

Jan Felix Ditlev-Simonsen og Peer Anton Zahl

# LiDAR på drone

## Lokalisering av vadeområder

Bacheloroppgave i Geomatikk

Veileder: Halvard Bjerke og Rune Ødegård

Medveileder: Christian Malmquist

Mai 2023



Jan Felix Ditlev-Simonsen og Peer Anton Zahl

# **LiDAR på drone**

Lokalisering av vadeområder

Bacheloroppgave i Geomatikk  
Veileder: Halvard Bjerke og Rune Ødegård  
Medveileder: Christian Malmquist  
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk



Kunnskap for en bedre verden





# Forord

Bakgrunnen for valget av tematikk er interessen om å utforske droner. I tillegg er det et ønske om å bruke droner til å løse et problem av operativ militær betydning. Samtidig fremmet Hærens våpenskole (HVS) et ønske om å utforske LiDAR-droner, på bakgrunn av teknologiens potensiale og fagmiljøets lave kunnskap om temaet. Dette er heller ikke et tema det undervises i på Krigsskolen, og oppgaven legger derfor ekstra vekt på teoridelen for å spre kunnskap ut i fagmiljøet. Oppgaven handler derfor om å utforske hvordan LiDAR-droner kan brukes til å lokalisere vadeområder.

En stor takk rettes til våre hovedveiledere Halvard Bjerke og Rune Ødegård for gode diskusjoner og tilbakemeldinger. Vi ønsker også å takke vår eksternveileder Christian Malmquist fra Kartverket. Uten hans kompetanse innen LiDAR og Airborne LiDAR Bathymetry ville ikke denne oppgaven vært den samme. Videre vil vi takke Sebastien Wærstad-Campeau ved HVS for gode innspill til tematikk, Lars Roar Uggerud Dugstad for ekstra støtte på metode og Norges vassdrags- og energidirektorat for datagrunnlag til oppgaven.

# Sammendrag

Militær lendebedømmelse handler om å beskrive effekten omgivelsene har på militære operasjoner. En av disse effektene er elver og våte gaps evne til å hindre bevegelse. Dersom en kan vade gjennom slike områder vil utfordringene de i utgangspunktet medfører, vesentlig reduseres. For å vurdere om vading er en mulighet er formålet med oppgaven å finne en ny metode der droner med laserskannere, også kalt LiDAR, brukes til å rekognosere området. Teknologitvillingen innen droner og LiDAR har fundamentalt endret kartleggingssektoren de siste årene. Det er derfor relevant å undersøke om denne teknologien kan bidra til å løse vadeproblematikken. Følgende problemstilling skal derfor undersøkes:

*Hvordan kan man lokalisere vadeområder med LiDAR på drone?*

I arbeidet med å konkretisere hvordan LiDAR-droner kan lokalisere vadeområder har den teknologivitenenskapelige metode blitt anvendt. Hensikten med denne metoden er alltid å frembringe en ny eller forbedret teknologi, altså en ny metode for å rekognosere vadeområder. Arbeidet frem til dette består av et omfattende teoretisk grunnlag innen vadeområder, LiDAR, digitale høydemodeller, ArcGIS Pro og innhenting av data med LiDAR-droner. Det teoretiske grunnlaget danner dermed fundamentet til en ny metode for å lokalisere vadeområder.

For å besvare problemstillingen har det blitt laget et verktøy som automatisk lokaliserer den mest egnede vaderuten. Under fem feltforsøk klarte verktøyet å hente ut anbefalt vaderute til alle områdene. Konklusjonen er dermed at verktøyet fungerer, men gjennom oppgaven vil også flere sentrale svakheter problematiseres.

Den eneste inngangsdataen verktøyet anvender er dataen LiDAR-dronen samler inn. For at verktøyet skal fungere er det konkludert med at denne dataen er det viktigste suksesskriteriet. Dette løses med god planlegging av datainnhenting, men det er fortsatt utfordringer knyttet til innsamling av god data. Spesielt utfordrende er det i områder der elvene har grumsete vann, eller er for dype for at LiDAR-sensoren kan penetrere ned til bunnen.

# Summary

The purpose of military terrain assessments is to describe the effect of the environment on military operations. One of these effects is how rivers and other water obstacles prevent manoeuvre. If such areas can be waded, the challenges they initially entail will be significantly reduced. To assess if wading is possible, this thesis seeks to find a new method using drones with laser scanners, also known as LiDAR, to reconnoitre the area. The development in drone and LiDAR-technology has fundamentally changed the mapping sector the recent years. Thus, it is relevant to explore whether this technology can contribute to solving the wading issue. The following thesis question shall therefor be explored:

*How can you locate wading areas with LiDAR on a drone?*

To address how LiDAR-drones can locate wading areas, the methodology of technological science has been applied. The purpose of this method is always to produce a new or improved technology, here, a new method for reconnaissance of wading areas. The approach consists of comprehensive theoretical data on wading areas, LiDAR, digital elevation models, ArcGIS Pro, and data collection with LiDAR-drones. The theoretical basis thus forms the foundation for a new method for locating wading areas.

To answer the thesis question, a tool that automatically locates the most suitable wading route has been created. During five field tests, the tool was able to produce the recommended wading route to all areas. The conclusion is that the tool works, but through the course of this paper several key weaknesses will also be discussed.

The only input data the tool uses is the data that the LiDAR-drone collects. For the tool to work, it is concluded that this data is the most important success criterion. Data collection has been solved with good planning, but it is still difficult. It is especially challenging in areas where the rivers have turbid water or are too deep for the LiDAR-sensor to penetrate to the bottom.

# Ordforklaring

---

<b>ALB</b>	Batymetrisk LiDAR-drone (eng. Airborne LiDAR Bathymetry)
<b>ArcGIS Pro</b>	Programvare for å behandle geografiske informasjonssystemer
<b>Drone</b>	Ubemannede helikoptre som kan fjernstyres eller fly autonomt
<b>Las-fil</b>	Filformatet for lagring av punktskyer
<b>LiDAR</b>	Light Detection and Ranging, en fjernmålingsmetode som benytter lys i form av en pulserende laser til å måle avstander
<b>MilGeo</b>	Forkortelse for både faget militær geomatikk og personer med kompetanse innen fagområdet
<b>ModelBuilder</b>	ArcGIS Pro sitt visuelle programmeringsspråk
<b>nDOM</b>	Normalisert digital overflatemodell, produseres ved å subtrahere DOM fra DTM
<b>Punktsky</b>	Punkter plassert i et tredimensjonalt rom
<b>Rover / basestasjon</b>	GNSS mottaker
<b>Secchidybde</b>	Dybden en secchiskive ikke lenger er synlig når den er nedsunket i vann
<b>Vade</b>	Kryssing av elv/bekk/vassdrag der vann trekker oppover kjøretøyet, samtidig som at det har kontakt med bakken gjennom hele krysningen
<b>Vadeområde</b>	Et avgrenset geografisk område der det er mulig å foreta vading

---

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag .....	II
Summary .....	III
Ordforklaring .....	IV
Innholdsfortegnelse.....	V
Figurliste .....	VIII
Tabelliste.....	XI
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling .....	3
1.3 Forutsetninger og avgrensninger .....	3
1.4 Strukturen i oppgaven.....	5
2 Metode.....	6
2.1 Teknologivitenskapelig metode .....	6
2.2 Metoden i denne oppgaven .....	8
2.3 Kildekritikk .....	10
3 Teoretisk grunnlag .....	12
3.1 Vadeområde .....	12
3.1.1 Metodikk for rekognosering av vadeområder.....	12
3.1.2 Krav til vadeområder .....	13
3.2 LiDAR .....	15
3.2.1 Definisjon på LiDAR.....	16
3.2.2 Tekniske aspekter ved LiDAR.....	18
3.2.3 Bølgelengde på laser .....	21
3.2.4 Dybdemåling.....	22
3.2.5 Lokalisering av vannoverflaten.....	25
3.2.6 Klassifisering .....	27
3.3 Digitale høydemodeller .....	29

3.3.1	Digital overflatemodell .....	30
3.3.2	Digital terrengmodell .....	31
3.3.3	Normalisert digital overflatemodell .....	31
3.4	Innsamling.....	32
3.4.1	Flyplan .....	33
3.4.2	Nøyaktighet.....	37
3.4.3	Vær.....	39
3.4.4	Kamera.....	39
3.5	Bearbeiding av data og analyse.....	40
3.5.1	Weighted Overlay .....	40
3.5.2	Focal Statistics .....	42
3.5.3	Cost Distance og Cost Path.....	44
4	Vademetoden .....	47
4.1	Tilrettelegging .....	48
4.2	Bruk av vadeverktøyet .....	51
4.2.1	Filbane og input .....	52
4.2.2	Generering av kostnadsraster.....	54
4.2.3	Start og slutt punkt for kostnadsanalysen .....	56
4.3	Feilmelding og advarsler.....	58
4.4	Egne tilpasninger.....	59
4.5	Evaluering av resultater.....	60
5	Resultater .....	62
5.1	Inndata.....	62
5.2	Parametere brukt under forsøket.....	70
5.3	Resultater fra oppgaven.....	70
5.4	Vurdering av resultatet.....	73
6	Drøfting .....	77
6.1	Teknologivitenskapelig metode .....	78
6.2	ALB – innsamling og datakvalitet .....	79
6.3	Vadeverktøyet .....	81

6.4	Bærekraft.....	84
7	Konklusjon.....	85
8	Videre arbeid .....	87
	Litteraturliste.....	89

# Figurliste

Figur 1: Krav til vadeområder.....	4
Figur 2: Teknologivitskapelig metode .....	8
Figur 3: Teknologivitskapelig metode i denne oppgaven. ....	8
Figur 4: Homogen punkttetthet, vannoverflaten, vannsøylen og bunnen av vannet .....	15
Figur 5: De essensielle optiske komponentene til et LiDAR system.....	16
Figur 6: IMU beregner heading, pitch og roll.....	17
Figur 7: Fotavtrykk til laserpuls.....	19
Figur 8: Ulike skannemønstre.....	21
Figur 9: Absorpsjonskoeffisienten til sjøvann, og dempingen ved forskjellige dybder. ....	22
Figur 10: Snells lov .....	23
Figur 11: Endring av retning når laser treffer vann .....	23
Figur 12: Spredningseffekt til laseren i vann.....	24
Figur 13: Secchiskive for å måle siktedyp.....	25
Figur 14: Formel for reflektert energi fra vannoverflaten og symbolforklaring.....	26
Figur 15: Mikrofasett og fasetter på diamanter.....	27
Figur 16: Speilende (specular) og diffus komponenten.....	27
Figur 17: RIEGL VQ-840-G ekkosignal som representerer overflaten.....	28
Figur 18: Før og etter interpolering .....	30
Figur 19: De ulike høydemodellene.....	32
Figur 20: LiDAR- og flygnignsspesifikasjoner som blir til flyplan. ....	33
Figur 21: Illustrasjon av flyhøydens påvirkning på skannebredden og punkttetthet. ....	34
Figur 22: Punkttetthet gitt høyde og hastighet for ASTRALite EDGE™ .....	35



Figur 23: Punkttetthet gitt høyde og hastighet for RIEGL VQ-840-G punkttetthet .....	35
Figur 24: Sideoverlapp.....	36
Figur 25: Hull, det hvite området, i datasettet mellom flystripene. ....	36
Figur 26: Flight plan laget med programvare .....	37
Figur 27: Rover/basestasjon.....	38
Figur 28: Nadir retning . ....	39
Figur 29: Eksempel på Weighted Overlay verktøyet, med forklaringer.....	42
Figur 30: Utrekning av gjennomsnittlig verdi for en piksel, ved bruk av Focal Statistics. ....	43
Figur 31: Figurformer til nabolaget .....	43
Figur 32: Cost Back Link raster.....	45
Figur 33: Soneforklaring.....	46
Figur 34: Vademetoden.....	47
Figur 35: Hull i datasettet over område 4. ....	49
Figur 36: Hvordan velge linje på vektoren. ....	50
Figur 37: Hvordan legge til et attributfelt.....	50
Figur 38: Classification Codes.....	51
Figur 39: Vadeverktøyet vist i ArcGIS Pro. ....	52
Figur 40: Filbane og input.....	53
Figur 41: Point Spacing. ....	54
Figur 42: Generering av kostnadsraster .....	55
Figur 43: Start og slutt punkt for kostnadsanalysen velges ved hjelp av Select. ....	57
Figur 44: Feilmelding som følge av at ønsket GDB ikke er etablert. ....	58
Figur 45: Hvordan opprette en ny GDB manuelt.....	58
Figur 46: Advarsel om at Cost Distance og Cost Path er gjennomført, men ikke optimalt.....	59
Figur 47: Vekting av Reclass_Elvedybde (V) og Reclass_Slope_Bunn (H).....	60

Figur 48: De 5 analyseområdene. ....	63
Figur 49: 3D-visning av punktskyen fra område 4. ....	63
Figur 50: Områdedekkende punkttetthet for område 1 og 2.....	66
Figur 51: Områdedekkende punkttetthet område 3, 4 og 5. ....	67
Figur 52: Forskjell i punkttettheten mellom bunn og overflate i område 1.....	68
Figur 53 Hull oppstått i bunndatasettet over område 4.....	69
Figur 54: Interpolering i sving.....	69
Figur 55: Anbefalt vaderute for område 1-4. ....	71
Figur 56: Anbefalt vadeområde fra område 5.....	72
Figur 57: Innholdet i den nye GDB som produseres. ....	72
Figur 58: AnbefaltVaderute1 sett opp imot helning.....	73
Figur 59: AnbefaltVaderute1 sett opp imot evledybde.....	74
Figur 60: AnbefaltVaderute3 sammen med Reclass_Slope_Bunn og Reclass_Elvedybde.....	74
Figur 61: AnbefaltVaderute3 sammen med kostnadsrasteret. ....	75
Figur 62: Effekten bredde har på AnbefaltVaderute5.....	75
Figur 63: Elvekanten er utenfor kostnadsrasteret. ....	76
Figur 64 Teknologivitenskapelig metode i denne oppgaven. ....	79

# Tabelliste

Tabell 1: Momenter for rekognosering av vadestedet .....	14
Tabell 2 Teknisk data på RIEGL VQ-840-G og ASTRALite EDGE™ .....	18
Tabell 3: Parametere for Figgjo innsamlingen .....	64
Tabell 4: Punktavstand og punkttetthet til LAS-filene .....	65
Tabell 5: Parametere brukt under forsøket.....	70

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Terrenget er en avgjørende faktor for planlegging og gjennomføring av militære operasjoner. Sun Tzu er av mange ansett som grunnleggeren av militærteori. Han mente at terrenget var en av fem faktorer som til sammen utgjør krigens grunnleggende vesen og oppsummerer det slik: hvis du kjenner fienden og deg selv vil seieren aldri bli truet. Kjenner du i tillegg terrenget og værforholdene vil seieren være fullstendig (Sunzi & Bin, 1999, ss. 3-81).

Carl von Clausewitz er en av tidenes viktigste militærteoretikere og underbygger Sun Tzus påstander. Han hevdet at terrenget har en nær og alltid tilstedeværende påvirkning på krigføring. Påvirkningen er ifølge Clausewitz kritisk for både gjennomføringen og planleggingen av militære operasjoner. Han hevdet videre at terrenget påvirker militære operasjoner på tre måter, hvorav alle andre typer påvirkning kan spores tilbake til disse: (1) som et hinder for bevegelse, (2) som et hinder for synlighet og (3) som dekning for ild (Clausewitz, 1989, s. 348).

Elver og våte gap er et hinder for bevegelse. Clausewitz forklarer at elver først og fremst er et hinder som svekker mobiliteten og forskyver manøveren. Han hevdet også at elver i praksis påvirker militære styrkers bevegelse i større grad enn det teorien tilsier. Selv om elver er et betydelig hinder, hevdet han likevel at det er få elver som ikke kan omgås eller krysses (Clausewitz, 1989, ss. 532-533).

Også i moderne krigføring har elver betydning for landstyrkenes manøverrom. Spesielt påvirker elver offensive operasjoner, hvor initiativ og tempo ofte er nøkkelfaktorer for suksess (Hosler, 2020, s. 57). Planleggingsverktøyet *Stabshåndbok for Hæren – Plan- og beslutningsprosessen* og *Håndbok Militær Geomatikk (MilGeo) innen landmilitær virksomhet* tar også opp temaet. Her beskrives elver som naturlige hindre som enten må forseres ved hjelp av ferge, brolegger eller vading (Generalinspektøren for Hæren, 2015, s. 126; Sjef Hærens våpenskole, 2019, s. 36).

For å finne kryssningspunktene til elver er det viktig å gjennomføre en lendeanalyse av området. Militære geografer (MilGeo) har en særlig plass i arbeidet med lende vurderinger, og kan bidra med tekniske lendeanalyser som gir hurtige og nøyaktige resultater (Generalinspektøren for Hæren, 2015, s. 125). Prosessen kan deles i to; først analysere faktorer utenfor elven, slik at egnede vadeområder lokaliseres. Deretter må elven ved de tiltenkte vadeområdene analyseres, slik at det blir bekreftet om det er mulig å vade der eller ei.

Droner med laserskannere, også kalt Light Detection and Ranging (LiDAR), har fundamentalt endret kartleggingssektoren de siste årene, og kan anvendes til å samle inn data om vadeområdet (Mandlbürger et al., 2020, s. 1). LiDAR er en fjernmålingsmetode som benytter lys i form av en pulserende laser til å måle avstander (US Department of Commerce, 2021). Drone er et samlebegrep for ubemannede fartøy som kan fjernstyres eller bevege seg autonomt (Herrick, 2017). Denne teksten bruker drone som en definisjon på ubemannede helikoptre, som kan fjernstyres eller fly autonomt. Ved å koble LiDAR til dronefunksjonen oppstår flere fordeler. LiDAR-droner kan fly lavt, som gir en lav avstand mellom sensor og objekt, og har større smidighet enn fly og bemannede helikoptre. På grunn av fremgang innen drone- og LiDAR-teknologi, gir forminskningen og forbedringen av sensorene enestående romlig oppløsning og nøyaktighet (Mandlbürger et al., 2020, ss. 1-2).

LiDAR på drone er et nytt konsept, og generelt sett en lite utprøvd teknologi. Hærens våpenskole (HVS) har på bakgrunn av LiDAR-droners potensiale og lite kunnskap om temaet, ytret et ønske om å utforske LiDAR på drone. Det kan videre forekomme mangelfull geografisk informasjon når det gjelder høydemodeller over elver. De stedene det finnes høydemodeller over elver er det likevel behov for å ettergå dybdeforholdene, ettersom høydemodellene ikke tar hensyn til elvenes varierende dybder, på grunn av erosjon og regnforhold. Mangelen på data gjør at det er vanskelig å anslå dybde og helning under vann. Dette gjør det vanskeligere for en MilGeo å lokalisere egnede vadeområder og svekker hens evne til å bidra med oppdrag- og beslutningsstøtte.

