

ARBETSRAPPORT 1239-2025

Metod för ökad noggrannhet på höjdvärden i NVDB

En möjliggörare för noggranna energiberäkningar och effektiv ruttning

Daniel Noreland, Aron Davidsson & David Bredström



Brant utförslöpa längs enskild skogsbilväg.

Innehåll

Förord	4
Summary	5
Sammanfattning	6
Bakgrund	7
Varför är tillgängliga data inte tillräckliga?	8
Syfte	9
Projektmål	9
Effektmål.....	9
Produktmål	11
Material och metoder	11
RST – Road surface testing.....	11
Laserpunktmoln	12
Markhöjdmodellen	12
Data om över- och underfarter.....	12
Algoritm för identifikation av vägen direkt från laserpunktmolnet.....	12
Draperingsalgoritm som använder Markhöjdmodellen.....	13
Algoritm för detektering av fel i data.....	13
Projektets framskridande.....	13
Arbetsformer	13
Tester och jämförelser	13
Metoder baserade på laserdata	13
Metod baserad på RST.....	14
Dataformat och lagring	15
Förhållande till grunddatabasen i NVDB.....	15
Körspår som företeelse med egen geometri	15
Upplösning, noggrannhet och prestanda	18
Hål i data vid broar och tunnlar	21
Metadata	22
Process för produktion och ajourhållning	22
Nyproduktion	22
Ajourhållning.....	23
Statliga vägar	23
Datakälla	23

Process för dataproduktion	23
Ajourhållning	23
Kommunala vägar	23
Datakälla	23
Process för dataproduktion	23
Ajourhållning	23
Enskilda vägar	24
Datakälla	24
Process för dataproduktion	24
Ajourhållning	24
Diskussion	24
Slutsatser	25
Referenser	25
Bilaga 1	27



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts februari månad 2025 av
Thomas Norlin, teknisk specialist vid Trafikverket. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef,
granskat och godkänt publikationen för publicering 24 mars 2025.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2025 ISSN 1404-305X
Publikationsnummer: 2025:091
ISBN-nummer: 978-91-8045-457-5

Förord

Den här rapporten är resultatet av ett nära samarbete med Trafikverket och den finansiering Skogforsk fick för projektet *Förbättrade höjdvärden i NVDB*. Vi vill rikta ett varmt tack för det engagemang och stöd som framför allt Tomas Löfgren och Thomas Norlin visat inför och under projektet. Skogforsk vill även tacka Lars-Erik Jönsson på Biometria, som bidragit med värdefulla synpunkter under arbetets gång.

Uppsala i januari 2025

Daniel Noreland

Summary

The National Road Database (NVDB) contains a description of the road network in the form of both planar and elevation coordinates. Data is collected from several different actors and is of mixed quality.

The forestry sector sees a need for better and more consistent altitude information. Energy calculations, environmental accounting and routing for heavy transport are examples of applications where the road's gradient value plays a major role in the result. It is also recognised that other transport industries would benefit from this.

This project has examined utilising the Swedish Transport Administration's regular RST (Road Surface Testing) data and Lantmäteriet's Ground Elevation Model to obtain more accurate and homogeneous elevation information. Methods and processes are proposed for producing and updating elevation values, which can provide an accuracy of less than 10 cm for most of the country's roads. The report also presents proposals for metadata and data provision in a way that does not create conflicts with current data in the NVDB.

In principle, it would be possible to update altitude coordinates in the basic NVDB database with the new values generated by the methods proposed in the report. This would also require the updating of planimetric coordinates so that the height values can be related to coordinates of equivalent accuracy. However, problems would arise due to the loss of continuity between reference and sub-links if all roads in the country are not processed at the same time and due to the small differences in results that the proposed methods may produce. Therefore, it is proposed to handle the new coordinate values in a separate environment.

For data management reasons, it is not possible to describe the road surface with high resolution in both longitudinal and transverse directions. Instead, it is proposed that the road is described with coordinate tracks, which describe one of many possible driving tracks. This may lead to some errors in elevation values, for example when changing lanes, but as long as a vehicle sticks to one lane, the gradient values that can be calculated from the elevation values should be correct. After all, the difference between two neighbouring lanes is probably a reasonably constant difference in level. The situation is different on separated roads. These can be separate carriageways with virtually independent elevation profiles. Therefore, separated roads should be represented by one coordinate track per direction of travel.

Both production and updating are proposed to be carried out by the Swedish Transport Administration, which currently has software that works for this purpose. Although these tools are not optimised for the task in terms of performance, they are robust and proven.

Data production from the available data sources is estimated to take around two weeks, of which machine time is the main part.

Given the frequency of updates for the various data sources, an annual updating effort is deemed appropriate. The option of working with continuous change updates is considered to be too labour-intensive in relation to the benefits, unless it can be fully automated.

Sammanfattning

Nationell vägdatabas (NVDB) innehåller en beskrivning av bilvägnätet i form av både plan- och höjdkoordinater. Data samlas in från flera olika aktörer och har blandad kvalitet.

Inom skogsnäringen ser man ett behov av bättre och homogenare noggrannhet på höjdinformationen. Energikalkylering, miljöredovisning och ruttplanering för tunga transporter är exempel på beräkningar där vägens lutningsvärde spelar stor roll för resultatet. Man ser även att övriga transportnäringar skulle ha nytta av detta.

Det här projektet har undersökt möjligheten att nyttja Trafikverkets regelbundna RST-data (Road Surface Testing) och Lantmäteriets Markhöjdmodell för att erhålla en bättre och homogenare noggrannhet på höjdinformationen. Det föreslås metoder och processer för att ta fram och ajourhålla höjdvärden, som kan ge en noggrannhet på under 10 cm för de flesta av rikets vägar. Rapporten presenterar även förslag på metadata och tillhandahållande av data på ett sätt som inte skapar konflikter med nuvarande data i NVDB.

I princip skulle det vara möjligt att uppdatera höjdkoordinater i NVDB:s grunddatabas med de nya värden som genereras av de metoder som föreslås i rapporten. I samband med det skulle även plankoordinater behöva uppdateras så att höjdvärdena kan hänföras till koordinater med motsvarande noggrannhet. Problem skulle dock uppstå genom att kontinuiteten mellan referens- och dellänkar kan gå förlorad om inte landets alla vägar hanteras samtidigt, och på grund av de små skillnader i resultat som de föreslagna metoderna kan ge. Därför föreslås att de nya höjdvärdena hanteras i en separat miljö.

Av datahanteringsskäl går det inte att beskriva vägytan med hög upplösning i både längs- och tvärled. Därför föreslås att vägen, likt dagens system, beskrivs med koordinatspår som kan tänkas beskriva ett av många möjliga körspår. Detta kan leda till att vissa fel i höjdvärde uppstår exempelvis vid körfältsbyten, men så länge ett fordon håller sig till ett körfält bör de lutningsvärden som kan beräknas ur höjdvärdena vara korrekta. Skillnaden mellan två näraliggande körfält består ju rimligen av en någorlunda konstant nivåskillnad. Annorlunda förhåller det sig på möttesseparerade vägar. Här kan det röra sig om separata körbanor med i princip oberoende höjdprofiler. Därför bör möttesseparerade vägar representeras med ett koordinatspår per körriktning.

Både produktion och ajourhållning föreslås ske på Trafikverket, som idag har för ändamålet fungerande programvara. Även om dessa verktyg inte är optimerade för uppgiften prestandamässigt, är de robusta och beprövade.

Dataproduktionen utifrån tillgängliga datakällor uppskattas ta omkring två veckor, varav maskintid utgör huvuddelen.

Mot bakgrund av uppdateringsfrekvensen för de olika datakällorna bedöms ett årligt omdrev vara lämpligt som ajourhållningsinsats. Alternativet att arbeta med kontinuerliga förändringsuppdateringar bedöms vara för arbetskrävande i förhållande till nyttan, såvida processen inte kan automatiseras helt.

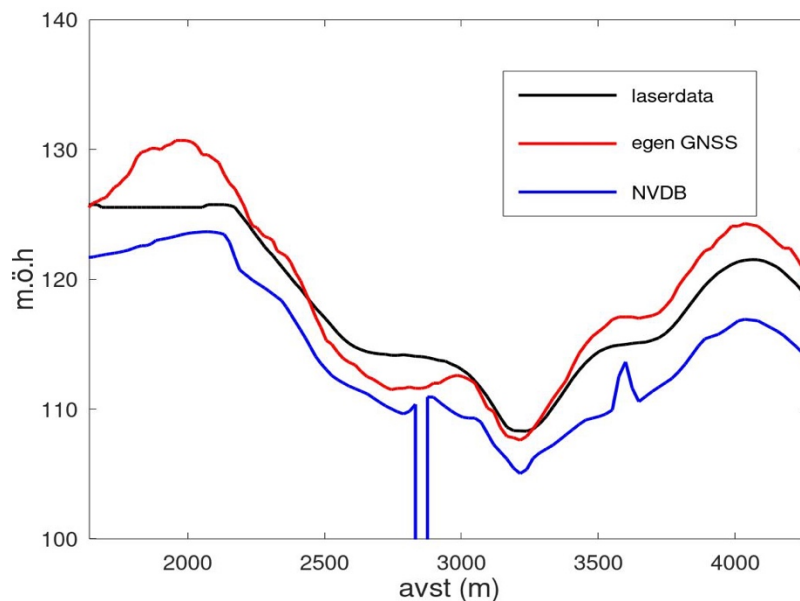
Bakgrund

Den nationella vägdaten (NVDB) fyller en viktig funktion för flera aktörer. Ett exempel på användare av vägdata är vägvalstjänster. Från början syftade dessa till att hitta den avståndsmässigt kortaste vägen mellan två punkter, men tidigt stod det klart att det är minst lika intressant att hitta den snabbaste eller energisnålaste vägen. För att bestämma tids- eller energiåtgång för en rutt krävs en matematisk modell för hur de beror av vägens olika företeelser. I sin enklaste form kan man anta att tiden det tar att tillryggalägga en väglänk är omvänt proportionell mot skyltad hastighet, och att energianvändningen följer något enkelt samband med länkens längd och hastigheten. En mera realistisk modell kräver dock att man tar hänsyn till höjdarbete, förväntade accelerationer och inbromsningar. Dessa faktorer påverkas av flera av vägens egenskaper, och i hög grad dess topografi.

Den begynnande elektrifieringen av tunga vägtransporter ställer nya krav på noggrannheten i prediktioner av energiåtgången för att köra en rutt. Den energi som kan lagras i ett fordonsbatteri är begränsande för möjligheten att utföra många transporter. Det är därför viktigt att kunna planera rutterna utifrån god kännedom om energianvändningen.

I flera projekt som Skogforsk drivit har det visat sig att noggrannheten i de höjdvärden som finns att tillgå från NVDB har varit en begränsande faktor. Problemen observerades först vid framtagning av modeller för bestämning av luftmotstånd (von Hofsten & Noreland 2021), bränsleförbrukning och energikalkyler (Noreland 2024b) samt rullmotstånd hos tunga fordon med syfte att avgöra konditionen på grusvägar (Noreland 2024a). Ett exempel på dagens datakvalitet i NVDB visas i Figur 1. Snart stod det även klart hur viktigt bra höjdvärden är för funktionen hos skogsbrukets vägvalstjänst Krönt Vägval (Biometria 2025), samt en härur avledd ny ersättningsmodell för timmertransporter, som Skogforsk tagit fram. Skogforsk har i en förstudie undersökt om data från den nationella laserskanningen kan användas för att ta fram vägars höjdvärde. De preliminära resultaten var lovande och har redan använts i ett forskningsprojekt på ett kort vägsnitt, men metoden är inte lämpad för storskalig höjdvärdesbestämning.

