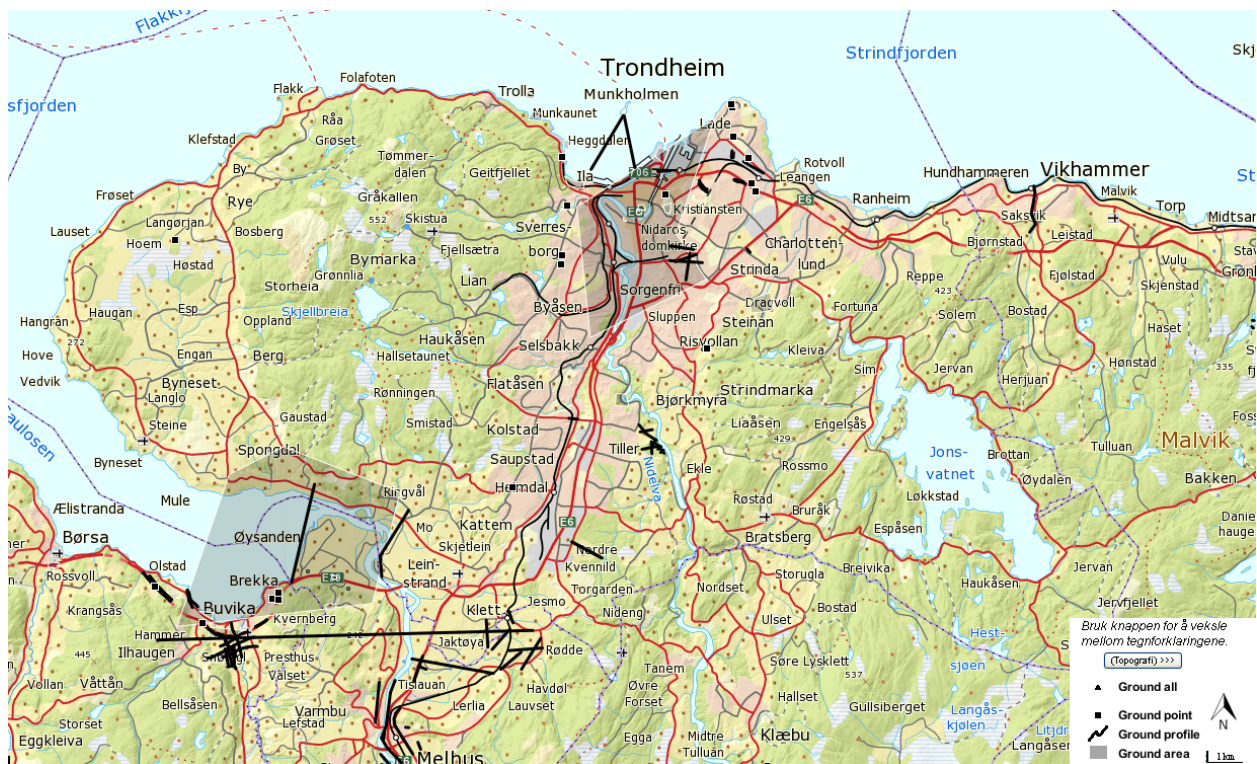
energibrønner henter energi fra omkringliggende berggrunn, og en væske-vann varmepumpe løfter temperaturen til ønsket nivå for varmedistribusjon. Energien (grunnvarmen) er hovedsakelig magasinert solenergi og er fornybar. Siden grunnvarme ofte er lønnsomt er interessen for teknologien økende.

Investeringskostnaden ligger på 150 000 til 250 000 kr for utendørsdel og installert varmepumpe (Ramstad 2011), hvorav store deler av summen utgjøres av varmepumpe og arbeid. Kostnadene knyttet til installasjon av en energibrønn, forutsatt at bygningen er tilrettelagt for vannbåren varme, er hovedsakelig knyttet til boring, grøfter, varmepumpe, elektriker samt montering av varmepumpe og termostater. Dimensjonene på en energibrønn er vanligvis 11,5 eller 13,9 cm i diameter og boredybden varierer mellom 100 til 250 m (Ramstad 2011).

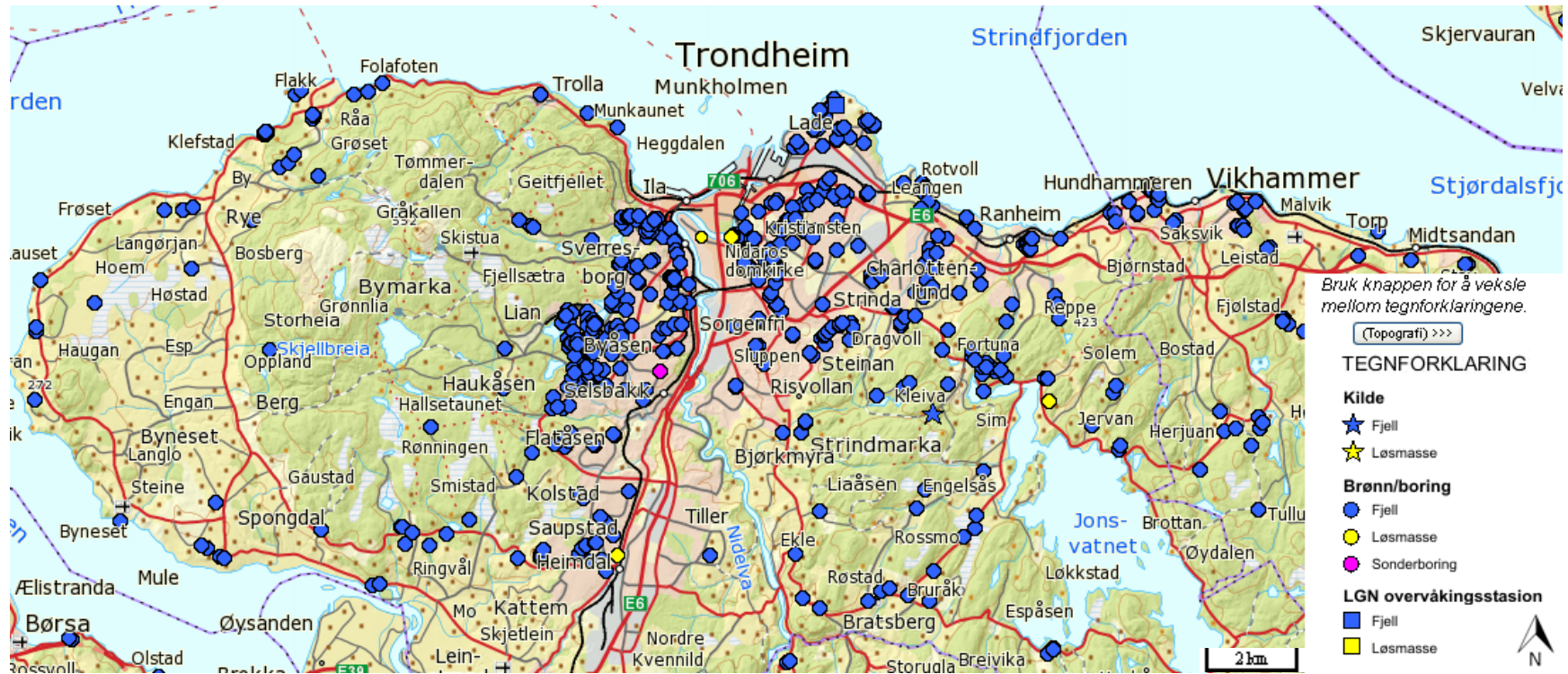
Ved installasjon av en energibrønn er det to geologiske forhold som påvirker

2.2 LØSMASSETYKKELSE

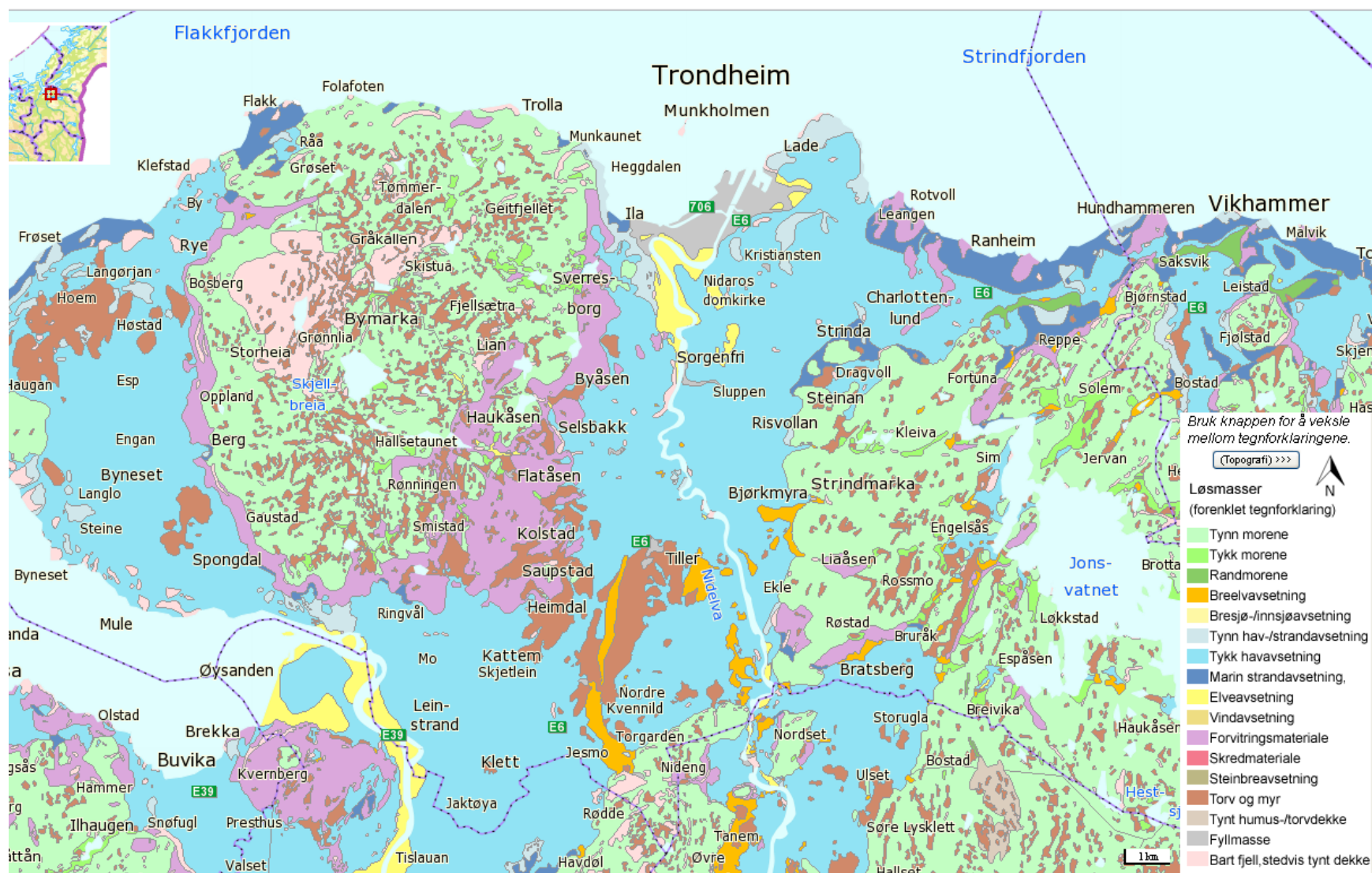
Helt nøyaktig løsmassetykkelse i et bestemt punkt kan kun finnes ved å bore helt ned til berggrunnsoverflaten i det gitte punktet. For å få kunnskap om sannsynlig dybde til fjell i et punkt kan data fra utførte borer, geofysiske undersøkelser og observerte løsmassetyper i området benyttes. Denne informasjonen er blant annet offentlig tilgjengelig i digitalt kartformat på Norges geologiske undersøkelse (NGU) sin hjemmeside www.ngu.no i form av nasjonal geofysikkdatabase (figur 2), nasjonal grunnvannsdatabase (Granada) (figur 3) og kvartærgeologisk kart (figur 4). Grunnboringer i forbindelse med geotekniske undersøkelser er også en viktig informasjonskilde om dybde til fjell. Med få unntak er denne informasjonen lite systematisert og tilgjengeliggjort på nasjonalt nivå. En grunnboring er en boring som gjøres for å ta ut løsmasseprøver fra grunnen. Boringene utføres av kommunen eller konsulentselskaper i forbindelse med bygging av bygninger, vei eller annen infrastruktur. Målet med grunnboringene er å få informasjon om mengde, type og kvalitet av løsmasser. Ved å ta ut masser fra ulike dyp kan man finne ut hvilke løsmasser som eksisterer nedover i boreprofilen.



Figur 2. Utsnitt av nasjonal geofysikkdatabase (Dragon) utviklet av NGU (NGU 2012a).



Figur 3. Utsnitt av nasjonal grunnvannsdatabase utviklet av NGU (NGU 2012b).



Figur 4. Kwartærgeologisk kart som viser kartlagte løsmassetyper i Trondheim kommune (NGU 2012c). Trondheim kommune er kartlagt i målestokk 1: 50 000.

2.3 FORHOLD SOM BØR VURDERES VED ETABLERING AV ENERGIBRØNNER

Ved installasjon av energibrønner i områder med marin leire bør man vurdere risikoen for setningsskader eller kvikkleireskred før arbeidet starter. Nedenfor er tre faktorer rangert etter sannsynlighet for setningsskader.

- Underdimensjonering av brønn
- Høyt luft/vann trykk ved boring
- Belastning ved bruk av tunge borerigger

Brønnen må dimensjoneres slik at fryse- og tineprosesser unngås. Dette er fordi leiren rundt brønnen kan fryse hvis det blir tatt ut mer energi fra brønnen enn det den er dimensjonert for. Hvis dette skjer vil vann trekke ut av leirstrukturen og strukturen forandres (Vogt m. fl. 1998). Vannet trekker ikke inn i leirstrukturen igjen når leiren tiner og leirevolumet krymper. Dermed vil det oppstå setningsskader rundt brønnen etter tining (figur 5) (Rosén m. fl. 2001). I Chamberlain (1981) sin sammenfatning av indekstester over frostpåvirkning på løsmasser beskrives det at løsmasser får redusert stabilitet etter tining fra frosset tilstand, men at stabiliteten i de fleste tilfeller vil være like høy som det den var før frysingen fant sted etter et visst tidsrom. Trykkluft eller vann under trykk brukes under boring for å få opp masser fra borehullet og for å holde hullet åpent. Høyt trykk (luft/vann) bør unngås ved boring fordi dette kan føre til et poreovertrykk i leiren som igjen kan føre til redusert stabilitet (Aarhaug 1992). Ved etablering av brønn brukes store tunge borerigger. Disse kan gi en belastning på leiren som kan føre til redusert stabilitet.



Figur 5. Disse to bildene illustrerer setningsskader rundt en underdimensjonert brønn i leire. I fotoet til venstre kan man se et hull i asfalten som har oppstått på grunn av setningsskader. I bildet til høyre er det samme hullet zoomet inn og her kan man se at leirmassene har sunket sammen nedi hullet (Foto: Ramstad 2012).

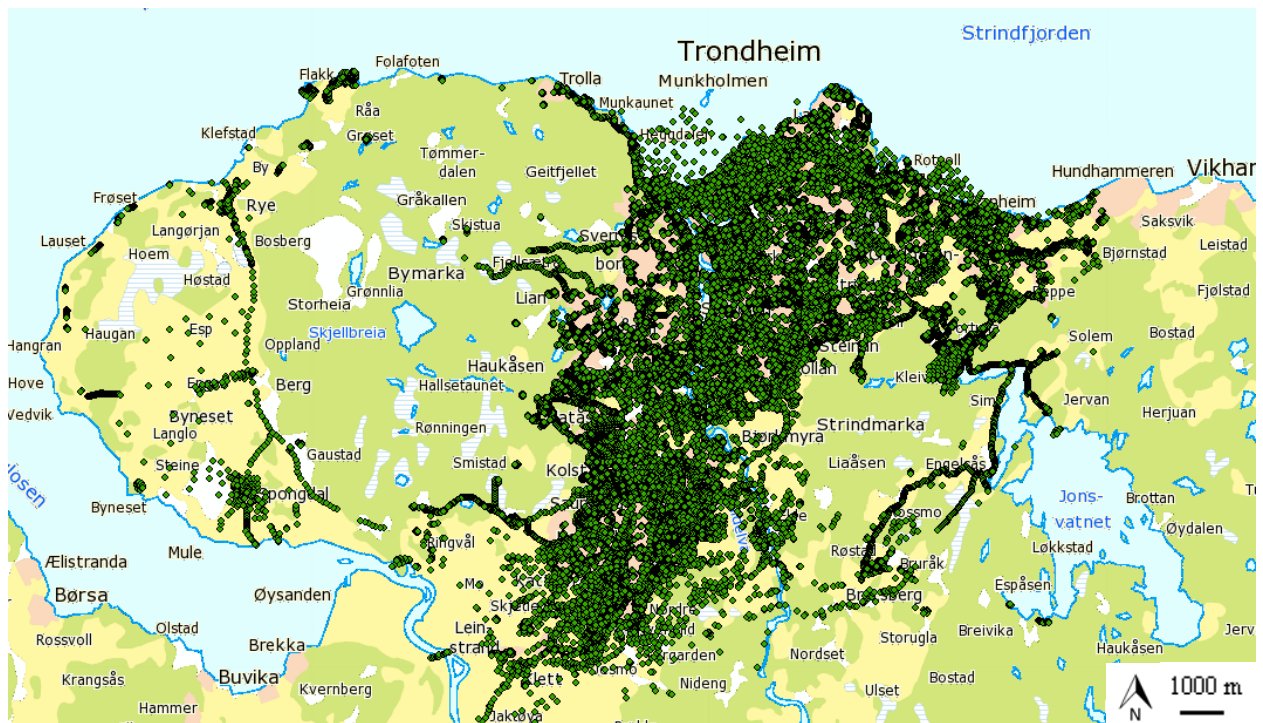
Ved installasjon av energibrønner bør man være oppmerksom på om undergrunnen blir tatt i bruk av andre. Per i dag er det ikke laget ett samlet kart over undergrunnsanlegg i Trondheim kommune. Trondheim kommune har registrert noen vei-, jernbane- og kloakktunneler digitalt, samt en tilførselstunnel. Det skal også eksistere flere tilfluktsrom og andre anlegg som ikke er kartfestet. Vann- og avløpsledninger, strøm-, bredbånds- og telefonkabler som ligger forholdsvis grunt er registrert i kart.

2.4 DATAGRUNNLAG

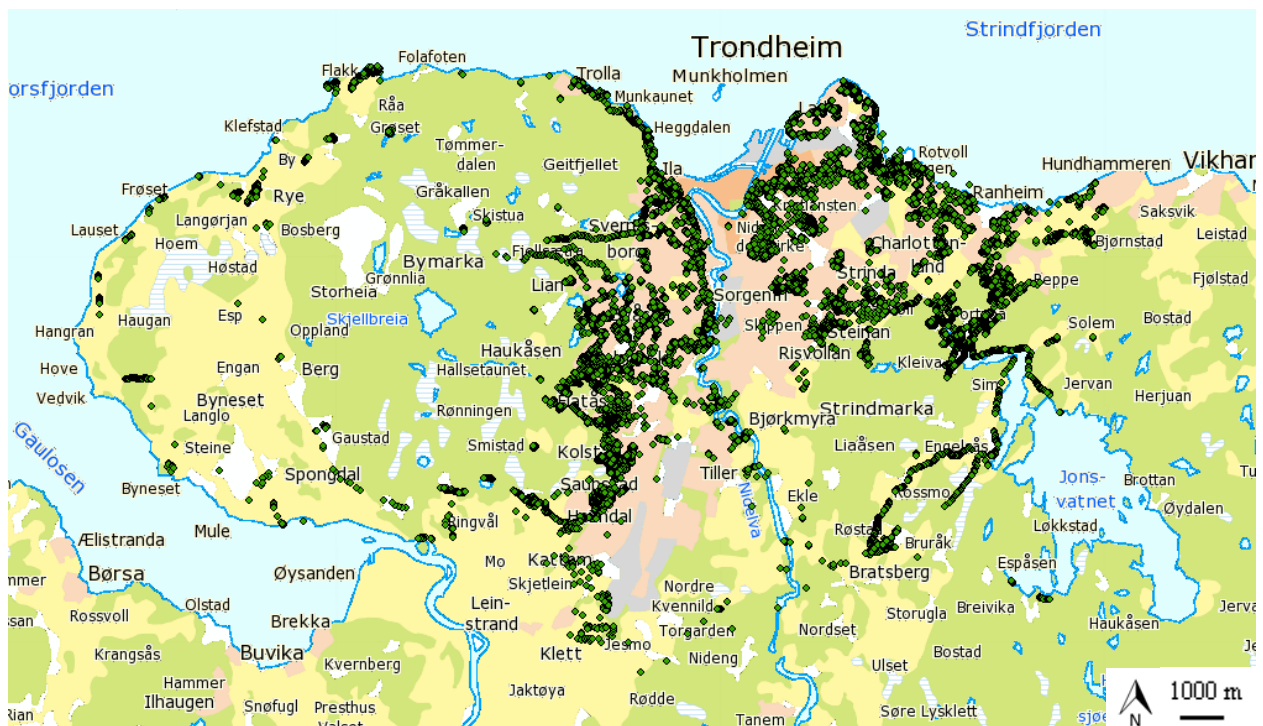
De to kildene som har bidratt med punkt- og flatedata i denne oppgaven er Trondheim kommune og NGU. Nedenfor er de ulike datasettene listet opp.

- Trondheim kommune
 - Grunnboringsdatabase
- NGU
 - Nasjonal grunnvannsdatabase (GRANADA)
 - Løsmassekart over Norge (Trondheim kommune i målestokk 1:50 000)
 - Fjellblotninger

Trondheim kommune er en av få kommuner i Norge som registrerer alle grunnboringer som gjennomføres i deres prosjekter i en database. Totalt er det registrert 57712 grunnboringer i databasen og av disse har 16589 (28,7 %) boringer nådd fjell (1. jan 2012) (figur 6 og 7).

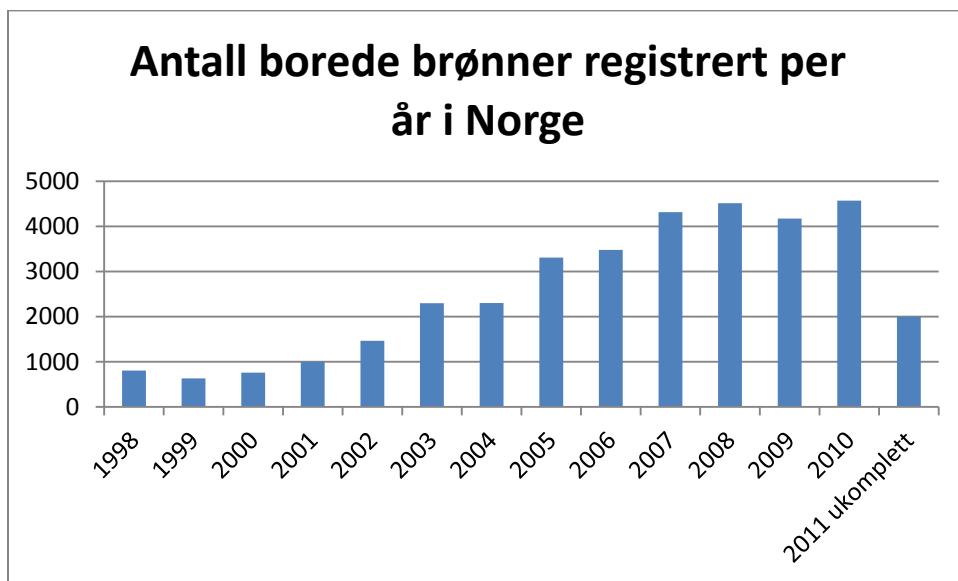


Figur 6. Kart over Trondheim kommune som viser alle grunnboringer registrert av Trondheim kommune i grunnboringsdatabasen (grønne sirkler).

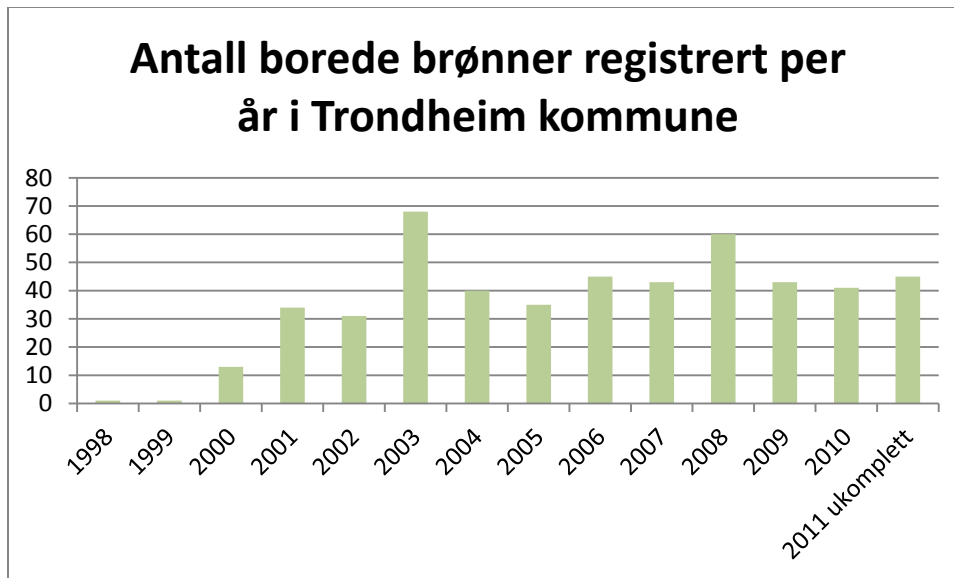


Figur 7. Kart over Trondheim kommune som viser grunnboringer med informasjon om dybde til fjell registrert av Trondheim kommune i grunnboringsdatabasen (grønne sirkler).

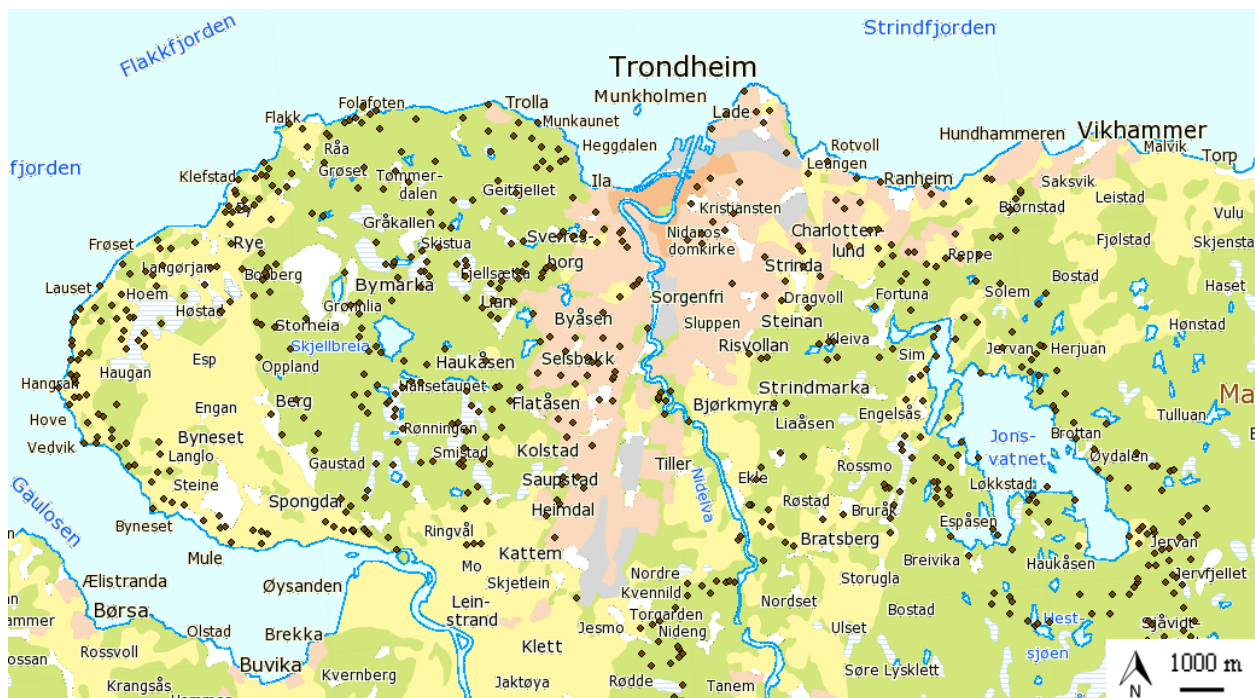
NGU registrerer alle innmeldte grunnvanns- og energibrønnboringer fra brønnboreselskaper i Granada (figur 3). Dataene er bearbeidet og gjort offentlig tilgjengelig gjennom en karttjeneste på www.ngu.no. Totalt antall brønner registrert i Granada er 63719 og av disse er det 16168 (25,4 %) energibrønner (31.5.2012) (NGU 2012d). De fleste brønnene har blitt registrert det siste tiåret, men før 1998 var allerede 17165 brønner registrert. Antallet innrapporterte brønner har økt gradvis fra 2002 frem til år 2007, mens de siste årene har det ligget stabilt på litt over 4000 innrapporterte brønner årlig (figur 8). Utviklingen skyldes at det ble innført rapporteringsplikt av brønner fra 1. januar 1997 gjennom ”Forskrift om oppgaveplikt ved brønnboring og grunnvannsundersøkelser”. Før 1998 var kun 53 brønner registrert i grunnvannsdatabasen i Trondheim kommune, men store mengder borede brønner har blitt registrert i løpet av de siste ti årene (figur 9) NGU har også laget kvartærgeologiske kart ved kartlegging av løsmasser og digitalisert disse (figur 4). Norge er for det meste kartlagt i målestokk 1:250 000, men deler av Norge er også blitt kartlagt i målestokk 1:20 000 (NGU 2012e). Kvartærgeologisk kart for Trondheim kommune er i målestokk 1:50 000. Punkter som viser fjellblotninger på analoge kvartærgeologiske kart har også blitt digitalisert ved NGU (figur 10).



Figur 8. Historisk utvikling: antall grunnvanns- og energibrønner registrert i Granada per år i Norge.



Figur 9. Historisk utvikling: antall grunnvanns- og energibrønner registrert i Granada per år i Trondheim.



Figur 10. Kart over Trondheim kommune med registrerte punkter med bart fjell (brune sirkler).

Registrerte brønner og fjellblotninger er representert ved punkt i kart, mens hver løsmassetype er representert ved flater i kart. Metadata (= data om dataene) til hvert punkt og hver flate er lagret i

attributtabeller. Bakgrunn i alle kart er basert på data fra Statens kartverk og alle kart er laget i projeksjonssone UTM 32 og datumet WGS 84.

2.5 MODELLERINGSVERKTØY

For å illustrere og beregne sannsynlig løsmassetykkelse ble programmene ArcGIS og Leapfrog mining brukt. Programmet ArcGIS ble valgt som verktøy ved utviklingen av de todimensjonale kartene (Esri 2010). Todimensjonale kart ble laget i modell 1 og 2 (kartfremstillinger av grunnlagsdata), samt i modell 3 og 5 (estimeringer av dybde til fjell). ”Dybde til fjell”-kartene i modell 3 og 5 ble estimert ved å bruke den geostatistiske metoden kriging i ArcGIS. ArcGIS brukes i Norge av diverse konsulentselskaper, kommuner, universiteter og statlige institusjoner. Kart i tre dimensjoner (modell 4) ble utviklet i Leapfrog mining (Aranz Geo 2012) ved å bruke implisitt modellering. Leapfrog mining er et program som brukes til geologisk modellering først og fremst i gruveindustrien. Alternative programmer i dette tilfellet kunne vært ISY WinMap eller GIS3D.

2.5.1 GEOSTATISTIKK

Før man tar i bruk geostatistiske metoder som kriging er det vanlig å gjennomgå beskrivende statistikk for datasettet for å bli kjent med det. Statistikk som beskriver et datasett er histogram, gjennomsnitt og varians. Et histogram angir hvordan datapunktene verdier er fordelt. Gjennomsnittet er lik summen av alle målte verdier i punkter delt på antall punkter. Variansen (σ^2) angir hvor spredt dataverdiene er i forhold til gjennomsnittlig verdi. Variansen er lik forventningsrett verdi minus gjennomsnittlig verdi opphøyd i andre (formel nedenfor). Standardavvik er lik kvadratroten til variansen (Armstrong 1998).

$$\sigma^2(Z) = E(Z - E(Z))^2 \quad (\text{Armstrong 1998})$$

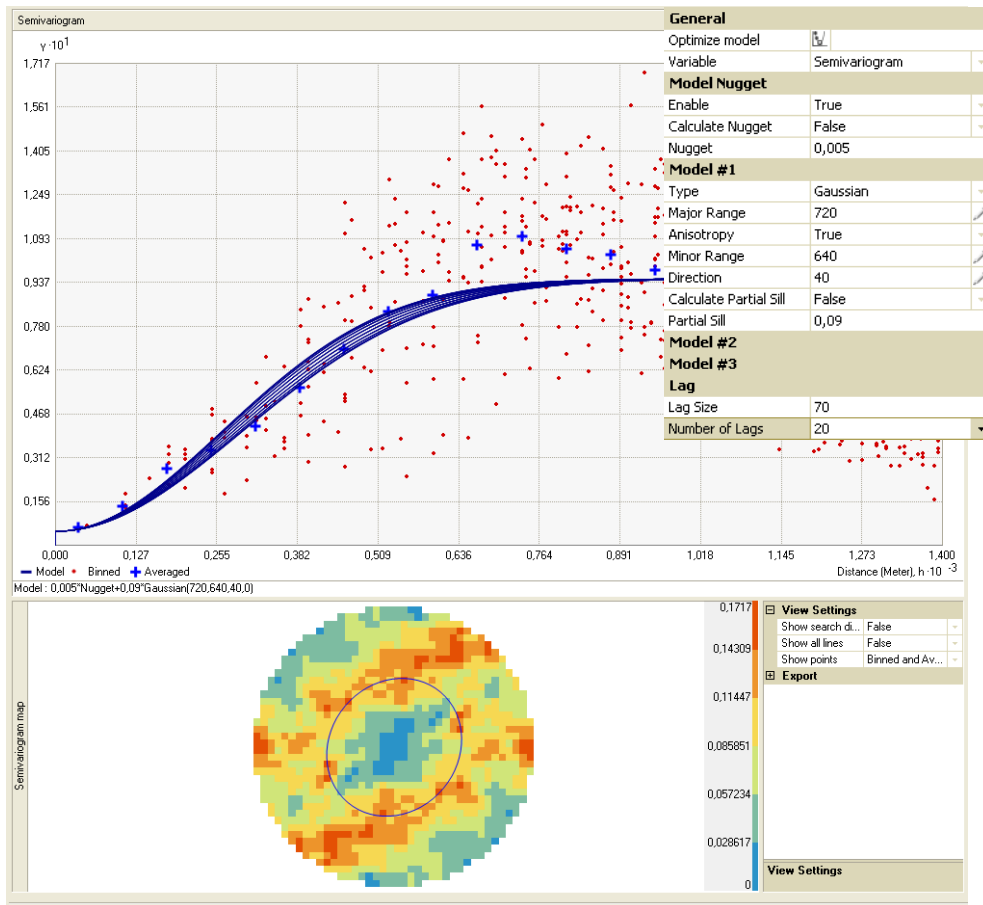
σ^2 = varians til Z

Z = ukjent punkt

E(Z) = forventningsverdi til Z (= gjennomsnittlig verdi)

Kriging er en geostatistisk metode som benyttes for å beregne verdier i områder uten grunnlagsdata. Ulike kriging metoder er ordinær kriging, indikatorkriging og universal kriging. Ved å benytte kriging går man ut ifra at det eksisterer en sammenheng mellom punkter og at nærliggende punkter har en større sammenheng med hverandre. Dermed kan man bruke nærliggende punkter til å finne verdien i et ukjent punkt. Beregningene for dette baseres på verdier i nærliggende punkter, avstander til nærliggende punkter og variogrammodellen til

punktene. Ordinær kriging og indikatorkriging er blitt benyttet i denne oppgaven. I ordinær kriging estimeres dybder til fjell, mens i indikatorkriging estimeres sannsynligheten for at dybden til fjell er større enn en definert grenseverdi. I indikatorkriging må følgende ekstra førstesteg gjennomføres. En grenseverdi må defineres og man må velge om man skal benytte sannsynligheten for at punktverdien er mindre eller større enn grenseverdien. I denne oppgaven tas det utgangspunkt i sannsynligheten for at verdiene er større enn grenseverdien. Hvis den analyserte verdien er over grensen blir den gitt verdien 1, hvis ikke får den verdien 0.



Figur 11. Øvre del viser en sfærisk variogrammodell (blå strek) tilpasset datapunkter med bestemte avstander mellom punkter (rød sirkel) samt gjennomsnittlige variogramverdier (blå kryss). Y-akse er lik variogramverdi, mens x-akse er lik avstand mellom punkter. Nedre del viser et eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.

For å kunne benytte kriging må et eksperimentelt variogram estimeres og en variogrammodell må tilpasses det eksperimentelle variogrammet (figur 11). Det finnes flere variogrammodeller, for eksempel sfærisk og gaussisk som har blitt benyttet i denne oppgaven. Den mest brukte modellen er sfærisk modell. Forskjellen i forhold til gaussisk modell er at en gaussisk modell brukes når det er stor grad av samvariasjon (likhet i verdier) ved korte avstander mellom punkter (noen meter). I variogrammet i figur 11 er y-aksen lik variogramverdien (= sammenhengen til

datapunktene avhengig av avstand mellom datapunktene) = $\gamma(h)$, mens x-aksen er avstanden mellom punktene = h . Variogrammet er lettest å lage for data som tilfredsstillt kravet om andregrads stasjonæritet. En variogrammodell kan til og med være umulig å lage hvis dette kravet ikke er oppfylt. Andregrads stasjonæritet tilsier at gjennomsnittet av alle punkter er konstant og at kovariansen er avhengig av avstanden mellom to punkter, men ikke punktets plassering. Dette fører i variogrammet til at variogramverdien ved store avstander (stor h) er konstant (figur 11). Variogrammodeller har en terskelverdi C (kalt "partial sill" i figur 11) som inntreffer når punktverdier er så langt ifra hverandre at de ikke lenger er avhengige av hverandre (kurve har flatet ut). Dette punktet angir også influensavstanden på x-aksen som tilsier at det ikke lenger er noen samvariasjon mellom punkter. Terskelverdien er gitt for stasjonære variabler som den verdien på y-aksen hvor variogramverdien er lik standardavviket til datasettet ($\gamma(h) = C = \sigma$).

Hvis det er lite samvariasjon mellom punkter med små avstander benyttes nugget effekt (kalt nugget i figur 11). Nugget effekt er representert i variogrammet ved at grafen ikke begynner i null, men i en positiv y-verdi (for eksempel 1). En søkeellipsoide kan ses i figur 11 som en svart sirkel i det eksperimentelle variogrammet. Søkeellipsoiden avgjør hvor stort område med punkter som skal inkluderes i estimeringen og hvor mange analyserte punkter som skal inkluderes (maksimums- og minimumsverdier). Størrelsen på ellipsoiden bestemmes ved aksestørrelser (hovedakse og underordnet akse) og disse bestemmes ut ifra rekkevidden til variogrammodellen (kalt "minor range" og "major range" i figur).

I det eksperimentelle variogrammet kan det forekomme geometrisk og zonal anisotropi. Geometrisk anisotropi vil si at det er ulik influensavstand i ulike retninger i det eksperimentelle variogrammet. Geometrisk anisotropi tas hensyn til ved å lage søkeellipsoiden elliptisk med en vinkel (kalt "direction" i figur 11) som angir plasseringen til ellipsen i x- og y-retning. Den lengste aksene i ellipsoiden rettes i retningen hvor det er høyest samvariasjon. Zonal anisotropi vil si at det er både ulik influensavstand og terskelverdi i ulike retninger i variogrammet. Ved zonal anisotropi deles variogrammet i to komponenter, en komponent som er lik i alle retninger og en komponent som bare virker i den vertikale retningen (Armstrong 1998).

Nedenfor forklares det i detalj hvordan ordinær kriging med punktverdier fungerer. En detaljert forklaring for indikatorkriging utelukkes siden denne metoden ikke er lineær og er mer komplisert. I ordinær kriging estimeres en verdi i et ikke-analysert punkt basert på en vektet lineær kombinasjon av verdiene i omkringliggende analyserte punkter (formel nedenfor). Den lineære kombinasjonen forutsetter at de kjente verdiene er additive, altså at gjennomsnittet i en sone må være lik gjennomsnittet av verdiene i sonen. Vektene størrelse avhenger av variogrammodellen og dermed også av avstanden mellom kjent og ukjent punkt.

$$\hat{Z} = \lambda_1 * Z_1 + \lambda_2 * Z_2 + \lambda_3 * Z_3 + \dots + \lambda_i * Z_i \quad (\text{Armstrong 1998})$$

\hat{Z} = ukjent verdi

Z_i = kjent verdi i analysert punkt i

λ_i = vekt til verdi Z_i

Summen av alle vektene må til sammen være lik null i ordinær kriging. Dette er fordi det i ordinær kriging ikke er forventet noen feil mellom estimert z-verdi og den reelle z-verdien. Estimeringsfeilen er definert som estimert verdi i ikke-analysert punkt minus reell verdi i ikke-analysert punkt. For å finne vektene til omkringliggende punkt minimeres variansen til estimeringsfeilen Φ ved å innføre Lagrange multiplikatoren μ . Variansen til estimeringsfeilen er gitt i formelen nedenfor.

$$\Phi = \text{Var} [\hat{Z}(v) - Z(v)] = 2 \sum \lambda_i * \bar{\gamma}(x_i, V) - \sum \sum \lambda_i \lambda_j * \gamma(x_i, x_j) - \bar{\gamma}(V, V) \quad (\text{Ellefmo 2011})$$

Φ = variansen til estimeringsfeilen

$\hat{Z}(v)$ = estimert verdi i ikke-analysert punkt

$Z(v)$ = reell verdi i ikke-analysert punkt

λ_i = vekt til verdi Z_i

λ_j = vekt til verdi Z_j

$\bar{\gamma}(x_i, V)$ = gjennomsnittlig variogramverdi til avstanden h mellom x_i og V

$\gamma(x_i, x_j)$ = variogramverdi til avstanden h mellom x_i og x_j

$\bar{\gamma}(V, V)$ = gjennomsnittlig variogramverdi til avstanden h mellom V og V

Resultatet blir et ligningssystem som kan brukes til å finne vektene til hvert punkt. For å løse dette ligningssystemet må variansverdien finnes ved å bruke variogrammet. Variogramverdier finnes ved å sette avstanden mellom to punkter inn i formelen gitt fra variogrammodellen (Armstrong 1998).

$$\gamma_{11} \cdot \lambda_1 + \gamma_{12} \cdot \lambda_2 + \dots + \gamma_{1N} \cdot \lambda_N + \mu = \gamma(x_1, x_0) \quad (\text{Ellefmo 2011})$$

$$\gamma_{21} \cdot \lambda_1 + \gamma_{22} \cdot \lambda_2 + \dots + \gamma_{2N} \cdot \lambda_N + \mu = \gamma(x_2, x_0)$$

.

.

$$\gamma_{N1} \cdot \lambda_1 + \gamma_{N2} \cdot \lambda_2 + \dots + \gamma_{NN} \cdot \lambda_N + \mu = \gamma(x_N, x_0)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N = 1$$

$\gamma_{ij} = \gamma(x_i, x_j)$ = variogramverdi til avstanden h mellom x_i og x_j

λ_i = vekt til verdi Z_i

μ = gjennomsnittsverdien til vektene

$\gamma(x_i, x_0)$ = variogramverdien til avstanden h mellom x_i og x_0

For å få estimerte verdier for et område brukes denne framgangsmåten for et stort antall datapunkter i et modelleringsprogram.

2.5.2 IMPLISITT MODELLERING

Implisitt modellering inkluderer metoder som benyttes for å beregne verdier i områder uten grunnlagsdata. Den implisitte modelleringsmetoden som benyttes i denne oppgaven er en volumfunksjon med radielle basisfunksjoner. For å kunne ta i bruk radielle basisfunksjoner antas det at dataene er stasjonære og man går ut ifra at det eksisterer en sammenheng mellom punkter samt at nærliggende punkter har en større sammenheng med hverandre (Cowan m. fl. 2002).

Radielle basisfunksjoner brukes i globale volumfunksjoner blant annet for å estimere tidsserier eller grafiske overflater i tre dimensjoner. Ofte brukes disse funksjonene når det er ønskelig å estimere verdier i ikke-analyserte punkter basert på et bestemt antall analyserte punkter. Eksempel på en basisfunksjon er "sferoidal function" som er gitt ved formlene nedenfor. Som det ses i formlene er radielle basisfunksjoner kun avhengige av avstanden fra det ikke-analyserte punktet til det analyserte punktet.

$$\begin{aligned} \text{Hvis } |x| \leq \left(\frac{c^2}{x^2 + c^2}\right)^{\frac{n}{2}} & \quad C = 1 - \frac{n}{2c\sqrt{n+1}}|x| & \quad (\text{Ross 2012}) \\ \text{Hvis } |x| \geq \left(\frac{c^2}{x^2 + c^2}\right)^{\frac{n}{2}} & \quad C = \frac{1}{2} \left(\frac{n+2}{n+1}\right)^{\frac{n}{2}+1} \left(\frac{c^2}{|x|^2 + c^2}\right)^{\frac{n}{2}} \end{aligned}$$

I modell 4 benyttes volumfunksjoner med radielle basisfunksjoner til å lage en interpolert¹ modell av dybde til fjell i tre dimensjoner. Dette gjøres ved å utføre følgende steg:

1. Data validering (overføring av data til Leapfrog mining)
2. Geologisk tolkning (konstruksjon av strukturelle trender)
3. Bearbeiding av data (interpolering av den strukturelle trenden i kontaktpunktene)
4. Interpolasjon av bearbeidet data (konstruksjon av interpolert flate)

¹ Å interpolere = Å estimere verdier av funksjoner basert på kjente punkt.

Steg 4 er beskrevet i detalj nedenfor. En interpolert flate bygges opp av mange volumfunksjoner $s(x)$ (formel nedenfor). Tilpasning av volumfunksjonen gjøres ved å finne vektene til analyserte punkt og parametrene i $p(x)$. Vektene finnes ved å benytte seg av at estimerte verdier i analyserte punkter $s(x)$ er forskjellige fra de virkelige verdier $f(x)$. Denne egenskapen tas i bruk ved å sette opp ligningssystemer der de estimerte verdier i analyserte punkter settes lik de analyserte verdier ($f(x)=s(x)$). Dermed eksisterer det N antall ligninger som må løses for å finne vektene (Carr m. fl. 2003).

Formel for volumfunksjonen kan skrives som:

$$s(x) = p(x) + \sum \lambda_i \Phi(|x-x_i|) \quad (\text{Carr m. fl. 2003})$$

$p(x)$ = polynom av lav grad

Φ = basis funksjon (for eksempel r)

λ_i = vekt for punkt i

x_i = datapunkt i

Når man har funnet vektene kan man bruke den samme ligningen (volumfunksjonen) til å finne den interpolerte flaten ved å finne de estimerte verdier i ikke-analyserte punkt x siden den eneste ukjente er $s(x)$. Resultatet blir et utglattet bilde av virkeligheten.

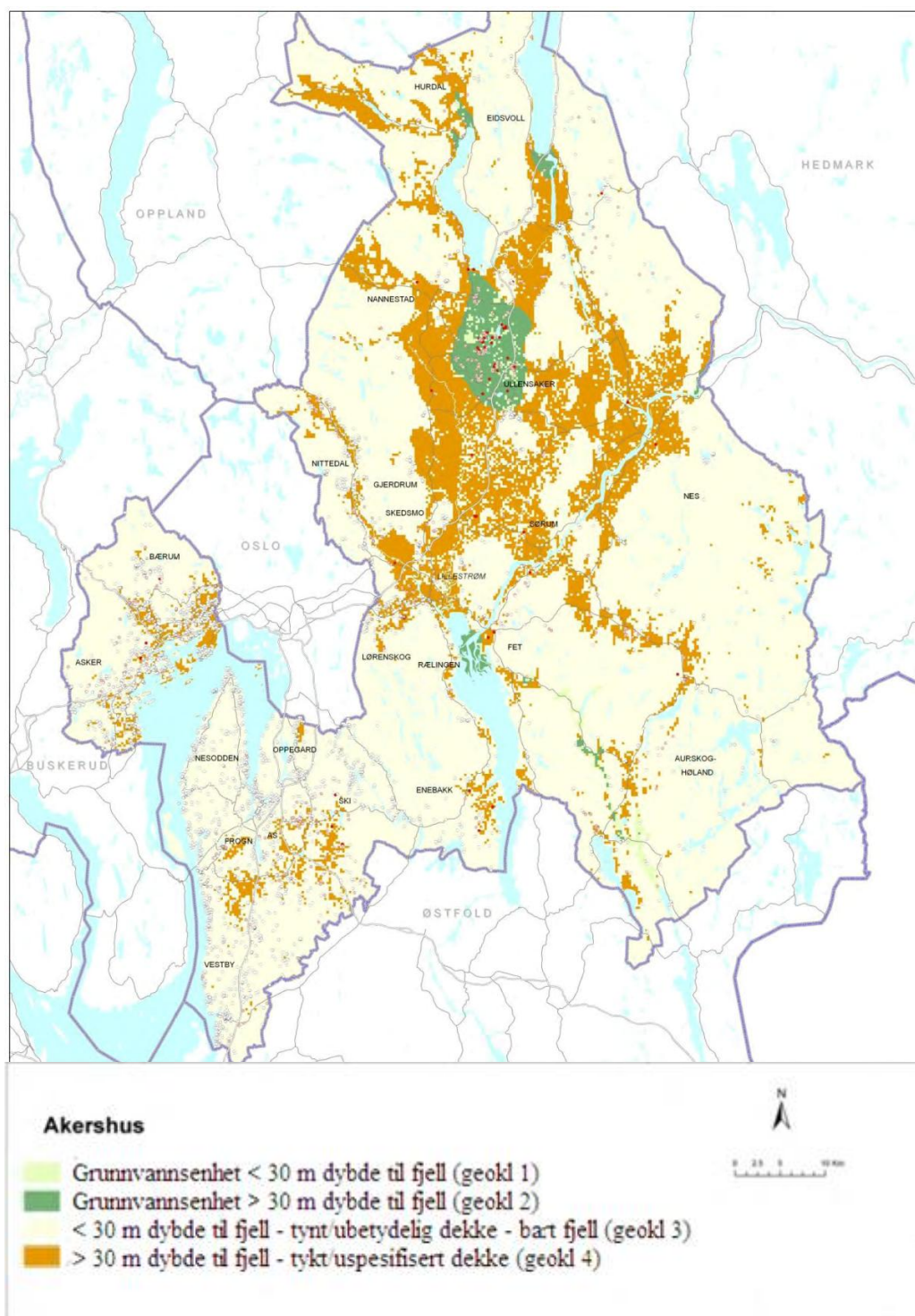
2.6 KART

I de neste avsnittene behandles rapporter som omhandler kart med dybde til fjell og internettsider som viser kvikkleirekart. Det finnes flere ulike metoder for å estimere og presentere løsmassetykkelse/dyp til fjell på. Metoder baseres på tilgjengelige informasjon som punkt- og flatedata hvor punkter kan være boringer og fjellblotninger, mens flater kan være områder med definerte løsmasstyper. Nedenfor er det beskrevet tre metoder for estimering av "dybde til fjell"-kart. Disse er hentet fra NVE rapporten "Grunnvarme i Norge – kartlegging av økonomisk potensial" utarbeidet av Asplan Viak (Ramstad 2011), Statens Vegvesen rapporten "SaltSMART - Salt i grunnvann" (Kitterød m.fl. 2011) utarbeidet av Bioforsk og Universitetet i Bergen (UiB), samt British Geological Survey informasjonsheftet "Superficial Deposits Thickness Model – V5" (Lawley m. fl. 2010). Stedvis forekomst av kvikkleire kan vises på ulike måter. Nedenfor er det gitt to metoder for kvikkleirekart som er hentet fra offentlig tilgjengelige internettsider. Den ene internettsiden er laget av NVE (www.skreddata.no), mens den andre er laget av Trondheim kommune (www.trondheim.kommune.no).

2.6.1 “DYBDE TIL FJELL”-KART UTVIKLET AV ASPLAN VIAK FOR NVE

I rapporten ”Grunnvarme i Norge – kartlegging av økonomisk potensial” (Ramstad 2011) ble informasjon om dybde til fjell kartlagt for å angi hvilke områder som er mest lønnsomme for etablering av grunnvarme. Lønnsomhet for grunnvarme avhenger i dette tilfellet av løsmassetykkelse og egnethet for uttak av grunnvann (grunnvannsenhet). Metoden for løsmassetykkelse baserer seg på løsmassetyper i kvartærgeologisk kart, brønnboringer i nasjonal grunnvannsdatabase, punkter med bart fjell og grunnvannsenheter.

Først får løsmasseflater og boringer nummer som viser dybde til fjell. Løsmasseflatene får nummer basert på den definerte tykkelsen til løsmassetypene (bart, tynt, ubetydelig = 3, mens tykt, uspesifisert = 4). Boringer får nummer basert på den registrerte dybden til fjell (< 30 m tilsvarer tallet 3, mens > 30 m tilsvarer tallet 4). Deretter deles norgeskartet inn i ruter på 250x250 m og den flaten eller punktet innenfor ruten med minst dybde til fjell blir valgt til å representere hele rutens dybde til fjell. Denne metoden deler altså ruter inn i tykt løsmassedekke (> 30 m dybde til fjell) eller tynt løsmassedekke (< 30 m dybde til fjell) (Ramstad 2011). Et resultat av denne metoden kan ses i figur 12.

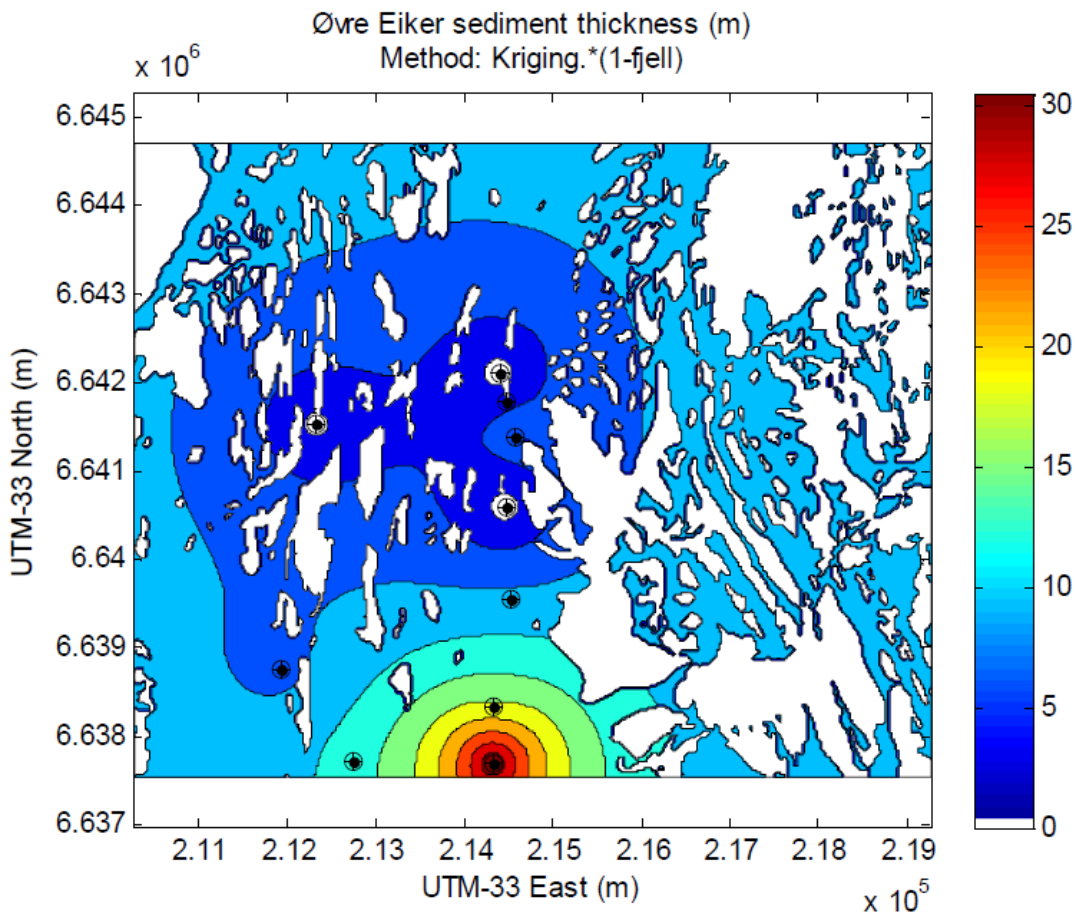


Figur 12. Modifisert kart fra rapporten ”Grunnvarme i Norge – kartlegging av økonomisk potensial” (Ramstad 2011). Kartet viser geologisk egnethet for uttak av grunnvarme basert på geoklasser for Akershus fylke. Oransje og mørkegrønne ruter viser områder med løsmassetykkelser > 30 m, mens lysegule og lysegrønne ruter viser områder med løsmassetykkelser < 30 m.

2.6.2 “DYBDE TIL FJELL”-KART LAGET AV BIOFORSK OG UIB FOR STATENS VEGVESEN

Dybde til fjell ble beregnet i rapporten ”SaltSMART - Salt i grunnvann” (Kitterød m. fl. 2011) for å estimere sårbarhet for angitte grunnvannsforekomster i Norge med hensyn til forurensning fra veisalt. Grunnvann er mindre sårbart i områder med stor løsmassemektighet. Foruten dataene som er brukt i metoden ovenfor, brukes også prøvetakingspunkter av blotninger fra Litoprojektet ved NGU og uttak fra grus- og pukkdatabasen til NGU.

I denne rapporten ble ordinær kriging brukt som modell (se avsnitt om kriging). Dermed bestemmes dybden til fjell i det ukjente punktet basert på dybden til fjell i de nærliggende punktene og variogramverdien til disse (Kitterød m.fl. 2011). Figur 13 viser et resultat av denne metoden.

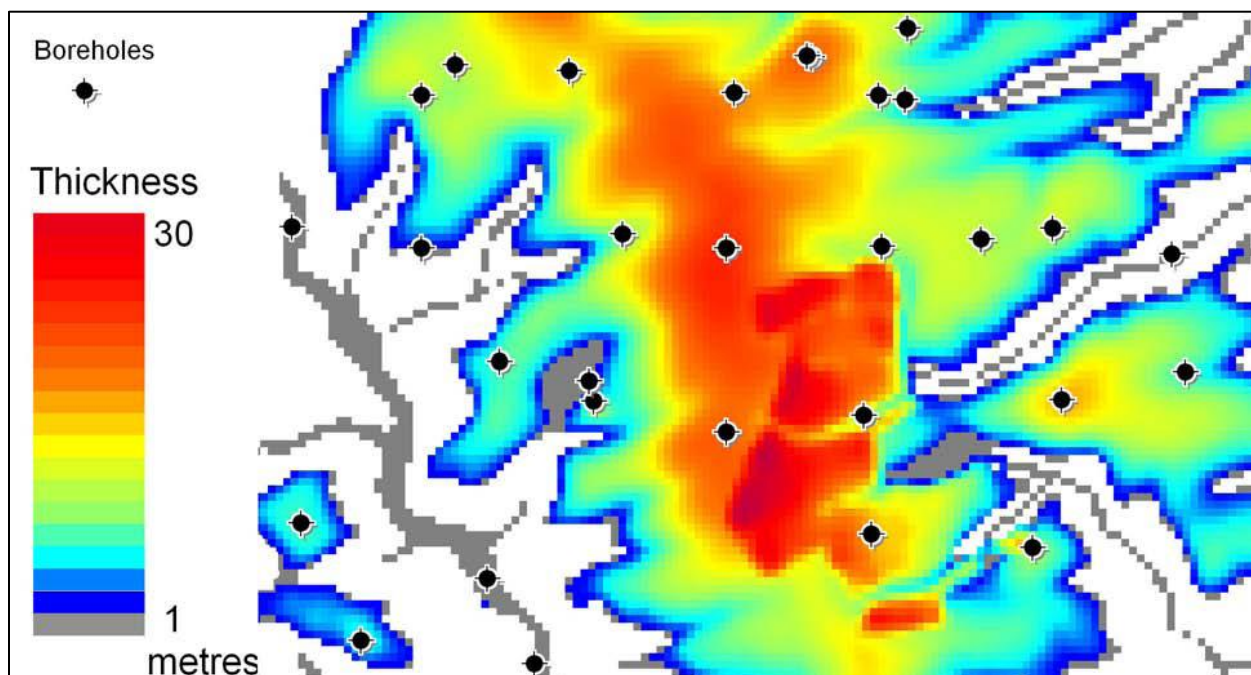


Figur 13. Utviklet “dybde til fjell”-kart i rapporten ”Salt SMART – Salt i grunnvann” utarbeidet av Bioforsk og UiB. (Kitterød m. fl. 2011).

2.6.3 “DYBDE TIL FJELL”-KART TATT I BRUK AV BRITISH GEOLOGICAL SURVEY

British Geological Survey har gitt ut flere informasjonshefter som beskriver deres metoder for estimering av dyp til fjell kart. Det siste informasjonsheftet heter ”Superficial Deposits Thickness Model – Version 5” (kartene er ikke tilgjengelige på nett per i dag) (Lawley m. fl. 2010). Metodene brukt for å finne dybde til fjell baserer seg på følgende grunnlagsdata: Brønner fra BGS Single Onshore Borehole Index, løsmassekart av Storbritannia i målestokk 1:50 000 kalt DiGMapGB - 50 version 5 og en topografisk modell med 50x50 m celler kalt Intermap NextMap © DTM.

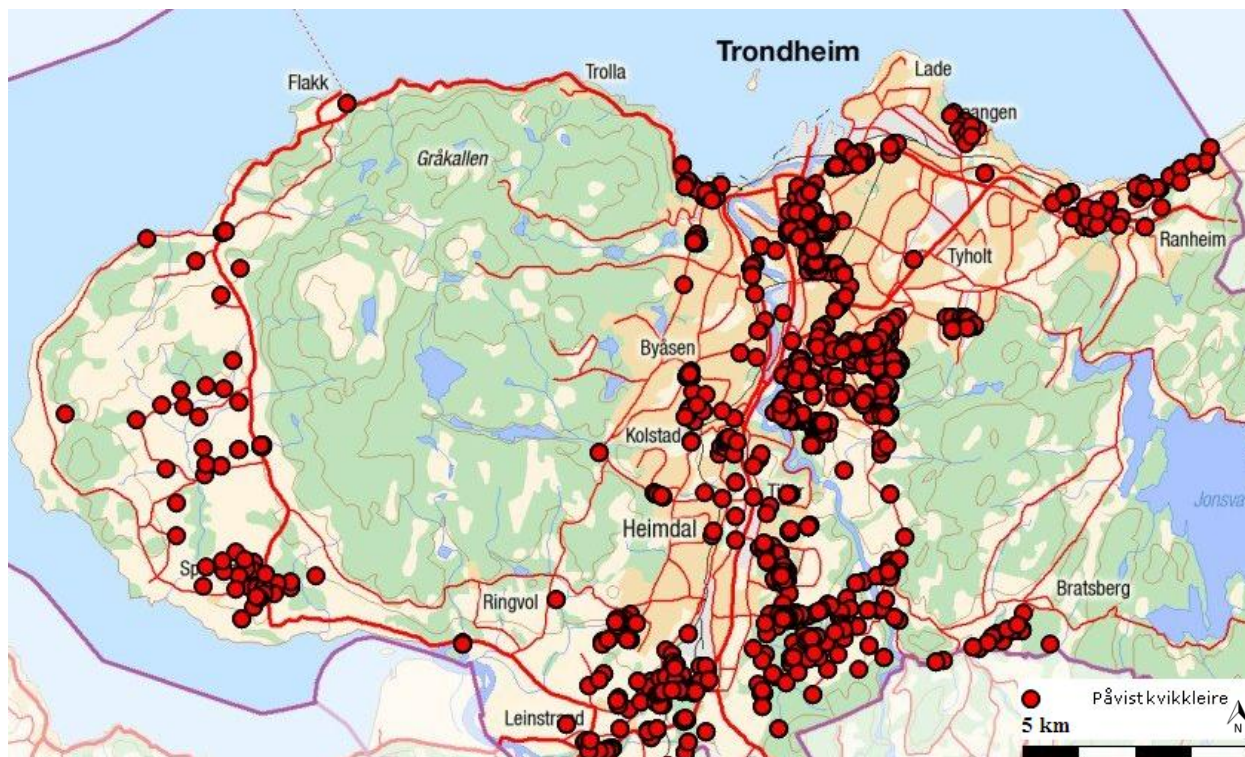
To ulike metoder har blitt utviklet ved å bruke programmene Vertical Mapper og MapInfo GIS. Den ene metoden (BSTM) består i å finne den beste interpolasjonen mellom kjente borepunkters tykkelse. I den andre metoden (ASTM) blir den interpolerte tykkelsen funnet på samme måte som i BSTM. Deretter blir tykkelsen funnet i hvert datapunkt sammenlignet med en digital terrengmodell og berggrunnsoverflatens høyde over havet blir bestemt. Høyden i hvert borepunkt og grensene til bart fjell blir så interpolert over hele kartet. Deretter blir denne modellen subtrahert fra den digitale terrengmodellen og resultatet er en modell som angir løsmassetykkelser. I begge disse metodene er cellestørrelsen 50x50 m og dataene er aggregert med en radius på 25 m. I figur 14 kan et resultat av metoden ses (Lawley m.fl. 2010).



Figur 14. Kart utarbeidet av BGS: Superficial Deposits Thickness Model – V5. Kartutklippet viser resultatet av ASTM metoden. Løsmassetykkelse er illustrert med farger fra grå (0 m) til rød (30 m) (Lawley m. fl. 2010).

2.6.4 KART OVER GRUNNBORINGER MED PÅVIST KVIKKLEIRE

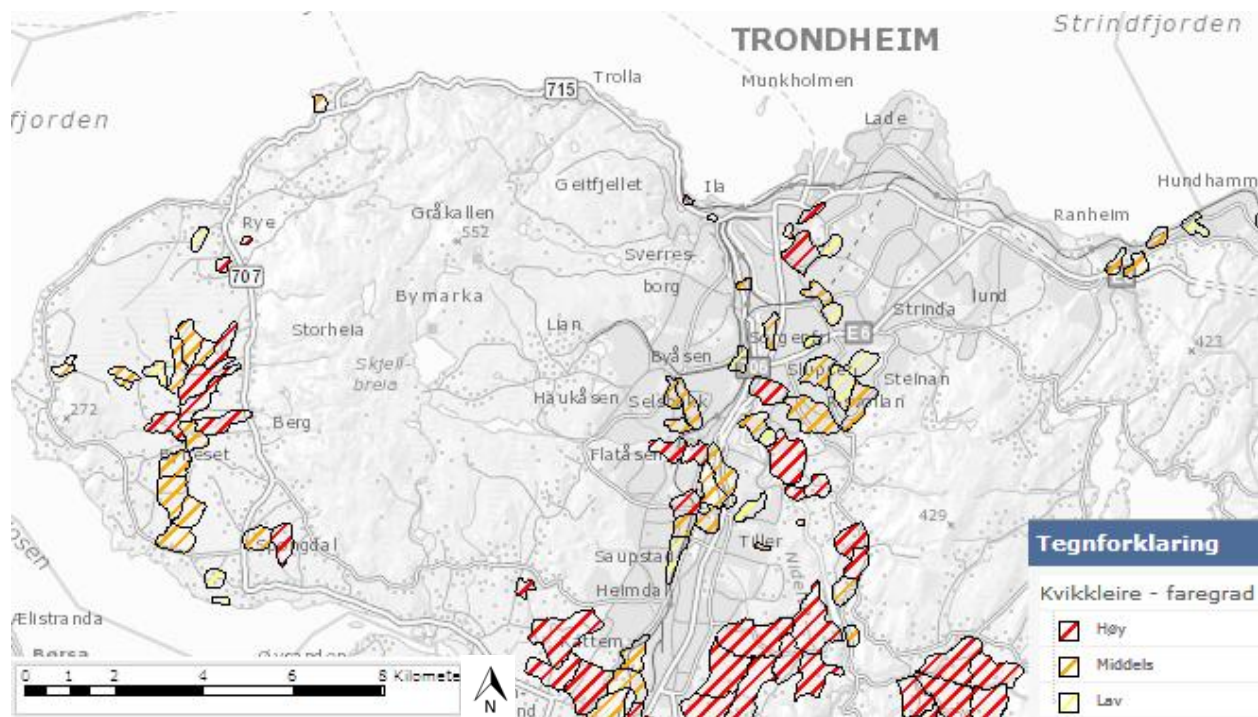
Trondheim kommune har laget et kart over grunnboringer med påvist kvikkleire. Dette kartet er offentlig tilgjengelig som et avledet tema for grunnboringsdatabasen i kommunens interaktive karttjeneste. Kartet viser alle grunnboringer med påvist kvikkleire utført av kommunen selv eller i samarbeid med konsulentselskaper (røde sirkler) (figur 15).



Figur 15. Modifisert kart over grunnboringer med påvist kvikkleire utarbeidet av Trondheim kommune (Trondheim kommune 2012).

2.6.5 KART MED FARSONER FOR KVIKKLEIRESKRED

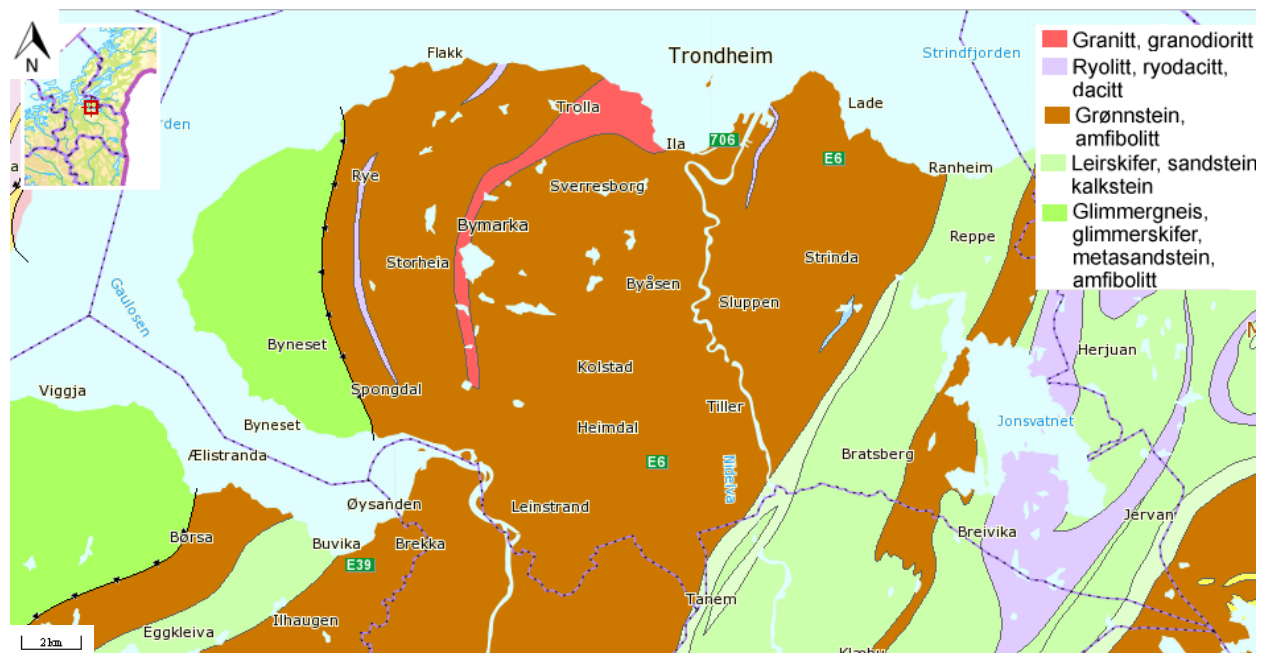
På skredatlas.nve.no ligger det offentlig tilgjengelige kart for kvikkleire med fare-, konsekvens- og risikosoner (figur 16). Kartene er laget som grunnlag for å avgrense aktsomhetsområder for kvikkleire. Avgrensning av kvikkleireområder baserer seg på forekomst av marinleire, påvisning av kvikkleire i grunnboringer og topografiske forhold. Ved klassifisering av faresoner vurderes også geotekniske forhold, hydrologiske forhold, erosjons- og grunnforhold, samt skredhistorikk (NVE 2011). Detaljer om klassifisering er ikke inkludert i denne oppgaven siden dette er utenfor problemstillingen, men det vises til Norges geologiske institutt (NGI) sin rapport ”Program for økt sikkerhet mot leirskred” (Gregersen, O. 2001).