Etttersom teknologi har en sentral rolle i samfunnet, er det viktig at den bidrar til samfunnsmessig- og miljømessig bærekraft (Bakshi, 2019, s. 56). Ved å utnytte ny drone- og LiDAR-teknologi kan dette målet nås. Teknologien kan derfor tjene flere formål enn kun militære. Geodata er en viktig ressurs i samfunnsplanlegging og for verdiskapning rettet mot næringslivet og innbyggere

(Miljøverndepartementet, 2012). LiDAR-scanning er hovedmetodikken for produksjon av geodata som digitale høydemodeller (DHM) (Kartverket, 2022) og kan avledes til nyttige produkter som geanalyser, skogtakstering ved å definere hogstvolum og masseberegninger. LiDAR-droner muliggjør også oppdatering av kartgrunnlag i sanntid, som kan benyttes til overvåking av vegetasjon rundt kraftlinjer og jernbanelinjer, smelting av isbreer, registrering av flom- og skredområder og ved naturkatastrofer som skogbrann. LiDAR-data spiller således en viktig rolle innen kartlegging, analyse og måling av FNs bærekraftsmål. Det er 17 bærekraftsmål og disse kan deles inn i økonomiske, sosiale og klimarettede mål (Stockholm Resilience Centre, 2016). Spesielt innen klimaendringer (mål 13) er LiDAR-droner nyttige, ettersom sensoren kan kartlegge hav- og vannområder (mål 14), og livet på land (mål 15). Avslutningsvis innebærer LiDAR-teknologi en effektivisering innen kartlegging, noe som frigjør ressurser og gjør at datainnsamlinger krever mindre ressurser, noe som vanligvis er synonymt med bærekraft (Bakshi, 2019, s. 56). Hensikten med oppgaven er dermed å utforske LiDAR-droner og dens evne til innsamling av data om våte gapet.

## 1.2 Problemstilling

For at Forsvaret faktisk kan anvende LiDAR på drone er det nødvendig å finne en metode for innsamling og prosessering. På bakgrunn av HVS sitt ønske om å utforske mulighetene til LiDAR på drone og forfatterens egen nysgjerrighet på tematikken, reises følgende problemstilling:

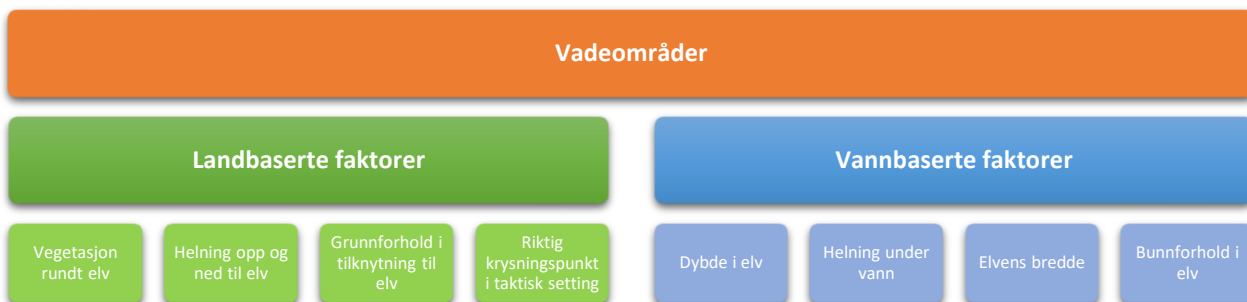
*Hvordan kan man lokalisere vadeområder med LiDAR på drone?*

## 1.3 Forutsetninger og avgrensninger

Oppgaven ble skrevet i en militær kontekst på Krigsskolen, og senere adaptert til NTNU sine læringsmål. Flere begreper som anses forståelige for militært personell vil derfor beskrives slik at ikke-militære får samme forståelse for oppgaven.

LiDAR er et tema som i liten grad blir dekket i geomatikk-utdanningen på Krigsskolen. Oppgaven er derfor skrevet for personell med grunnleggende forståelse innenfor GIS (geografisk informasjonssystem), men som ikke har en grunnleggende LiDAR-forståelse. Dette medfører et omfattende teoretisk grunnlag.

For å finne egnede vadeområder er det flere faktorer som må medberegnes. Disse er i oppgaven prinsipielt delt mellom landbaserte- og vannbaserte faktorer som vist på Figur 1.



Figur 1: Krav til vadeområder.

Ingen av faktorlistene er uttømmende og de vil variere med oppdragets natur. De landbaserte faktorene endrer seg lite over tid og er ofte godt kartlagt, dette gjør at en generell vurdering på de landbaserte faktorene kan finne aktuelle vadesteder. Det forutsettes at det har blitt gjennomført en analyse på de landbaserte faktorene for å spisse oppgaven mot selve analysen på vadestedet.

Det avgrenses mot å vurdere bunnforhold og styrken på strømmen, fordi disse vannbaserte faktorene er vanskelige å detektere med LiDAR. De gjenstående og relevante faktorene er derfor vanddybde og helning under vann.

For å kunne avkrefte eller bekrefte hvor det er mulig å vade er det i oppgaven laget et verktøy som automatisk beregner dette, men verktøyet er avgrenset vekk fra å ta hensyn til det taktiske scenarioet. Denne informasjonen vil fungere som beslutnings- og oppdragsstøtte, og hvor en eventuell vadeoperasjon blir gjennomført må ses i sammenheng med en totalvurdering av det taktiske scenarioet.

De lokaliserte vadeområdene vil vanligvis inngå i en etterretningsmessig vurdering av operasjonsområdets påvirkning på operasjoner, og i produktet bli angitt en vurdering på vadeområdets egnethet. Det er derfor viktig å understreke at egnetheten til vadeområdet blir vurdert både i selve verktøyet presentert i oppgaven, og når det inngår i et etterretningsprodukt.

Det har ikke blitt gjennomført en selvstendig innsamling av data med LiDAR-drone, ettersom dette er svært dyrt. Oppgaven tar derfor utgangspunkt i en innsamling gjennomført av selskapet Nordic Unmanned over Figgjoelva ved Stavanger.

I flere deler av Norge, spesielt Nord-Norge der Brigade Nord har sitt hovedsete, er det snø og is store deler av året. Oppgaven vil likevel ikke vurdere vadeområder om vinteren, på grunn av tilgjengelig tid og den svake penetreringsevne som LiDAR har i snø og is (Pfennigbauer & Ullrich, 2011, s. 4).

To LiDAR-sensorer blir presentert i oppgaven som referansepunkter, men det vil ikke bli vurdert om Forsvaret bør gå til innkjøp av LiDAR-sensorer og eventuelt hvilken.

Opgaven vil se på generelle prinsipper bak det å lokalisere vadeområder, og ikke vurdere spesifikke kjøretøy sin vadeevne. Årsaken er at oppgaven skal forbli UGRADERT.

## 1.4 Strukturen i oppgaven

Kapittel to redegjør for den metodiske fremgangsmåten, og hvordan denne brukes i oppgaven. I tillegg rettes et kritisk blikk på kildevalgene i oppgaven. Kapittel tre presenterer hoveddelen av oppgavens teoretiske rammeverk. Her beskrives de sentrale begrepene og konseptene; vadeområde, LiDAR, digitale høydemodeller, innsamling og bearbeiding av data. I kapittel fire forklares nyskapningen i oppgaven, et verktøy som lokaliserer vadeområder. Videre presenterer kapittel fem resultatene verktøyet fikk da det ble testet ut i fem feltforsøk. Kapittel seks drøfter den metodiske fremgangsmåten brukt i oppgaven, verktøyet, LiDAR-data og bærekraft. Til slutt presenteres konklusjonen i kapittel syv, og mulighetene for videre utbedring av verktøyet laget i oppgaven og konseptet LiDAR på drone i kapittel åtte.



## 2 Metode

Noe av det som kjennetegner vitenskapen er at det stilles metodiske krav til måten det anskaffes kunnskap på (Norborg, 1981, s. 1). Tranøy går så langt som å hevde at «Å være vitenskapelig er å være metodisk» (1986, s. 127). I tillegg til å være en kritisk del av vitenskapen, avgjør også problemstillingen hvilken metode som bør benyttes (Dalland, 2017, s. 51). Valget av metode er derfor en viktig del av forskningsprosessen, ettersom ulike metoder egner seg til å belyse ulike temaer.

Ketil Stølen er forskningsleder ved SINTEF og professor ved institutt for informatikk ved Universitetet i Oslo. Han hevder at når man skal drive med teknologiforskning for å skape nye verktøy eller fenomener, er man avhengig av å bruke en metode som skiller seg fra de klassiske vitenskapene. Klassisk vitenskap, som naturvitenskap og samfunnsvitenskap, hevder han er mer egnet til å forstå verden slik den er, og ikke til å skape noe nytt (Stølen, 2019, s. 2). Ettersom det i oppgaven søkes etter å lage en ny metode med LiDAR-droner for å rekognosere vadeområder, vil den teknologivitenskapelige metode benyttes for å besvare problemstillingen.

### 2.1 Teknologivitenskapelig metode

Teknologivitenskapens metode, også kalt fremgangsmåten, forklarer stegvis hvordan man kommer frem til teknologivitenskapens forskningsresultat, som alltid er et nytt eller forbedret artefakt (Stølen, 2019, s. 19). Stølen bruker artefakt istedenfor teknologi for å beskrive forskningsresultatet. Artefakt blir definert som «(...) en ting, et objekt eller et fenomen skapt av mennesker» (2019, s. 10). Siden teknologi omhandler menneskeskapt gjenstander og de ferdigheter som anvendes til å fremstille eller bruke disse, er disse derfor artefakter. Begrepene er svært like, men nyanser skiller dem. Mange anser ikke prosedyreartefakter, eksempelvis prosedyrer for hvordan man slukker branner, som teknologi. Derfor benyttes det flere begreper artefakt istedenfor teknologi for å beskrive forskningsresultatet innen teknologivitenskap (Stølen, 2019, s. 11). Stølens definisjon på teknologivitenskap brukes derfor i denne oppgaven:

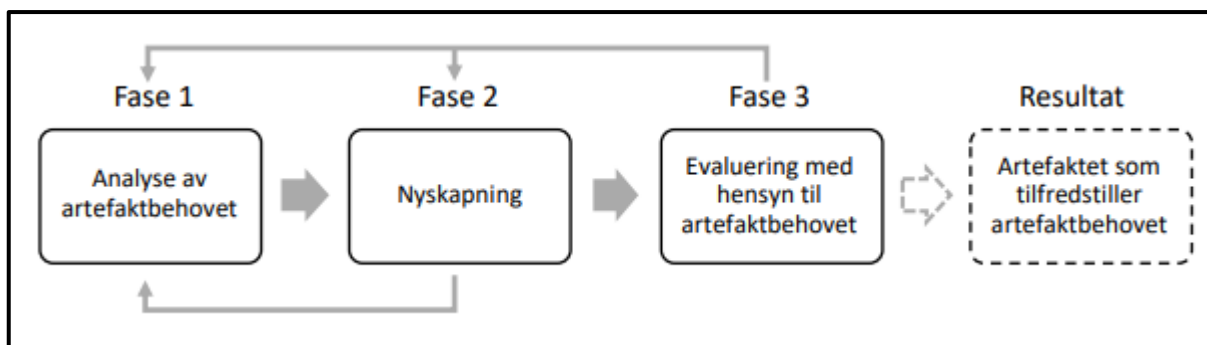
«Teknologivitenskap er vitenskap der man fokuserer på å utvide virkeligheten med nye eller vesentlig bedre artefakter» (2019, s. 15).

Teknologivitenskap etterstreber altså å skape nye, eller forbedrede, redskaper og immaterielle fenomener. Redskaper dekker alt fra enkle verktøy, som sag og øks, til avanserte satellitter. Immaterielle fenomener kan eksempelvis være en forretningsprosess eller et dataprogram. Teknologiforskere leverer også sjeldent komplette artefakter. Det er som regel et design eller en prototype som eventuelt kan videreutvikles av andre (Stølen, 2019, s. 19). Oppgavens mål er å skape en metode for å rekognosere vadeområder, og er derfor et immaterielt artefakt med hensikt å forbedre dagens metoder. Oppgavens resultat kan også kategoriseres som en prototype (Stølen, 2019, s. 54), altså en modell av artefaktet som kan videreutvikles av andre.

Artefaktet metoden skal resultere i kommer av et menneskelig behov for en ny eller forbedret metode eller verktøy, kalt et artefaktbehov. Artefaktbehovet kan være definert av andre, som bedrifter og privatpersoner, men det er forskerens oppgave å fremstille eller finne opp et artefakt som tilfredsstillende dette behovet (Stølen, 2019, ss. 19-20). Artefaktbehovet i denne oppgaven stammer fra forfatterne selv og ytringer fra HVS om å undersøke mulighetene LiDAR på drone har.

Teknologivitenskapelig metode deles inn i tre faser. Fasene er sekvensielle, men prosessen er iterativ. Det er derfor naturlig å gå frem og tilbake mellom fasene i forskningsprosjektet, slik Figur 2 demonstrerer. *Fase 1* er analyse av artefaktbehovet og her skal et potensielt artefaktbehov karakteriseres. *Fase 2* er nyskaping og her skal forskeren skape et artefakt som tilfredsstillende artefaktbehovet. Dette er den kreative delen av forskningsprosjektet hvor nyskapingen skjer. Nyskapingen kan både være banebrytende eller beskjeden, så lenge det fører til utvikling, eksempelvis justering av et eksisterende artefakt for å dekke et nytt artefaktbehov (Stølen, 2019, ss. 19-20). Stølen forklarer at idegenerering er blant metodene som er viktigst for å klare å gjennomføre nyskaping og kan gjøres på flere måter. Idegenerering via litteraturstudier vil gi forskeren informasjon om tematikken. Eksperimentering, som innebærer å prøve seg frem, teste ut og simulere artefaktet, vil gjøre at forskeren kontinuerlig kan forbedre produktet. Idegenerering gjennom samtale og diskusjon vil avslutningsvis gjøre det mulig for forskerne å tilnærme seg tematikken fra ulike perspektiver og gir rom for kunnskapsutveksling (2019, ss. 46-52). *Fase 3* er

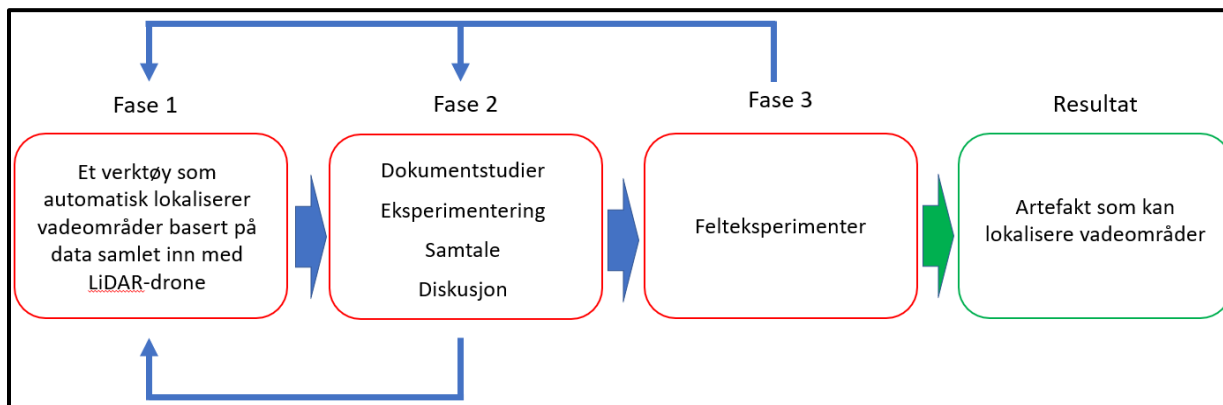
evaluering og skal svare på om artefaktet tilfredsstillende det identifiserte artefaktbehovet. Alle metoder for evaluering har styrker og svakheter, og det er derfor ønskelig å maksimere henholdsvis generalitet, presisjon og realisme (Stølen, 2019, ss. 52-55). Dette lar seg sjeldent gjøre samtidig og det er derfor behov for flere evalueringsformer for å triangulere utfallet av evalueringsmetodene. Er evalueringen vellykket, kan forskeren hevde å ha lyktes. Dersom evalueringen spriker må enten behovskriteriene, eller artefaktet, endres og reevalueres (Stølen, 2019, ss. 19-20).



Figur 2: Teknologivitenenskapelig metode (Stølen, 2019, s.20).

## 2.2 Metoden i denne oppgaven

Den teknologivitenenskapelige metoden vil i denne oppgaven bli anvendt som vist på Figur 3.



Figur 3: Teknologivitenenskapelig metode i denne oppgaven.

**Fase 1** består av en problemanalyse som skal klargjøre og presisere problemet. For oppgaven innebærer det å karakterisere og avgrense artefaktbehovet som skal tilfredsstilles (Stølen, 2019, s. 35). Dette er dokumentert i kapittel en. Kapittelet leder fram til problemstillingen: *Hvordan kan man lokalisere vadeområder med LiDAR på drone?* Problemstillingen er utformet som et spørsmål og er etter Stølens beskrivelse ikke et egnet artefaktbehov. Han mener at artefaktbehovet kan komme i form av suksesskriterier, altså en «(...) betegnelse for om man har lyktes med et gitt foregående» (Stølen, 2019, s. 41). Med utgangspunkt i problemstillingen betegnes artefaktbehovet til å være: *Et verktøy som automatisk lokaliserer vadeområder basert på data samlet inn med LiDAR-drone*. Verktøyet kalles heretter *vadeverktøyet*.

**Fase 2** er nyskapningen som skal skape selve artefaktet, som tilfredsstillers artefaktbehovet (Stølen, 2019, s. 45). Dette dokumenteres i kapittel fire. For å fremme nyskapning har det blitt anvendt idegenerering i form av dokumentstudier, eksperimentering, samtale og diskusjon. Dokumentstudiene har gitt informasjon om temaet som er nødvendig for å klare å skape et nytt artefakt. Samtale og diskusjon med relevant fagpersonell har blitt gjennomført for å få dypere forståelse for temaet, spesielt innen LiDAR. Til slutt har eksperimentering blitt anvendt i stor grad for å kunne teste ut analyser og metodikker på faktiske datasett. Resultatet er et verktøy som automatisk finner egnet vaderute. Verktøyet er et produkt av idegenereringen, med stort fokus på eksperimentering.