Trafikverket genomförde 2013 en förstudie med syfte att undersöka möjligheter till förbättring av höjdvärden på väg- och järnvägsnäten med utgångspunkt från Lantmäteriets nya nationella höjdmodell (NNH). Det främsta argumentet för att ta fram förbättrade höjdvärden var, liksom nu, behovet av att kunna göra noggranna energiberäkningar av tunga transporter. Förstudien visade att den tekniska miljö som Trafikverket hade då initialt skulle ha utgjort en produktionsteknisk flaskhals och inneburit stora kostnader för att få in data. En föreslagen rutin där respektive dataleverantör skulle sköta ajourhållningen bedömdes dessutom inte vara realistisk. Sedan förstudien gjordes har behovet av noggrannare höjdvärden ökat samtidigt som de tekniska möjligheterna förbättrats.



Figur 1. Höjdvärden från tre olika källor längs en sektion av riksväg 134 i Östergötlands län.

Varför är tillgängliga data inte tillräckliga?

För de tillämpningar som nämnts i inledningen är det inte framför allt själva höjdvärdena som är intressanta, utan vägens lutningsvärde. Det senare beräknas dock från höjdvärdets variation längs vägen. Dagens noggrannhetskrav för höjdvärdet som det anges i NVDB är 4 m, och utan att veta mer om hur felet i en punkt förhåller sig till felet i en näraliggande punkt går det inte att säga vilken noggrannhet detta medför beträffande lutningen. På delar av vägnätet, företrädesvis de större allmänna vägarna, är höjdvärdena avsevärt bättre än minimikravet och även lutningsvärdet är bra. I anslutningen mellan vägar, och längs vägar med mindre noggranna höjdvärden kan dock stora fel i lutningen uppkomma. Ett annat problem idag är att det inte finns något direkt kvalitetsmått på höjdvärdet, även om det i någon mån går att gissa sig till kvaliteten i stort utifrån uppgifter om höjdvärdets källa.

En känsla för vilka noggrannhetskrav som ställs får man om man betraktar de krafter som verkar på ett tungt transportfordon. Den enskilt största energiförlusten hos ett fordon under färd står rullmotståndet för. Ett modernt lastbilsdäck har en rullmotståndskoefficient på runt 0,005. Den bromsande kraft ett fordon med sådana däck utsätts för på grund av rullmotståndet motsvarar storleksmässigt ett motlut på 50 cm per 100 m. En noggrann bestämning av rullmotståndet är intressant för att upptäcka fordonsbrister med konsekvenser för bränsleförbrukningen eller för att detektera ytuppmjukning på grusvägar, vilket är ett tecken på begynnande vägnedbrytning. Mätning av rullmotståndet förutsätter att man kan skilja bromsande krafter från mot- och medlut, vilket alltså kräver betydligt bättre uppgifter om vägens lutning än vad som är tillgängligt idag.

Tunga fordon mäter idag vägens lutning i realtid med hjälp av accelerometrar. En sammanfattning av svårigheten med detta och varför bra data är intressant beskrivs i Noreland (2024a). Skogforsks erfarenhet är att den typen av fordonsmätta data inte håller tillräcklig kvalitet för de tillämpningar vi nämner, och hur som helst inte bidrar med kartinformation off-line, som exempelvis krävs för energieffektiv rutt- och laddningsplanering för elfordon.

Utöver de nämnda tillämpningarna är skärpta EU-krav på lutningsinformation i de nationella vägdataserna att vänta som följd av det reviderade ITS-direktivet (EU 2023). Projektet förekommer dessa krav och kan förhoppningsvis inspirera unionens andra länder till efterföljd.

Syfte

Projektets primära syfte var att ta fram ett förslag på arbetsgång för storskalig bestämning av höjdvärdet på Sveriges vägnät, allmänna såväl som enskilda vägar. Höjdvärdesbestämningen skulle generera ett heltäckande dataset med hög och enhetlig kvalitet. I arbetet ingick mått på noggrannhet och nödvändig datorkapacitet. Utöver själva dataproduktionen skulle projektet, i samarbete med Trafikverket, föreslå ett sätt att tillhandahålla den nya informationen som inte interfererar med nuvarande data i NVDB. Processen för dataproduktion skulle omfatta såväl initialproduktion som ajourhållning.

Projektmål

Projektmålen delades upp i de två kategorierna *effektmål* och *produktmål*. Den förra avser de nyttor som olika aktörer kan komma att få om projektets resultat implementeras. Den senare avser de konkreta resultat som själva projektet genererar och som är förutsättningar för att nå effektmålen.

Effektmål

Projektets effektmål omfattar ett antal samhällsnyttor utgående från tillämpningar som är beroende av noggranna höjd- eller lutningsvärden. Eftersom behoven observerades i samband med forskning om skogliga tillämpningar förekommer en viss slagsida mot dessa tillämpningar. Vi har dock försökt tänka bredare och se till andra näringars behov av detaljerad och noggrann beskrivning av infrastrukturen. De viktigaste av de nyttor vi observerat är:

- **Krönt vägval:** Skogsbruket använder en vägvalstjänst (Biometria 2025), administrerad av Biometria, för att komma överens om betalningsgrundande avstånd för transporter. Indata till tjänsten är bland annat lutningsinformation. Det förekommer idag att tjänsten genererar vad som uppfattas som dåliga förslag på vägval beroende på brister i indata, vilket manifesteras genom ett relativt stort antal årliga avvikelserapporter som inkommer till Biometria. Med hänsyn till lutningsdata kan vägvalen vara ofördelaktiga genom att de är kostsamma att köra, eller att de i kraft av sin lutning helt enkelt inte är framkomliga vid halt väglag.
- **Ruttoptimering:** Många aktörer inom transport och logistik använder egna vägvalstjänster för att bestämma exempelvis energieffektiva rutter. Eftersom backar är en viktig faktor för energianvändning är heltäckande och noggrann lutningsinformation nödvändig.

- **Intelligenta farthållare:** Tunga fordon utrustas idag ofta med system för intelligent farthållning. Vad som tidigare framför allt var ett förarstöd för att bekvämt kunna hålla jämn och laglig hastighet har idag utvecklats till en viktig funktion för ekonomisk körning. Genom att anpassa hastighet och växelval efter topografin kan drivlinan fås att arbeta där den är som mest effektiv, vilket leder till minskad bränsleförbrukning och lägre utsläpp. För elektriska fordon med begränsad räckvidd är det på motsvarande sätt nödvändigt att så effektivt som möjligt anpassa motorbromsning i backar efter fordonets möjlighet att återvinna energi.
- **SNVDB:** Biometria, som bland annat fungerar som informationshubb för skogsbruket, administrerar Skogsbrukets nationella vägdatabas, som är en kopia av NVDB utökad med detaljerad information om de enskilda vägnas framkomlighet och tillgänglighet vid varierande förhållanden. En viktig funktion för SNVDB är att peka ut vägar som på grund av kraftig lutning utgör logistiska hinder eller i värsta fall säkerhetsproblem. Utifrån informationen kan man styra rutter förbi vägar som inte bör trafikeras samt planera för upprustningsåtgärder.
- **Nya ersättningsmodeller:** Skogforsk har föreslagit en ny ersättningsmodell för skogstransporter, som är under utvärdering i branschen. Modellen utökar tidigare tariffer, som enbart baseras på vikt och avstånd, med faktorer relaterade till bland annat backighet.
- **Miljöredovisning och energikalkyler:** Krav på hållbarhetsinformation om transporter ställer i sin tur krav på noggrannhet i beräkningar av energianvändning för transporter. En tjänst för beräkning av energivärde har nyligen implementerats i Biometrias Krönt vägval. För väldigt svagt kuperade topografier gäller att skillnader i energiförbrukning per kilometer vållade av mot- och medlut till stor del tar ut varandra. Fel i höjdvärden har i sådana fall en begränsad påverkan på den beräknade förbrukningen för en hel rutt. Det gäller dock inte vid brantare lutning, bland annat eftersom energi måste bromsas bort i utförsbackar. Därvid uppträder stora fel i kalkylerna om höjdvärdena är ”brusiga” med stora hopp i den beräknade lutningen som följd.
- **System för automatisk detektion av vägnedbrytning:** Av Sveriges ca 60 000 mil väg utgör 3/8 enskilda skogsbilvägar. Det är en angelägen uppgift att följa upp status för dessa vägar så att underhållsåtgärder kan planeras in innan skador uppstår. Genom att följa upp hur rullmotståndet på en väglänk förändras över tid och vid varierande väderlek kan ytuppmjukning och därmed begynnande spårbildning detekteras (Noreland 2024a). Det enskilda vägnätet är idag för dåligt beskrivet med avseende på höjdvärdet för att system baserade på mätning av rullmotstånd ska ge tillförlitliga resultat.
- **Fordonsuppföljning:** Rullmotståndet är den enskilt största källan till energiförluster för tunga fordon. Idag ställs stora krav på att däck ska vara lättrullande. En långtidsuppföljning (Noreland 2024b) av ett 20-tal timmerfordon visade dock stora variationer i rullmotstånd mellan fordonsindivider. Det är sannolikt att en del av skillnaderna förklaras av faktorer relaterade till fordonskondition. Med hjälp av system för löpande uppföljning av förändringar av rullmotståndet kan potentiellt stora ekonomiska och miljömässiga vinster göras genom att i tid utföra serviceåtgärder.

Utöver dessa nyttor kan det sannolikt tillkomma andra tillämpningar som projektet inte förmått att förutse.

Produktmål

I den projektplan som låg till grund för Trafikverkets beslut om projektstöd specificerades produktmålen. Utkomsten av projektet ska vara en algoritm/arbetsbeskrivning för hur förbättrade höjdvärden kan tas fram utifrån de datakällor som undersöks. Förslaget ska förankras med Trafikverket så att det kan implementeras kostnadseffektivt inom ramen för tillgänglig infrastruktur. Ett förslag ska även ges på hur ajourhållning av data kan ske.

En kommentar angående leveranserna från projektet är på sin plats. Innan projektet startade var det inte klart vilken konkret form metoden eller processen skulle anta. De inledningsvisa försöken pekade på en leverans i form av programkod, som kan anpassas till Trafikverkets produktionsmiljö. En bit in i projektet stod det emellertid klart att en snabbare och mer kostnadseffektiv lösning var att arbeta mot lösningar som använder verktyg och data som redan idag finns tillgängliga hos Trafikverket. För fullständighets skull redovisas de algoritmer vi tagit fram under arbetets gång i rapporten, men begränsat till hur de fungerar. Programkod kan erhållas på begäran.

Material och metoder

En målsättning i projektet har varit att utgå från de noggrannaste datakällor som finns tillgängliga. För vägnätet rör det sig om data från bilburen laserskanning, data från flygburen laserskanning i form av laserpunktmoln samt Lantmäteriets Markhöjdmodell. Data har sedan behandlats med olika processer eller algoritmer, som testats och utvärderats. Det här kapitlet presenterar översiktligt vad som undersökts i projektet.

RST – Road surface testing

I underhållssyfte inspekterar Trafikverket löpande den belagda delen av det statliga vägnätet med hjälp av fordon bestyckade med utrustning för Road surface testing (RST). Mätningarna görs med laser och genererar ett punktmoln som beskriver vägytan med hög upplösning och noggrannhet både längs och tvärs vägen. Mätbilen är försedd med utrustning för positionering via GNSS (Global Navigation Satellite System) och RTK (Real Time Kinematic) samt ett tröghetsnavigeringssystem (IMU). RTK-systemet kan sägas ge en noggrann position med stor tidskonstant, medan IMU-systemet ger en mindre noggrann signal med liten tidskonstant. Genom sensorfusion kan man få en signal som både är noggrann och snabb (ger täta punkter). Det innebär samtidigt att det absoluta felet i två näraliggande punkter från körspårsdata inte är oberoende av varandra.