Figur 16. Modifisert faresonekart for kvikkleire utarbeidet av NVE (NVE 2012a).

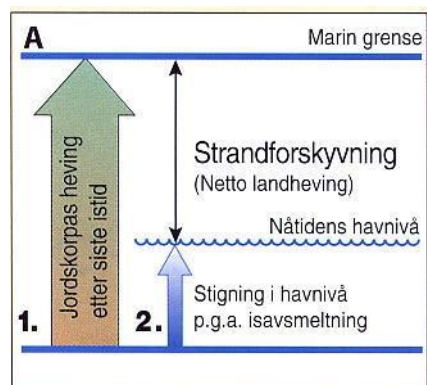
2.7 TRONDHEIMS GEOLOGISKE OG URBANE UTVIKLING

Løsmassene i Trondheim har blitt avsatt i løpet av de siste 12 000 årene. Berggrunnen ble derimot dannet i forbindelse med den Kaledonske fjellkjede sekvansen som varte i ca. 160 millioner år, fra ca. 520 millioner år før nåtid til 360 millioner år før nåtid (Sigmond 1985). Bergarter som grønnstein og tuff, samt noe senere dannet skifer og sandstein ble foldet, transportert og omdannet, og utgjør i dag berggrunnen i Trøndelagsfylkene (figur 17). De forholdsvis svakere bergartene i den kaledonske fjellkjeden (svake i forhold til grunnfjellet) førte senere til produksjon av store mengder løsmasser i Trondheimsfeltet. Hevingen av Skandinavia i slutten av tertiærtiden (geologisk tidsperiode fra 65 til 1,8 millioner år siden) førte til høye kystfjell og bratte elver som gravde enda dypere V-daler. Nåtidens daler og fjorder følger i hovedsak de tidligere formede V-dalene og svakhetssonene. De mest markerte svakhetssonene i Trondheim kommune går i dag fra øst til vest og fra nordøst til sørvest. (Reite m. fl. 1999).



Figur 17. Berggrunnskart over Trondheim kommune (NGU 2012f).

Trondheim har vært dekket av isbreer flere ganger. Den siste isbreen som dekket Norges kontinentalsokkel trakk seg tilbake for 15 000 - 13 000 år siden (Andersen 1979) og brekanten endte opp 20 km øst for Tautra (Reite 1994). Breen rykket igjen frem i nordvestlig retning og stoppet opp i det som i dag kalles Tautratrinnet (10800-10500 f.Kr.) (Reite 1983). Spor av avsatte israndavsetninger fra dette trinnet kan ses i dag på Kvenild, Heimdal, Tiller og Ekle. Israndavsetninger er morenerygger og breelavsetninger som blir avsatt foran breen når den stopper opp i framrykkingen. Breelavsetninger dannes ved at sedimenter blir avsatt av breelvene ved foten av isbreen (Reite 1983).

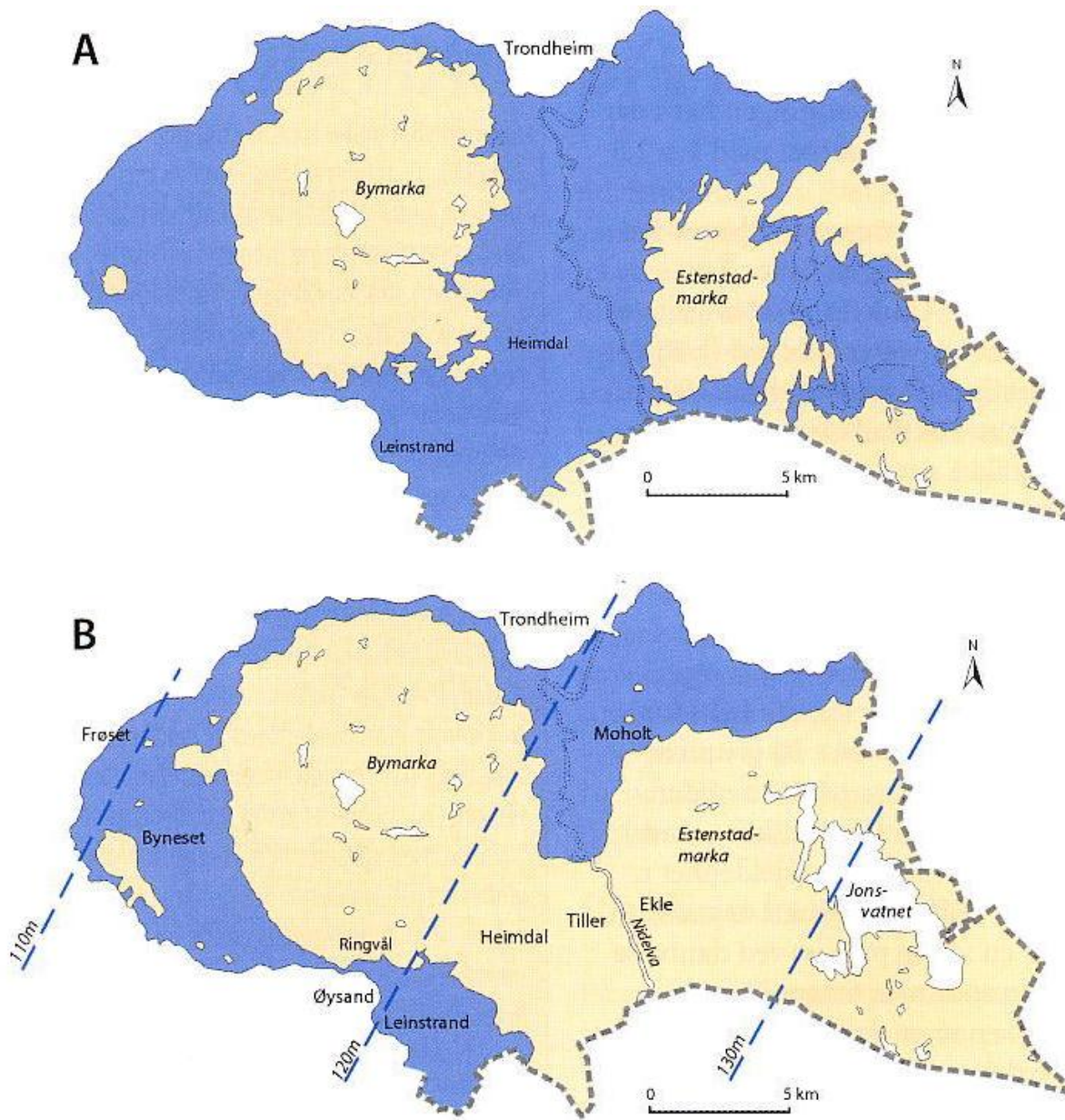


A. Strandforskyvningen er et nettoresultat av jordskorpeheving og havstigning (etter Sveian 1995).

Figur 18. Strandforskyvning = jordskorpeheving – stigning i havnivå (Reite m. fl. 1999).

Isranden fortsatte langs østsiden av Estenstadmarka og videre med en bretunge ned til Reppe og til Vikhammer. For 10 500 år siden smeltet isen og området som i dag utgjør Trondheim kommune ble isfritt bortsett fra et lite område ved Sjøvidthøgda øst for Jonsvatnet. Isen trakk seg ytterligere tilbake mens store mengder leire ble avsatt i Trondheimsområdet som da lå under vann (Reite m. fl. 1999). Idet isbreen forsvant begynte landhevingen. Denne førte til at det relative havnivået sank, selv om store mengder smeltevann ble tilført (figur 18). I dag kan spor av gamle strandlinjer ses ved 160 m over havet ved Sverresborg, Blyberget og Munkvollveien på Byåsen. Strandlinjen er cirka 10 m lavere enn det maksimum havnivå var ved sist istid. Ved et slikt havnivå var Bymarka og

Estenstadmarka de eneste områdene i kommunen som ikke var dekket av vann (figur 19, A). Det tok noen tusen år å heve landet til det nivået som er i dag. For 2000 år siden var havnivået cirka 10 m over dagens havnivå og bortsett fra Midtbyen var landskapet i Trondheim kommune ganske likt det som er i dag (Reite m.fl. 1999).



Figur 19. Havnivåets utvikling i Trondheim kommune. A. 11 500 år siden. Bymarka og Estenstadmarka ligger over marin grense. B. 9600 år siden. Heimdal og Tiller områdene blir tørre. Tyholt og Kuhaugen stikker også opp av havet (havnivå 120 m høyere enn i dag) (Reite m. fl 1999).

Mye av de gamle leirflatene dannet som fjordbunn er bevart på Byneset, Heimdal og Moholt. Elvene skjærte lenger ned i landskapet etter hvert som havnivået sank og dette skapte V-daler og utløste tallrike skred. Ved Øvre og Nedre Leirfossen har Nidelven skjært helt ned til fast fjell. Nidelvens elveløp har ikke alltid ligget der det er i dag, men gikk tidligere mer strakt ut ved domkirken. Øya-området nær sentrum ble dannet i løpet av de siste 2000 år ved at elven gravde i yttersvingen. Sand ble også avsatt i Midtbyen, mens strandkanten lå her (Reite m.fl. 1999). Det har vært mange leirskred i Trondheimsområdet, og groper og skredmateriale er spor som kan ses i landskapet som bevis på dette. I historisk tid har det blant annet gått store skred i Duedalen i 1625 (Helland 1898), på Tiller i 1816 (Helland 1898), og på Brå på Byneset i 1928 (Holmsen 1929).

På slutten av 900-tallet vokste det fram et bysamfunn på østre del av det som i dag er Midtbyen (Kjøpmannsgata og Krambugata). Fram til 1920 var det bymessig bebyggelse kun i Midtbyen og i områdene innover Lademoen, Bakklandet, Møllenberg og deler av Ila og Øya, mens store deler av det som senere ble Trondheim kommune var kun landbruksareal med spredt bosetning. Deretter ble Singsaker, Tyholt, Lade og deler av Byåsen tatt i bruk som boligarealer, og byen utvidet seg videre. Leire til bruk i teglverk ble tatt ut fra blant annet Teglverkstunet på Moholt og Teglverkstomta på Bakklandet. Sand og grus ble tatt fra breelavsetningene ved Torgård, Tiller og Ekle til blant annet asfalt- og betongproduksjon (Reite m.fl. 1999). Oppfylling av dalsøkk har funnet sted i Sluppen-området og utfylling av masser har funnet sted i havneområdet. Deriblant har hele Brattøra-området blitt dannet ved utfylling av masser.

3 METODE

3.1 TILRETTELEGGING AV GRUNNLAGSDATA

Nedenfor er filene brukt som grunnlagsdata beskrevet i detalj.

- Trondheim kommunes grunnboringsdatabase
 - ”Trondheim_kommune”
- NGUs nasjonale grunnvannsdatabase (Granada)
 - ”Granada”
- NGUs fjellblotningspunkt
 - ”Fjellblotning”
- NGUs løsmassekart
 - ”Løsmassekart” (Trondheim kommune i målestokk 1:50 000)

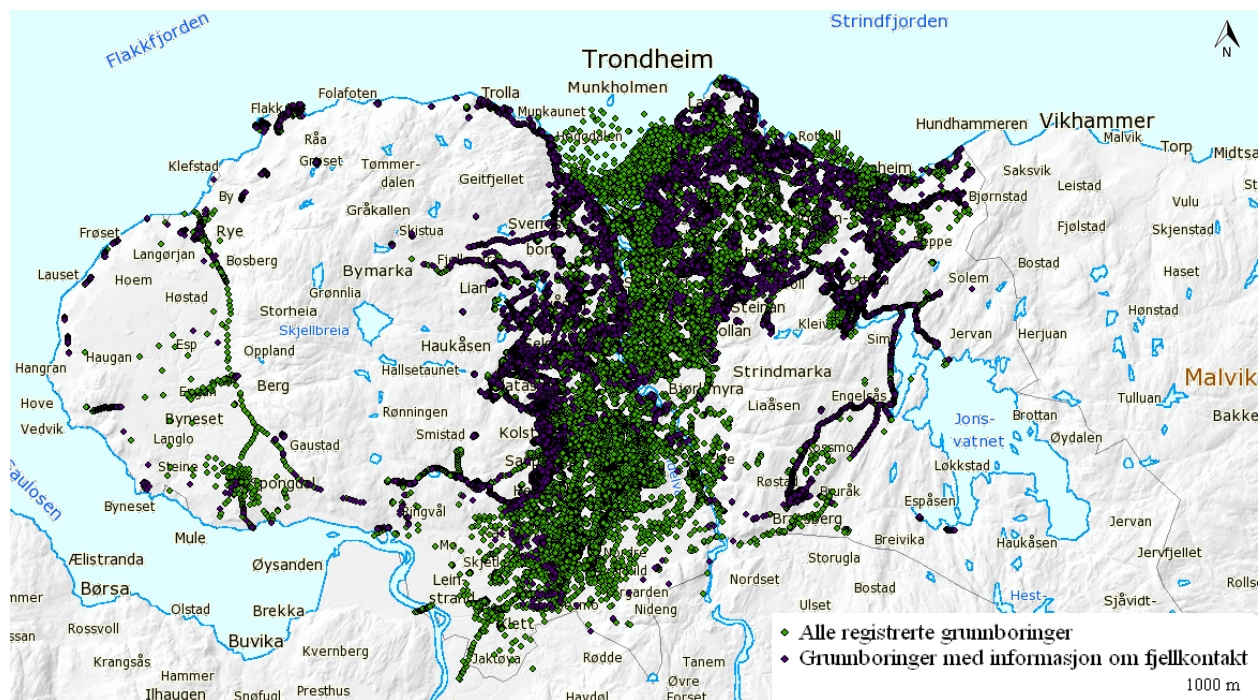
Fra Trondheim kommunes grunnboringsdatabase ble fire filer mottatt. Disse ble satt sammen til filen ”Trondheim_kommune”. Fra NGU ble data fra den nasjonale grunnvannsdatabase (Granada), samt filer med løsmassedata (løsmassekart og punkter for fjellblotninger) mottatt. Alle filene fra de to kildene ble overbrakt som ”feature”-filer som kunne brukes direkte i ArcGIS. ”Feature”-filene inneholder punkt-/flatekoordinater og metadata for hvert registrerte punkt/flate.

Tabell 1. Data brukt i de ulike ”dybde til fjell”-modellene.

Model l	Punktdata (Trondheim kommune, Granada, Fjellblotning, BartPunktFraFlate)		Flatedata (Løsmasse 0 m)	Kommentarer
	Fjellkontakt = JA	Fjellkontakt = NEI		
1	x	x	x	Fremstilling av datapunkter med farger gitt dybde til fjell/boreddybde og løsmasseflate (0 m).
2	x		x	Framstilling av datapunkter og løsmasseflate (0 m) i rutenett med farger gitt dybde til fjell.
3	x (kartutsnitt)			Estimering av dybde til fjell ved ordinær kriging.
4	x (kartutsnitt)			Estimering av dybde til fjell i tre dimensjoner ved radielle basisfunksjoner.
5	x (kartutsnitt)	x (kartutsnitt)		Estimering av dybde til fjell ved indikatorkriging.

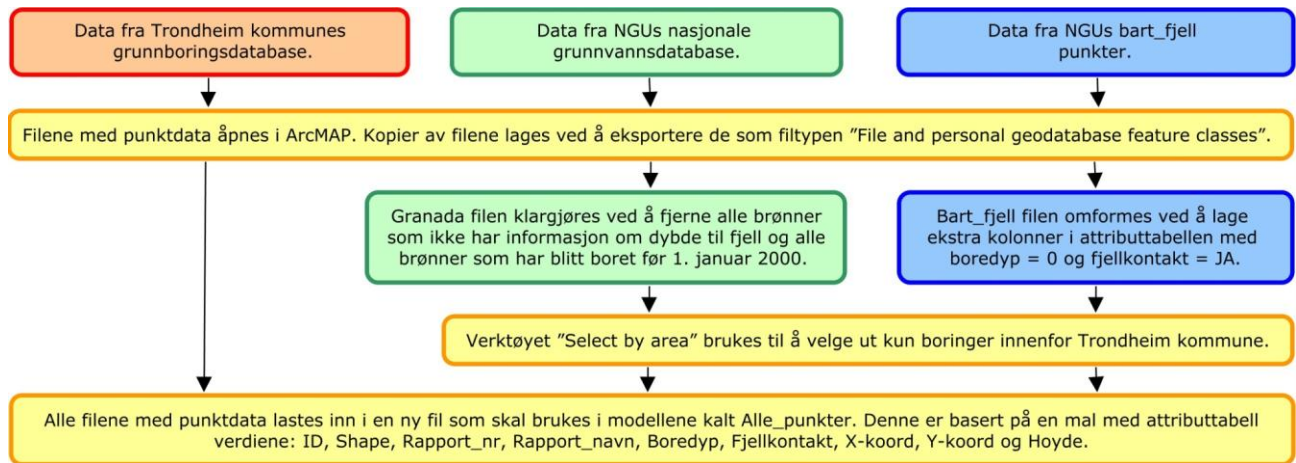
Alle datapunkter ses i figur 20, hvorav de punkter som har nådd fjell (informasjon om fjellkontakt) er vist i lilla. Ulikt grunnlagsmateriale har blitt brukt i de ulike modellene. Alle datapunkter, både de med og uten informasjon om fjellkontakt, tas i bruk i modell 1 og 5 (tabell 1). I de andre modellene (modell 2, 3 og 4) er det kun borer som har nådd fjell som brukes.

Selekteringen av disse punktene gjøres ved å bruke ”Select by attributes -> Fjellkontakt = JA”. Løsmassetyper med definert løsmassetykkelse lik 0 m (flatedata) brukes i modell 1 og 2 til å representere områder med 0 m tykkelse og i modell 3, 4 og 5 til å ekskludere områder med 0 m tykkelse (figur 22).



Figur 20. Alle punktdata uten fjellkontakt (grønne sirkler) og alle punktdata med informasjon om dybde til fjell (lilla sirkler) samlet i ett kart.

3.1.1 PUNKTDATA TIL BRUK I “DYBDE TIL FJELL”-KART



Figur 21. Flyttdiagram som illustrerer tilretteleggingen av grunnlagsdata for videre modellering.

Flytskjema for bearbeiding av punktdata er vist i figur 21. Filene med punktdata ("Trondheim_kommune", "Granada" og "Bart_fjell" (Fjellblotning)) åpnes i ArcGIS. Kopier av filene lages ved å eksportere de som filtypen "File and personal geodatabase feature classes". Alle filene går igjennom ulike redigeringer beskrevet nedenfor før de lastes inn ved "Load..." i en ny fil kalt Alle_punkter som er basert på en mal med attributtabel verdiene: "ID", "Shape", "Rapport_nr", "Rapport_navn", "Boredyp", "Fjellkontakt", "x-koord", "y-koord" og "Hoyde".

Redigeringer:

- "Granada"-filen organiseres ved å fjerne alle brønnpunkter som ikke har informasjon om dybde til fjell og alle brønnpunkter som har blitt boret før 1. januar 2000. Sistnevnte gjøres for å ha kun punkter som har blitt stedfestet med en viss nøyaktighet. Årstallet er basert på innføring av GPS og validering av punktenes dybde til fjell sammenlignet med dybde til fjell i kommunens grunnboringer i samme område. 21 brønner blir ekskludert fra Trondheim kommune ved "Select by attributes" fordi de har blitt boret før 1. januar 2000. Deretter brukes verktøyet "Select by area" til å velge ut bare borer som befinner seg innenfor Trondheim kommune.
- Filen med fjellblotninger omformes ved å lage to ekstra kolonner i attributtabelen med "Boredyp = 0" og "Fjellkontakt = JA". Deretter brukes verktøyet "Select by area" til å velge ut bare de borer som befinner seg innenfor Trondheim kommune.

3.1.2 FLATEDATA TIL BRUK I “DYBDE TIL FJELL”-KART

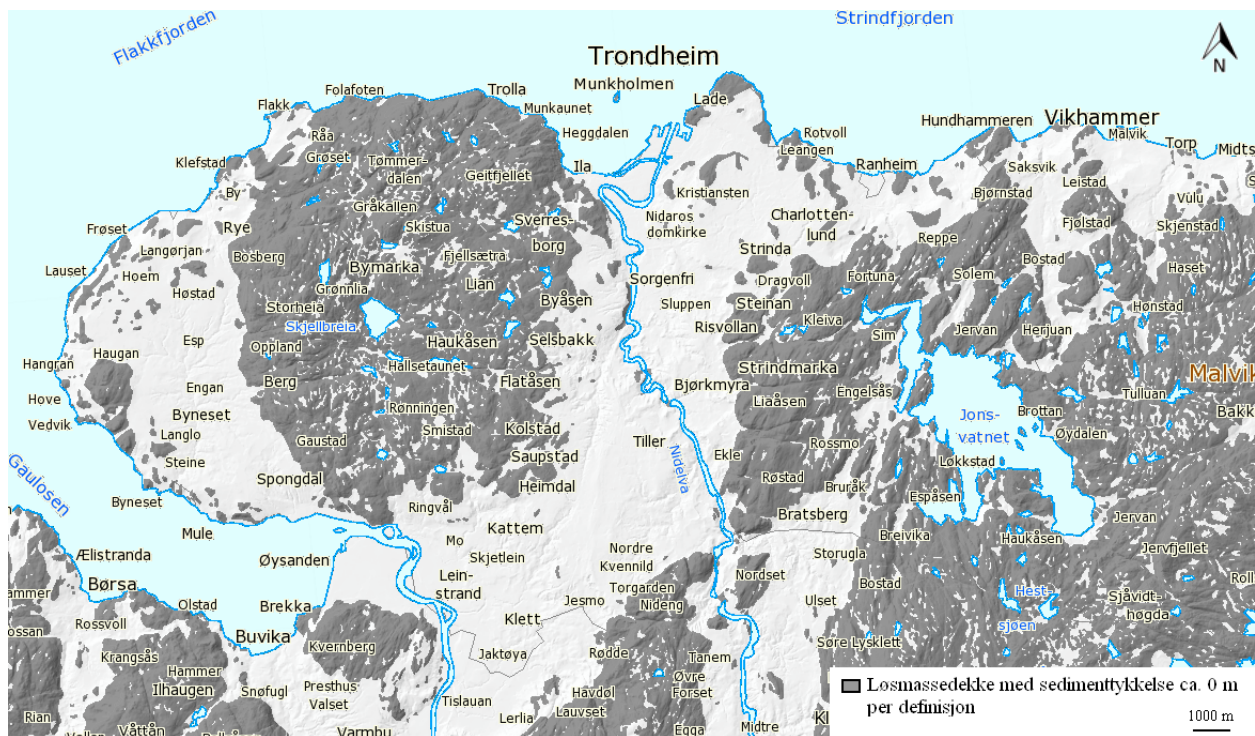
Filen "Løsmassekart" fra NGU åpnes i ArcGIS og kopieres ved å eksportere den som filtypen "File and personal geodatabase feature classes". Deretter defineres 10 løsmassetyper til å ha

løsmassetykkelse lik 0 m. Dette er løsmasser kartlagt til å ha usammenhengende/tynt dekke, eller til å være bart fjell. De definerte løsmassene med 0 m tykkelse velges ut ved å bruke "Select by attribute". Definisjonene på de ti løsmassetyperne er hentet fra NGU (2012g):

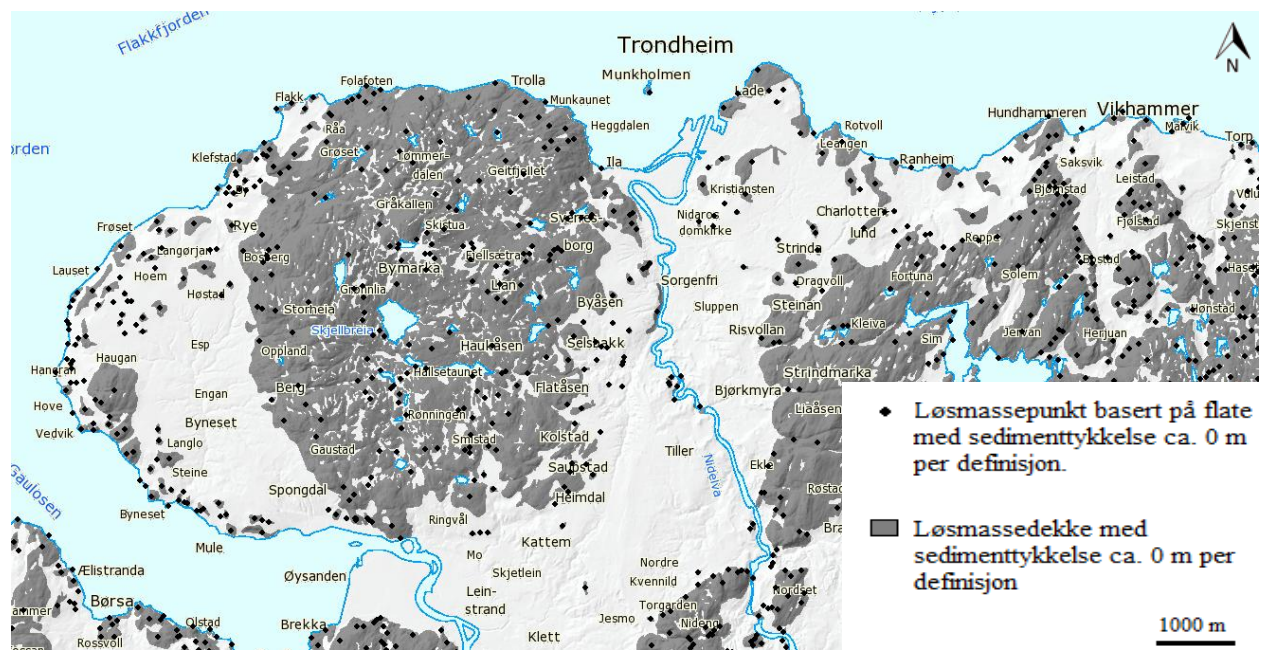
- 12: Morenemateriale, usammenhengende eller tynt dekke over berggrunnen
- 43: Hav og fjordavsetninger og strandavsetninger, usammenhengende eller tynt dekke over berggrunnen
- 52: Elveavsetninger, usammenhengende/tynt
- 55: Flomavsetninger, usammenhengende/tynt
- 72: Forvittringsmateriale, usammenhengende eller tynt dekke over berggrunnen
- 82: Skredmateriale, usammenhengende eller tynt dekke over berggrunnen
- 100: Humusdekke/tynt torvdekke over berggrunnen
- 101: Usammenhengende eller tynt løsmassedekke over berggrunnen, flere løsmassetyper, uspesifisert
- 130: Bart fjell
- 140: Bart fjell/fjell med usammenhengende el. tynt dekke.

Verktøyet "Select by area" brukes til å avgrense området, slik at kun flatedata som ligger innenfor Trondheim kommune blir brukt. Flatedataene brukes i modell 1 og 2 til å representere områder med 0 m løsmassetykkelse (figur 22).

I estimeringsverktøyene brukt i modell 3, 4 og 5 kan kun punktdata bli tatt i bruk. Derfor omgjøres løsmasseflatene som per definisjon har en løsmassetykkelse på 0 m til punkter og inkluderes i punktdataene. I modell 1 og 2 inkluderes også disse punktene, men dette vil ikke bidra med mer informasjon siden flatedata også inkluderes i disse modellene. Flatedataene representeres med punkter ved å bruke verktøyet "Feature to point" (figur 23). Det legges til to kolonner i attributt Tabellen med "Fjellkontakt = JA" og "Boreddybde = 0". Denne filen ved navn "BartPunktFraFlate" legges ved filen "Alle_punkter" ved å bruke "Load...".



Figur 22. Løsmassekart som viser løsmassetyper definert til å ha 0 m løsmassetykkelse (grå).



Figur 23. Løsmassekart over løsmassetyper definert til å ha 0 m løsmassetykkelse (grå flater) og konstruerte løsmassepunkt basert på løsmassetyper definert til å ha 0 m løsmassetykkelse (svarte sirkler).

3.1.3 PUNKTDATA TIL BRUK I KVIKKLEIREKART

Filen ”Trondheim_kommune” åpnes i ArcGIS. Kopi av filen lages ved å eksportere den som filtypen ”File and personal geodatabase feature classes”. Deretter velges punkter med kvikkleire ved ”Select by attributes” og lagres.

3.2 MODELLER

Konstruksjon av fem modeller som fremstiller dybde til fjell blir beskrevet nedenfor. I de to første modellene illustreres grunnlagsdataene, mens i de tre siste estimeres dybde til fjell basert på grunnlagsdataene. I teorikapittelet har det blitt sett på tre ulike metoder for ”dybde til fjell”-kart. Modifiserte versjoner av disse metodene har blitt testet på datagrunnlaget. Modell 2 er forholdsvis lik metoden med ruteinndeling og nummerering fra rapporten ”Grunnvarme i Norge – kartlegging av økonomisk potensial” (Ramstad 2011). Ordinær kriging i rapporten ”SaltSMART - Salt i grunnvann” (Kitterød m. fl. 2011) er den samme estimeringsmetoden som er brukt i modell 3. Metoden beskrevet for å estimere sedimenttykkelse i rapport ”Superficial Deposits Thickness Model – Version 5” (Lawley m. fl. 2010) ligner på det som gjøres i modell 4. Nedenfor beskrives også kart som viser grunnboringer med påvist kvikkleire og faresoner for kvikkleireskred.

3.2.1 BESKRIVENDE STATISTIKK

For å beskrive datagrunnlaget lages histogram, og gjennomsnitt og standardavvik beregnes. Dette gjøres både for datagrunnlaget som brukes i modell 1, 2, 3 og 4, og datagrunnlaget som brukes i modell5. Et histogram lages for å beskrive hvordan datapunktene er fordelt i forhold til variabelen dybde til fjell. Et variogram konstrueres for å se om dataene er stasjonære. Histogrammet lages ved å bruke ”Geostatistical Analyst -> Explore Data -> Histogram”. Gjennomsnitt og standardavvik estimeres også ved hjelp av denne funksjonen. Variogrammet lages ved hjelp av verktøyet ”Geostatistical analyst” i ArcGIS.

3.2.2 MODELL 1 - GRUNNLAGSDATA MED FARGEGRADERING

Kart lages med punkter med registrert dybde til fjell og løsmasselag som er definert til å ha løsmassetykkelse lik 0 m. Kart lages også med punkter som ikke har nådd fjell. Punkter vises i kart med farger avhengig av lengden til boringen i punktet.

3.2.3 MODELL 2 - RUTENETT

I denne modellen illustreres ruter med fargekoder gitt dybde til fjell. Trondheim kommunes areal illustreres med en flatefil basert på vanngrense og kommunegrense. Dette arealet deles så inn i ruter på 100x100 m. Verktøyet "Grid index features" brukes i ArcGIS for å utføre denne operasjonen. I den første rutefilen gis hver rute den gjennomsnittlige løsmassetykkelse til punkter som ligger innenfor ruten. Ruter uten punkter får ingen verdi. I den andre rutefilen gis hver rute løsmassetykkelse lik 0 hvis flater med 0 m løsmassetykkelse ligger innenfor ruten. Dette gjøres med verktøyet "Spatial join". Dette resulterer i to gitterfiler, en med ruteverdier fra løsmassedekket Løsmasser_0m og en med ruteverdier fra brønnpunktene. For å få disse to filene inn i en og samme fil må en del filoperasjoner gjennomføres. Begge filene må ha samme variabler i attributt Tabellen for å kunne bli satt sammen. For å lagre filene med nye attributtvariable brukes verktøyet "Create feature class" og "Load objects...". I løpet av denne prosessen velges det å bare beholde de rutene som har tallverdier for boreddybde. Attributt Tabellene har følgende parametere: "OBJECTID", "Shape", "Boredyp", "Shape Length" og "Shape Area".

Følgende verktøy tas deretter i bruk: "Intersect -> Erase -> Merge". "Intersect" brukes til å velge ut de rutene som har fått verdier både fra løsmassedekket og fra borepunkter. Deretter brukes "Erase" for å slette disse rutene fra filen med ruteverdier tatt fra løsmassedekket. Dette gjøres for å unngå å få dobbelt opp med verdier for noen ruter. "Merge" brukes for å legge de resterende to filene sammen: fil med borepunktdata + korrigeret fil med løsmasselag_0m.

3.2.4 MODELL 3 - ORDINÆR KRIGING

I dette tilfellet har det blitt valgt å lage en 2D modell av midtre del av Trondheim kommune (Sentrum, Leangen og Tiller) (figur 25). Området er avgrenset ut ifra hvor det er løsmasser med tykkelser større enn 0 m. I figur 26 kan statistikk over antall bygninger per 250x250 m rute og boringer med fjellkontakt ses. Statistikk over antall bygninger per 250x250 m rute er hentet fra Statistisk sentralbyrå (SSB 2012). Det spesifikke området av Trondheim kommune inkluderer arealer med høy bygningstetthet og mange boringer. En ny flate som viser det valgte området lages ved "Editor -> Clip" og punkter som befinner seg innenfor flaten selekteres ved å bruke verktøyet "Clip".



Figur 24. Flytskjema for geostatistisk analyse.

Det er flere steg i en geostatistisk analyse. Ovenfor er de tre stegene som gjennomføres i denne oppgaven gitt i et flytskjema (figur 24). Innledende analyse er gjennomført i avsnittet kalt ”Beskrivende statistikk”.

I strukturell analyse fremstilles et eksperimentelt variogram til dataene, og en variogrammodell tilpasses det eksperimentelle variogrammet. Hvis to punkter har samme koordinater velges punktet med størst løsmassetykkelse. I denne modellen har det blitt valgt å bruke en sfærisk variogrammodell med nugget effekt og geometrisk anisotropi (ulike lengder på aksene i søkeellipsoiden) fordi denne er best tilpasset datapunktene. Verktøyet som er brukt er ”Geostatistical analyst” i ArcGIS. Nugget effekt brukes når det er liten samvariasjon mellom nærliggende punkter (noen få meter). Dette vises i diagrammet ved at grafen ikke starter i $y=0$, men i $y=1$. I figur 27 ses et bilde av variogrammodellen og variablene brukt i modellen er listet opp. Geometrisk anisotropi ses som to ytre blå linjer i variogrammodellen.

En sfærisk modell ble valgt på tross av at denne ikke tilpasser dataene etter $h = 960$ m hvor datagjennomsnittet går ned i en bølgedal. Dataene fortsetter etter $h = 960$ m å ha en bølgete form. Dette fenomenet har blitt funnet for alle grader i søkeellipsoiden og det samme fenomenet forekommer i variogrammet utarbeidet for punkter med dybde til fjell i Norge i rapporten ”SaltSMART - Salt i grunnvann” (Kitterød m. fl. 2011). Bølgeeffekten indikerer at det er bedre sammenheng mellom punkter som er ca. 960 - 1740 m fra hverandre i forhold til de som er ca. 600 – 960 m og ca. 1740 – 2280 m fra hverandre. En modell kalt ”hole effect” som er bølgete ble forsøkt benyttet, men denne ga estimerte verdier med større avvik fra kjente verdier i de analyserte punktene enn det den sfæriske modellen gjorde.

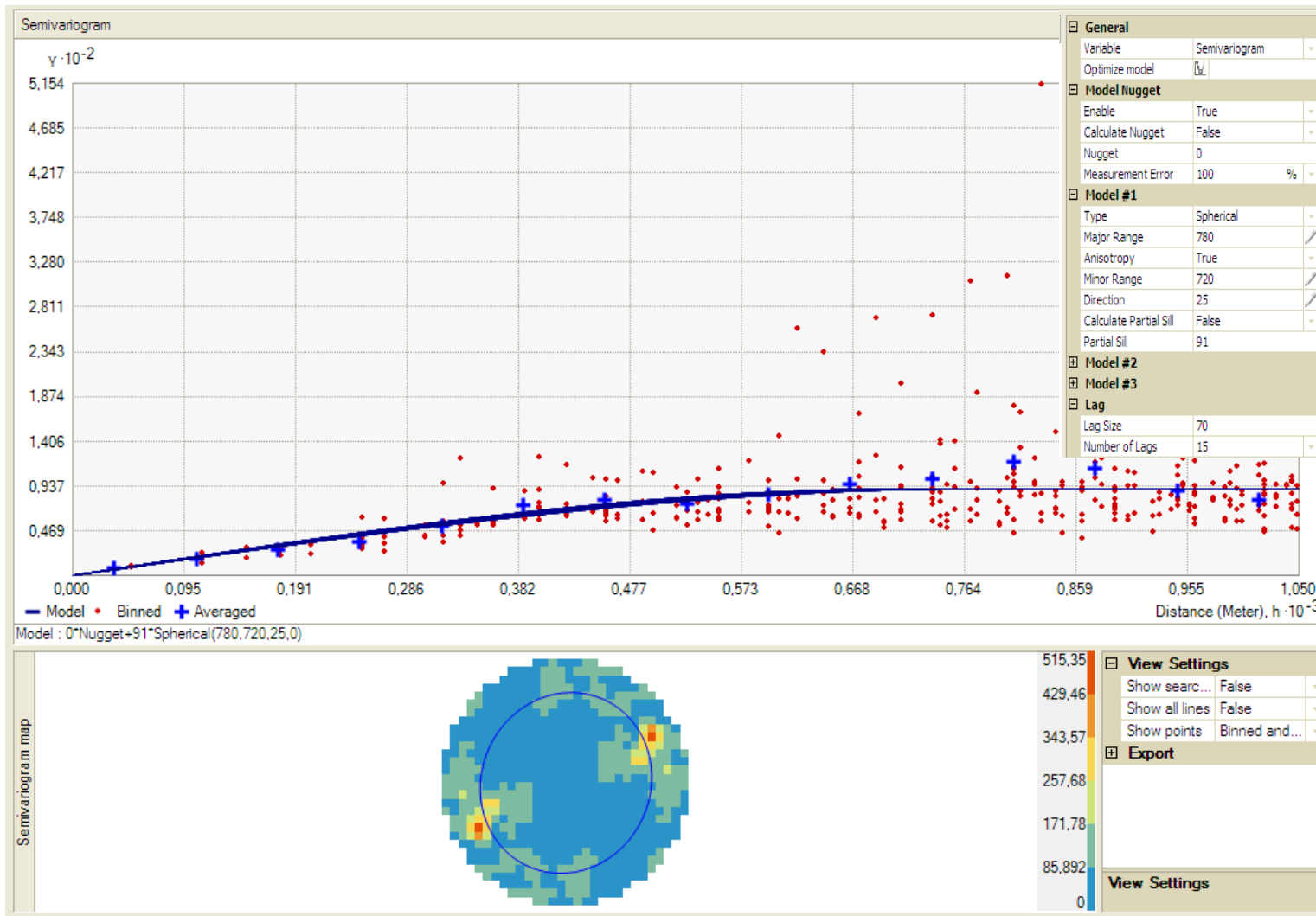
Tabell 2 angir variablene brukt for søkeellipsoiden i modellen. Ved estimering av en verdi i et ikke-analysert punkt, settes det ukjente punktet i sentrum av søkeellipsoiden og verdien estimeres basert på de analyserte punktene som er innenfor søkeellipsoiden og variogrammodellen. Parametrene for søkeellipsoiden ble valgt fordi de ga minst usikkerhet i de estimerte verdier.

Tabell 2. Parametre brukt for søkeellipsoide i modell 3.

Søkeellipsoide	
Maksimum antall nabopunkt	30
Minimum antall nabopunkt	10
Søkeellipsoidetype	○
Vinkel [grader]	25
Hovedakse [m]	780
Underordnet akse [m]	720
Anisotropifaktor	1,08

Ved hjelp av variogrammodellen og verdier i analyserte punkt blir verdier i ikke-analyserte punkter estimert. Til denne oppgaven brukes ordinær kriging med verktøyet "Geostatistical analyst" i ArcGIS.

For å illustrere de estimerte verdienes usikkerheter lages et kart med de estimerte verdienes standardavvik. Dette lages basert på det utviklede kartet med estimerte verdier ved å bruke "Change output to prediction standard error".



Figur 27. Øvre bilde: Sferisk variogrammodell brukt for dataene i modell 3. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^3 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sferiske modellen. Nedre bilde: Eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.

3.2.5 MODELL 4 - 3D MODELL

I dette tilfellet har det blitt valgt å lage en modell i tre dimensjoner over midtre del av Trondheim kommune (Sentrum, Leangen og Tiller) (likt område som i modell 3, figur 25). Ideen er å se på løsmassedekket som en malmkropp og å illustrere dette i tre dimensjoner i Leapfrog mining. Dataene gjøres klar til å overføres til Leapfrog mining ved å kopiere attributt Tabellen til et excel-dokument og bearbeide dokumentet i henhold til mal. For de punktene som har like koordinater velges kun punktet med den største løsmassetykkelsen. Fire filer lages i csv-format. Disse filene inneholder henholdsvis:

- ID
- x-koordinat
- y-koordinat
- z-koordinat
- Dybde til fjell
- Fallet til borehullet
- Asimut til borehullet

Fall og asimut fylles inn for de verdier hvor dette er oppgitt. I dette tilfellet er dette fylt inn for 34 brønner registrert i Granada med denne informasjonen. Øvrige brønner og borer er definert til å være vertikale.

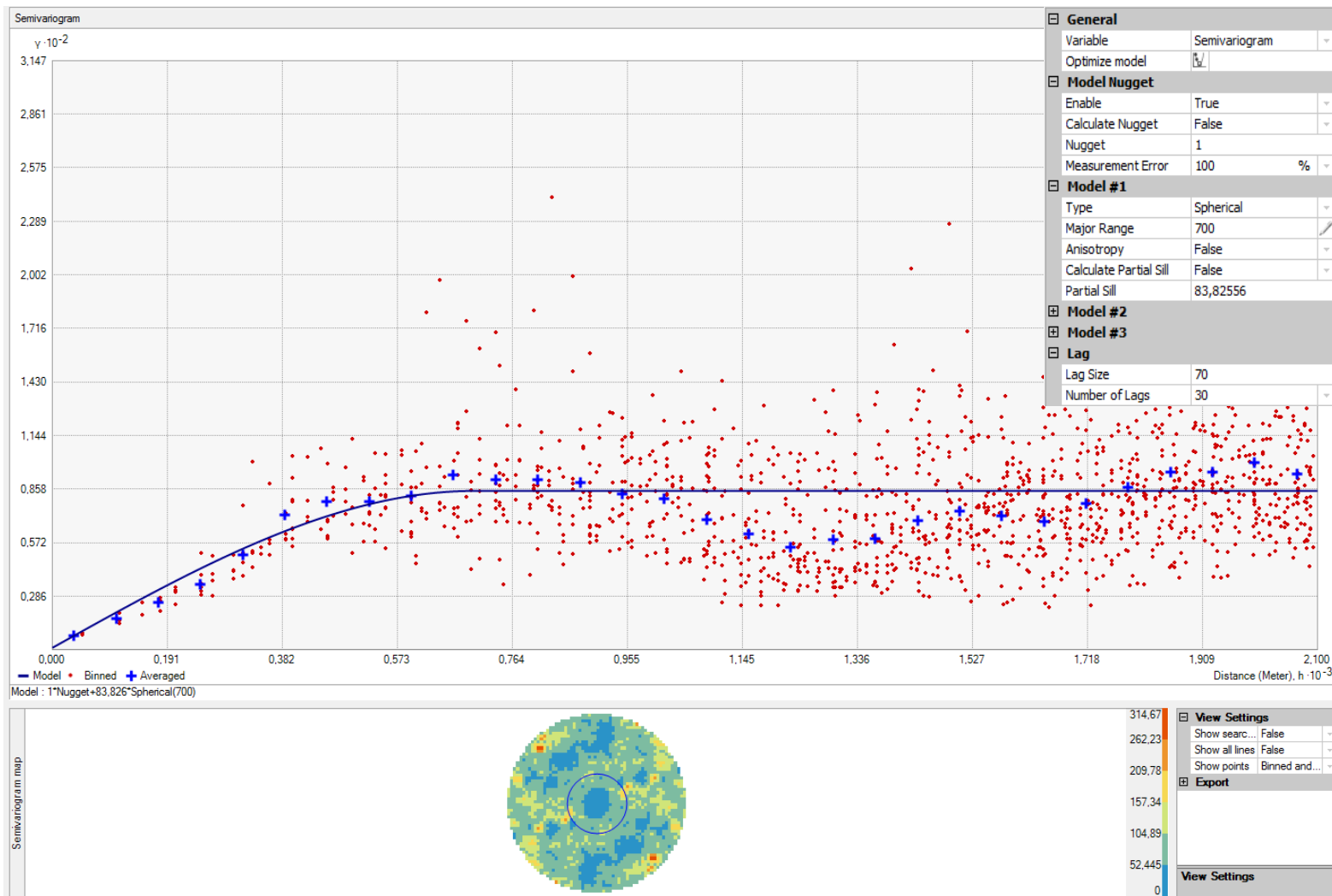
Filene lastes inn i Leapfrog. For å lage en 3D-modell er det flere operasjoner som må gjennomføres, og disse er:

1. Punkter som ligger på grensen mellom løsmassedekket og berggrunnen genereres ved å benytte filen "Geology" og ved å velge grensen mellom sediment og berggrunn ("Geology" -> extract points -> contact points"). Resultatet blir filen "Bedrock-sediment contact". Denne filen er basis for resten av modelleringsarbeidet.
2. En triangulert flate² lages basert på punktene mellom sediment og berggrunnen ("Bedrock-sediment contact -> surface triangle"). Dette gir filen "Bedrock-sediment contact surface". Dette gjøres for å kunne lage en strukturell trend³ (neste steg).
3. En strukturell trend lages basert på "Bedrock-sediment contact surface" ("Structural trend -> new structural trend"). Resultatet blir filen "Structural-trend". Denne lages for å brukes som en strukturell trend når en skal lage punkter over og under grensepunktene (neste steg).
4. Punkter over og under grensepunktene lages basert på "Bedrock-sediment contact" ("Bedrock-sediment contact -> surface values").

² Triangulert flate = en flate som består av et nett av sammenhengende trekanter.

³ Strukturell trend = strukturer i flaten (i dette tilfellet).

5. En overflate basert på grensepunkt lages ved å interpolere dataene innenfor et område gitt av *"BelowTopoInsideDataframe"*. Interpoleringen er basert på en variogrammodell samt en søkeellipsoide (*"Bedrock-sediment contact -> interpolate values"*). Den valgte variogrammodellen kan ses i figur 28 (lik variogrammodell som i modell 3, men uten anisotropi). Søkeellipsoiden har variablene listet opp i tabell 2. Resultatet blir 3D modellen *"Modell4"*.
6. Punkter med informasjon om løsmassetykkelse lages ved å bruke filen *"Assay"* (*"Assay -> extract points" -> assay points"*). Resultatet blir punktene samlet i filen *"Tykkelse"*. Denne filen lages for å kunne vise tykkelsen i plan.
7. Overflater som viser løsmassetykkelse med farger er laget av *"Modell4"* ved å evaluere overflaten basert på *"Tykkelse"*.
8. Overflate som viser avstand til nærmeste borepunkt er laget av *"Modell4"* ved å evaluere overflaten basert på filen som lages ved å bruke filen *"Tykkelse"* (*"Tykkelse -> distance interpolant"*).
9. Topografisk overflate lages basert på punkter med fem og ti meters mellomrom. Dette blir ikke beskrevet i detalj her fordi mange av de samme kommandoene som er brukt ovenfor brukes.



Figur 28. Øvre bilde: Sfærisk variogrammodell brukt for dataene i modell 3. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^3 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sfæriske modellen. Nedre bilde: Eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.

3.2.6 MODELL 5 - INDIKATORKRIGING

Den følgende metoden er tatt i bruk for å inkludere boringer som ikke har nådd fjell. Dette er en stor mengde med data som blir utelukket i de andre estimeringsmetodene. Dataene utelukkes i de andre modellene fordi modellene baserer estimerte verdier på kontaktpunktet mellom løsmasser og fjell. Modell 5 lages for midtre del av Trondheim kommune (Sentrum, Leangen og Tiller) (likt område som i modell 3 og 4, figur 25). For de punktene som har like koordinater velges kun punktet med den største løsmassetykkelsen.

Metoden går ut på å lage fem figurer basert på sannsynligheten for at dybde til fjell er større enn en gitt grenseverdi (grenseverdi = 1, 10, 20, 30, 50). Data med informasjon om fjellkontakt brukes i alle figurene. Data uten informasjon om fjellkontakt deles inn i grupper avhengig av hvor langt ned boringene har gått. Ett eksempel: de boringene som har gått lenger ned enn 50 m uten å treffe på fjell inkluderes med data med informasjon om fjellkontakt. Altså ekskluderes alle boringer som har blitt boret mindre enn 50 m og ikke nådd fjell. Til sammen danner alle boringer som har truffet på fjell og alle boringer som ikke har truffet på fjell, men har gått lenger ned enn 50 m grunnlaget for figuren som gir sannsynligheten for at dybde til fjell er dypere enn 50 m. Dette fører til at det blir ulikt datagrunnlag i hver modell, hvorav kartet for grenseverdi > 1 m har flest datapunkter siden denne modellen består av alle boringer som har nådd fjell + alle boringer som ikke har nådd fjell, men har blitt boret lenger ned enn 1 m.

Innledende analyse er gjennomført i avsnittet kalt "Beskrivende statistikk". I strukturell analyse fremstilles et eksperimentelt variogram til dataene, og en variogrammodell tilpasses det eksperimentelle variogrammet. Hvis to punkter har samme koordinater velges punktet med størst løsmassetykkelse. Variogrammodellene brukt kan ses i vedlegg A. I modellene for de første tre grenseverdiene benyttes sfærisk modell, mens gaussisk og "stable" modell benyttes for de to siste grenseverdimodellene. Gaussisk og Stable modell benyttes når punkter med små avstander mellom seg er veldig like. En lav nugget effekt er benyttet i alle modellene bortsett fra modell med grenseverdi > 50 m. Nugget effekt brukes når det er liten samvariasjon mellom nærliggende punkter (noen få meter). Det eksperimentelle variogrammet viser at det er ulike variogramverdier i ulike retninger, altså geometrisk anisotropi, i modellene for grenseverdi > 10 m, > 20 m og > 30 m. Dette tas hensyn til ved å ha ulike aksestørrelser på x- og y-aksen i søkeellipsoiden. Som i modell 3 hadde datasettet et bølgete utseende etter en viss avstand på x-aksen. En modell som viste hensyn til bølger ("hole effect") ble allikevel ikke brukt siden den ga estimerte verdier med større avvik fra kjente verdier ved kryssvalidering enn sfæriske og gaussiske modeller gjorde.

Tabell 3 angir de ulike søkeellipsoidene brukt for de ulike modellene. Parametrene for søkeellipsoiden ble valgt fordi de ga minst usikkerhet i de estimerte verdier.

Tabell 3. Søkeellipsoide for de ulike modellene med sannsynlighet for løsmassetykkelse > 1, 10, 20, 30 eller 50 m.

Søkeellipsoide					
Modell med sannsynlighet for løsmassetykkelse > x m	> 1m	> 10 m	> 20 m	> 30 m	> 50 m
Maksimum antall nabopunkt	30	30	30	30	30
Minimum antall nabopunkt	8	8	10	10	10
Søkeellipsoidetype	O	O	O	O	O
Vinkel [grader]	0	40	45	40	0
Hovedakse [m]	218	510	870	720	780
Underordnet akse [m]	218	460	790	640	780
Anisotropifaktor	1,0	1,11	1,10	1,13	1,0

Ved hjelp av variogrammodellen og verdier i analyserte punkter blir sannsynligheten for å overgå definerte grenseverdier for dybde til fjell i ikke-analyserte punkter estimert. Til denne oppgaven brukes indikatorkriging med verktøyet ”Geostatistical analyst” i ArcGIS. For å illustrere de estimerte verdienes usikkerheter lages et kart med verdienes standardavvik. Dette kartet lages basert på det utviklede kartet med estimerte verdier ved å bruke ”Change output to prediction standard error”.

De fem indikatorkriging kartene består av lag med sannsynlighet for å overgå definert grenseverdi i intervaller på 0,1 % fra 0 % til 1 %. Det gjøres et forsøk på å lage et kart som angir områder med sannsynlige dybder istedenfor sannsynlighet for at området overgår en definert grenseverdi. For å gjøre dette brukes kun intervallet (laget) med høyest sannsynlighet for å overgå grenseverdien (0,9-1 %). Dette laget velges ut fra alle grenseverdikartene og settes inn i et nytt kart. Hvert lag får en individuell farge avhengig av grenseverdien som det symboliserer. Kartet som har grenseverdi 1 m er spesielt. I dette kartet brukes alle sannsynlighetsintervaller for å unngå områder uten farge/data i det resulterende kartet. Sannsynlighetsintervaller under 50 % angis til å være < 1 m. Intervaller som er over 50 % angis til å være > 1 m. Det resulterende kartet blir et kart med områder som er større enn en gitt dybde til fjell med 90 % sannsynlighet. Den samme fremgangsmåten brukes også for å lage kart med områder med dybde til fjell som har en sannsynlighet på mer enn 70 % og 80 % til å overgå grenseverdiene.

3.2.7 MODELL - KVIKKLEIREKART

I det første kartet vises boringer med påvist kvikkleire (røde sirkler) og et løsmasselag som skal illustrere marine avsetninger i det kvartærgeologiske kartet, nemlig ”41: Hav- og fjordavsetninger, sammenhengende dekke, ofte med stor mektighet”. I det andre kartet inkluderes boringer med påvist kvikkleire og faregradsoner hentet fra kart på www.ngu.no. I det tredje kartet inkluderes boringer med og uten fjellkontakt.

4 RESULTATER

4.1 MODELLER

4.1.1 BESKRIVENDE STATISTIKK

Figur 29 viser histogram for dybde til fjell til datapunktene brukt i modell 1, 2, 3 og 4. Histogram for boreddybde til datapunktene brukt i modell 5 kan ses i vedlegg B. Ut ifra figur 29 ser det ut til at borepunktens dybde til fjell er log-normal fordelt. Fordelingen har en positiv skjevhet (de fleste punkter er fordelt til venstre i histogrammet) og fordelingen har høy kurtosis (spiss topp). Disse beskrivelsene gjelder også histogrammene til grunnlagsdata brukt i modell 5 i vedlegg B.

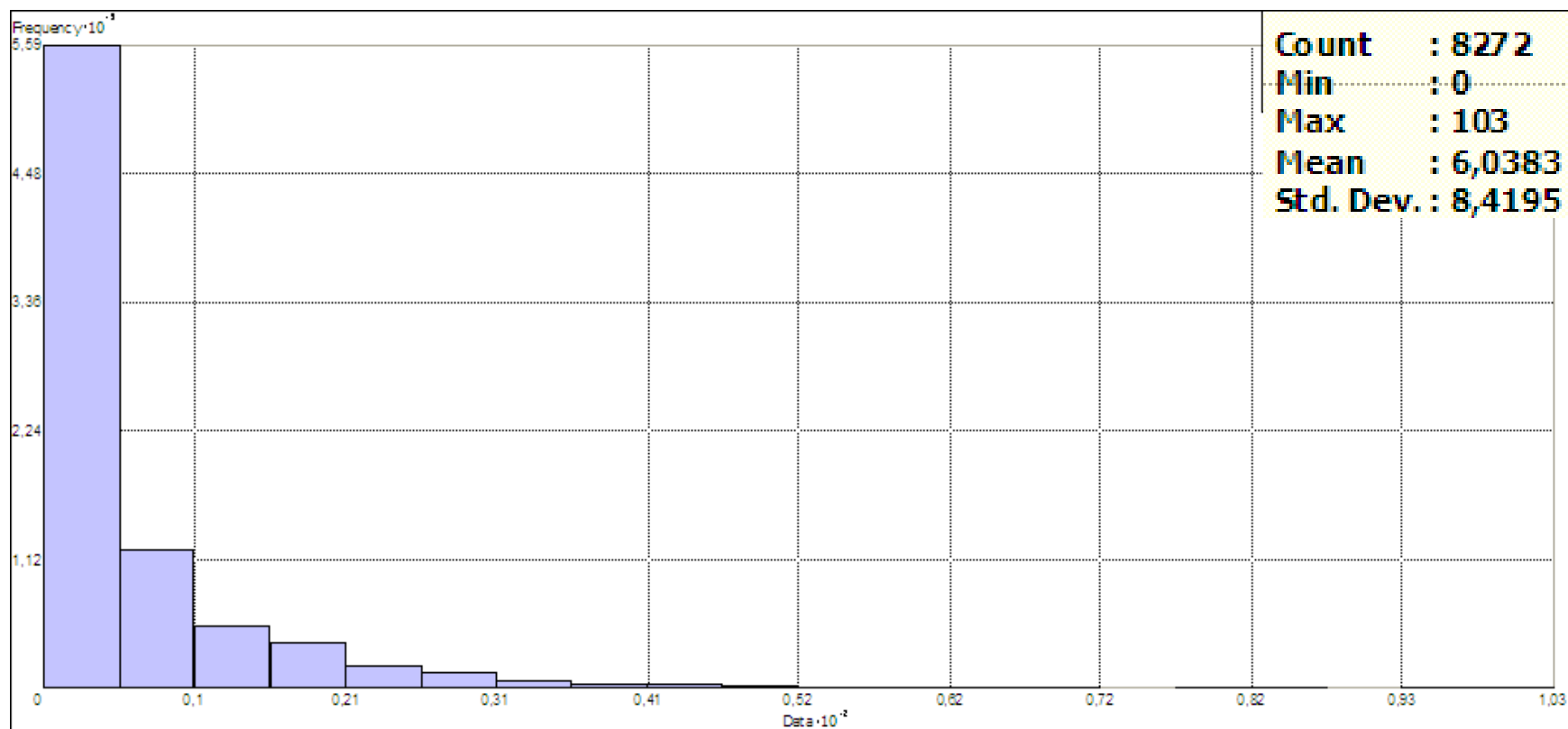
Antall datapunkter inkludert i modell 1, 2, 3 og 4 er 8272, hvorav dybde til fjell minimumsverdien er 0 m og maksimumsverdien er 103 m. Gjennomsnittet er 6,04 m og standardavviket er 8,42 m.

Tabell 4 oppsummerer den beskrivende statistikken til grunnlagsdataene brukt i modell 5. Antall datapunkter er størst ved lave grenseverdier. For eksempel ved grenseverdi > 1 inkluderes alle boringer som ikke har nådd fjell som har blitt boret dypere enn 1 m. Dette resulterer i 34410 datapunkter. Gjennomsnittsverdiene til boringene ligger rundt 9 m. Det er størst spredning i forhold til gjennomsnittet i modell med grenseverdi > 20 m hvor standardavviket er 12,8.

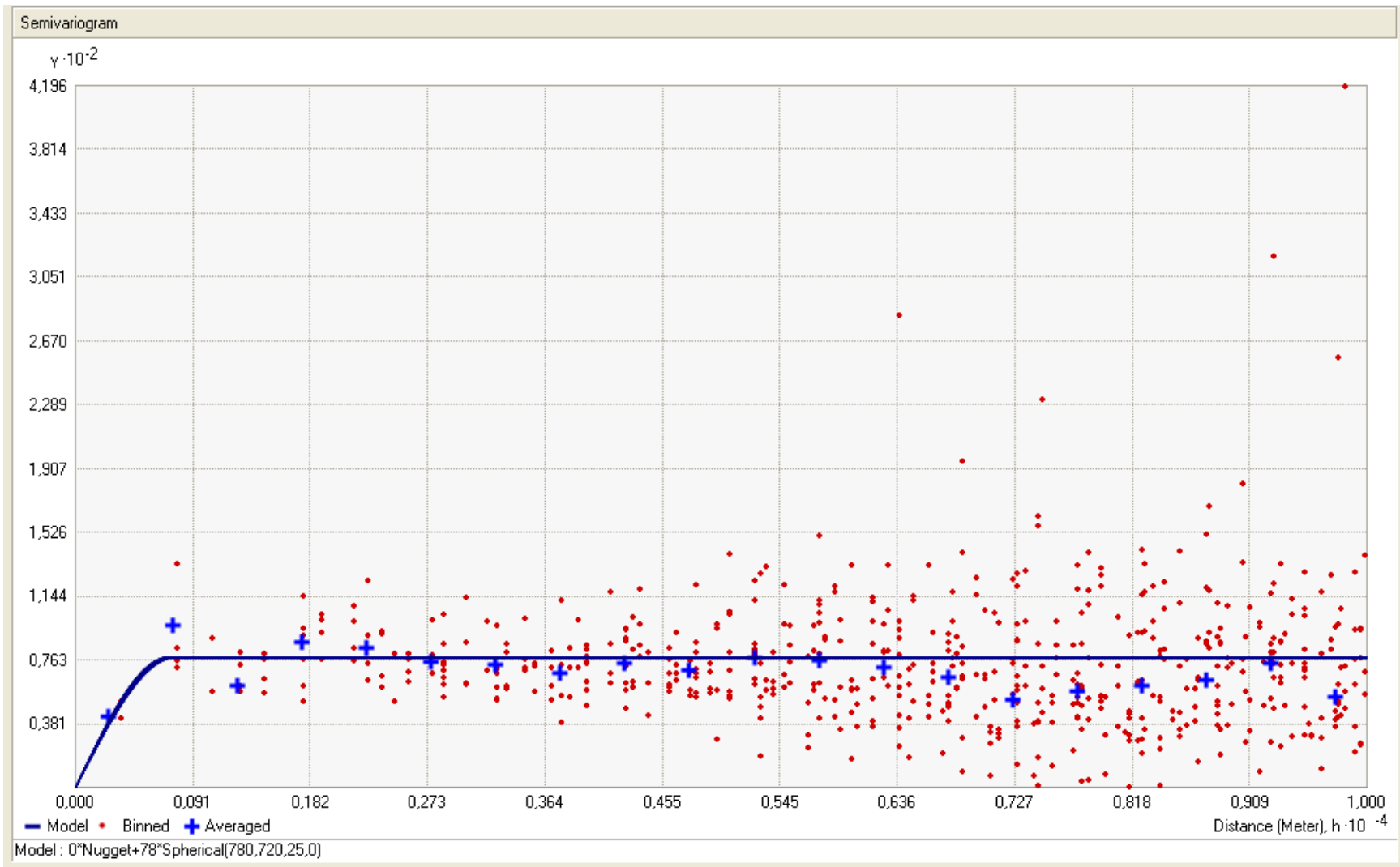
Figur 30 viser et variogram basert på datapunktene brukt i modell 1, 2, 3 og 4 med parameteren dybde til fjell. Variogrammet viser at datapunktene har en bølgete form ved økende avstand mellom punkter. Bølgen går langs en horisontal trend som ikke stiger. Dette indikerer at datagrunnlaget er andregrads stasjonært. Den samme antagelsen kan gjøres for grunnlagsdataene i modell 5 (variogrammer i vedlegg A).

Tabell 4. Antall datapunkt brukt i modellene, samt gjennomsnitt og standardavvik til datapunktene.

	Modell 5				
	Grenseverdi > 1	Grenseverdi > 10	Grenseverdi > 20	Grenseverdi > 30	Grenseverdi > 50
Antall datapunkter	34410	19253	11057	9341	8353
Gjennomsnittlig boreddybde	9,1	12,7	11,7	9,5	6,4
Standardavvik	8,6	10	12,8	12,6	9,5



Figur 29. Histogram for dybde til fjell til datasettet brukt i modell 3. x-aksen gir dybde til fjell (x100 m), mens y-aksen gir antall datapunkter som havner innenfor bestemte intervaller av dybder til fjell (x1000).

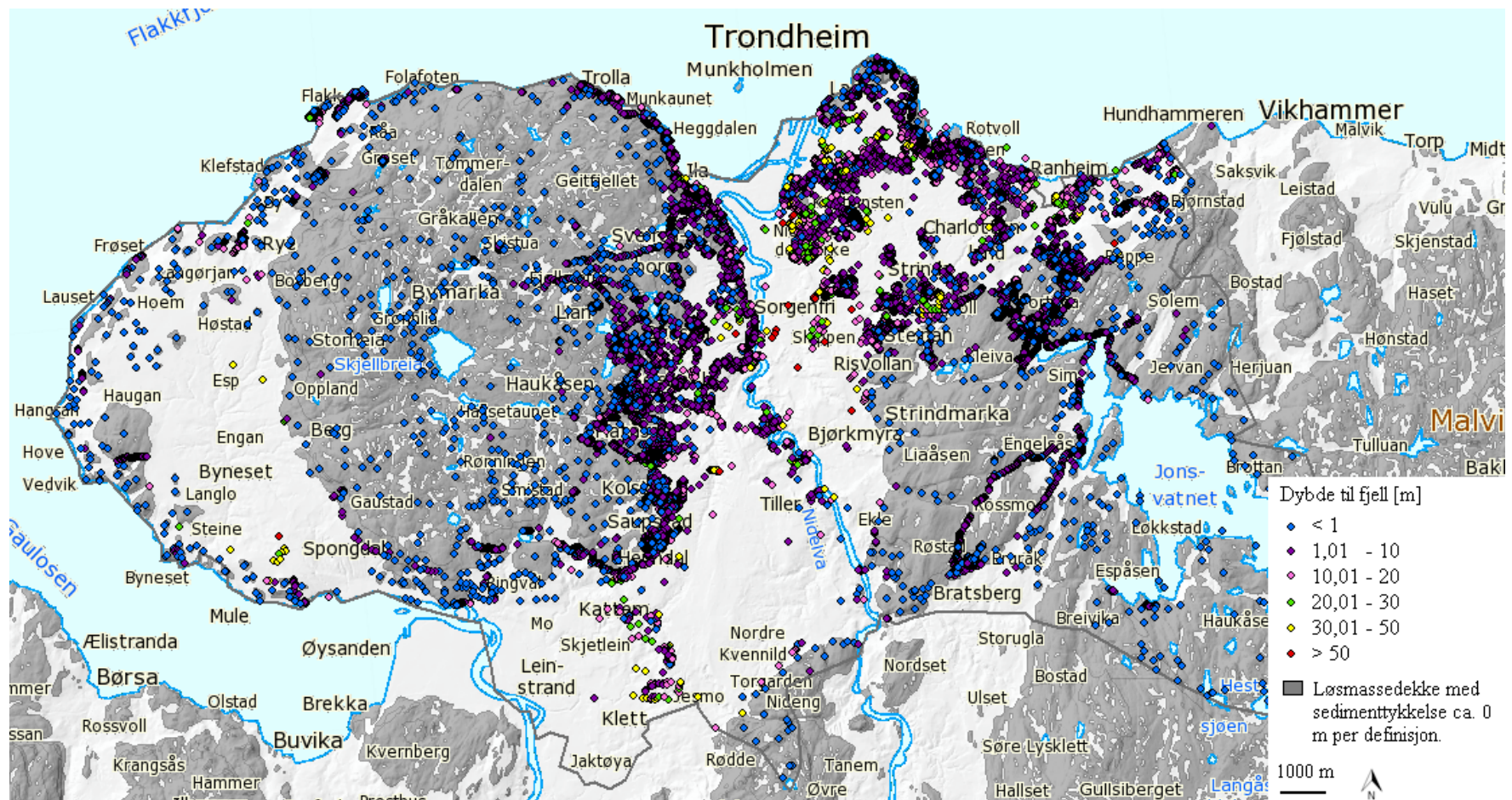


Figur 30. Variogram av grunnlagsdataene til modell 2, 3 og 4. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^4 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem [10^2]. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sfæriske modellen.

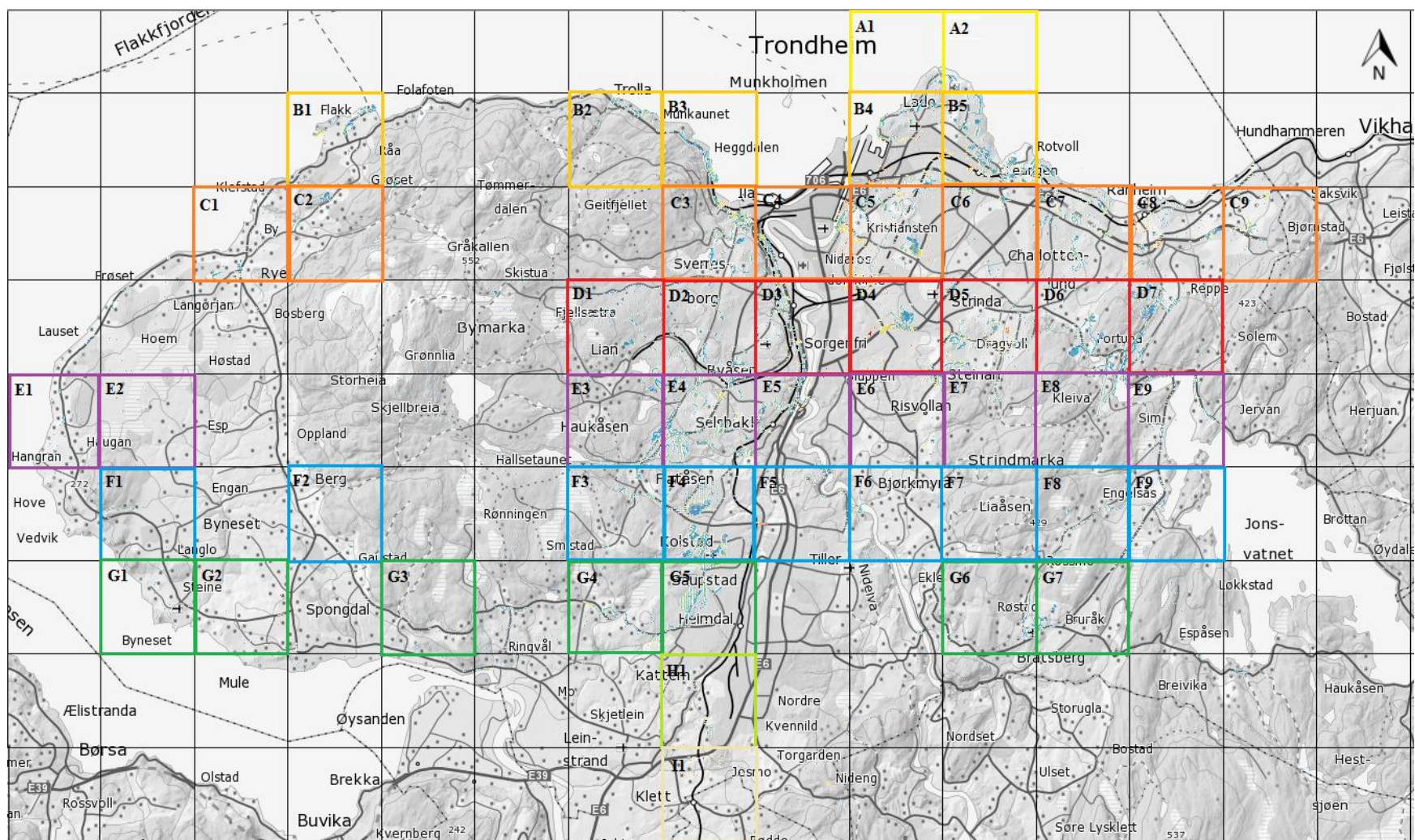
4.1.2 MODELL 1 - GRUNNLAGSDATA MED FARGEGRADERING

I figur 31 ses borepunktene med fargegraderinger gitt ulike dybder til fjell samt løsmassetypene som er definert til å ha 0 m tykkelse. Figuren gir et bilde på målt dybde til fjell i punktene grunnlagsdataene. Figuren viser at det er tilnærmet løsmassetykkelse på 0 m over store områder sentrert omkring Bymarka og Estenstadmarka. Dette fremkommer også av kvartærgeologisk kart (figur 4). Det kan også ses at mye data med informasjon om løsmassetykkelser er innsamlet nord i kommunen (Leangen, Bakklandet, Ila, Gløshaugen, Dragvoll, Byåsen, Flatåsen og Kolstad), mens sør (Ekle, Tiller, Nordre Kvenild og Klett) og vest (Byneset og Spongdal) i kommunen er det få grunnboringer og brønnboringer som er utført hvor fjell er nådd. Dyp til fjell varierer veldig innenfor små områder, men det kan også ses en trend: det er dypere til fjell midt i kommunen og vest i kommunen. Figur 33 viser et detaljert kart over Midtbyen med borepunkter gitt farge avhengig av dybde til fjell. Detaljerte kart for ruter i størrelse 2000x2000 m som er fremhevet i figur 32 kan ses i vedlegg C.