**Fase 3** evaluerer nyskapningen og sjekker om det nye artefaktet tilfredsstillers artefaktbehovet (Stølen, 2019, s. 52). Dette dokumenteres i kapittel fem. Evalueringen ble gjennomført gjennom felteksperimenter og innebærer at artefaktet blir testet ut i sine naturlige omgivelser med mulighet for forskeren å bryte inn. Felteksperimenter er realistiske, men ikke særlig presise ettersom det er flere faktorer som kan påvirke resultatet, og som vanskelig kan kontrolleres (Stølen, 2019, ss. 53-56). Det ble gjennomført fem felteksperimenter, som skaper generalitet innen denne evalueringsformen.

## 2.3 Kildekritikk

Oppgavens teoretiske grunnlag er basert på dokumentstudier og kunnskapsutveksling med eksperter innen geodesi og LiDAR. Dokumentene er hovedsakelig hentet inn etter dialog med ekspertene. En svakhet med dette er at de er med på å styre hvilken retning innhenting av kilder gjøres. Andre dokumenter har blitt hentet fra åpne kilder og relevante lærebøker. Ved innhenting av data fra åpne kilder har det blitt tilstrebet å anvende fagfelleverderte dokumenter. Det har også blitt lagt vekt på tekster og forfattere som det er henvist til i andre relevante tekster, eller som har skrevet andre relevante tekster. Dette har ført til at flere tekster er utformet av samme persongruppe og kan gjøre at deres syn på tematikken former oppgaven. Eksempelvis har gruppen anvendt flere tekster av Dr. Mandlbürger. Selv om hans syn på tematikken ofte blir brukt i teksten, har han doktorgrad i geodesi med ekspertise i dybdedata, også kalt batymetri, og har publisert mange tekster om temaet. Tekster fra fagpersoner kan også ha en svakhet i form av positivisme, altså at forfatteren fremmer sitt eget fagfelt. Der ukjente kilder blitt anvendt har det blitt tilstrebet å faktasjekke dette opp mot andre kilder. Søkemetodikken og -ordene gruppen har brukt kan også ha påvirket oppgaven.

Ved dialog med fagpersonell kan spørsmålene som ble stilt og retningen samtalen ble ført, være en svakhet ved at deler av tematikken ble utelatt. Flere av de gruppen har diskutert med er ansatte i private selskaper, noe som kan påvirke informasjonen de har distribuert, ettersom selskapets endelige målsetning er å selge sine produkter og tjenester.

Teknologien som tillater LiDAR-droner å gjennomføre målinger av elver er ny, og flere eldre kilder vil derfor være mindre relevante. Eksempelvis beskriver Guenther et al. at lokalisering av vannoverflaten med grønn laser er tilnærmet umulig (2000, ss. 6-9). Algoritmer og programvare har ført til at dette er den vanligste metoden å anvende i dag og kan oppnå nøyaktighet ned til én cm (ASTRALite, 2020, ss. 1-2).

De fleste som utvikler LiDAR-teknologi er private bedrifter. For å ikke avsløre deres teknologi til andre selskaper innen samme fagfelt er det en del hemmelighold rundt hvordan de ulike bedriftene løser ulike problemer, som for eksempel prosessering og klassifisering av LiDAR-data (Kinzel et

al., 2013, s. 4). Dette skaper et informasjonsgap og tvinger gruppen til å bruke flere eldre kilder og er en svakhet med oppgaven.

## 3 Teoretisk grunnlag

Dette kapitlet tar for seg det teoretiske grunnlaget som ligger til grunn for vadeverktøyet. Det teoretiske grunnlaget beskriver først kravene til vadeområdet og metoden som brukes av ingeniørrekognoseringsstroppene for å måle vanddybde. For å forstå vadeverktøyets oppbygning og evne å feilsøke i det, beskrives LiDAR, deretter digitale høydemodeller, innsamling av data og til slutt bearbeiding og analyse av data.

### 3.1 Vadeområde

Vading er forflytning delvis nedsunken i vann eller andre væsker, der en har kontakt med bunnen under forflytningen (Cambridge Dictionary, u.å.). For mennesker betyr dette at de ikke kan benytte normal gange, og for kjøretøy betyr det at det ikke kan kjøre i normal hastighet og i tillegg må ta særlig hensyn. *UD 2-1 Forsvarets sikkerhetsbestemmelser for landmilitær virksomhet* definerer vading ut ifra kjøretøytype og hvor langt opp på kjøretøyet vann kan komme uten at det ødelegges (Generalinspektøren for Hæren, 2016, s. 194). Vading med kjøretøy defineres derfor som kryssing av elv/bekk/vassdrag der vann trekker oppover kjøretøyet, samtidig som at det er kontakt med bakken gjennom hele kryssningen. Et vadeområde defineres dermed som et avgrenset geografisk område der det er mulig å foreta vading.

#### 3.1.1 Metodikk for rekognosering av vadeområder

I militær kontekst er det vanligvis ingeniørrekognoseringsstropper som gjennomfører måling av dybdeforhold. Dette gjennomføres med lite avanserte metodikker. Det fremkommer etter dialog med troppssjefen for Brigade Nord sin ingeniørrekognoseringsstropp at metoden primært består av å kjøre sekshjuling eller CV90 stormpanservogn ut i vannet og måle dybden med en målepinne vinkelrett ned i vannet (O.-K. Aarseth, personlig kommunikasjon, 4. november 2021). Hvis det er for dypt for dette kan en gå ut i vannet med vadebukser. Er ikke disse metodene mulig å

gjennomføre måler dykkere vanndybden med en dykkerklokke (trykklokke) av typen Suunto Vyper.

### 3.1.2 Krav til vadeområder

Vading er en naturlig, men krevende, del av landoperasjoner (Sjef Hærens våpenskole, 2019, s. 31). Det er derfor en rekke krav som skal forsikre at det er trygt å vade. *Håndbok Ingeniørrekognosering* beskriver kravene til vadeområdet (2019, ss. 31-34), vist i Tabell 1. Punktene markert gult er de faktorene som er inkludert i vadeverktøyet. Under *Helning opp og ned av vannet*, er det helningen under vann og bredden til kjøretøyet som blir vurdert.

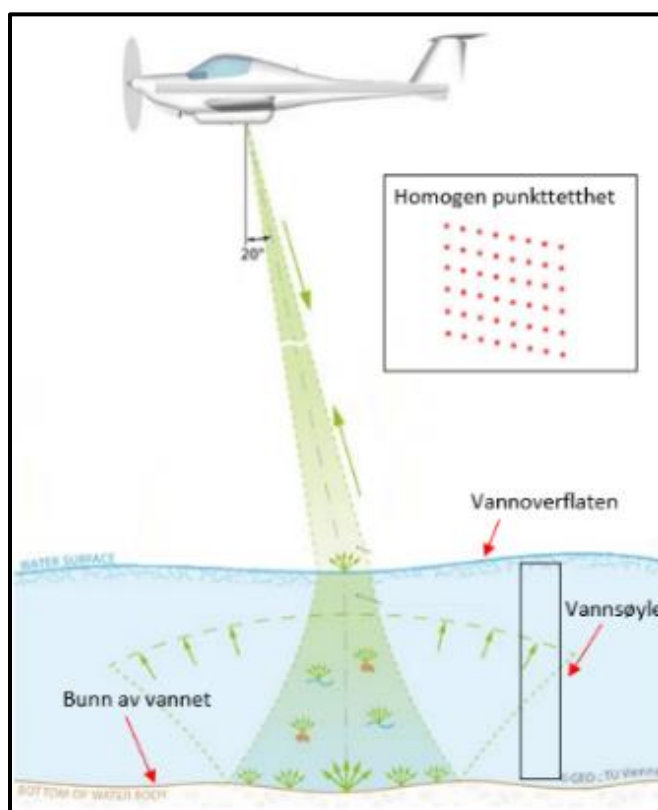


Tabell 1: Momenter for rekognosering av vadestedet, gule punkter er inkludert i vadeverktøyet (Sjef Hærens våpenskole, 2019, ss. 31-32).

Hva	Hvor	Merknad
<b>Posisjon</b>		
<b>DTG</b>		For senere bruk. Vannstanden vil påvirkes av snøsmelting, regntid, tørketid.
<b>Nedbør</b>		For senere bruk. Vannstanden vil variere med mye eller lite nedbør.
<b>Tilkomstakser</b>	Begge sider av vadestedet	
<b>Elvebredden</b>	Begge sider av vadestedet	Elvebredden skal være fri for hindringer både over og under vann. Det bør ikke være myrlendt.
<b>Helning opp og ned av vannet</b>	Begge sider av vadestedet	Bredden og bunnen skal være slik at vognen kan kjøre og vade mest mulig vinkelrett på ut- og ilandkjøringsstedet. Ved ut- og ilandkjøringsstedet skal det være jevn skråning over og under vannet, og det skal ikke være så bratt at vannet utilsiktet kan renne inn gjennom vognens luker / overstige maksimal vadedybde. Ved vertikal kant på ilandkjøringsstedet må denne ikke overstige kjøretøyets klatreevne.
<b>Ising</b>	Langs kanten og på bunnen	Dersom det er en iskant, kan kjøretøyet stange oppunder på tur opp av vannet. Ved ising under vann vil det være fare for at kjøretøyet ikke kommer opp av vannet. Husk at det er mindre marktrykk på kjøretøy i vann.
<b>Strømhastighet</b>		Strømhastigheten og vannføringen må ikke kunne medføre at vognen blir revet med av strømmen.
<b>Bunnforhold</b>		Bunnen på overgangsstedet skal være fast nok til å bære vognen og være fri for hindringer. Ved behov skal det brukes dykkere for å vurdere dette.
<b>Bredde på gapet</b>		Nøyaktigheten krever kun anslag.
<b>Vannstand</b>	Dypeste punkt	For senere bruk må det tas en vurdering på om hvordan vannstanden er i forhold til normalen.
<b>Vannflaten</b>		Vannflaten skal være fri for større grener, stokker o l.
<b>Behov for utbedring</b>		Hva må gjøres, hvilke ressurser er det behov for, og hvilke tidsaspekt er det snakk om?

## 3.2 LiDAR

Tradisjonelt har båter utstyrt med ekkolodd blitt brukt til å kartlegge batymetri. Mandlbürger et al. forklarer at dette fungerer svært godt på dypt vann, men er lite anvendbart på grunnere områder, som kystsonen og elver. De hevder videre at batymetriske LiDAR-droner (ALB, eng Airborne LiDAR Bathymetry) står frem som et av de beste alternativene for kartlegging av disse områdene. ALB har fordelene av å (1) ha arealdekning kun avhengig av flyhøyden og ikke vannets dybde, (2) generere homogen punkttetthet, (3) simultankartlegge vannoverflaten, vannsøylen, bunnen av vannet og land, og (4) ikke ha kontakt med vannet, som gir store fordeler spesielt i naturreservater og for kartlegging av vannoverflaten, se Figur 4. (Mandlbürger et al., 2020, ss. 1-2). Dette kapittelet vil ta for seg definisjonen på LiDAR, dens tekniske aspekter, dybdemåling med sensoren og prinsipper for hvordan innsamlet data kan kategoriseres.

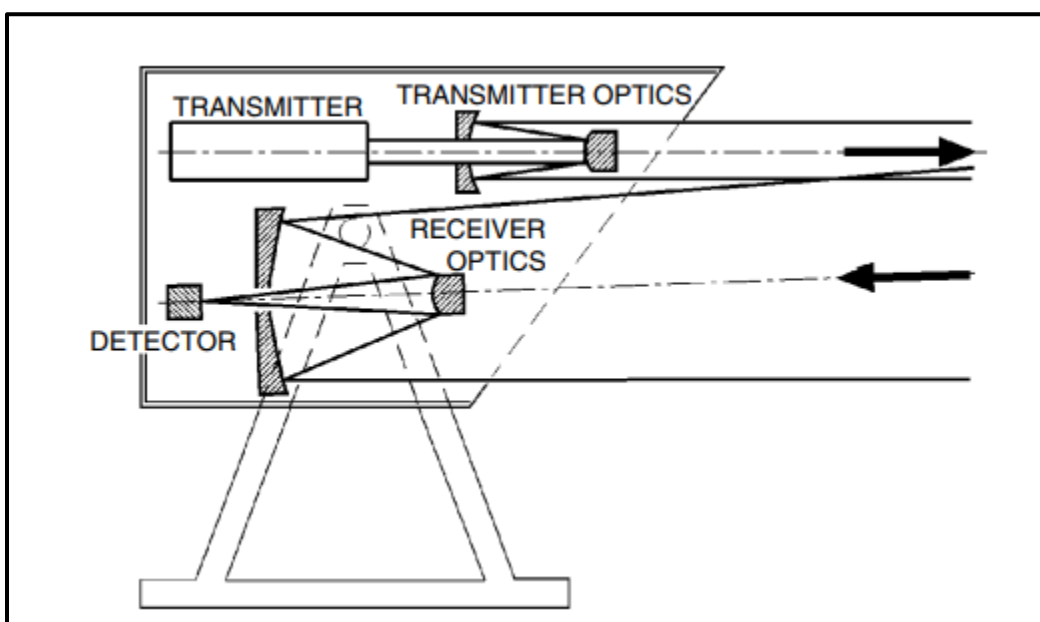


Figur 4: Homogen punkttetthet, vannoverflaten, vannsøylen og bunnen av vannet (Mandlbürger, 2017, s. 344).

### 3.2.1 Definisjon på LiDAR

Det finnes flere ulike definisjoner på LiDAR. Chuvieco definerer LiDAR på en lettfattet måte til å være en aktiv sensor som sender lyspulser ned på bakken, for å deretter samle refleksjonene (2016, s. 93). Fuji & Fukuch har en tyngre definisjon som forteller at LiDAR består av fem subsystemer, se Figur 5:

“(1) a transmitter, in all practical cases a laser, mostly, but not necessarily pulsed; (2) a transmitter optics; (3) a receiver optics; (4) a detector; and (5) an electronic system for data acquisition, processing, evaluation, display, and storage” (2005 s. 7)

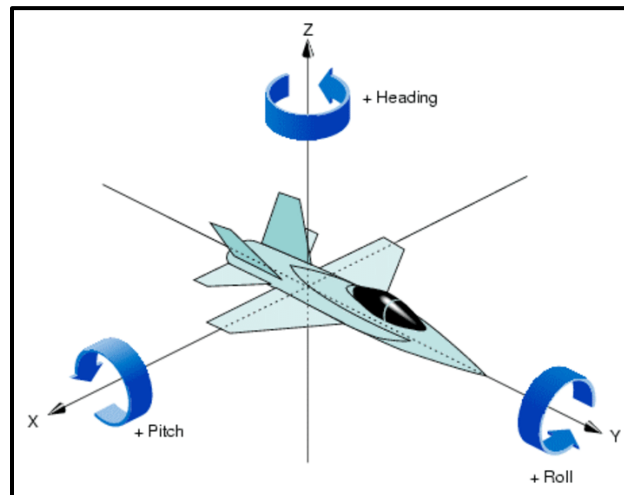


Figur 5: De essensielle optiske komponentene til et LiDAR system (Takashi Fujii & Tetsuo Fukuchi, 2005 s. 8).

Denne definisjonen belyser datamaskinen som en viktig del av LiDAR-sensoren, for å behandle, visualisere og lagre informasjonen lasermålingene henter inn. Den belyser også de fire komponentene som sender ut og registrerer laserpulsen. Denne definisjonen tar for seg en stillestående laser, men luftbårne innsamlere krever også flere sensorer for å kunne synkronisere og georeferere innsamlet data.

Chen legger i sin definisjon til at LiDAR er avhengig av et globalt navigasjonssatellittsystem (GNSS, eng global navigation satellitt system) og et treghetsmålesystemet (IMU, eng inertial

measurement unit) for å vite hvor sensoren henter inn data (2017, s. 26). Disse to systemene sammen med en datamaskin utgjør treghetsnavigasjonssystem (INS, eng inertial navigation system) som muliggjør synkronisering og georeferering av punktskyen, som er utgangspunktet for generering av høydemodeller (Kartverket, 2023). GNSS er et satellittsystem som kan gi høyde, lengde- og breddegrad over hele verden (Muhammad, 2014, s. 7). Det amerikanske GPS (Global Positioning System) er eksempelvis et GNSS. Ved tap av signal over en kort periode vil INSet fortsette å gi posisjon til dronen (Muhammad, 2014, s. 7). Basert på sist kjente posisjon klarer INSet å beregne nåværende posisjon ved hjelp av IMU og feilberegningsestimater (Petovello, 2003, s. 51; Muhammad, 2014, s. 22). Selv om INS muliggjør posisjonering med tap av GNSS, vil feilmarginen øke raskt (Muhammad, 2014, s. 30). IMU brukes også til å måle vinkelen LiDAR-sensoren er rotert rundt de forskjellige aksene, se Figur 6 (Chuvieco, 2016, s. 94).





Figur 6: IMU beregner heading, pitch og roll (Nikolaos & Kiyoshi, 2010, s. 22).

På bakgrunn av definisjonene vil denne oppgaven ta utgangspunkt i at LiDAR er et sammensatt system bestående av en laser, mottaker, INS og en datamaskin til å behandle innsamlet data.

### 3.2.2 Tekniske aspekter ved LiDAR

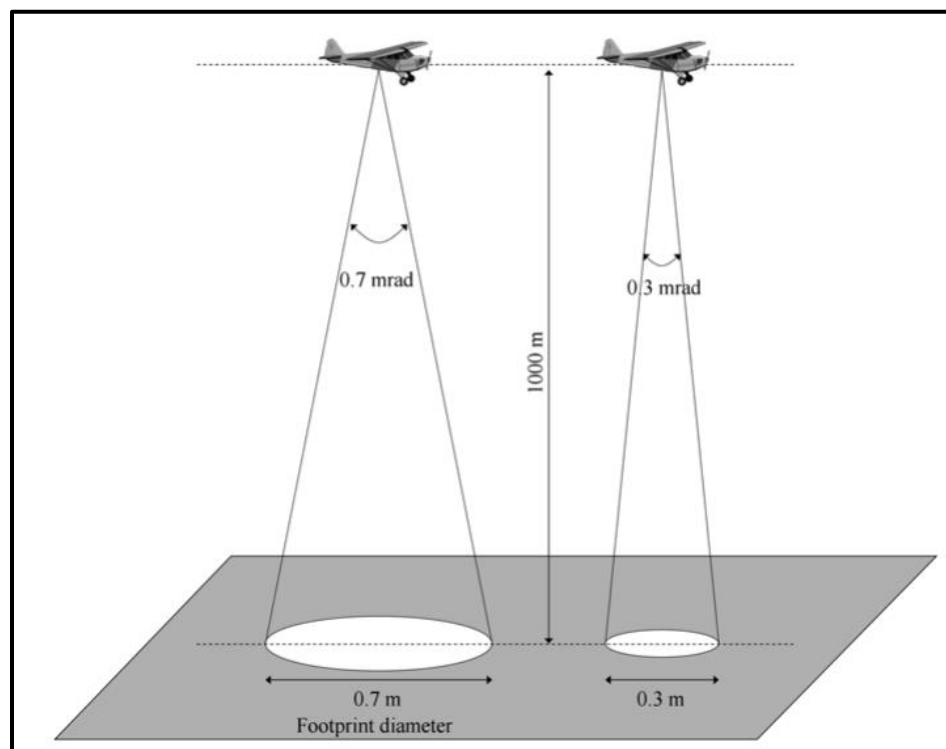
Dette underkapittelet tar for seg mange av de tekniske begrepene som er med på å bestemme LiDAR-sensorens egenskap til å måle vanddybder. For å eksemplifisere egenskapene til sensoren tar oppgaven utgangspunkt i to batymetriske LiDAR-sensorer, RIEGL VQ-840-G, heretter Riegl og ASTRALite EDGE™, heretter Astralite, se Tabell 2.