Data från Trafikverkets RST har enligt specifikationerna en punktvis noggrannhet i höjdvärde på ca +/- 5 cm. Detta avser att 95 procent (+/- två standardavvikelser) av alla punkter ligger högst 5 cm från det rätta värdet.

RST genererar punktmoln beskrivande vägytan som ett stort antal vägytepunkter med både plan- och höjdkoordinater. Ur punktmolnen kan ett körspår extraheras. Körspårets upplösning varierar med hur fort RST-bilen kört, men i genomsnitt är punkttätheten runt 15 punkter/m. Detta täta spår samplas ner med en algoritm enligt Ramer-Douglas-Peucker (Ramer 1972), som genererar ett glesare spår med en upplösning som styrs av spårets krökning i plan- och höjddled.

Frekvensen på RST-undersökningar varierar mellan olika vägar. På funktionell vägklass o sker det årligen, medan det på mindre trafikerade vägar kan gå 2–3 år mellan undersökningarna.

Laserpunktmoln

Större delen av Sveriges yta har vid två tillfällen genomgått en heltäckande laserskanning. Den första, som genomfördes 2009–2017, genererade ett punktmoln med en täthet på i genomsnitt ca 0,5 punkter per kvadratmeter. En andra laserskanning inleddes 2018 och den har en punkttäthet på ca 2 punkter per kvadratmeter. 2024 inleddes en tredje laserskanning. Inför den nu pågående laserskanningen gjorde man en avvägning mellan upplösning i rum och tid och valde att behålla den tidigare upplösningen till förmån för att kunna genomföra uppdateringar med kortare intervall.

Ett laserpunktmoln är en ostrukturerad (ej bunden till något raster) samling av koordinater i rummet och beskriver punkter som ligger på marken, i vegetationen eller på byggnader. Varje punkt karaktäriseras av plan- och höjdkoordinater, reflektionsintensitet samt ordningsnummer för eko från en och samma laserpuls. Den absoluta lägesnoggrannheten är ett medelfel på <0,1 m i höjd och <0,3 m i plan (Lantmäteriet 2022).

Laserpunktmolnet utgör rådata för olika algoritmer såsom Markhöjdmodellen.

Markhöjdmodellen

Markhöjdmodellen presenterar rikstäckande höjddata i form av ett regelbundet rutnät med en meters upplösning. Modellen är framställd utifrån en kombination av punktmoln från flygburen laserskanning och flygbilder. Normalt är det laserpunktmolnet som används för underlag till Markhöjdmodellen. Punkter som representerar vegetation eller byggnader har skalats av, varefter markytan i varje ruta beskrivs genom linjär interpolation. Där data härstammar från flygburen laserskanning är noggrannheten i höjddled 0,1 m. Flygfoton används för att detektera förändringar som skett sedan senaste laserskanningen, exempelvis genom schaktarbeten eller skred, och för den påföljande uppdateringen av Markhöjdmodellen. När flygbilder har använts är noggrannheten i höjddled 0,4 m.

Modellen uppdateras kontinuerligt över året, men mest frekvent under hösten efter att stora mängder laser- och bilddata samlats in under sommaren. I genomsnitt uppdateras runt 60 000 km² per år, varav det allra mesta görs utifrån laserdata.

Data om över- och underfarter

För att säkert detektera vägavsnitt som inte täcks av Markhöjdmodellen har Lantmäteriet information om över- och underfarter i form av ett kartlager med polygoner som täcker identifierade broar med ett spann på minst 3 m. Broarna identifieras med en kombination av automatisk detektering och manuell kontroll mot bland annat NVDB.

Algoritm för identifikation av vägen direkt från laserpunktmolnet

För att identifiera hur plankoordinater för en given väggeometri avviker från den verkliga vägpositionen har algoritmer som använder laserpunktmolnet utvecklats för att analysera förutsättningarna i omgivningen till den givna geometrin. Väggeometrin tillåts sedan att justeras i plan för att skapa den mest troliga representationen av vägen. Motsvarande

justering av plankoordinater går även att göra med utgångspunkt från Markhöjdmodellen men då med förlusten att informationen från icke markklassade punkter inte finns med (till exempel byggnader, vegetation, vatten och broar).

Draperingsalgoritm som använder Markhöjdmodellen

Utifrån en plangeometri för vägen bestäms höjdvärden genom att väggeometrin draperas på Markhöjdmodellen. Metoden genererar inte plankoordinater för vägen, utan utgår från en sedan tidigare gjord digitalisering. Idag har Trafikverket tillgång till verktyget *Surface draper* i FME, som kan drapera punkter, linjer och polygoner på en topografisk karta.

På grund av att Markhöjdmodellen är en terrängmodell där byggnader (inklusive vägöverfarter) är borttagna så saknas det höjdvärden på alla överfarter. Höjdvärden för tunnlar finns naturligtvis inte heller representerade, men också kortare underfarter där interpolation har använts i Markhöjdmodellen är av osäker kvalitet och skapar brus i höjdvärdena. Utifrån polygoner från Lantmäteriet med kända under- och överfarter kan osäkra punkter markeras som saknade ("nodata"). För att hantera fall när det inte finns någon sådan indikation på att data från Markhöjdmodellen saknas har algoritmer utvecklats som identifierar brus och hopp i höjdvärden utmed vägen, som sedan ersätts med "nodata"-värden.

Algoritm för detektering av fel i data

För att hitta datapunkter där höjdbestämmingen av olika skäl misslyckats har olika hjälpalgoritmer tagits fram. Algoritmerna tar hänsyn till extrem lutning, snabba förändringar i lutning och avvikelser från spline-approximationer och uppmätta höjdvärden. Om någon av dessa mätningar faller utanför givna tröskelvärden betraktas det som osäkert område med hänsyn till höjdvärden.

Projektets framskridande

Arbetsformer

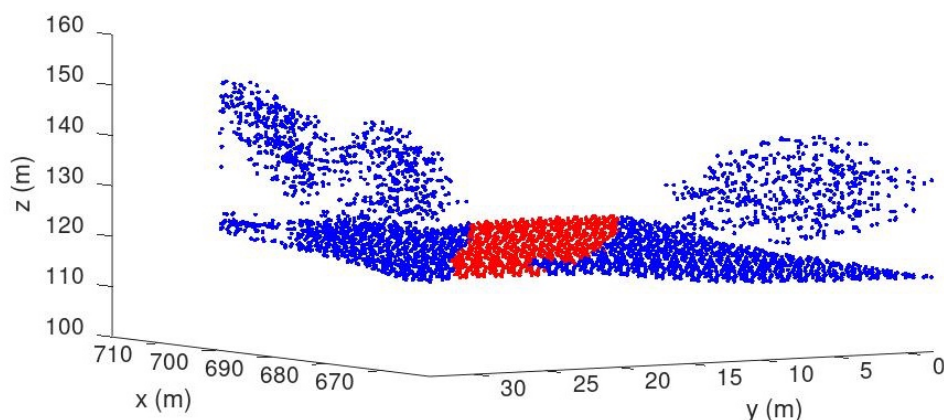
Under hela projektiden har en tät kommunikation med Trafikverket hållits i form av regelbundna arbetsmöten och workshopar. Mötena har främst hållits på länk, medan workshoparna hållits hos Skogforsk i Uppsala och på Trafikverkets kontor i Linköping. Företrädare för andra aktörer, främst Lantmäteriet, har deltagit i flera av mötena och bidragit med synpunkter och information om tillgängliga data och arbetsprocesser. Olika idéer har presenterats, testats och i flera fall förkastats utifrån utfallet av gjorda erfarenheter.

Tester och jämförelser

Metoder baserade på laserdata

Inledande tester med att identifiera och koordinatsätta vägen utifrån laserpunktmolnet gjordes av Skogforsk 2020. Då togs en algoritm fram, som genom att identifiera ellipsformade testytor, där punkterna ligger nära ett plan, iterativt kunde hitta och

klassificera vägpunkter direkt ur laserdata (exempel i Figur 2). Genom att via regression anpassa ett plan till näraliggande punkter, som klassats som vägyta, går det att bestämma höjdvärden med en noggrannhet som är bättre än den angivna noggrannheten för de individuella laserpunkterna. Algoritmen användes i anslutning till sin tillkomst skarpt för ett projekt (von Hofsten & Noreland 2021) där noggranna höjdvärden behövdes för en sektion av riksväg 134 väster om Kisa i Östergötland. Även om metoden fungerade och visade på potentialen i att utgå från laserdata var den mycket beräkningstung och kunde felklassificera punkter från plana ytor i anslutning till vägen, exempelvis parkeringsfickor. Efter dessa inledande försök gjordes inom ramen för innevarande projekt en utvecklad version med bättre prestanda och robusthet i vägidentifieringen. Metoden beskrivs detaljerat i Bilaga 1. För att minimera brus och underlätta identifikation av hopp i höjdvärden togs en terrängmodell fram, som motsvarar Markhöjdmodellen, men med skillnaden att även broklassade punkter används för att beskriva markytan. Med en sådan modell får man tydliga hopp i höjdvärden i alla underfarter som är lätta att identifiera algoritmiskt. Överfarter och broar får samtidigt en korrekt höjdsättning, vilket tillsammans ger mycket bra förutsättningar för enkel drapering. Efter diskussioner med Lantmäteriet och Trafikverket nåddes dock slutsatsen att det åtminstone inte på kort sikt finns förutsättningar för att kontinuerligt underhålla och tillhandahålla en sådan terrängmodell. Arbetet inriktades därför på metoden som utgår från höjdsättning utifrån den existerande Markhöjdmodellen.

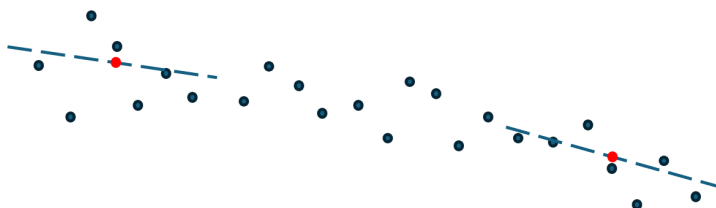


Figur 2. Laserpunktmoln från flygburen skanning. Röda punkter har identifierats som vägyta. Utöver punkter från laserträffar på markytan kan man se ett stort antal punkter i trädkronor.

Metod baserad på RST

Tester med RST-data utfördes utgående från av Trafikverket extraherade körspår. Körspåren är plan- och höjdkoordinaterna för laserpunkterna mitt under mätfordonet. Körspårens inledningsvis höga upplösning längs vägen samplades ner med Douglas-Ramer-Peuckers algoritmen och olika val av tröskelvärde. Algoritmen filtrerar ut ett urval av laserpunkter, som var och en i sig motsvarar punkter på vägen. Behöver man återskapa höjdvärden mellan punkterna kan det ske genom linjär *interpolation*. Noggrannheten i interpolationen är proportionell mot kvadraten på avståndet mellan punkterna. Genom att minska det brukliga tröskelvärdet på 5 cm till 2,5 cm (rekommenderat minimum med hänsyn till mätfel) ökar datamängden en faktor två, men felet i interpolationen går ner till en fjärdedel. Varje punkt är dock behäftad med ett mätfel, vilket sätter en gräns för vilken noggrannhet som kan uppnås vid interpolation genom att förtäta punkterna. Genom lokal *approximation* i minsta kvadratmening går det i princip att filtrera mätfel och höja

noggrannheten med tätare punkter enligt Figur 3. Dock är de slumpvisa felen i näraliggande punkter från RST som nämnt inte oberoende av varandra, utan starkt korrelerade genom sensorfusionen mellan GNSS- och IMU-signalerna. En lokal approximation ger därför ingen ökad noggrannhet, utan man kan se det som att operationen implicit redan är genomförd i de rådata som levereras från RST. Det är inte uteslutet att noggrannheten skulle kunna öka ytterligare med hjälp av statistiska metoder, men i brist på exakta detaljer kring felen i RST-data föreslås inga ytterligare åtgärder utöver körspårsextraktionen och filtreringen med Rahmer-Douglas-Peucker.