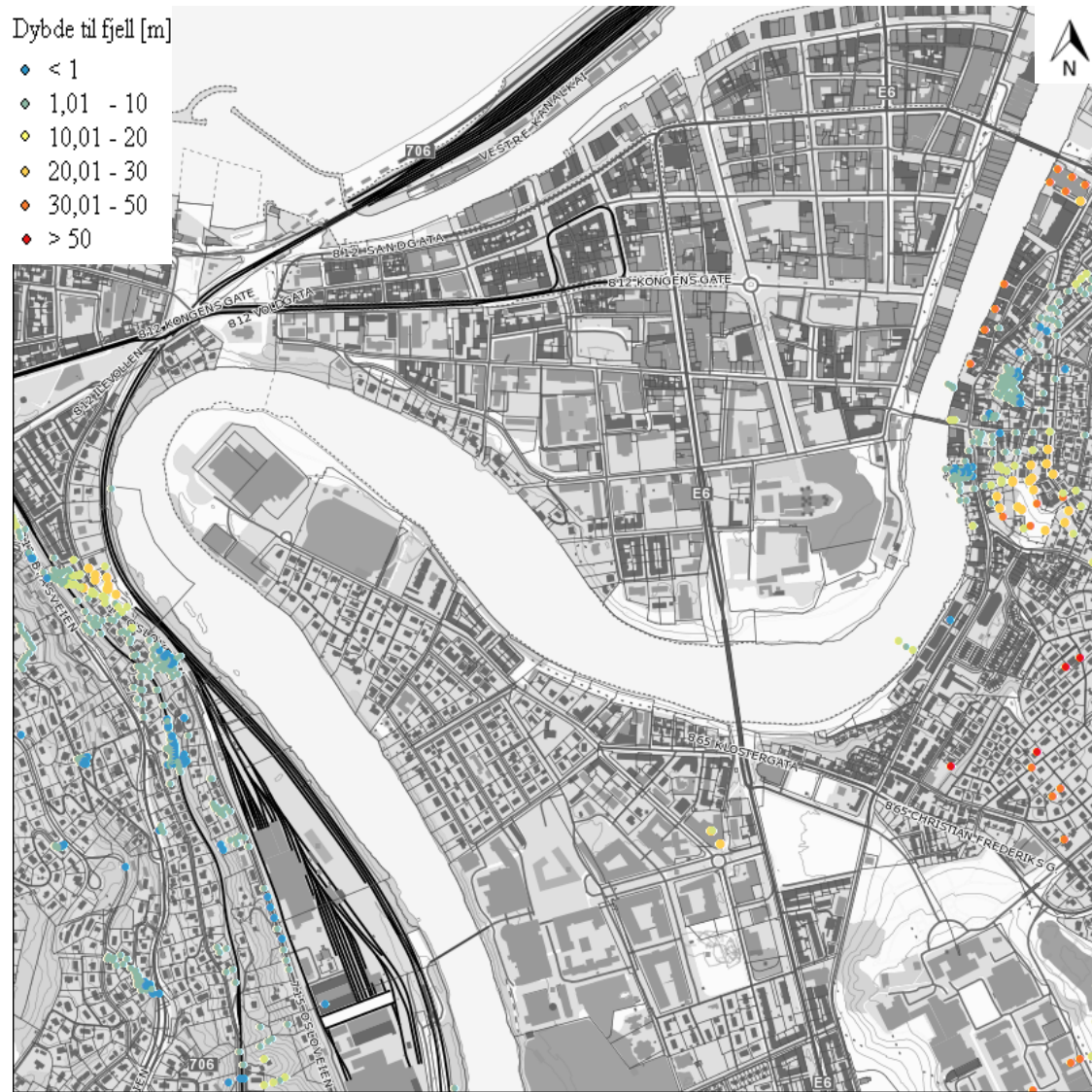
Hvis man ser på boringer som ikke inneholder informasjon om løsmassetykkelse (= fjelloverflaten ble ikke nådd) kan man se at det er flere boringer som har blitt boret 30-50 m ned (oransje punkt) (figur 34). Det er også noen boringer som har blitt boret mer enn 50 meter ned (røde punkt) uten å treffe fjell. Dette gjelder områdene ved Okstad og Foldal hvor boring er blitt utført ned til 50-70 m dybde uten å nå fjell, samt Heggstadmoen og Blakli hvor boringer er blitt utført ned til 50-55 m dybde uten å nå fjell (figur 35 og 36).



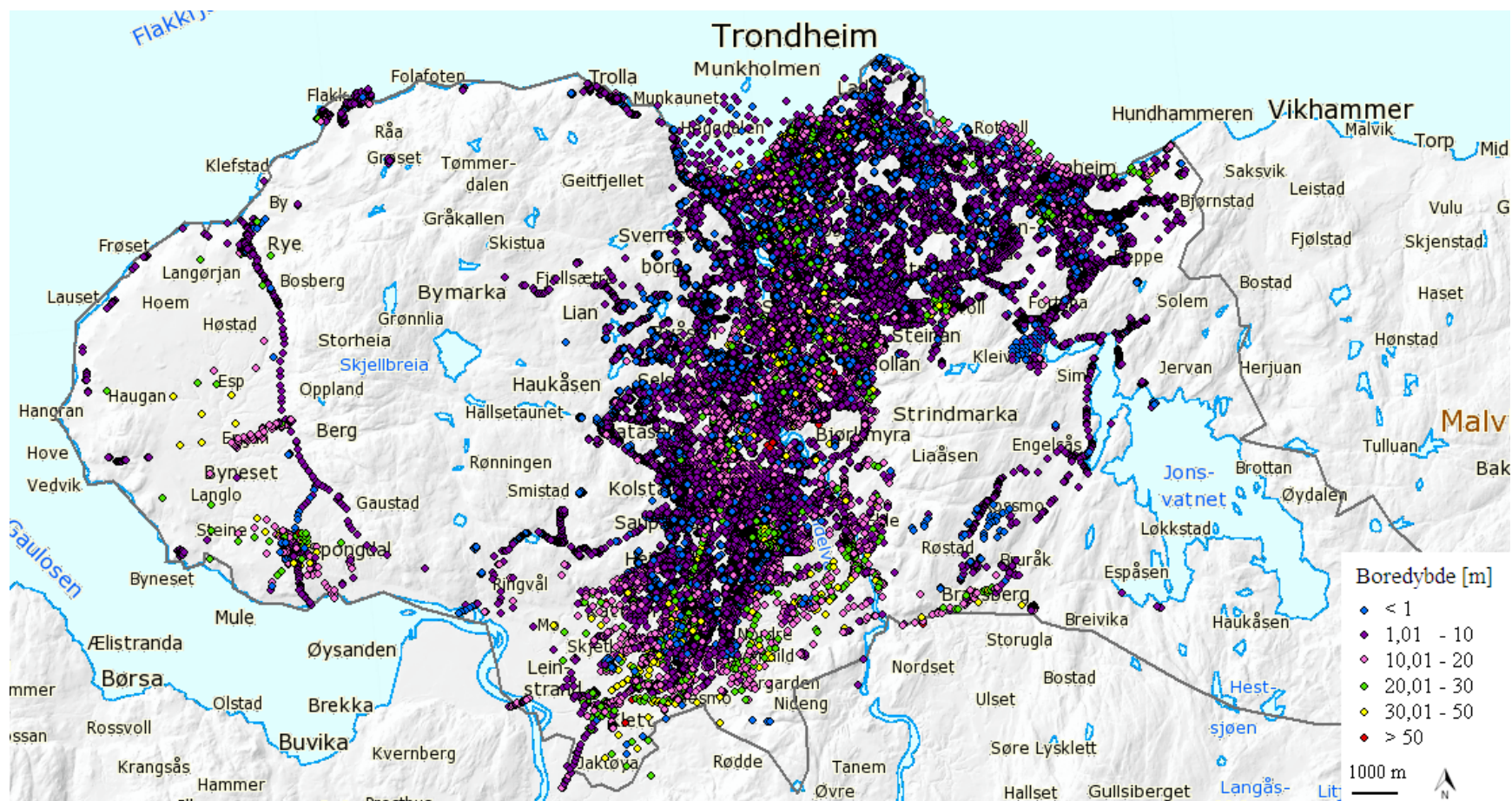
Figur 31. Alle borepunkter med informasjon om dybde til fjell illustrert med farger. Graderingen går fra blå som tilsier 0-1 m dybde til fjell, til rød som tilsier > 50 m dybde til fjell. Løsmassetypene som har løsmassetykkelse lik 0 m per definisjon er vist med grå farge.



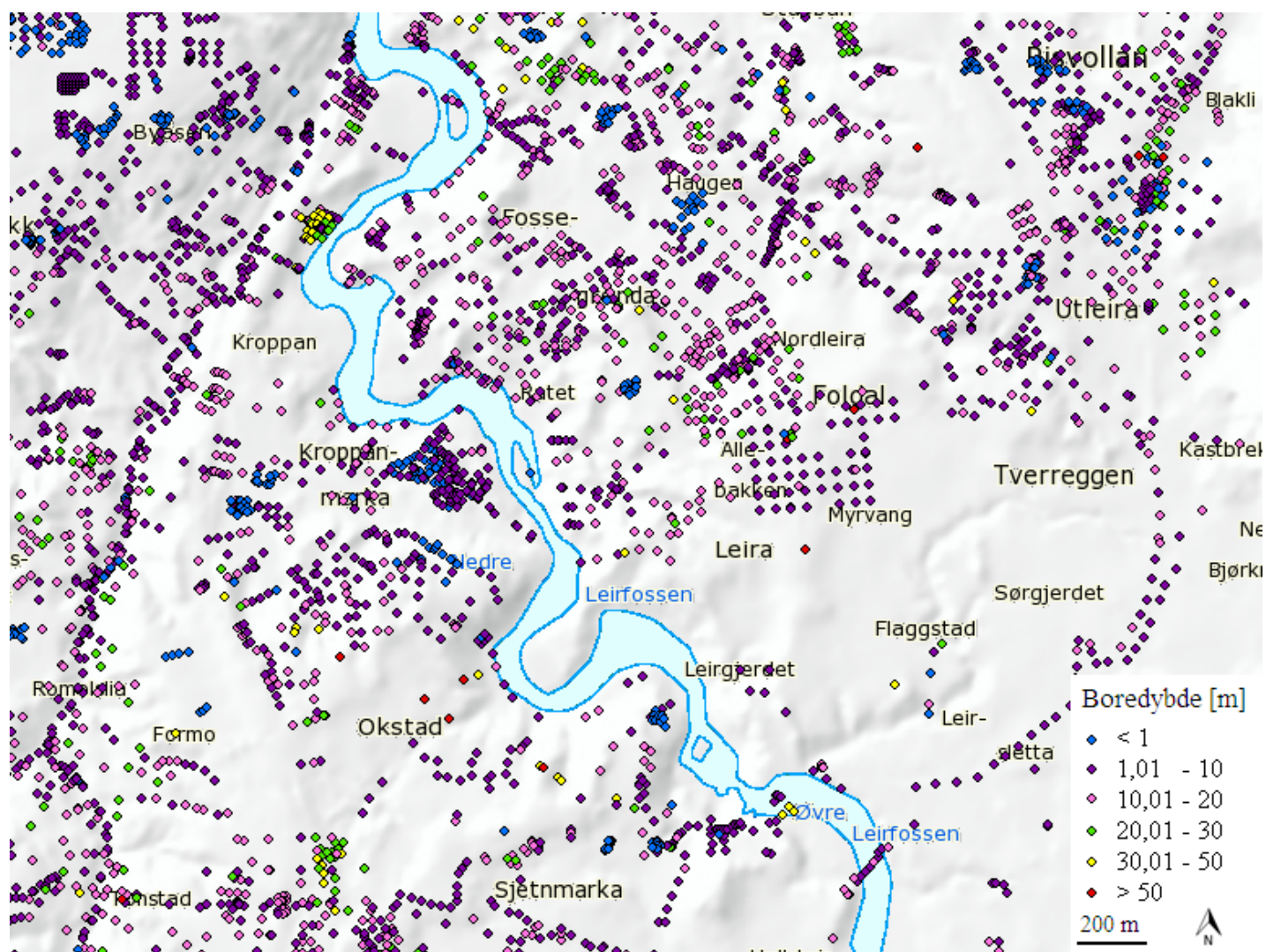
Figur 32. Figuren viser de merkede ruter som blir vist i detalj. Rutene er i størrelse 2000x2000 m.



Figur 33. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C4, Midtbyen i størrelse 2000x2000 m.



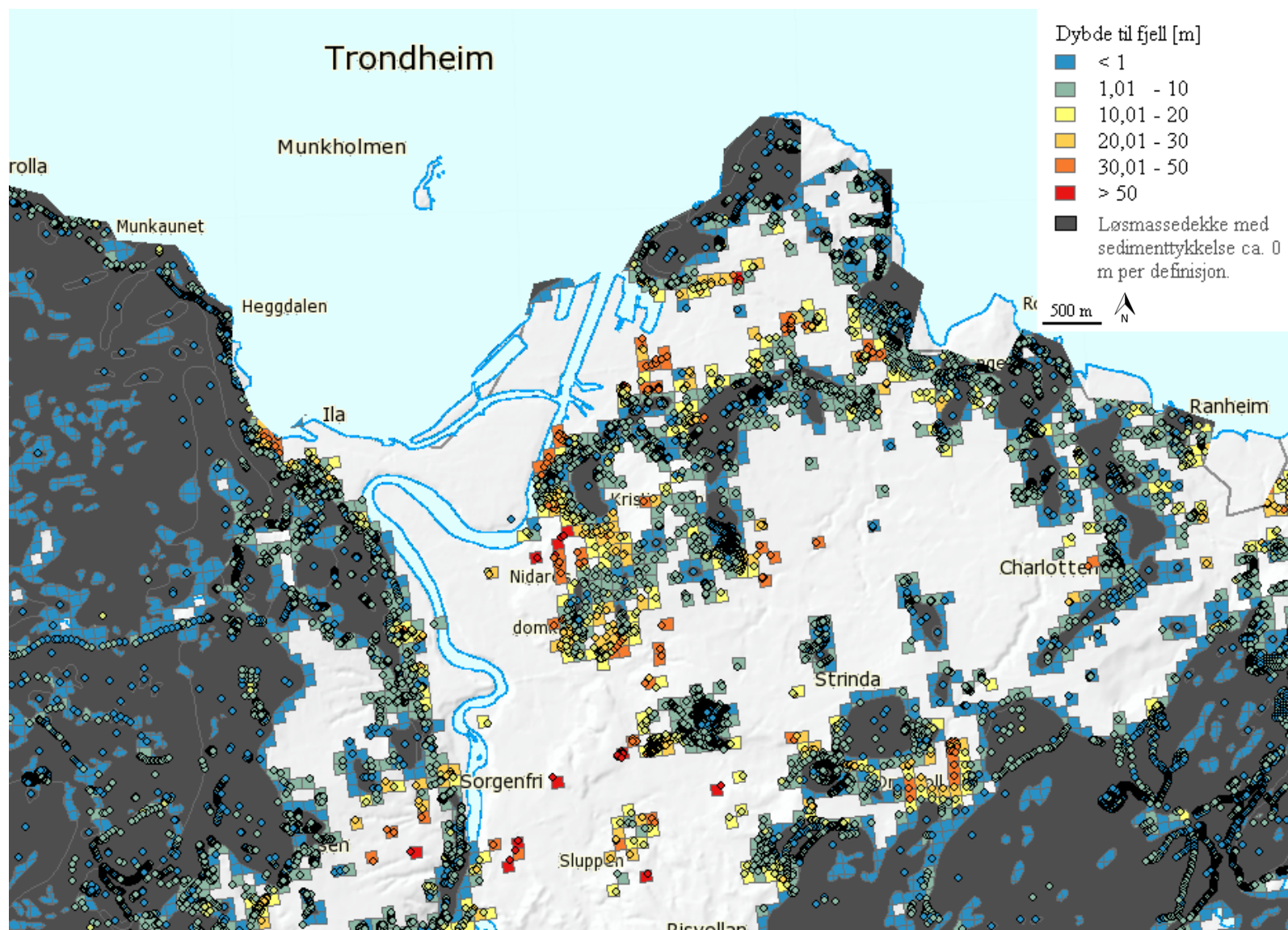
Figur 34. Alle borepunkter som ikke inneholder informasjon om dybde til fjell illustrert med farger avhengig av boreddybde. Graderingen går fra blå som tilsier 0-1 m dybde til fjell til rød som tilsier > 50 m dybde til fjell.



Figur 35. Borepunkter som ikke inneholder informasjon om dybde til fjell illustrert med farger avhengig av boredybde. Graderingen går fra blå < 1 m dybde til fjell til rød som tilsier >50 m dybde til fjell. Ved Blakli ses boringer som har gått ned til 51 og 52 (røde sirkler). Og ved Okstad ses boringer som har gått ned til 50, 53, 56, 59 og 68 m og ved Foldal ses boringer som har gått ned til 54 m (røde sirkler).

4.1.3 MODELL 2 - RUTENETT

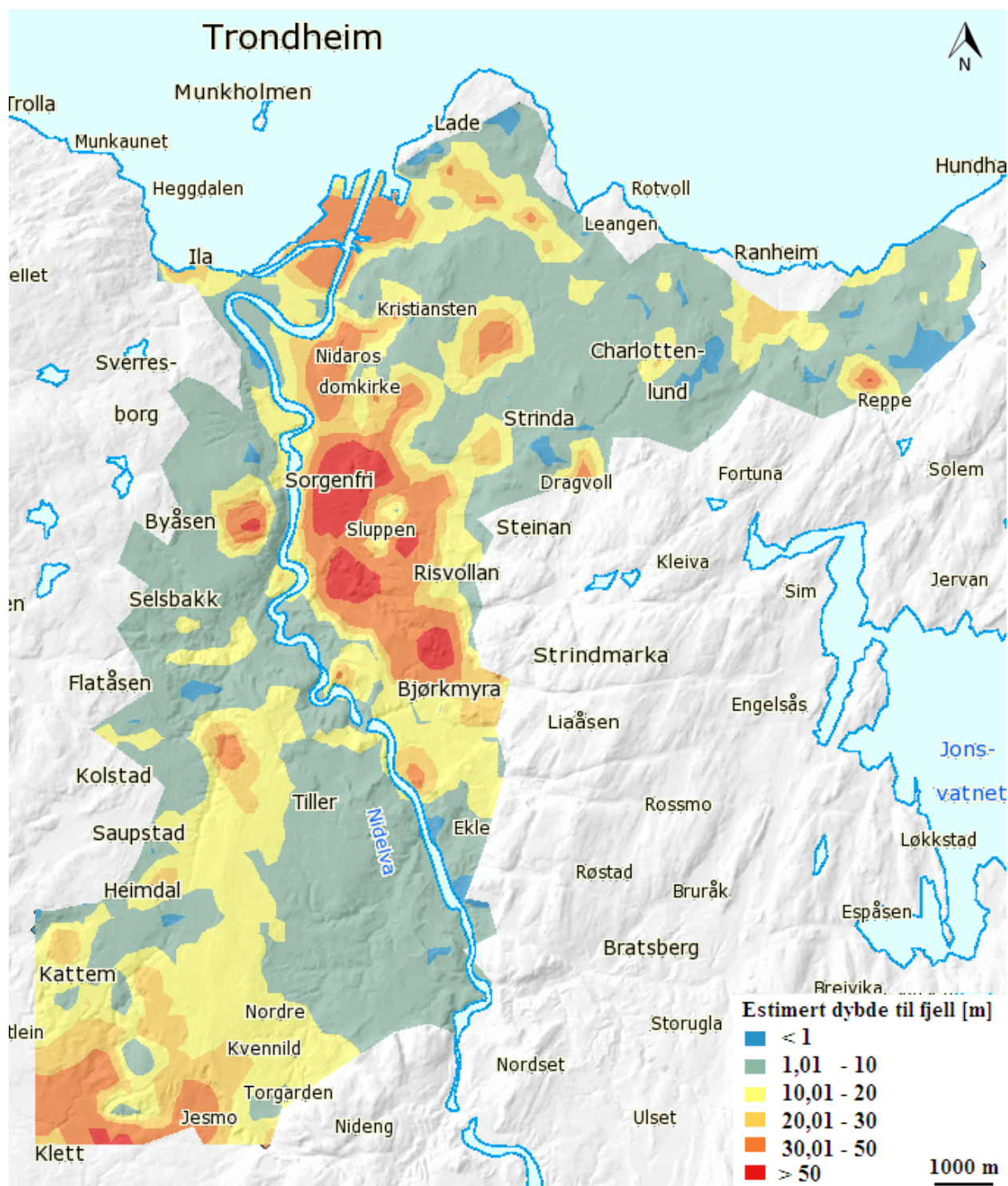
All data fra borepunkter med informasjon om fjellkontakt samt løsmasselag med 0 m løsmassetykkelse er integrert i rutenettet som vises i figur 37. Denne modellen gir et mindre detaljert bilde av grunnlagsdataene enn modell 1. Figur 38 viser at det i en rute kan finnes flere borepunkter som til sammen utgjør den gjennomsnittlige ruteverdien. Dette rutenettet er en illustrasjon av grunnlagsdataene i en skala på 100x100 m. Som i metode 1, ses det også her at data fra boringer som har nådd fjell er fraværende sør og vest i kommunen, samt at det er større løsmassemekthet midt i og vest i kommunen.



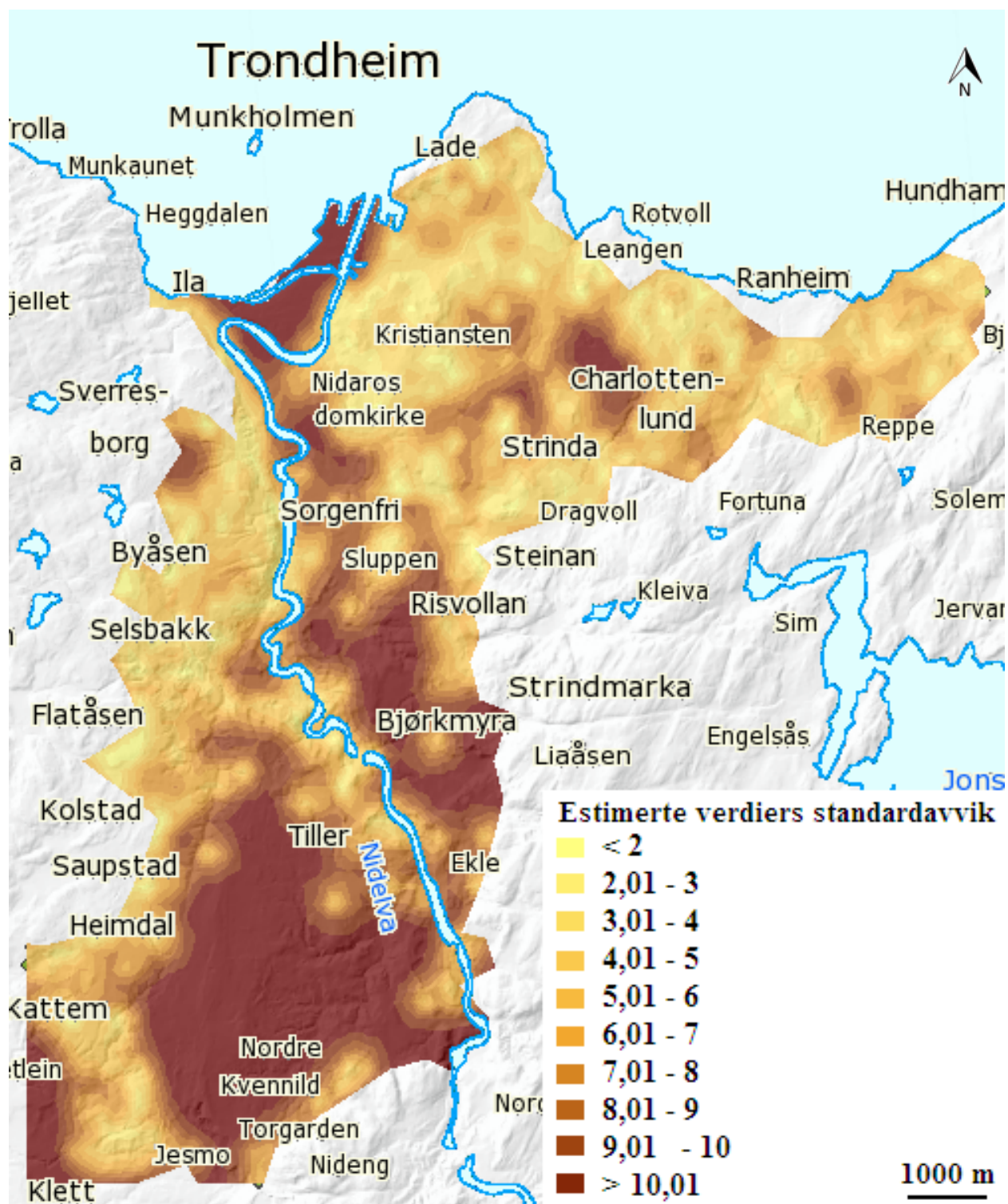
Figur 38. Zoomet inn i rutenettet. Her ses grunnlagsdataene som rutenettet er basert på: borepunkter som har nådd fjell (sirkler) og løsmasselag som har en løsmassetykkelse 0 m (grå polygon).

4.1.4 MODELL 3 - ORDINÆR KRIGING

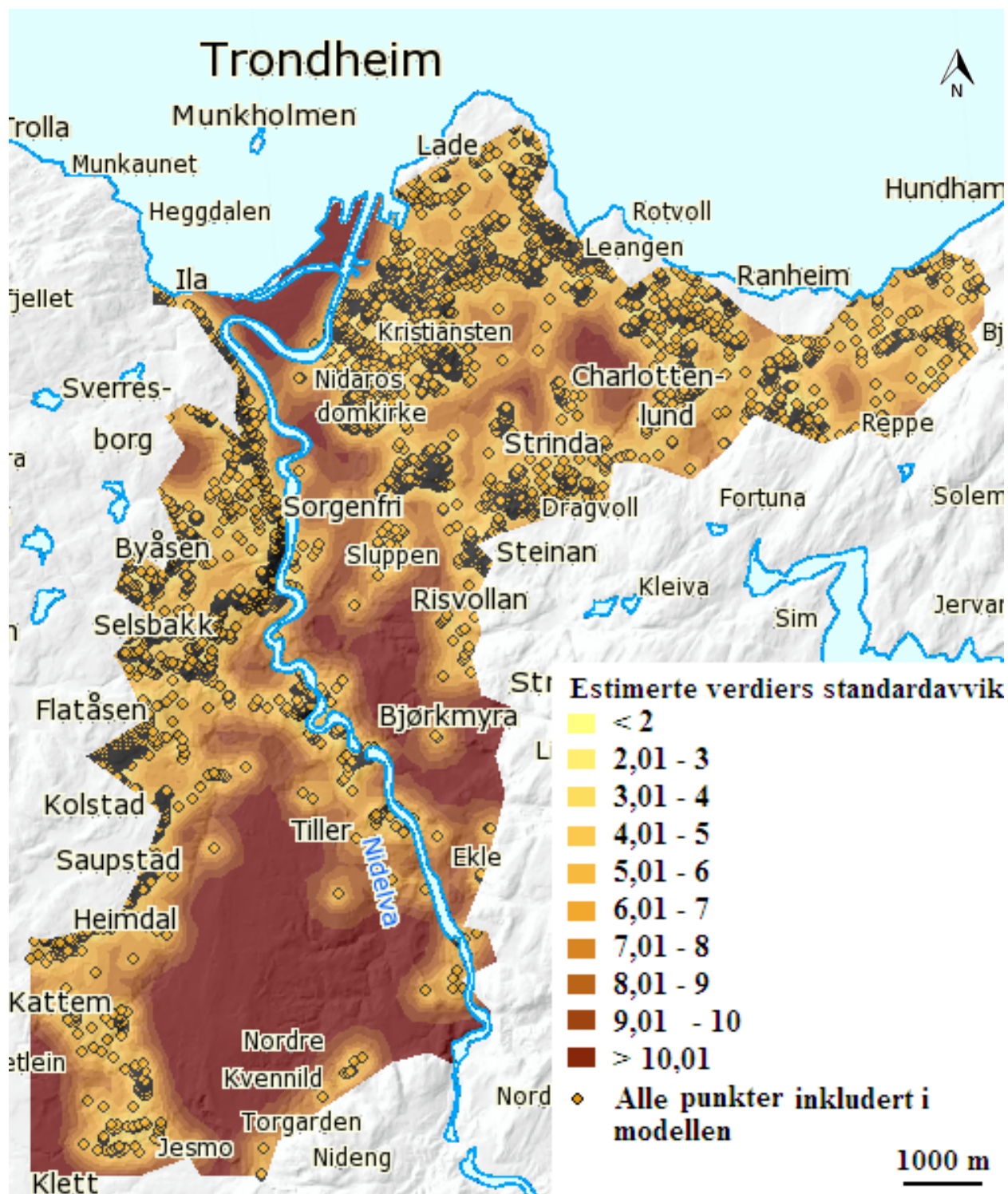
I figur 39 ses estimerte dybder til fjell ved bruk av ordinær kriging i ArcGIS. Når det gjelder fordelingen av løsmasser i kartutsnittet så viser kartet flere områder med dybde til fjell større enn 50 m, blant annet ved Sluppen, Nedre Byåsen, Klett og vest for Risvollan. Områder som har dybde til fjell mellom 30 og 50 m uten omkringliggende områder med dybde til fjell større enn 50 m er blant annet Rosten, Eklespannet, Gløshaugen, Strindheim og Midtbyen. Kartet viser også områder uten løsmasser. Dette forekommer blant annet på Tyholt, ved Havstein, Kristianstens festning og Nedre Leirfossen. Dette kartet har områder med estimerte verdier som har stor usikkerhet. Kart som viser standardavvikene til de estimerte verdiene kan ses i figur 40. Figur 41 viser at det er størst standardavvik langt fra datapunkter. Ifølge usikkerhetskartet er det stor usikkerhet knyttet til estimerer i Midtbyen, ved Reppe, Charlottenlund, Nedre Byåsen, Bjørkmyra, Kattem, Klett og Nordre Kvennild. Det er forholdsvis stor usikkerhet knyttet til estimerer på Strindheim og Sluppen området.



Figur 39. Estimert “dybde til fjell”-kart ved ordinær kriging. Graden av dybde til fjell går fra blått som er områder med estimert dybde til fjell mindre enn 1 m, mens rødt er områder med estimert dybde til fjell større enn 50 m.



Figur 40. Standardavvik til estimert “dybde til fjell”-kart ved ordinær kriging. Standardavviket går fra lys gult som er områder med standardavvik mindre enn 2 til mørk brunt som er områder med standardavvik større enn 10.

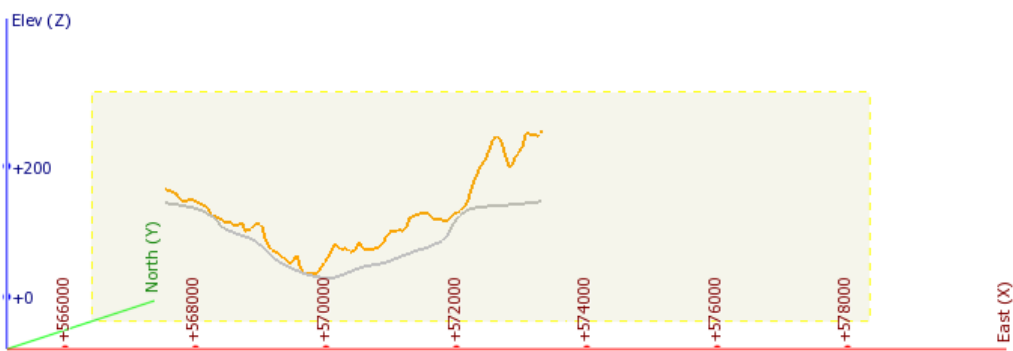


Figur 41. Standardavvik til estimert “dybde til fjell”-kart ved ordinær kriging inkludert punktene (oransje sirkler) som modellen baserer seg på. Standardavviket går fra lys gult som er områder med standardavvik mindre enn 2 til mørk brunt som er områder med standardavvik større enn 10.

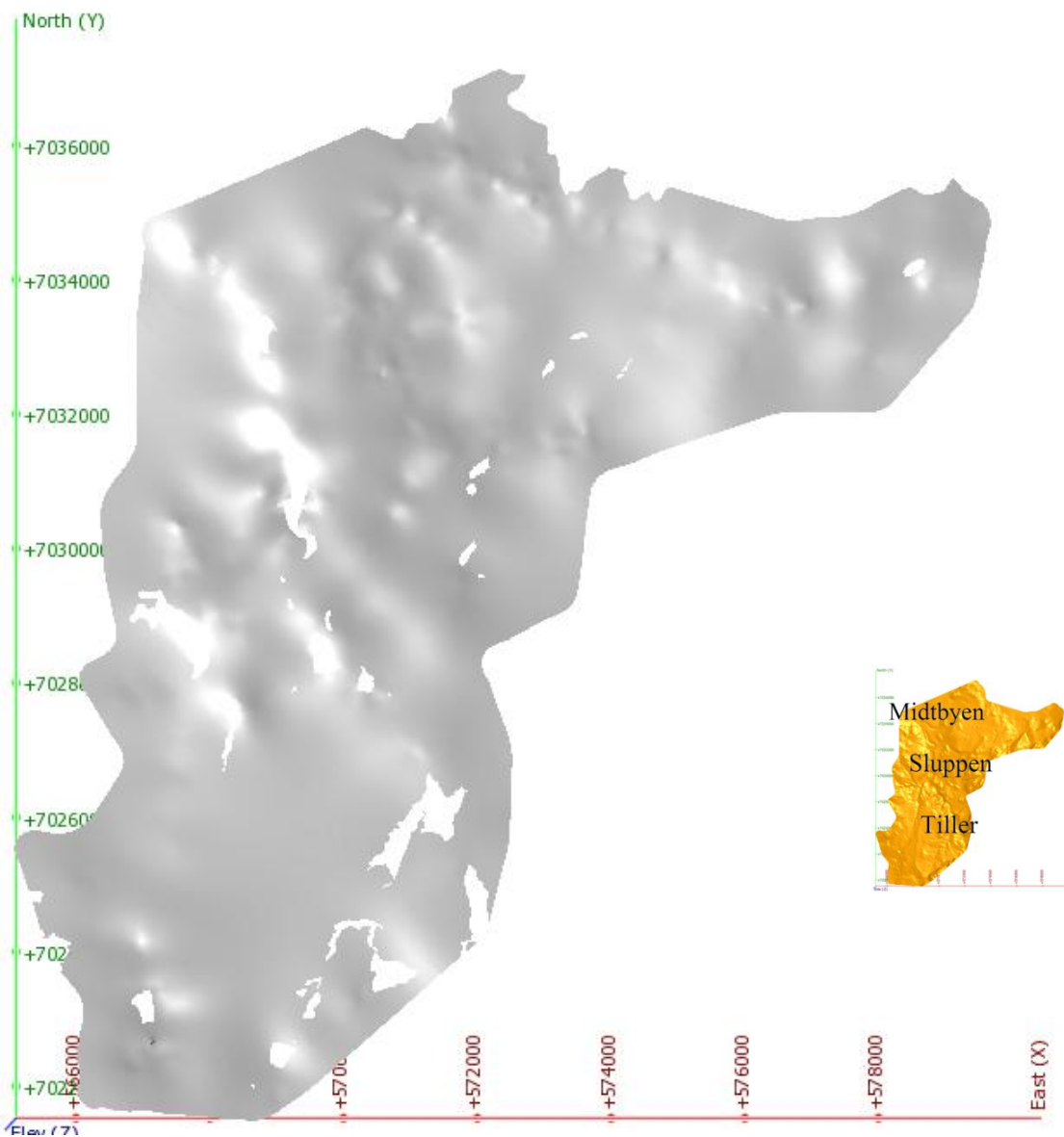
4.1.5 MODELL 4 - 3D MODELL

Metoden benyttet for å lage modell 4 er implisitt modellering med radielle basisfunksjoner i 3D i Leapfrog mining. I figur 42 ses et snitt av 3D kartet. Snittet viser at den topografiske flaten har flere variasjoner på liten skala enn det den estimerte berggrunnsoverflaten har. Snitt for hver 500 m på nord-aksen er gitt i vedlegg D. Modellen gir et illustrativt bilde av berggrunnsoverflate og topografisk overflate i tre dimensjoner (figur 43, 44 og 45). En figur i to dimensjoner med dybde til fjell representert ved fargegradering er gitt figur 46. Kart som viser antall meter til nærmeste borepunkt er vist i figur 47. Dette gir også et bilde på usikkerheten siden verdier i ukjente punkter er basert på analyserte punkters verdier, variogrammet til datagrunnlaget og dermed avstanden til nærmeste analyserte punkt.

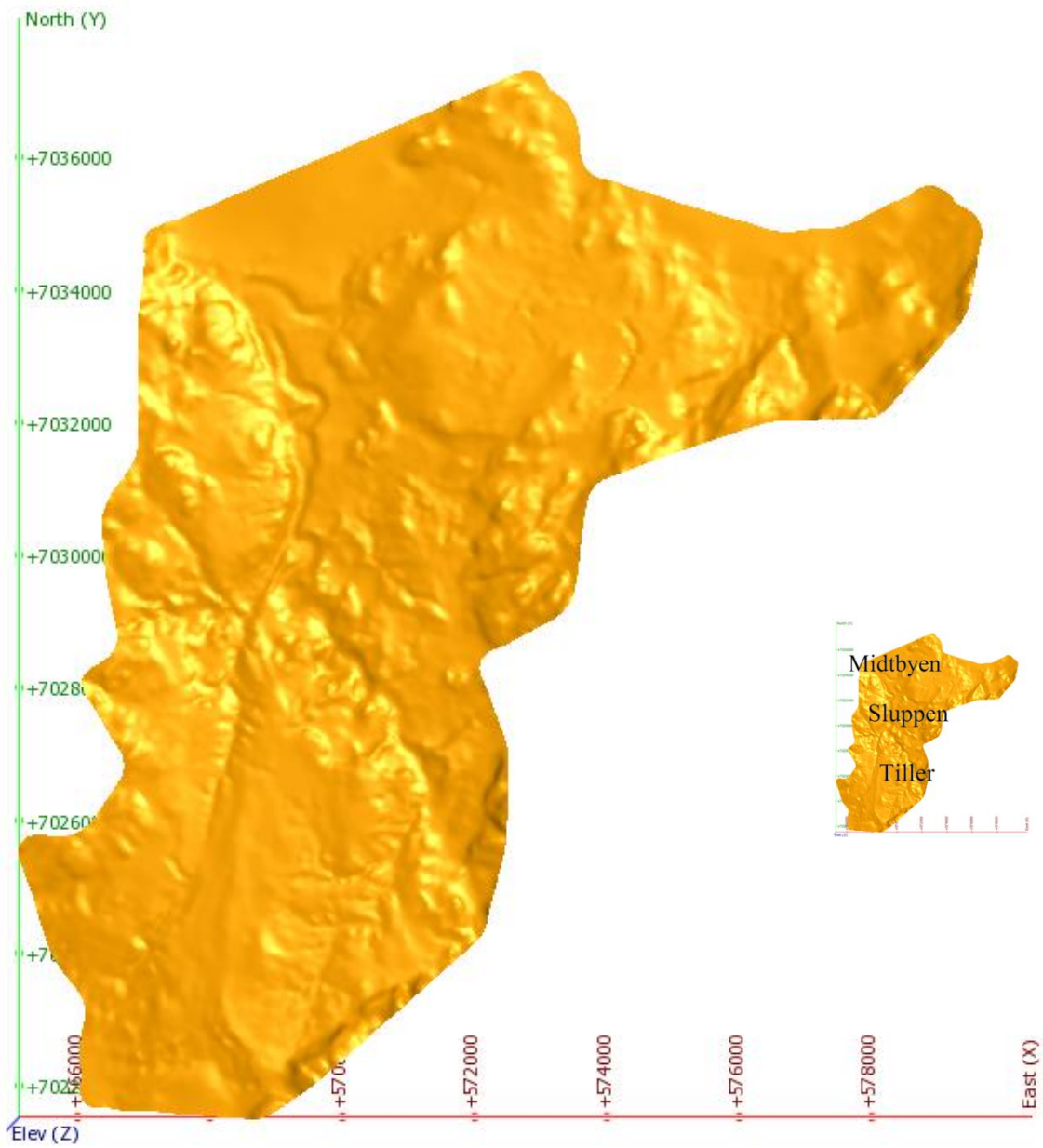
Løsmassene i kartutsnittet har store tykkelser (> 50 m) blant annet i Midtbyen, ved Øya-området, Sluppen, Nedre Byåsen og vest for Risvollan. Områder som har dybde til fjell mellom 30 og 50 m uten omkringliggende områder med dybde til fjell større enn 50 m er blant annet Rosten, Eklespannet, Klett og Strindheim. Kartet viser også områder uten løsmasser. Dette forekommer blant annet ved Havstein. Dette kartet har områder med estimerte verdier som har høy usikkerhet. Figur - viser at det er store områder i sør som er langt fra analyserte datapunkter og som dermed har en høy usikkerhet. Ifølge usikkerhetskartet er det stor usikkerhet knyttet til estimater i Midtbyen, Charlottenlund, Sluppen-området, Nedre Byåsen, Bjørkmyra og Nordre Kvennild.



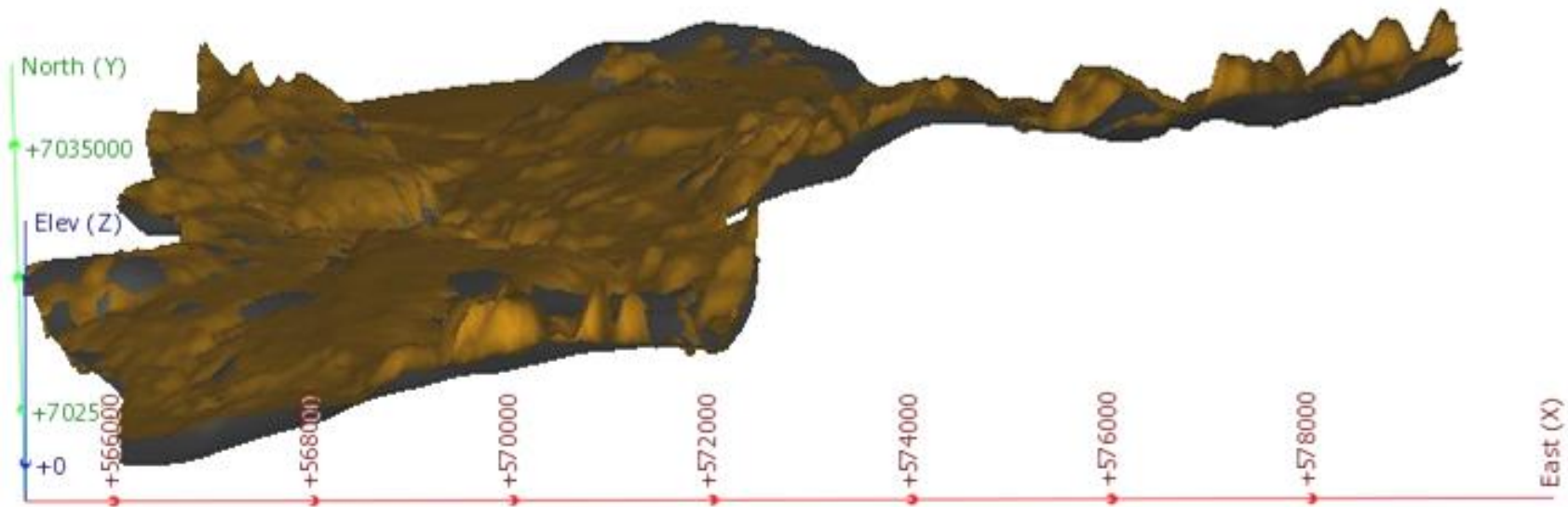
Figur 42. UTM 32. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7029500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



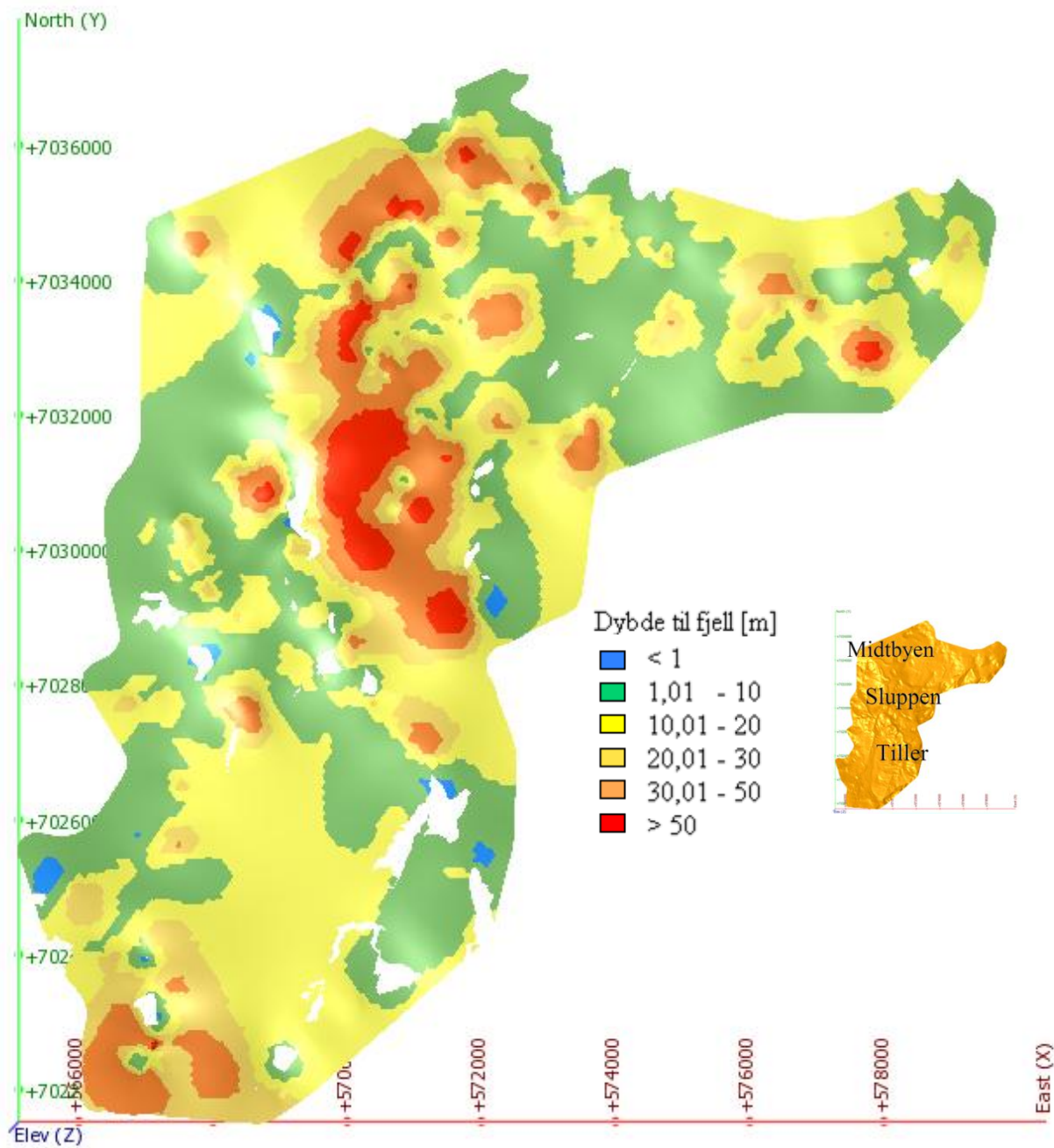
Figur 43. Berggrunnsflate i 2D. Hvite områder representerer flater hvor berggrunnsflaten er estimert til å være høyere enn flaten som representerer topografien.



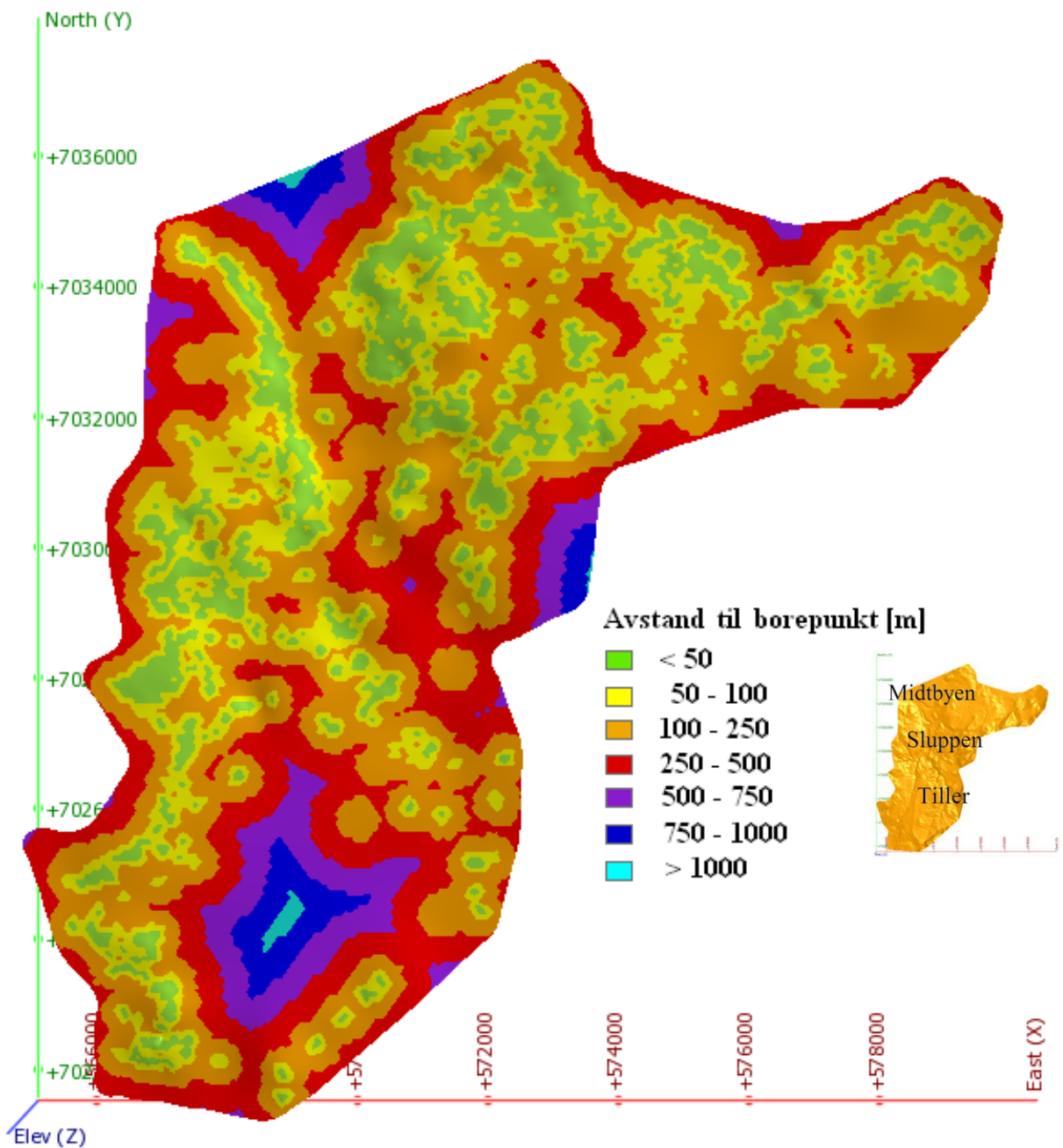
Figur 44. Estimert topografisk overflate i x og y-retning.



Figur 45. 3D kart sett fra sør med 15 graders helning. Oransje flate er den topografiske flaten, mens den grå flaten er berggrunnsflaten. Toppene på ytterkanten av modellen er et resultat av den topografiske modellen som har få punkter i disse områdene.



Figur 46. Bilde med estimert dybde til fjell tatt fra 3D modellen sett i x- og y-plan. Dybde til fjell er gitt i farger fra blå (< 1 m) til rød (> 50 m). Hvite områder representerer flater hvor berggrunnsflaten er estimert til å være høyere enn flaten som representerer topografien.



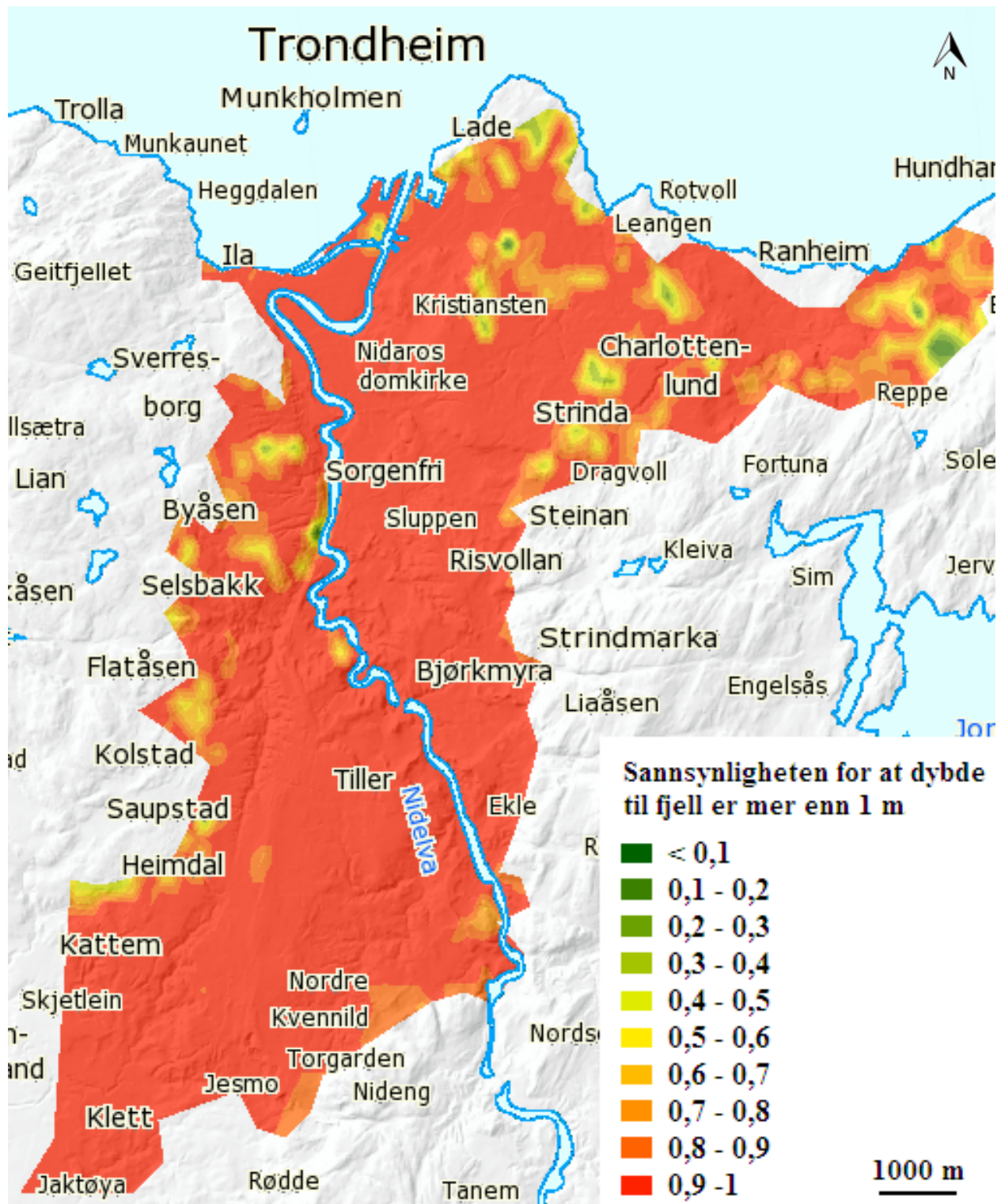
Figur 47. Avstand til borepunkt gitt i meter. Figuren illustrerer også usikre områder ved at estimerte verdier langt fra kjente borepunkt får høyere usikkerhet. Avstand til borepunkt er vist i farger fra grønn (< 50 m) til turkis (> 1000 m).

4.1.6 MODELL 5 - INDIKATORKRIGING

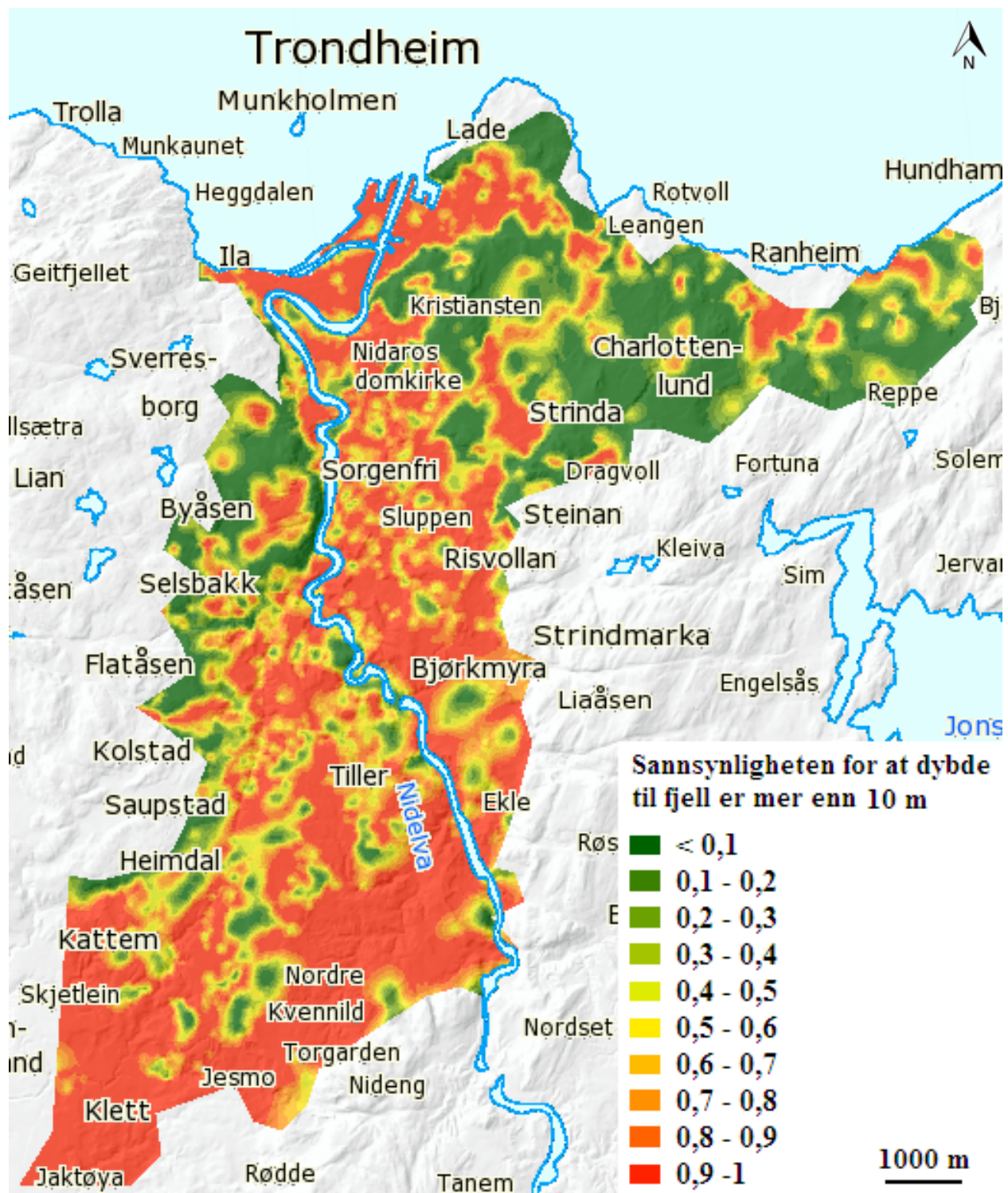
Modellene med ulike grenseverdier fra > 1 m til > 50 m viser hvilke områder som mest sannsynlig overgår grenseverdiene og hvilke som ikke gjør det. Modell med grenseverdi > 1 m (figur 48) viser at store deler av kartutsnittet har dybde til fjell større enn 1 m, men det forekommer også noen fjellblotninger i kartet. Modell med grenseverdi > 10 m (figur 49) viser i grov skala at det midt i kartutsnittet for det meste er dybder til fjell som er større enn 10 m, mens det på sidene i kartutsnittet forekommer områder med dybde til fjell mindre enn 10 m. Modell med grenseverdi > 20 m (figur 50) viser at det er løsmasser som er større enn 20 m i midten av kartutsnittet og noen små områder på sidene. I modell med grenseverdi > 30 m (figur 51) befinner områdene med dybde til fjell større enn 30 m seg for det meste i midtre del av kartutsnittet og innenfor områdene som er estimert til å ha dybde til fjell større enn 20 m. I modell med grenseverdi > 50 m (figur 52) befinner områder med dybde til fjell større enn 50 m seg i midten av profilet for utenom to områder ved Klett og Reppe som er på sidene i profilet.

Kart med standardavvik til estimerte verdier er illustrert for hver grenseverdi i vedlegg E. Modeller med grenseverdier > 1 , > 10 og > 20 m har store standardavvik, mens modeller med grenseverdi > 30 og > 50 m har lavere standardavvik. Det er spesielt i områdene Charlottenlund, Strindheim, Nedre Byåsen, Nordre Tiller, Bjørkmyra, Kattem, Klett og Reppe at store standardavvik forekommer i modeller med grenseverdi > 1 og > 10 m. I modell med grenseverdi > 30 m forekommer store standardavvik i områdene Charlottenlund, Strindheim, Nedre Byåsen, Bjørkmyra, Klett og Reppe. I modeller med grenseverdi > 30 og 50 m forekommer de største standardavvikene ved Midtbyen, Charlottenlund, Sluppen, Tiller, Nordre Kvennild, Bjørkmyra, Klett og Kattem.

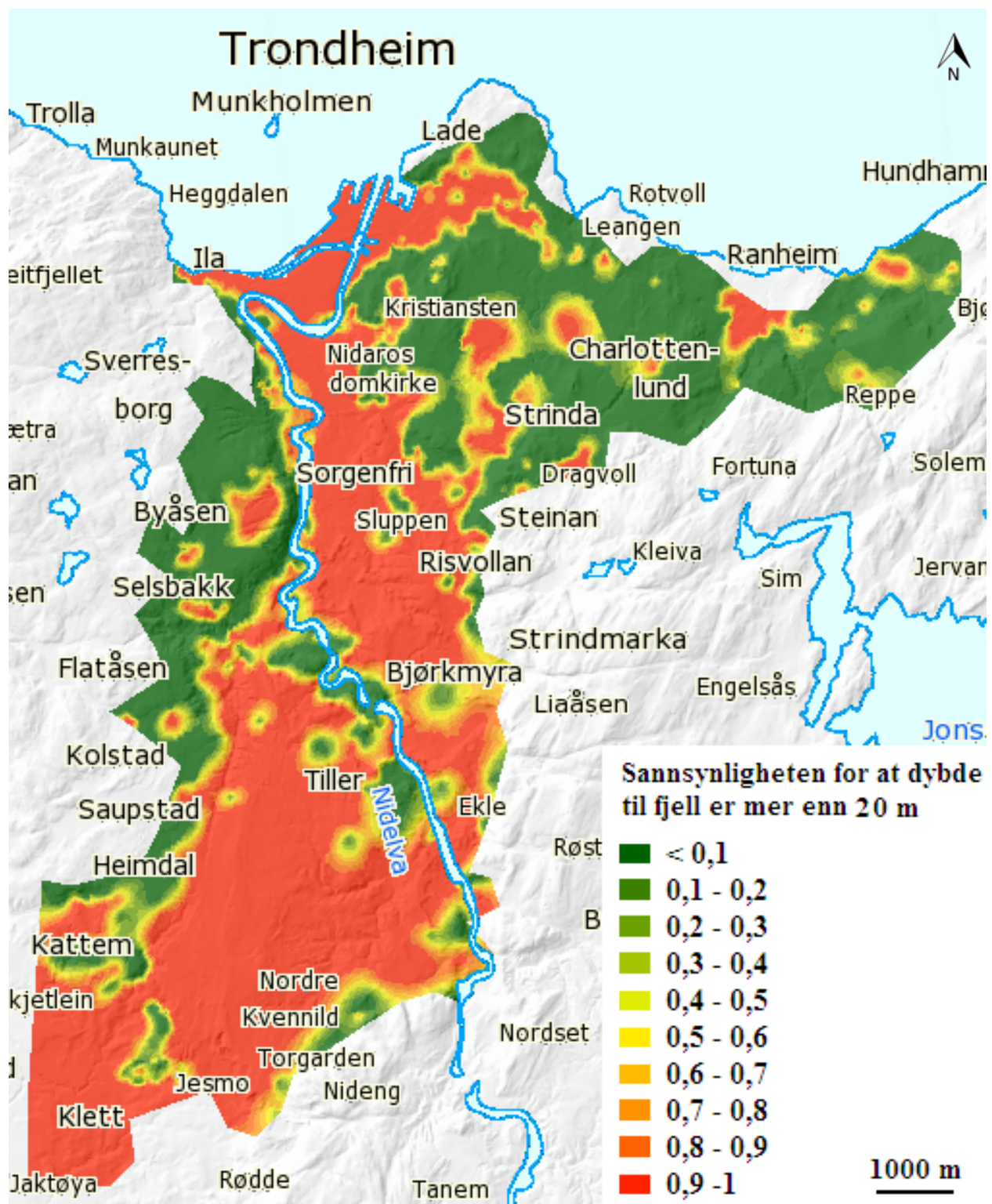
Data fra alle grenseverdikartene er inkludert i figur 53 som består av laget i hvert grenseverdikart som har mer enn 90 % sannsynlighet til å overstige grenseverdien. Kart basert på lag som har 70 % og 80 % sannsynlighet til å overstige grenseverdien ses i vedlegg F. Disse figurene viser en større utbredelse av områder med store dybder til fjell enn 90 % sannsynlighetskartet. Når det gjelder fordelingen av løsmasser i figur 53 så viser kartet flere områder med dybde til fjell større enn 50 m, blant annet i Midtbyen, ved Øya, Sluppen, vest for Risvollan, ved Heggstadmoen, Rosten og ved Sørnypan. Områder som har dybde til fjell mellom 30 og 50 m utenom omkringliggende områder med dybde til fjell på mer enn 50 m er blant annet ved Nedre Byåsen, Eklespannet, Strindheim og Nordre Tiller. Kartet viser også områder uten løsmasser. Dette forekommer blant annet på Tyholt, Kristianstens festning, Havstein og ved Nedre Leirfossen.



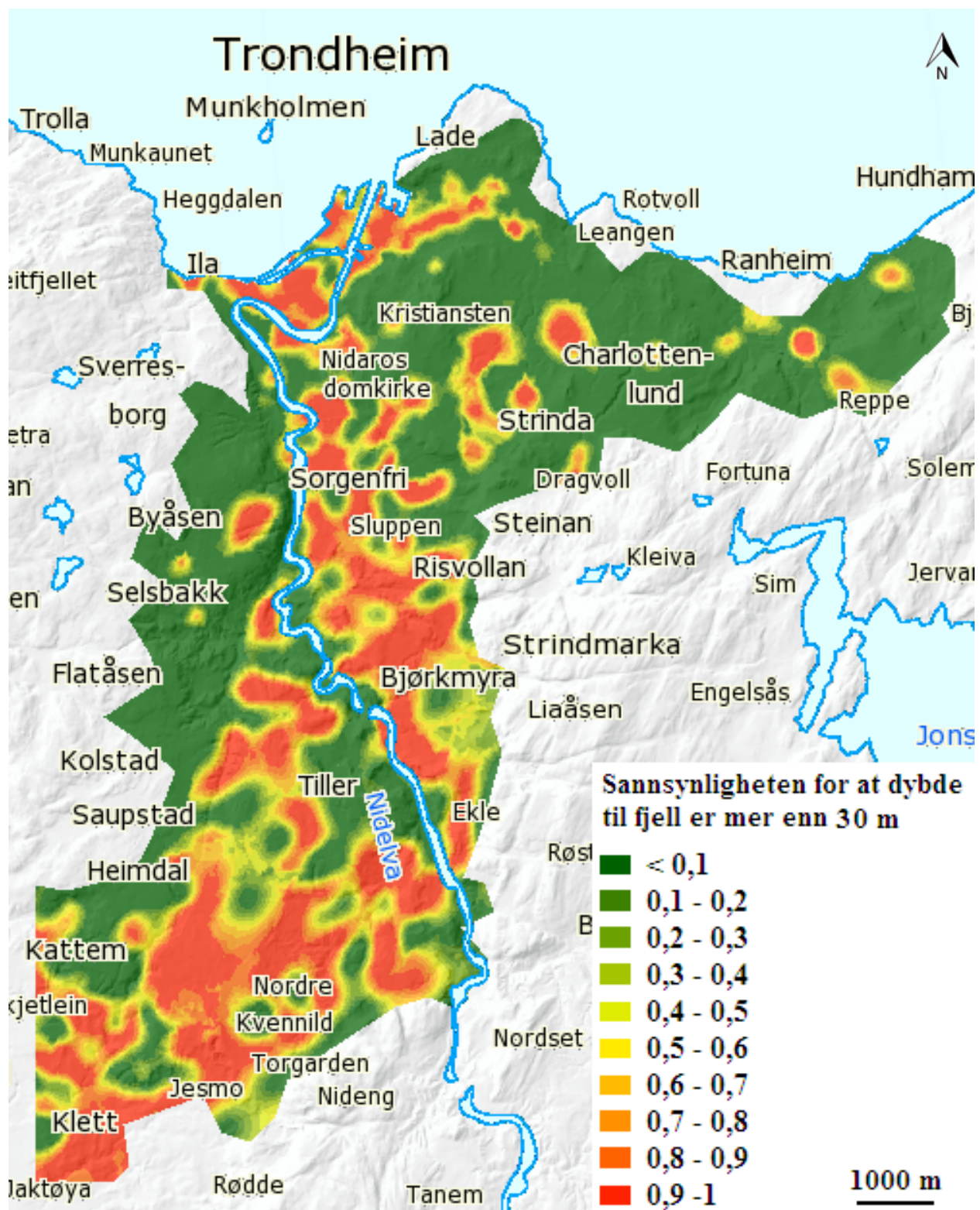
Figur 48. Kart som viser estimert sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m. Grønn farge viser områder med lav sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m, mens rød farge fremstiller områder med stor sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m.