Tabell 2 Teknisk data på RIEGL VQ-840-G og ASTRALite EDGE™ (ASTRALite, 2020; RIEGL, 2021).

Sensor	RIEGL VQ-840-G	ASTRALite EDGE™
		
Vekt (kg)	12	5
Dimensjoner (cm)	36 X 29 X 20	27 X 23 X 19
Innebygget kamera	Ja	Nei, mulighet for eksternt kamera
Pulsrepetisjonsrate (kHz)	50-200	20
Pulsvarighet (ns)	N/S	N/S
Stråledivergens (mrad)	1-6	12
Laserfotavtrykk (mm) ved optimal flyhøyde	50-150 (1 mrad) 300-900 (6 mrad)	240-360
Skannemønster	Ellipse	Rettlinjet
Skannevinkel	$\pm 20^\circ = 40^\circ$ vinkelrett på flyretning $\pm 14^\circ = 28^\circ$ i flyretning	$\pm 15^\circ = 30^\circ$ i flyretning
Skannehastighet (Hz)	100	70
Optimal flyhøyde (m)	50-150	20-30
Maksimal flyhøyde (m)	250	60
Secchidybde	1,7 (200kHz), 1,8 (100kHz), 2,0 (50kHz), 2,2 (5kHz), 2,5 (0,5kHz)	1,5

Noe av det første som oppgis ved en LiDAR-sensor er hvilken *pulsrepetisjonsrate* (PRR) den opererer med, som regel oppgitt i kHz. PRR forteller hvor mange laserpulser som blir sendt ut over en gitt tid på et punkt i et forplantningsmedie (Weik, 2001). Hver emitterte laserpuls kan bli til et punkt i punktskyen. Høyere frekvens gir flere laserpulser og dermed større punkttetthet. PRR er derfor primærfaktoren for å bestemme punkttettheten LiDAR-sensoren kan fremskaffe (Csanyi & Toth, 2006, ss. 1-2).

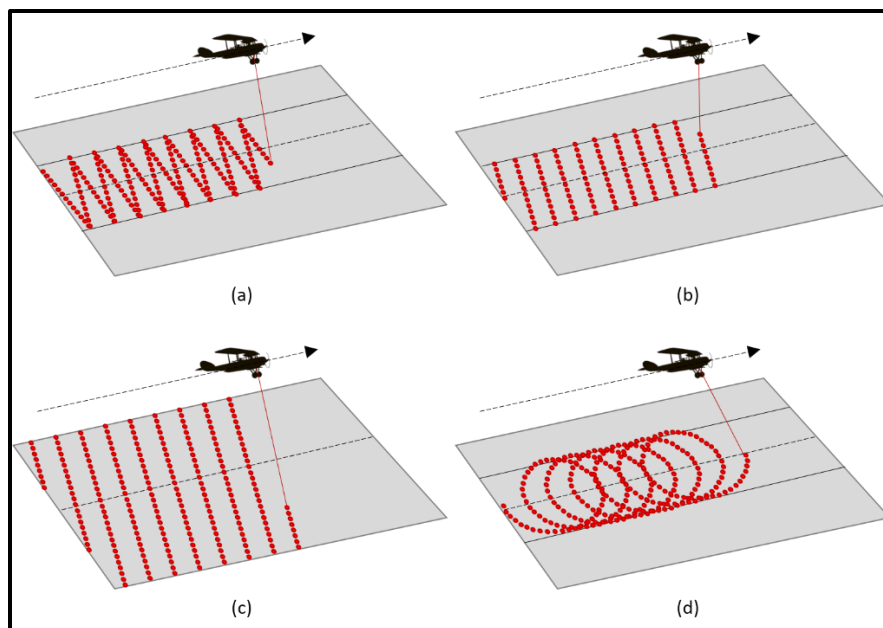
Laserstrålens egenskaper kan videre beskrives med *stråledivergens* og *pulsvarighet*. Stråledivergens er en måte å måle hvor mye laserstrålen ekspanderer fra senderen over tid (Paschotta, u.å.). Dette oppgis i milliradianer (mrad), der antall mrad tilsvarer antall millimeter økt i diameter per meter (Mandlbürger et al., 2020, s. 4), se Figur 7. På den ene siden vil et stort *laserfotavtrykk* dekke et større område, men på den andre siden gjør mindre fotavtrykk at laserpulsene i større grad blir samlet, som gir større punkttetthet. Ettersom det er behov for høy detaljgrad når grunne vann kartlegges, bruker ALB som regel små laserfotavtrykk (Mandlbürger et al., 2020, ss. 3-4).



Figur 7: Fotavtrykk til laserpuls (Gatziolis & Andersen, 2008, s. 4).

*Pulsvarigheten* er viktig for hvor dypt strålen kan penetrere i vann og oppgis i ns (nanosekunder). Lengre stråler med større energi gir bedre mulighet til å penetrere dypere ned i vannet. På den andre siden er det vanskelig for mottakeren på LiDAR-sensoren å forstå forskjellen mellom vannoverflaten og bunnen av vannet hvis det er svært grunne forhold. Dette er fordi ekkot fra bunnen og vannoverflaten blandes sammen til ett ekkosignal. Generelt kan ikke LiDAR-sensorer måle vann som er grunnere enn halvparten av laserstrålelengden. Derfor er det kritiske å bruke korte laserpulser på rundt 1ns (Mandlbürger, 2020, s. 10). 1ns tilsvarer  $3 * 10^{11} \frac{mm}{s} * 1 * 10^{-9}s = 300mm$ . Det vil si at den minste dybden sensoren kan måle er ca. 150mm. På grunn av dette bruker dyptgående LiDAR-sensorer lengre laserpulser med mer energi (Guenther et al., 2000, s. 7). Dette gjør at laserstrålene kan penetrere dypt, men gir lavere punkttetthet og fungerer i mindre grad på grunt vann. Lengre laserpulser med mer energi gjør at man må senke frekvensen, ettersom det ikke er energi nok til å både ha stor energi i pulsene og høy frekvens av pulser. LiDAR-sensorer som skal kartlegge grunne områder bruker på den andre siden korte laserpulser med mindre energi og større frekvens. Dette gir muligheten til å måle dybder på grunt vann med høy punkttetthet, men gjør at laseren ikke penetrerer like dypt.

*Skannehastigheten* til LiDAR-sensoren vil også påvirke kvaliteten på punktskyen som blir produsert. Skannehastigheten forklarer hvor mange linjer som blir skannet over en gitt tid, som regel oppgitt i Hz (RIEGL, 2021, s. 5). For Astralite som benytter et 70Hz lineært tverrsporskannemønster, se Figur 8 (c), betyr det at sensoren kan skanne 70 linjer i sekundet (ASTRALite, 2020, s. 2). For Riegl som benytter ellipseskanneform, se Figur 8 (d), med opptil 200Hz, betyr dette at sensoren kan skanne opptil 200 ellipser i sekundet (RIEGL, 2021, s. 5). De ulike skannemønstrene har ulike egenskaper som må tas hensyn til ved innsamling. Eksempelvis gir ellipseskanneform høyere punkttetthet i kantene enn i senter, og tverrsporskanning gir en mer homogen punktsky.

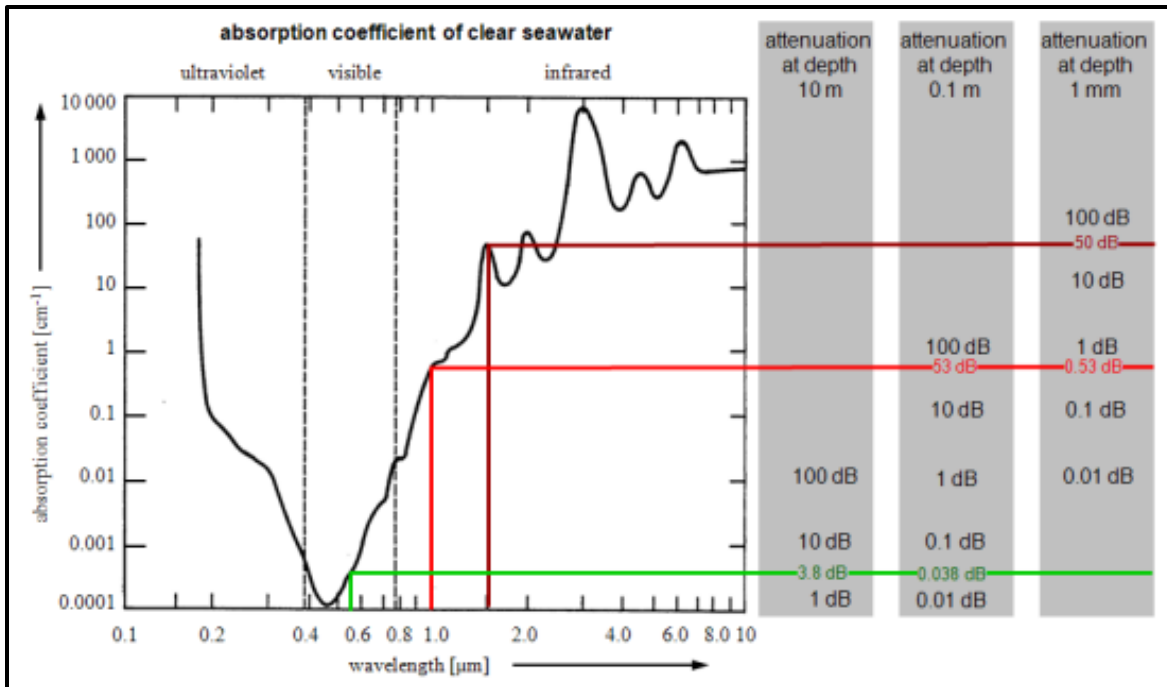


Figur 8: Ulike skannemønstre (Moussy, 2021).

### 3.2.3 Bølgelengde på laser

For å måle vanndybden på elver og andre våte gap er man avhengige av å kartlegge bunnen. Derfor er det viktig å bruke en laserpuls med en bølgelengde som kan bryte gjennom vann. 480 nm, blått lys, blir absorbert minst av vann (Mandlbürger, 2017, s. 346) og er derfor den bølgelengden som penetrerer lengst ned i vann. Selv om blå laser er best til å penetrere vann, har denne bølgelengden en rekke svakheter: den samhandler mer med atmosfæren enn lengre bølgelengder, den er energimessig mindre effektiv og har temperaturproblemer ved høy intensitet (Klemas, 2011, s. 1021). Grønn laser er derfor det vanligste alternativet for å måle vanndybder. Grønn laser har også lav absorpsjon i vann, se Figur 9, samhandler mindre med atmosfæren og er mer energieffektiv enn blå laser. Grønn laser (532 nm) er også enkel å fremstille med frekvensdobling av infrarødt lys (IR, 1064 nm) (Mandlbürger, 2017, s. 346).





Figur 9: Absorpsjonskoeffisienten til sjøvann etter bølgelengde, til høyre er dempingen ved forskjellige dybder (Pfennigbauer & Ullrich, 2011, s. 6).

### 3.2.4 Dybdemåling

Laserstrålene som reflekteres fra elven kan deles inn i stråler reflektert fra vannoverflaten, vannsøylen og bunnen av elven (Mandlbürger, 2017, s. 345). For å måle hvor disse befinner seg er det vanlig å benytte vei-fart-tid måleprinsippet. En laserstråle blir sendt fra LiDAR-sensoren, strålen reiser gjennom atmosfæren, reagerer deretter med vannoverflaten, vannsøylen, eller bunnen av elven, og tilbakespredningen av strålen blir registrert av mottakeren på LiDAR-sensoren (Abdallah et al., 2012, s. 745; Mandlbürger, 2017, ss. 343-345). Avstanden er dermed proporsjonal med målt vei-fart-tid.

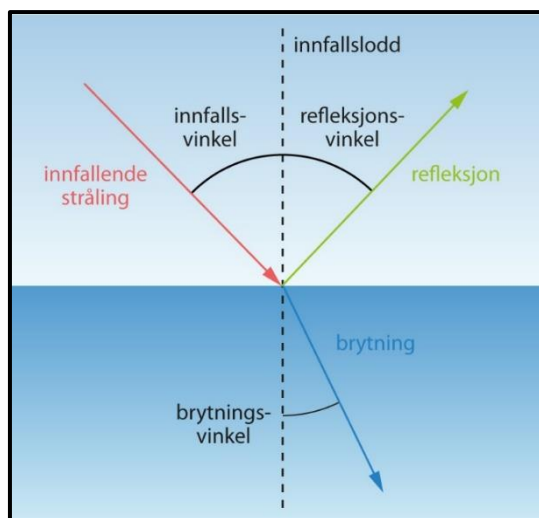
Farten til de utsendte laserstrålene har lysets hastighet. Det tilsvarer 15 cm/ns i lufta og 11 cm/ns i vann (Kinzel et al., 2013, s. 6). For å kunne gjennomføre nøyaktige avstandsbedømmelser er det derfor kritisk å vite når laserstrålene befinner seg i vannet og når den befinner seg i lufta. I tillegg gjør hastighetsreduksjonen at retningen til laserstrålene endrer seg når de treffer vannoverflaten, slik Snells lov forklarer (Mandlbürger, 2020, s.7), se Figur 10. Denne retningsendringen må derfor

tas hensyn til ved utregningen av den vertikale avstanden fra LiDAR-sensoren til objektet. Laserens endring i retning vises i Figur 11.

$$\frac{\sin \alpha_{\text{air}}}{\sin \alpha_{\text{water}}} = \frac{c_{\text{air}}}{c_{\text{water}}} = \frac{n_{\text{water}}}{n_{\text{air}}}$$

With:  $n_{\text{air}} = c_0/c_{\text{air}} \approx 1.0$   
 $n_{\text{water}} = c_0/c_{\text{water}} \approx 1.33$

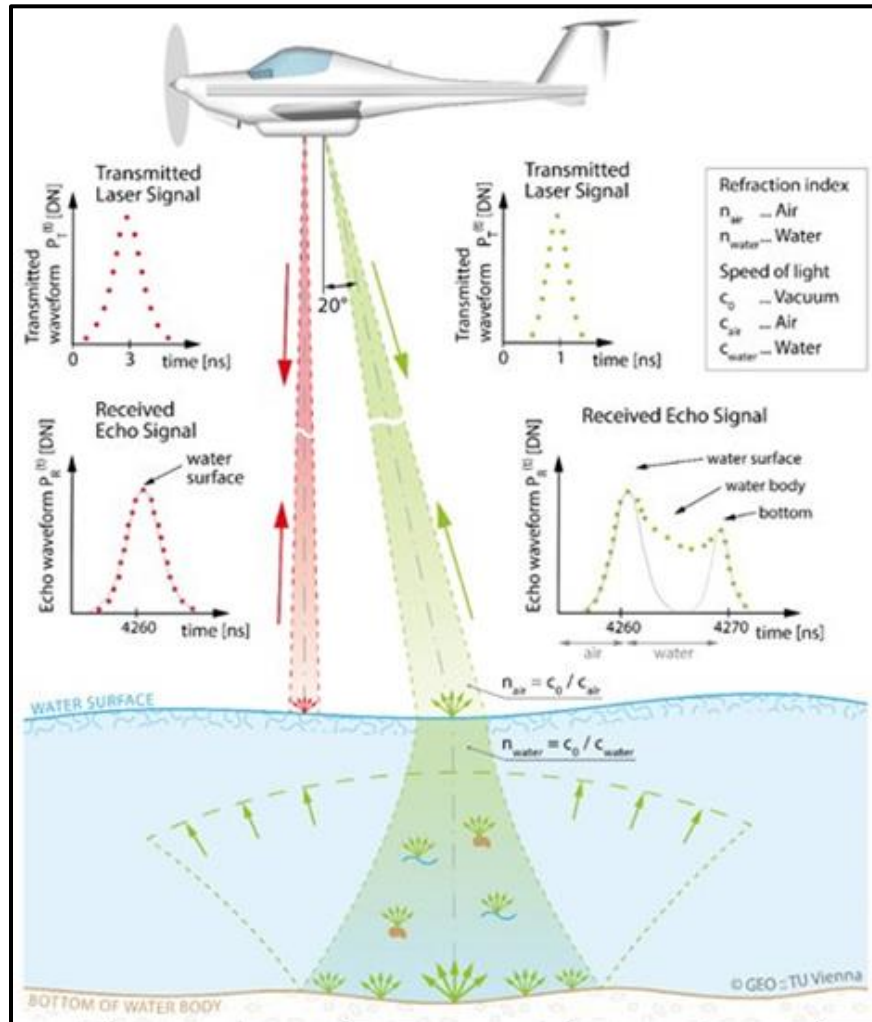
Figur 10: Snells lov (Mandlbürger, 2020, s. 7).



Figur 11: Endring av retning når laser treffer vann (Skaar, 2018a).

Dybde måling i vann er avhengig av at emitterte laserstråler faktisk reflekteres når de treffer elvebunnen, noe lysspredningen i vann og bunnforholdet hindrer. Lysspredningen i vann skjer eksponentielt på grunn av bølger ved vannoverflaten og vannets gjennomsiktighet, se Figur 12 . Bare en liten del av lysstrålene som entrer vannet returnerer. Lysstrålene spres og absorberes i vannet på grunn av at de treffer organiske- og ikke organiske partikler, og luftbobler. Spredningen på grunn av vannets gjennomsiktighet er generelt den dominerende årsaken til at man har problemer med å måle dybden i vann (Guenther et al., 2000, ss. 10-12). Dette er årsaken til at

LiDAR-sensorers evne til å penetrere vann blir oppgitt i secchidybder. Secchiskiver er skiver med diameter mellom 25-30 cm som senkes ned i vannet, se Figur 13. Når secchiskiven ikke lenger er synlig, tilsvarer det én secchidybe (Hongve, 2020). Eksempelvis kan Astralite måle dybder ned til 1,5 secchidybder (ASTRALite, 2020, s. 2). Bunnforholdet vil også påvirke hvor mange laserstråler som returnerer ut ifra elvebunnens refleksjonsegenskaper. Generelt har mørk bunn dårlig refleksjonsegenskap og lys bunn god (Mandlbürger, 2017, s. 346).