Figur 3. Filtrering av brusiga mätvärden (blå punkter) genom lokal anpassning av linje kan ge uppskattningar med högre noggrannhet (röda punkter).

Dataformat och lagring

Detta avsnitt beskriver hur plan- och höjdkoordinater föreslås lagras och tillhandahållas. En redovisning av spatial upplösning och noggrannhet presenteras också.

Förhållande till grunddatabasen i NVDB

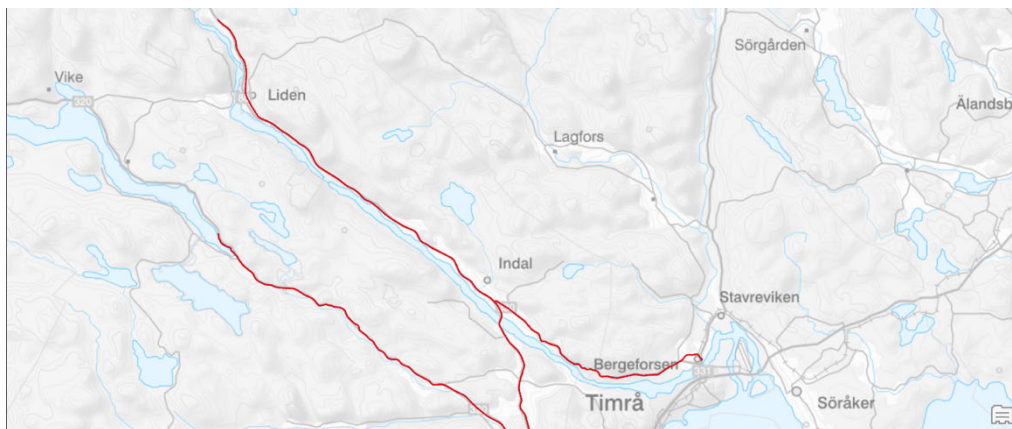
I princip skulle det vara möjligt att uppdatera den existerande företeelsen höjdvärde i NVDB:s grunddatabas med de nya värden som genereras av de metoder som föreslås i rapporten. I samband med det skulle även plangeometrin behöva uppdateras så att höjdvärdena kan hänföras till koordinater med motsvarande noggrannhet. Problem skulle dock uppstå genom att kontinuiteten mellan referens- och dellänkar kan gå förlorad om inte landets alla vägar hanteras samtidigt och på grund av de små skillnader i resultat som de föreslagna metoderna kan ge. Vi föreslår därför att inga försök att åtgärda grunddatabasen görs, utan att de nya höjdvärdena hanteras i en separat miljö.

Körspår som företeelse med egen geometri

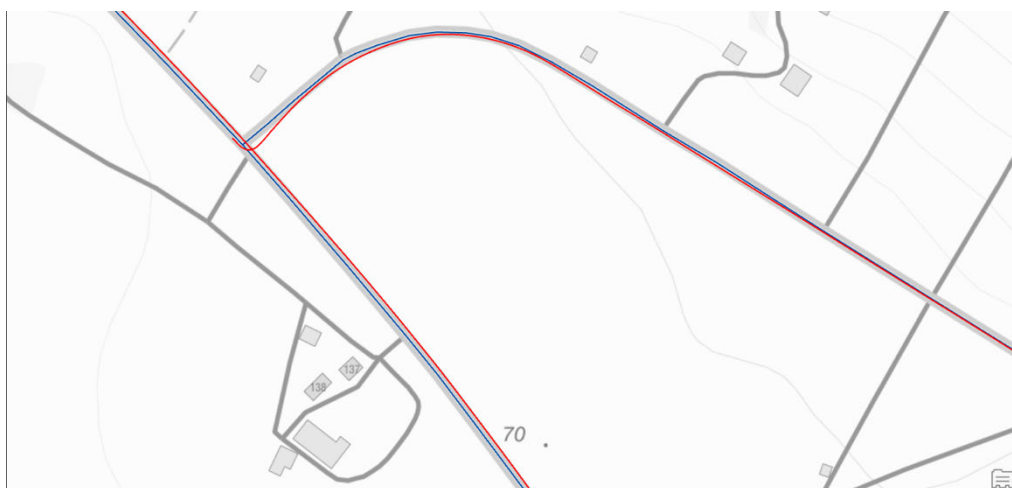
I NVDB har det sedan begynnelsen varit möjligt att knyta företeelser, det vill säga egenskaper och objekt, till vägnätet i form av nätets referenslänkar. En fördel med det här sättet att knyta företeelser är att det är lätt att samköra data samt att räkna ut mängder efter exempelvis ett specifikt vägnummer. Nackdelen har varit att man inte kan se det faktiska läget för objekten i terrängen. Ett bullerplank har med andra ord ärvt positionen för vägmitt, vilket är direkt felaktigt vid en bulleranalys.

Med Trafikverkets relativt nya tillhandahållandemiljö finns det möjligheter att knyta företeelser till referenslänkarna samtidigt som den egna geometrin sparas. Det kommer med andra ord att finnas två representationer av geometri. Den ena är den vägnätsanknutna och den andra representerar objektets faktiska läge.

Trafikverket har tagit fram exempeldata i Timrå där körspår (eng. trajectories) från lasermätning knutits till vägnätet som företeelser med egen geometri (Figur 4 och Figur 5).



Figur 4. Exempelvägar för vilka företeelse med egen geometri lagras.



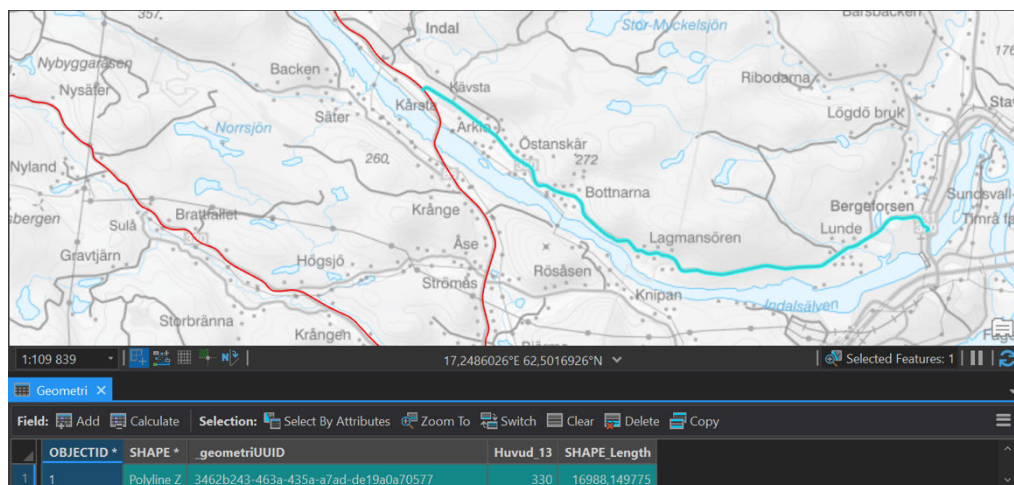
Figur 5. I bilden ser man körspåret i rött som en företeelse med egen geometri kopplade till de blåa referenslänkarna.

I Figur 6 syns tydligt att geometrin för körspåret följer mätfordonets position i ett specifikt körfält. Det här betyder att geometrin i plan inte nödvändigtvis behöver vara bättre än dito för referenslänkarna som ska redovisa vägmitt för normala vägar. Däremot är formen för hela geometrin bättre, både i plan och höjd. Notera också att det inte finns en topologisk koppling mellan geometrierna för körspåren. Tanken är att applikationer såsom ruttning och navigation använder sig av topologin från referenslänkarna men med information om kurvatur och lutning från körspårsgeometrin.



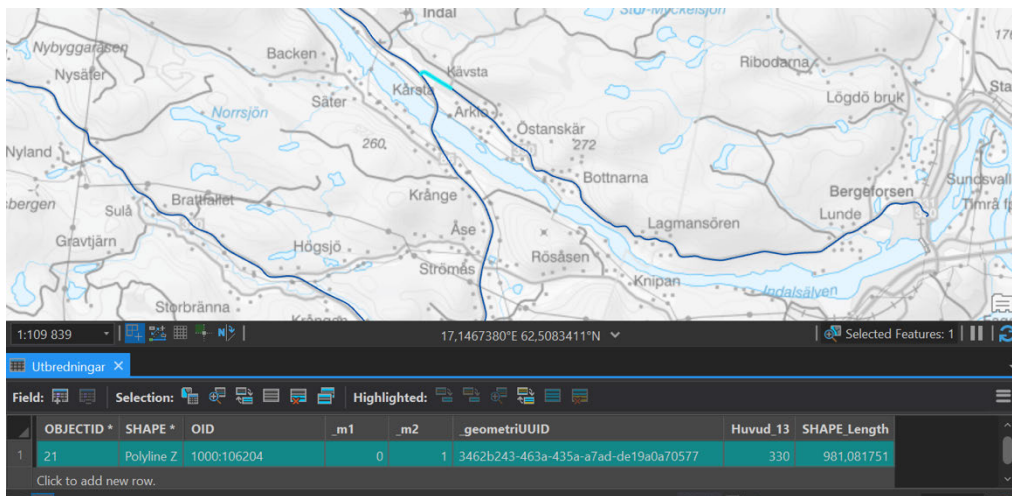
Figur 6. Geometrin för körspåret följer mätfordonets position i ett specifikt körfält.

Körspåren kommer att lagras som företeelser med egen geometri som inte klipps efter referenslänkarna i databasen. I stället kommer det att finnas flera utbredningar av företeelsen som pekar ut en och samma körspårsgeometri. I exemplet i Figur 7 visas en körspårsgeometri från mätningen mellan Kårsta och Bergforsen vars identitet är "3462b243-463a-435a-a7ad-de19a0a70577". Notera att geometrin kommer att ha samma riktning som mätfordonet färdades i.



Figur 7. Körspårsgeometri från mätningen mellan Kårsta och Bergforsen.

Vägsträckan mellan Kårsta och Bergforsen byggs upp av flera referenslänkar. Kopplade till dessa skapas utbredningar där varje utbredning (Figur 8) vet vilken referenslänk och var på referenslänken de ligger. Dessutom pekas körspårsgeometrin med identiteten "3462b243-463a-435a-a7ad-de19a0a70577" ut för varje utbredning.



Figur 8. En av referenslänkarna längs vägen mellan Kårsta och Bergforsen.

Upplösning, noggrannhet och prestanda

Av datahanteringsskäl går det inte att beskriva vägytan med hög upplösning i både längs- och tvärled. I stället beslutades tidigt i projektet att vägen ungefär som idag ska beskrivas med koordinatspår, som kan tänkas beskriva ett av många möjliga körspår. Det kan leda till att vissa fel i höjdvärde uppstår exempelvis vid körfältsbyten, men så länge ett fordon håller sig till ett körfält bör de lutningsvärden som kan beräkna ut höjdvärdena vara korrekta. Skillnaden mellan två näraliggande körfält består ju rimligen i en någorlunda konstant nivåskillnad. Annorlunda förhåller det sig på mötesseparerade vägar. Här kan det röra sig om separata körbanor med i princip oberoende höjdprofiler. Därför beslutades att mötesseparerade vägar ska representeras med ett koordinatspår per körriktning.

Inför projektet specificerades inget formellt noggrannhetskrav för de höjddata som presenteras, utan tanken var att uppnå en så hög noggrannhet som det går med hänsyn till datakällornas noggrannhet, dataprocessering och prestanda. I detta ingår såväl dataproduktion som tillhandahållande.