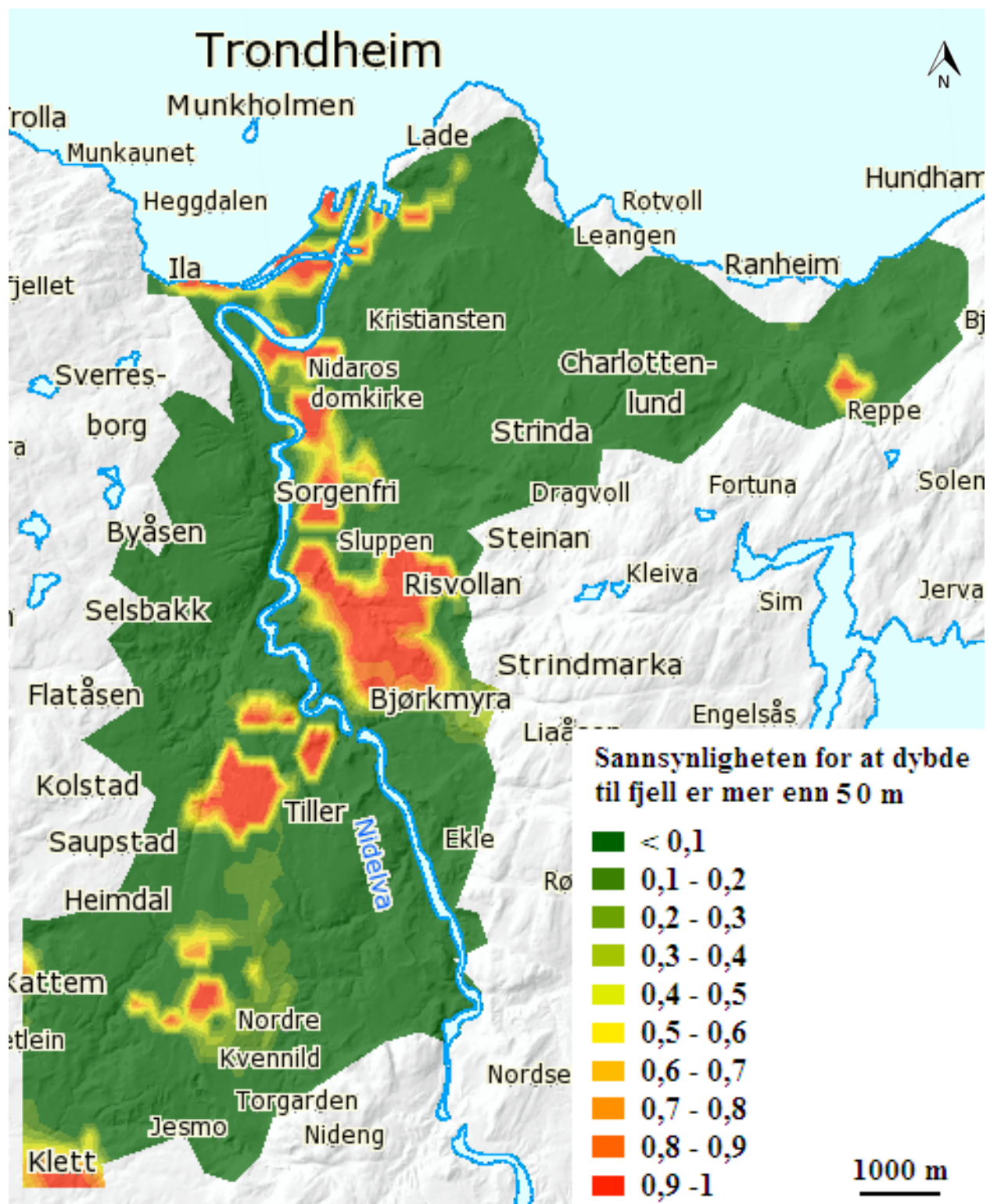
Figur 49. Kart som viser estimert sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m. Grønn farge viser områder med lav sannsynligheten for at dybde til fjell er mer enn 10 m, mens rød farge fremstiller områder med stor sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 10 m.



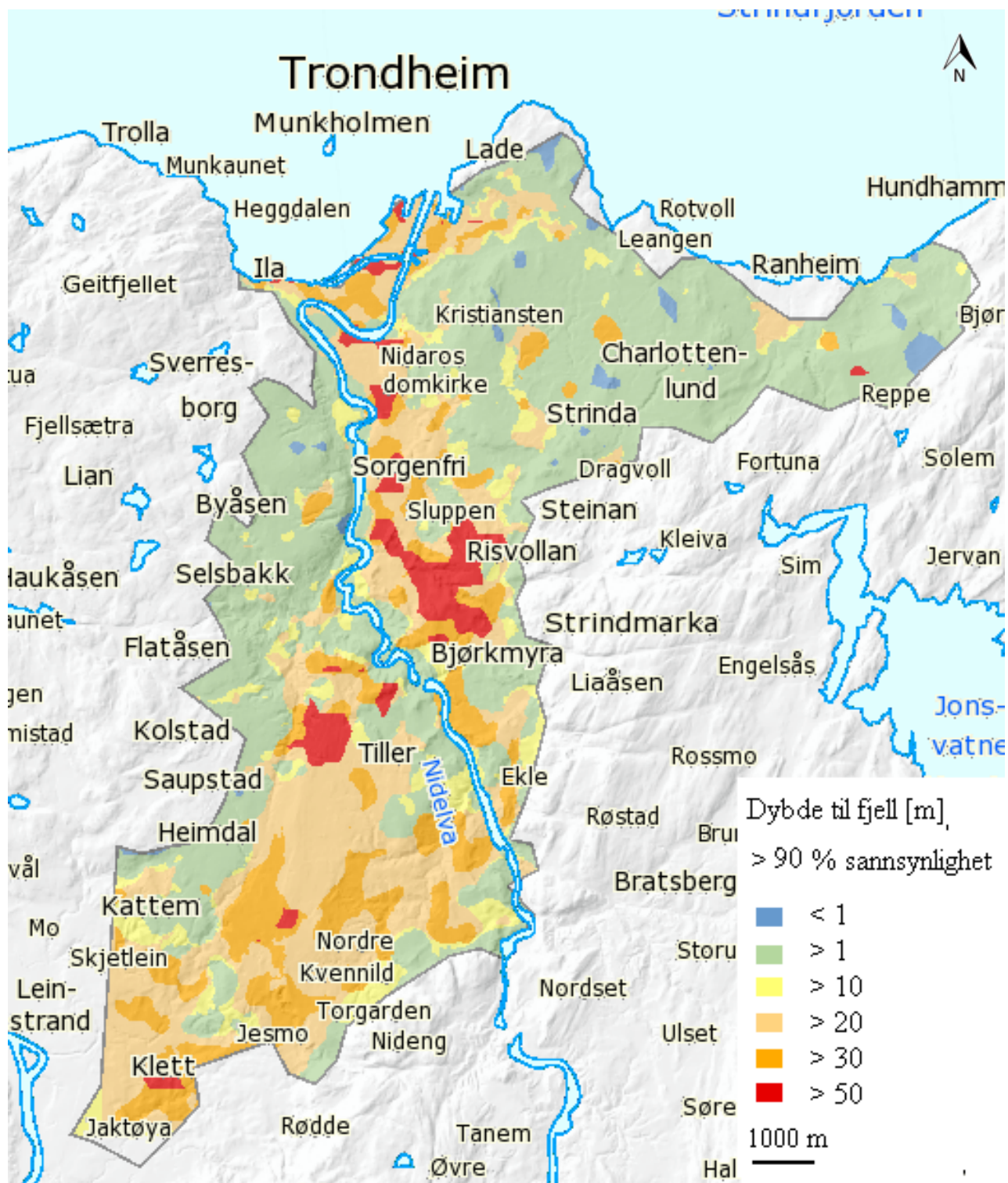
Figur 50. Kart som viser estimert sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m. Grønn farge viser områder med lav sannsynligheten for at dybde til fjell er mer enn 20 m, mens rød farge fremstiller områder med stor sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 20 m.



Figur 51. Kart som viser estimert sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m. Grønn farge viser områder med lav sannsynligheten for at dybde til fjell er mer enn 30 m, mens rød farge fremstiller områder med stor sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 30 m.



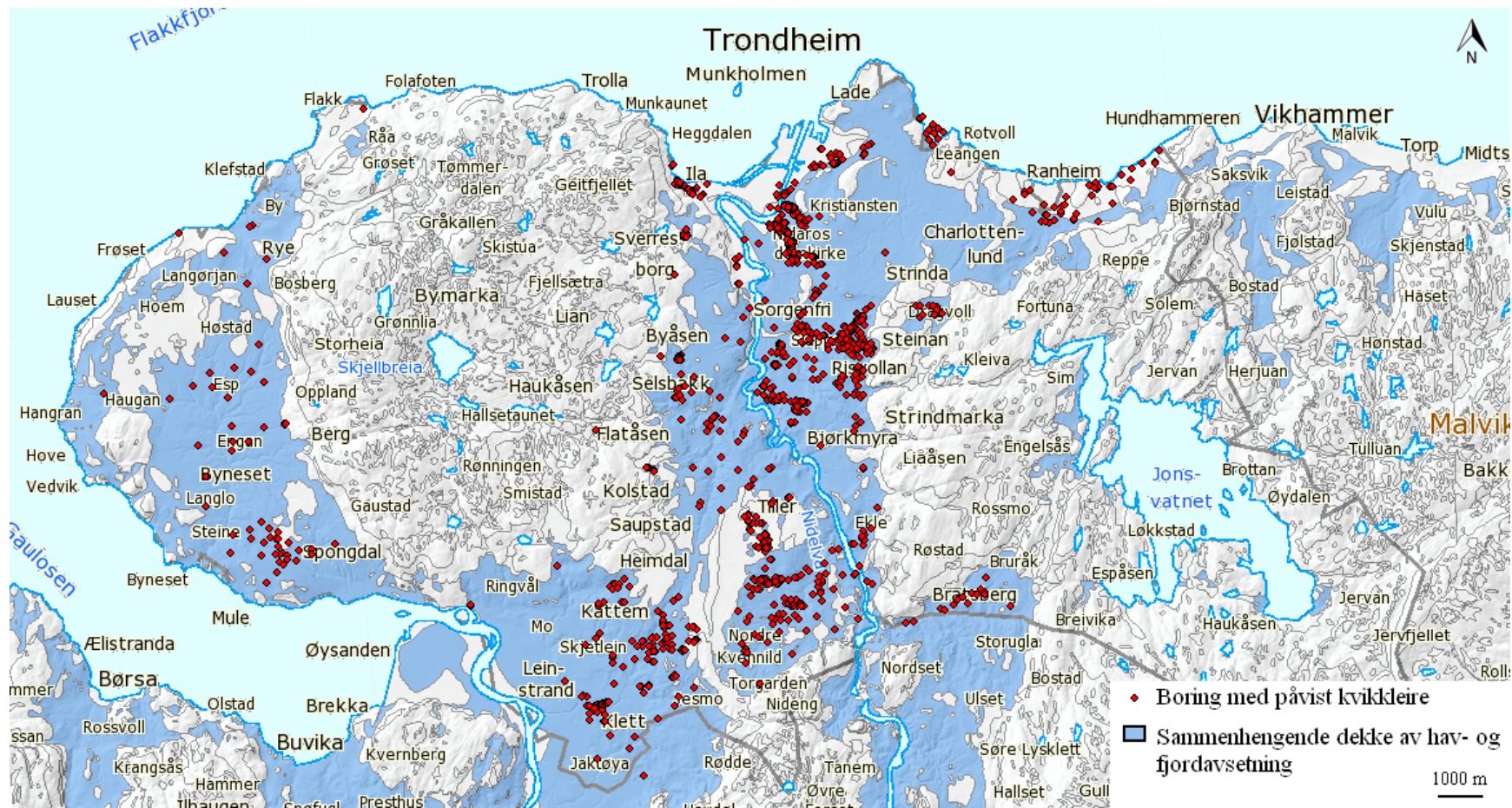
Figur 52. Kart som viser estimert sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m. Grønn farge viser områder med lav sannsynligheten for at dybde til fjell er mer enn 50 m, mens rød farge fremstiller områder med stor sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 50 m.



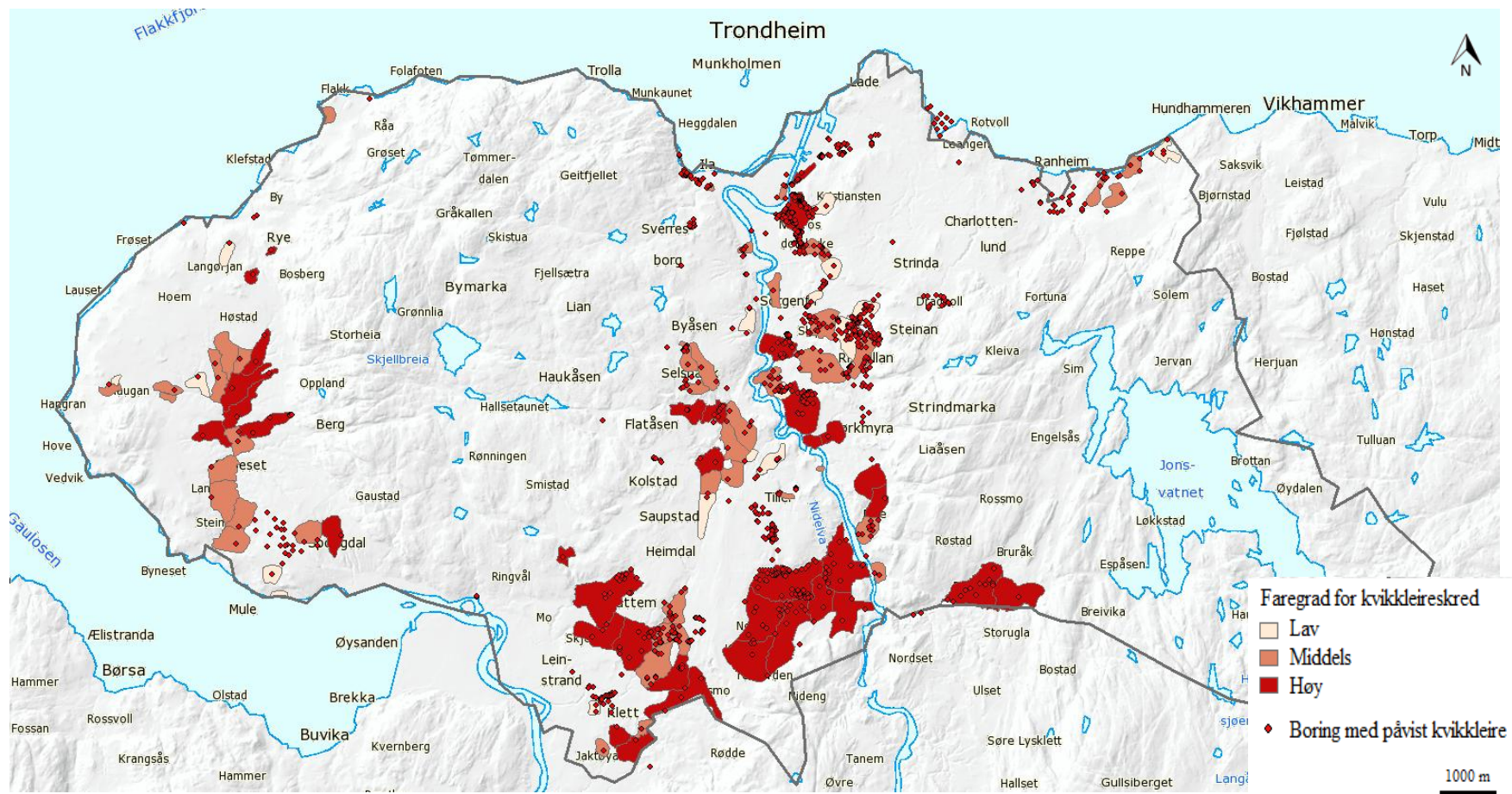
Figur 53. Sammensatt kart av alle grenseverdikart. Viser dybde til fjell med 90 % sannsynlighet.

4.1.7 MODELL - KVIKKLEIREKART

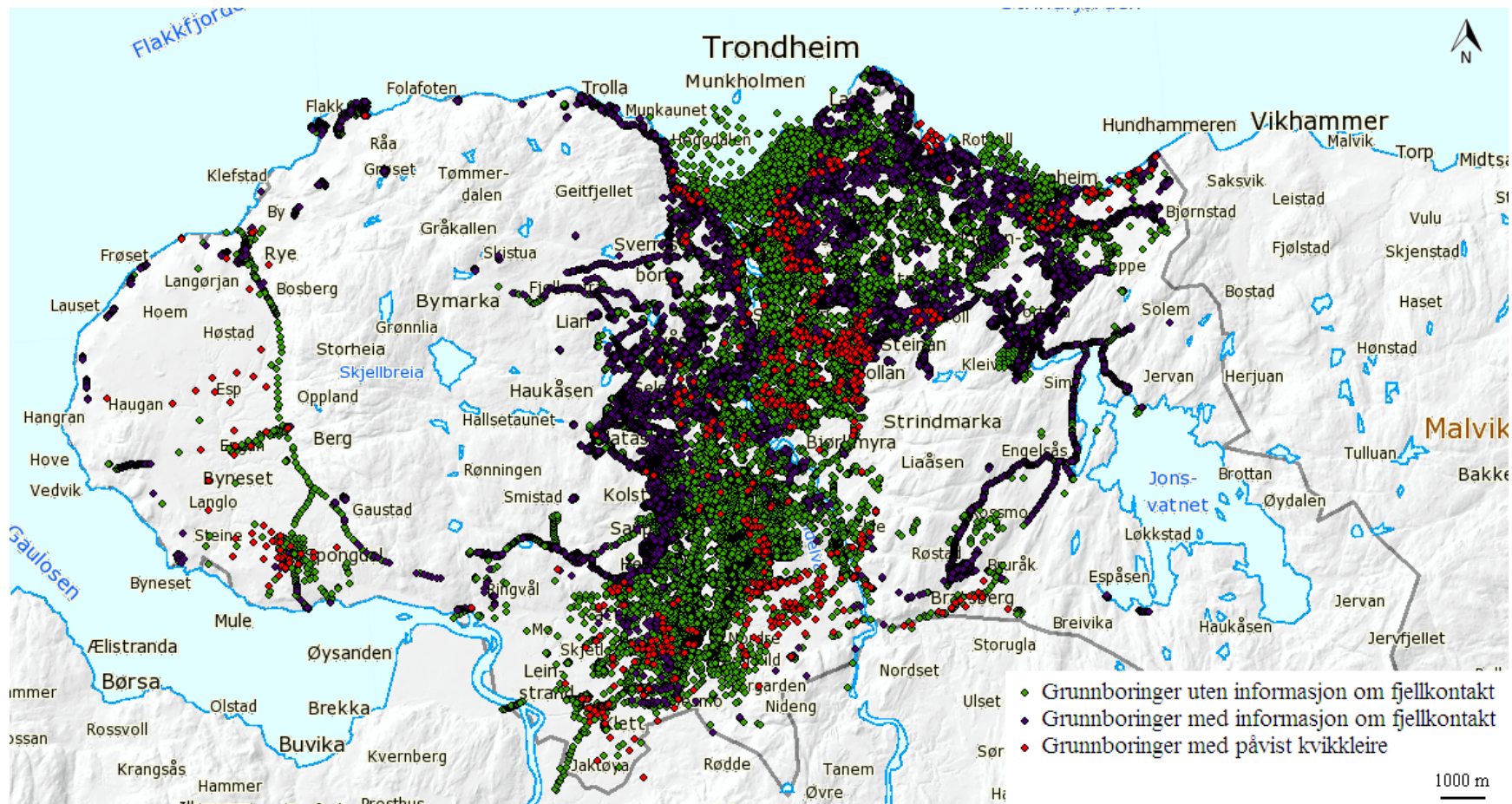
Kartet i figur 54 viser boringer med påvist kvikkleire og løsmasselaget ”41: Sammenhengende dekke av hav- og fjordavsetninger”. De som ikke er innenfor dette laget ligger blant annet i områder der det kartlagte topplaget er elveavsetninger eller fyllmasser. Studeres dette kartet i detalj ser man at kvikkleire er påvist først og fremst i områder ved Ilsvika, Lademoen, Bakklandet, Gløshaugen, Hoeggen, Sluppen, Risvollan, Foldal, Munkvoll, Flatåsaunet, Tiller, Ekle, Heggstadmoen, Klett, Byneset og Folkvang. I figur 55 kan man se at det er fare for kvikkleireskred i de fleste områdene hvor leire har blitt påvist i boringer ifølge faregradskartet hentet fra skredatlas.nve.no. Kvikkleireskredfaregraden sier noe om sannsynligheten for at et kvikkleireskred kan skje. Vurderingen er delt inn i tre klasser (lav, middels, høy) og disse bygger på kriterier som omhandler grunnforhold, topografi, erosjon og flom (NVE 2012b). Figur 56 viser hvor mange grunnboringer som det er påvist kvikkleire i sammenlignet med alle utførte grunnboringer i kommunen. Det er påvist kvikkleire i 1817 (3,1 %) grunnboringer av totalt 57712 grunnboringer (1. jan. 2012). I denne figuren kan man også legge merke til at omkring boringer hvor kvikkleire har blitt påvist har flertallet av boringene ikke nådd fjell.



Figur 54. Kart som viser borepunkter hvor kvikkleire er påvist (røde sirkler) og plassering av løsmasselag av typen 41: Sammenhengende dekke av hav- og fjordavsetninger (blå flater).



Figur 55. Kart som viser borepunkter hvor kvikkleire er påvist (røde sirkler) og områder med faregrad for kvikkleireskred (røde, rosa og hvite flater) lastet ned fra www.ngu.no (NGU 2012h).



Figur 56. Kart som viser grunnboringer i Trondheim kommune. Grunnboringer som ikke har nådd fjell (grønne sirkler), grunnboringer hvor kvikkleire er påvist (røde sirkler) og grunnboringer som har nådd fjell (lilla sirkler).

4.1.8 SAMMENLIGNING AV MODELL 3 OG 5 MED KVARTÆRGEOLOGISK KART OG GEOFYSISKE UNDERSØKELSER

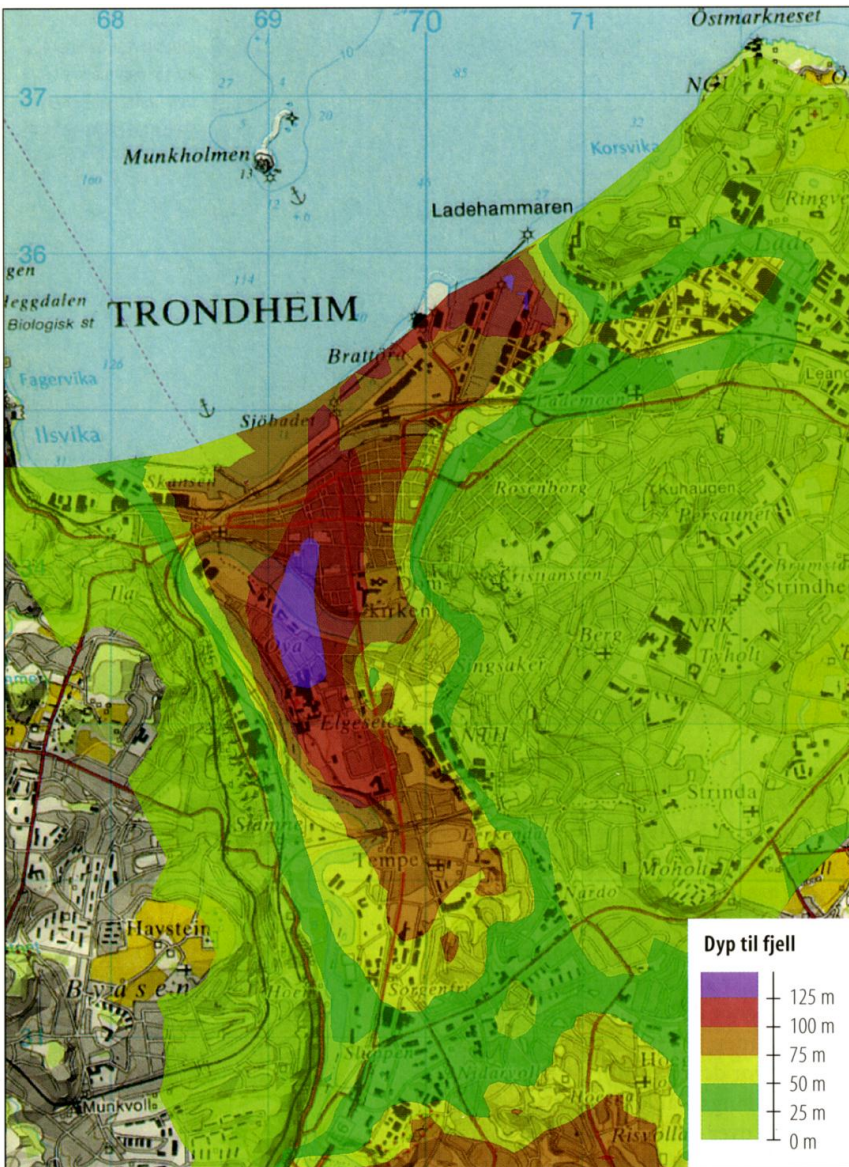
Kvartærgeologisk kart Trondheim 1621 IV (målestokk 1:50 000) (Reite 1983) har blitt sammenlignet med modell 3 og 5. Modell 4 ble ikke evaluert siden det estimerte kartet var forholdsvis likt kartet i modell 3 (figur 46 og figur 39). Sammenlignes blotningene (blå områder) i estimert “dybde til fjell”-kart modell 3 med blotninger på kvartærgeologisk kart (rosa flater) er det noen ulikheter. De fleste fjellblotninger i det kvartærgeologiske kartet kan ses på de estimerte kartene, men det er også noen blotninger som ikke kommer fram på de estimerte kartene. I modell 3 er det syv fjellblotninger, mens i modell 5 er det fem fjellblotninger som ikke kommer fram på det estimerte kartet. Det finnes fire blotninger som eksisterer i modell 3 og fem blotninger som eksisterer i modell 5 som ikke kan ses på det kvartærgeologiske kartet eller i grunnlagsdata, fjellblotningspunkter.

Geofysikkrapporter har blitt lest for å finne ut om de har dybder som er lik de estimerte ”dybde til fjell”-modellene 3 og 5. Alle boringer som de estimerte metodene er basert på var ikke tilgjengelig når alle de geofysiske tolkningene fant sted, men det velges allikevel å gjennomføre en sammenligning. En utviklet “dybde til fjell”-modell for området omkring Midtbyen i ”Gråsteinen 5, Trondheim fra istid til nåtid – landskapshistorie og løsmasser” (Reite m. fl. 1999) er sett nærmere på og fem geofysiske rapporter utarbeidet av NGU har blitt evaluert. De evaluerte rapportene er ”Geofysiske målinger Bakkaune” (Dalsegg 2004), ”Gravimetri for kartlegging av løsmassemektigheten i Trondheim” (Tønnesen 1996), ”Seismisk undersøkelse ved Kongsvegen, Heimdal” (Hillestad 1980), ”Seismiske undersøkelser for bakklandsforbindelsen” (Hillestad m. fl. 1978) og ”Seismisk undersøkelse Hallsteingård” (Hillestad m.fl. 1973). Profilenes plassering er inntegnet i figur 58.

Rapportene ble valgt basert på tre kriterier:

- 3 Det undersøkte området måtte være innenfor kartutsnittet brukt i modell 3 og 5
- 4 Rapporten måtte inneholde informasjon om dybde til fjell
- 5 Rapporten måtte ha et kart hvor det undersøkte profilet var tegnet inn

Tre rapporter med geofysiske undersøkelser utført utenfor det estimerte kartområdet er også sett nærmere på. De tre er gransket for å kunne si noe om løsmassetykkelsen i nærliggende områder. De valgte rapportene er ”Seismiske målinger 1972 – 1979 i Gauldalen” (Sindre 1979), ”Refleksjonsseismiske undersøkelser av skredaktivitet i Trondheim havn” (Bjerkli m. fl. 1990) og ”A multidisciplinary study of submarine landslides at the Nidelva fjord delta, Central Norway – Implications for geohazard assessment” (L’Heureux m. fl. 2010). Alle rapporter er tilgjengelig i papirform på biblioteket ved Norges geologiske undersøkelse.



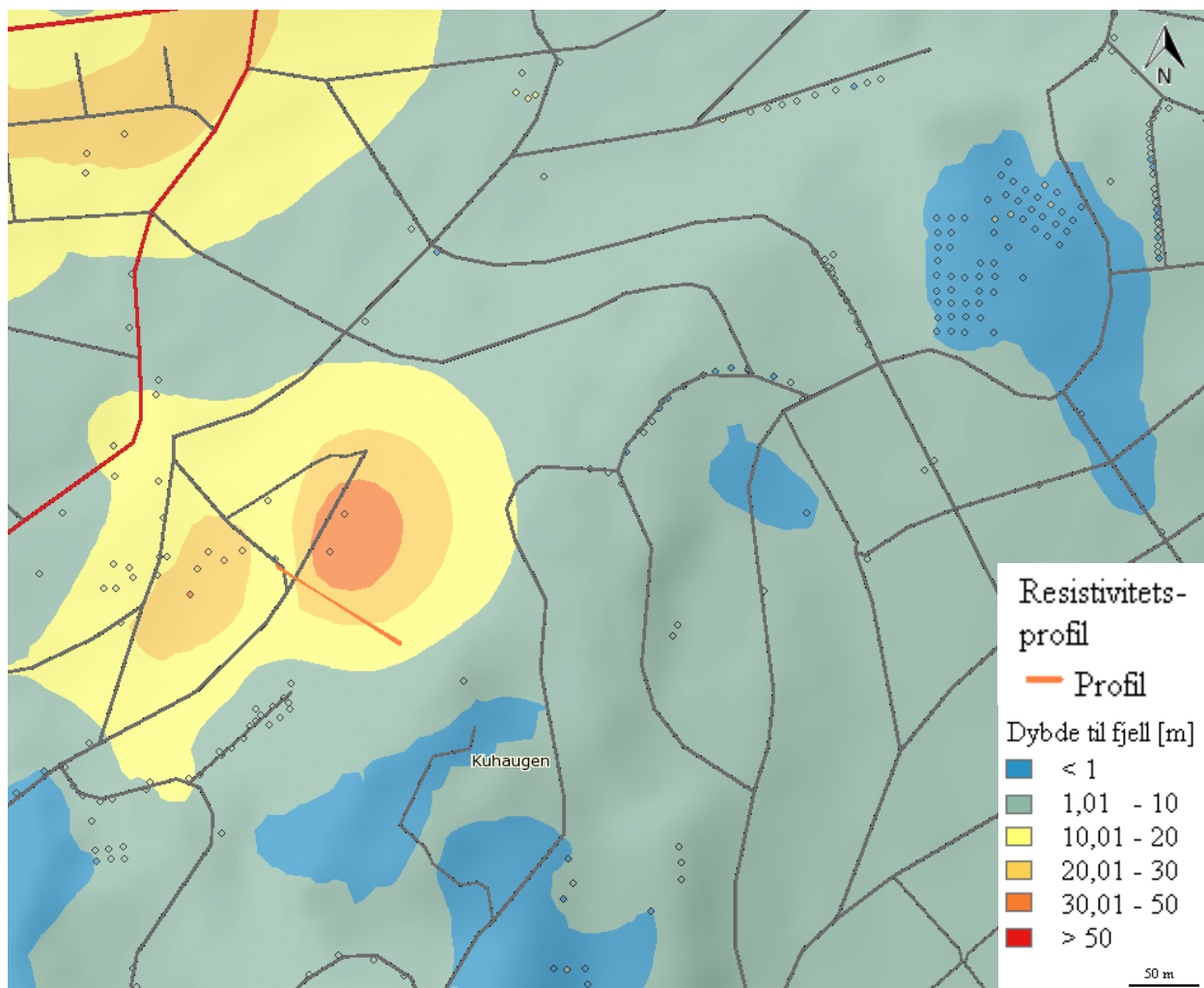
Figur 57. Modell for dybde til fjell gjengitt fra ”Gråsteinen 5, Trondheim fra istid til nåtid”. Dybde til fjell er illustrert med farger fra lys grønn (0 – 25 m) til lilla (> 125 m) (Reite m. fl. 1999).

I ”Gråsteinen 5, Trondheim fra istid til nåtid – landskapshistorie og løsmasser” (Reite m. fl. 1999) vises en modell med dybde til fjell basert på geofysiske undersøkelser og boringer for Trondheim sentrum (figur 57). Dette kartet angir dybder til fjell på mer enn 50 m for hele Midtbyen, Øya og området rundt Elgesetergate, samt deler av Gløshaugen, Lademoen og Tempe. I de framstilte modellene i denne oppgaven er det kun i modell 5 det forekommer små områder innenfor dette arealet med dybder til fjell større enn 50 m. Det er angitt mektigheter > 20 m for store deler av det angitte området i begge modellene (3 og 5), men bare deler av området har mektigheter > 30 m. I kartet i Gråsteinen 5 er det også angitt områder med løsmassetykkelser på 0 - 25 m. Disse områdene har forholdsvis lik utbredelse som i modell 3 og 5.



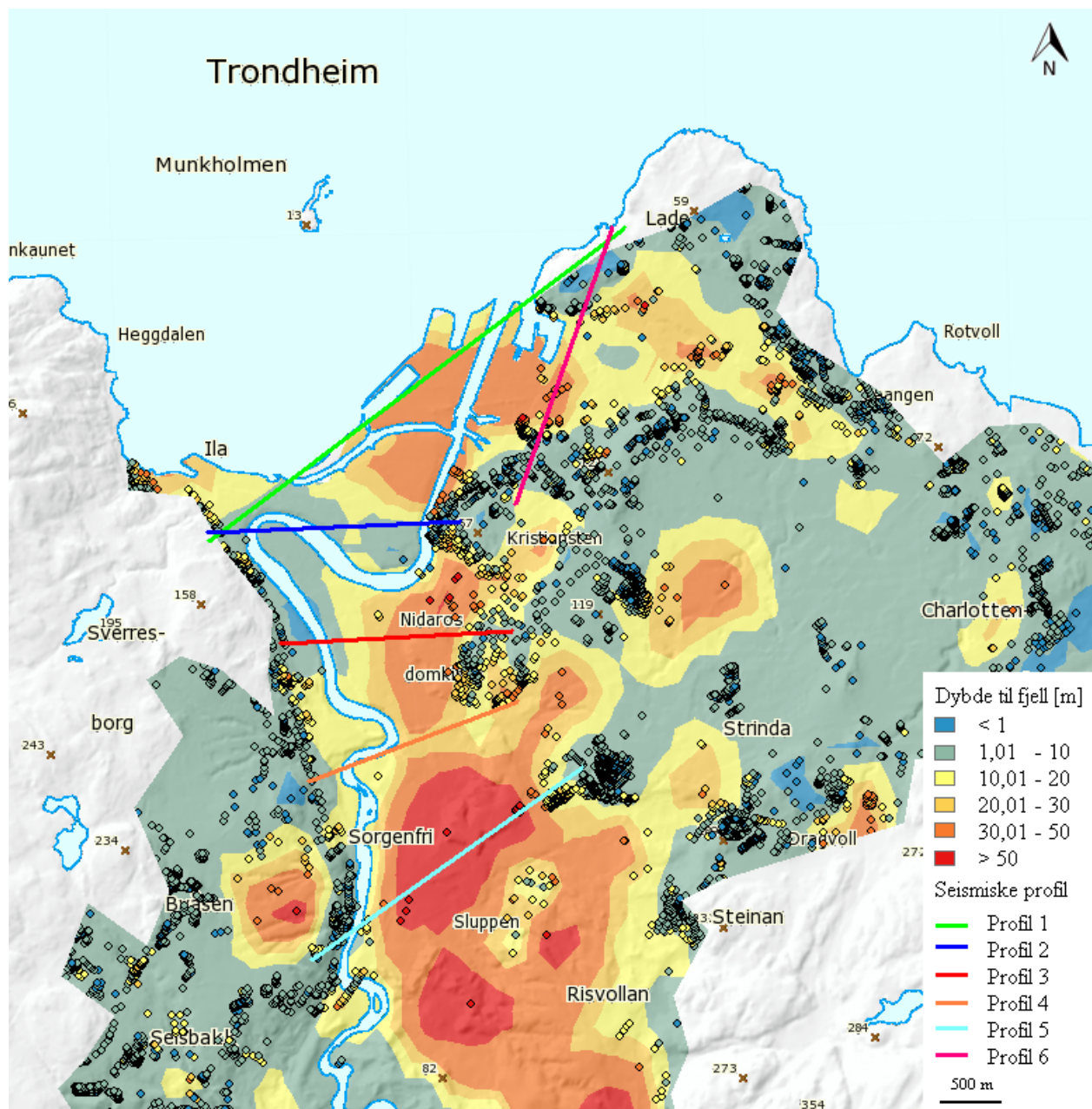
- 1. Geofysiske målinger Bakkaune
- 2. Gravimetri for kartlegging av løsmassemekktigheten i Trondheim
- 3. Seismiske undersøkelser ved Kongsvegen, Heimdal
- 4. Seismiske undersøkelser for Bakklandsforbindelsen
- 5. Seismiske undersøkelser Hallsteingård

Figur 58. Kartutsnitt som illustrerer posisjoner til evaluerte geofysiske undersøkelser.



Figur 59. Plassering av resistivitetsprofil (oransje strek) i kart i rapport "Geofysiske målinger Bakkaune". Modell 3 er brukt som bakgrunnsbilde.

I rapport "Geofysiske målinger Bakkaune" (Dalsegg 2004) har resistivitetsmålinger kombinert med boringer indikert at det er dybder til fjell på 25 – 30 m ved Bergstien/ Markvegen (figur 59). Dette området har ifølge modell 3 og 5 en dybde på 10-20 m. Altså er estimerte dybder til fjell i modellene mindre enn det de tolkede dybder til fjell er i Dalsegg (2004). Det eksisterer boringer ca. 35 m sørvest for området som har dybder til fjell på 39,2 m og 43,6 m, samt en boring 25 m vest med en dybde til fjell på 8 m.



Figur 60. Plassering av seismiske profil i kart I rapport "Gravimetri for kartlegging av løsmassemektheten i Trondheim". Modell 3 er brukt som bakgrunnsbilde.

I rapport "Gravimetri for kartlegging av løsmassemektheten i Trondheim" (Tønnesen 1996) er det utført gravimetrisk undersøkelse i seks profiler. Det er få utførte boringer i midten av disse profilene. I profil 1 er det store dybder til fjell (60 - 100 m) langs hele profilet, bortsett fra i endene av profilet (x = 750 m) hvor dybde til fjell minker til < 10 m (figur 60). Profil 1 har mye større dybder til fjell enn det som er estimert i modell 3 og 5, men formen er den samme med større løsmasseakkumuleringer i midten enn på sidene av profilet.

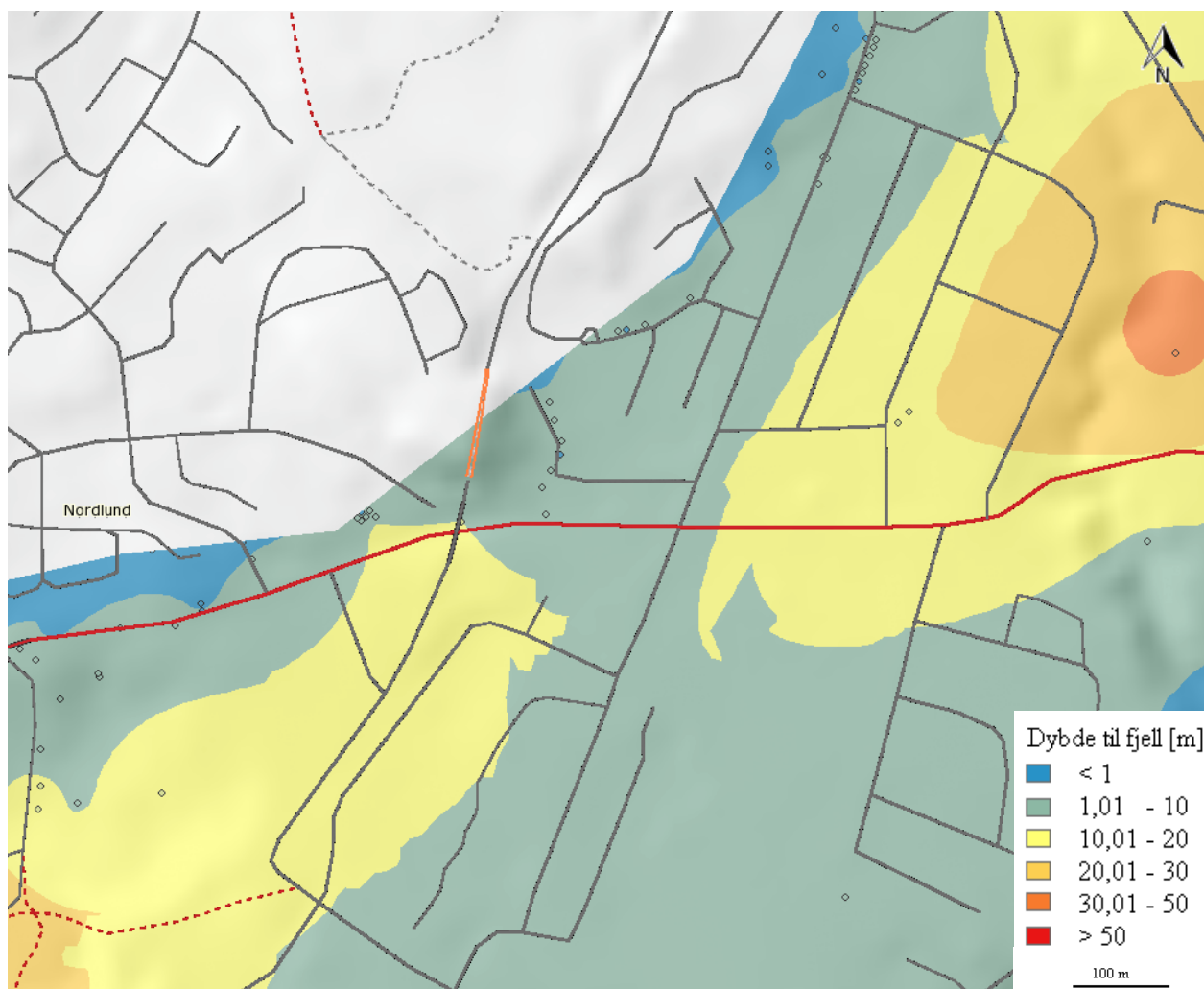
Profil 2 har samme form som profil 1 med store løsmassetykkelser i midten av profilet. Maksimum dybde til fjell er på ca. 120 m. Profil 2 samsvarer ikke med modell 3 og 5 som har mye lavere dybder til fjell enn profil 2. Store deler av profilet er i modell 3 estimert til å ha dybde til fjell < 10 m, mens maksimum dybde til fjell er lik 20 m. Modell 5 har litt større løsmassemektigheter langs profilet i forhold til modell 3, men løsmassetykkelsen er generelt lavere enn det den er tolket til å være i Tønnesen (1996).

Profil 3 illustrerer store dybder til fjell i vest med et maksimum på 120 m, og mindre store dyp i øst (ca. 50 m). Profil 3 samsvarer ikke godt med modell 3. Det er kun i et lite område helt øst i profilet at dybde til fjell er forholdsvis likt. I modell 3 er dybde til fjell estimert til å være < 10 m i vestre del av profilet, stigende etter 2/3 av profilet til maksimumsverdien i øst på 30 – 50 m. Modell 5 har litt større dybder til fjell enn modell 3, men modellen samsvarer allikevel ikke godt med profilet i Tønnesen (1996) som har enda større dybder til fjell.

I profil 4 er det økende dybder til fjell etter $x = 300$ m til $x = 1500$ m (maksimum 80 m). Deretter kommer et parti med små dybder til fjell. I modell 3 er dybde til fjell på 1 - 10 m for $x = 0$ til $x = 400$ m, deretter øker dybden til fjell til 20 - 50 m for så å minke på slutten av profilet. I dette profilet er modellene 3 og 5 ganske like gravimetriprofilet i stigning og minking, men dybden til fjell er mye lavere i modell 3 og modell 5.

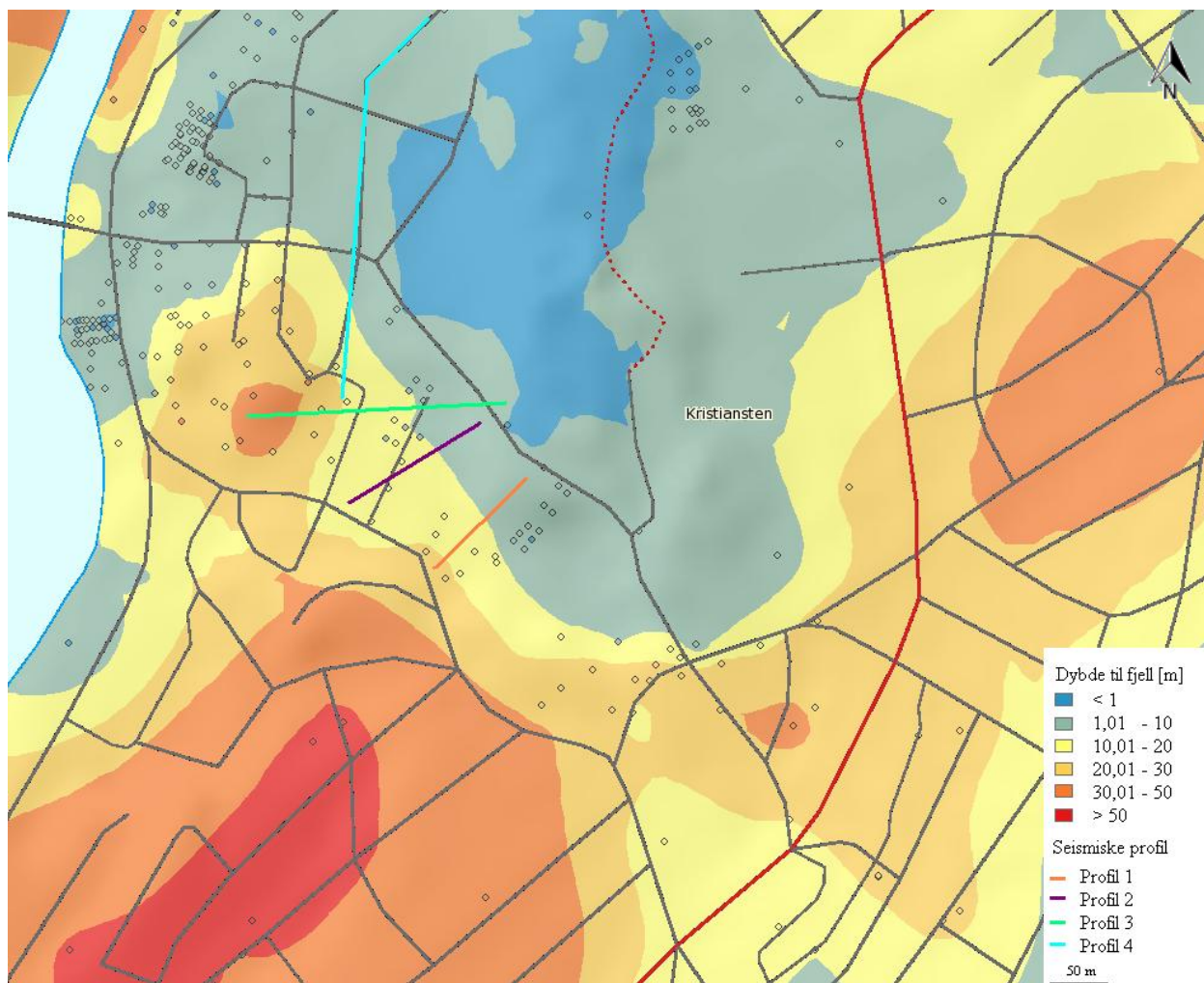
Profil 5 har en forholdsvis stor dybde til fjell (ca. 50 m) over hele profilet. Modell 3 har derimot en kraftig økning i dybde til fjell fra 1 – 10 m til > 50 m fra $x = 0$. Den første delen av det gravimetriske profilet ($x = 0$) samsvarer ikke med modell 3, men resten samsvarer til en viss grad. I modell 5 er det kun et lite område hvor dybde til fjell er over 50 m, men det er store områder med løsmassemektighet > 20 m. Denne modellen samsvarer ikke bra med profilet.

Profil 6 angir dybder til fjell på 60 - 80 m i begynnelsen av profilet ($x = 0$), men litt lavere dybder til fjell på enden av profilet (10 m løsmassetykkelse). Modell 3 langs profil 6 har dybder til fjell på 10 - 20 m i begynnelsen av profilet og < 10 m i enden av profilet. Verdiene i begynnelsen av profilet er svært forskjellig fra verdiene funnet i det gravimetriske kartet. Det er angitt dybder til fjell opp mot 50 m langs profilet i modell 5 og dybde til fjell < 10 m i endene. Bortsett fra noen hundre meter i enden av profilet, samsvarer ikke de estimerte dybdene til fjell med profilet i Tønnesen (1996).



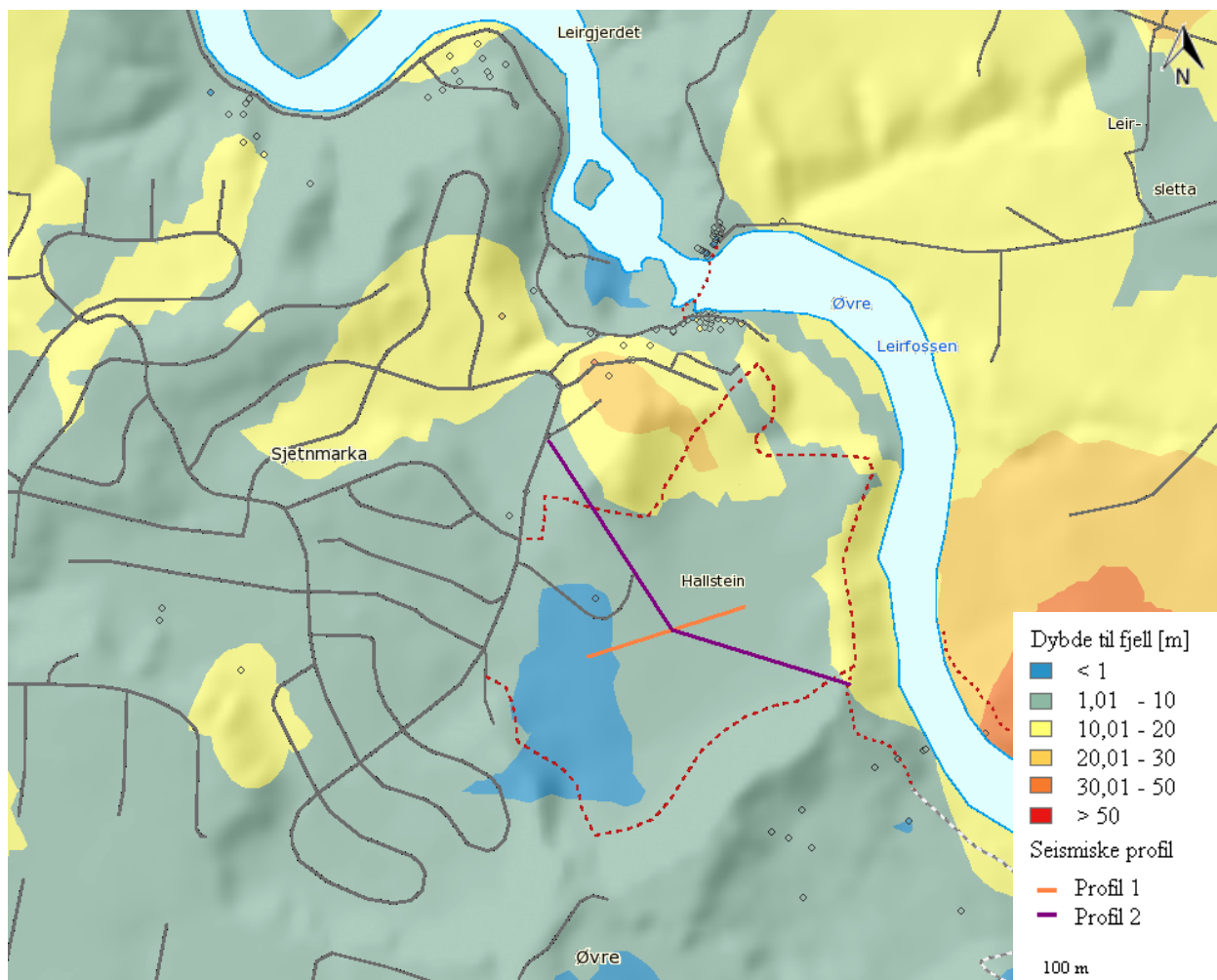
Figur 61. Plassering av seismikkprofil i kart i rapport "Seismisk undersøkelse ved Kongsvegen, Heimdal". Modell 3 er brukt som bakgrunnsbilde.

I rapport "Seismisk undersøkelse ved Kongsvegen, Heimdal" (Hillestad 1980) er det angitt at maksimal dybde til oppsprukket fjell langs søndre del av Tunelvegen er 6 m (figur 61). Dette stemmer bra med både modell 3 og 5 som angir at det er dybde til fjell fra 1 til 10 meter langs profilet.



Figur 62. Plassering av seismiske profil i kart i rapport "Seismiske undersøkelser for bakklandsforbindelsen". Modell 3 er brukt som bakgrunnsbilde.

I rapport "Seismiske undersøkelser for bakklandsforbindelsen" (Hillestad m. fl. 1978) er det i profil 1 og 2 angitt dybder til fjell på 1 - 10 m ved Kristianstens festning og 10 - 20 m ved Kristianstensbakken (figur 62). Profil 3 angir dybde til fjell til å øke fra 20 - 30 m til maksimum 38 m i enden av profilet. Profil 4 angir dybde til fjell til å være 1 - 10 m over hele profilet bortsett fra i nordre del av profilet hvor dybde til fjell øker til maksimalt 13 m. Alle verdier stemmer godt overens med modell 3 bortsett fra profil 4. I modell 3 er dybden til fjell langs profil 4 estimert til å være 10 - 20 m fra $x = 0$ til $x = 35$ m. Modell 5 er ganske lik seismikk resultatene, men den dype delen av profil 2 er estimert til å være kortere enn det som er tilfellet på det seismiske profilet. Modellen har også estimert en blotning ved Nedre Kristianstens gate som ikke er på profil 4. Boringer gjort i området stemmer godt overens med både profil og modell 3 og modell 5.



Figur 63. Plassering av seismiske profil i kart i rapport ”Seismisk undersøkelse Hallsteingård”. Modell 3 er brukt som bakgrunnsbilde.

Rapport ”Seismisk undersøkelse Hallsteingård” (Hillestad m.fl. 1973) angir dypet til fjell ved Hallstein gård til å være 10 – 20 m vest i profil 1 (figur 63). Halvveis ut i profil 1 øker løsmassetykkelsen til over 30 m og øst i profilet er den maksimalt 50 m. Profil 2 varierer i dybde fra maksimum ca. 26 m til minimum 8 m. Profil 1 stemmer ikke overens med modell 3 som estimerer området til å ha en dybde til fjell på 1 – 10 m og 0 m helt i vest i profilet. Hele profil 2 er estimert til å ha dybde til fjell på 1 – 10 meter i modell 3. Dette er ikke tilfelle for store deler av det seismiske profilet som har større tolkede dybder. Modell 5 er lik modell 3, bortsett fra store dyp (20 – 30 m) estimert helt sør i profil 2. Dette samsvarer ikke med seismikkprofilen som estimerer dybder i dette området til å være 8 – 20 m.

Vurderinger i områder utenfor kartutsnittet har blitt gjort for å kunne si noe om dybder til fjell i områder hvor det eksisterer få boringer. Områdene det er fokusert på er sørvestre del av kartutsnittet og Midtbyen. Dette er områder hvor det er få boringer utført og dermed stor usikkerhet knyttet til estimerte dybder i modellene. I rapport ”Seismiske målinger 1972 – 1979 i

Gauldalen” (Sindre 1979), profil 2 så har det blitt målt dybder til fjell ved seismiske målinger fra 140 til 380 m på det dypeste i yttersvingen ved Kuøra. Dette indikerer at det er store løsmassetykkelser i omkringliggende områder.

I rapport ”Refleksjonsseismiske undersøkelser av skredaktivitet i Trondheim havn” (Bjerkli m. fl. 1990) er det indikert store dybder i havnebassenget. Alle verdier er gitt i ms og må regnes om (millisekund 2-veis gangtid til den utsendte lydimpulsen). Nedenfor er to omregninger utført med maksimums- og minimumsverdier for dybde til fjell, samt lydshastigheter i løsmasser hentet fra Bjerkli (1990). Gitt at total mektighet til fjell er 140 ms (maksimum millisekund 2-veis gangtid indikert på kart nordøst for pir 1) hvorav sandlagets mektighet er 20 ms og resten av sedimentdekket består av leire/silt ($0,02 \text{ s} * 1600 \text{ m/s} + 0,12 \text{ s} * 1700 \text{ m/s} = 236 \text{ m}$). Eksempelutregningen gir en dybde til fjell på 236 m. Nord for Ladehammeren er det indikert en minimumsdybde på 60 ms. Hvis verdiene i det forrige eksemplet blir brukt gir dette en løsmassemektighet på 100 m ($0,02 \text{ s} * 1600 \text{ m/s} + 0,04 \text{ s} * 1700 \text{ m/s} = 100 \text{ m}$). Disse eksempelutregningene indikerer at løsmassemektigheten i havnebassenget er større enn 100 m. En annen kilde som også angir løsmassetykkelser i havnebassenget til å være større enn 100 m er ”A multidisciplinary study of submarine landslides at the Nidelva fjord delta, Central Norway – Implications for geohazard assessment” (L’Heureux m. fl. 2010), hvor det nevnes at sjøbunnen i havnebassenget består av løsmasser med maksimal tykkelse på 125 m.

5 DISKUSJON

5.1 INNSAMLING AV GEOLOGISKE OG GEOTEKNISKE DATA

Innsamling av geologiske og geotekniske data for videre bruk er viktig. Nedenfor er innsamling, lagring, bearbeiding og presentasjon av brønndata, grunnboringsdata og geofysiske data diskutert (en programvare som gjennomfører dette er per definisjon et geografisk informasjonssystem (GIS) (Ludvigsen 2011)).

Per i dag er det rapporteringsplikt ved boring av grunnvanns- eller energibrønner. Det er NGU som står for innsamling, bearbeiding og presentasjon av disse dataene (nasjonal grunnvannsdatabase). Kart med alle brønnboringer registrert i nasjonal grunnvannsdatabase er presentert på nett og disse brukes som informasjonskilde av flere instanser ved bygging av anlegg. Det er ikke alle brønnboringer som blir registrert i basen, men gevinstene med økt innrapportering er mange. Økt innrapportering vil øke mengden informasjon som kan tas i bruk av offentlig instanser og private bedrifter. Ved konstruksjon av modeller basert på disse dataene minsker usikkerheten i modellerte estimater ved å basere modellen på flere borepunkter. Noen konflikter som kan oppstå mellom private og offentlige interesseparter kan forhåpentligvis også bli unngått ved økt antall registrerte brønner. Dette gjelder spesielt ved etablering av brønner i områder med fremtidige eller allerede bygde offentlige undergrunnsinstallasjoner som brønner, vei-, jernbane- eller kloakktunneler. Ved at flere brønner blir registrert har man større mulighet til å sjekke om naboen har en brønn før man installerer selv og dermed kan dette tas hensyn til ved å øke borelengden og plassere brønnen et stykke vekk fra den andre brønnen (minimum 20 m for å unngå termisk påvirkning). Offentlige instanser kan også få tilgang på mer helhetlig data ved sjekk av plassering av brønner før utbygging av infrastruktur. Med økt bruk av undergrunnen øker også behovet for stedfestelse av undergrunnsinstallasjoner. Alle undergrunnsinstallasjoner er ikke fullstendig registrert i et offentlig tilgjengelig kart per i dag i Trondheim kommune. Et digitalisert kart med alle undergrunnsinstallasjoner ville vært til stor hjelp for brønnborere og offentlige aktører.

Innsamling, bearbeiding og presentasjon av grunnboredata er viktig for å kunne øke kunnskap om grunnen og for å unngå å gjøre dobbelt arbeid. Grunnboringer utføres ved ulike typer utbygginger. Å utføre nye grunnboringer fordi informasjon vedrørende gamle grunnboringer er utilgjengelig medfører ekstra kostnader og unødig tidsbruk. Den samfunnsøkonomiske gevinsten i form av reduserte kostnader, tidsbruk og bedre planlegging ville vært betydelig. Ved å samle inn alle grunnboringsdata utført kommunalt og i samarbeid med konsultantselskaper i en database, har man en god og oversiktlig informasjonskilde. På nasjonalt nivå vil dette bidra til enda mer datagrunnlag til bruk i modeller for hele landet (for eksempel en nasjonal "dybde til fjell"-modell). I dag er Trondheim kommune en av få kommuner i Norge som utfører denne praksisen. Kommunene har på grunn av deres store mengder med boringer og samarbeidspartneres boringer årlig en gylden mulighet til å få tak i mye nyttig informasjon om

boringer. Nasjonalt kan det mest effektive være å samle inn data fra hver enkelt kommune, men dette krever en mal når det gjelder hvilken informasjon som skal samles inn av kommunene. Å bearbeide data ved å sortere informasjon inn i kolonner med relevante parametre bidrar til lettere å kunne presentere data (for eksempel kolonner med: boredato, påvist kvikkleire, borelengde og om boringen traff fjell). En enkel presentasjonsform av boringsdata er å benytte en parameter og angi ulike alternativer for parameteren ved farge eller størrelse på symbol i alle punktene. Som bakgrunn kan offentlig tilgjengelige kart over Norge fra Statens kartverk brukes. Dette gir et bilde på hvordan en parameter varierer over et område. Et eksempel på et slikt kart kan ses i figur 31, hvor parameteren dybde til fjell har blitt brukt.

Rapporter fra geofysiske undersøkelser blir i dag lagret av firmaene som utfører undersøkelsene (for eksempel NGU). De geofysiske undersøkelsesprofilene kunne blitt tegnet inn på kart med informasjon om rapportnummer. Dermed kunne de som hadde vært interessert i en gitt rapport sett nærmere på denne. NGU har begynt arbeidet med et slikt kart ved å registrere noen seismiske profiler i den nasjonale geofysikkdatabase (Dragon). Å digitalisere de geofysiske rapportene med adgang til de på nett hadde gjort de lettere tilgjengelig. I denne oppgaven er geofysiske undersøkelser kun brukt som en evaluering av modellen, men disse kan også brukes som en del av en modell.

5.2 MODELLER

Det er valgt å vurdere metodene utviklet av Asplan Viak, UiB/Bioforsk og British Geological Survey basert på egne erfaringer med lignende metoder (modell 2, 3 og 4) og ved gjennomlesing av de omhandlede rapporter. I de ulike estimerte modellene er det benyttet grunnlagsdata med tilknyttede usikkerheter. Grunnlagsdata som er brukt i modellene er løsmasseflater og fjellblotningspunkter fra kvartærgeologisk kart, brønnpunkter fra nasjonal grunnvannsdatabasen (Granada) og grunnboringspunkter fra Trondheim kommunes grunnboringsdatabase. Kvartærgeologisk kart og Granada er også brukt som datakilder i Ramstad (2011) og Kitterød (2011).

Løsmassekart har usikkerheter knyttet til kartleggingen spesielt når det gjelder plassering av løsmassegrenser i kart. Granada har usikkerheter i innmålte x- og y-koordinater til brønnpunkter. Når gjelder borehullets fall og fallretning er det kun noen brønner i Granada som har informasjon om dette. Det er 34 boringer registrert i Trondheim kommune i kartutsnitt (modell 3, 4 og 5) i Granada som har boringer med registrert avvik i fall fra 90 grader (loddrett) og asimut. Av disse er fjell påtruffet etter mindre enn 11 m i 16 av boringene. Dette tilsvarer ikke store avvik i dybde til fjell. Det er allikevel noen få som har blitt boret til ca. 60 m med avvik fra loddrett på 10-15 grader. Disse vil få en feil på ca. 1 m i dybde til fjell. Den største feilkilden gjelder en enkeltbrønn som har blitt boret ned til fjell på 52,5 m med et loddrett avvik på 20 grader. Dette tilsvarer ca. 3 m feil i dybde til fjell. I modell 1, 2, 3 og 5 ble det antatt at alle boringene var

loddrette, mens i modell 4 ble det tatt hensyn til asimut og fall. Det er ikke oppgitt at det har blitt tatt hensyn til fall og fallretning i rapportene som beskriver metodene utviklet av Asplan Viak, UiB/Bioforsk og British Geological Survey.

Det er ikke bare usikkerheter knyttet til en enkelt måling som gir usikkerheter i de estimerte modellene, men også stedvis fordeling av borepunkter skaper usikkerheter. Brønnpunktene i Granada er ikke likt distribuert over hele Trondheim kommune. Grunnboringer er også ujevnt fordelt fordi grunnboringer ofte blir utført i forbindelse med utbygging av vei, boliger eller andre byggeprosjekter. Dermed er boringene sentrert til urbane områder. Når det gjelder boringer som går helt ned til fjell, utføres disse av økonomiske grunner for det meste i områder hvor det er forventet lite løsmasseoverdekning. At borepunktene er ujevnt fordelt påvirker fremstilling av boredata og modeller på tre måter:

- Løsmassetykkelsen i områder med få boringer er forholdsvis ukjent.
- Estimerte dybder (i modell 3, 4 og 5) i områder med få boringer er veldig usikre siden det er lange avstander til nærmeste boring.
- Løsmassetykkelsen i områder uten boringer er mest sannsynlig underestimert. Dette er tilfelle fordi de nærmeste boringene til området bestemmer områdets løsmassetykkelse.

Det er antatt at grunnlagsdataenes fordeling av boreddybde og dybde til fjell er log-normal. Ulemper med å bygge modeller på log-normal fordelt data er at verdier som varierer mye fra gjennomsnittet blir gitt større betydning enn det de blir gitt ved normalfordelt data. I oppgaven er det antatt at grunnlagsdataene er andregrads stasjonære. Det kan være vanskelig å tilpasse en variogrammodell til dataene hvis dette ikke er tilfelle. Hvis dataene er ustasjonære kan det hende at estimerer i kriging ikke blir forventningsrett. Det er også større sjanse for å få negative estimerer ved bruk av kriging ved tildeling av negative vektorer.

Ulike valg ved konstruksjon av modellene har fått betydning for hvordan de estimerte kartene ser ut. Dybde til fjell er fordelt i fem klasser (< 1m, 1-10 m, 10-20 m, 20-30 m, 30-50 m og > 50 m) basert på antall boringer innenfor ulike intervaller av dybde til fjell (figur 29). Det kunne også ha blitt valgt å inkludere en ekstra klasse etter > 50 m (for eksempel 50-100 m og > 100 m). Dette ble ikke valgt på bakgrunn av at den største boringen til fjell er på 103 m. Avgrenset område brukt i modell 3, 4 og 5 burde vært mindre hvis det hadde blitt tatt mer hensyn til borepunkter og bebyggelse.

Når det gjelder bruk av kvartærgeologisk kart til å representere løsmassetykkelser i de estimerte modellene har representasjonsformen også usikkerheter knyttet til seg. I modellene har kvartærgeologisk kartdata blitt inkludert ved å definere noen løsmasselag til å ha en løsmassetykkelse på 0 m. De utvalgte løsmasselagene har blitt basert på skjønn. Definisjonen av valgte løsmassetykkelser lik 0 m er sikkert ikke helt riktig for alle områder. Verdien kan i dette tilfellet allikevel settes lik 0 for bruk i modellen fordi løsmassetykkelser i modellen blir delt inn i 1, 10, 30 og 50 meter. Dermed vil ikke en reell tykkelse på 0,99 m for et lag virke inn på

modellen. Løsmasseyper med en definert tykkelse på 0 m blir ikke godt representert som punkter i modell 3, 4 og 5. Figur 23 viser at et forholdsvis stort område av bart fjell blir representert med kun et punkt. Dermed blir disse punktene lett overdøvet av nærliggende boringer i den estimerte modellen. Antall punkter per blotning ble bestemt basert på omformingsmetoden fra flatedata til punktdata i ArcGIS. Resultatet er at ikke alle blotningene kommer fram på kartet og noen blir mindre enn det de virkelig er.

Geologisk historie tilsier at de områder som ligger under marin grense (ca. 160 m) er dekket av et til tider tykt løsmasselag av leire, mens de områder som ligger over marin grense for det meste er dekket av et tynt lag av forvitringssedimenter eller morene. Disse trendene kan også ses i kvartærgeologiske kart og er gjengitt i modellene ved å inkludere løsmasselag fra kvartærgeologiske kart som per definisjon har en løsmasseykkelse på 0 m.

De estimerte modellene blir omhandlet i de neste avsnittene. Modell 1 fremstiller grunnlagsdata ved at ulike intervaller av dybde til fjell og boredybde er representert med forskjellige farger. Metode 2 gir den samme informasjonen som modell 1, bare i lavere målestokk ved at en rute blir representert av en eller flere grunnboringer og løsmasseflater. Modell 2 er bra på målestokk 1:100 000 eller mindre, men gir ikke god informasjon i større målestokk grunnet inndeling i ruter på størrelse 100x100 m. Modell 2 er inspirert av metoden som benyttes i rapporten ”Grunnvarme i Norge – kartlegging av økonomisk potensial” (Ramstad 2011). I denne rapporten er rutene laget i størrelse 250 x 250 m istedenfor 100 x 100. Altså blir data i Ramstad (2011) illustrert i en lavere målestokk. En annen forskjell er måten rutene får verdier i Ramstad (2011). I Ramstad (2011) velges flaten eller punktet med den minste dybden til fjell. I de rutene som blir angitt til å ha en dybde til fjell større enn 30 m basert på løsmasseflater blir tykkelsen ofte overestimert. Dette er fordi boringer i mange av områdene som er kartlagt som tykt løsmassedekke viser at løsmasseykkelsen i virkeligheten er mindre enn 30 m. I modell 2 velges gjennomsnittet av borepunktene i rutene, og hvis det er data fra borepunkt og løsmasseflater med løsmasseykkelse lik 0 m i samme rute velges data fra borepunktet. Et større område kunne ha blitt dekket av modellen i oppgaven ved å inkludere flere løsmasseflater med andre løsmasseykkelser eller ved å øke rutestørrelsen. Dessverre er det vanskelig å dele inn løsmasseykkelsen til løsmasseyperne i det kvartærgeologiske kartet på en 10 m skala. Å øke rutestørrelsene vil kun føre til et mindre detaljert kart som ikke er ønskelig i dette tilfellet.

Modell 3 gir et bilde av estimerte dybder til fjell i stor målestokk. Modell 3 er inspirert av ”SaltSMART - Salt i grunnvann” (Kitterød m. fl. 2011) hvor ordinær kriging blir tatt i bruk. I Kitterød (2011) brukes en variogrammodell basert på punkter fra hele Norge til å estimere dybder til fjell i et lite lokalt område med få punkter (figur 13). Mange datapunkter er nødvendig for å få en mest mulig reell modell ved bruk av estimeringsmetoder og også i modell 3 ses det områder sør i kartutsnittet med få datapunkter hvor usikkerheten til estimerte verdier er veldig stor. Det kan settes spørsmålsteget ved estimerings korrekthet i områder med så få punkter. Variogrammodellen i modell 3 tilpasset datapunktene følger ikke den bølgete formen til gjennomsnittsverdiene til grunndataene etter 960 meter. Det er valgt en søkeellipsoide som er

mindre enn 960 m og sfærisk modell. Dette er gjort fordi denne modellen ga bedre estimat enn ”hole effect”-modellen som er bølgete. Grunnen til at variogramverdien er lavere for punkter som er ca. 960 - 1740 m fra hverandre i forhold til de som er ca. 600 – 960 m og ca. 1740 – 2280 m fra hverandre er mest sannsynlig den store forskjellen i løsmasseykkelse som er mellom punkter med stor løsmassemektighet og punkter med liten løsmassemektighet. Punkter som symboliserer dette i variogrammet har svært høye variogramverdier og de drar dermed gjennomsnittskurven opp. Ved avstandsintervallene 600 – 960 m og 1740 – 2280 i variogrammet er det noen få punkter med høy variogramverdi som drar gjennomsnittet av variogramverdiene opp. Det ble også prøvd å finne en forklaring på dette fenomenet i det kvartærgeologiske kart, men dette ble ikke funnet. Det kan forekomme slike trender i variogram på grunn av dataprosessering, men i dette tilfellet er det nok heller datasettet som gir den bølgete formen. Anisotropi retning kunne ha blitt valgt annerledes. Dette ville ha påvirket variogrammodellen i liten grad siden anisotropien var svært liten. Ved bruk av ordinær kriging får man et utglattet bilde av virkeligheten og man må derfor forvente at det ikke er veldig detaljrikt på korte avstander.