Figur 12: Spredningseffekt til laseren i vann (Mandlbürger, 2017, s. 344).



Figur 13: Secchiskive for å måle siktedyp (Hongve, 2020).

### 3.2.5 Lokalisering av vannoverflaten

For å kunne måle dybde med batymetrisk LiDAR er det viktig å vite når laseren reiser gjennom luft og vann. Vannoverflaten og utstrekningen til elven er derfor kritisk for dybdemåling, ettersom den forteller hvor elven starter og fungerer som et referansepunkt for beregningen av dybden. Lokalisering av vannoverflatehøyde med LiDAR er mulig, men interaksjonen mellom laserstrålen og luft-vann-grensesnittet er kompleks. Grønn laser brukes som tidligere nevnt på ALB grunnet dens evne til å penetrere vann. Derfor blir lite av den grønne laseren reflektert ved vannoverflaten (Mandlbürger et al., 2013, s. 175). Tidligere var det vanlig å ha en sensor som emitterte IR laser og en som emitterte grønn laser på ALBer. IR laser penetrerer vann svært dårlig, noe som gjør at den kan brukes til å lokalisere vannoverflaten. I dag er grønn-laser teknologi så god på å lokalisere vannoverflaten at behovet for IR laser har falt bort. Fjerningen av IR-sensor er også vektbesparende og er noe av grunnen til at sensorer i dag er lette nok til å plasseres på droner.

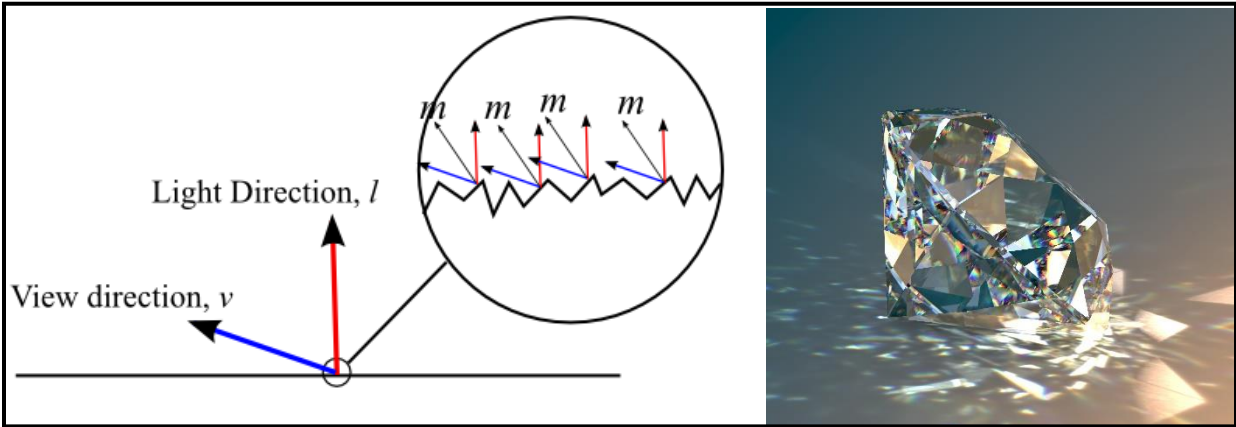
Formelen for lokalisering av vannoverflaten ( $P_{WS}$ ) er vist på Figur 14. Mange av faktorene er inkonstante og vil variere ut ifra endringer i miljøet.  $P_{WS}$  er en funksjon av hvor mye energi som blir sendt ut av laseren ( $P_T$ ), hvor stor LiDARens mottakeroverflate er ( $D$ ), atmosfærisk dempning

og systemtap ( $\eta_{\text{ATM}} \eta_{\text{SYS}}$ ), cosinus på vinkelen mellom laseren normalt på vannoverflaten ( $\alpha_A$ ), avstanden fra LiDAR-sensoren til mediet som skal måles ( $H$ ) og en faktor ( $L_0$ ). Forenklet beskriver  $L_0$  tapet av energi gjennom overflaten på grunn av reflektansfordeling. Dette representeres gjennom mikrofasetter, og vannoverflatens diffuse og speilende komponenter. Mikrofasetter er små flater på en overflate som fører til at lys spres i ulike retninger (Pharr et al., 2018), veldig likt som lysspredningen til en diamant, se Figur 15. Vannoverflatens diffuse og speilende komponent forteller hvor mye lys som penetrerer vannet og hvor mye som reflekteres (Skaar, 2018b), se Figur 16.

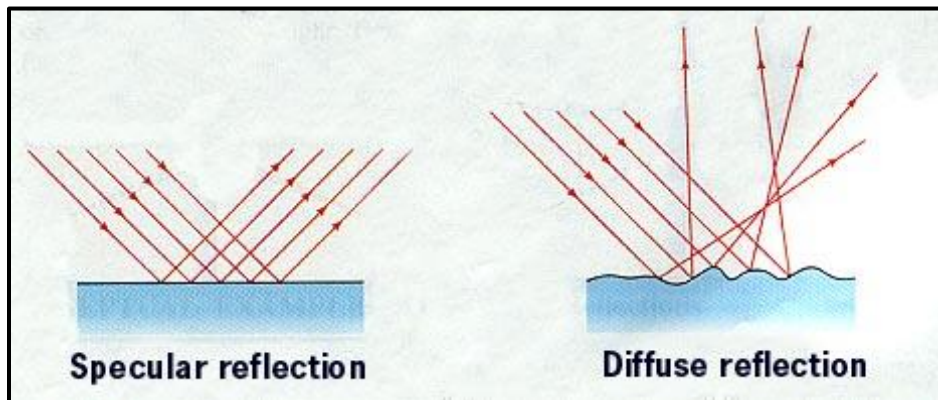
$$P_{\text{WS}} = \frac{P_{\text{T}} D^2 \pi / 4 \eta_{\text{ATM}} \eta_{\text{SYS}} L_0 \cos \alpha_A}{\pi H^2} \quad L_0 = \frac{k_{\text{d}}}{\pi} + \frac{k_{\text{s}} D_{\text{BS}} O F_{\text{r}}}{\pi \cos^2 \alpha_A} D_{\text{BS}} = \frac{1}{r^2 \cos^4 \alpha_A} e^{-(\tan \alpha_A / r)^2}$$

$P_{\text{T}}$	Transmitted laser power in W	$\alpha_A$	Air-sided incidence angle between laser beam and water surface normal direction in a. u.
$P_{\text{R}}$	Entire received laser power in W	$\alpha_w$	Water-sided (i. e. refracted) incidence angle in a. u.
$P_{\text{WS}}$	Received power returned from the water surface in W	$F$	Loss factor (telescope FOV) due to the field of view of the telescope
$P_{\text{WC}}$	Received power returned from the water column in W	$\beta_{\text{v}}(\theta)$	Volume scattering function
$P_{\text{WB}}$	Received power returned from the water bottom in W	$k$	Diffuse attenuation coefficient
$P_{\text{BK}}$	Received power caused by background radiation in W	$n_{\text{W}}$	Refractive index of water (ca. 1.33)
$R$	Measurement range in m	$H$	Flying height above water level in m
$\gamma$	Laser beam divergence angle in angular units (a. u.)	$z$	Height of water column in m
$\sigma$	Laser-radar backscatter cross section in $\text{m}^2$	$Z$	Water depth in m
$D$	Receiver aperture area in $\text{m}^2$	$R_{\text{B}}$	Bottom albedo factor (i. e. bottom reflectance)
$\eta_{\text{ATM}}$	Atmospheric loss factor	$k_{\text{d}}$	Diffuse reflection portion
$\eta_{\text{SYS}}$	System loss factor	$k_{\text{s}}$	Specular reflection portion
$\Omega$	Opening angle of backscatter cone in a. u.	$D_{\text{BS}}$	Micro-facet distribution function according to Beckmann and Spizzochino (1987)
$\rho$	Diffuse target reflectance	$O$	Geometric attenuation factor of the bi-directional reflectance distribution function
$A$	Target area in $\text{m}^2$	$F_{\text{r}}$	Function describing the Fresnel reflection of light on each micro-facet
$L_0$	Surface albedo factor describing the loss due to transmission through the surface (surface albedo)	$r$	Root mean square (r. m. s.) slope of the micro-facets in radians

Figur 14: Formel for reflektert energi fra vannoverflaten og symbolforklaring (Mandlburger, 2017, ss. 345-346).



Figur 15: Mikrofasett og fasetter på diamanter (Diamond Cut Information, u.å.; Rough Glass Microfacet Model, 2012).



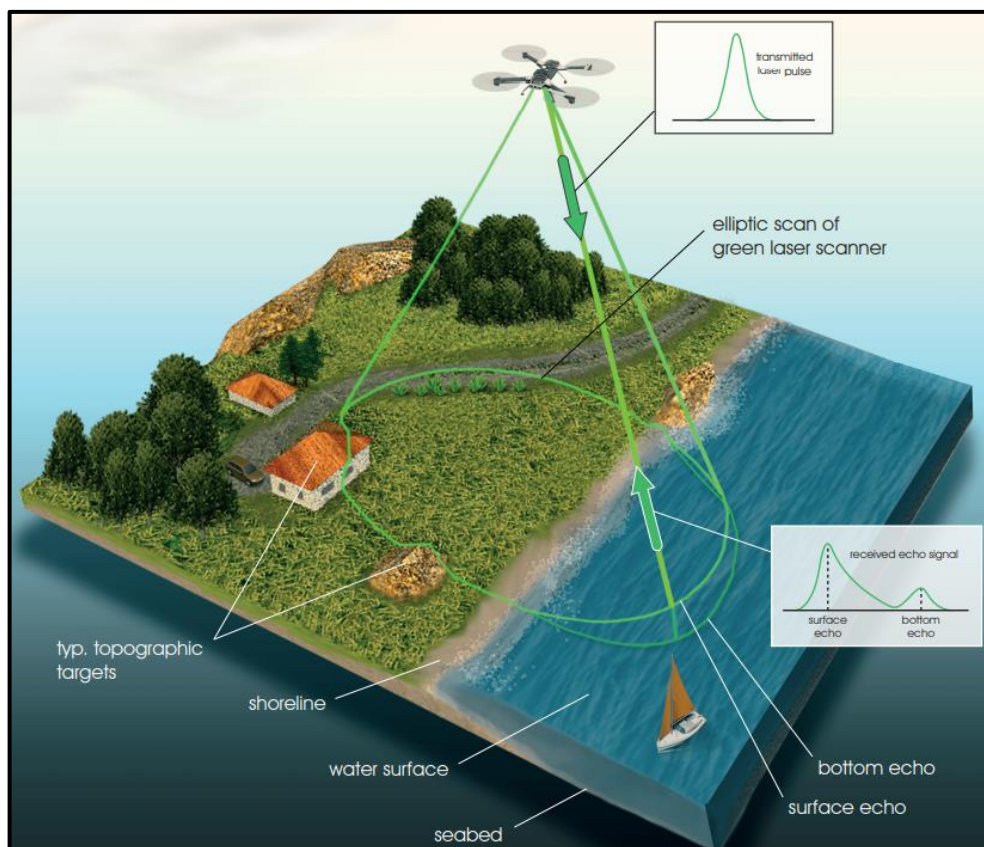
Figur 16: Speilende (specular) og diffus komponenten (Davis, u.å.).

### 3.2.6 Klassifisering

Klassifisering av LiDAR-data går ut på å identifisere de ulike karakteristikkene til lendet ved hjelp av egenskapene til de reflekterte laserpulsene (Yan et al., 2015, s. 14). For topologisk kartlegging innebærer det kartlegging av bygg, vegetasjon osv. For vann er det klassifisering av vannoverflaten, bunnen og bunnforholdene som er i fokus. Det er, som beskrevet i kapittel 2.3, mye hemmelighold rundt hvordan klassifisering gjøres av de ulike LiDAR-produzentene. Derfor blir noen generelle prinsipper presentert for hvordan klassifisering kan gjennomføres.



Den vanligste formen for klassifisering er å skille ut bakkepunktene i punktskyen, disse punktene definerer terrengmodellen (Kartverket, 2023). For å kartlegge elver vil det være nødvendig med en terrengmodell for overflaten og en for bunnen av elven. Disse blir klassifisert ved å bruke ekkosignalene som mottas i mottakeren (Mandlbürger, 2020, s. 7). Ekkosignalene blir kategorisert ut ifra punkttettheten og de nærliggende punktene. Eksempelvis vil første ekkosignal være relativt sterkt, dette er overflaten (Mandlbürger et al., 2013, s. 176). Neste sterke ekkosignal representerer bunnen av elven. Alt imellom representerer vannsøylen. Se Figur 17 for fremstilling av mottatt ekkosignal. Det er bunn- og vannoverflateklassifiseringene fra datasettet som blir brukt i vadeverktøyet for å estimere dybden til elven og helningen under vann.



Figur 17: RIEGL VQ-840-G ekkosignal som representerer overflaten (RIEGL, 2021, s. 2).

Det er også mulig å kategorisere bunnforholdet til elven ved bruk av LiDAR. Tulldahl et al. klarte eksempelvis å skille mellom brunalger, ålegress og sandbunn med høy nøyaktighet (2007, s. 10).

Bunnforholdet forklares i kapittel 3.1.2 som en viktig faktor for om vading kan gjennomføres, men er som nevnt i kapittel 1.3 avgrenset fra oppgaven.

Topografi er i større grad forsket på, og det er flere og bedre metoder for å klassifisere ulike arealtyper. Det finnes flere ulike metoder og kombinasjoner av dem. Blant metodene kan høyden LiDAR-dataen registrerer brukes til å klassifisere objekter. Huang et al. testet dette i et eksperiment for å klassifisere urbane områder med LiDAR. Sammenlignet med klassifisering gjennom ortofoto, ble resultatet opptil 18% bedre da LiDAR ble inkludert (2008, s. 481). En annen fordel med LiDAR-data er registreringen av intensitet for å skille mellom mørke og lyse objekter, spesielt der høyden til objektet er likt, men ikke refleksjonsintensiteten (Brennan & Webster, 2006, s. 170). Intensitet representerer maksimal amplitude registrert på den returnerte pulsen (Yan et al., 2015, s. 9). I en studie utført av Im et al. var det akkurat denne egenskapen som gjorde at nøyaktigheten i klassifiseringen gikk opp fra omtrent 70% til over 90% (2008, s. 223). Gjennom analyse av returpulsen er det mulig å finne ut om pulsen har en eller flere returer (Wolfgang Wagner, 2010, s. 505). Dette er for øvrig metoden for klassifisering av vannoverflaten og bunnen (Mandlburger, 2020, s. 7). Om en puls gir flere returer kan det fortelle noe om hva slags objekt som har blitt truffet. Evnen til å skille mellom gjennomtrengelige og ikke-gjennomtrengelige objekter har vist seg veldig nyttig til å skille mellom skogsområder og bebygde områder (Buján et al., 2012, s. 406).

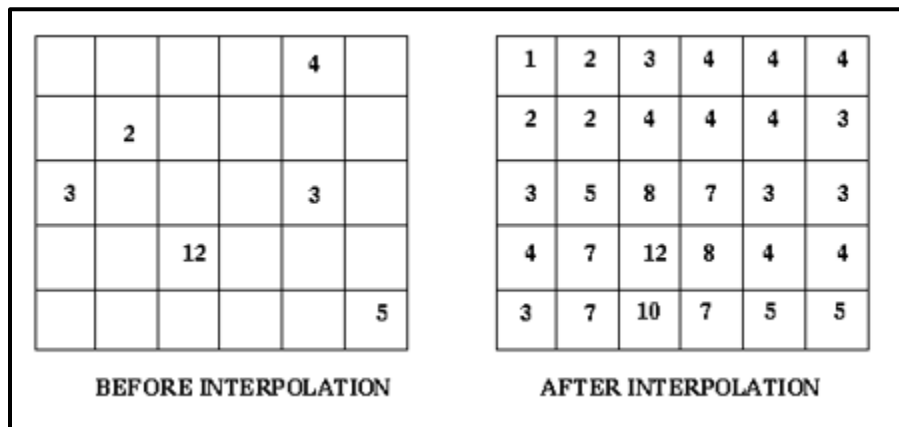
### 3.3 Digitale høydemodeller

Digitale høydemodeller (DHM) er digitale representasjoner av jordoverflaten. DHM kan produseres ved hjelp av fjernmålingsverktøy, som fotogrammetri, radar og *LiDAR* (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015). Filformatet *las* er tilpasset data som er lagret som en punktsky og er mulig å bruke til produksjon av DHM (*LAS Specification 1.4 - R15*, 2019, s. 1). DHM lagres som regel på rasterformat hvor hver enkelt piksel får tildelt en Z-verdi. Ut ifra punkttettheten vil man med formelen nedenfor (Esri, u.å.-f) kunne regne seg fra punkttettheten til *punktavstanden*. Med en pikselstørrelse lik punktavstanden, vil DHM gjennomsnittlig ha en Z-verdi per piksel.



$$\text{Punkttetthet} = \frac{1}{\text{Puntavstand}^2}$$

Der pikselinformasjon om Z-verdien mangler, kan interpoleringsmetoder for å estimere de manglende Z-verdiene benyttes. Det finnes mange ulike interpoleringsmetoder, men fellestrekket er at manglende verdier estimeres basert på de nærmeste kjente verdiene. «En DHM er nettopp dette, et sett med kjente x, y, z og en valgt interpoleringsmetode» (Grinderud et al., 2016, s. 155). DHM kan videre deles inn i digital overflatemodell (DOM), digital terrengmodell (DTM) og normalisert digital overflatemodell (nDOM). DHMene blir brukt i vadeverktøyet for å avgjøre hvor dypt vadeområdet er og helningen under vann.



Figur 18: Før og etter interpolering (Columbia University, u.å.).