Den slutliga dataprodukten är behäftad med två typer av fel. Den första utgörs av begränsningarna i den underliggande datakällan. Lantmäteriets laserskanning har som nämnt ett medelfel på $<0,1$ m medan data från de RST-undersökningar som Trafikverket regelbundet genomför har en noggrannhet på ca 5 cm.

Andra potentiella fel beroende på underliggande data kan vara:

- Mätbilen tvingas byta spår vid omkörning eller av annat skäl
- Delar av cirkulationsplatser täcks inte
- Information om vägytan på broar saknas efter att de skalats bort från Markhöjdmodellen
- Vägens plangeometri är felaktig

Den andra typen av fel uppkommer på grund av att högupplöst information samplas ner. När antalet datapunkter är större än vad som kan hanteras i den representationen behöver data kondenseras. RST-undersökningarna genererar punktspår där de enskilda datapunkterna typiskt ligger mellan 5 och 10 cm från varandra. Den upplösningen är i sig onödigt hög och Trafikverket använder en algoritm för att minska upplösningen i körspår utifrån ett toleranskrav (Ramer 1972). Ramer-Douglas-Peuckers algoritm behåller ett

urval av punkterna efter att punkter som ligger inom ett visst avstånd från en linjär interpolant sorterats bort. Efter tester på ett antal referenssträckor bestämdes att ett tröskelvärde på 2,5 cm för radieparametern är lämpligt. Med det parametervälet blir punkttätheten i genomsnitt 0,1 punkt/m. Översatt till hela Sveriges vägnät motsvarar det runt 10 miljoner datapunkter.

Beroende på tillämpning kan man med hjälp av interpolation behöva återskapa höjdvärden mellan de punkter som blir kvar efter filtreringen. För att undersöka det förväntade felet i på så vis återskapade värden analyserades en teststräcka. Teststräckan är belägen på riksväg 66 i Dalarna i närheten av Transtrand och visas i Figur 9 och Figur 10. Sträckans längd är 4797,1 meter och beskrivs av ett körspår omfattande 56 622 punkter.

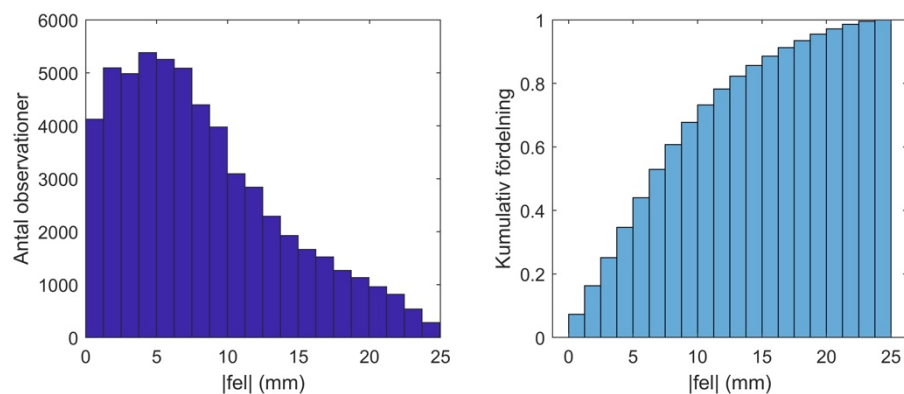


Figur 9. Teststräckans utbredning i översikt till vänster och förstorat till höger.



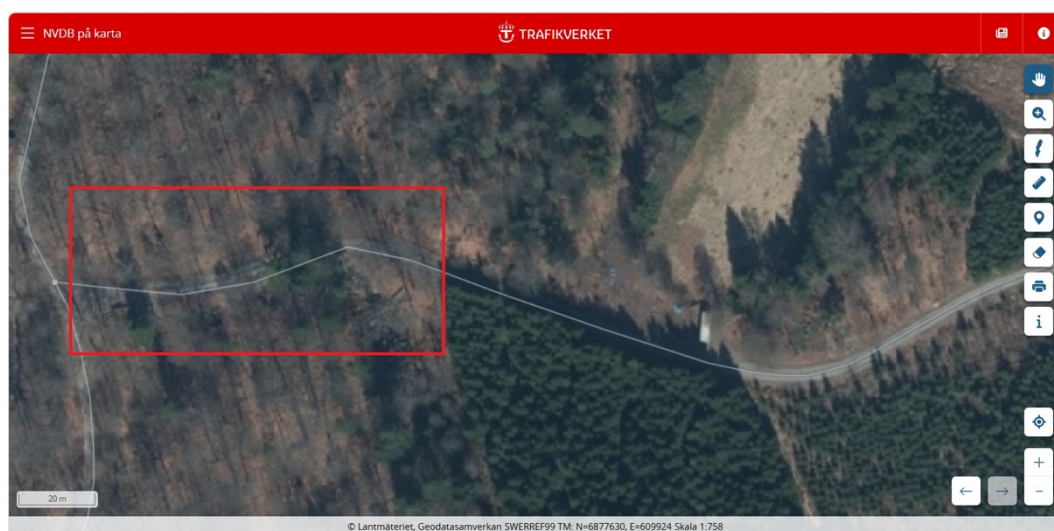
Figur 10. Till vänster visas filterade punkter i rött på teststräckan i svart. Den svarta rutans område återges i bilden till höger, där varje ofiltrerad punkt är svart och de filterade röda. De svarta punkterna ligger mycket tätt.

I Figur 11 visas felet i 56 622 återskapade punkter längs vägen, varav alla utom de 392 som återstod efter filtreringen beräknats med linjär interpolation. Interpolationen avser både plan- och höjdkoordinaterna och är beräknad i punkter vars kurvparametervärden överensstämmer med de ursprungliga 56 622 datapunkternas. Som synes är felet aldrig större än filtreringens tröskelvärde på 25 mm. 95 procent av punkterna har ett fel på högst 20 mm, och för 50 procent av punkterna är felet högst 7 mm. Eftersom interpolationen gjordes i tre dimensioner utgör dessa värden en övre gräns för felet i höjdkoordinaten.



Figur 11. Fördelning av fel som uppstår vid interpolation av nedsamlade RST-data.

Noggrannheten i beskrivningen av vägen innefattar både plan- och höjdkoordinaterna. För RST-data genereras tre koordinater av hög noggrannhet, men metoden baserad på Markhöjdmodellen utgår från en redan existerande beskrivning av vägens plangeometri. Om plankoordinaten är behäftad med stort fel blir även höjdvärdet felaktigt, eftersom det då hämtas från fel position i Markhöjdmodellen. När väggeometrier för enskilda vägar idag rapporteras in till Lantmäteriet görs en kvalitetskontroll. Endast lägesfel som är större än fyra meter korrigeras, vilket innebär att en del av de data som beskriver det enskilda vägnätet är behäftat med okorrigerade fel. I Figur 12 visas exempel på en vägsträckning vars representation delvis missar den verkliga linjeföringen. Felet i det markerade området uppgår som mest till uppskattningsvis 3 m i förhållande till vägens centerlinje, vilket medför att höjdvärden från draperingen kommer att hämtas från sidan av vägen. Den exakta omfattningen av brytpunkter som ligger tillräckligt långt från centerlinjen för att missa vägytan är inte känd, men att döma av stickprov från olika områden i landet rör det sig om ett antal procent. Företrädesvis berörs vägar av funktionell vägklass 8 och 9, som sannolikt digitaliserats då de var krontäckta och utan stöd av Markhöjdmodellen. Det kan även antas att skicklighet och noggrannhet hos tjänstemannen som digitaliserat vägen spelat roll.



Figur 12. Digitaliserad väg med delvis felaktiga plankoordinater (Veddige, Varberg).

Det kan vara svårt att detektera fall då höjdvärdet hämtats vid sidan av vägen enbart utifrån det avlästa höjdvärdet. Vid så stora höjdvariationer mellan polygonpunkter att de förutsätter orimliga lutningar eller inte motsvarar vad som kan förväntas utifrån aktuell vägklass kan problem misstänkas. Mindre variationer passerar dock obemärkt förbi.

Hål i data vid broar och tunnlar

Broar och tunnlar utgör ett speciellt problem för produktionen av höjdvärden. Broar är som nämnt avskalade från Markhöjdmodellen och vägytan i tunnlar täcks av naturliga skäl inte av flygburen laserskanning. Det går därför inte att utläsa vägens höjdvärde på dessa vägsektioner ur Markhöjdmodellen. Broar har för det mesta en mycket förutsägbar höjdprofil, och en tänkbar lösning för dessa skulle vara att ta fram artificiella höjdvärden via interpolation av höjdvärdena i närheten av broarnas landfästen. För transparensens skull rekommenderar vi dock att man bara markerar saknade höjdvärden och låter

användaren avgöra i vilken mån det utgör ett problem för applikationen i fråga och i förekommande fall utföra interpolationen själv.

Metadata

För optimal användning av datakällan är det nödvändigt med information om dess kvalitet. Helst borde kvalitetsmålet vara kvantitativt i form av en feltolerans. Det är dock inte alltid möjligt att uppskatta noggrannheten i data. Så är fallet om höjdvärden för en nybyggd väg beräknas utifrån en markmodell, som skapats före anläggningstidpunkten. För att det ska gå att härleda datatillkomsten och koppla data till vägen kronologiskt behöver följande metadata redovisas:

- Datum för produktion av z-värde
- Metod för produktion av z-värde
- Produktionsdatum för underliggande dataset
- Datum för byggande av väg

Användaren kan därefter vid behov och där det är möjligt utläsa noggrannheten från respektive metodspecifikation.

Process för produktion och ajourhållning

I detta kapitel beskrivs först processerna för dataproduktion och ajourhållning översiktligt. Därefter redovisas processtegen per väghållarkategori med eventuella särskiljande detaljer.

Nyproduktion

Här presenteras det förslag till arbetsprocess för nyproduktion av höjdvärden som projektet kommit fram till. Naturliga krav på produktionen av höjddata är att den ska vara heltäckande och utgå från bästa tillgängliga grunddata. I de flesta fall är det senare liktydigt med mest aktuella data. Föreslagen produktionsprocess kan tillämpas på nationell nivå och följer turordningen:

1. Statliga grusvägar, kommunala vägar och enskilda vägar hanteras genom drapering av väggeometri på Markhöjdmodellen, som förutsätts vara aktuell genom Lantmäteriets ajourhållningsprocess.
2. Data för statliga belagda vägar extraheras ur senast tillgängliga RST-data.
3. Vägar som saknar data efter steg 2 flaggas för framtida omdrev.

Både produktion och ajourhållning förslås göras av Trafikverket, som idag har för ändamålet fungerande programvara. Även om dessa verktyg prestandamässigt inte är optimerade för uppgiften är de robusta och beprövade.

Dataproduktionen utifrån tillgängliga datakällor uppskattas ta runt två veckor, varav maskintid utgör huvuddelen.

Ajourhållning

Mot bakgrund av uppdateringsfrekvensen för de olika datakällorna bedöms ett årligt omdrev vara lämpligt som ajourhållningsinsats. Vid omdrevet hanteras alla vägar utan hänsyn till om uppdatering av datakällan faktiskt skett eller eventuella fysiska förändringar av vägen. Detta ger enkelhet i hanteringen till priset av en fördröjning i införande av mest aktuella data på som mest ett år. Möjligen leder det även till ett visst onödigt maskinvaruutnyttjande, men i förhållande till omdrevsfrekvensen är det av mindre betydelse.

Alternativet att arbeta med kontinuerliga förändringsuppdateringar bedöms som för arbetskrävande i förhållande till nyttan, om det inte kan ske helt automatiserat.