Modell 4 gir et bilde i tre dimensjoner på dybde til fjell. Variogrammet brukt i denne modellen er likt variogrammet brukt i modell 3 uten geometrisk anisotropi. Dette ble gjort fordi anisotropien var svært liten for datapunktene og inkludering i modell 4 var arbeidsomt. Denne modellen tar i bruk topografiske data. Dette gjøres også i informasjonsheftet ”Superficial Deposits Thickness Model – Version 5” (Lawley m. fl. 2010) utarbeidet av British Geological Survey. I dette informasjonsheftet informeres det om at de topografiske dataene kan inneholde feil enten ved at måleradaren tror at toppen av trær er bakken eller ved at datamaskinen konkluderer med at berg består av bare løsmasser. Om dette er tilfellet for de topografiske dataene som brukes i denne oppgaven vites ikke.

Om man sammenligner modell 4 i to dimensjoner (figur 45) og tre dimensjoner (figur 46) ser man at 2D modellen gir mer informasjon ved første øyekast i forhold til 3D modellen. Fordelen med 3D modellen er at terrengoverflaten blir inkludert. Dermed kan snitt lages og berggrunnsoverflater som er estimert til å være større på z-aksen enn overflaten, elimineres. Grunnen til at berggrunnen noen plasser ligger høyere over havet enn topografien, er fordi berggrunnen er et utglattet bilde med få punkter i forhold til topografien som er basert på punkter med 5 og 10 meters mellomrom. Modell 3 og 4 er basert på mangelfulle data siden det av praktiske grunner er umulig å inkludere punkter uten informasjon om fjellkontakt i ordinær kriging og implisitt modellering med radielle basisfunksjoner uten å angi boringens dybde som dybde til fjell. Å angi boringers dybde som dybde til fjell vil gi veldig feil datagrunnlag siden mange boringer har blitt stoppet etter mindre enn 10 m. Å forkaste disse kartene er allikevel ikke å anbefale.

Modell 5 gir, i likhet med modell 3, et utglattet bilde av estimert dybde til fjell i to dimensjoner. Modellen gir et mer korrekt bilde av dybde til fjell enn modell 3 og 4 siden grunnboringer uten informasjon om fjellkontakt også er inkludert. Anisotropi retningen kunne ha blitt valgt å være

annerledes i noen av diagrammene. Siden anisotropien var svært liten ville dette hatt liten påvirkning på variogrammodellen. Å velge lag med $> 90\%$ sannsynlighet for å ha overgått grenseverdien gjøres for å minske sjansene for å representere for store områder med feilaktig store dybder til fjell. Sammenlignes kartet med $> 90\%$ sannsynlighet med kart med $> 80\%$ og $> 70\%$ sannsynlighet vises det at områder med store løsmassetykkelser øker. Dette indikerer at det er større områder enn de som ses i 90% kartet som kan regnes å ha store løsmassetykkelser. Modeller med grenseverdier > 1 , > 10 og > 20 m har høye standardavvik, mens modeller med grenseverdi > 30 og > 50 m har lavere standardavvik. Dette kan være fordi det er mange punkter i de sistnevnte modellene som får verdien 0 i det første steget i estimeringen i indikatorkriging. I det første steget i estimeringen i indikatorkriging gis punktene tallet 0 eller 1. For kart med grenseverdi > 30 m gis alle boringer som er under 30 m verdien 0, mens alle som er over 30 m får verdien 1. Deretter blir verdien i punktene estimert til å være mellom 0-1.

Sammenligninger av modell 3 mot modell 4 og 5 er utført. Modell 4 og 5 ble ikke sammenlignet, siden modell 3 og 4 er forholdsvis like. Sammenligner man modell 4 mot modell 3 ses det at kartene er forholdsvis maken, men det er også noen forskjeller. Sør i kartutsnittet (Nordre Tiller) estimerer modell 4 et større område til å ha 10 - 20 m tykkelse hvor modell 3 estimerer det samme området til å ha 1 - 10 m tykkelse. Nord i kartutsnittet i modell 4 er det estimert få fjellblotninger i forhold til hva som er estimert i modell 3. Noen av disse blotningene kommer fram når man ekskluderer alle områder hvor berggrunnsoverflaten er estimert til å være høyere over havet enn det topografi overflaten er. Modell 4 estimerer det til å være > 50 m dybder til fjell i Midtbyen og øst for Øya-området. Modell 3 har derimot estimert dybde til fjell i disse områdene til å være 30 - 50 m. Modell 3 har estimert et lite område ved Klett til å ha dybde til fjell > 50 m. Dette området har i modell 4 blitt estimert til å ha dybder til fjell mellom 30 og 50 m. Modell 3 og 4 har forholdsvis like kart som illustrerer usikkerhet. Forskjeller mellom modell 3 og modell 4 skyldes først og fremst ulik modelleringsmetode. Det kan også nevnes at det i modell 3 er tatt hensyn til en liten anisotropi i det eksperimentelle variogrammet, men dette er ikke gjort i modell 4.

Sammenligner man modell 3 med modell 5 ser man at nord i kartutsnittet er modell 3 og 5 ganske like, mens sør i kartutsnittet har modell 5 større dybder til fjell. Her er det boringer som har blitt boret langt ned i grunnen, men ikke har nådd fjell som blir gjeldende. Et eksempel er gitt sør i kommunen, nærmere bestemt på Heggstadmoen hvor det er utført boringer som ikke har nådd fjell etter 50-60 m med boring. Boringer i nærheten av disse punktene er ikke grunne så det er usannsynlig at disse skyldes feil i datagrunnlaget. Store dybder til fjell i dette området kommer fram i modell 5, men ikke i modell 3. Andre områder som er estimert til å ha dybder til fjell større enn 50 som kommer fram i modell 5, men ikke i modell 3 er Midtbyen, Øya og Rosten. Midtbyen og Rosten er representert i modell 3 til å ha dybder til fjell mellom 30 – 50 m, mens Øya er representert til å ha dybder til fjell på maksimum 20 - 30 m. I modell 3 forekommer det et område på Nedre Byåsen som har dybder til fjell større enn 50 m. Dette området er estimert i modell 5 til å ha dybder til fjell på mellom 30 og 50 m. Nordre Tiller er i modell 5 estimert til å

ha dybder til fjell på 30 til 50 m, mens i modell 3 er dybdene estimert til å være maksimum 10 m. I alle kartene i modell 3 og 5 er det store usikkerheter knyttet til områdene ved Nordre Tiller, Reppe, Charlottenlund, Klett, Bjørkmyra Nedre Byåsen, Kattem, Nordre Kvenild, Midtbyen, Strindheim og Sluppen. Det var umulig å lage relative standardavvik kart i ArcGIS (for eksempel standardavvik delt på sannsynlige estimat) for å sammenligne standardavvikene til estimer i modell 3 og 5. Derfor kan ikke standardavvik kartenes tall sammenlignes direkte. Allikevel kan det legges merke til at standardavvikkartet i modell 3 og standardavvikkartene i modell 5 med grenseverdi > 30 og > 50 er ganske like. Grunnen til dette er ukjent. Forskjeller mellom modell 3 og modell 5 skyldes både ulikt datagrunnlag, ulik variogrammodell og ulik modelleringsmetode.

Kvikkleirekartet innehar de usikkerheter som medfølger grunnlagsdataene, altså usikkerheter knyttet til påvisning av kvikkleire ved den benyttede målemetoden. I de boringene med påvist kvikkleire som ikke er innenfor det kvartærgeologiske kartets tykke hav- og fjordavsetninger ligger enten leiren under de øverste massene som er kartlagt i det kvartærgeologiske kartet eller så kan det være unøyaktigheter ved plassering av grensene til løsmassetypene i det kvartærgeologiske kartet. Den første grunnen er mest sannsynlig den rette. Grunnen til at noen områder har boringer med påvist kvikkleire uten at det er faregradssoner i disse områdene er fordi faresonekartet ikke er oppdatert med disse boringene. Dette illustrerer behovet for systematisk innsamling, bearbeiding og presentasjon av grunnboringer.

For alle modeller gjelder det også at minimum målestokk blir bestemt av målestokken eller usikkerhetene til grunnlagsdataene. Dette vil si at hvis det blir brukt borehull som har en maksimum usikkerhet i x og y retning på 10 m, og løsmassekart som har en målestokk på 1:50 000 (50 m) har den ferdige modellen en minimum målestokk på 1:50 000. Det er også usikkerheter knyttet opp mot selve modelleringen og derfor er det ikke noe poeng i å lage estimerte modeller alt for nøyaktige. Det er slik at ulike parter vil ha ulik målestokk på kartet. En privatperson vil for eksempel gjerne ha oversikt over hvor på tomten hans det er best å installere en brønn, mens NGU gjerne vil ha en nasjonal oversikt.

5.3 SAMMENLIGNING AV MODELL 3 OG 5 MED KVARTÆRGEOLOGISK KART OG GEOFYSISKE UNDERSØKELSER

Grunnen til at noen blotninger i det kvartærgeologiske kartet ikke kommer fram i de estimerte ”dybde til fjell”-kartene er måten blotningene er representert på i grunnlagsdataene. Hver blotning er representert med et datapunkt. Ved store mengder datapunkt i et område blir det ene datapunktet som representerer blotningen overdøvet. Et annet tilfelle ser ut til å være at blotningspunkter som ligger nær hverandre modelleres i modellen som en litt større blotning i det ene blotningspunktet. Det er modellenes trend som skaper blotninger i de estimerte kartene som ikke eksisterer i det kvartærgeologiske kartet eller i fjellblotningspunktene i grunnlagsdataene.

Det er større dybder til fjell i store deler av profilene i fire av geofysikkrapportene i forhold til de estimerte modellene. Dette kan skyldes at det er lite boringer utført i områder hvor dybde til fjell er stor, for eksempel midt i kartutsnittet. Dermed blir områder med få boringer og store dybder til fjell i modellen estimert basert på boringer som ligger i nærheten med mindre dybder til fjell. I to av disse undersøkelsene er det mindre dybder til fjell i deler av profilene i de geofysiske rapportene enn det som er estimert av modellene. Disse rapportene ble laget i 1973 og 1978. Det kan hende at forskjellen skyldes boringer som ikke var tilgjengelig den gangen undersøkelsene ble utført. I en rapport stemmer undersøkelsene og modellene bra.

Utregningene i rapport ”Refleksjonsseismiske undersøkelser av skredaktivitet i Trondheim havn” (Bjerkli m. fl. 1990) indikerer at løsmassemektheten i havnebassenget er større enn 100 m. Dette antyder at det er store løsmassemektheter i Midtbyen. Området sørvest i kartutsnittet har få boringer. Ser man på rapport ”Seismiske målinger 1972 – 1979 i Gauldalen” (Sindre 1979) antydes det at det er dybder på 140 til 380 m et stykke vest for dette området.

5.4 VIDERE ARBEID

- Utvikle kart med geofysikkprofil med referanser til rapporter og inntegnede tolkede dybder til fjell.
- Utvikle et kart over Trondheim kommune med infrastruktur i grunnen.
- Finn ut om datasettets bølgete gjennomsnittlige variogramverdier kan forklares ved kvartærgeologisk kart.
- Utvikle ”dybde til fjell”-kart ved bruk av geofysiske undersøkelser samt borepunkter og løsmassepunkter, som beskrevet i ”Geostatistics for Natural Resources Evaluation” (Goovaerts 1997).
- Utvikle ”dybde til fjell”-kart ved en geostatistisk metode som ikke glatter ut overflaten. For eksempel geostatistisk simulering ved ”Sequential Gaussian Simulation” eller ”Turning Bands”.
- Utvikle et kvikkleirekart ved indikatorkriging ved å sette boringer med påvist kvikkleire lik 1 og boringer uten påvist kvikkleire lik 0 (grenseverdi = 1).
- Utvikle et interaktivt kart over Trondheim kommune basert på Granada og Trondheim kommunes grunnboringsdatabase (relevante parametre: dybde til fjell og påvist kvikkleire).
- Verifisere geofysikkdata med boringer.
- Utvikle en interaktiv tjeneste hvor dybde til fjell eller sannsynlighet for at dybde til fjell er større enn en viss grenseverdi blir estimert i et valgt punkt.

Lage relative standardavvik kart for estimerte ”dybde til fjell”-kart for å sammenligne usikkerheter i en modell basert på boringer som har nådd fjell, og en modell som er basert på både boringer som har nådd fjell og boringer som ikke har nådd fjell.

6 KONKLUSJON

De deler av Trondheim kommune som ligger mer enn 160 m over havet har for det meste et tynt lag av forvitringssedimenter eller morene (Byåsen og Estenstadmarka), mens de deler som ligger under denne grensen har til tider et tykt sedimentlag av leire. Det finnes større mengder av grus og sand, avsatt som bre- og breelvavsetninger ved Kvenild, Heimdal, Ekle og Tiller. Lag av grus og sand har og blitt avsatt som elveavsetninger langs Nidelvens nåværende eller tidligere elveløp. Kulturlag skapt av mennesker ligger i Midtbyen, spesielt i sørøstre del. Utfylling av masser har funnet sted i Sluppen-området og i havneområdet.

Testing av fem modeller basert på grunnboringer fra Trondheim kommune, samt brønnboringer og løsmassekart fra NGU førte til konklusjonen om at det er best å illustrere dyp til fjell i kart med farger og i to dimensjoner. Hvis modellen inkluderer boringer uten informasjon om fjellkontakt er indikatorkriging den beste estimeringsmetoden (figur 53). Hvis det kun brukes boringer med informasjon om fjellkontakt er ordinær kriging eller implisitt modellering gode valg (figur 39 og 46). Dybder til fjell estimert i modellene er generelt mindre enn det som er observert i geofysiske undersøkelser.

Innsamling av grunnbøringsdata kan gjøres ved at kommunene samler inn alle data over grunnboringer, utført kommunalt og i samarbeid med konsulentselskaper, i en database. Nasjonalt kan data samles inn fra hver enkelt kommune. Data kan bearbeides ved å sortere informasjon inn i kolonner med relevante parametre. Børingsdata kan enkelt presenteres ved å benytte en parameter og vise ulike alternativer av parameteren med farge eller størrelse på symbol i punkter.

Alle undergrunnsinstallasjoner i Trondheim kommune er ikke fullstendig registrert i et offentlig tilgjengelig digitalisert kart per i dag, men et slikt kart ville lettet kommunens eget planarbeid og gjort denne informasjonen lettere tilgjengelig for publikum.

7 REFERANSER

- Aarhaug, O. R. 1992: Stabilitet i skråninger og skjæringer. I: *Geoteknikk*. NKI forlaget. ISBN 82-562-2209 3. s. 326.
- Andersen, B. G. 1979: The deglaciation of Norway 15 000-10 000 B. P. I: *Boreas* 8. Universitetsforlaget. s. 79-87.
- Aranz Geo 2012: Leapfrog mining. Aranz Geo Ltd. URL <http://www.aranzgeo.com/>
- Armstrong M. 1998: *Basic Linear Geostatistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-61845-7. 152 s.
- Bjerkli, K. & Olsen H. A. 1990: *Refleksjonsseismiske undersøkelser av skredaktivitet i Trondheim havn*. Norges geologiske undersøkelse. Rapport nr. 90.099. 11 s.
- Carr, J. C., Beatson, R. K., McCallum, B. C., Fright, W. R., McLennan, T. J., Mitchell, T. J. 2003: *Smooth surface reconstruction from noisy range data*. Applied Research Associates NZ Ltd. and University of Canterbury. 8 s.
- Cowan, E. J., Beatson, R. K., Fright, W. R., McLennan, T. J. og Mitchell, T. J. 2002: Rapid geological modelling. Extended abstract for Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining, International Symposium Kalgoorlie. SRK Consulting, University of Canterbury og Applied Research Associates NZ Ltd. 9 s.
- Chamberlain, E. J. 1981: Frost susceptibility and its relation to frost heaving and thaw weakening. I: *Frost susceptibility of soil – review of index tests*. United States army cold regions research and engineering laboratory, Monograph 81-2. s. 2.
- Dalsegg E. 2004: *Geofysiske målinger Bakkaune Trondheim, Sør-Trøndelag*. Norges geologiske undersøkelse. Rapport nr. 2004.047. 11 s.
- Ellefmo, S. L. 2011: Evaluering av data – geostatistikk/kriging. Forelesningsfoil i fag TGB 4215 GIS for mineralressursforvaltning. Institutt for geologi og bergteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. 71 s.
- Esri 2010: ArcGIS Desktop 10. Environmental systems research institute. URL <http://www.esri.com>
- Goovaerts P. 1997: Local Estimation: Accounting for Secondary Information. I: *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, ISBN 0-19-511538-4. s. 185-258.
- Gregersen, O. 2001: *Program for økt sikkerhet mot leirskred – Metode for kartlegging og klassifisering av faresoner, kvikkleire*. Norges geotekniske institutt. Rapport nr. 20001008-2. 23 s.

- Helland, A. 1898: Topografisk-statistisk beskrivelse over Søndre Trondheims amt. Første del: Den almindelige del og Trondhjem. I: *Norges land og folk.* Aschehoug.
- Hillestad, G. 1980: *Seismiske undersøkelser Kongsveien, Heimdal.* Norges geologiske undersøkelse. Rapport nr. 1739. 6 s.
- Hillestad, G., Melleby, P og Meek, A. 1978: *Seismiske undersøkelser for Bakklandsforbindelsen.* Norges geologiske undersøkelse. Rapport nr. 1643.5 s.
- Hillestad, G., Melleby, P. og Opdahl, R. 1973: *Seismisk undersøkelse Hallsteingård.* Norges geologiske undersøkelse. Rapport nr. 1214. 4 s.
- Holmsen, G. 1929: Lerfaldet ved Braa i Byneset. I: *Lerfaldene ved Kokstad, Gretnes og Braa.* Norges geologiske undersøkelse. s. 22-40.
- Kitterød, N. O., Gaut, S., Turtumøygard S., Jouin, C. og Aakerøy, P. A. 2011: Beregning av løsmassemekthet. I: *Salt SMART Salt i grunnvann.* Statens vegvesen, ISBN 978-82-17-00830-9. 82 s.
- Lawley, R. & Garcia-Bajo, M. 2010: *The national superficial deposit thickness model (version 5).* British geological survey. Rapportnr. OR/09/049. 18 s.
- L'Heureux, J.-S., Hansen, L., Longva, O., Emdal, A. og Grande, L. O. 2010: A multidisciplinary study and submarine landslides at the Nidelva fjord delta, Central Norway – Implications for geohazard assessment. I: *Norsk geologisk tidsskrift - Volum 90.* s. 1 – 20.
- Ludvigsen, E. 2011: GIS for mineralressursforvaltning – datainnsamling, lagring av data og presentasjon. Forelesningsfoil i fag TGB 4215 GIS for mineralressursforvaltning. Institutt for geologi og bergteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. s. 4.
- NGU 2008: Bergvarme. Norges geologiske undersøkelse. Besøkt 14.3.2012. URL <http://www.ngu.no/no/hm/Georessurser/Grunnvarme/Bergvarme/>
- NGU 2012a: Nasjonal geofysikkdatabase. Norges geologiske undersøkelse. Besøkt 8. 5.2012. URL <http://aps.ngu.no/kart/geophysicsngu/>
- NGU 2012b: Granada Nasjonal grunnvannsdatabse. Norges geologiske undersøkelse. Besøkt 24. 3.2012. URL <http://www.ngu.no/kart/granada/>
- NGU 2012c: Løsmassekart. Norges geologiske undersøkelse. Besøkt 15. 3.2012. URL <http://www.ngu.no/kart/losmasse/>
- NGU 2012d: Statistikk for antall boringer i brønndatabasen per 31.5.2012. Besøkt 31.5.2012. URL <http://aps.ngu.no/pls/oradb/hg.visstatbronnkart>

- NGU 2012e: Løsmasser. Norges geologiske undersøkelse. Besøkt 23.1.2012. URL <http://www.ngu.no/no/hm/Norges-geologi/Losmasser/>
- NGU 2012f: Berggrunnskart. Norges geologiske undersøkelse. Besøkt 22.3.2012. URL <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/>
- NGU 2012g: Fullstendig forklaring for løsmasseflate. Norges geologiske undersøkelse Besøkt 5.6.2012. URL http://geo.ngu.no/website/common94/losmasse/Fullstendig_tegnforklaring_LosmasseFlate.pdf
- NGU 2012h: Kvikkleirekart. Norges geologiske undersøkelse. Besøkt 22.5.2012. URL <http://www.ngu.no/no/hm/Kart-og-data/nedlasting/>
- NVE 2011: Aktsemd kart for kvikkleire. Norges vassdrags- og energidirektorat. Besøkt 8.5.2012. URL <http://www.nve.no/no/Flom-og-skred/Farekartlegging/Kvikkleirekart/>
- NVE 2012a: Skredatlas. Norges vassdrags- og energidirektorat. Besøkt 8.5.2012. URL <http://skredatlas.nve.no/ge/Viewer.aspx?Site=Skredatlas#>
- NVE 2012b: Kvikkleire – faregrad. Norges vassdrags- og energidirektorat. Besøkt 22.5.2012. URL http://arcus.nve.no/website/geoc3skredatlas/tema/skredatlas_kvikkleire_faregrad.html
- Ramstad, R. K. 2011: *Grunnvarme i Norge – kartlegging av økonomisk potensial*. Norges vassdrags- og energidirektorat, ISSN 1503-0318. 86 s.
- Reite, A. J. 1983: Trondheim – Beskrivelse til kvartærgeologisk kart 1621 IV – M 1:50 000. I: *Norges geologiske undersøkelse – Skrifter 46*. Norges geologiske undersøkelse, ISBN 82-00-31463-4. 44 s.
- Reite, A. J. 1994: Weichselian and Holocene geology of Sør-Trøndelag and adjacent parts of Nord-Trøndelag county, Central Norway. I: *Norges geologiske undersøkelse – Bulletin 426*. Norges geologiske undersøkelse. s. 1-30.
- Reite, A. J., Sveian, H. og Erichsen, E. 1999: *Trondheim fra istid til nåtid – landskapshistorie og løsmasser. Gråsteinen 5*. Norges geologiske undersøkelse, ISSN 0807-4801. 40 s.
- Rosén, B., Gabrielsson, A., Fallsvik, J., Hellström, G., og Nilsson, G. 2001: Markvärme och miljö. I: *System för värme och kyla ur mark – En nulägesbeskrivning*. Swedish Geotechnical Institute, ISSN 1100 6692. s. 214. Referert til <http://www.geotec.se/borrsv> (2000). Tidsskriften Borrvängen nr 4/99, 3/99, 2/98, 1/98, 4/96. Svenska grunnsborreres branschorganisation.
- Ross, H. 2012: Spheroidal function. I: *The blobs of Leapfrog*. 3 s.
- Sigmond, E. M. O. 1985: Berggrunnskart over Norge – Målestokk 1:3 millioner. Norges geologiske undersøkelse.

Sindre A. 1979: *Seismiske målinger i Gauldalen 1972 – 1979*. Norges geologiske undersøkelse. Rapport nr. 1641. s. 6.

SSB 2012: Boligstatistikk. Statistisk sentralbyrå. URL <http://www.ssb.no/boligstat/>

Trondheim kommune 2012: Kart over grunnforhold. Trondheim kommune. Besøkt 8.5.2012. URL http://webhotel2.gisline.no/GISLINEWebInnsyn_Trondheim/

Tønnesen, J. F. 1996: *Gravimetri for kartlegging av løsmassemektheter i Trondheim*. Norges geologiske undersøkelse. Rapportnr. 95.078. 48 s.

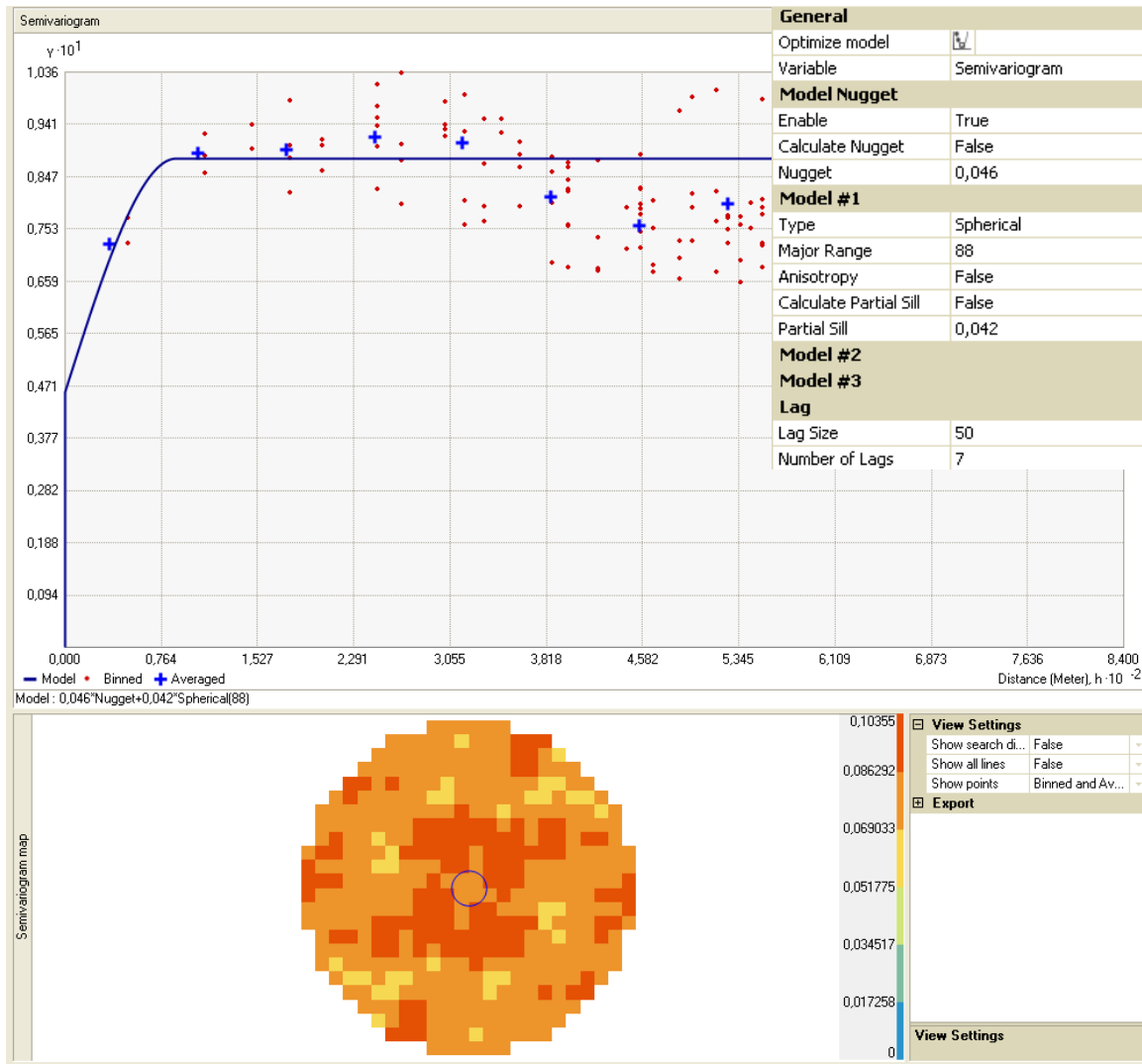
Vogt, T. & Larqué, P. 1998: Transformations and neoformations of clay in the cryogenic environment: examples from Transbaikalia (Siberia) and Patagonia (Argentina). I: *European journal of soil science* 49. Blackwell Science Ltd. s. 367-376.

8 VEDLEGG

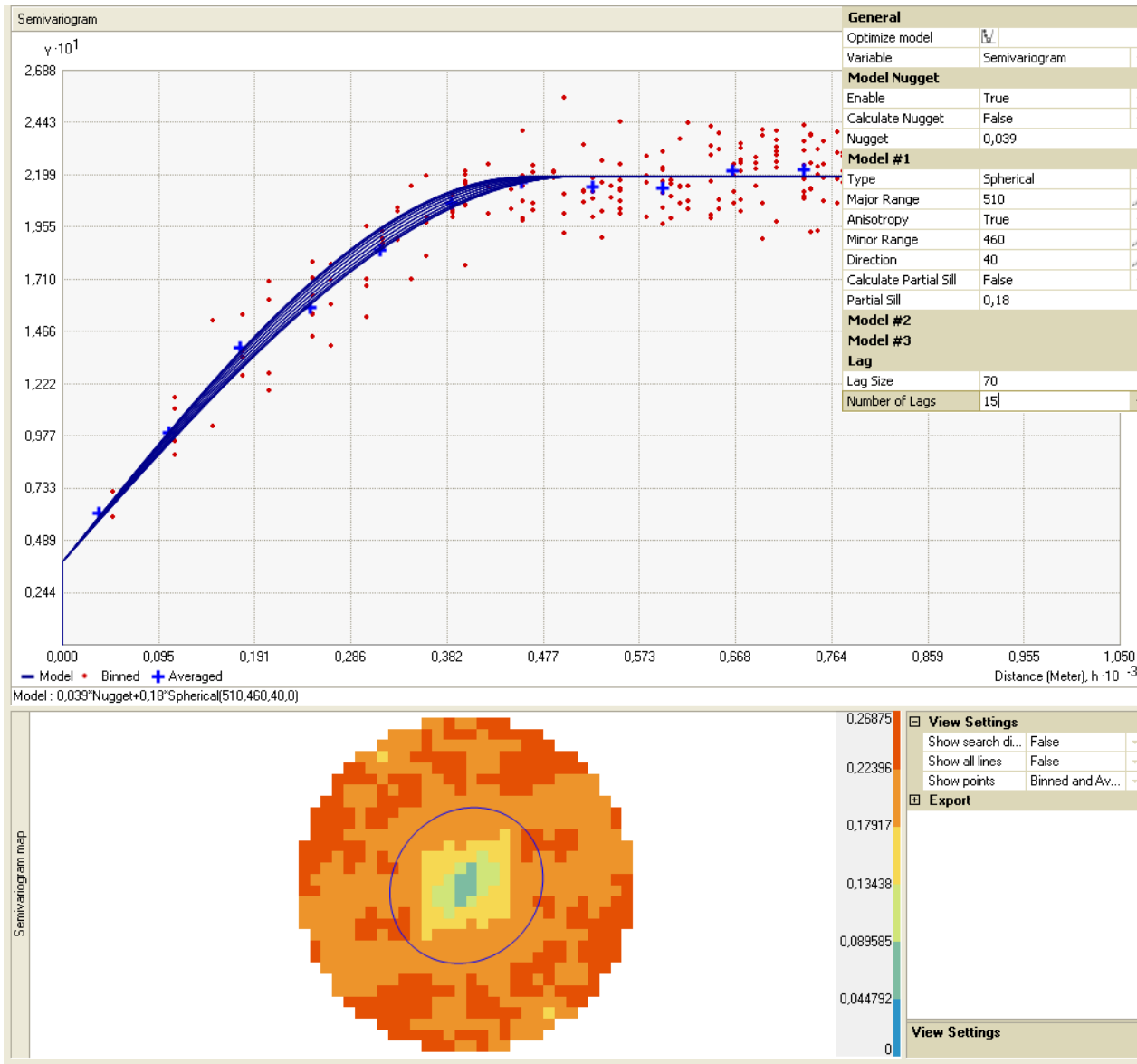
8.1 LISTE OVER VEDLEGG

8.2 Vedlegg A - Modell 5 - Variogrammodeller.....	120
8.3 Vedlegg B - Modell 5 - Histogram.....	125
8.4 Vedlegg C - Modell 1 - Detaljerte bilder.....	130
8.5 Vedlegg D - Modell 4 - Geologisk snitt.....	181
8.6 Vedlegg E - Modell 5 - Standardavvik kart.....	189
8.7 Vedlegg F - Modell 5 - Sammensatte kart.....	192

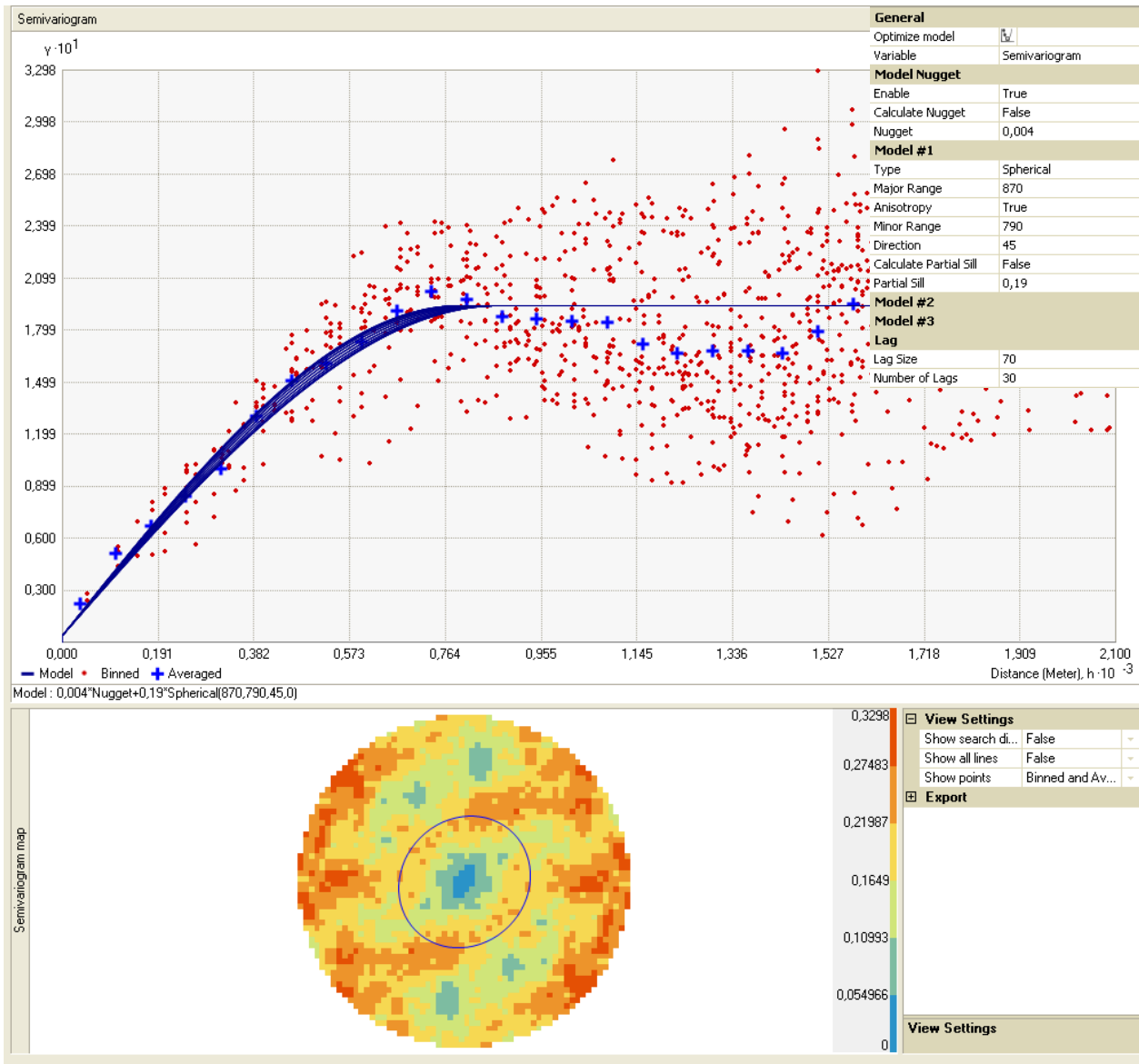
8.2 VEDLEGG A - MODELL 5 - VARIOGRAMMODELLER



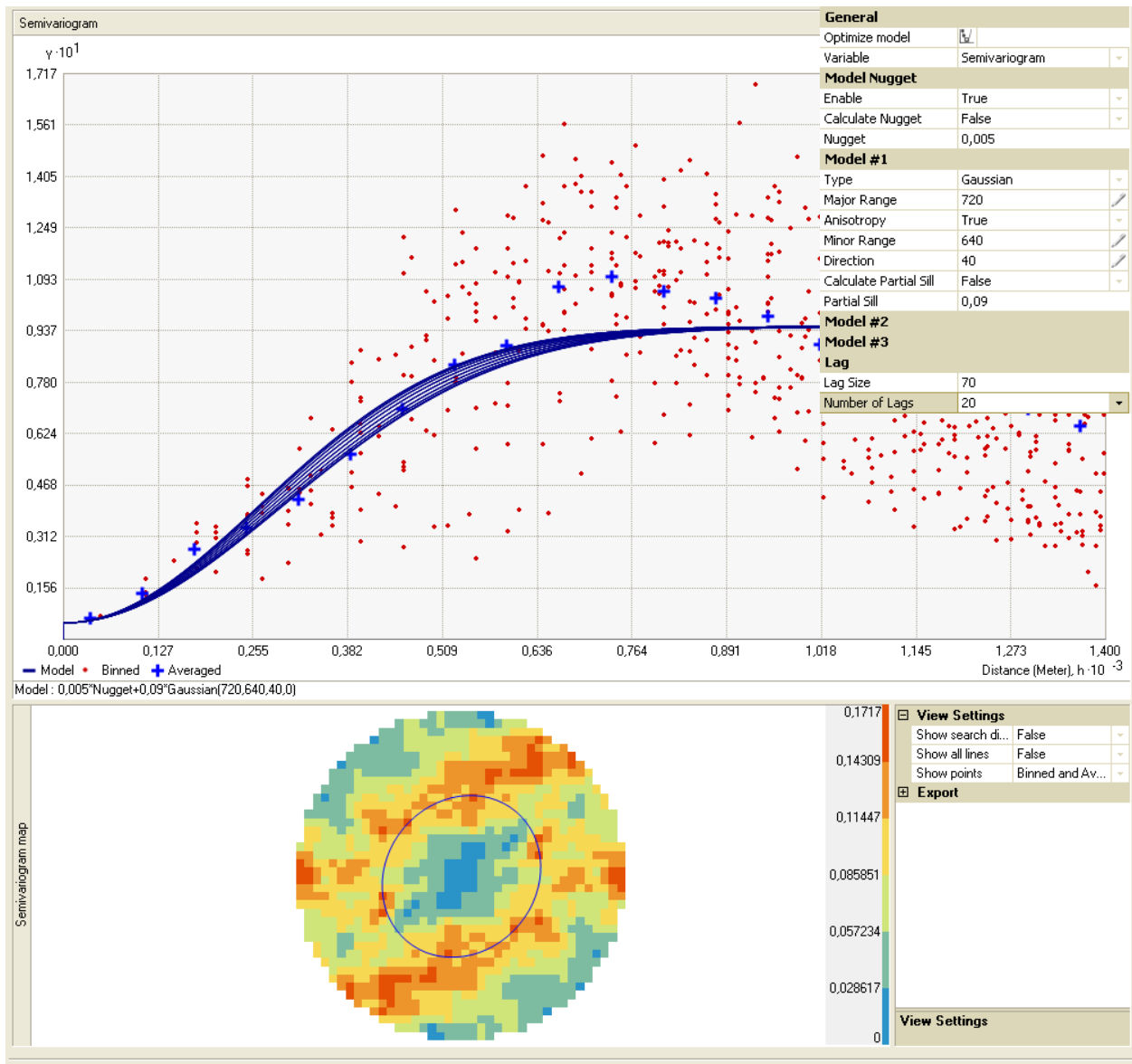
Figur i vedlegg A, 1. Øvre bilde: Sferisk variogrammodell brukt for dataene i modell 5, kart som angir sannsynligheten for at dybde til fjell er større enn 1 m. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^3 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sfæriske modellen. Nedre bilde: Eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.



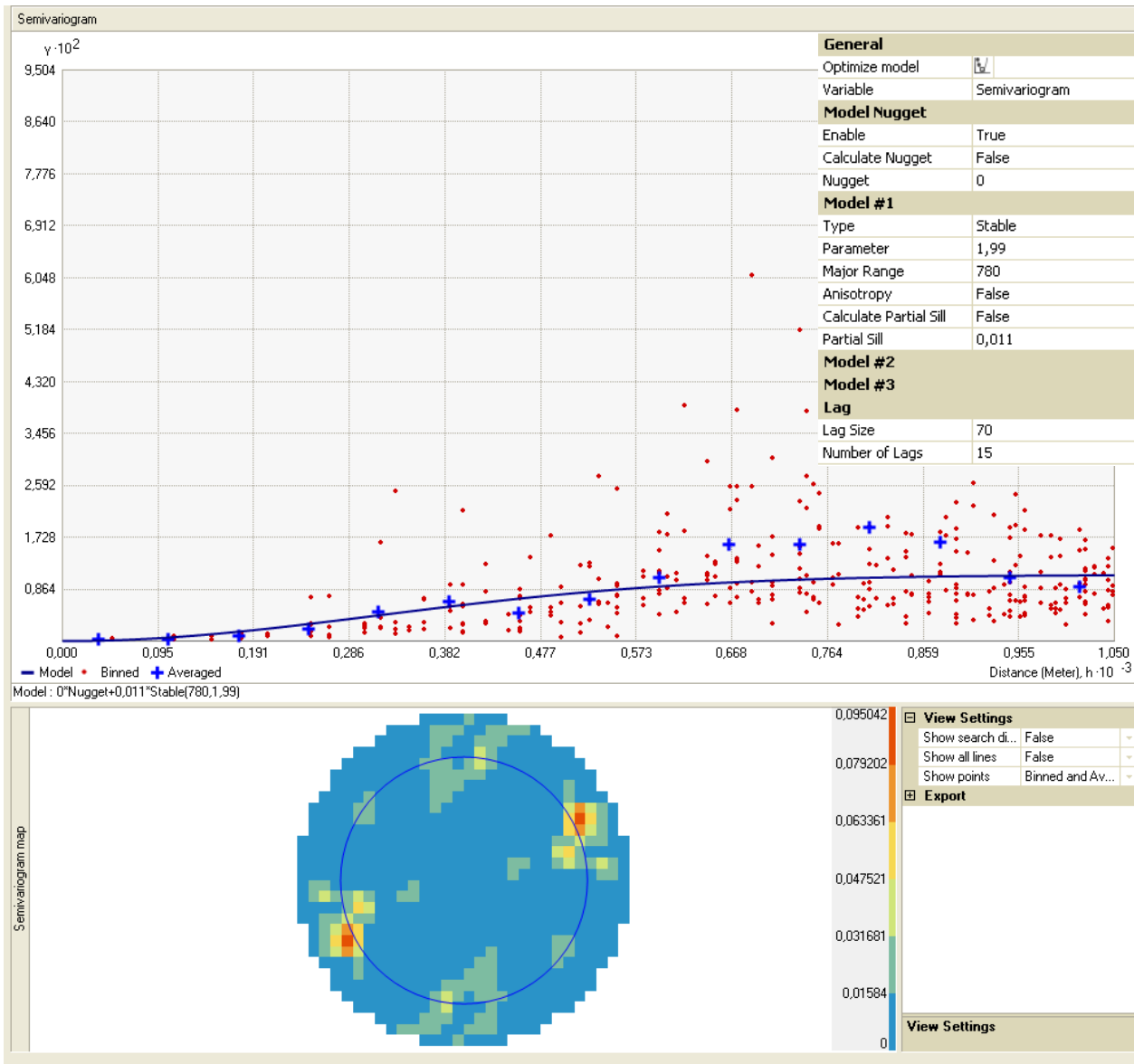
Figur i vedlegg A, 2. Øvre bilde: Sferisk variogrammodell brukt for dataene i modell 5, kart som angir sannsynligheten for at dybde til fjell er større enn 10 m. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^3 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sfæriske modellen. Nedre bilde: Eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.



Figur i vedlegg A, 3. Øvre bilde: Sfærisk variogrammodell brukt for dataene i modell 5, kart som angir sannsynligheten for at dybde til fjell er større enn 20 m. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^3 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sfæriske modellen. Nedre bilde: Eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.

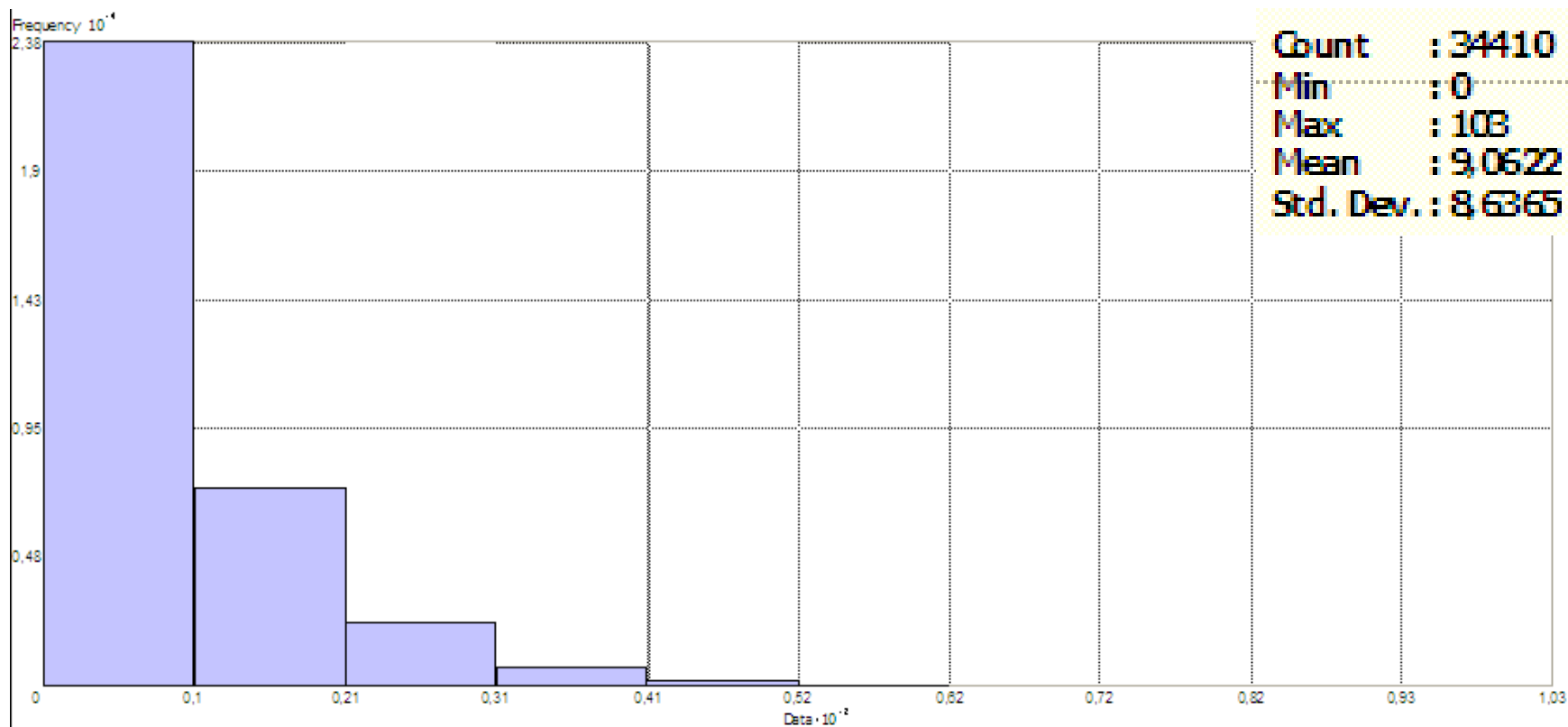


Figur i vedlegg A, 4. Øvre bilde: Sfærisk variogrammodell brukt for dataene i modell 5, kart som angir sannsynligheten for at dybde til fjell er større enn 30 m. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^3 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sfæriske modellen. Nedre bilde: Eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.

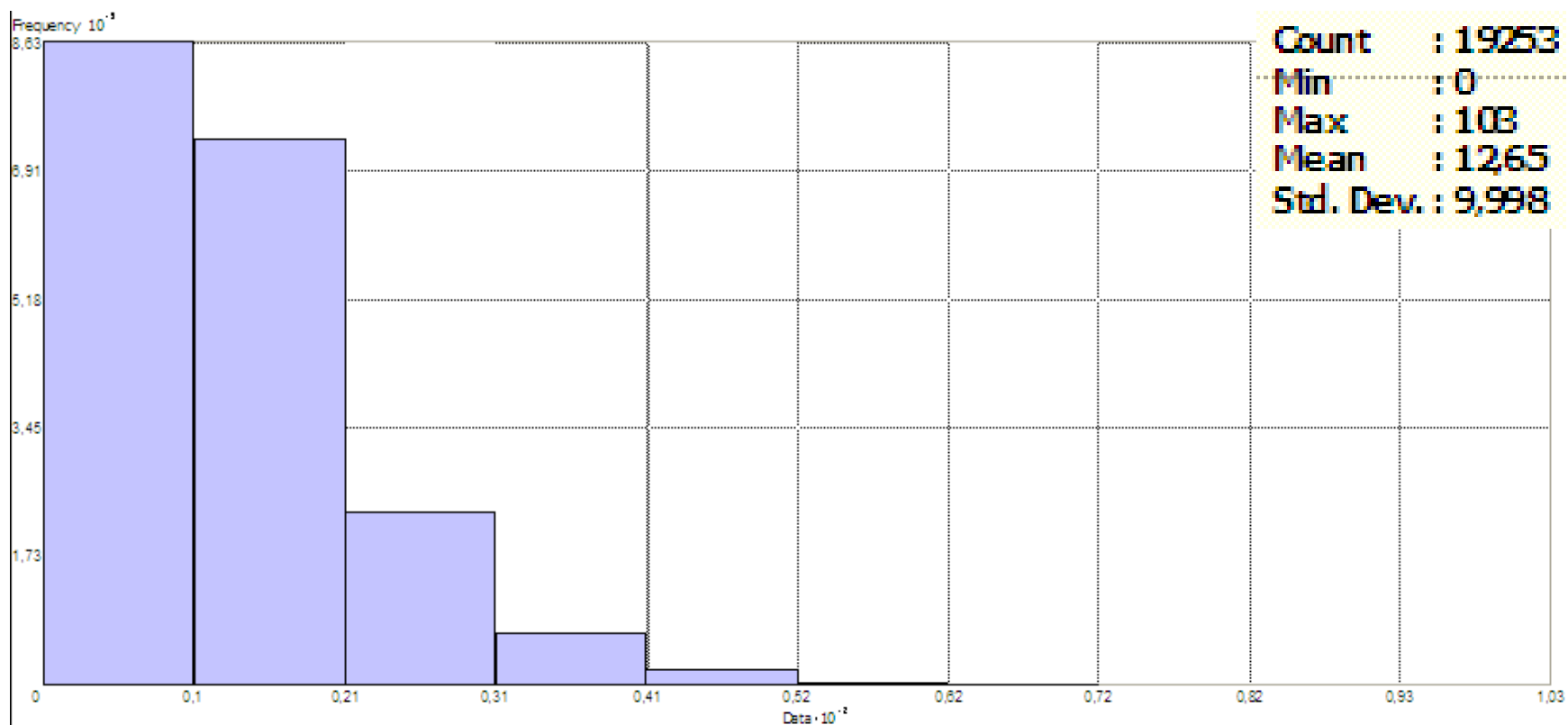


Figur i vedlegg A, 5. Øvre bilde: Sfærisk variogrammodell brukt for dataene i modell 5, kart som angir sannsynligheten for at dybde til fjell er større enn 50 m. x-aksen = h = avstanden mellom punkter [10^3 meter]. Y-aksen = γ = variogramverdien = sammenheng til punkter gitt avstanden mellom dem. Røde punkter = variogramverdi til to punkter med avstand h mellom seg. Blå kryss = gjennomsnittlig variogramverdi. Blå strek = den valgte sfæriske modellen. Nedre bilde: Eksperimentelt variogram med farger som indikerer samvariasjonen i ulike retninger.

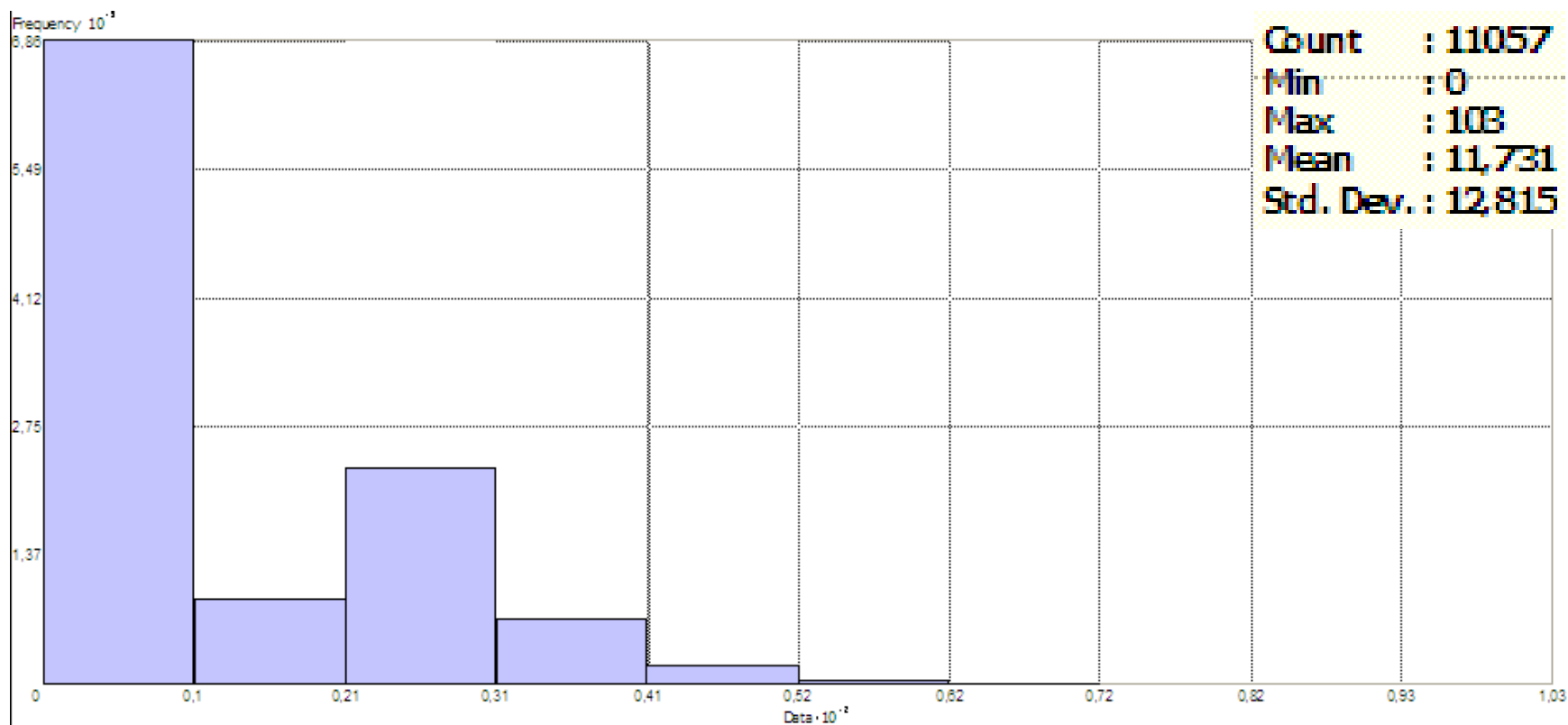
8.3 VEDLEGG B - MODELL 5 - HISTOGRAM



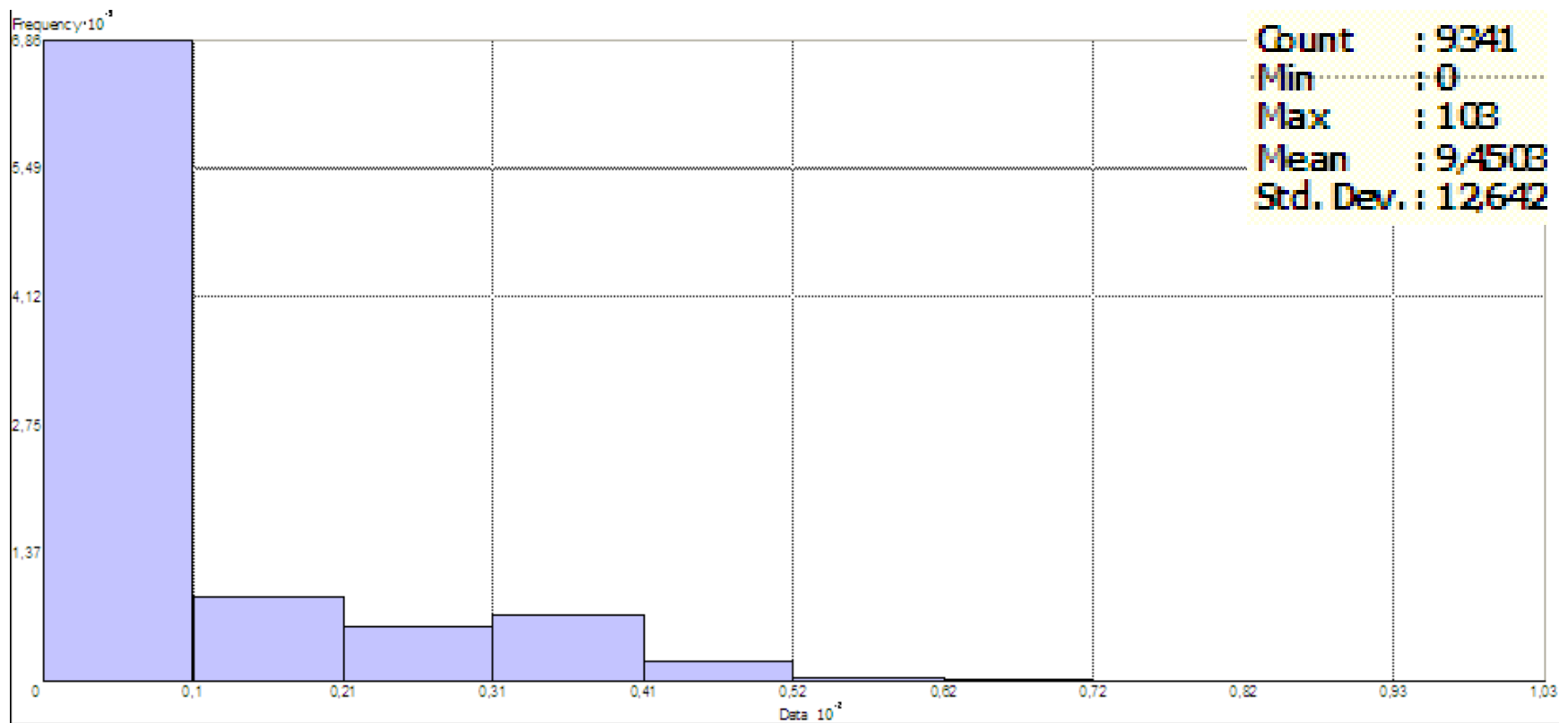
Figur i vedlegg B, 1. Histogram for boreddybde til datasettet brukt i modell 5 med grenseverdi > 1 m. x-aksen gir boreddybde (x100 m), mens y-aksen gir antall datapunkter som havner innenfor bestemte intervaller av dybder til fjell (x1000). Gjennomsnittet til datasettet er 9,1 m og standardavviket er 8,6 m.



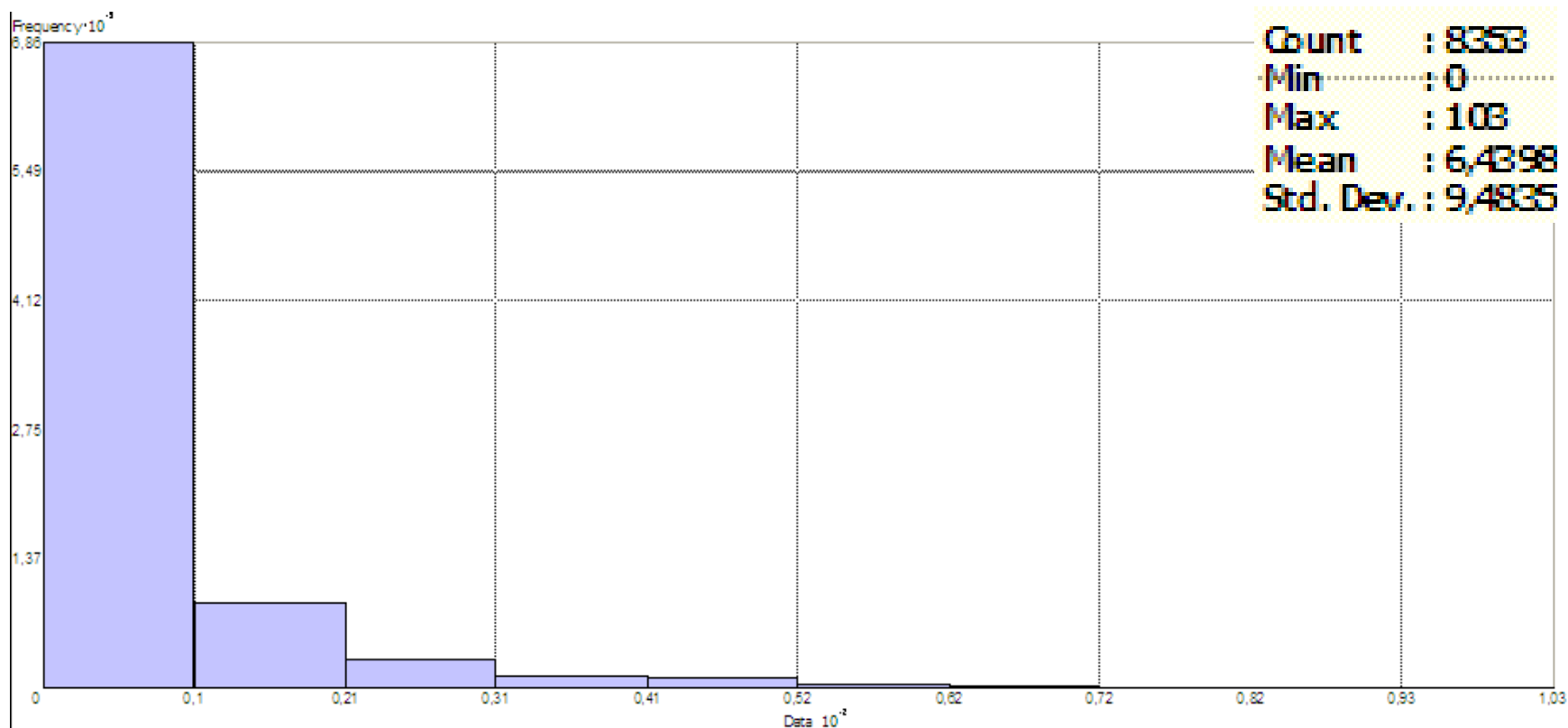
Figur i vedlegg B, 2. Histogram for boreddybde til datasettet brukt i modell 5 med grenseverdi > 10 m. x-aksen gir boreddybde (x100 m), mens y-aksen gir antall datapunkter som havner innenfor bestemte intervaller av dybder til fjell (x1000). Gjennomsnittet til datasettet er 12,65 m og standardavviket er 10,0 m.



Figur i vedlegg B, 3. Histogram for boreddybde til datasettet brukt i modell 5 med grenseverdi > 20 m. x-aksen gir boreddybde (x100 m), mens y-aksen gir antall datapunkter som havner innenfor bestemte intervaller av dybder til fjell (x1000). Gjennomsnittet til datasettet er 11,7 m og standardavviket er 12,8 m.

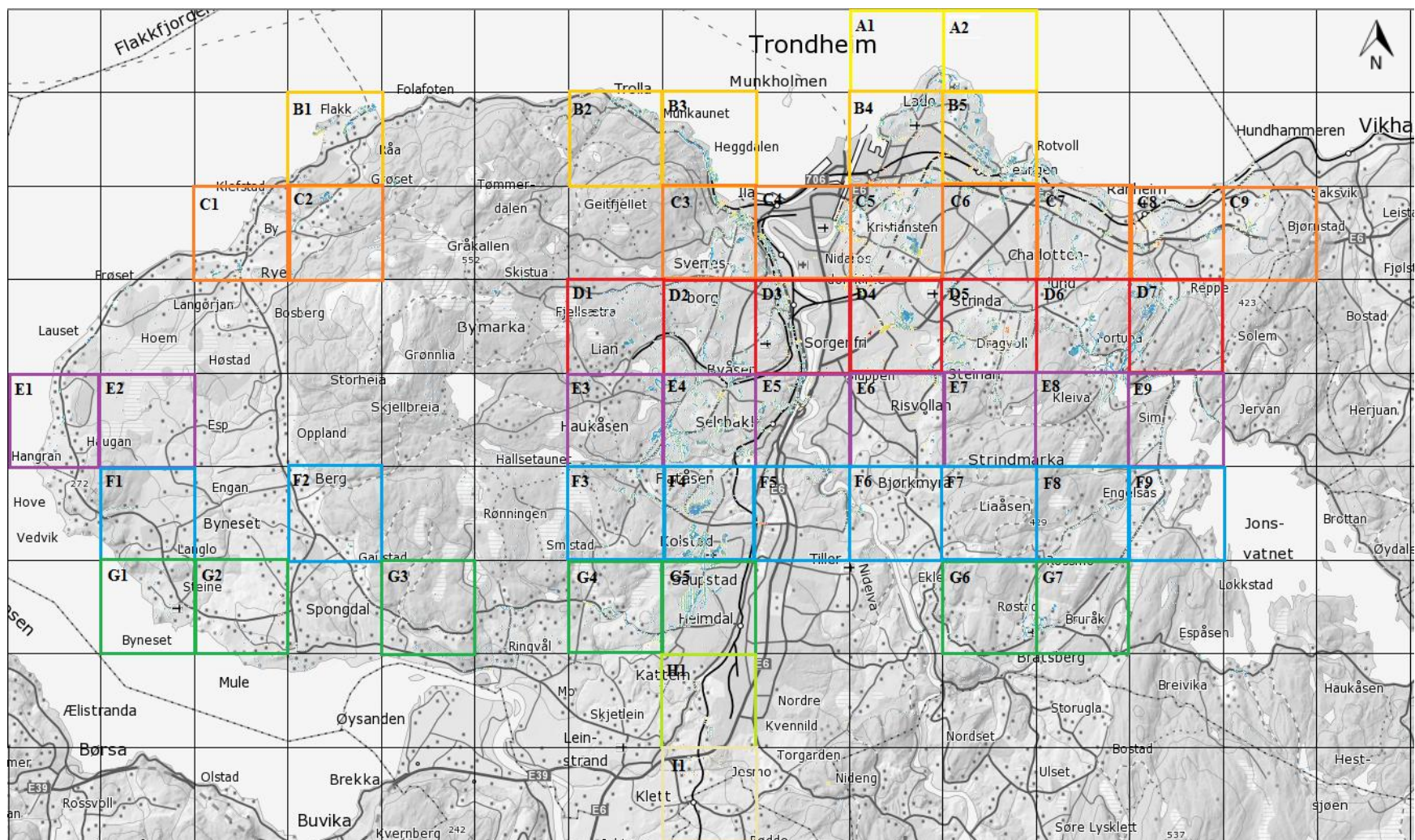


Figur i vedlegg B, 4. Histogram for boreddybde til datasettet brukt i modell 5 med grenseverdi > 30 m. x-aksen gir boreddybde (x100 m), mens y-aksen gir antall datapunkter som havner innenfor bestemte intervaller av dybder til fjell (x1000). Gjennomsnittet til datasettet er 9,5 m og standardavviket er 12,6 m.



Figur i vedlegg B, 5. Histogram for boreddybde til datasettet brukt i modell 5 med grenseverdi > 50 m. x-aksen gir boreddybde (x100 m), mens y-aksen gir antall datapunkter som havner innenfor bestemte intervaller av dybder til fjell (x1000). Gjennomsnittet til datasettet er 6,4 m og standardavviket er 9,5 m.