### 3.3.1 Digital overflatemodell

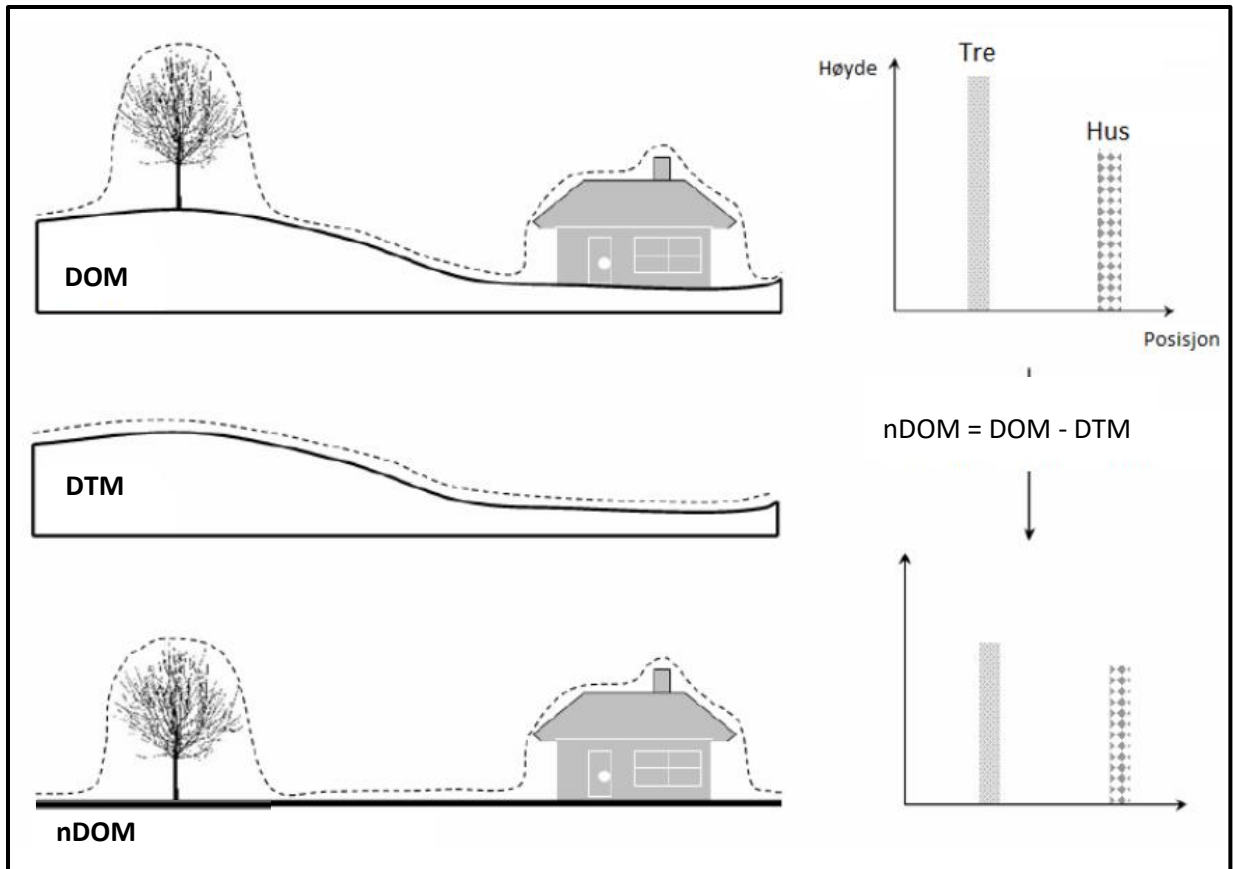
DOM er en digital modell som beskriver overflaten til terrenget. Med overflate menes jordoverflaten med alle menneskeskapte objekter og vegetasjon oppå seg. Enkelte definerer også en vannoverflatemodell (Mandlbürger et al., 2015, s. 6169), men oppgaven har valgt å inkludere denne i overflatemodellen. DOM representerer derfor de høyeste punktene på objekter (som trær og hus) og terreng uten objekter oppå. DOM kan eksempelvis benyttes til å gjennomføre analyser på hva man kan se fra et spesifikt punkt, kartlegge lufthindre og innen skogforvaltning (Grinderud et al., 2016, s. 156).

### 3.3.2 Digital terrengmodell

DTM er en digital modell av terrenget. Med terreng menes jordoverflaten uten vegetasjon og menneskeskapt objekter oppå. Oppgaven definerer også elvebunnen til å være en del av modellen. DTM representerer altså den underliggende jordoverflaten. Modellen blir skapt ved at objekter på overflaten blir detektert, eksempelvis via helning på objektet eller hvilken pulsretur det blir registrert som i LiDAR-sensoren. Deretter fjernes objektene og til slutt interpoleres det fjernede området med det omkringliggende området (Jinhai & Miklavcic, 2011, ss. 5622-5624). DTM gir muligheter for avanserte analyser og visualisering av topografien. DTM kan eksempelvis benyttes til å finne høyder i terrenget, beregne helning i terrenget og anvendes når flomutsatte områder skal lokaliseres (Grinderud et al., 2016, s. 155).

### 3.3.3 Normalisert digital overflatemodell

Forskjellen mellom DOM og DTM er nDOM, og produseres ved å subtrahere DOM fra DTM. nDOM er derfor et datasett som kun har objektene som er over terrengnivå, og ikke terrenget i seg selv (Vermont Center for Geographic Information, 2021). Ettersom DOM er definert til å inneholde vannoverflaten og DTM er definert til å være elvebunnen, representerer nDOM dybden til vadeområdet.



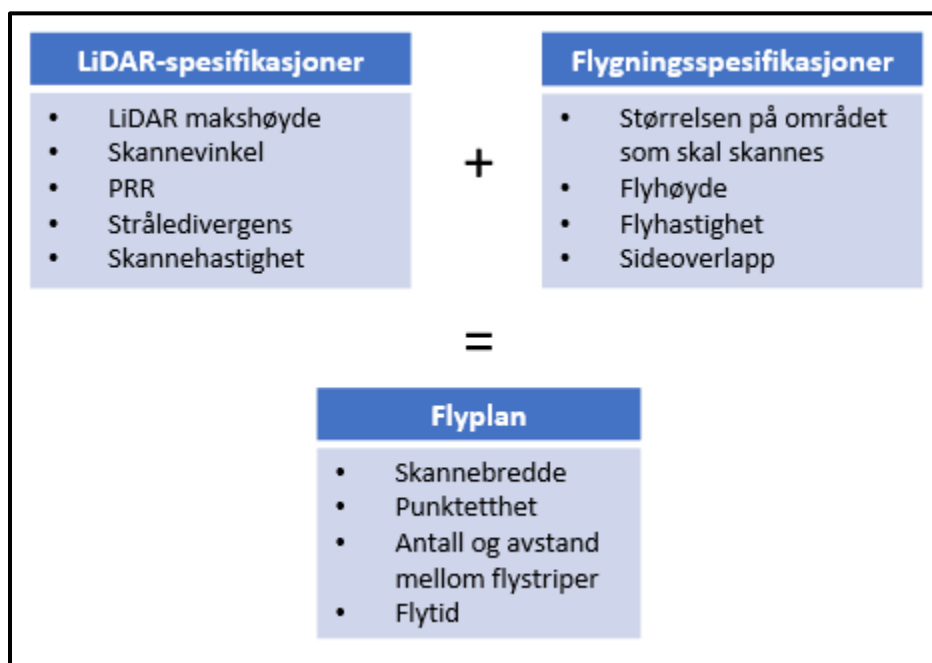
Figur 19: De ulike høydemodelleene (Bjerke, 2017, s. 19).

### 3.4 Innsamling

Kvaliteten på datasettet som produseres av LiDAR-sensoren avhenger av hvordan innsamlingen blir gjennomført. For innsamling fra fly eller helikopter er det utarbeidet flere krav og kontrolltiltak for å sikre god datakvalitet (Kartverket, 2023). Basert på disse kravene vil dette kapittelet belyse hva en flyplan med drone bør inneholde. Kapittelet vil også se på ytre faktorer som påvirker innsamlingen og hvordan tilleggsutstyr kan styrke innsamlingen.

### 3.4.1 Flyplan

Når LiDAR-data skal samles inn er det viktig å legge en plan for flygningen, slik at kravene til tid og kvalitet blir oppfylt. Ut ifra parameterne til LiDAR-sensoren og flygningsspesifikasjoner er det mulig å lage en flyplan som gir gode forutsetninger til å løse oppdraget som skal utføres, se Figur 20 (Alsadik & Remondino, 2020, ss. 3-4).



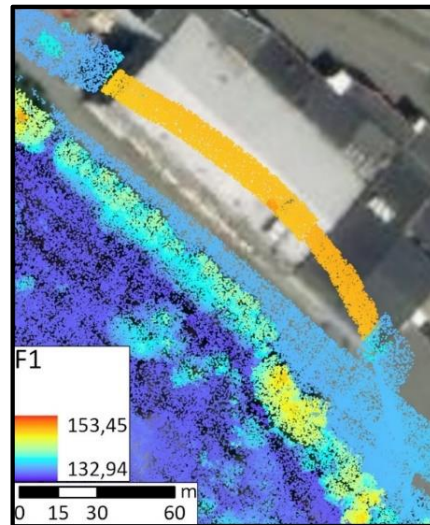
Figur 20: LiDAR- og flygningsspesifikasjoner som blir til flyplan.

**Skannebredden** er hvor bredt område LiDAR-sensoren kan skanne, og består av flyhøyden og skannevinkelen (Alsadik & Remondino, 2020, s. 4).

$$\text{Skannebredde} = 2 * \tan\left(\frac{\text{skannevinkel}}{2}\right) * \text{høyde}$$

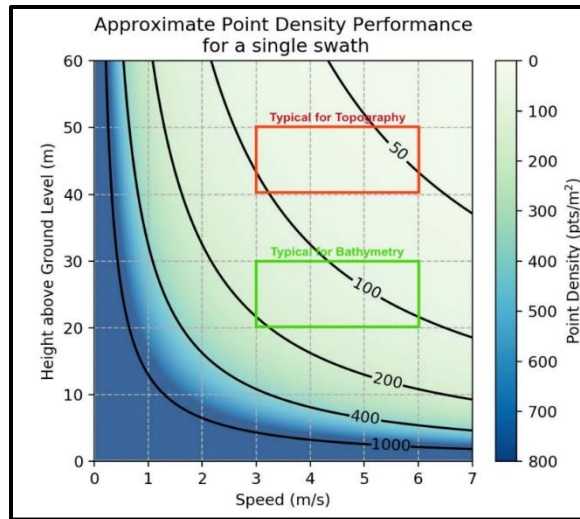
Større skannebredde gir raskere skanning av området. Eksempelvis har Riegl en skannebredde på 109,2m ved optimal flyhøyde (150m med 40° skannevinkel). Om området som skal skannes er smalt, eksempelvis en elv, kan én skanning være nok. Dette gjør også at man slipper å ta hensyn til sideoverlapp, antall flystriper og vendepunkter. Forholdet mellom flyhøyde og skannebredde er

ilustrert på Figur 21. På illustrasjonen flyr dronen over et hus, oransje stripe, og den relative flyhøyden blir dermed lavere, dette resulterer i smalere skannebredde og økt punkttetthet.

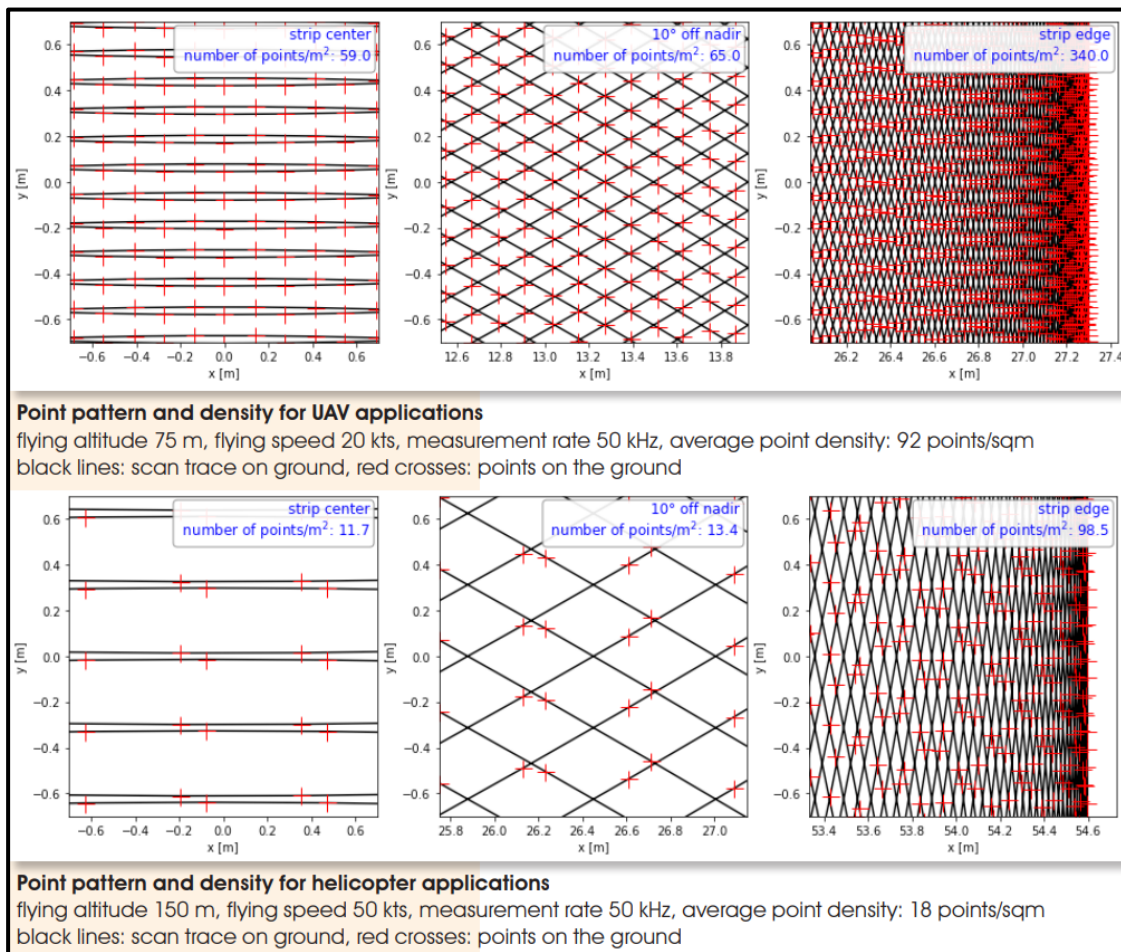


Figur 21: Illustrasjon av flyhøydens påvirkning på skannebredden og punkttetthet.

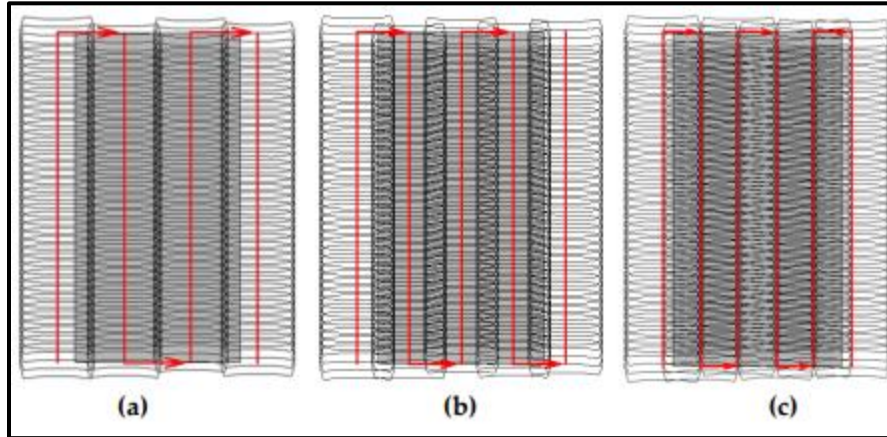
**Punkttettheten** er et resultat av flyhøyde, PRR, stråledivergens, sideoverlapp, skannehastighet og flyhastighet. Flere av LiDAR-sensorene har kun én standardverdi for PRR, stråledivergens og skannehastighet. Derfor kan punkttettheten forenklet forklares som et resultat av høyde, hastighet og sideoverlapp. Figur 22 og Figur 23 viser punkttettheten for de respektive sensorene basert på høyde og hastighet. For å unngå hull i punktskyen, se Figur 25, bør sideoverlapp benyttes. Sideoverlapp resulterer i en økt punkttetthet der skanningene overlapper, men et behov for flere skanninger, se Figur 24. Her må tid tilgjengelig veies opp mot kvalitet på resultatet.



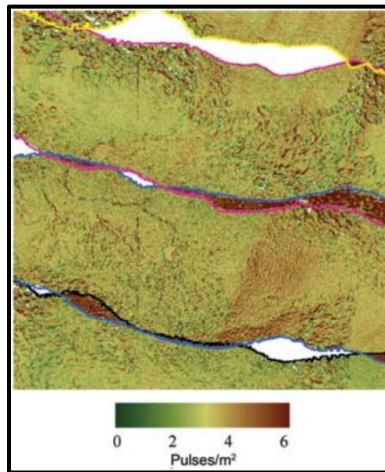
Figur 22: Punkttetthet gitt høyde og hastighet for ASTRALite EDGE™ (ASTRALite, 2020, s. 1).



Figur 23: Punkttetthet gitt høyde og hastighet for RIEGL VQ-840-G punkttetthet (RIEGL, 2021, s. 2).



Figur 24: Sideoverlapp. a = 10% sideoverlapp (4 flystriper). b = 30% sideoverlapp (5 flystriper). c = 50% sideoverlapp (6 flystriper) (Alsadik & Remondino, 2020, s. 8).



Figur 25: Hull, det hvite området, i datasettet mellom flystripene (Gatziolis & Andersen, 2008, s. 22).

**Antall og avstand mellom flystripene** bestemmes av størrelsen på området som skal skannes, skannebredden og hvor mye sideoverlapp som kreves (Alsadik & Remondino, 2020, s. 4). Hull er større områder der det mangler datapunkter, se Figur 25. Dette kan oppstå ved unøyaktig flygning om det ikke er tilstrekkelig med sideoverlapp. En annen metode for å unngå hull er at ALBen holder konstant høyde under hele innsamlingen (Gatziolis & Andersen, 2008, ss. 21-24).

$$\text{Avstand mellom flystripene} = (1 - \text{sideoverlapp} (\%)) * \text{skannebredde}$$

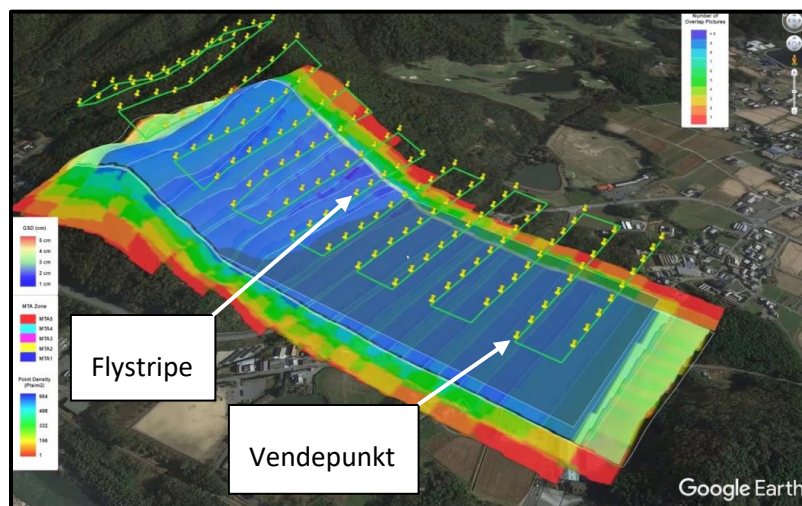


$$\text{Antall flystriper} = \frac{\text{bredden på området}}{\text{avstand mellom flystripene}} + 1$$

**Flytid** er viktig å ha et forhold til, ettersom den er begrenset av batterikapasiteten. Programvare kan benyttes for å beregne eksakt flytid, men generelt kan denne bli regnet ut med vei-fart-tid formelen. I realiteten vil flygningen ta lengre tid på grunn av en redusert hastighet i svingene.