Statliga vägar

Datakälla

För statliga belagda vägar används data från de rutinmässiga RST-undersökningarna.

Process för dataproduktion

Utifrån punktmolnen extraheras ett körspår beskrivande vägens centerlinje. Körspåren filtreras med Ramer-Douglas-Peuckers algoritm med ett tröskelvärde på 2,5 cm.

Mötesseparerade vägar beskrivs med ett körspår i vardera riktningen. Det är inte säkert att vägen undersöks i båda riktningar vid samma tillfälle. Således kan data ha olika aktualitet beroende på riktning, eller till och med saknas i en riktning.

Ajourhållning

Omdrev av höjdvärden görs rutinmässigt årligen. Eftersom data från RST kommer in löpande och med varierande frekvens för olika väglklasser finns det ingen aktualitetsmässig preferens för när omdrevet bör göras.

Kommunala vägar

Datakälla

Datakälla är Markhöjdmodellen, NVDB och polygoner med broar och underfarter från Lantmäteriet.

Process för dataproduktion

Vägarnas plangeometri hämtas från NVDB och draperas på Markhöjdmodellen i en landstäckande insats som utförs av Trafikverket. Om polygoner med broar och underfarter finns tillgängliga från Lantmäteriet appliceras de på materialet och punkter som ligger inom polygonerna ges värde "nodata" eller flaggas som osäkra.

Ajourhållning

Omdrev av höjdvärden görs rutinmässigt årligen.

Enskilda vägar

Datakälla

Datakälla är Markhöjdmodellen, NVDB och polygoner med broar och underfarter från Lantmäteriet.

Process för dataproduktion

Existerande vägar hanteras genom en landstäckande insats som utförs av Trafikverket, med draperingsverktyget. Om polygoner med broar och underfarter finns tillgängliga från Lantmäteriet appliceras de på materialet, och punkter som ligger inom polygonerna ges värde "nodata" eller flaggas som osäkra. Nybyggda vägar kan höjdsättas via Lantmäteriets tjänst Höjddata direkt, vilket görs av någon av Trafikverkets dataleverantörer. Processen för hur det görs behöver beskrivas i en detaljerad instruktion, som omfattar hur plankoordinater hämtas in från Markhöjdmodellen.

Ajourhållning

Omdrev görs rutinmässigt årligen. Eftersom Markmodellen uppdateras mest frekvent under hösten är det fördelaktigt att göra omdrevet i början av påföljande år.

Lantmäteriets tjänst för höjdsättning använder bara de ibland glesa brytpunkter som finns. Vid omdrev kan man eventuellt öka punkttätheten, vilket i så fall görs på grundval av polygonpunkternas täthet i förhållande till vägens kurvighet. I samband med punktförtätning kontrolleras plankoordinaterna mot Markhöjdmodellen.

Hur omfattande förtättnings- och upprättningsprocessen i praktiken blir, behovet av den, och huruvida den ska automatiseras bör bli föremål för framtida undersökningar efter att ett första dataset producerats av Trafikverket och kan utvärderas av branschen.

Diskussion

För de statliga belagda vägarna håller dataunderlaget mycket hög kvalitet. Dessa data är så högupplösta att de i framtiden även skulle kunna bidra med annan information utöver höjdvärden, såsom IRI och megatextur för användning i olika energiberäkningsmodeller, exempelvis HDM-4. Hur man väljer att använda datakvaliteten är till stor del en fråga om processnings- och lagringskapacitet.

Laserpunktmolnet håller också hög noggrannhetsmässig kvalitet och har som nämnts tidigare använts för direkt bestämning av vägars höjdvärden. Genom att identifiera vägbanan ur laserpunktmolnet är man inte bunden till andra datakällor för vägens plankoordinater, vilket är en fördel i de fall det finns anledning att ifrågasätta noggrannheten hos de senare. Dock är hanteringen beräkningstung och kräver en robust algoritm för identifiering av vägytan ur punktmolnet, något som kan vara en utmaning på platser där vägen ansluter till andra plana ytor, såsom mötesplatser eller parkeringsfickor. De flesta allmänna vägar har idag så bra plankoordinater att draperingsmetoden ger bra resultat, men enskilda vägar kan visa sig ha bristande geometribeskrivning. Lokalt stora brister kan upptäckas vid en efterbearbetning och i framtiden kan det visa sig motiverat att utveckla ett system för identifikation och korrektion av länkar med dåliga noggrannhet i plankoordinaterna. För statliga belagda

vägar uppstår inte några motsvarande problem eftersom datakällan (RST) innehåller sina egna plankoordinater.

Det resultat som Trafikverkets lösning genererar i slutändan kommer troligtvis att ha en del hopp i höjddata på vissa ställen, men förhoppningsvis i mycket lägre grad än dagens höjdvärden. För att kunna identifiera osäkra värden bör man utgå från hur Trafikverkets lösning ser ut och från den bestämma vilka metoder för feldetektion som är lämpliga. Även om grundidéerna om hur detektering av fel i data är kända så är detaljerna kring vad som är en bra kalibrering beroende av hur Trafikverkets resultat faktiskt ser ut. Exempelvis kan de verktyg som används vid höjdbestämning mjuka upp variationer eller ersätta "vildar" i mätserierna baserat på olika tröskelvärden. Vi föreslår därför att det genomförs ett mindre projekt om feldetektering efter att Trafikverket producerat ett första dataset med hjälp av existerande verktyg.

Slutsatser

Projektet har pekat ut ett ändamålsenligt dataunderlag samt föreslagit en produktionsprocess för bestämning av noggranna höjdvärden för hela Sveriges vägnät. Processen kan förväntas vara hållbar över tid genom att den kan anpassas till förändringar i noggrannheten för underliggande dataset.

För de belagda statliga vägarna blir resultatet så noggrant det kan bli utifrån existerande rådata och vald upplösning. Kommunala samt enskilda vägar utgör däremot en kompromiss mellan noggrannhet och kostnad genom att man går via Markhöjdmodellen, som ursprungligen inte är avsedd för ändamålet. Noggrannheten blir dock avsevärt bättre än idag. För nybyggda skogsbilvägar kan resultatet bli osäkert beroende på att vägarna saknas i det underliggande datasetet. Brister i beskrivningen av plangeometrin leder också potentiellt till fel, som med de föreslagna metoderna kan vara svåra att detektera. I framtiden kan det visa sig att det finns anledning att rätta upp plankoordinaterna på det enskilda vägnätet, men vi bedömer att föreslagen process medför så stor förbättring av höjdvärdesinformationen att det är motiverat att lansera den så snart som möjligt.

Referenser

Biometria. 2025. <https://www.biometria.se/tjanster/transport/kroent-vaegval-och-skogsbilvaegar/kroent-vaegval/>

Europaparlamentets och rådets direktiv (EU) 2023/2661 av den 22 november 2023 om ändring av direktiv 2010/40/EU om ett ramverk för införande av intelligenta transportsystem på vägtransportområdet och för gränssnitt mot andra transportslag.

Harrie, L., m.fl. 2022. Nationella specifikationer för storskaliga geodata. Lunds universitet Rapport S-2022-3.

Noreland, D. 2024a. Effektiva inventeringsverktyg för skogsbilvägar – Maskinstöd för datainsamling och ajourhållning av väginformation: fordonsdata. Skogforsk. Arbetsrapport 1206–2024.

- Noreland, D. 2024b. Semi-empirical model for timber truck speed profile and fuel consumption. *International Journal of Forest Engineering*, pp. 1–12.
- von Hofsten, H. & Noreland, D. 2021. Timmerbil utrustad för minskat luftmotstånd och lägre bränsleförbrukning. Arbetsrapport 1107-2022. Skogforsk. 23 s.
- Kvalitetsbeskrivning Laserdata. 2022. Lantmäteriet.
https://www.lantmateriet.se/globalassets/geodata/geodataprodukter/hojddata/kvalitetsbeskrivning_laserdata.pdf
- Ramer, U. 1972. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Computer graphics and image processing*, 1(3), pp. 244–256.

Bilaga 1

Revision av z-koordinater i NVDB, fas 1

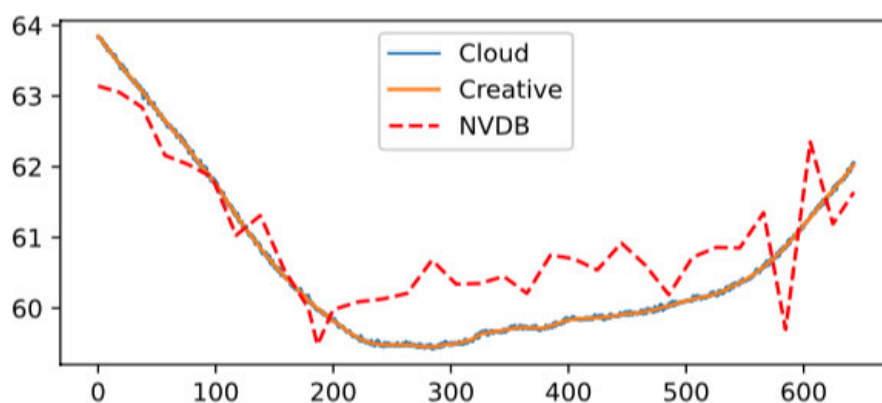
Innehåll

Frågeställning	1
Metod	2
Lokal analys av höjdvärden i laserdata	3
Justering av väg i XY-led	3
Z-värden	5
Resultat	5
Frågor att studera vidare	7

Frågeställning

Vägar i NVDB är uppbyggda med linjesegment där varje segment representeras av en sekvens av XYZ-koordinater. Speciellt Z-koordinaterna har sämre noggrannhet och är i vissa fall felaktiga eller saknas helt. Även XY-koordinaterna kan avvika signifikant från den verkliga vägen på ett sätt att ett linjesegment är placerat utanför vägen och därmed även på en annan implicit höjdnivå (t ex i ett dike).

Inom flera projekt, t ex projekt för ersättningsmodeller finansierat av Energimyndigheten och gröna pluttar projektet, är det viktigt att ha korrekta Z-värden. Ett exempel är att kunna beskriva bränsleförbrukningen korrekt som beror i hög grad på lutningar (indirekt Z-värdena). Ett annat exempel är att kunna identifiera backkrön.



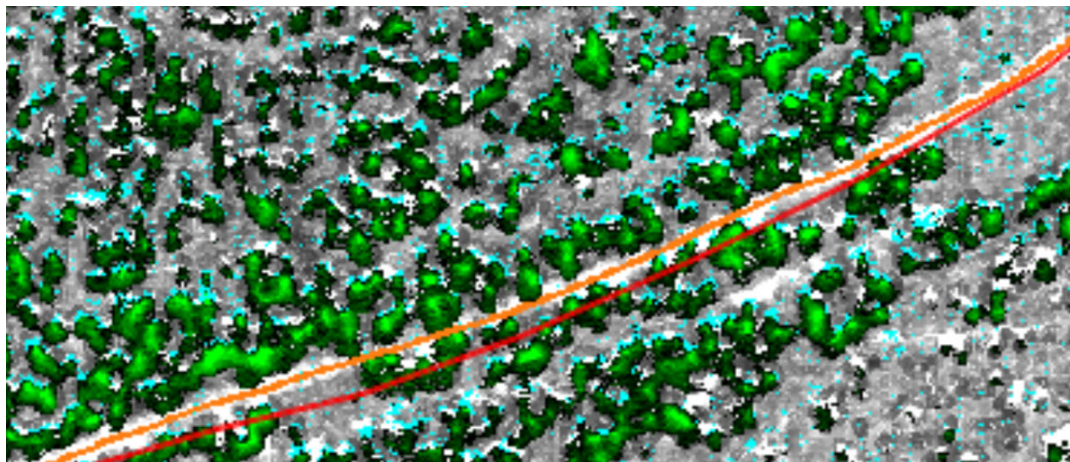
Figur 1. Exempel på hur Z-värden kan variera i NVDB (röd-streckad linje) jämfört med motsvarande höjdvärden från punktmolnet (orange linje). Vägsträckan har funktionell vägklass 2.