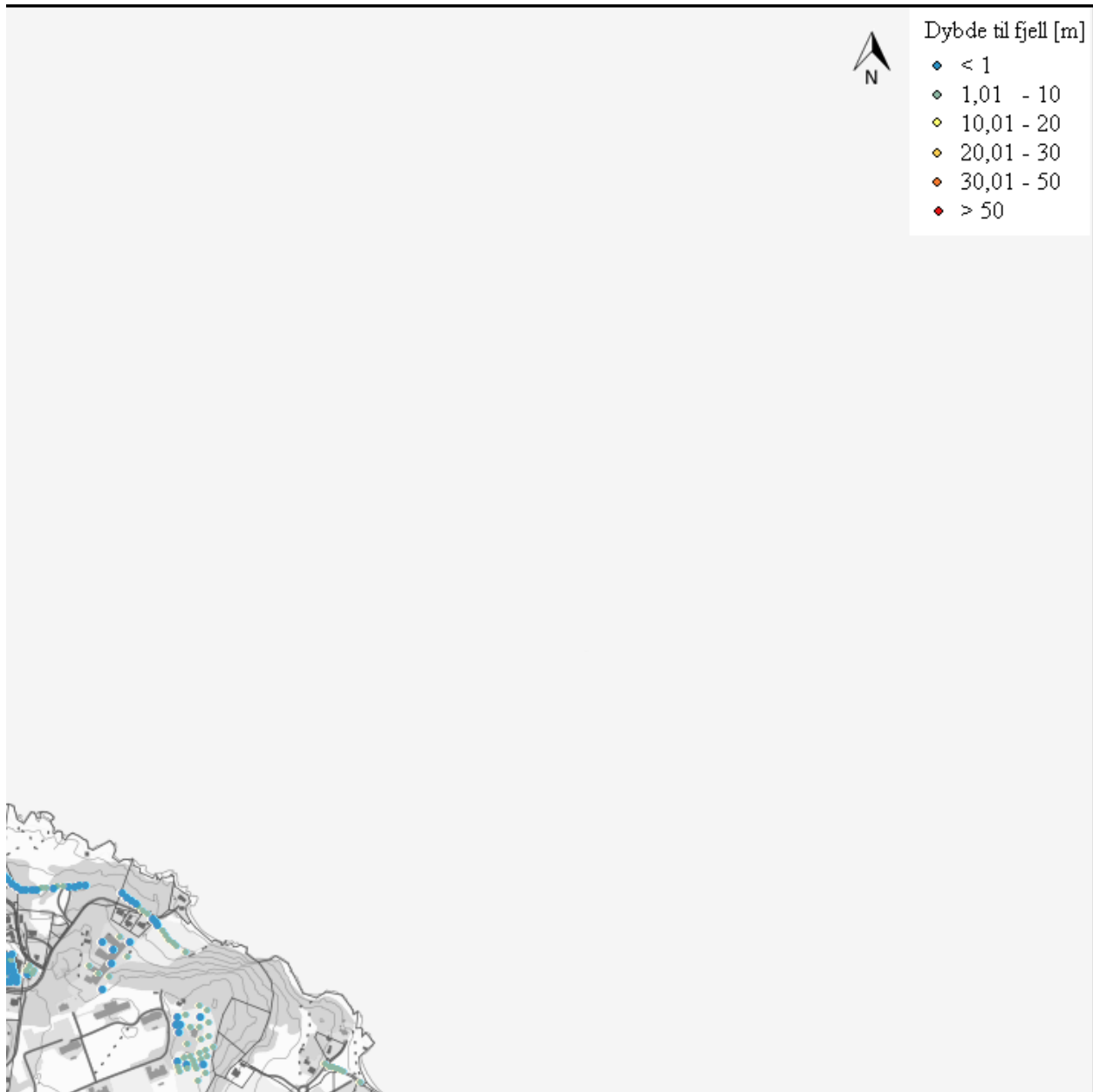
8.4 VEDLEGG C - MODELL 1 - DETALJERTE BILDER



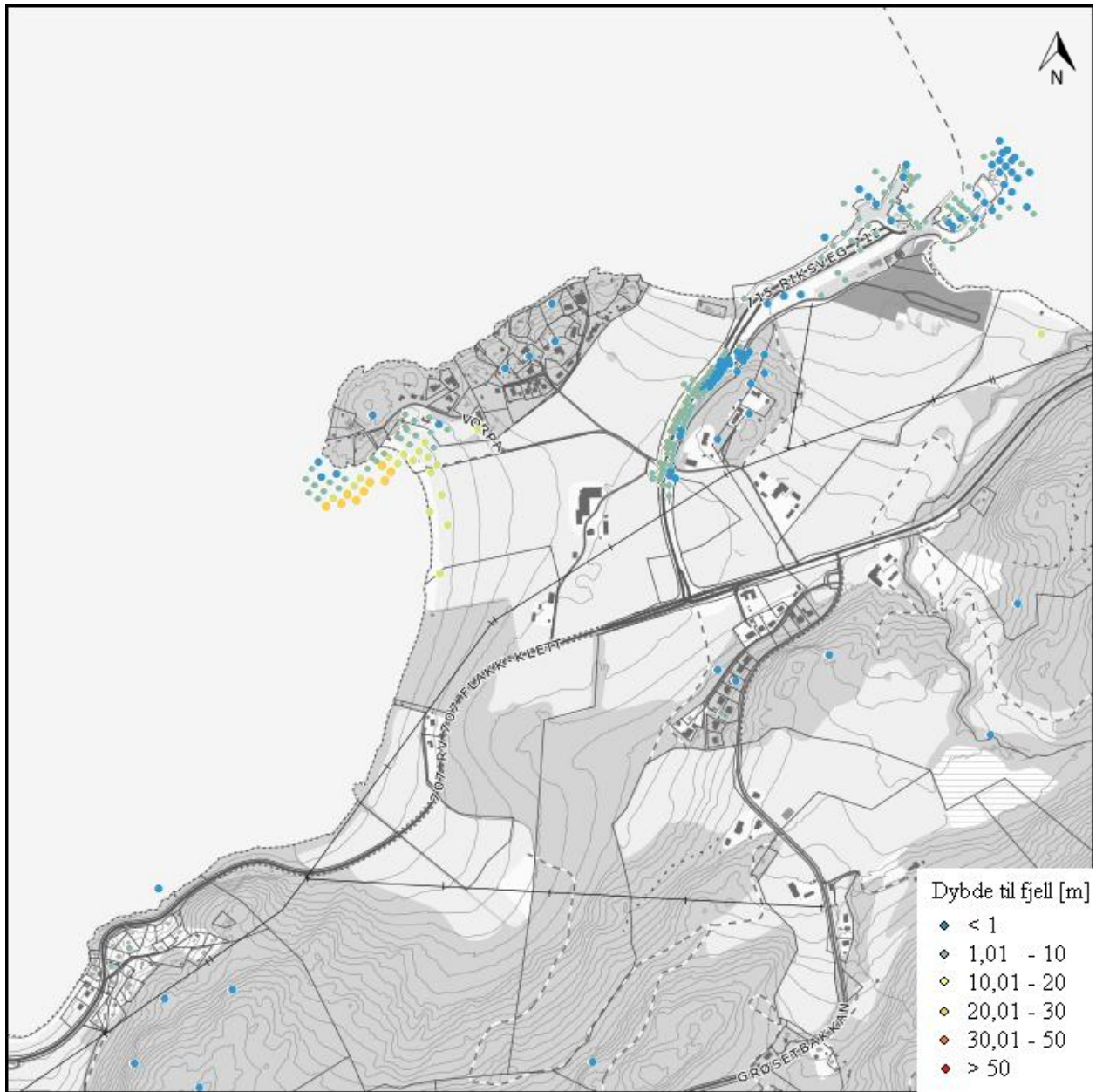
Figur i vedlegg C, 1. Figur som viser de merkede ruter som blir vist i detalj. Rutene er i størrelse 2000 m x 2000 m.



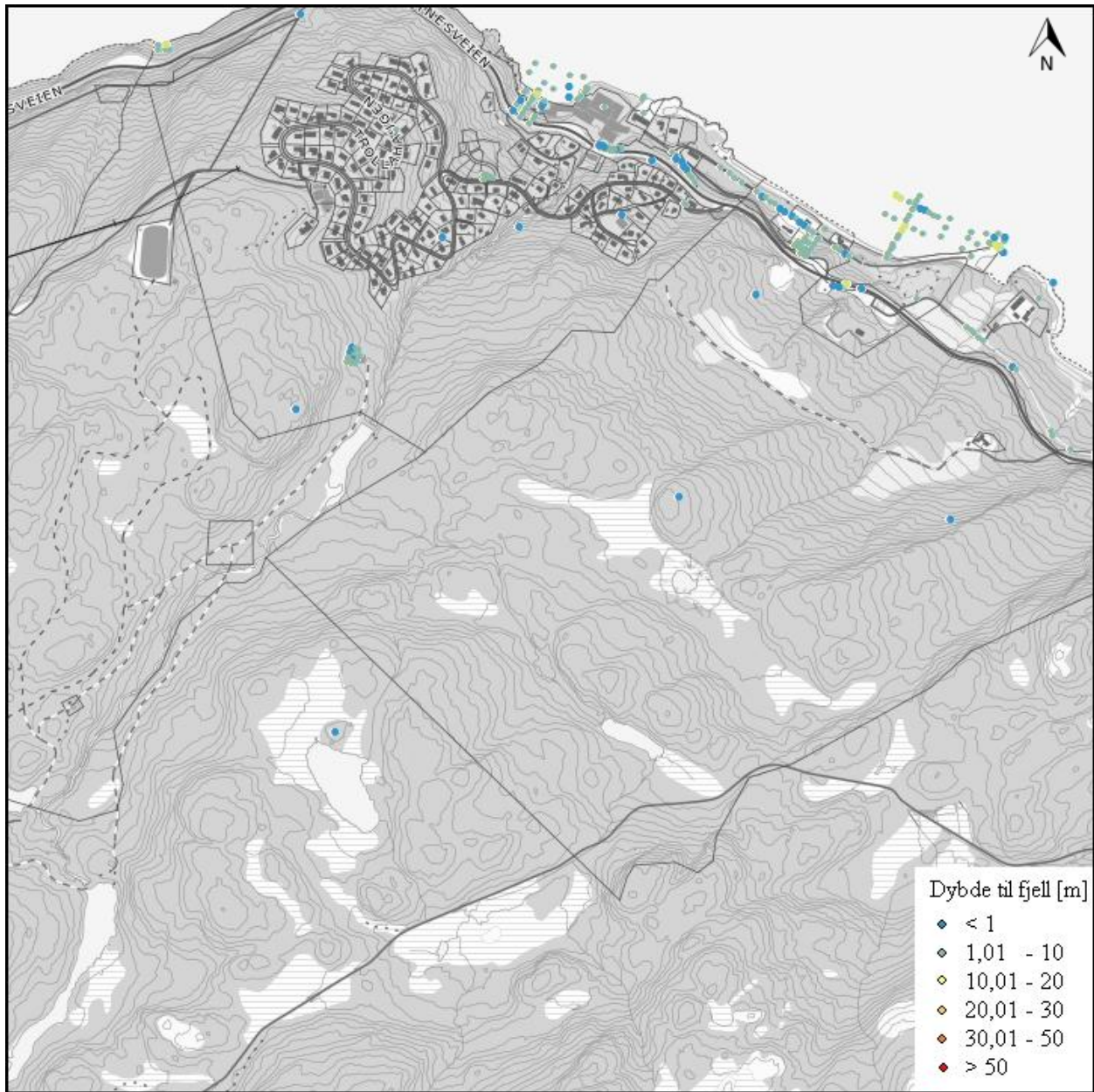
Figur i vedlegg C, 2. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt A1.



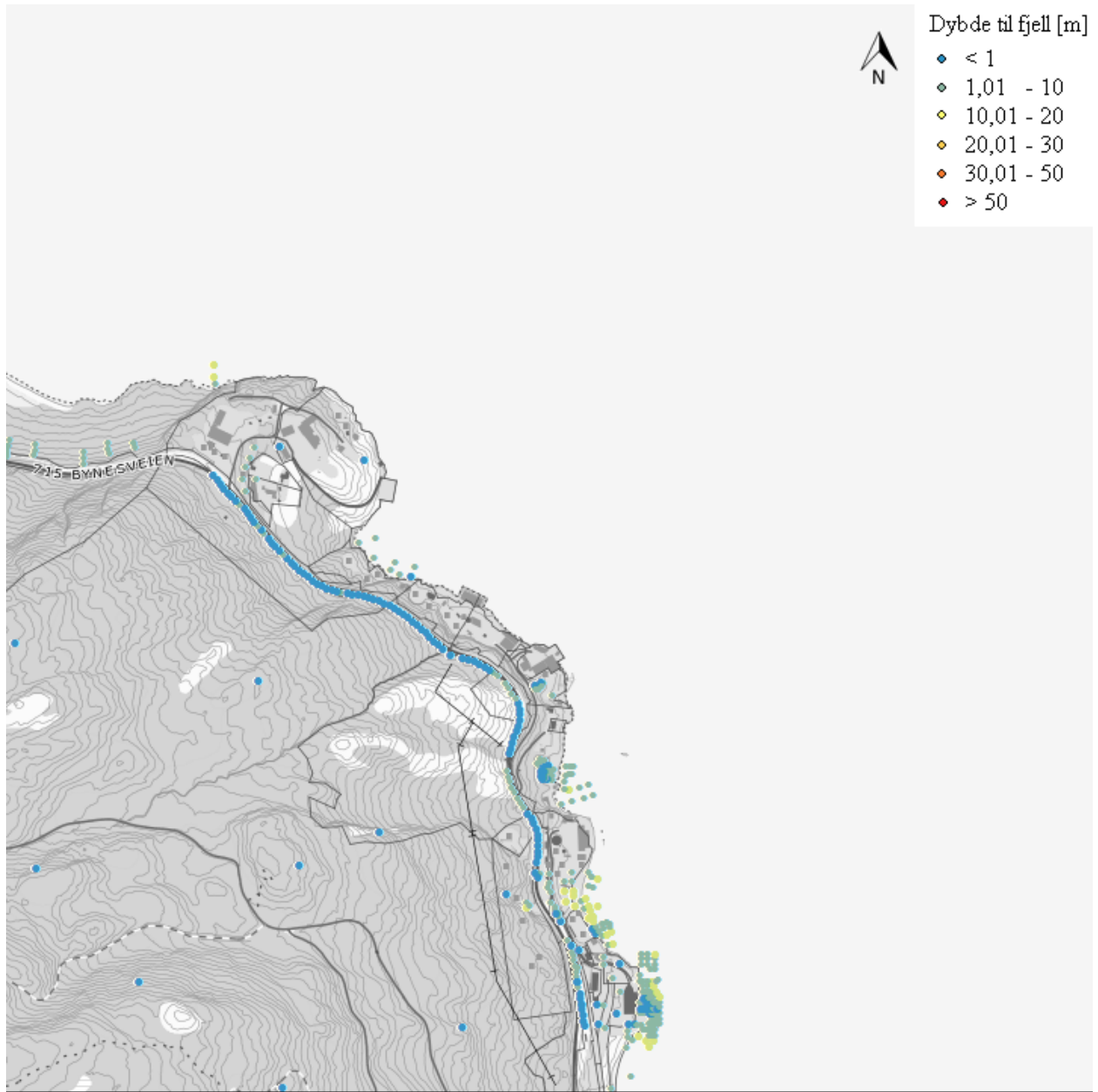
Figur i vedlegg C, 3. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt A2.



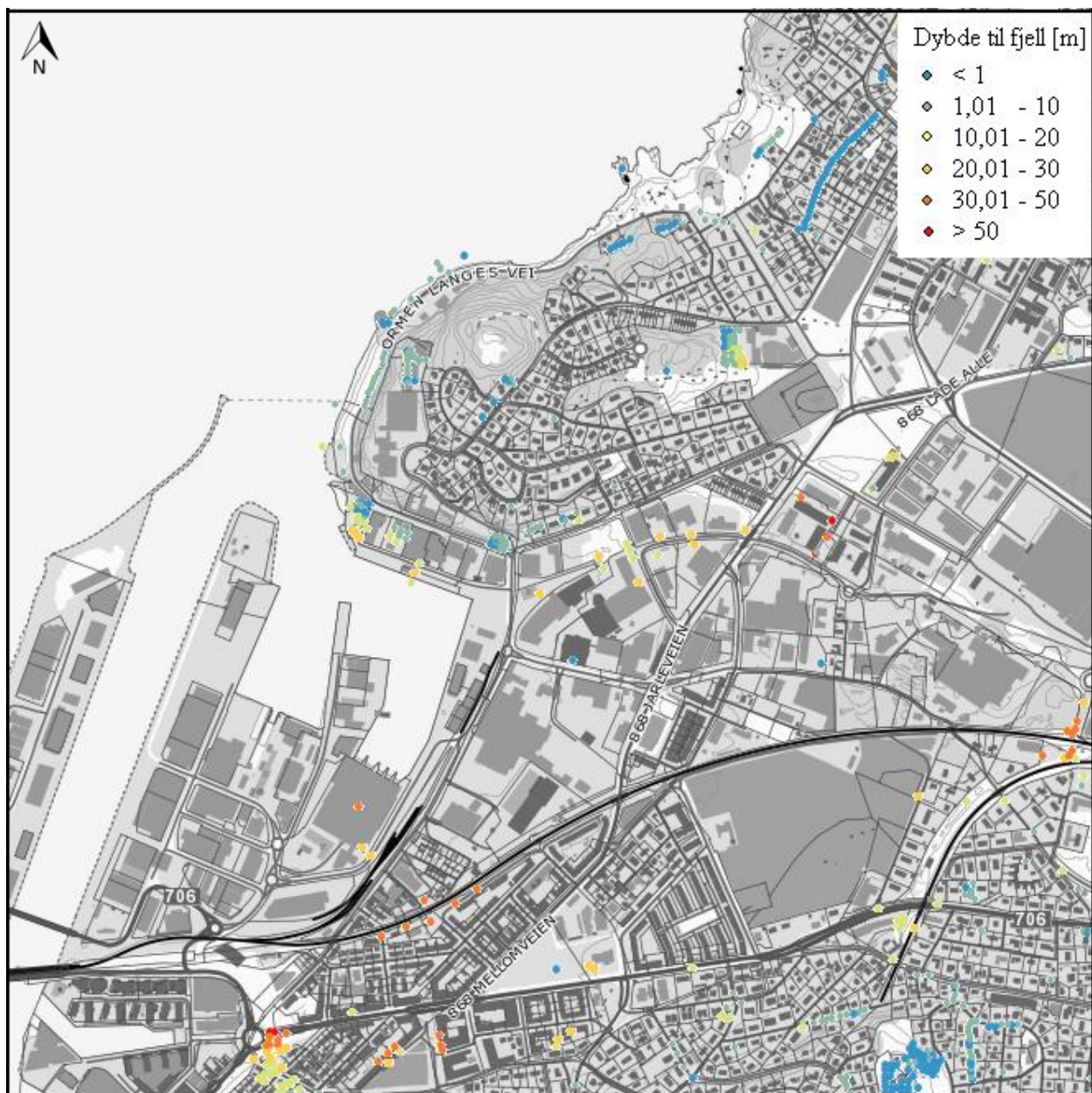
Figur i vedlegg C, 4. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt B1.



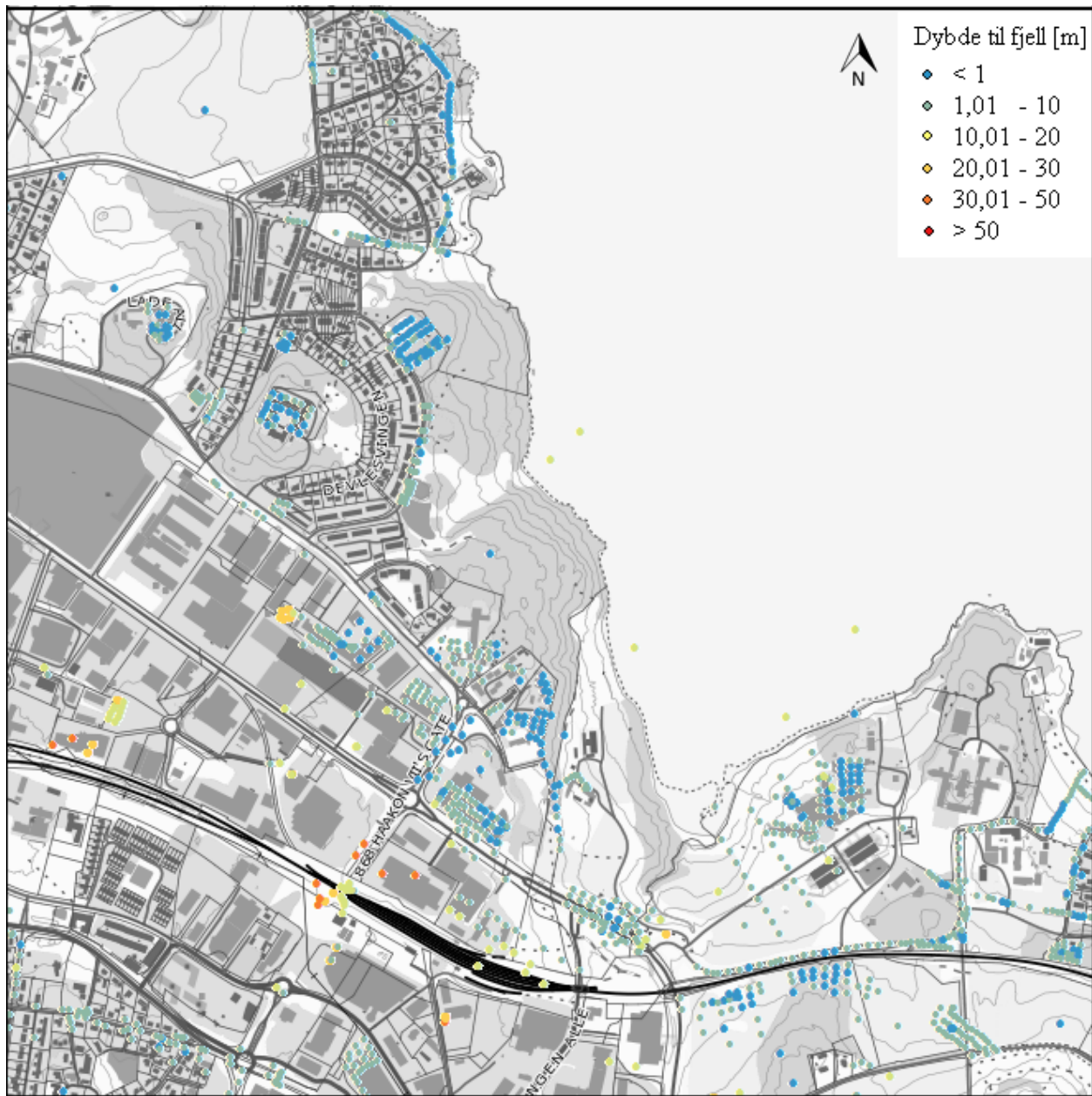
Figur i vedlegg C, 5. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt B2.



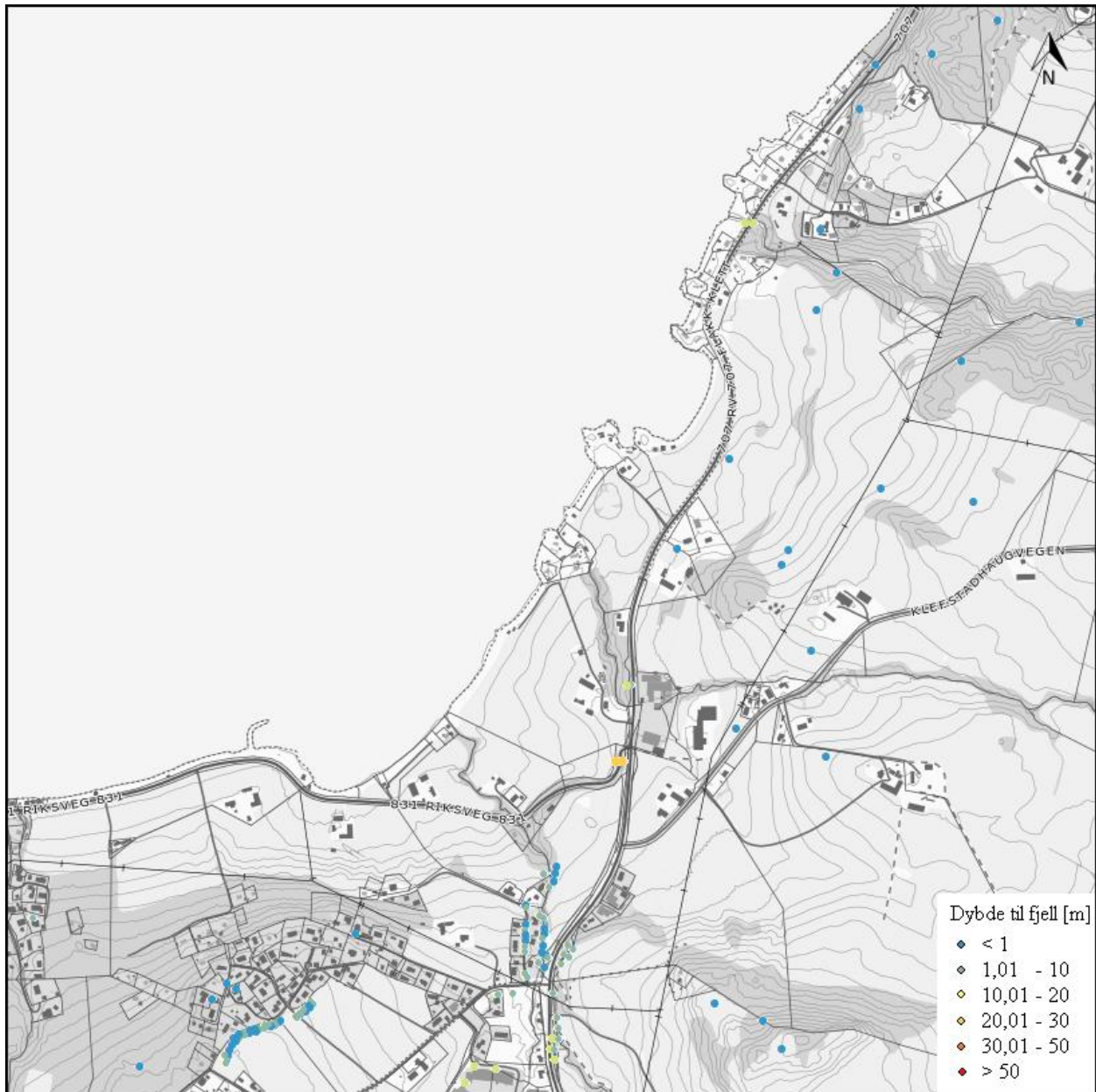
Figur i vedlegg C, 6. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt B3.



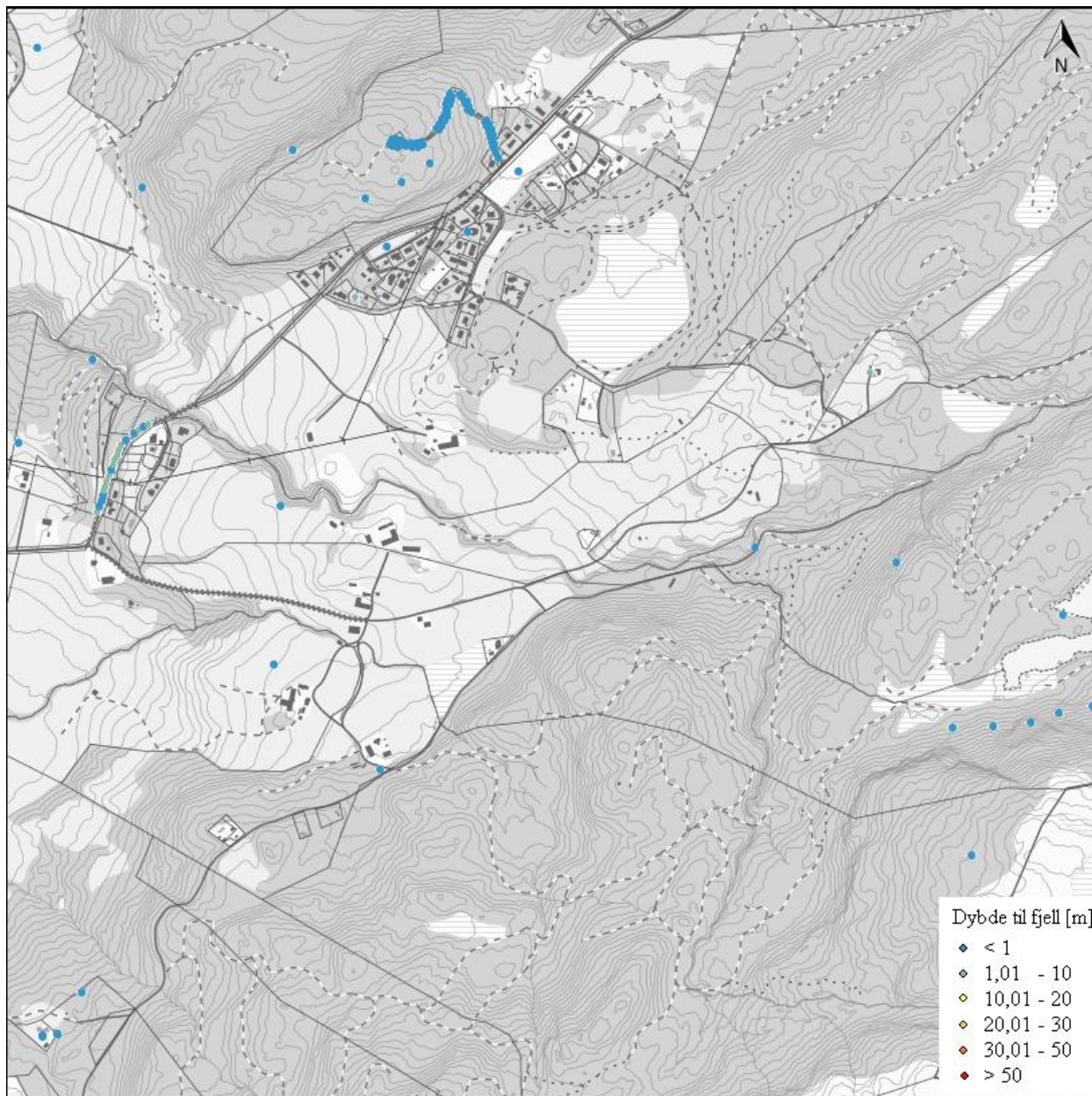
Figur i vedlegg C, 7. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt B4.



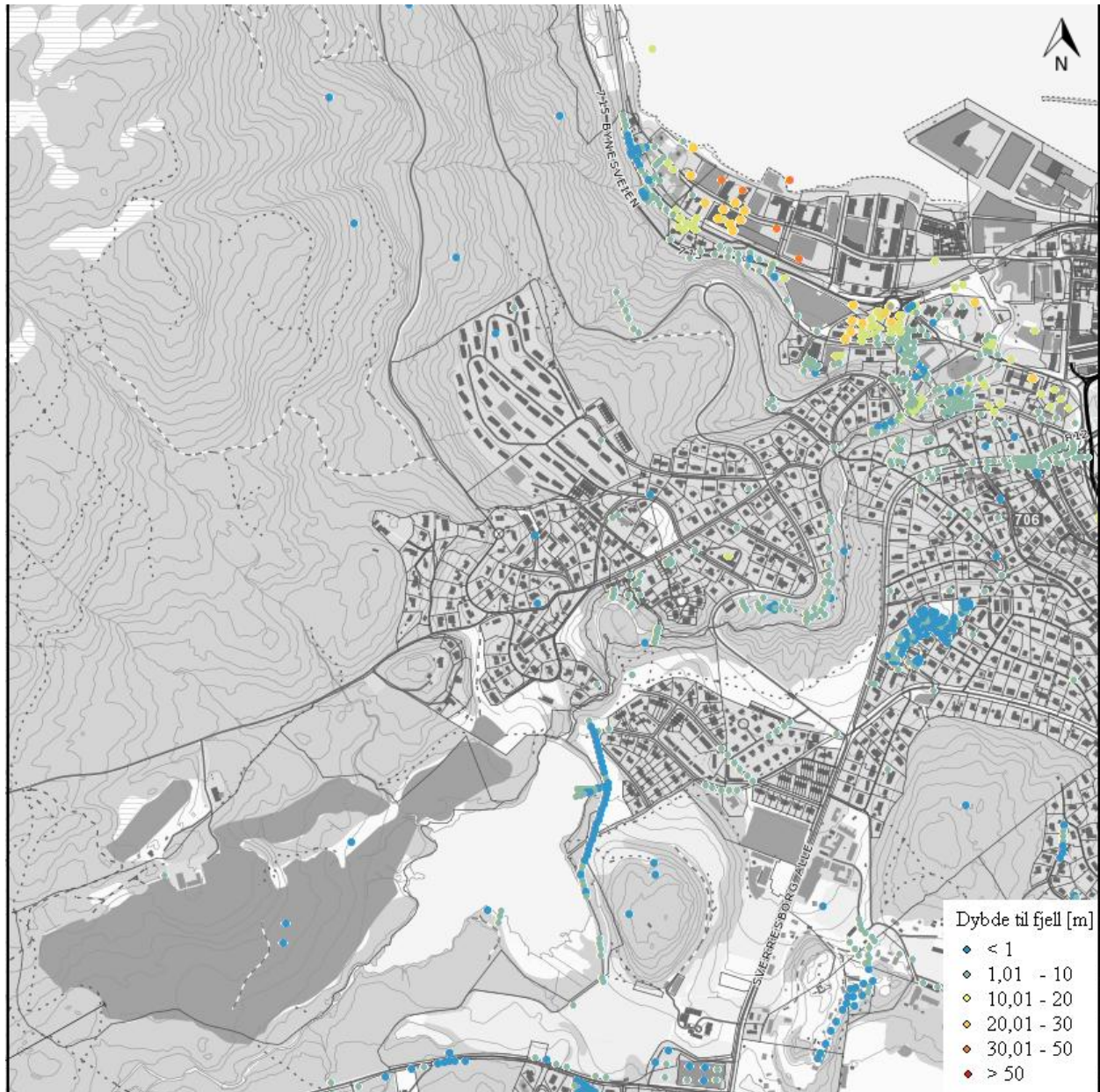
Figur i vedlegg C, 8. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt B5.



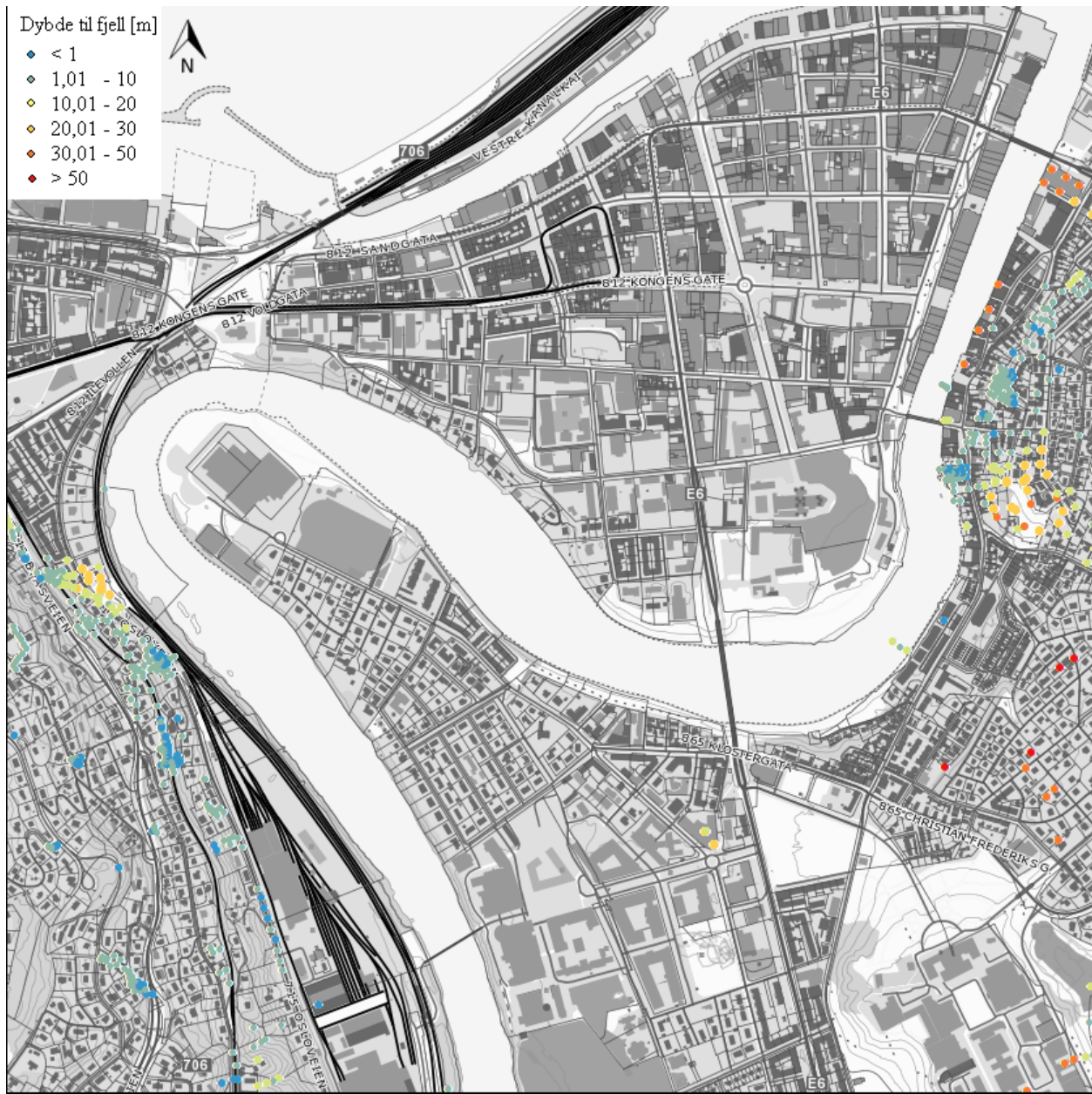
Figur i vedlegg C, 9. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C1.



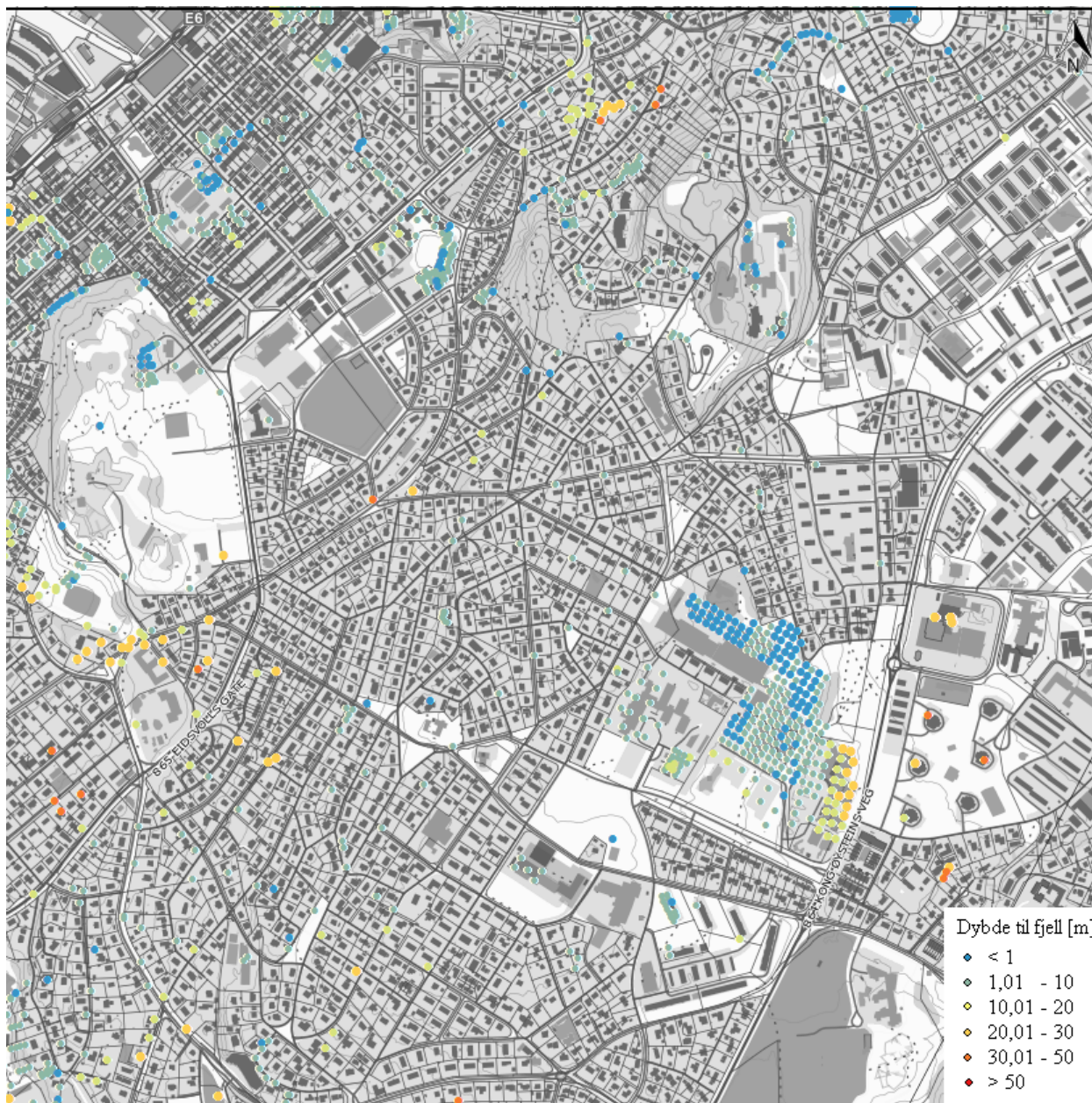
Figur i vedlegg C, 10. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C2.



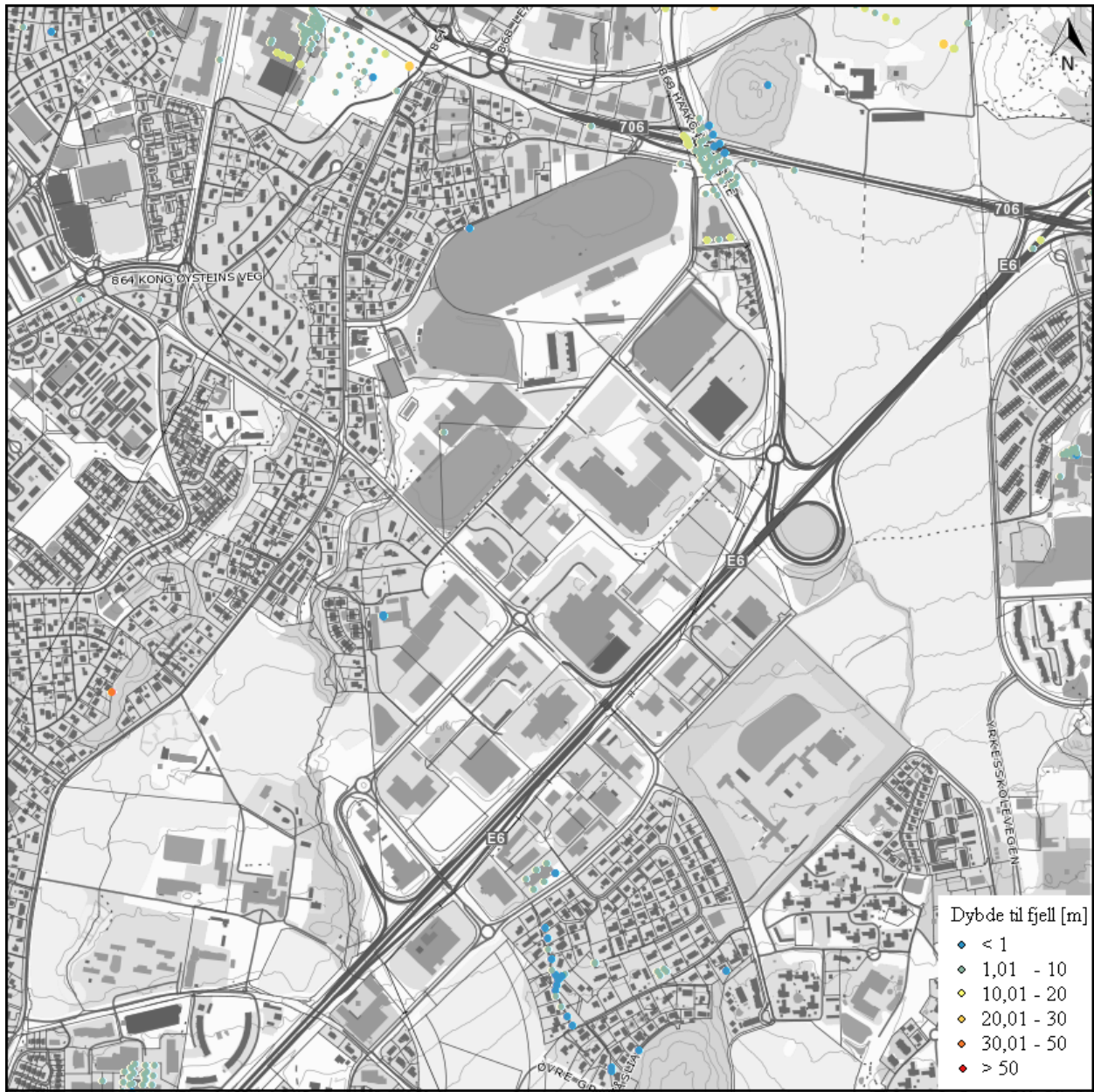
Figur i vedlegg C, 11. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C3.



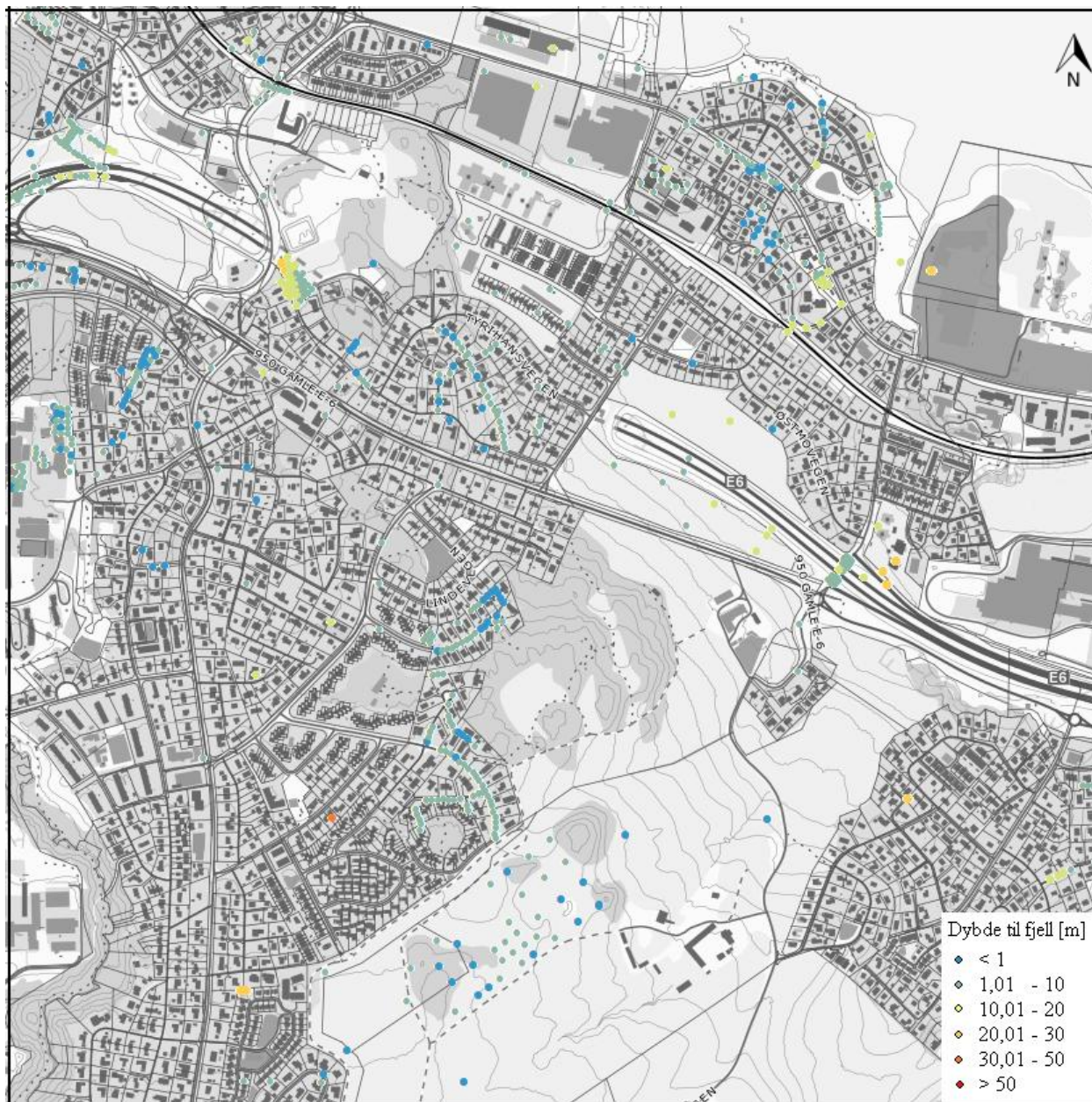
Figur i vedlegg C, 12. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C4.



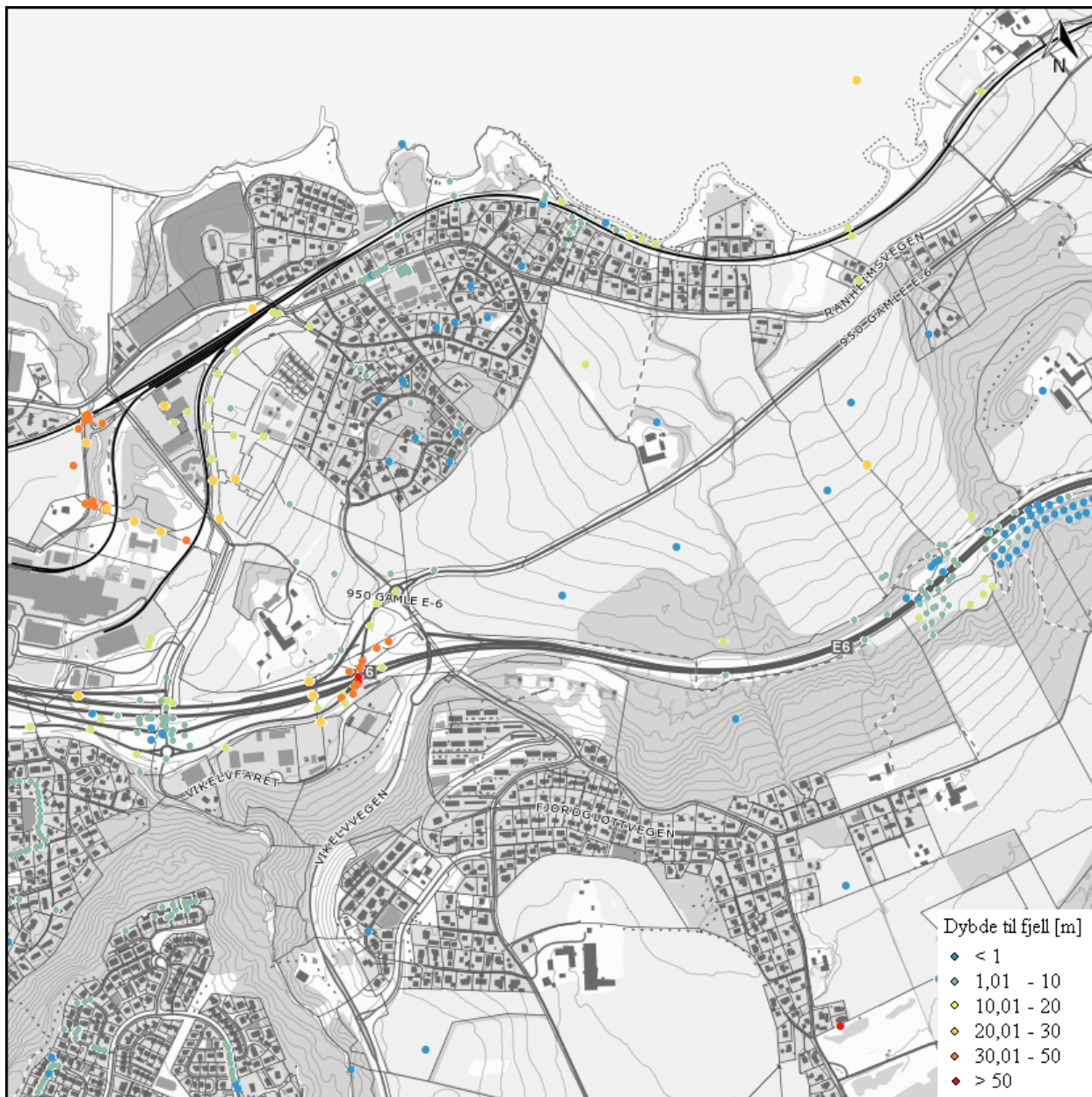
Figur i vedlegg C, 13. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C5.



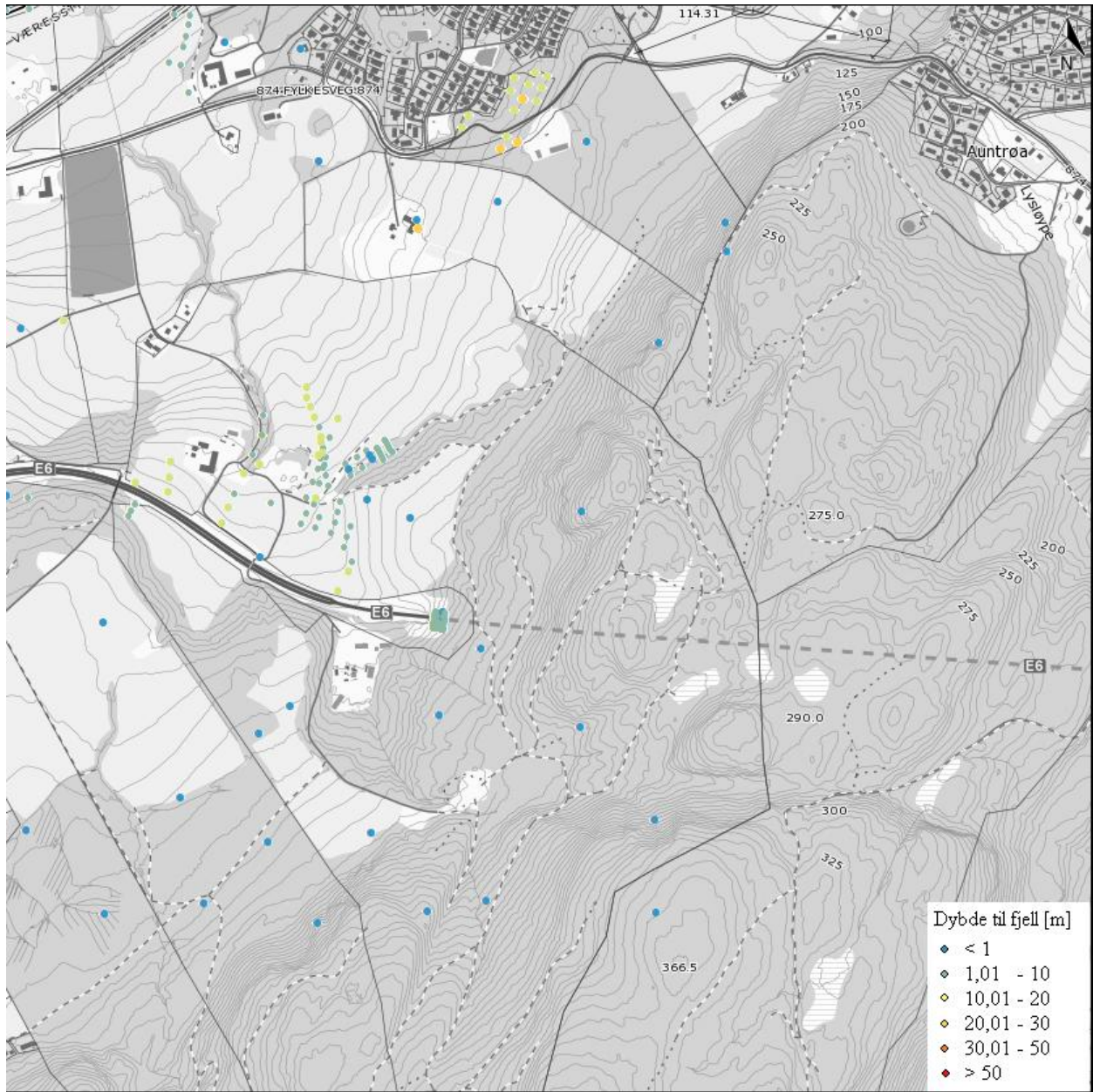
Figur i vedlegg C, 14. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C6.



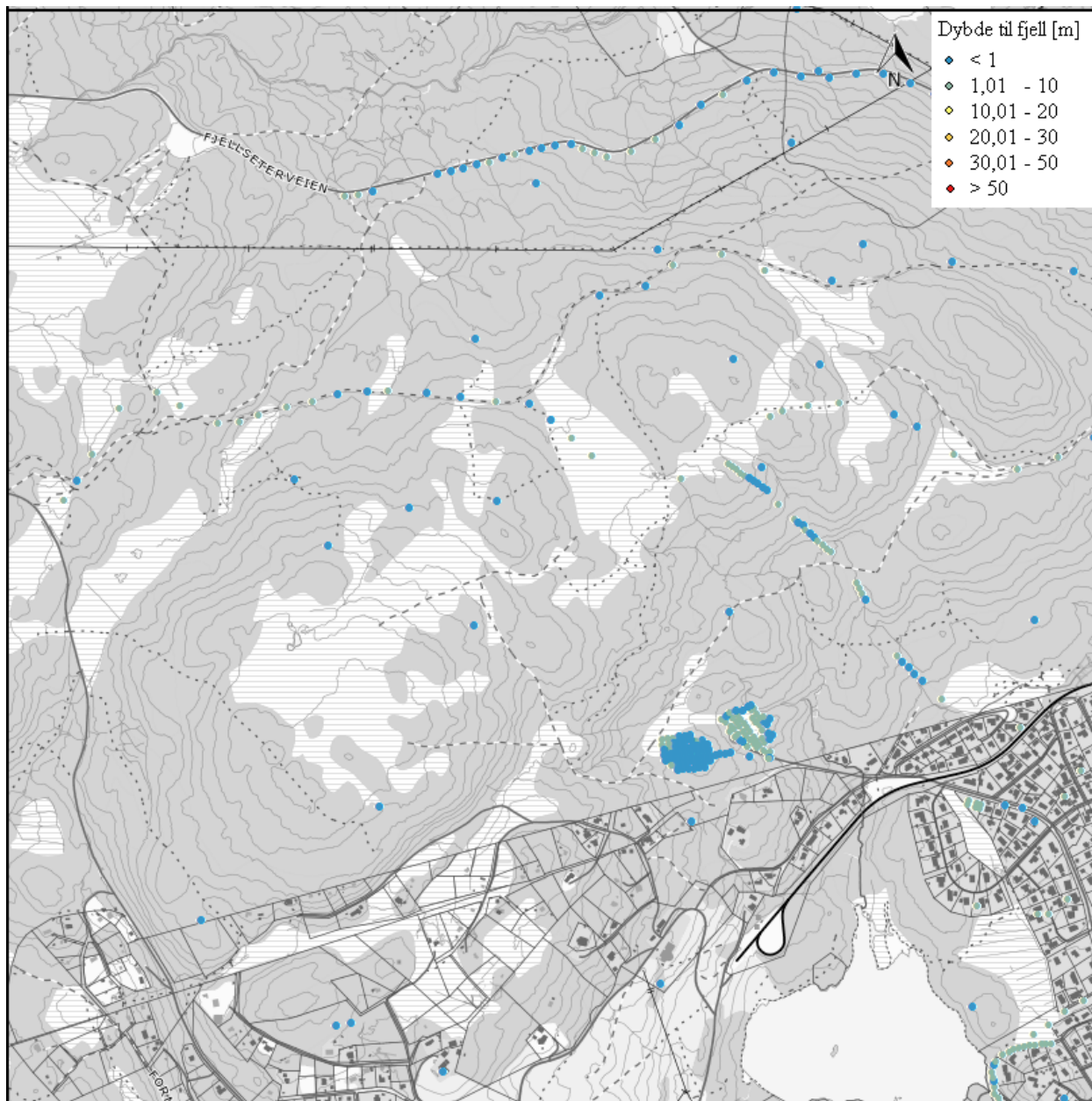
Figur i vedlegg C, 15. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C7.



Figur i vedlegg C, 16. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C8.



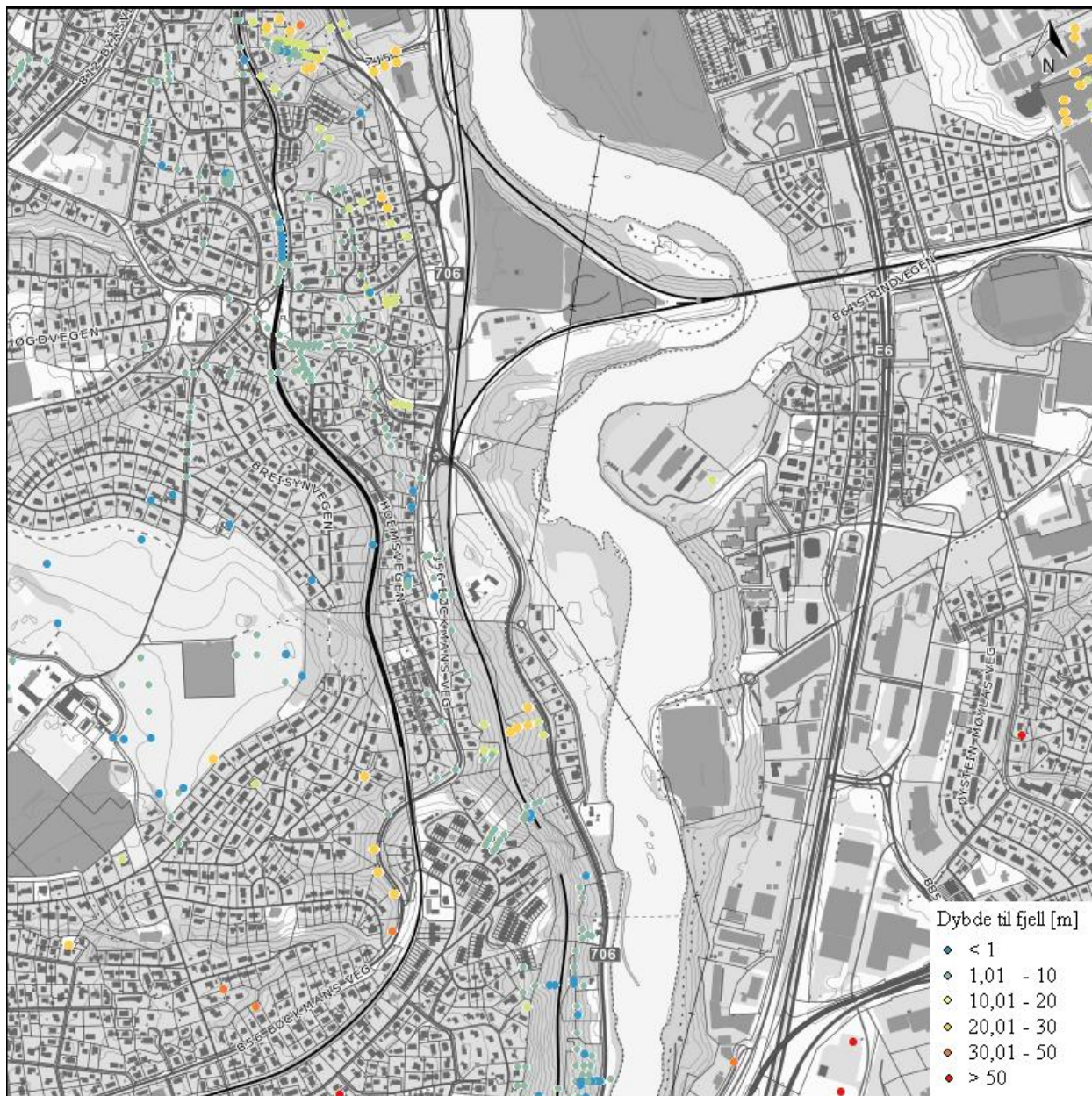
Figur i vedlegg C, 17. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt C9.



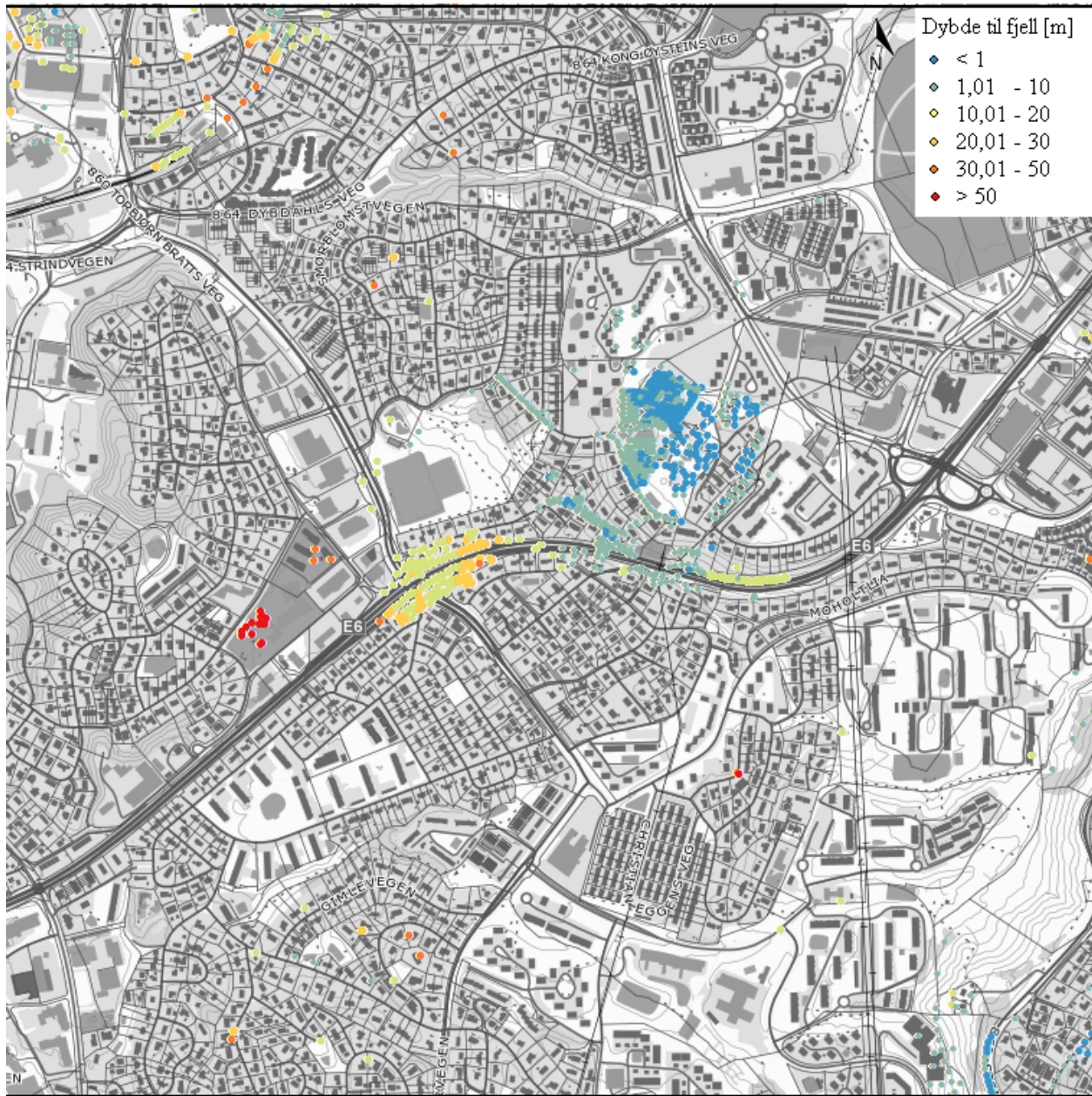
Figur i vedlegg C, 18. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt D1.



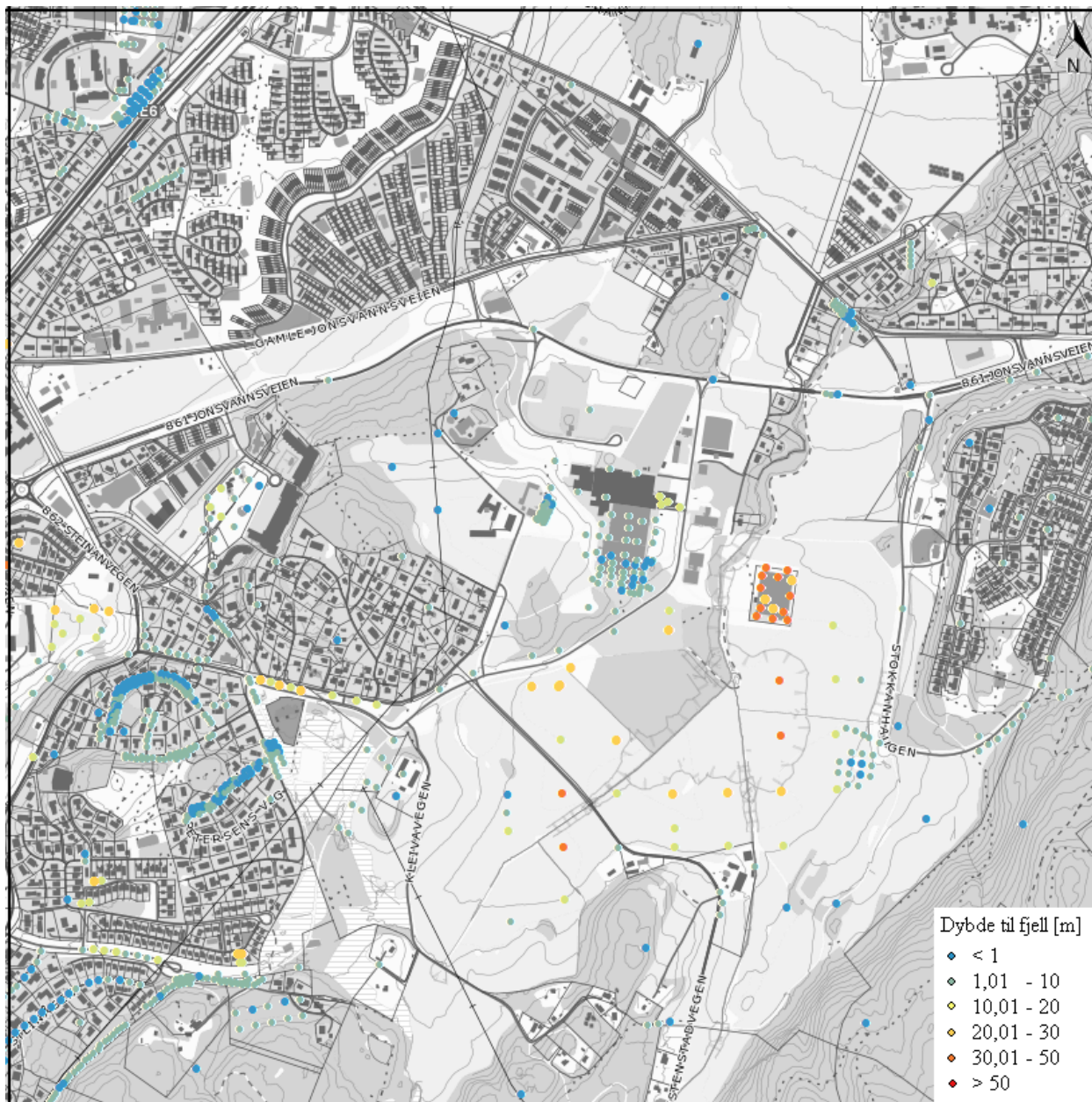
Figur i vedlegg C, 19. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt D2.



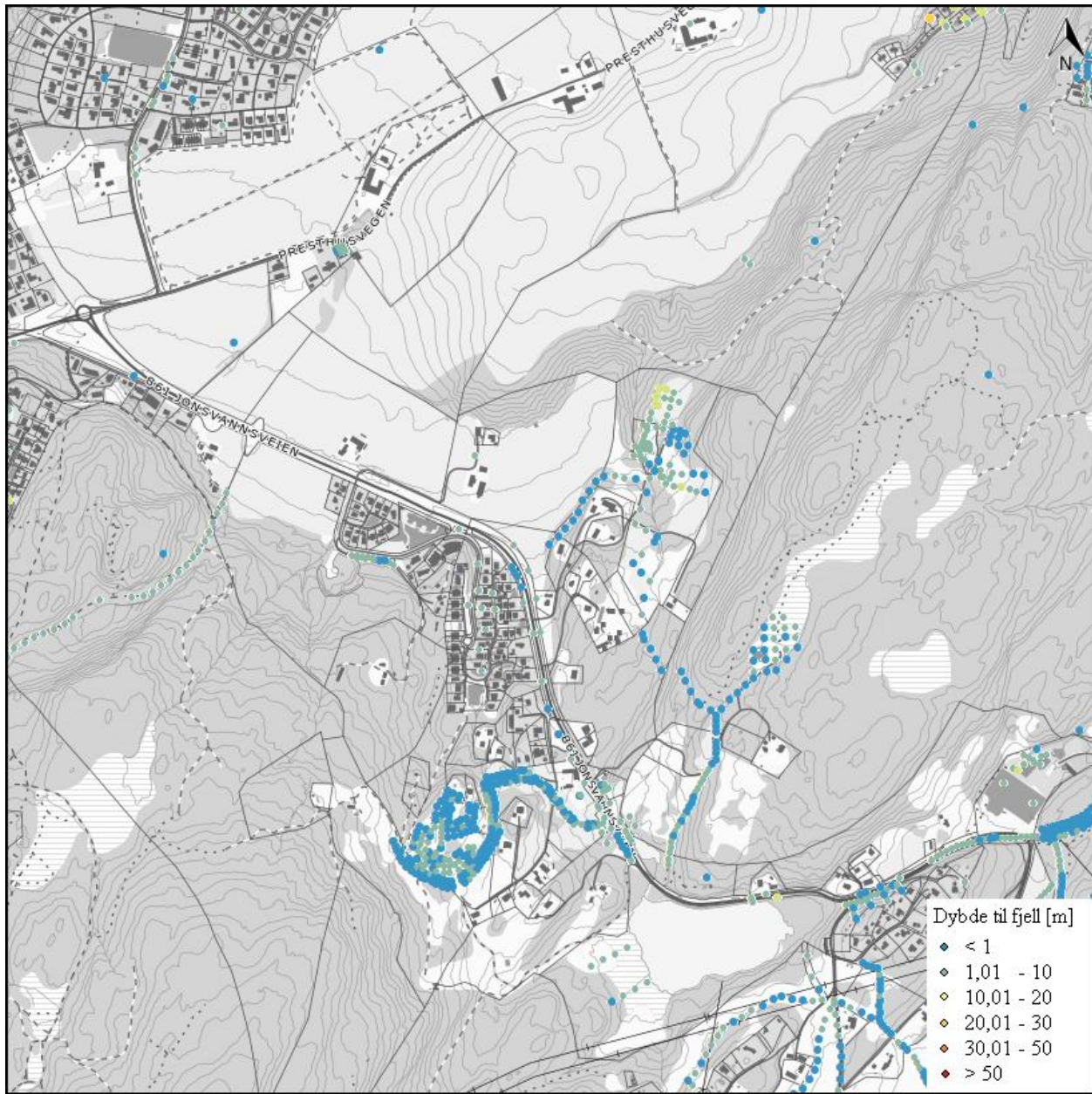
Figur i vedlegg C, 20. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt D3.