### 3.4.2 Nøyaktighet

For å øke presisjonen kan det være hensiktsmessig å bruke applikasjoner som både beregner flyrute og gjennomfører flygningen autonomt. *Phoenix Flight Planner* og *Geodetics flight planner*, er eksempler på slike verktøy (*LiDAR Drone Mapping, High-Precision Navigation, & Advanced Sensing*, u.å.; *Phoenix LiDAR Systems*, u.å.). Programmene lar brukeren fylle inn hvilken LiDAR-sensor og drone som anvendes, samt LiDAR- og flygningsspesifikasjoner, og det ønskede resultatet. Selskapet Phoenix lager også spesialtilpassede applikasjoner, slik at det er mulig å anskaffe enda mer spesialiserte applikasjoner for kartleggingsoperasjoner.



Figur 26: Flight plan laget med programvare (Phoenix LiDAR Systems, u.å.).



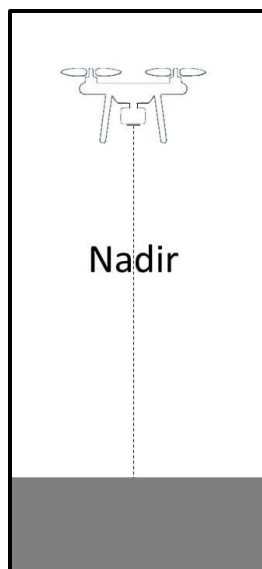
For å oppnå god nøyaktighet på punktskyen som produseres kan det brukes bakkekontrollpunkter eller en rover/basestasjon. Bakkekontrollpunkter er forhåndsuttatte punkter som brukes for å oppnå nøyaktige resultater (*Ground Control Points*, 2021). Selv om LiDAR-målinger blir mer nøyaktige med bakkekontrollpunkter (Siying et al., 2012, s. 88), er det ikke nødvendig om dataene skal vurderes isolert eller i forhold til seg selv (*Ground Control Points*, 2021). Alternativt, eller i tillegg, kan en rover/basestasjon plasseres ut, se Figur 27

, som er koblet opp til GNSS. Hensikten med rover/basestasjon er å få bedre nøyaktighet på dataene (Saylam et al., 2018, s. 5). Om man ønsker resultater så raskt som mulig kan man benytte seg av RTK (real time kinetiks) som kalibrerer i sanntid. Selv om denne metoden gir god nøyaktighet, vil synkronisering av dataene i etterkant oppnå bedre resultater (C. Stöcker et al., 2017, ss. 355, 358).



Figur 27: Rover/basestasjon (*Accurate GNSS Everywhere with SmartNet*, u.å.).

Til slutt er datamaskinen avhengig av å vite hvilken retning laseren er rettet fra dronen. LiDAR-systemet tar utgangspunkt i at laseren peker rett ned fra dronen, kalt nadir retning, se Figur 28. Om laseren er rettet til siden, fremover eller bakover registreres dette i grader fra nadir, kalt off nadir (Graham, 2019).



Figur 28: Nadir retning (What is the difference between NADIR Images and Oblique Images, 2020).

### 3.4.3 Vær

Været ALBen opererer i vil kunne påvirke datakvaliteten til punktskyen og dermed gi feilaktige resultater. Partikler i luften, eksempelvis regn, snø, støv, tåke, vil spre og absorbere laserstrålene. Dette er lignende som lysspredning i vann, se kapittel 0, og fører til lavere oppløsning og støy i punktskyen (Li & Ibanez-Guzman, 2020, s. 52). Regn og vind vil videre føre til at vannoverflaten blir mer ujevn og gjør det vanskeligere for laserstrålene å penetrere vannoverflaten, slik kapittel 0 forklarer. Til slutt blir også flyegenskapene til dronen LiDAR-sensoren er festet på påvirket ved kraftig vind og regn.

### 3.4.4 Kamera

Når gjennomsiktigheten til vann skal måles er kamera et godt alternativ til secchidybde. Vannets gjennomsiktighet er som forklart i kapittel 0 blant de viktigste faktorene for hvor dypt LiDAR-sensorer klarer å måle dybde i vann. Er det ikke mulig å gjennomføre måling av secchidybde, eksempelvis på grunn av at det taktiske scenarioet ikke tillater personell å være ved elven, er en

mulig løsning å ha kamera på ALBen. Da vil det være mulig å anslå vannets gjennomsiktighet, ved å se på bilder eller video. Dette er ikke en like nøyaktig metode som secchidybde, men gjør det mulig anslå vannets gjennomsiktighet og dermed hvor det vil være mulig å måle dypere.

Ortofoto av området kan også brukes som oppdragsstøtte, slik at personell som skal vade får visualisert området. Bilder gjør det også mulig å fargelegge punktskyen som produseres av LiDAR-sensoren (Shinohara et al., 2021, ss. 1062-1063).

## 3.5 Bearbeiding av data og analyse

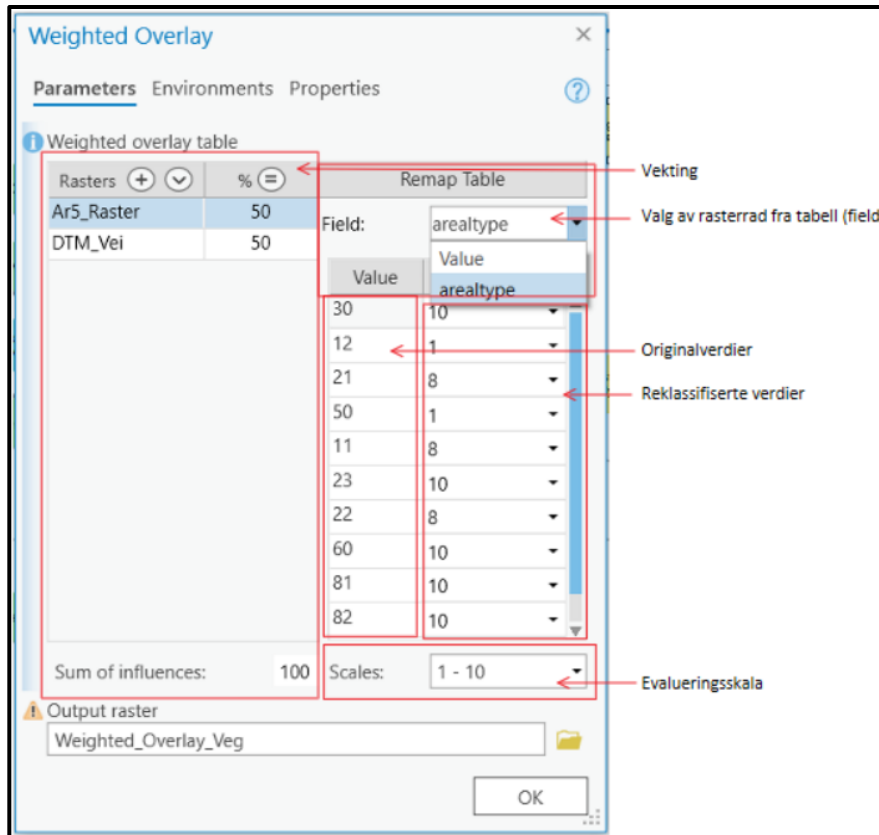
For å bearbeide las-filen brukes *ArcGIS Pro*. ArcGIS Pro er blant de ledende GIS-programvarene på markedet (Esri, u.å.-a). GIS defineres av Grindrud et al. som «[...] sammensetningen av geografisk data, kartsystemer, metoder, og menneskelig kunnskap og erfaring som gjør det mulig å samle inn, bearbeide, analysere og presentere geografien rundt oss» (2016, s. 17). *ModelBuilder* er ArcGIS Pro sitt visuelle programmeringsspråk (Esri, u.å.-h) og er plattformen vadeverktøyet er laget i. Vadeverktøyet består av flere allerede eksisterende verktøy i ArcGIS Pro, som er satt sammen til en automatisert prosess i *ModelBuilder*.

Selv om oppgaven forutsetter at leseren har grunnleggende GIS-forståelse, er det enkelte verktøy som er viktige å forklare for forståelsen av vadeverktøyet. Verktøyene er også spesielt viktige å forstå hvis brukeren ønsker å gjøre egne tilpasninger. Dette delkapittelet går i detalj på verktøyene *Weighted Overlay*, *Focal Statistics*, *Cost Distance* og *Cost Path*

### 3.5.1 Weighted Overlay

*Weighted Overlay* er en overlagsanalyse på rasterdata og er en av de mest brukte metodene for å løse multikritereoppgaver, som eksempelvis lokalisering av vadeområder (Esri, u.å.-e). Verktøyet tillater brukeren å reklassifisere rastre til en felles evalueringsskala, multipliserer pikselverdiene med rasterets vektingsgrad og til slutt adderer verktøyet pikselverdiene sammen til et felles resultatraster, se Figur 29. Esri viser til følgende fremgangsmåte (Esri, u.å.-e):

1. **Velg en evalueringsskala.** Evalueringsskalaen representerer egnethetsgraden og kan eksempelvis være en skala på 1-5. Lav og høy verdi beskriver egnethet i to ulike typer raster. Ved egnethetsmodellering vil generelt høyere verdier representere større egnethet. Ved kostnadsflater, eksempelvis for å finne ut hvor mye det koster å reise over en elv, indikerer lavere verdier større egnethet.
2. **Legg inn rasterdata.** Legg inn rasterdataen og velg deretter hvilket felt, *field*, verktøyet skal benytte. Verktøyet kan kun benytte integerdata (heltall), derfor må kontinuerlige rastere (eksempelvis helningsanalyser) og floatdata (desimaltall) reklassifiseres før det legges inn i verktøyet.
3. **Reklassifiser skalaverdiene.** Pikselverdiene fra hvert raster tildeles verdier fra evalueringsskalaen. Når dataen har felles skalaverdier er det mulig å gjennomføre aritmetiske operasjoner på rasterene som tidligere hadde ulike typer verdier. Utgangsverdiene kan endres til verdier på evalueringsskalaen ut ifra viktighet eller egnethet.
4. **Vekting av rasterdataen.** Hvert rasterdatalag vektet i prosent ut ifra viktighet, der summen må være 100%.
5. **Kjør verktøyet.** Det nye rasteret forteller hvilke reisekostnader det er over en kostnadsflate og egnethet i en egnethetsmodell.



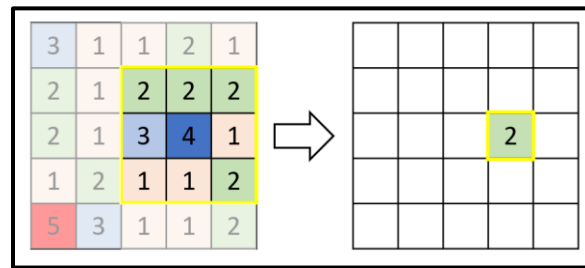
Figur 29: Eksempel på Weighted Overlay verktøyet, med forklaringer.

### 3.5.2 Focal Statistics

*Focal Statistics* brukes i fremgangsmåten for å bedre kunne estimere gjennomsnittet over et større område, som gir bedre forståelse for hvor militære kjøretøy kan kjøre. *Focal Statistics* utfører en nabolagsoperasjon, som resulterer i et raster der verdien for hver piksel i fokus er en funksjon av pikslene i nabolaget, se Figur 30 (Esri, u.å.-d). Funksjonen som gjennomføres på inndatapikslene er statistikk; maksimum, minimum, majoritet, median, minoritet, standardavvik, prosentil, variasjon, gjennomsnitt eller summen av alle verdiene som finnes i nabolaget.

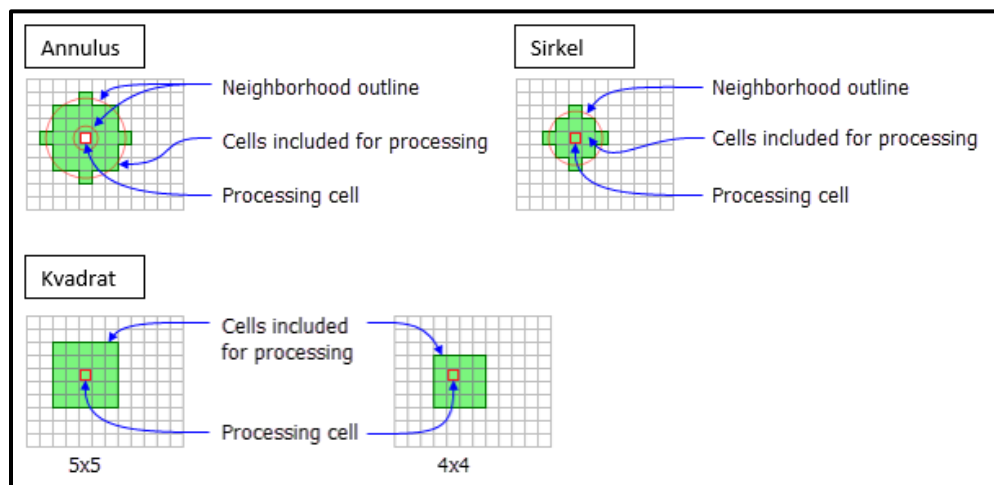
Når verktøyet brukes, har man muligheten til å ta med eller ignorere områder med manglende data (NODATA) i utregningen. Blir denne verdien tatt med, vil nabocellene også få verdien NODATA. Blir den ignorert, blir den ikke med i utregningen. For å unngå større hull og en forminskning av

rasteret kan verdien byttes ut med et høyt tall, som simulerer at det er vanskelig å reise gjennom denne pikselen.



Figur 30: Utregning av gjennomsnittlig verdi for en piksel i et nabolag på 3x3 piksler, ved bruk av Focal Statistics.

Formen og størrelsen til nabolaget gir ulike egenskaper. Figur 31 viser de vanligste formene som er annulus (smultringform), sirkel og kvadrat. En annulus består av to sirkler hvor alle pikslene mellom ytterste og innerste radius inkluderes i nabolaget, piksler som er innenfor innerste radius inkluderes ikke i nabolaget. Annulus beskriver derfor hvordan nabolagets piksler ser ut, uten å selv være med i beregningen. I sirkel inkluderes alle pikslene innenfor sirkelen i nabolaget, også pikselen man ønsker å finne verdien til. Kvadrat fungerer på samme måte som sirkel, men har en kvadratisk form på nabolaget. Størrelsene på nabolaget generaliserer utdataen i stor eller liten grad, et større nabolag vil generalisere mer og utdataen vil variere mindre enn ved små nabolag (Esri, u.å.-d).

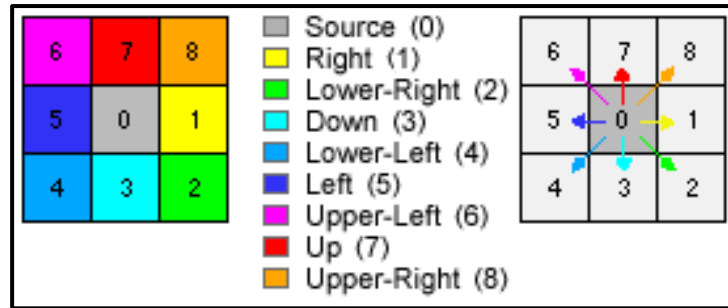


Figur 31: Figurformer til nabolaget (Esri, u.å.-d).

### 3.5.3 Cost Distance og Cost Path

*Cost Distance* verktøyet genererer både *Cost Distance Raster* og *Cost Back Link Raster*. *Cost Distance* beregner den minste akkumulerte kostnadsavstanden for hver piksel til eller fra en kostnadskilde over en kostnadsflate. Esri forklarer følgende tretrinnsmetode for å anvende verktøyet (Esri, u.å.-b):

1. **Start- / sluttpunkt.** Dette er punktet verktøyet beregner kostnadsavstanden fra eller til, og kan både være raster- og vektordata. Rasterdata kan være *integer* eller *float* fra og med 0. NODATA er ikke inkludert i datasettet og det blir ikke beregnet kostnadsavstand fra verdien. Vektordata kan være punkt, linje eller polygon. Brukes vektordata vil dataen bli konvertert til rasterdata før verktøyet iverksetter analysen. Pikselstørrelse for det konverterte rasteret vil være lik kostnadsrasteret om ikke en annen størrelse blir spesifiseres av brukeren.
2. **Kostnadsraster.** Dette rasteret definerer kostnaden for å bevege seg gjennom hver piksel. Pikselverdiene representerer kostnaden per enhetsavstand for å bevege seg gjennom pikslene. Hver pikselverdi multipliseres med pikseloppløsningen (pikselstørrelsen), samtidig som den kompenserer for diagonal bevegelse, for å oppnå den totale kostnaden ved å passere gjennom pikselen. Pikselverdiene kan være integer eller float, men ikke negative eller null. Verdiene kan ikke være null ettersom verktøyet gjennomfører multiplikative prosesser. Null må derfor konverteres til et annet lavt tall eller settes som NODATA.
3. **Resultat.** Resultatet verktøyet produserer er et *Cost Distance raster* og et *Cost Back Link raster*. *Cost Distance* definerer kostnaden fra eller til en kilde og *Cost Back Link* definerer retningen til neste celle. *Cost Back Link rasteret* viser billigste retning, den retningen med minst motstand, for å komme seg til kilden med retningsmetoden vist i Figur 32.