Denna rapport beskriver metod och resultat från fas 1, en förstudie där vi undersöker möjligheter

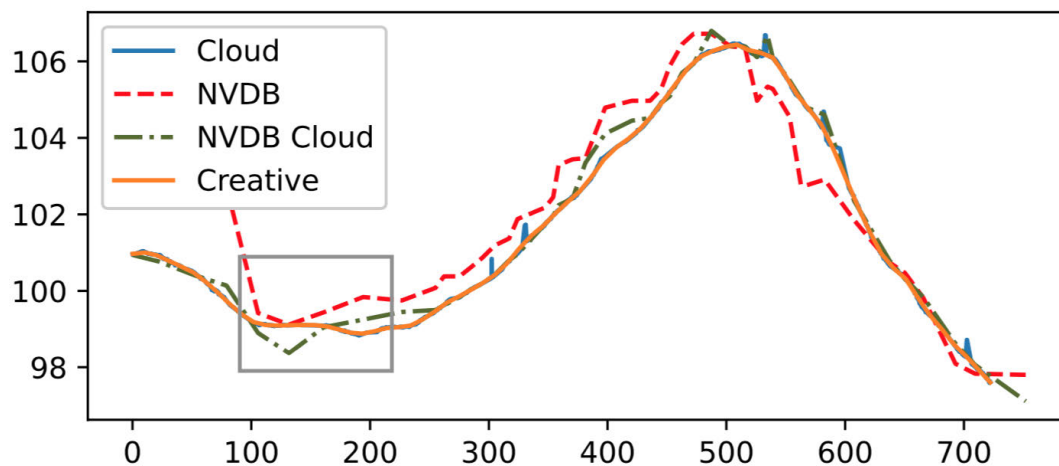
och svårigheter att beräkna fram korrekta Z-värden med hjälp av höjddata från [Laserdata Skog](#).

Metod

För att kunna hitta korrekta Z-värden behöver vi säkerställa vägarnas position i XY-led så att höjden mäts från vägens yta. Utan kunskap om vägens XY-position finns det en risk för att vi får fel höjdvärden som följande figurer illustrerar.



Figur 2. En NVDB-väg (röd) som är felplacerad i XY-led, och motsvarar delsträckan 100 till 200 meter i figuren med höjdvärden nedan.



Figur 3. Z-värden från de närmaste mark-klassade punkterna utmed en NVDB-väg (grön punktsteckad linje). Värdena avviker från vägens höjdvärden (orange linje) på vissa delar, speciellt där XY-positionen är felaktig.

Vi har utvecklat en algoritm som givet en väg i NVDB letar upp den mest troliga representationen i XY-led och från den plockar Z-värden som därför sannolikt ligger på vägens yta.

Lokal analys av höjdvärden i laserdata

En central komponent i metoden är att beräkna fram lokala förhållanden för godtyckliga positioner. Givet en position så använder vi alla punkter från punktmolnet som ligger inom en cirkel kring positionen för att ta fram följande:

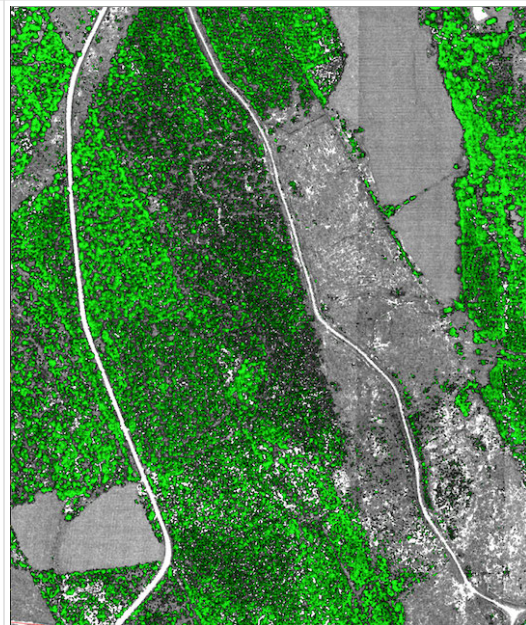
1. Proportion mark-klassade mot övriga punkter (exklusive brus).
2. Absolut variation i Z bland mark-klassade punkter.
3. Fel i Z-värden (residualerna) givet en minsta-kvadrat approximation (2d-plan mot höjdvärden).

Cirkel-storleken måste vara stor nog för att det ska ingå tillräckligt många punkter, men liten nog för att kunna befinna sig helt och hållet på en väg. I denna förstudie har vi använt storlekar mellan en och två meter i radie.

Om vi plottar summan av residualerna i ett raster med en gråskala där vitt är väldigt litet fel och svart är mycket fel, så får vi figuren till höger nedan. I de fall där andelen mark-klassade punkter är liten så använder vi istället en grön-skala. I bilden framgår därför vägar som ljusgrå/vita band.



Figur 4. Ortofoto

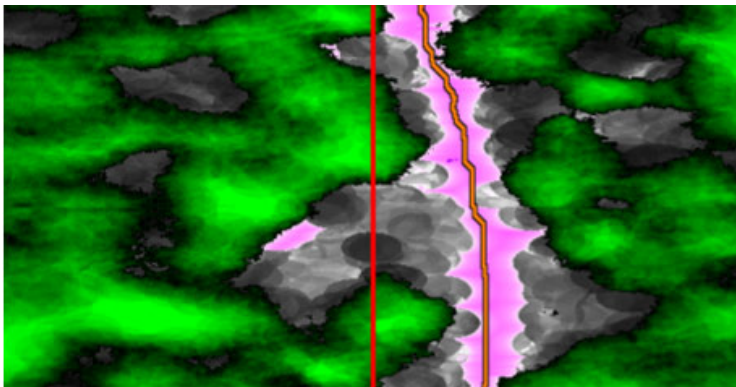


Figur 5. Moln-rendering

Justering av väg i XY-led

För att hitta den korrekta positionen av ett vägsegment så använder vi givna segment från NVDB och antar de har ett begränsat fel i XY-led. Vi beräknar först lokala förhållanden utmed vägen. Detta sker i små diskreta steg, t ex fem gånger per meter. I varje steg beräknar vi de lokala förhållanden vinkelrätt mot vägen, även där i små steg (t ex var femte cm) upp till en viss gräns i varje riktning (vänster och höger). Denna information är indatat till algoritmen och illustreras i

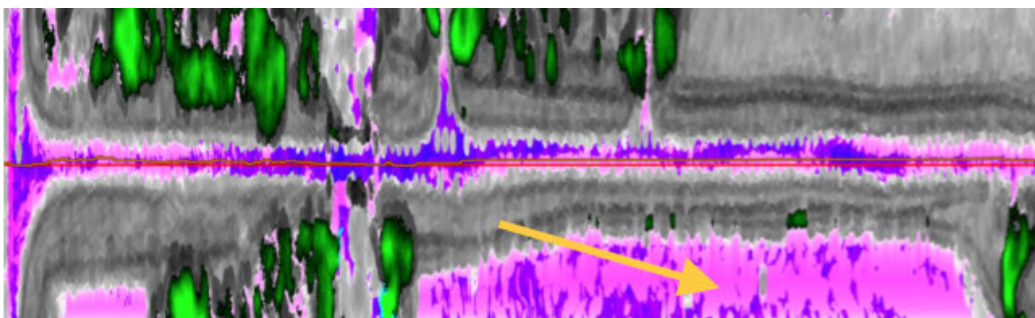
följande figur.



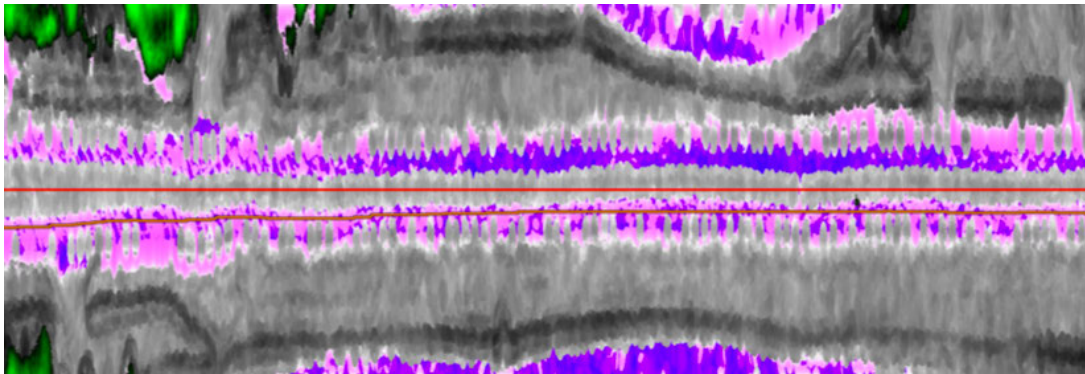
Figur 6. Visualisering av datan som används av algoritmen. Den röda vertikala linjen i mitten motsvarar en del av ett segment från NVDB. Bilden illustrerar 30 meter i bredd (15 meter åt vardera sida av den givna NVDB-vägen). De ljus-rosa delarna har rätt förhållanden som krävs för att vara en väg.

Given indatan så använder vi dynamisk programmering för att hitta den "billigaste vägen", dvs den väg som så mycket som möjligt omges av punkter med rätt förhållanden (i huvudsak små residuala fel i z-värden). I figuren ovan så är det den orange-färgade linjen som är billigast.

Här följer ett par exempel till med algoritm-data. De rosa-blå delarna har rätt förhållanden för att vara en väg.



Figur 7. Det kan naturligtvis finnas rätt förhållanden även där det inte är en väg. Pilen pekar på en åkermark.

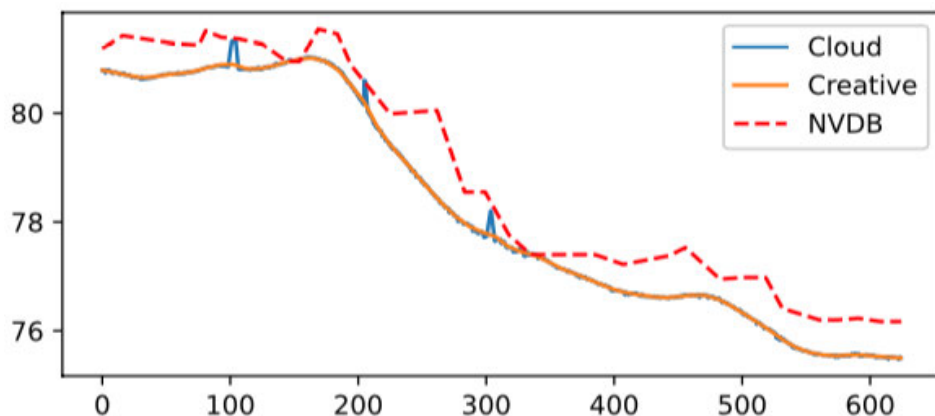


Figur 8. I denna bild så ser vi algoritm-data för en större väg med mitträcke. Algoritmen väljer ett körfält medan NVDB är placerad exakt i mitten av vägen.

Z-värden

Givet en justerad väg så följer vi vägen och samlar in kvalificerade Z-värden. För varje steg utmed den justerade vägen väljer vi det bästa Z-värde från minsta-kvadrat approximationerna som finns i sidled och som uppfyller krav på avstånd till justerad väg samt begränsningar på accepterad residual.