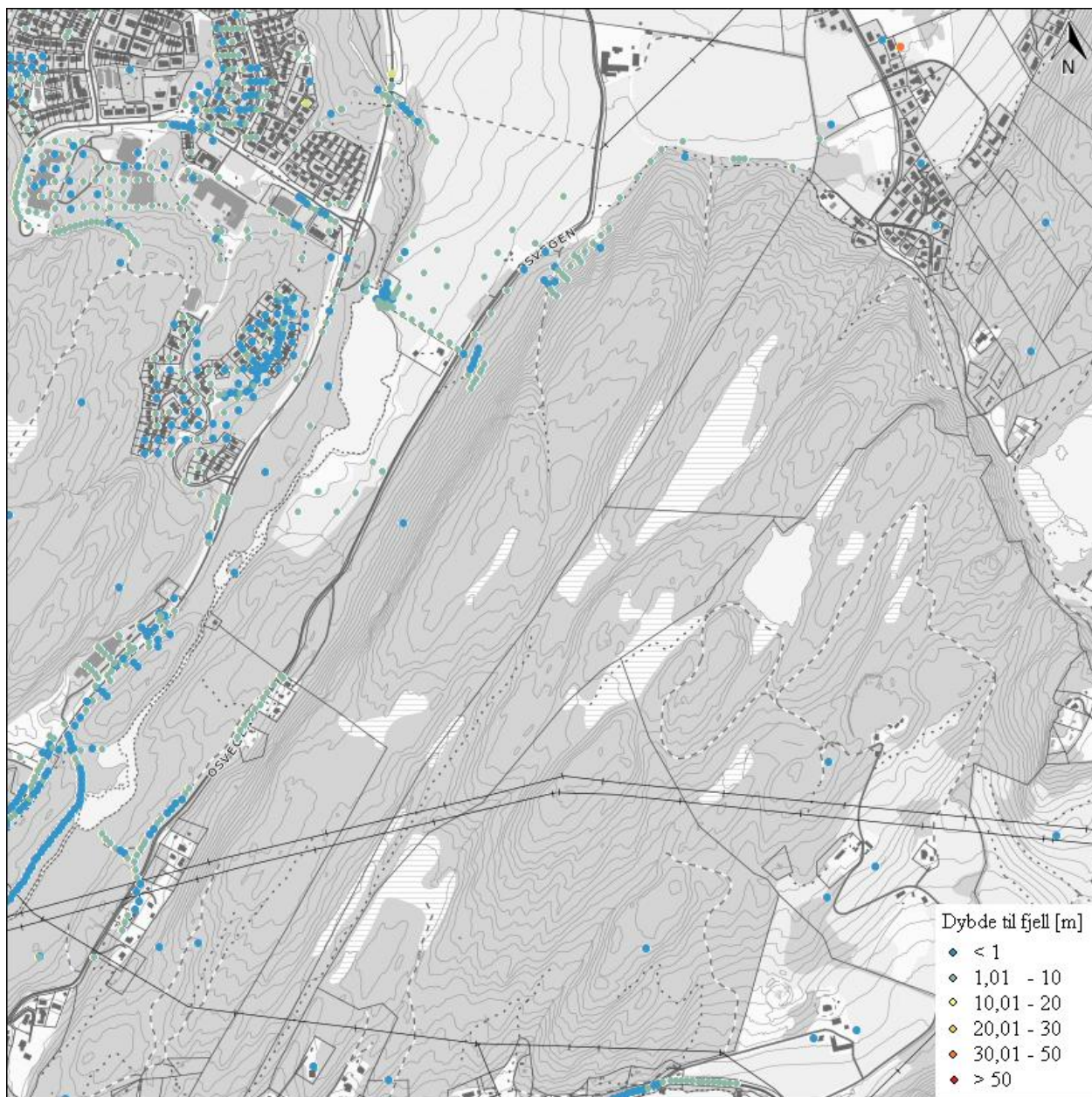
Figur i vedlegg C, 21. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt D4.



Figur i vedlegg C, 22. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt D5.



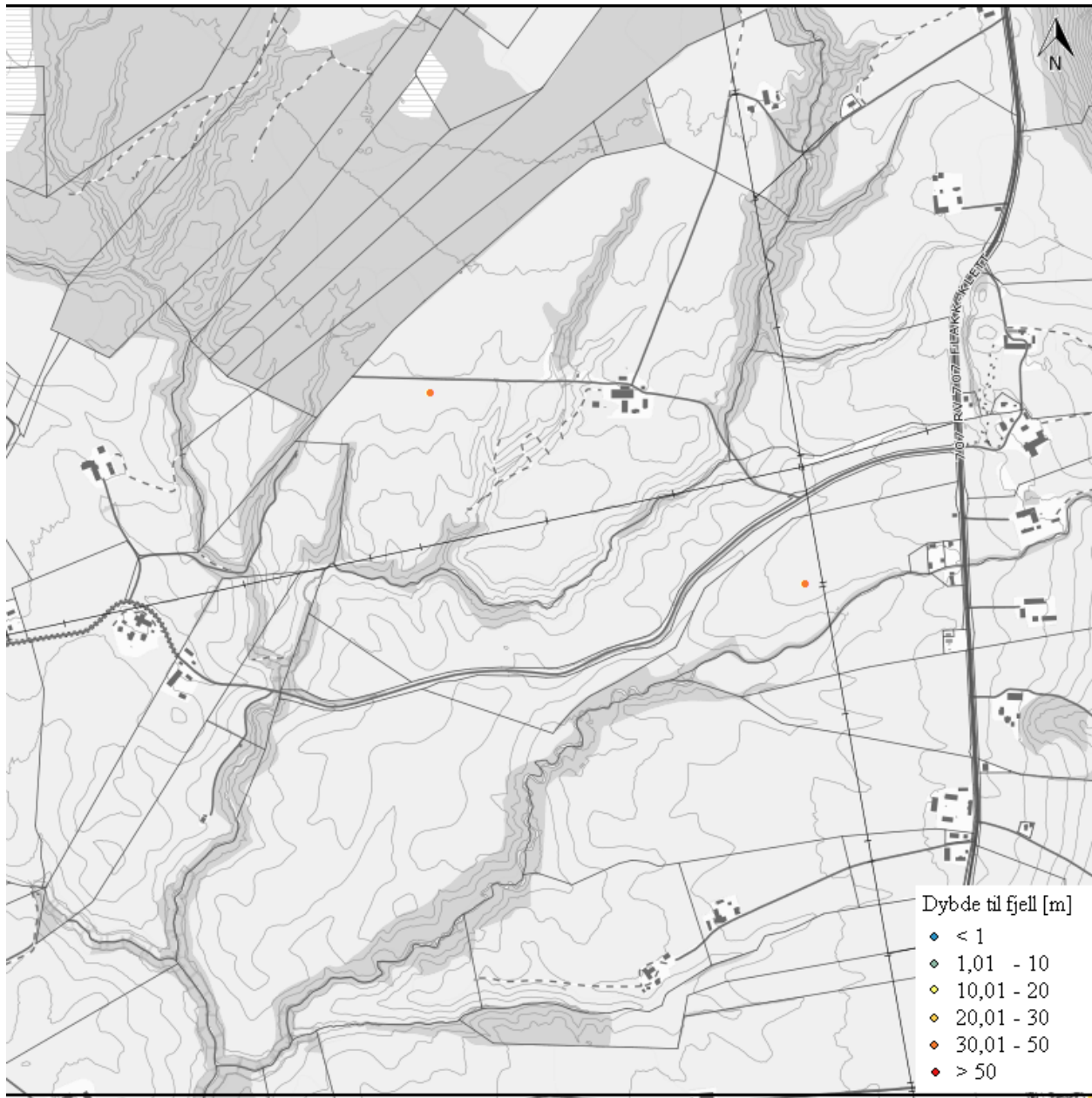
Figur i vedlegg C, 23. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt D6.



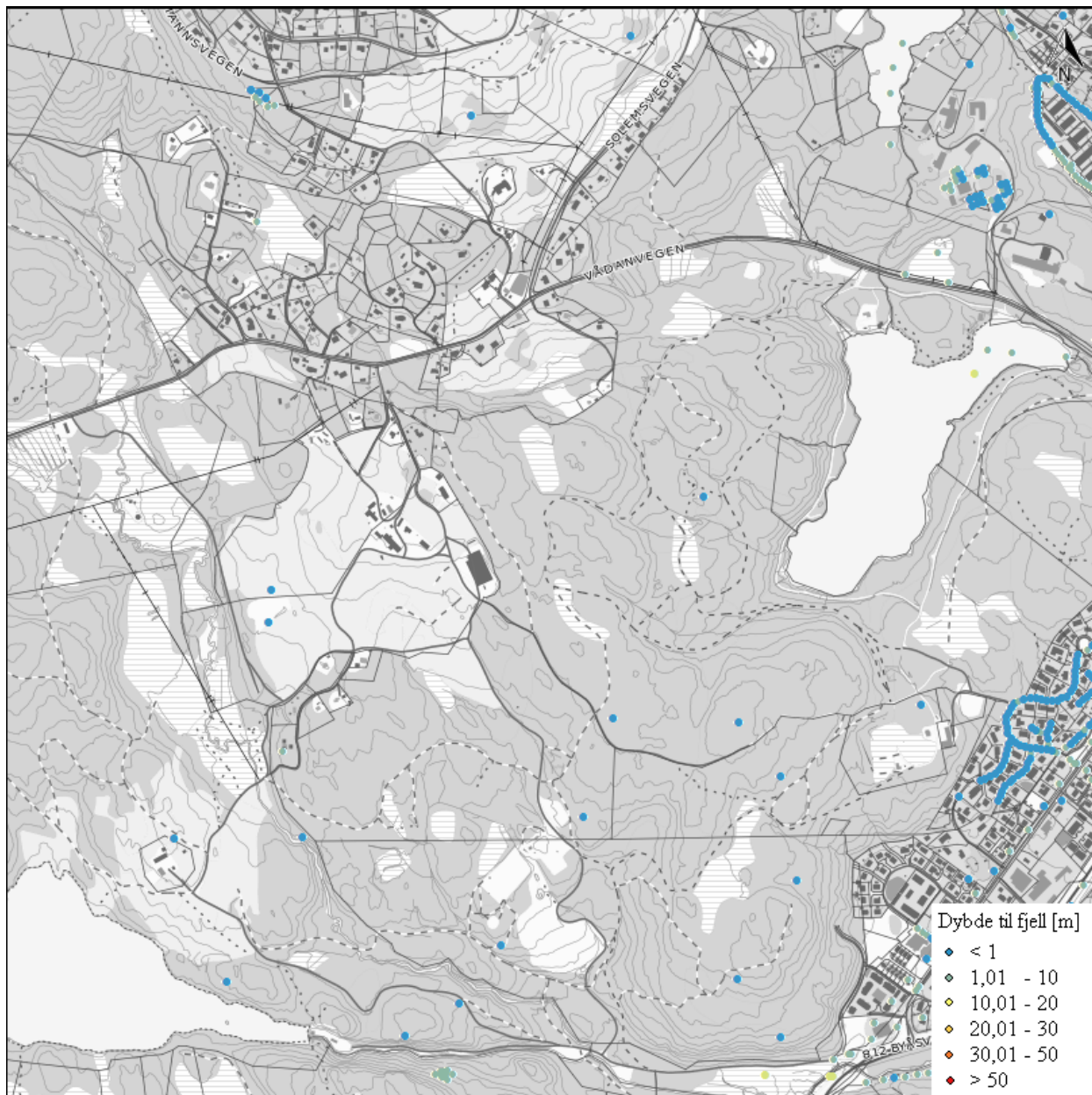
Figur i vedlegg C, 24. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt D7.



Figur i vedlegg C, 25. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E1.



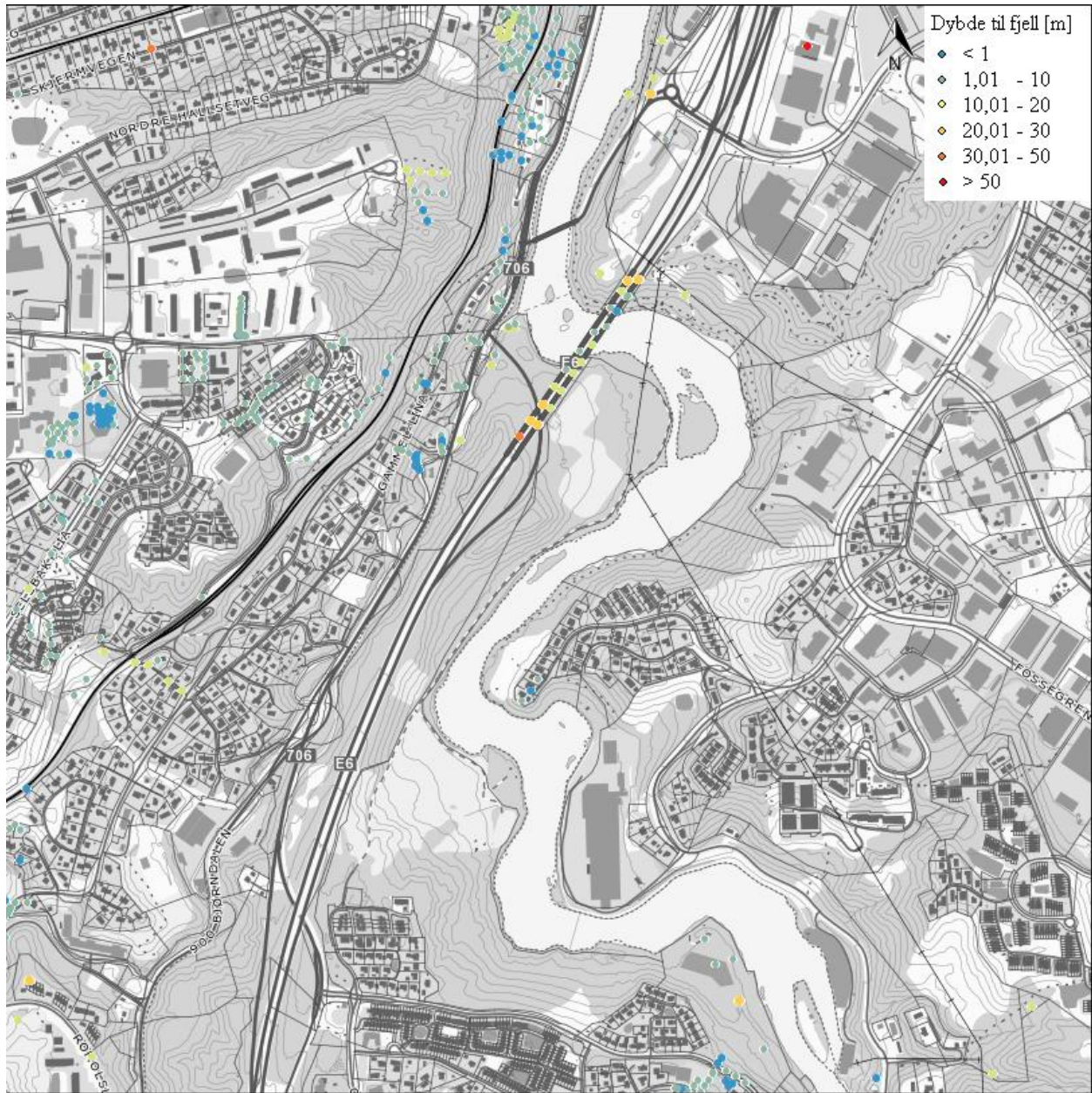
Figur i vedlegg C, 26. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E2.



Figur i vedlegg C, 27. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E3.



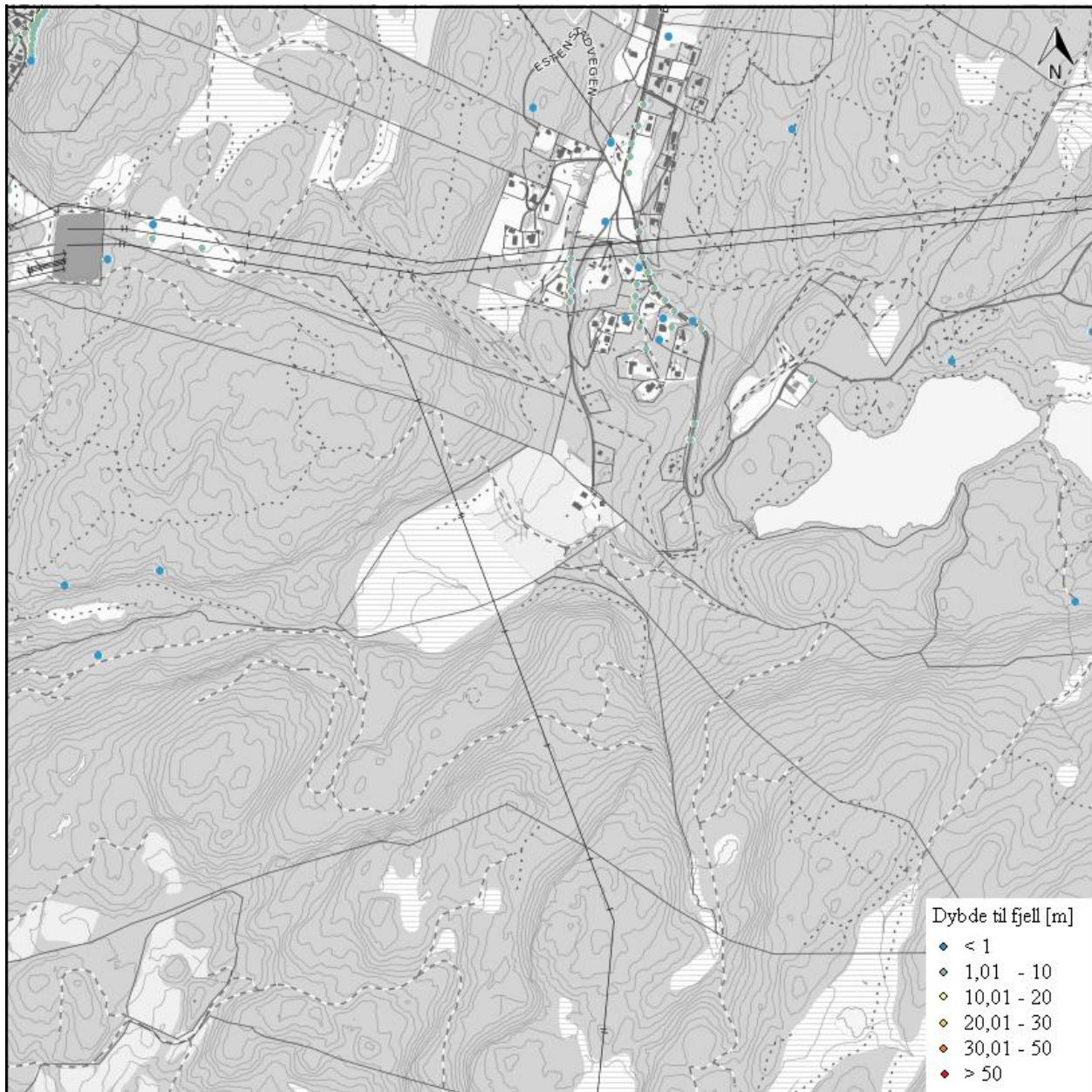
Figur i vedlegg C, 28. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E4.



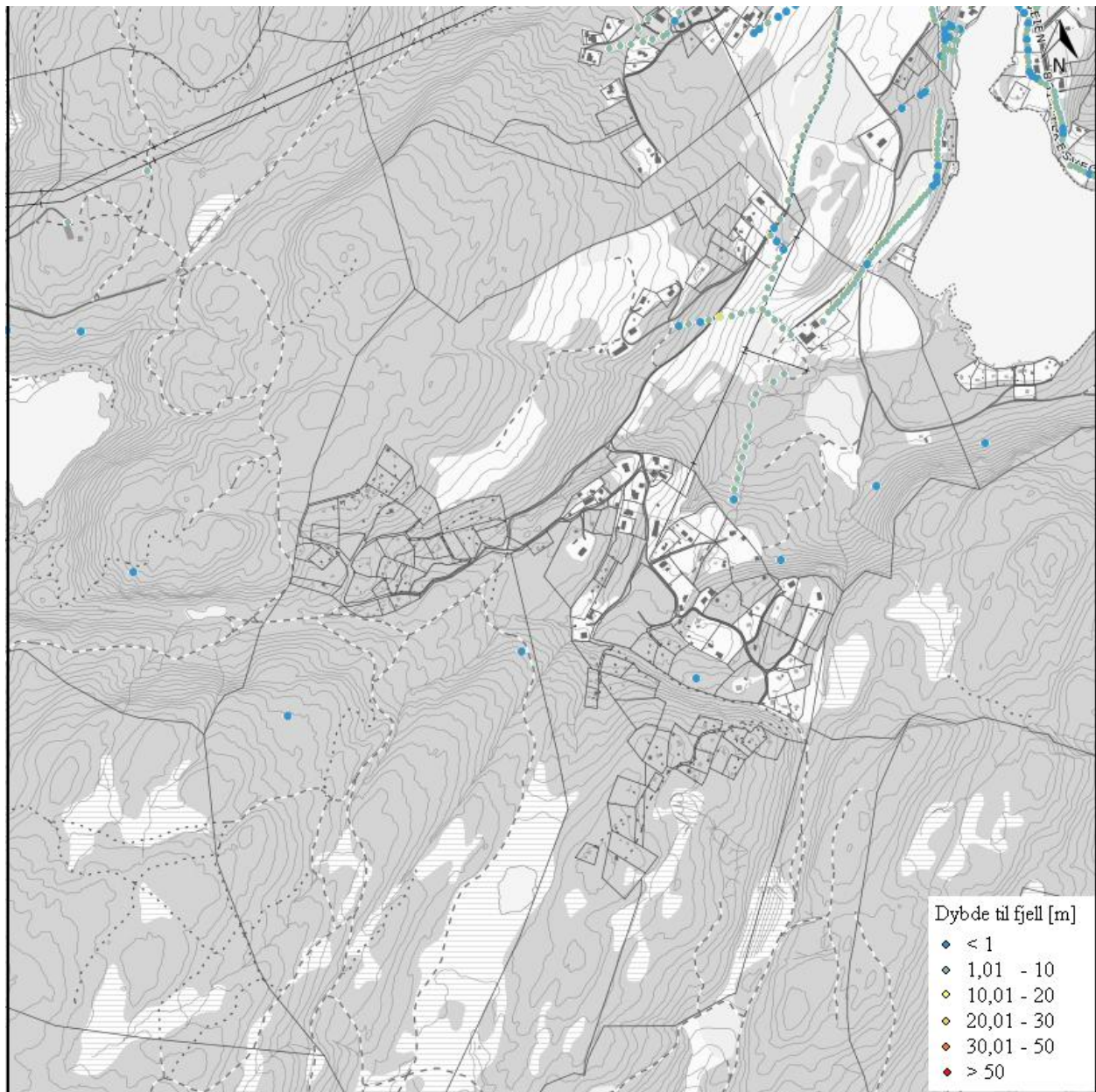
Figur i vedlegg C, 29. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E5.



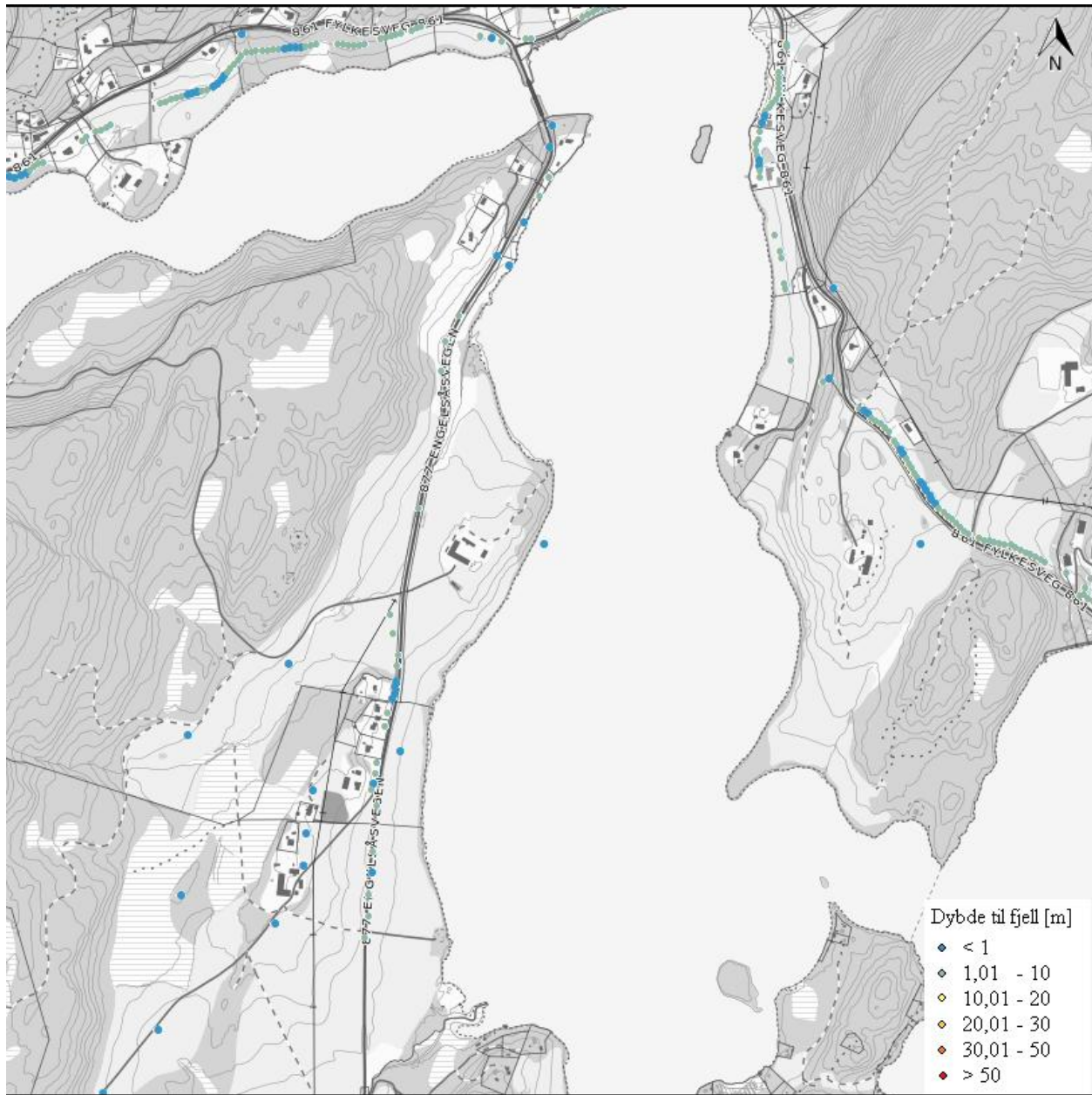
Figur i vedlegg C, 30. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E6.



Figur i vedlegg C, 31. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E7.



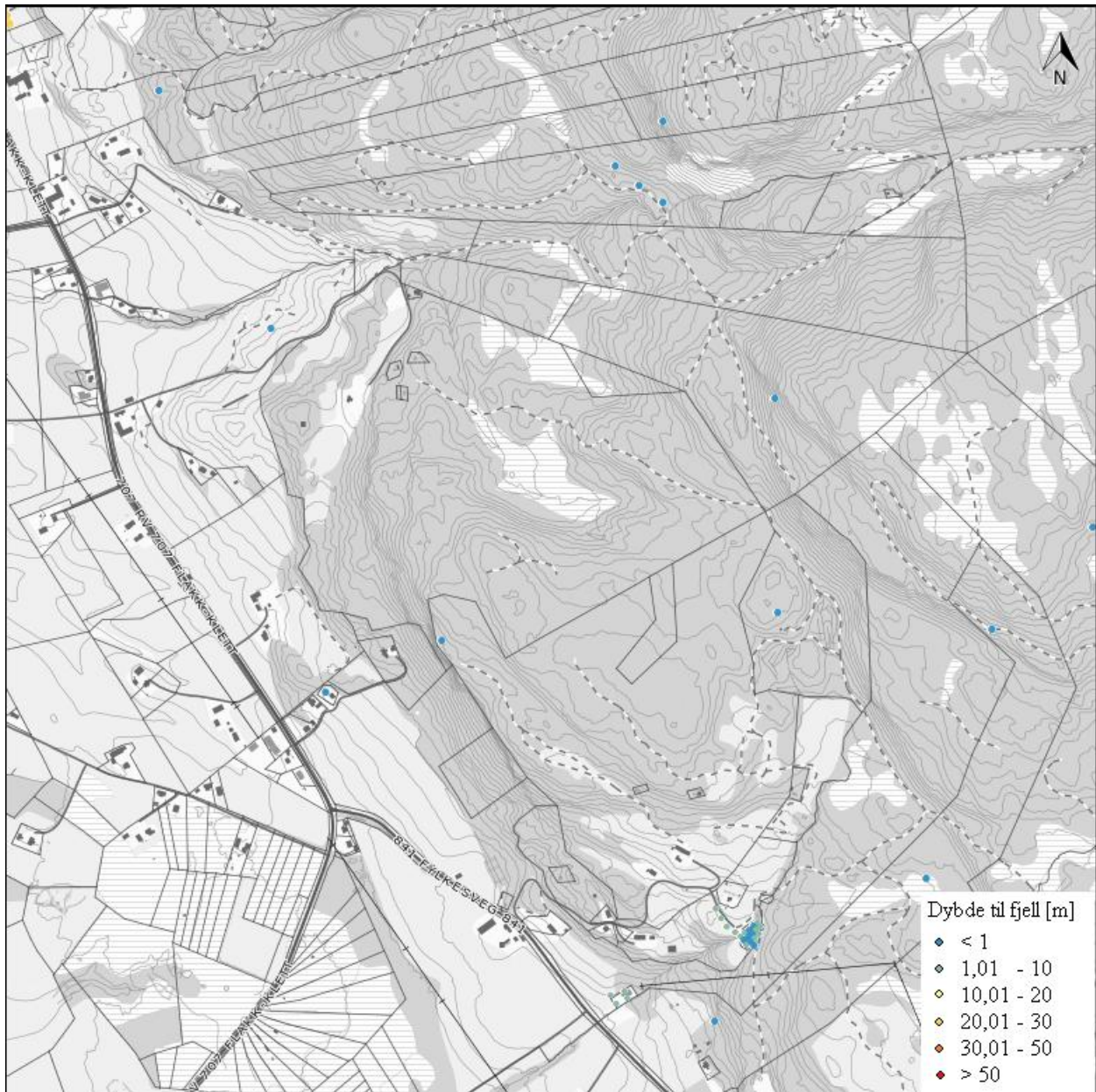
Figur i vedlegg C, 32. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E8.



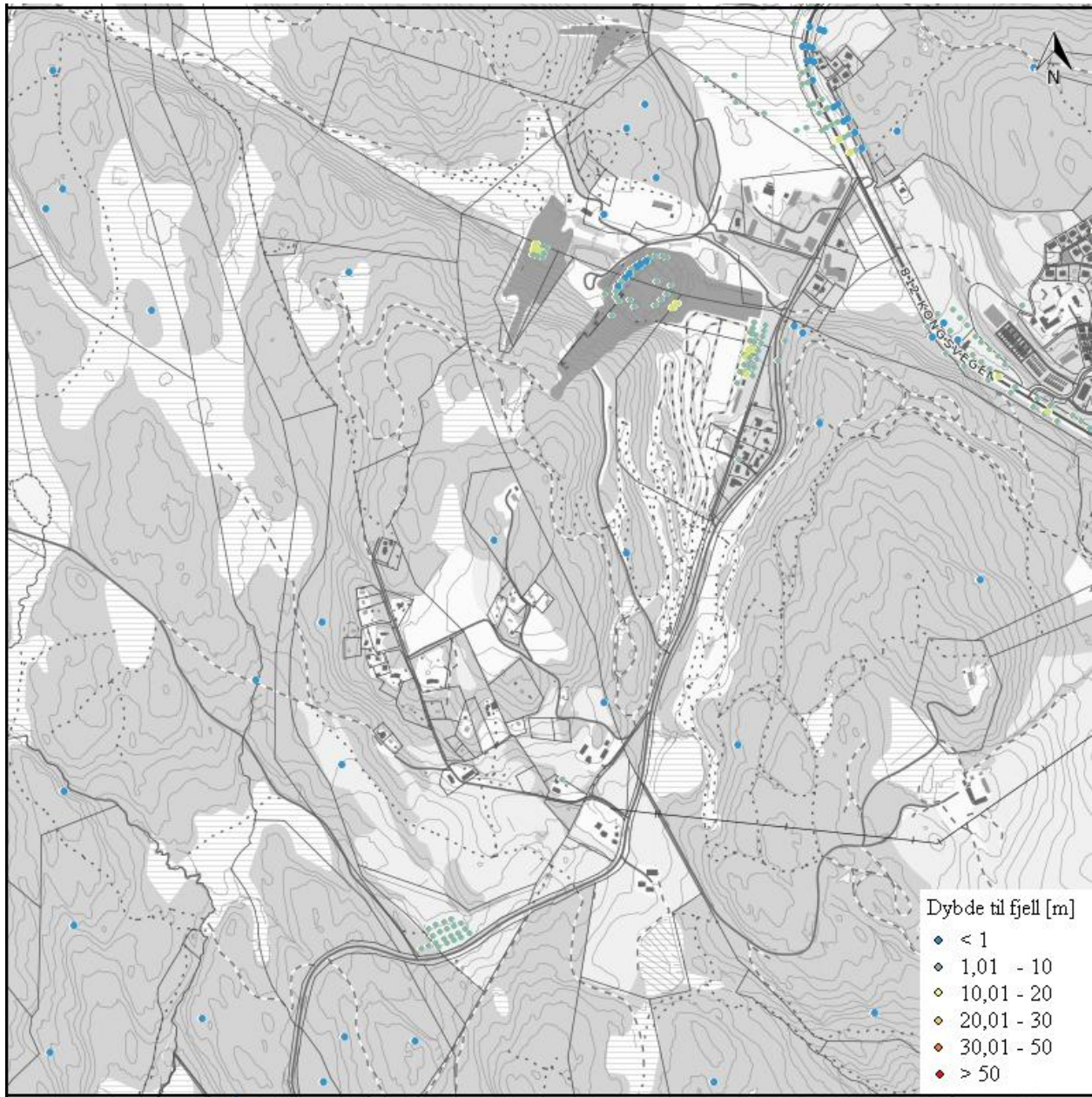
Figur i vedlegg C, 33. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt E9.



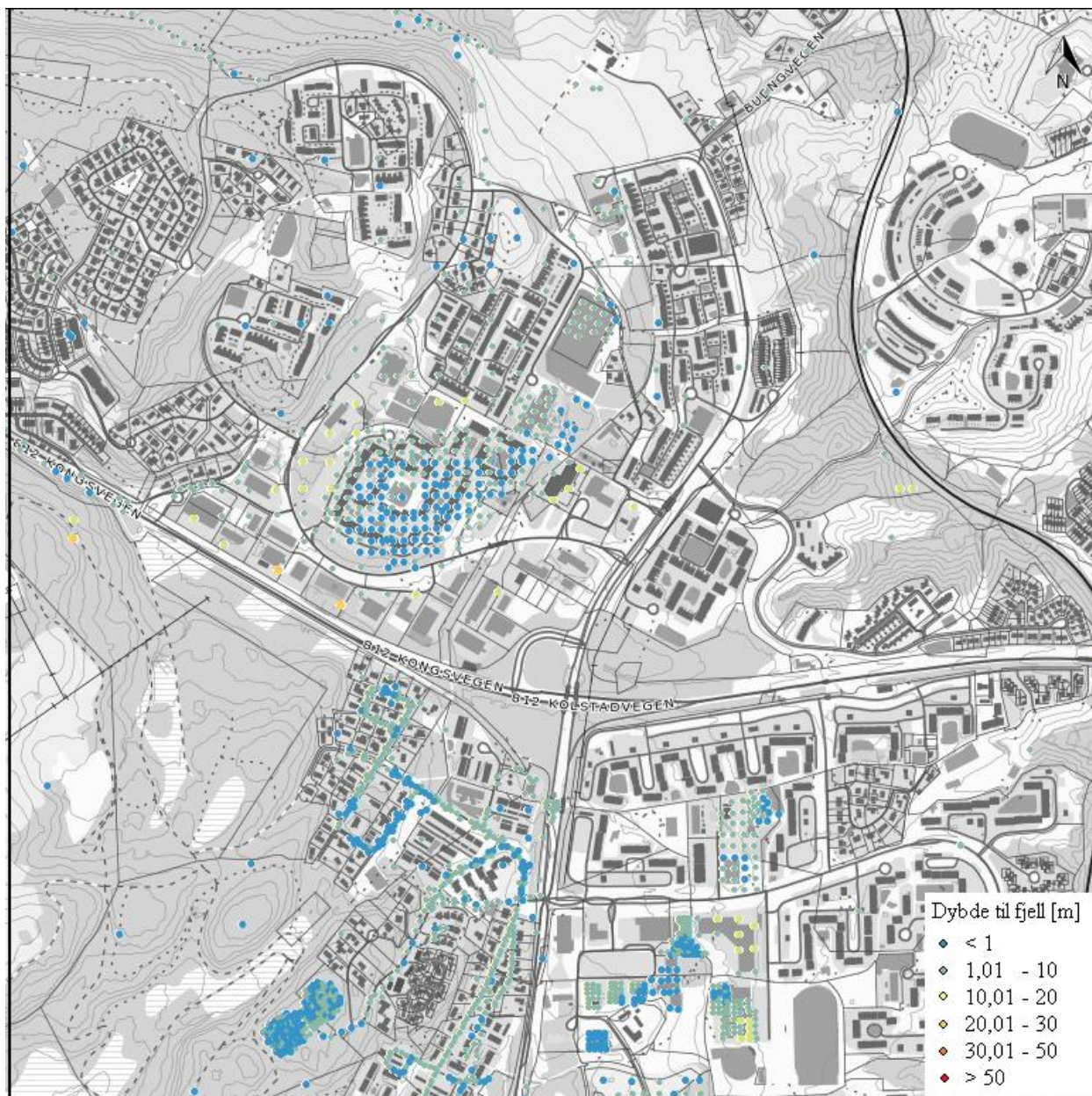
Figur i vedlegg C, 34. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F1.



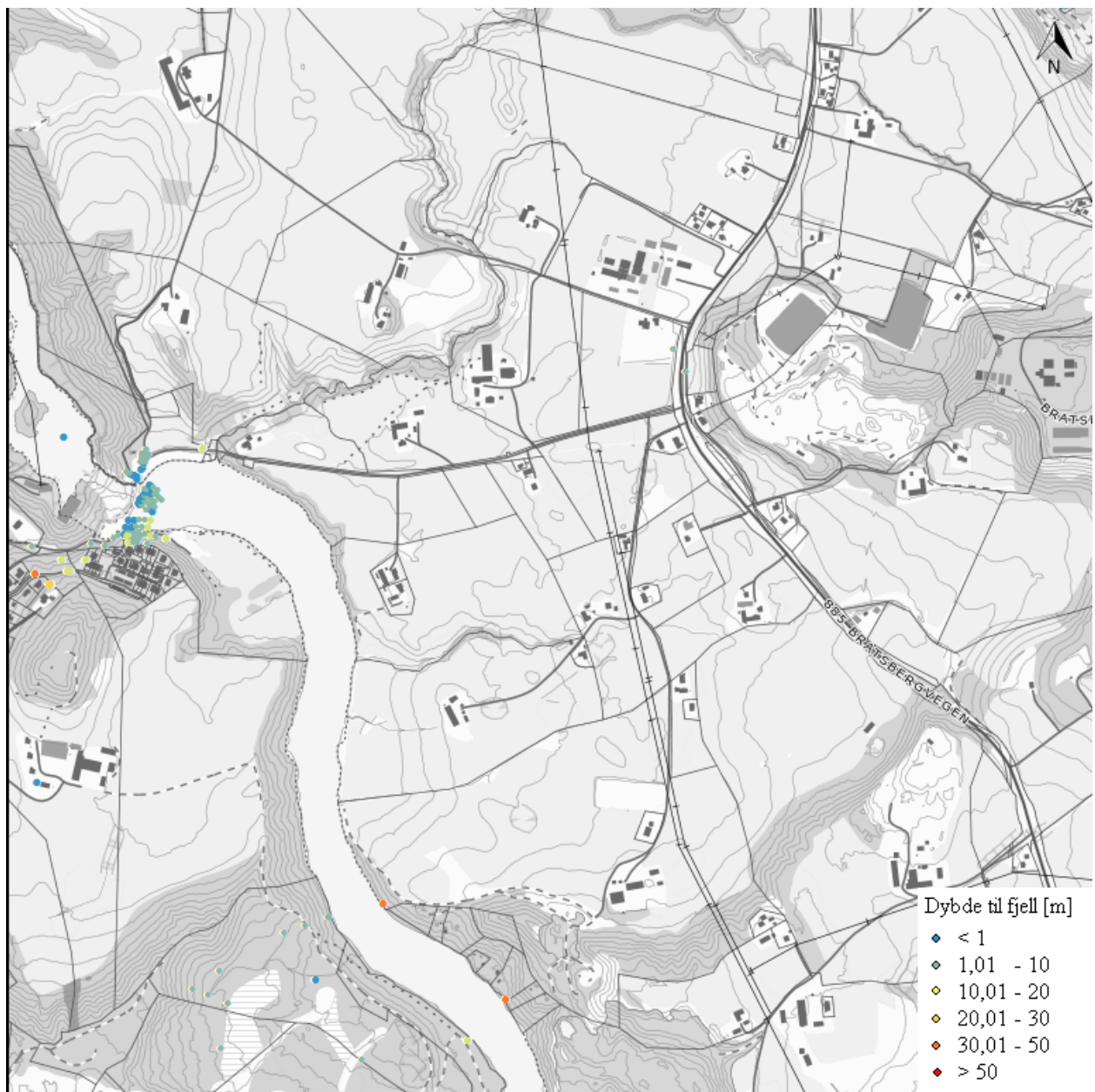
Figur i vedlegg C, 35. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F2.



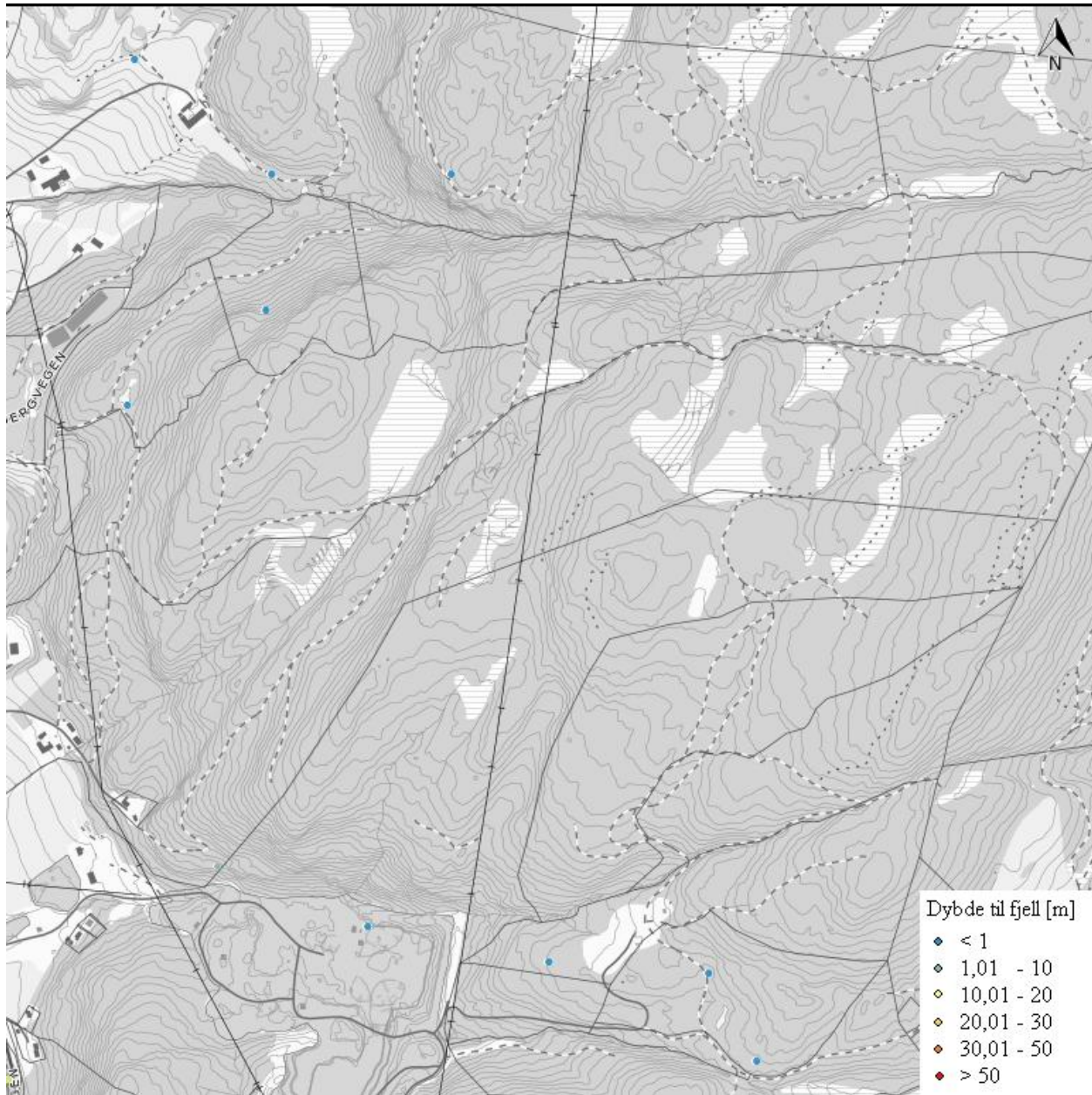
Figur i vedlegg C, 36. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F3.



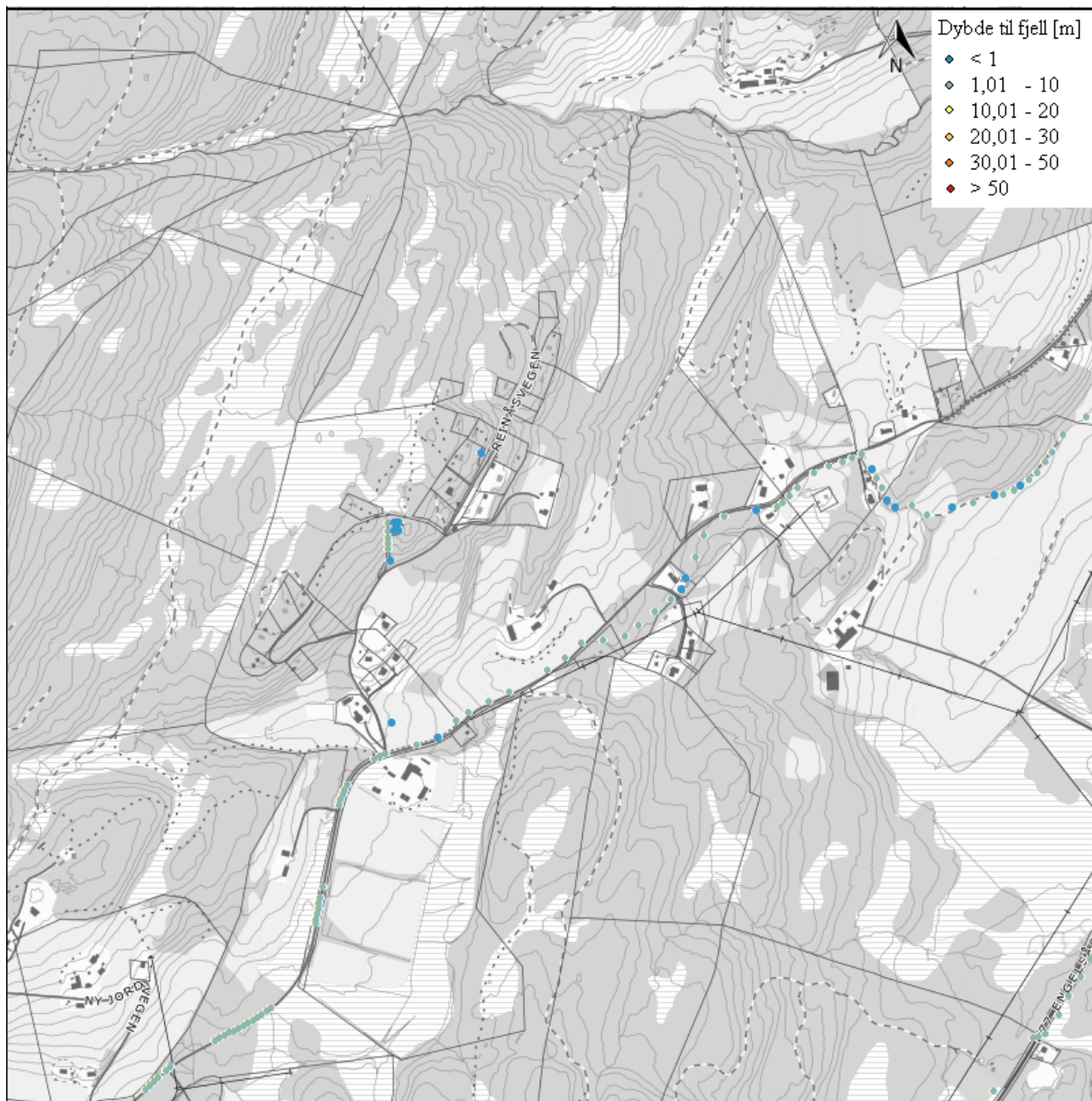
Figur i vedlegg C, 37. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F4.



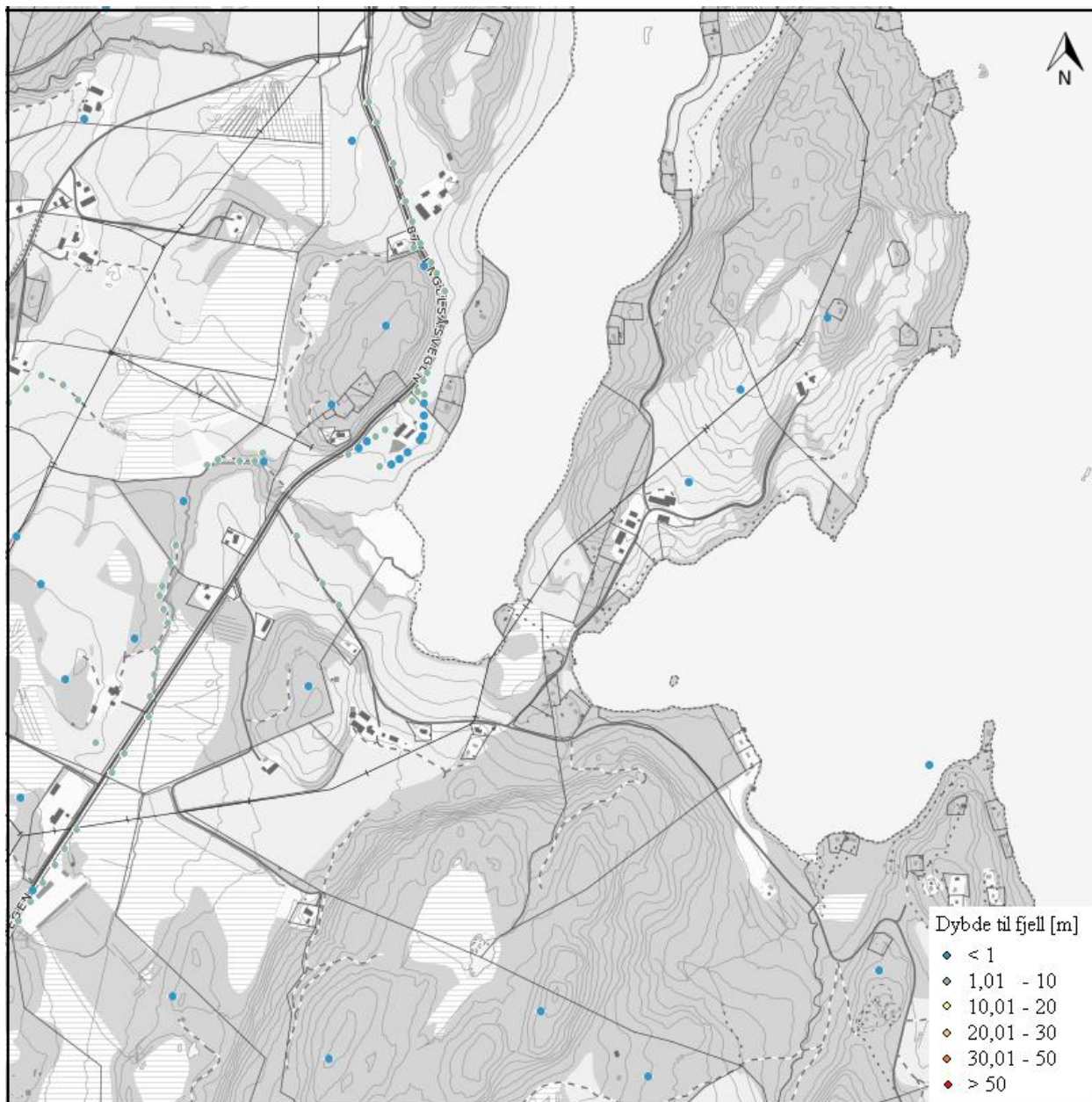
Figur i vedlegg C, 39. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F6.



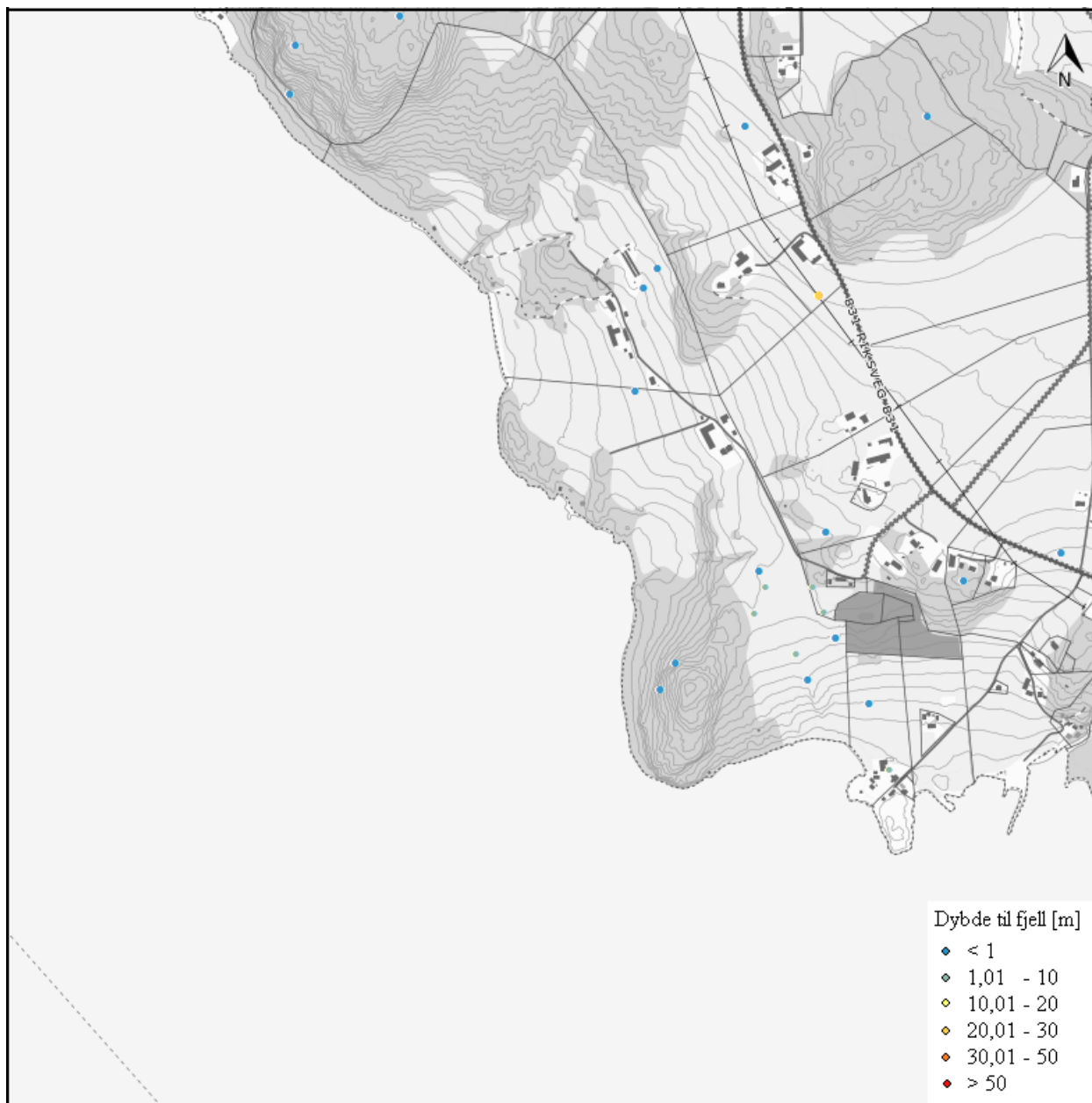
Figur i vedlegg C, 40. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F7.



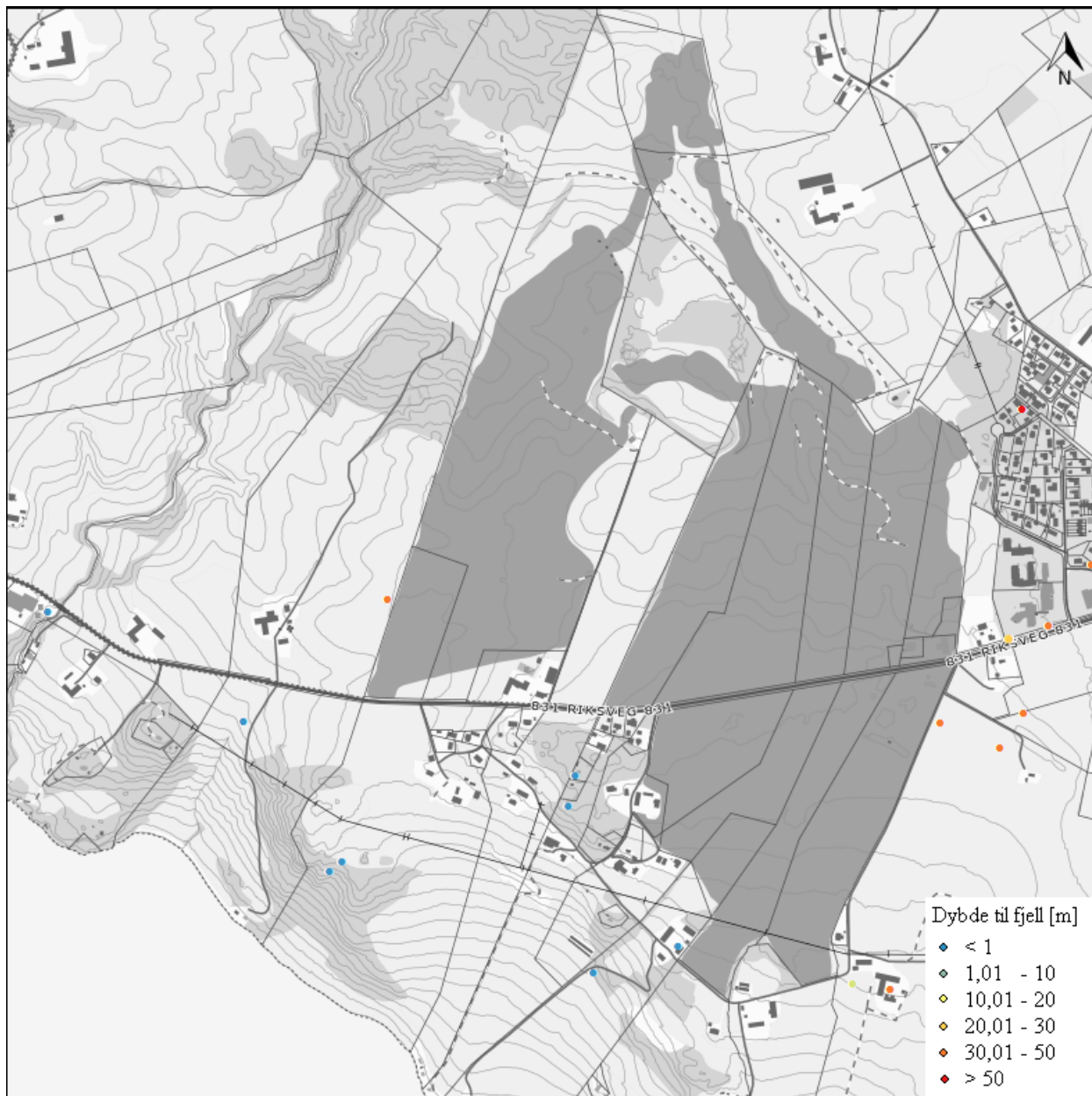
Figur i vedlegg C, 41. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F8.



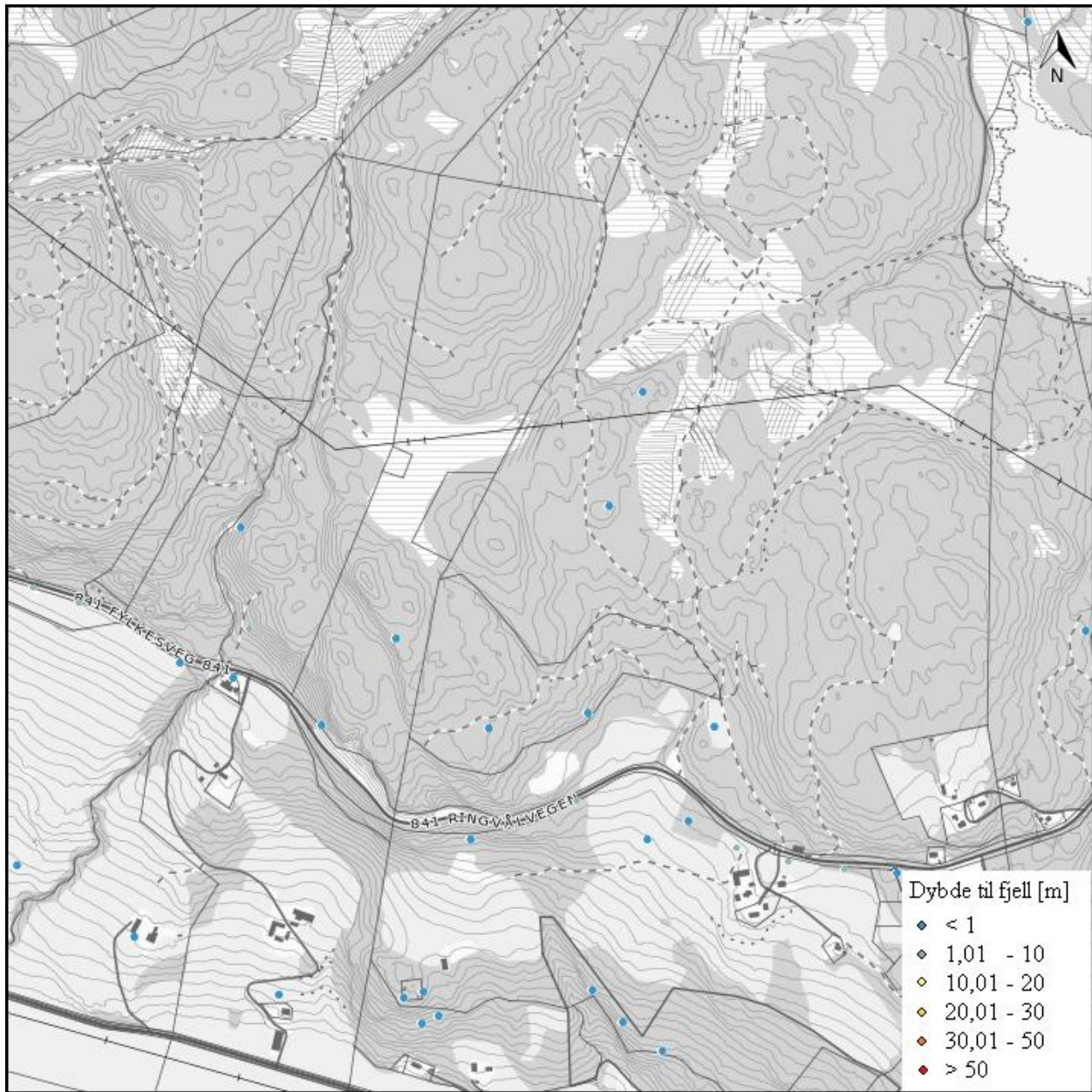
Figur i vedlegg C, 42. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt F9.



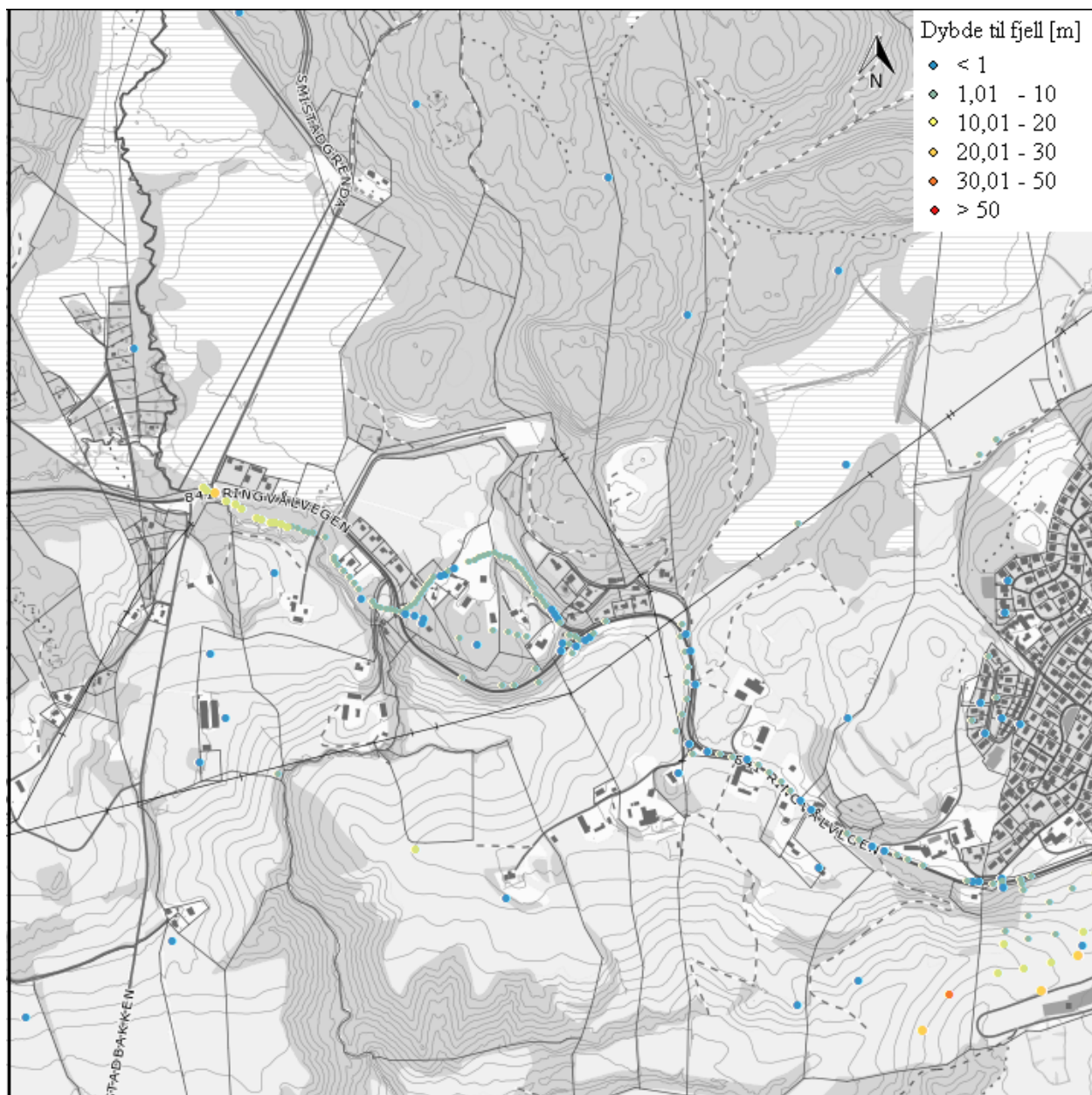
Figur i vedlegg C, 43. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt G1.



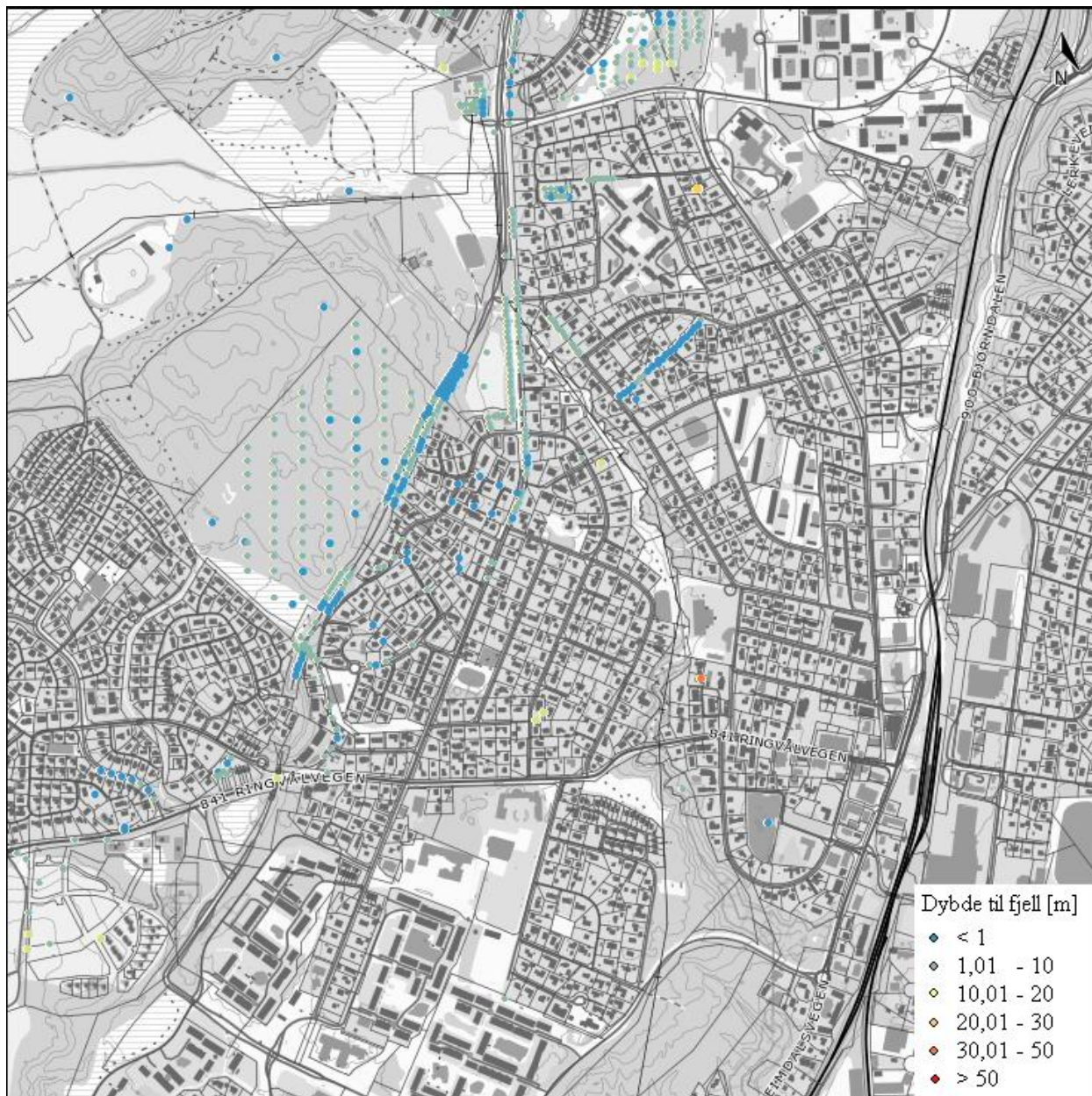
Figur i vedlegg C, 44. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt G2.