I vissa fall så finns ett hinder eller någon annan avvikelse som medför ett lokalt hopp i Z-led, som i figuren nedan. Till viss del filtreras dessa felaktiga Z-värden bort med hjälp av begränsningar på tillåtenhet. Men i en del situationer går det inte att urskilja felaktiga Z-värden utan att ta hänsyn till hela vägens höjd-kurva. Det sista steget i algoritmen är därför en spline-approximation där vi antar att en verklig väg är kontinuerlig och relativt "mjuk" i matematisk mening (kontinuerligt deriverbar).

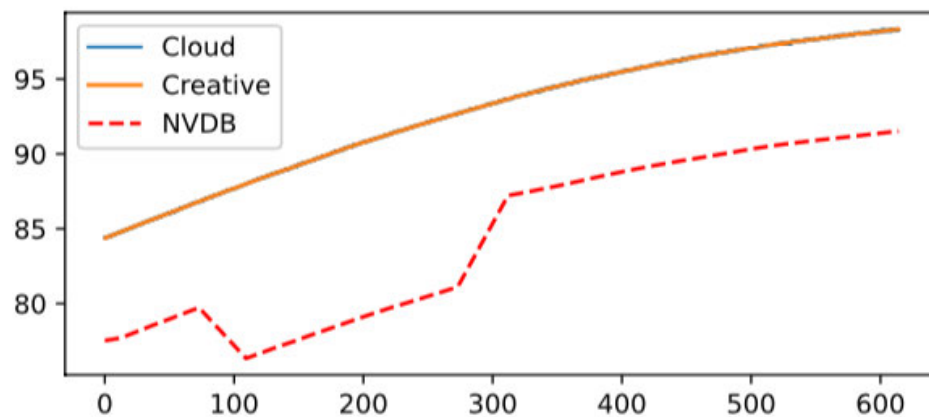


Figur 9. Av 2786 uppmätta Z-värden för detta vägsegment så avviker tre värden (blå linje, "Cloud") som filtreras bort med hjälp av spline-approximation (orange linje, "Creative").

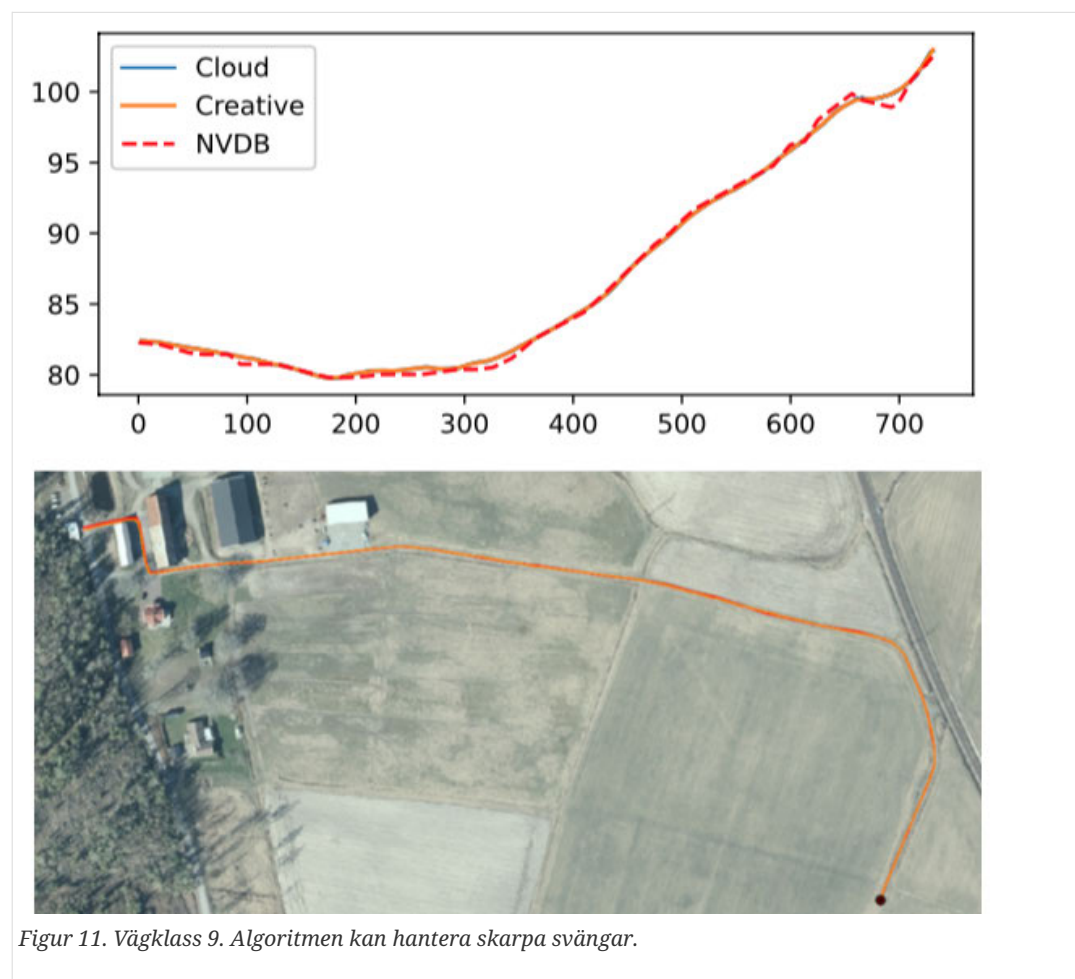
Resultat

Vi har studerat vägar från NVDB i sex stycken olika rutor av storlek 2.5 x 2.5 km från Laserdata Skog. Vägarna har haft funktionell vägklass 2-9. Givet de resultat vi har sett på det begränsade antal

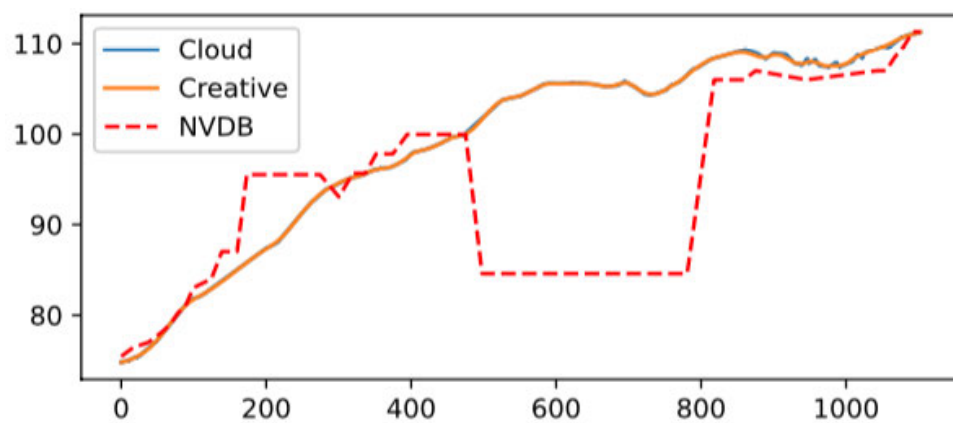
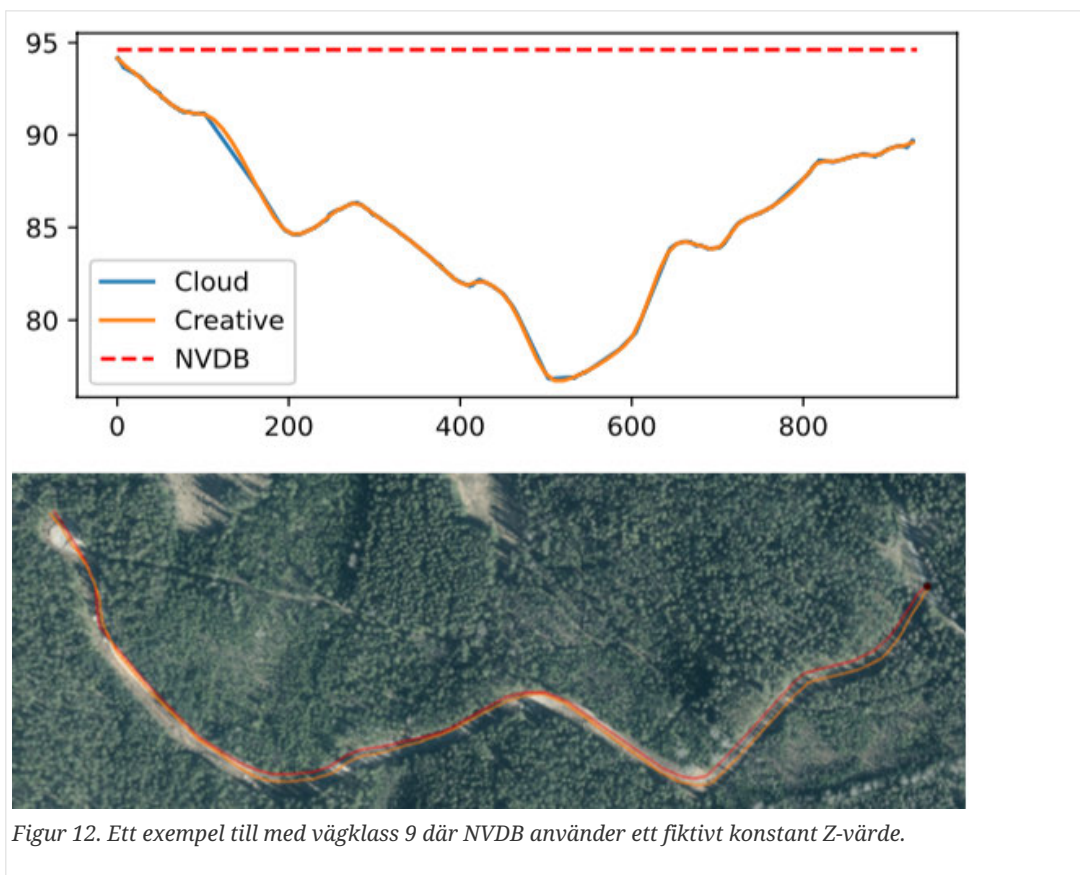
vägsegment som vi har studerat (ca 100 st), så är vår slutsats att vi kan beräkna korrekta Z-värden med hög noggrannhet för vägar i NVDB med hjälp av Laserdata Skog. Nedan följer några fler observationer från resultaten.



Figur 10. Vägklass 2. Alla 2814 kvalificerade Z-värden ligger på en mjuk kurva (blå linje som ligger under orange linje). Z-värden från NVDB gör ett omotiverat höjd-byte.



Figur 11. Vägklass 9. Algoritmen kan hantera skarpa svängar.



Frågor att studera vidare

Under avstämnings-mötet den 5 februari 2021 diskuterade vi följande möjliga problemställningar:

1. Reviderade Z-värden för hela Sveriges vägnätverk.

2. Möjlighet till XY-korrigerig för (delar av) NVDB-vägarna.
3. Använda liknande metod för att beräkna/uppskatta vägbredd.
4. Studera utbredning i korsningar och svängmöjligheter.

Högst prioritet har punkt 1, att revidera Z-värden för hela Sverige. För att genomföra en sådan revidering effektivt och automatiskt krävs viss vidareutveckling av algoritmerna, t ex:

- Automatiska parameterväl baserat på väg-attribut (mitträcke, vägklass etc)
- Flexibel diskretisering (för att hantera skarpa svängar bättre)
- Mått på säkerhet i resultat (för att kunna flagga potentiella problem)
- Arbeta med flera moln-rutor samtidigt
- Algoritm för förenkling av 3d-linjer (minska antalet punkter utan försämrad kvalitet)

Dessutom behöver vi bland annat:

- Tillgång till det gamla punktmolnet (Laserdata NH)
- Organiserad körning (skript) som går att avbryta och fortsätta. (Det finns ca 650 tusen km väg i NVDB. Under de sämsta förhållanden tar det upp till 30 dagar att hantera hela Sverige)
- Insamling och hantering av resultat (leverans-format)