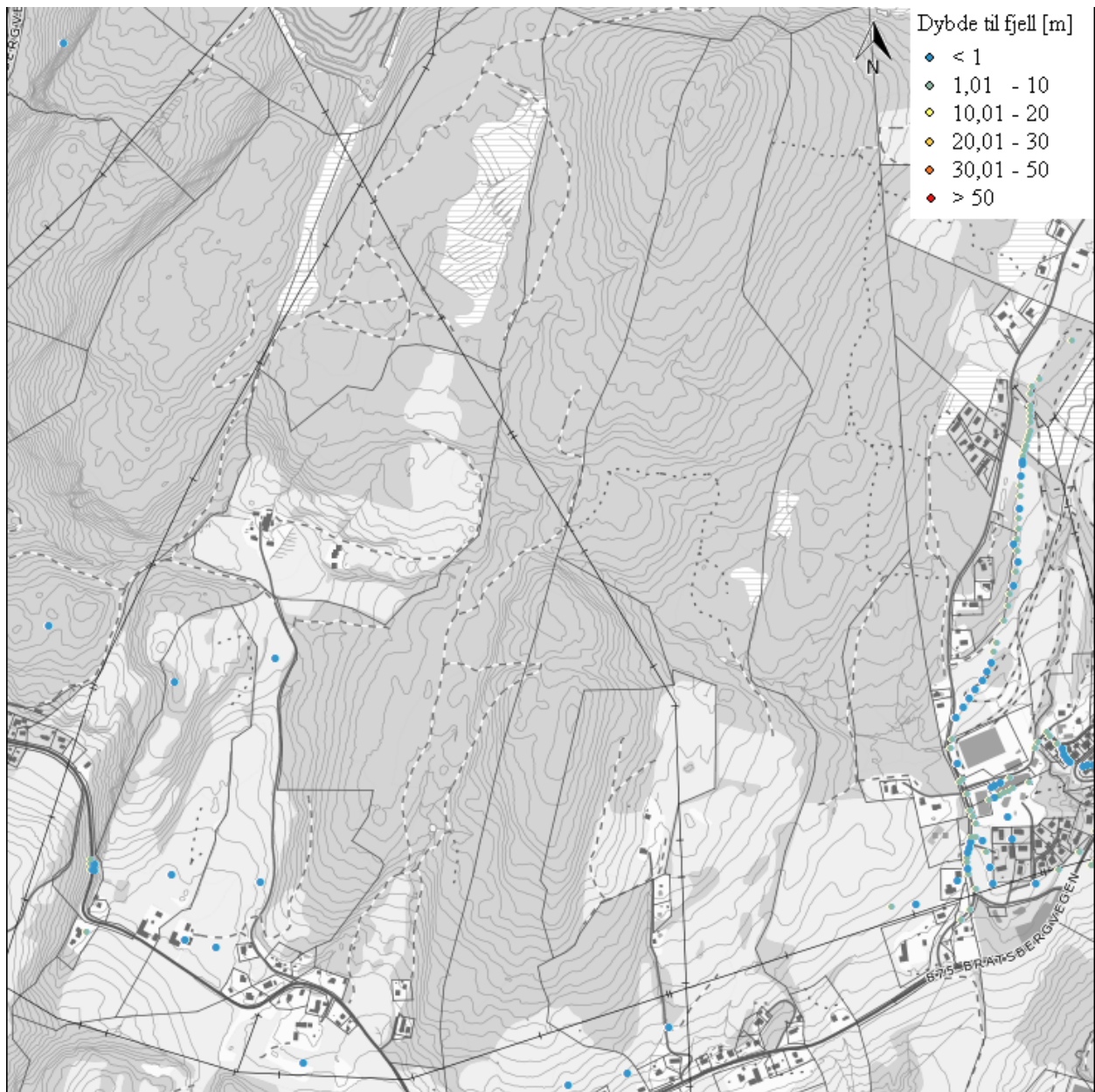
Figur i vedlegg C, 45. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt G3.



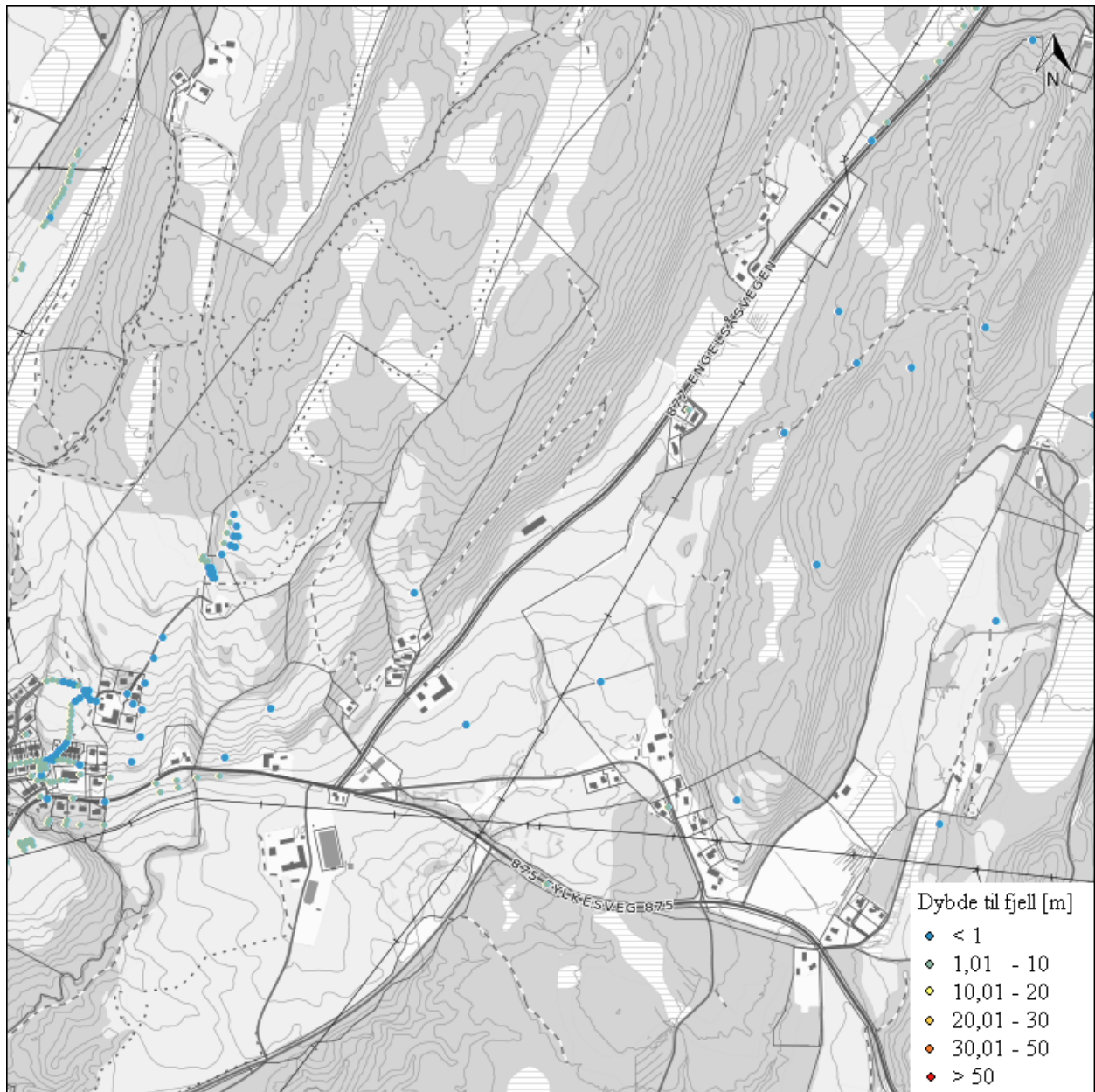
Figur i vedlegg C, 46. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt G4.



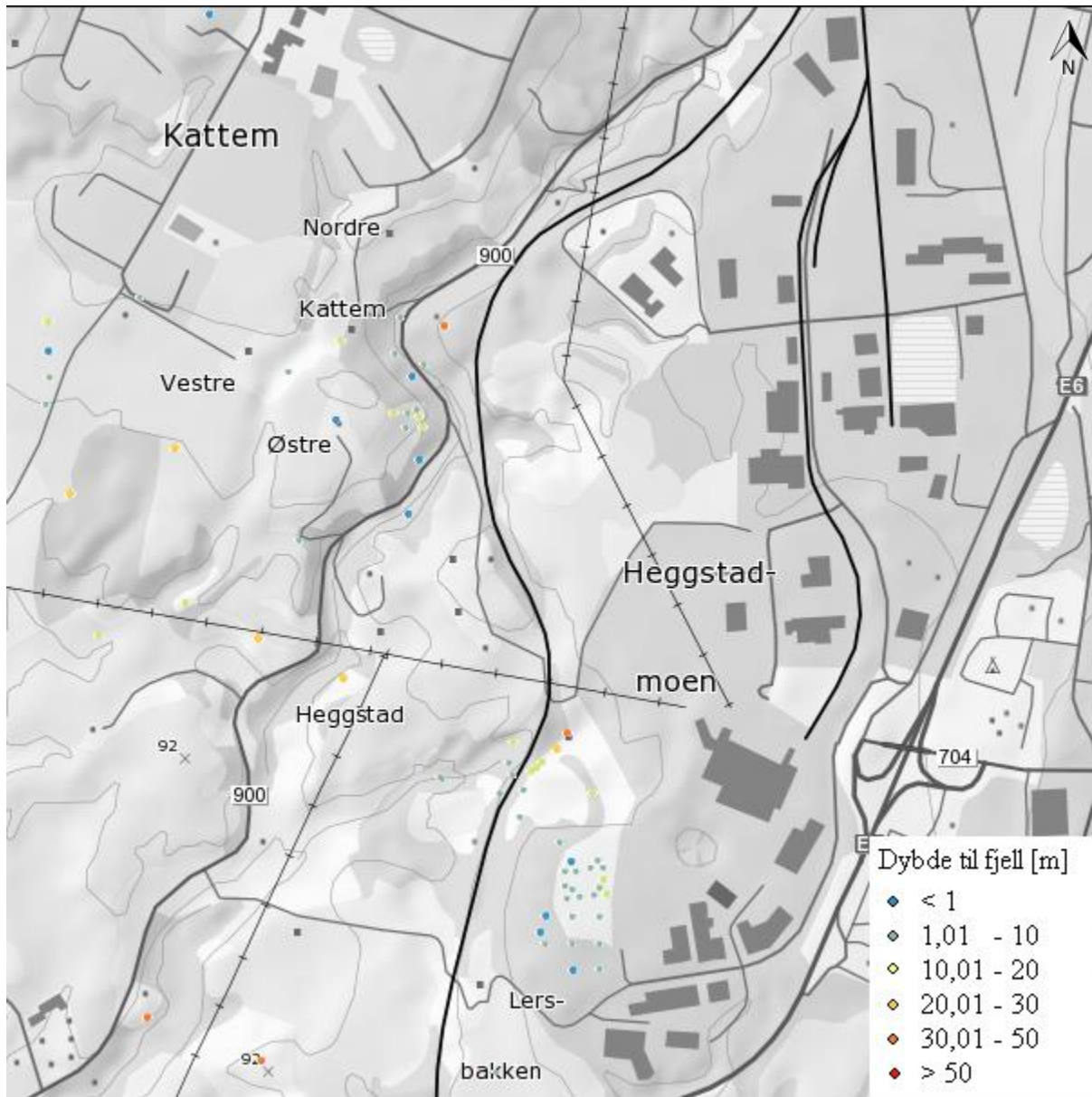
Figur i vedlegg C, 47. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt G5.



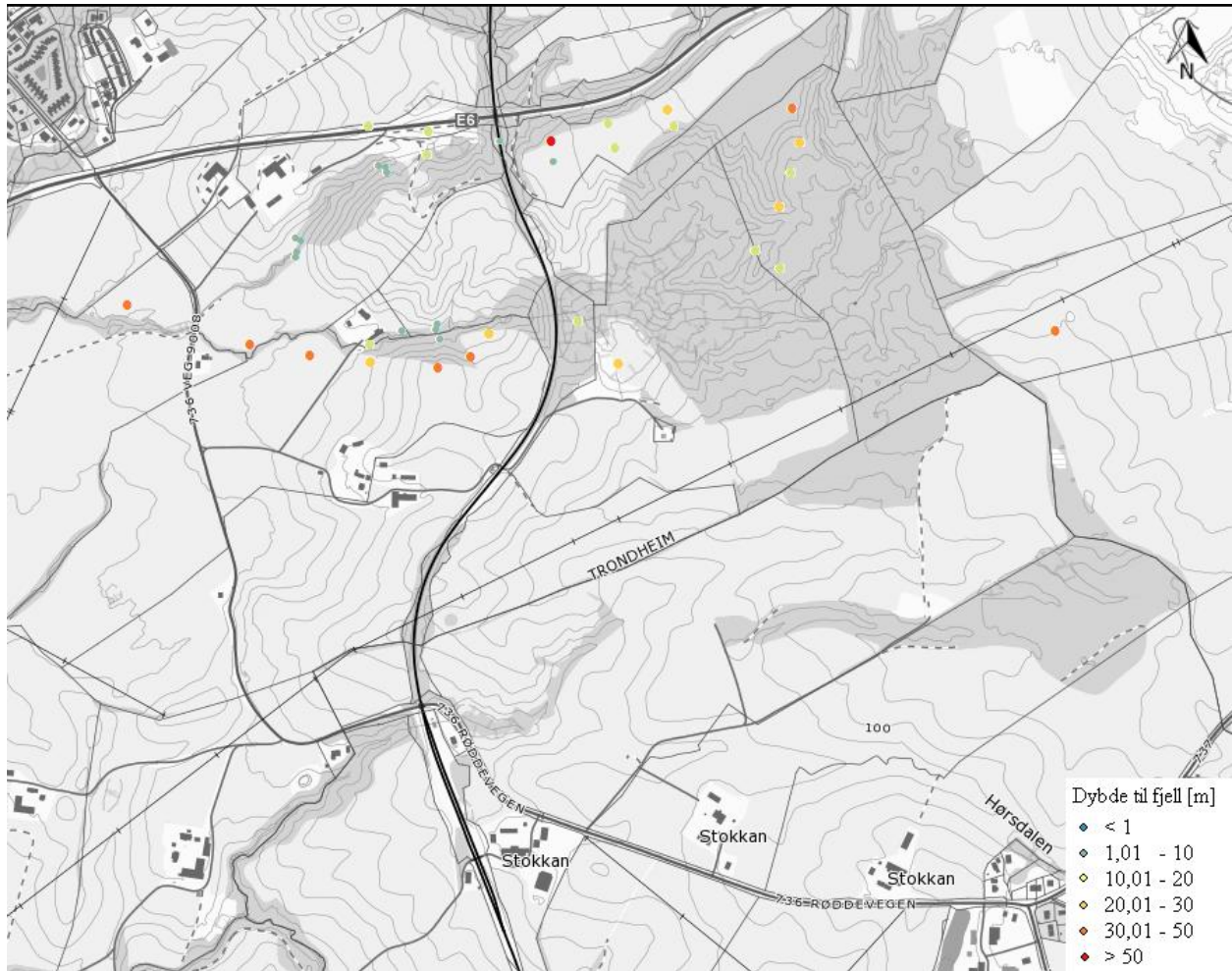
Figur i vedlegg C, 48. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt G6.



Figur i vedlegg C, 49. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt G7.

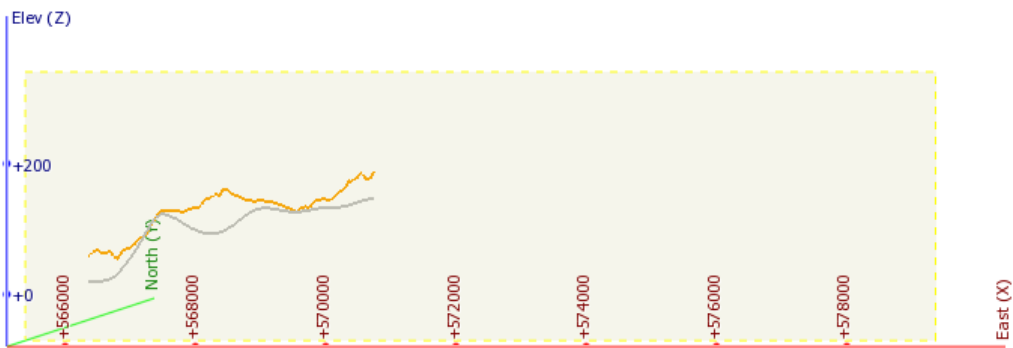


Figur i vedlegg C, 50. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt H1.

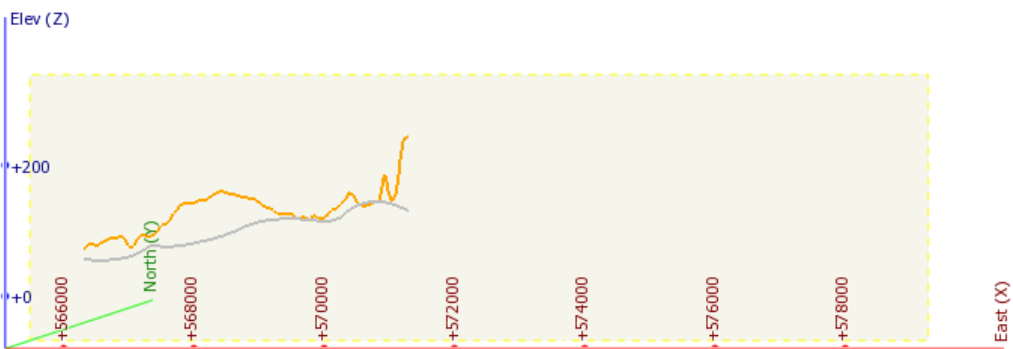


Figur i vedlegg C, 51. Kart for modell 1 angir punkter med dybde til fjell fra < 1 m til > 50 m. Kartutsnitt II.

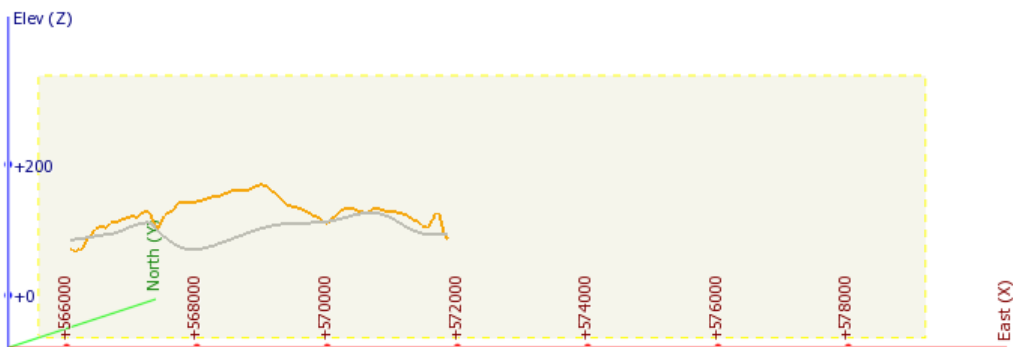
8.5 VEDLEGG D - MODELL 4 - GEOLOGISK SNITT



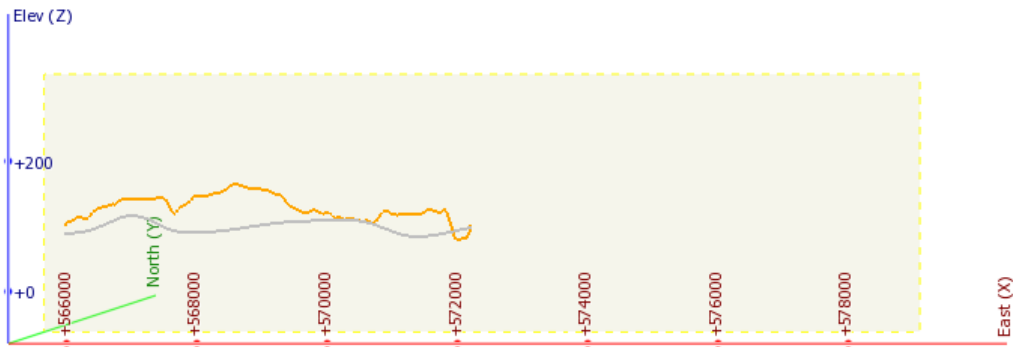
Figur i vedlegg D, 1. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7023000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



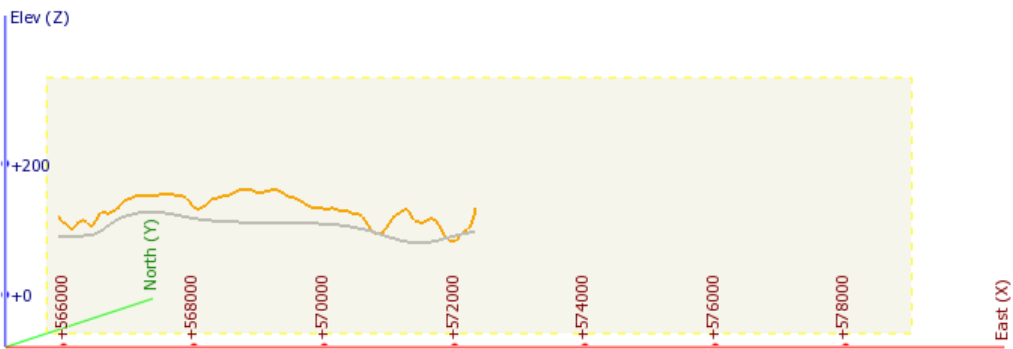
Figur i vedlegg D, 2. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7023500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



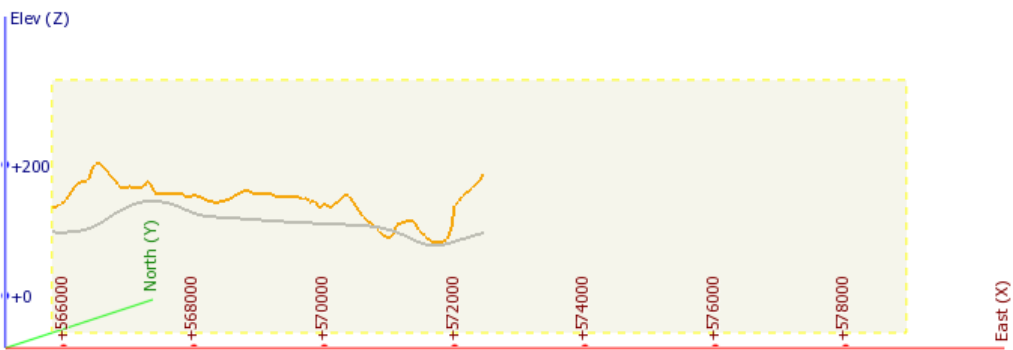
Figur i vedlegg D, 3. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7024000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



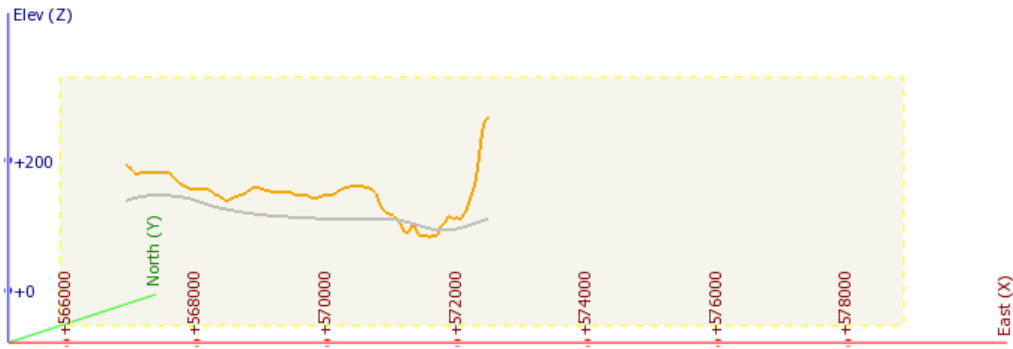
Figur i vedlegg D, 4. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7024500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



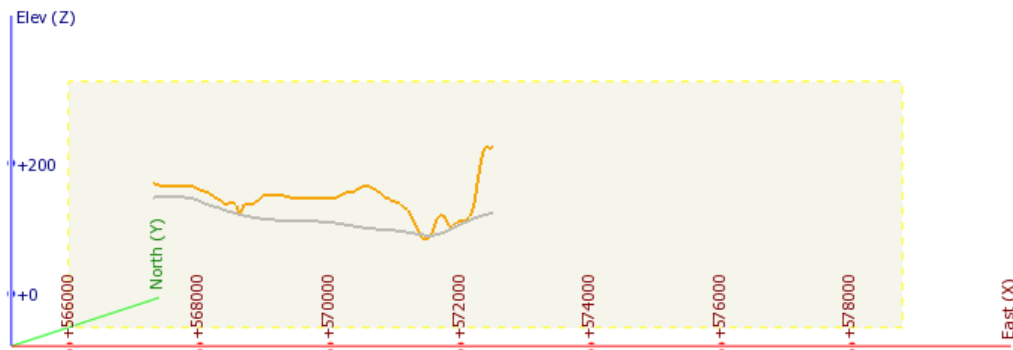
Figur i vedlegg D, 5. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7025000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



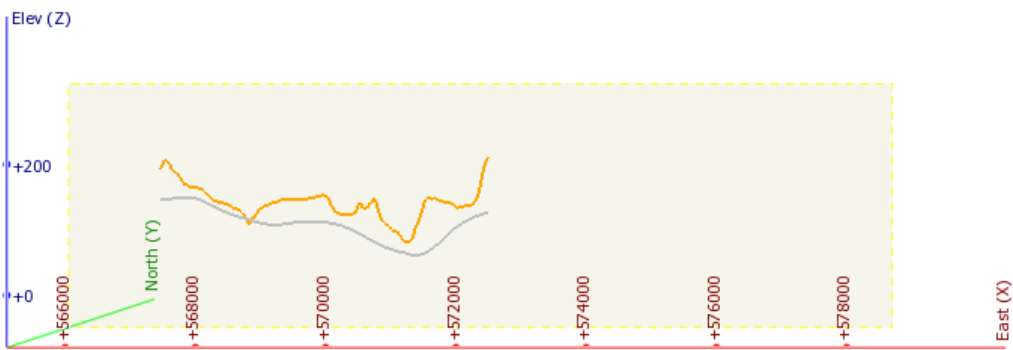
Figur i vedlegg D, 6. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7025500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



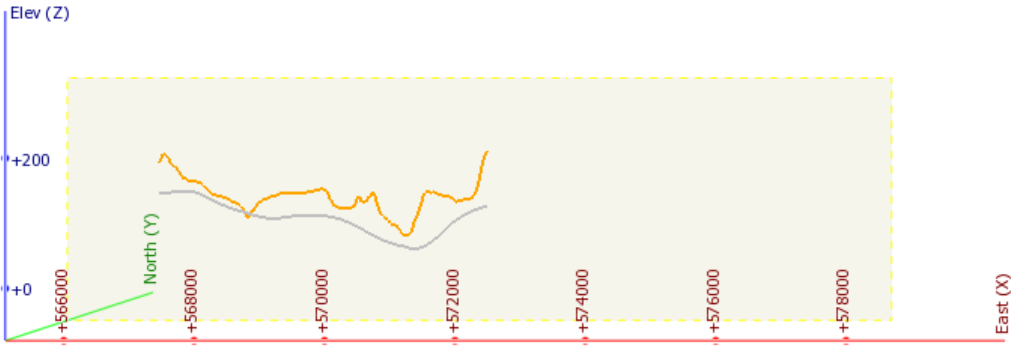
Figur i vedlegg D, 7. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7026000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



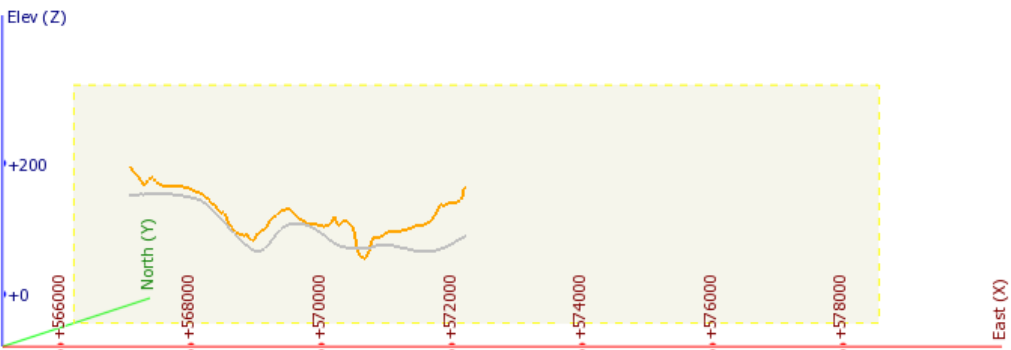
Figur i vedlegg D, 8. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7026500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



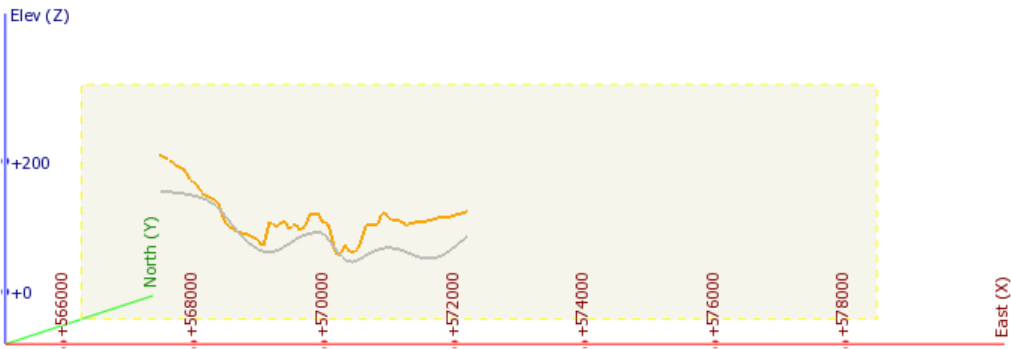
Figur i vedlegg D, 9. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7027000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



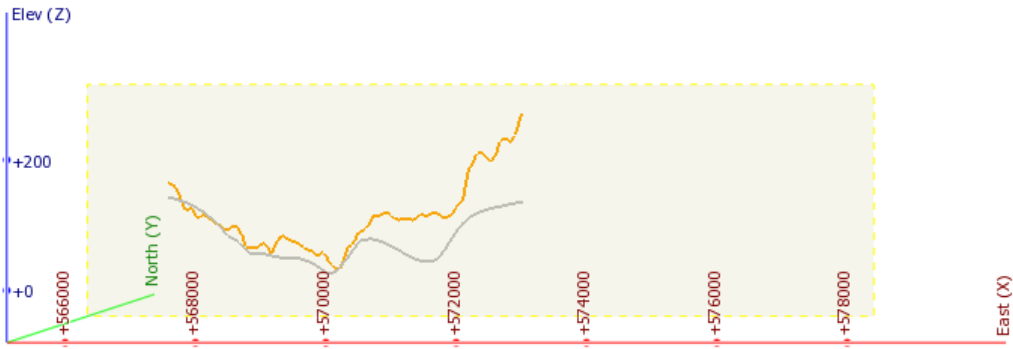
Figur i vedlegg D, 10. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7027500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



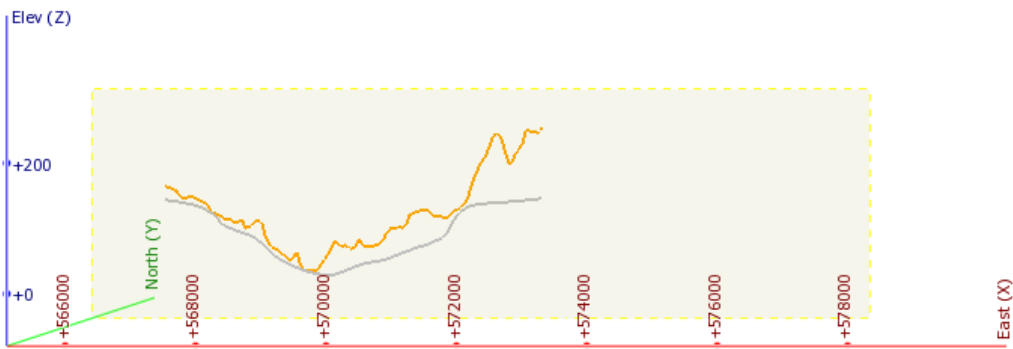
Figur i vedlegg D, 11. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7028000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



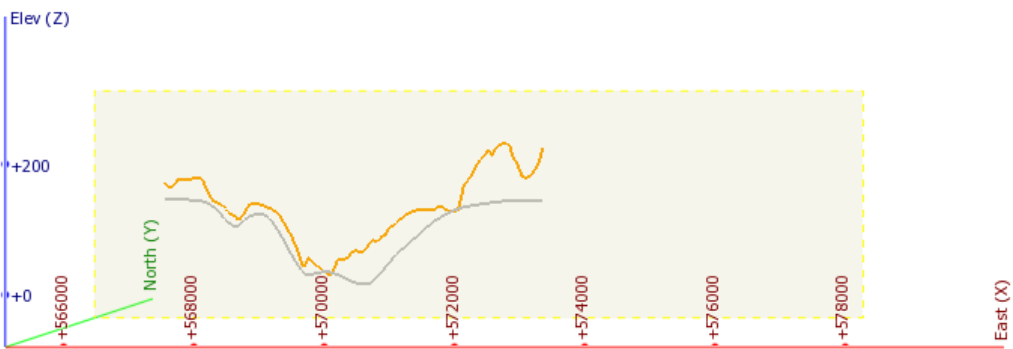
Figur i vedlegg D, 12. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7028500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



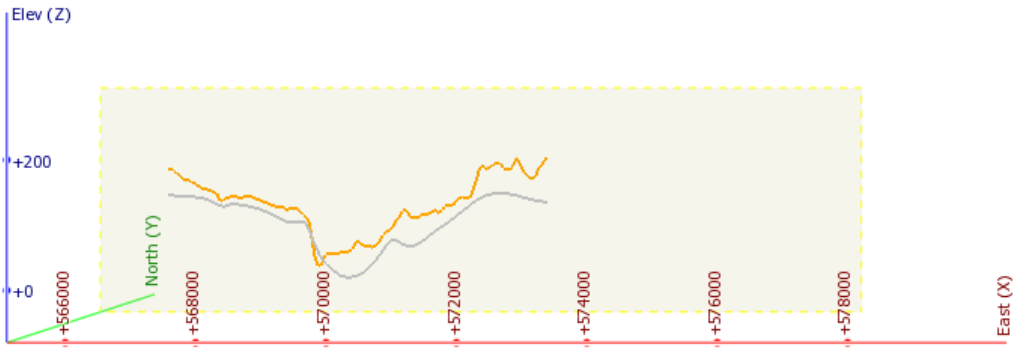
Figur i vedlegg D, 13. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7029000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



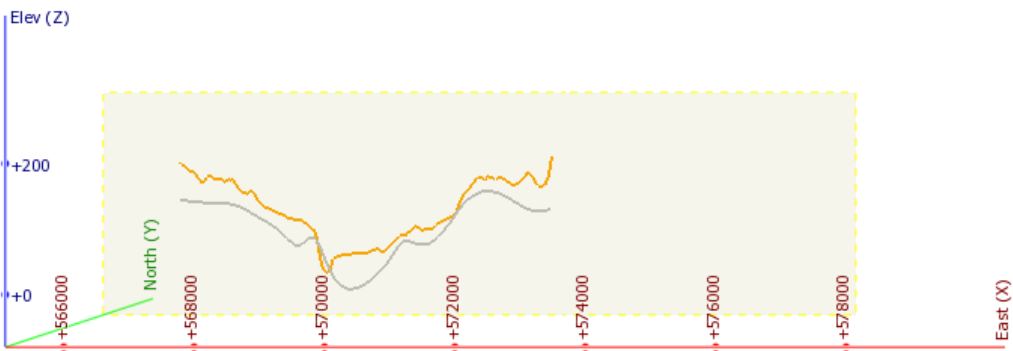
Figur i vedlegg D, 14. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7029500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



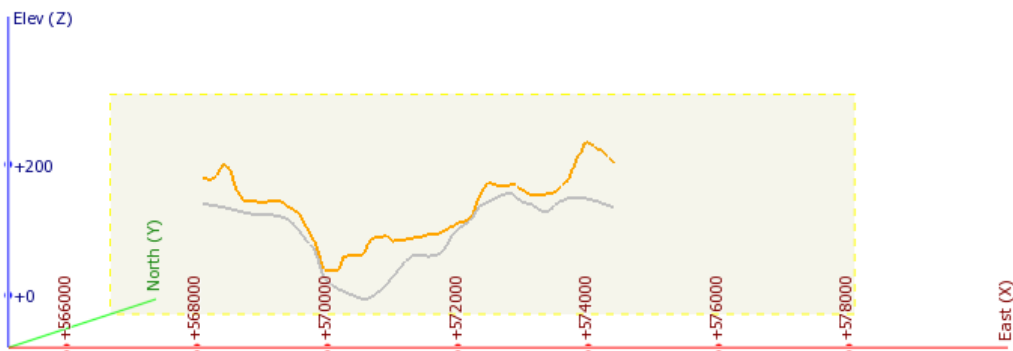
Figur i vedlegg D, 15. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7030000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



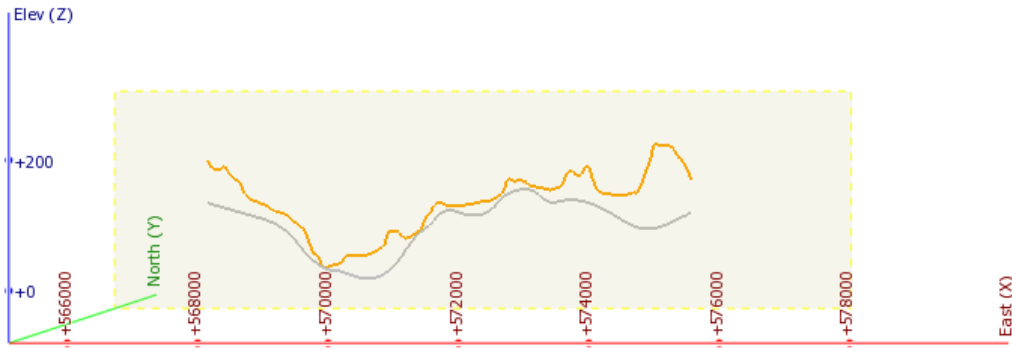
Figur i vedlegg D, 16. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7030500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



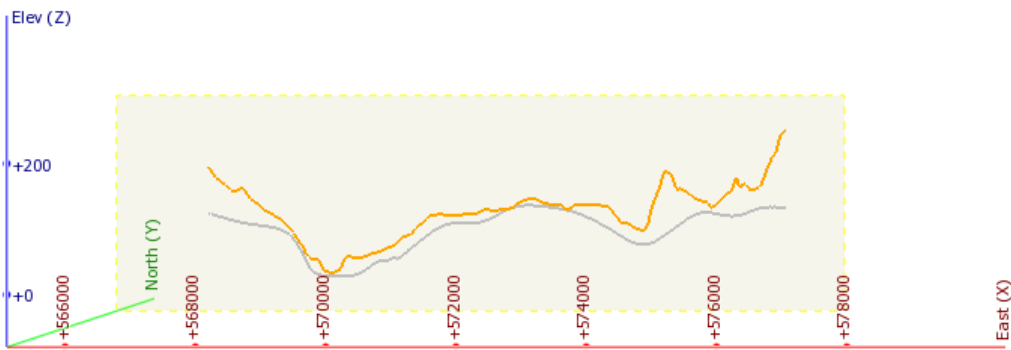
Figur i vedlegg D, 17. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7031000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



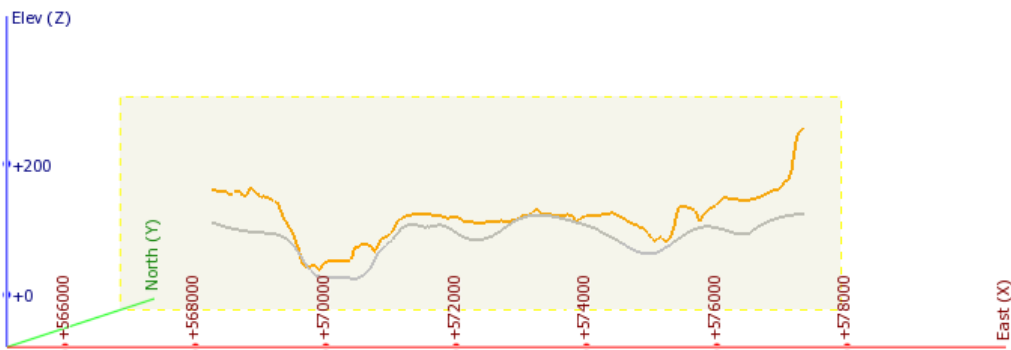
Figur i vedlegg D, 18. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7031500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



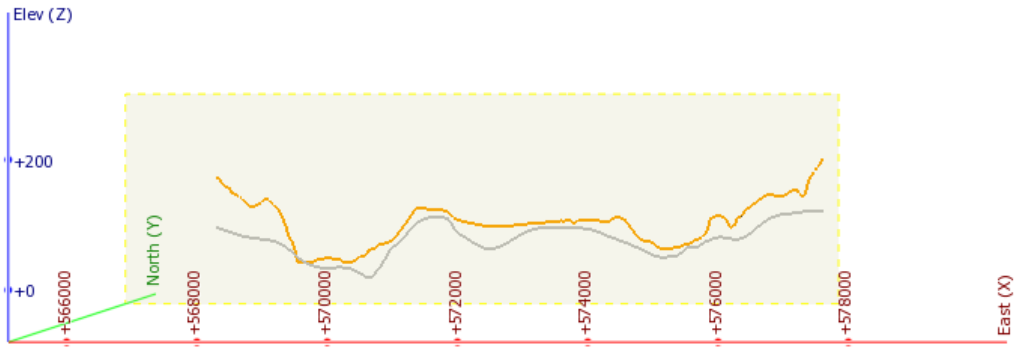
Figur i vedlegg D, 19. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7032000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



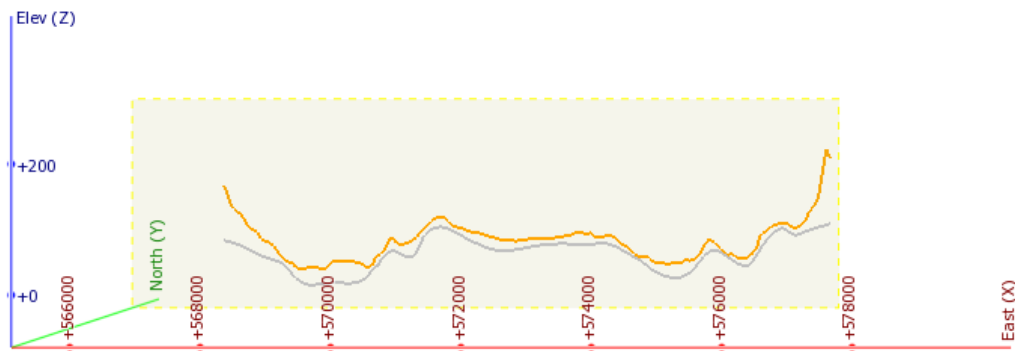
Figur i vedlegg D, 20. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7032500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.



Figur i vedlegg D, 21. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7033000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunnsoverflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.

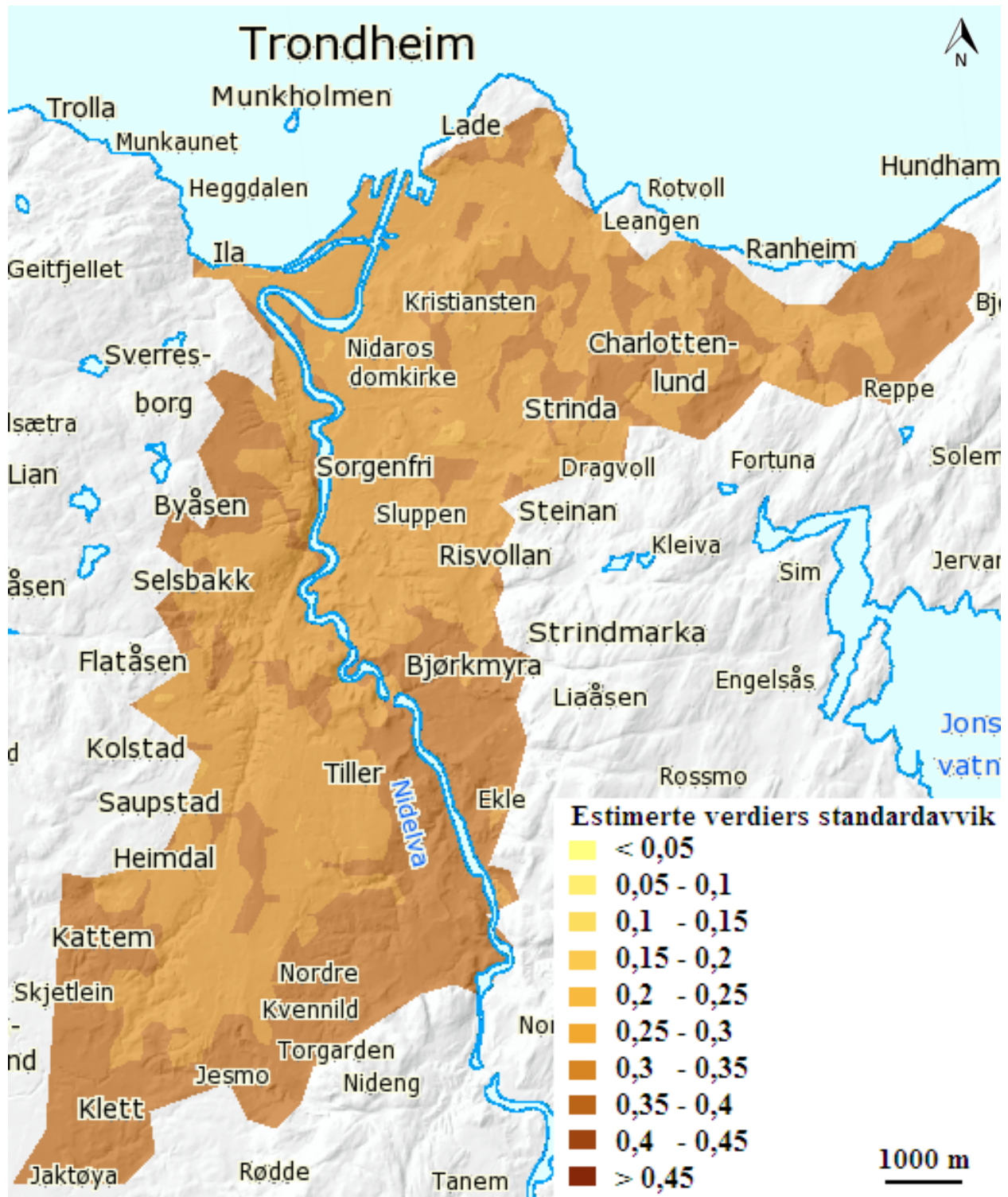


Figur i vedlegg D, 22. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7033500. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunns-overflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.

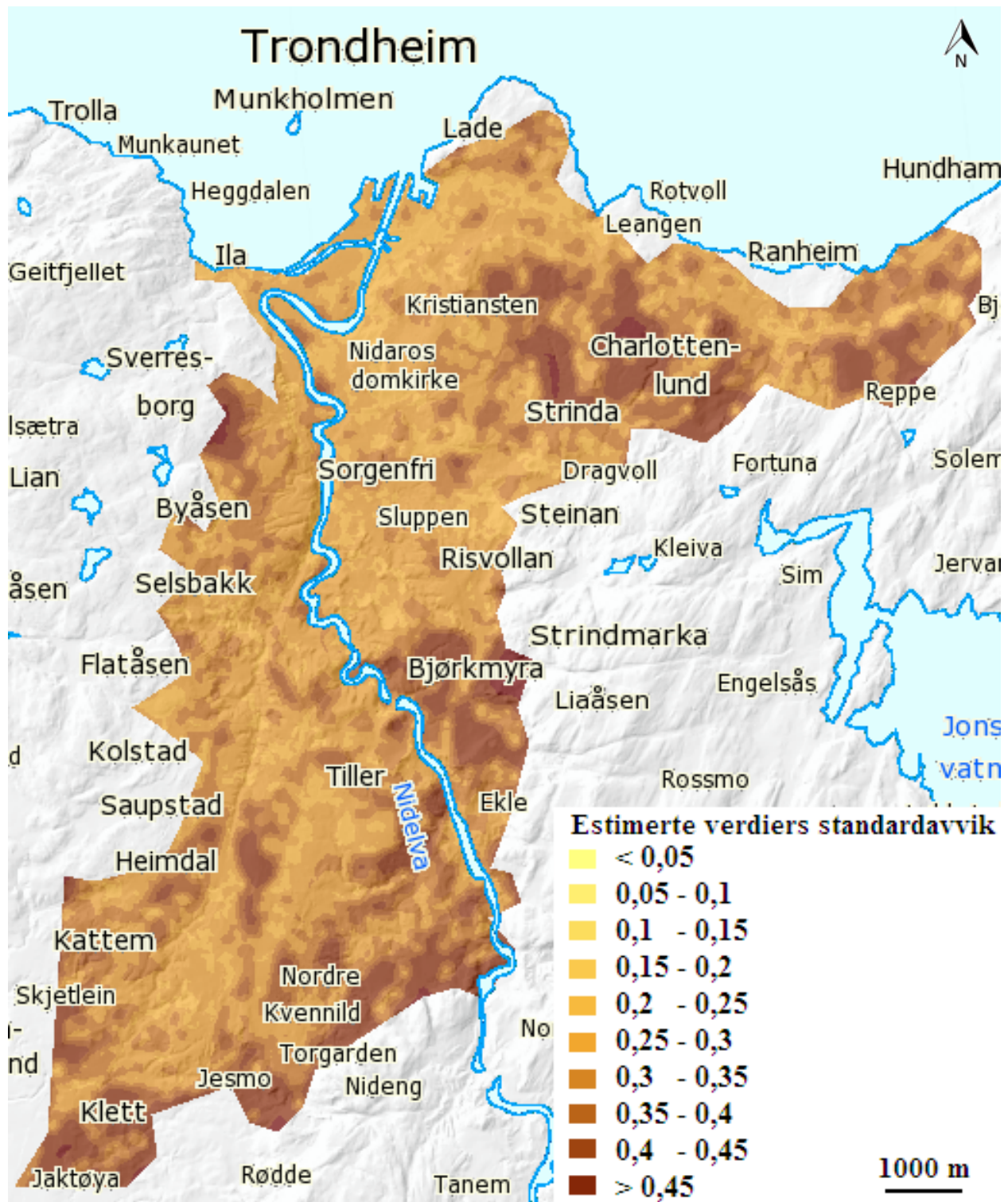


Figur i vedlegg D, 23. Snitt av 3D kart ved y-koordinat = 7034000. z-aksen er gitt som meter over havet. Grå strek representerer berggrunns-overflate, mens oransje strek representerer topografisk overflate.

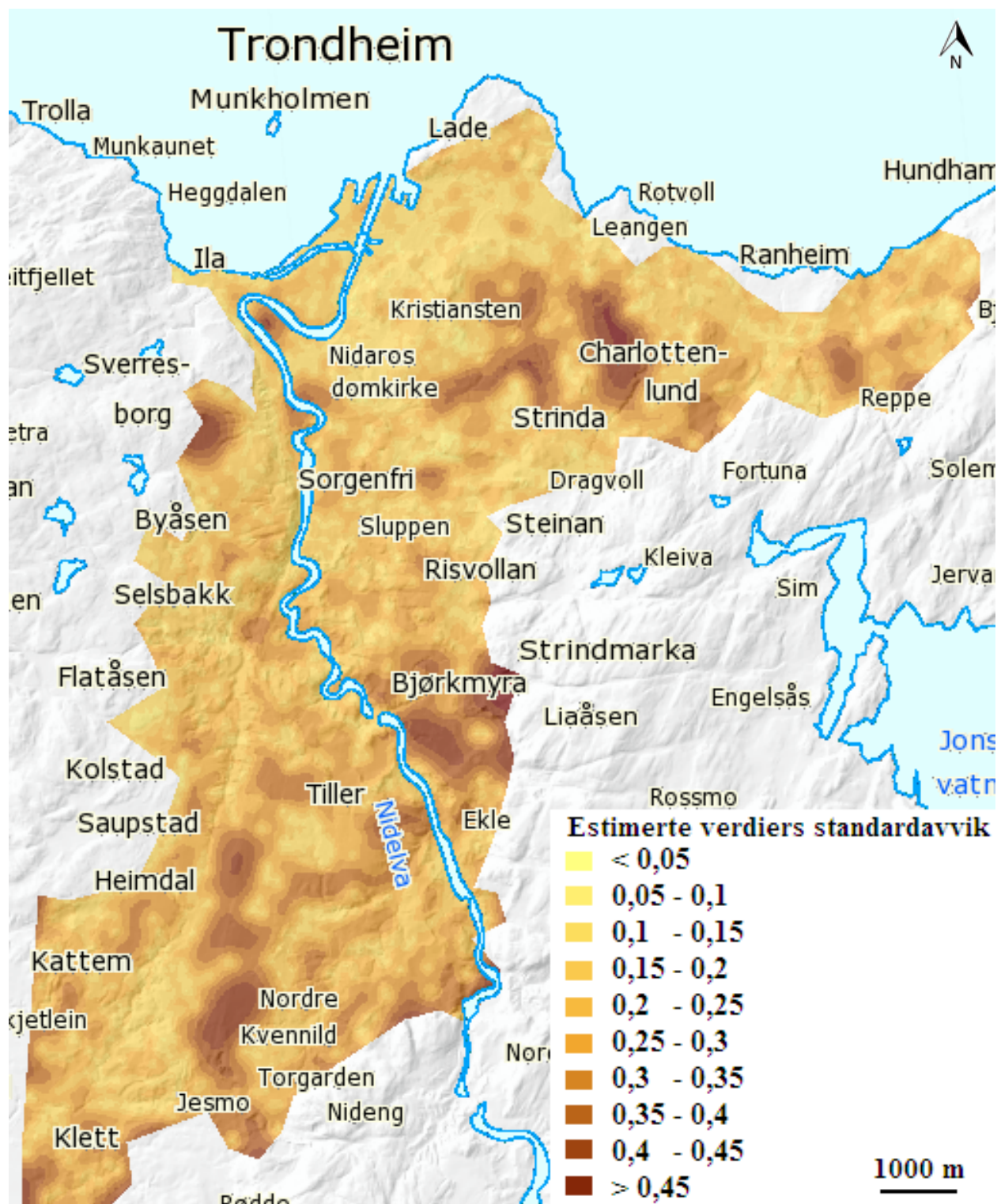
8.6 VEDLEGG E - MODELL 5 - STANDARDAVVIK KART



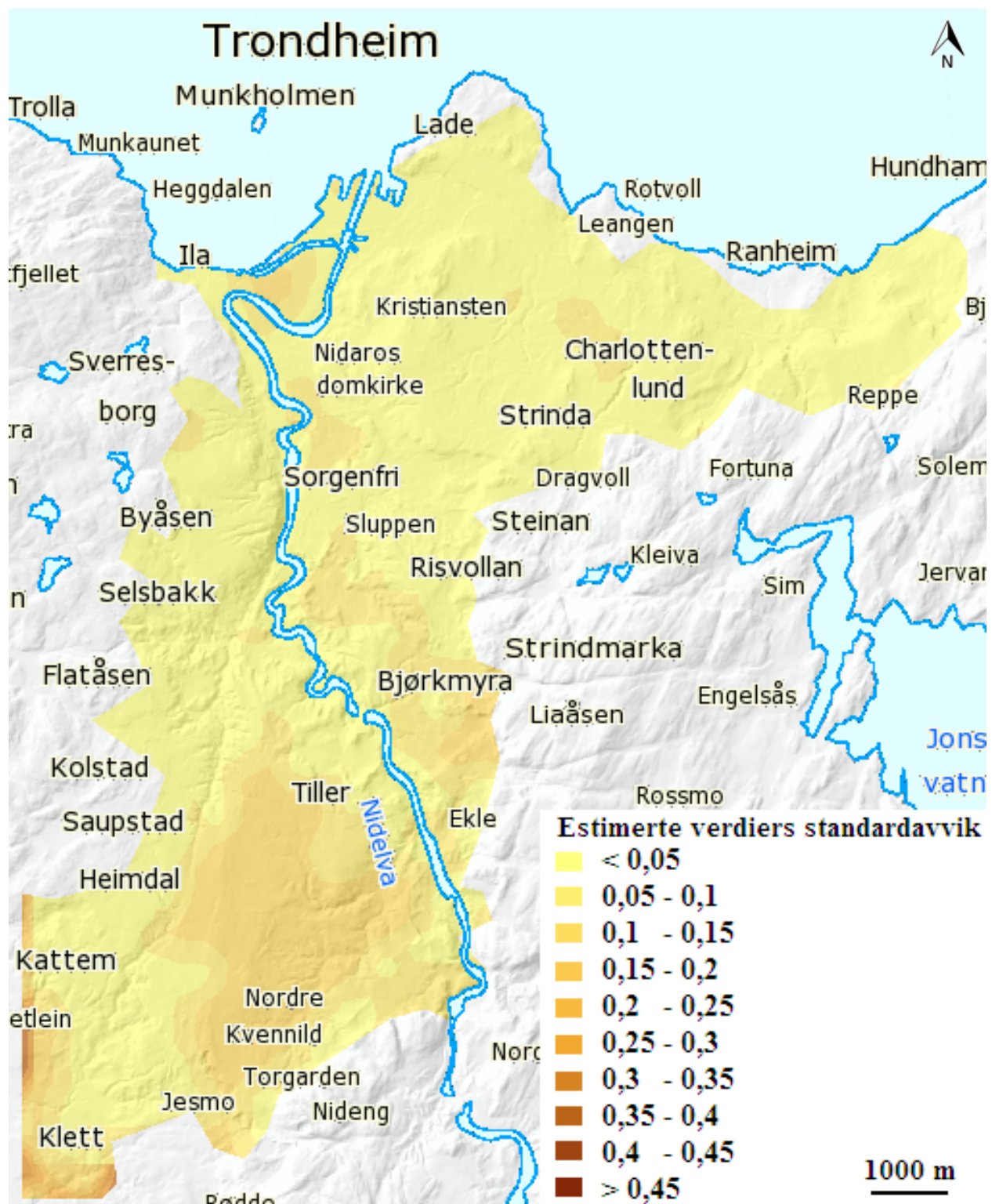
Figur i vedlegg E, 1. Modell 5: Estimerte verdiers standardavvik for kart med sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 1 m.



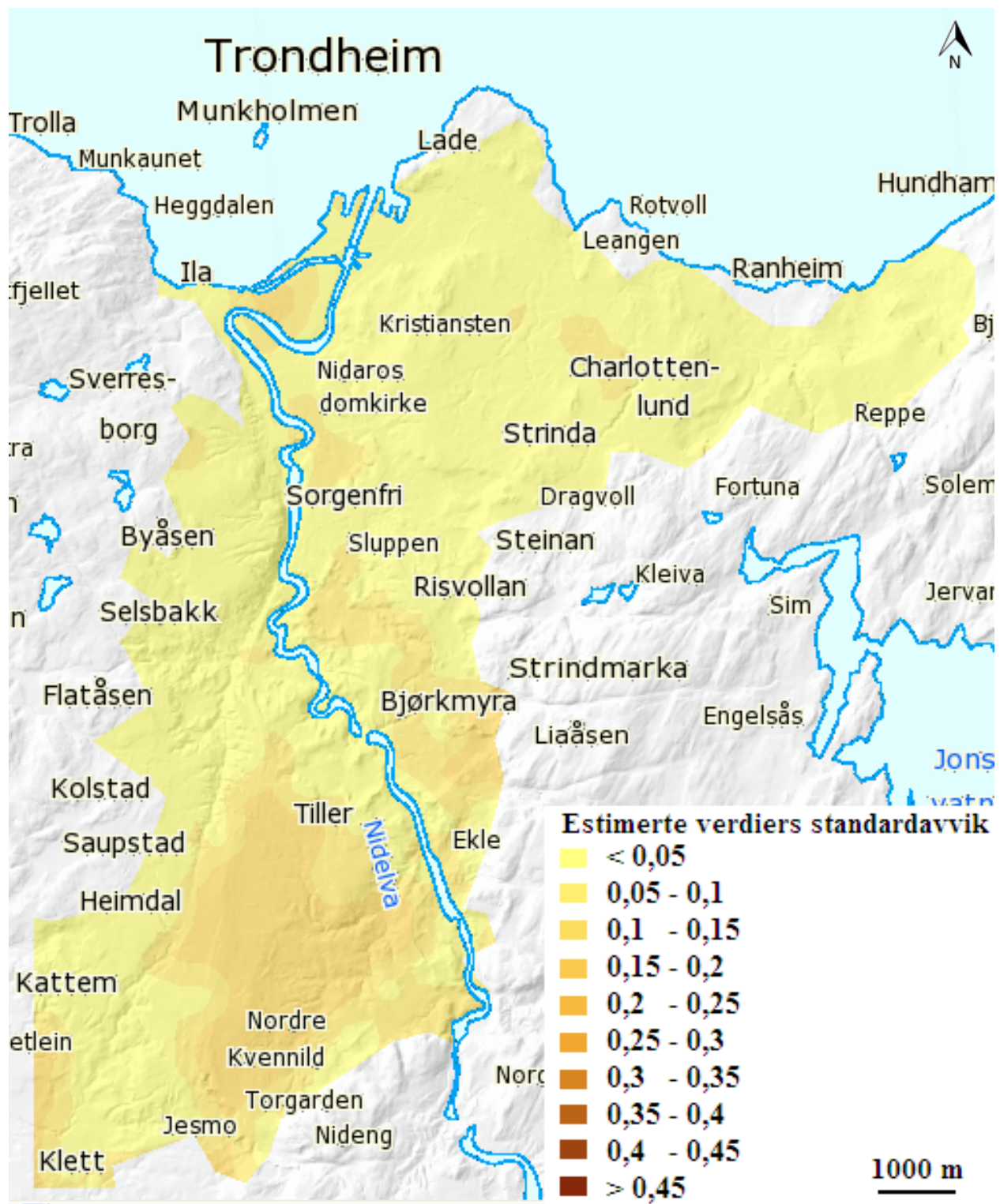
Figur i vedlegg E, 2. Modell 5: Estimerte verdiers standardavvik for kart med sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 10 m.



Figur i vedlegg E, 3. Modell 5: Estimerte verdiers standardavvik for kart med sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 20 m.

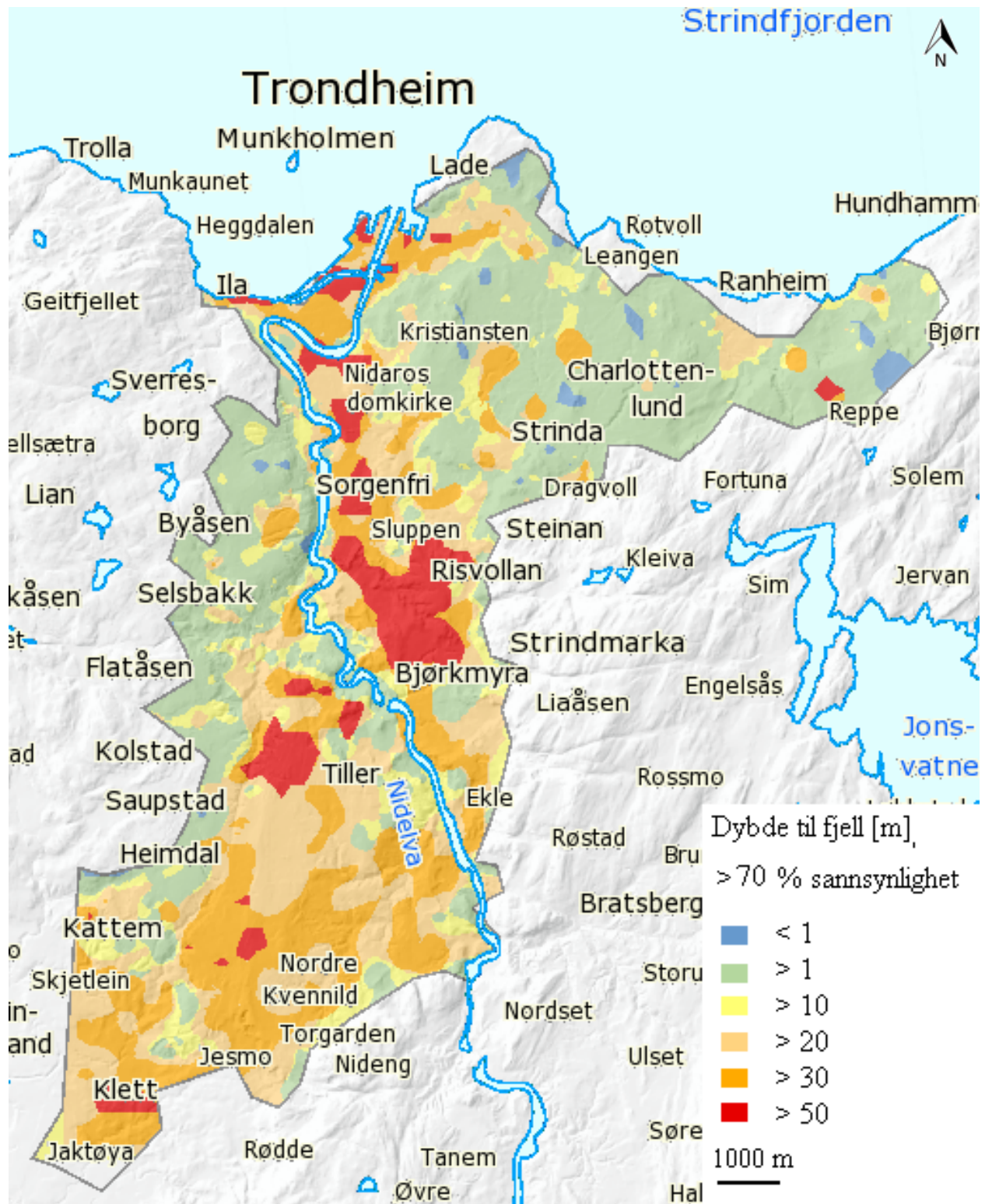


Figur i vedlegg E, 4. Modell 5: Estimerte verdiers standardavvik for kart med sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 30 m.

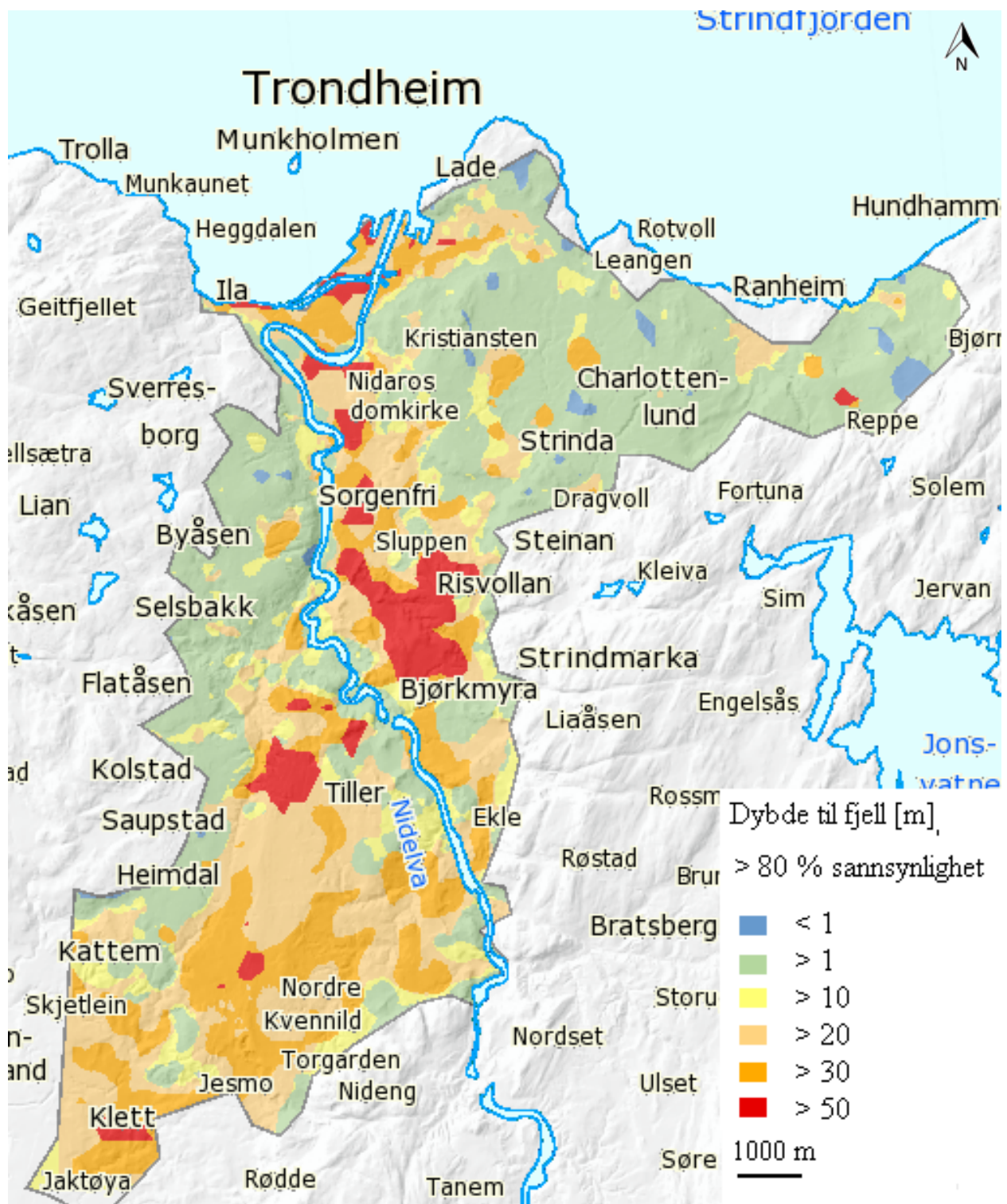


Figur i vedlegg E, 5. Modell 5: Estimerte verdiers standardavvik for kart med sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn 50 m.

8.7 VEDLEGG F - MODELL 5 - SAMMENSETTE KART



Figur i vedlegg F, 1. Sammensatt kart med 70 % sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn de angitte verdiene.



Figur i vedlegg F, 2. S sammensatt kart med 80 % sannsynlighet for at dybde til fjell er mer enn de angitte verdiene.