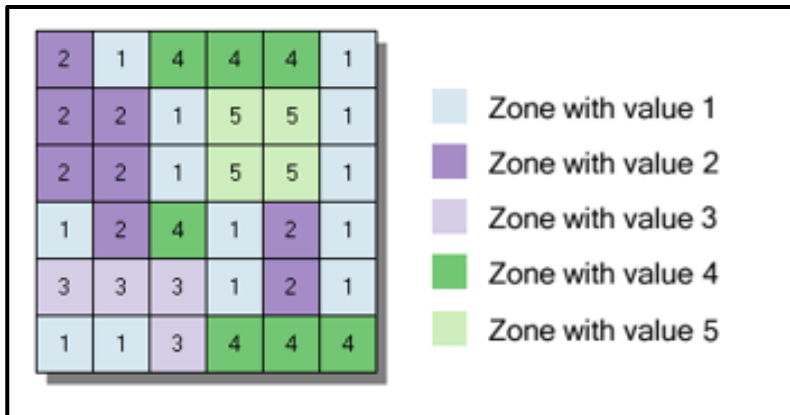


Figur 32: Cost Back Link raster (Esri, u.å.-b).

*Cost Path* kalkulerer den minste akkumulerte kostnadsavstanden for hver piksel fra en kilde til en destinasjon ved å benytte *Cost Distance raster* og *Cost Back Link raster*. Esri beskriver fremgangsmåten slik (u.å.-c):

1. **Destinasjon.** Dette punktet er endepunktet for verktøyet og kan være raster- og vektordata, med like krav som for start/sluttpunkt i *Cost Distance* verktøyet.
2. **Legg inn Cost Distance raster.** Dette rasteret blir produsert i verktøyet *Cost Distance* og forklarer kostnaden som akkumuleres fra startpunktet.
3. **Legg inn Cost Back Link raster.** Dette rasteret blir produsert i verktøyet *Cost Distance* og forklarer retningen fra en celle til en annen.
4. **Banetype.** Det er tre banetyper som kan benyttes, og disse definerer måten verdiene og sonene i destinasjonsdatasettet skal tolkes i kostnadsberegningene. Første banetype er at det blir generert en rute til hver celle i destinasjonsdatasettet. Andre banetype er at det blir generert en rute til hver sone i destinasjonsdatasettet. En sone er to eller flere celler med samme celledverdi som vist på Figur 33 (Esri, u.å.-g). Tredje banetype er at verktøyet finner én rute blant alle cellene i destinasjonsdatasettet, med den mest kostnadseffektive ruten.



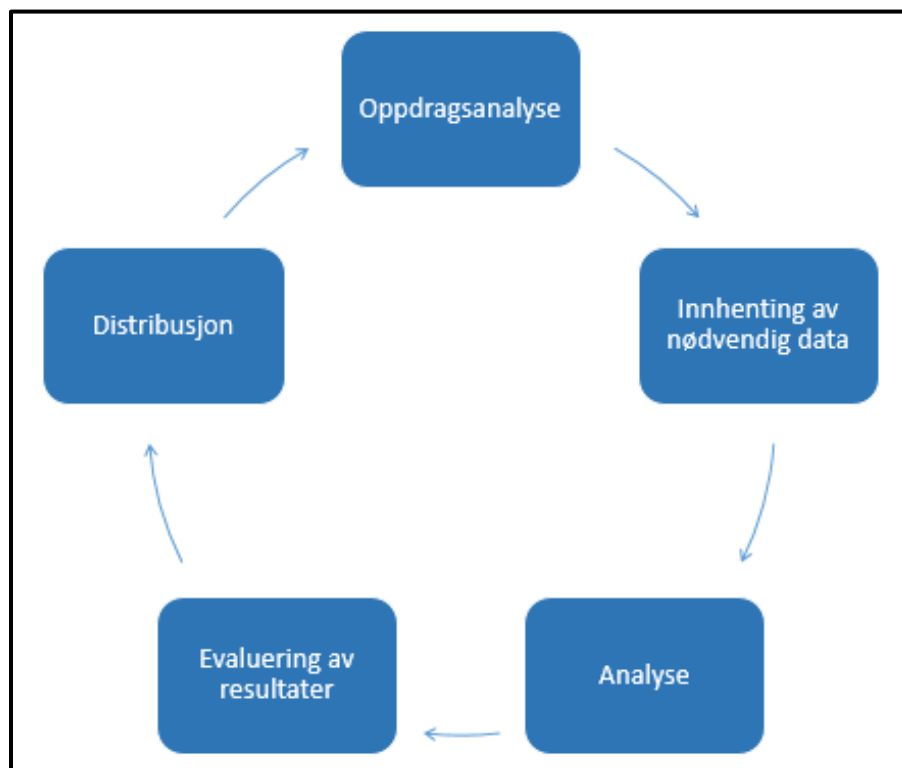


Figur 33: Soneforklaring (Esri, u.å.-g).

## 4 Vademetoden

For å besvare problemstillingen har en analysemetodikk for innsamling og prosessering av LiDAR-data blitt laget, heretter kalt *vademetoden*. Vademetoden skal sikre innhenting av data i de riktige områdene, riktig innhentingsmetode og god analyse av den innsamlede dataen. For å effektivisere analyseprosessen presenterer oppgaven også et vadeverktøy som er anvendbart i ArcGIS Pro. For å gjøre det mulig å hente ut og anvende vadeverktøyet er et Python-skript vedlagt (Vedlegg A).

Grinderud et al. beskriver i boken *GIS geografisens språk i vår tidsalder* to analysemetodikker. Den første metodikken er grundig og består av seks steg, men boka beskriver at ikke alle disse stegene alltid er nødvendig (2016, ss. 140-142). Den andre metodikken kalles GIS-hjulet. GIS-hjulet består av fire steg og er mer forenklet (2016, ss. 206-208). Basert på disse to følger vademetoden stegene vist i Figur 34. Modellen er iterativ og innebærer at deler, eller hele, metoden kan være nødvendig å gjennomføre flere ganger for å få et hensiktsmessig resultat.



Figur 34: Vademetoden.

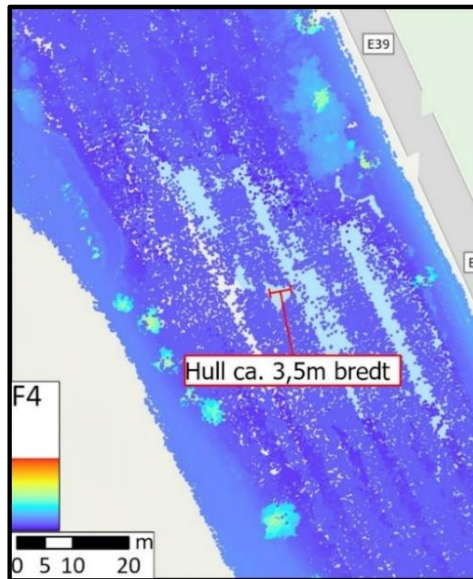
I alle GIS- og militære operasjoner er det viktig å starte med en grundig oppdragsanalyse (Grinderud et al., 2016, s. 140). Steget bør blant annet inkludere en analyse på de landbaserte faktorene, for å finne spesifikke elveområder som skal rekognoseres. Disse områdene må også ses i sammenheng med etterretningsvurderingene gjort i operasjonsområdet. Videre er det behov for innhenting av nødvendig data, her ved bruk av ALB. I dette steget er det kritisk at prinsippene beskrevet i kapittel 3.4 blir fulgt for å sikre kvaliteten på innsamlingen. Deretter skal den innhentede dataen analyseres ved bruk av vadeverktøyet. Etter vadeverktøyet har gjennomført analysesteget må resultatene evalueres. Dette er for å verifisere at den produserte dataen er gyldig, og kan anvendes. Avslutningsvis er det viktig å distribuere analysene slik at de bidrar til beslutnings- og oppdragsstøtte. Distribusjonen vil skje i Forsvarets kommando og kontrollsystemer, NORCCIS og NORBMS. Distribusjon i disse kanalene er hensiktsmessig, ettersom MilGeoer benytter verktøyene daglig og dermed har stor innsikt i hvordan data distribueres der. Systemene har i tillegg innebygde funksjoner som enkelt gjør det mulig å laste inn både raster- og vektordata, slik at analysene blir tilgjengeliggjort.

Dette kapitlet beskriver verktøyet for å lokalisere krysningspunkter over elver og våte gap. Selv om vademethoden inneholder flere steg, er hensikten med kapitlet er å beskrive artefaktet, slik at andre kan bruke det og for å gjøre oppgaven etterprøvable. Vadeverktøyet er i stor grad automatisert, gitt at las-filen som benyttes er klassifisert med en klasse for vannoverflate og en for bunnen av elven. Databehovet til vadeverktøyet er kun denne las-filen, men er avhengig av at et vektorlag som angir elvebredden blir laget. Hvordan verktøyet skal brukes blir beskrevet steg for steg i kapitlene under.

## 4.1 Tilrettelegging

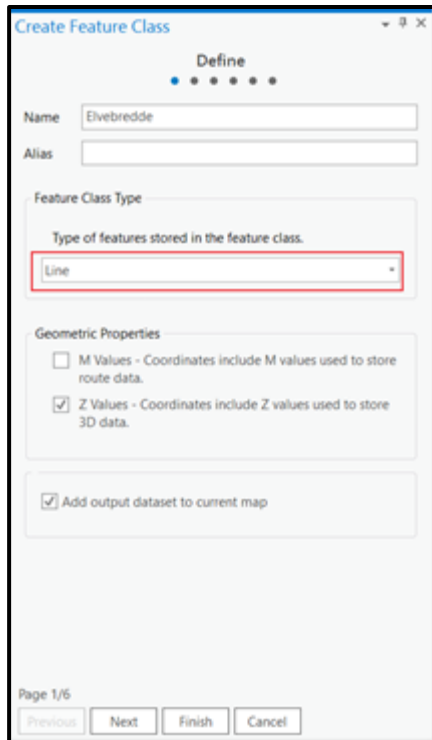
Før vadeverktøyet kan tas i bruk, er det noe tilrettelegging brukeren må gjøre manuelt. Det første steget er ikke noe som må gjøres, men noe som bør gjøres, og det er å sjekke inndataen for hull, se Figur 35. For å verifisere at det ikke er noe hull, kan de forskjellige lagene i las-filen, hoved-, bunn- og topp-fil, skrus på individuelt og visuelt inspiseres. Er det hull i hovedfilen vil det også være hull i topp- og bunnfilen. Er det store hull fører dette til interpolering over et større område

og dermed til større unøyaktighet i datasettet. Hvis det er få returer fra bunnen av elven kan dette stamme fra at vannet er ugjennomsiktig, det er sterk strøm eller at vannet er for dypt. Derfor er det viktig å visuelt sjekke området som blir skannet, spesielt hvis man ikke får bunnreturer. Dette kan gjøres fysisk på stedet med en secchiskive, eller ved å se på bilder tatt over området samtidig som LiDAR-skanningen fant sted.



Figur 35: Hull i datasettet over område 4.

Når inspeksjon av inndataen er gjort vil neste steg være å lage en ny *feature class*. Denne skal brukes til å tegne elvekanten og det er derfor viktig at den er på linjeformat, se Figur 36, og at det legges til et attributfelt som gjør det mulig å skille på elvesidene, se Figur 37.



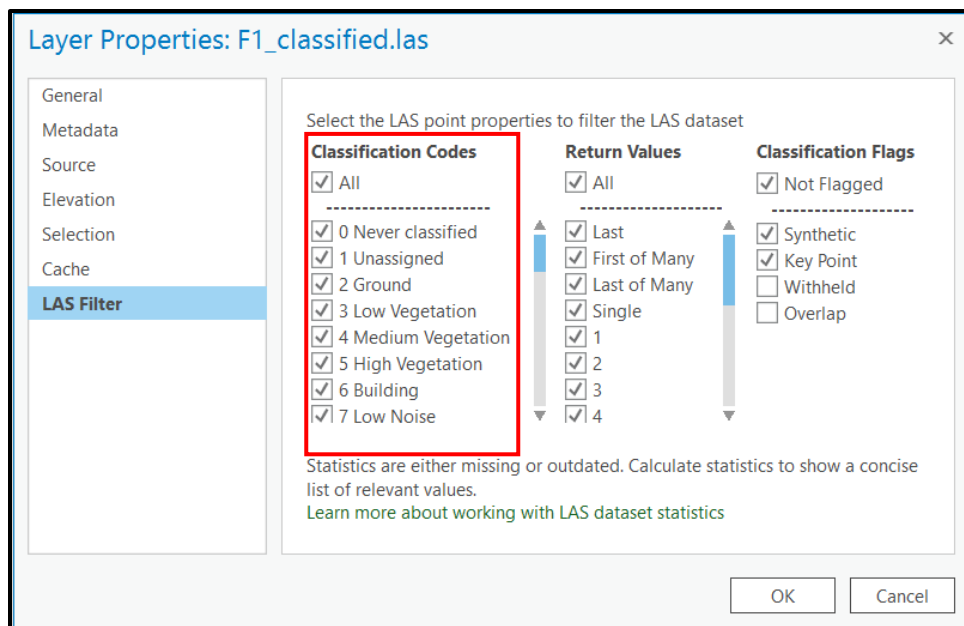
Figur 36: Hvordan velge linje på vektoren.



Figur 37: Hvordan legge til et attributfelt.

Når *feature class* er laget må høyre og venstre side av det våte gapet tegnes inn. Her er det viktig å registrere hvilken side det er i attributfeltet, slik at det er i etterkant er mulig å gjennomføre spørringer på hver av elvekantene.

Neste steg er å velge ut lagene med vannoverflate og bunnen av vannet fra las-filen. Høyreklikk på datasettet fra *Contents* og trykk på *Properties*, fra *Properties* under *LAS Filters* kan man velge hvilken *Classification code* som skal vises, se Figur 38. Hvilken kode som viser overflaten og bunnen er ikke nødvendigvis den samme i alle las-filer og det er derfor viktig å sjekke at riktig lag hukes av. Hovedverktøyet er avhengig av at overflate og bunn er selektert hver for seg. Det anbefales derfor å kopiere las-filen og velge overflaten i en og bunnen i den andre, slik at en slipper å bytte mellom lagene.



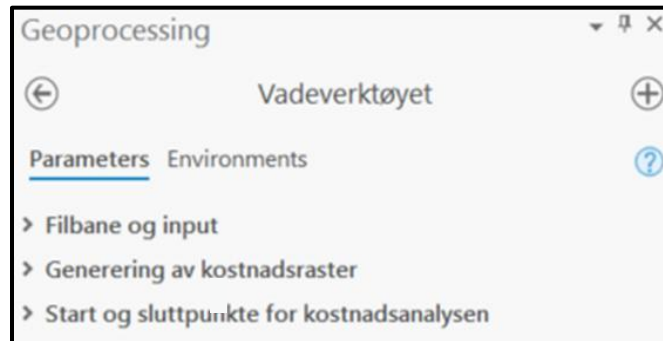
Figur 38: Classification Codes.

## 4.2 Bruk av vadeverktøyet

Vadeverktøyet består av tre deler som vist på Figur 39: (1) Filbane og input, (2) Generering av kostnadsraster og (3) Start og slutt punkt for kostnadsanalysen. Delkapitlene vil først ta for seg hvordan hver del er bygget opp for så å gjennomgå hvordan brukeren skal anvende verktøyet. Den første delen er satt opp for å gjøre verktøyet brukeruavhengig og brukeren bes derfor om å lage en ny geodatabase (GDB), alle outputfilene som produseres vil også samles her. Det er også i første steg at las- og elvekantfilene legges inn. For å produsere kostnadsrasteret i steg to må brukeren legge inn hvilke dybde- og helningskrav som passer til analysen, kostnadsrasteret vil være grunnlaget for å finne den beste ruten over elven. For å bestemme beste rute må start- og slutt punkt legges inn, dette er henholdsvis høyre og venstre side av elven og siste del av verktøyet. Den ruten med lavest kostnad vil bli lagt i den produserte GDBen med navnet *AnbefaltVaderute*.

For å få tilgang til de ulike funksjonene i ArcGIS Pro er brukeren avhengig av å kjøpe lisens. Siden vadeverktøyet er satt sammen av flere allerede eksisterende verktøy vil utvidelsen *Spatial Analyst* være nødvendig oppå en *Basic* brukerlisens. Med *Basic* brukerlisens vil man også ha tilgang til

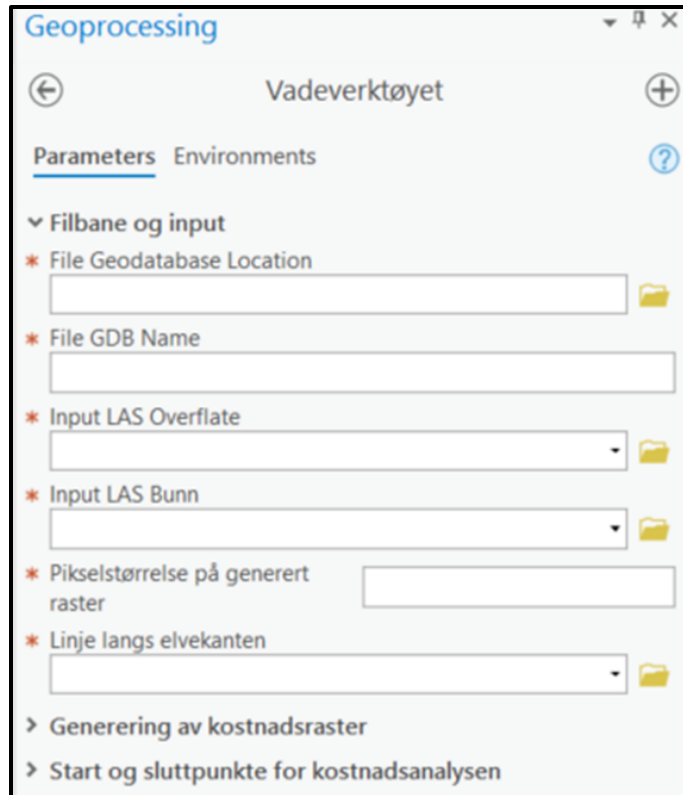
ModelBuilder som gir brukeren muligheten til å gjøre egne tilpasninger, et utklipp av arbeidsflyten i ModeBuilder er vedlagt (Vedlegg B).



Figur 39: Vadeverktøyet vist i ArcGIS Pro.

#### 4.2.1 Filbane og input

I *filbane og input*, se Figur 40, produseres innledningsvis en GDB med verktøyet *Create File Geodatabase*. Denne prosessen er satt som en forutsetning før resten av vadeverktøyet gjennomføres. For å samle utdataen som blir produsert i GDBen er koden *%Output File Geodatabase%* brukt. For vektorlagene *Linje\_Hoyre* og *Linje\_Venstre* ble verktøyet *Feature Class To Geodatabase* brukt for å flytte lagene til GDBen.



Figur 40: Filbane og input.

**File Geodatabase Location:** Velg hvilken mappe den nye GDBen skal lagres i. Det anbefales å legge GDBen i samme mappe som man jobber i, på den måten vil GDBen være tilgjengelig under *Catalog* --> *Folders*--> "Mappen man jobber i".

**File GDB Name:** Navnet på den nye GDBen.

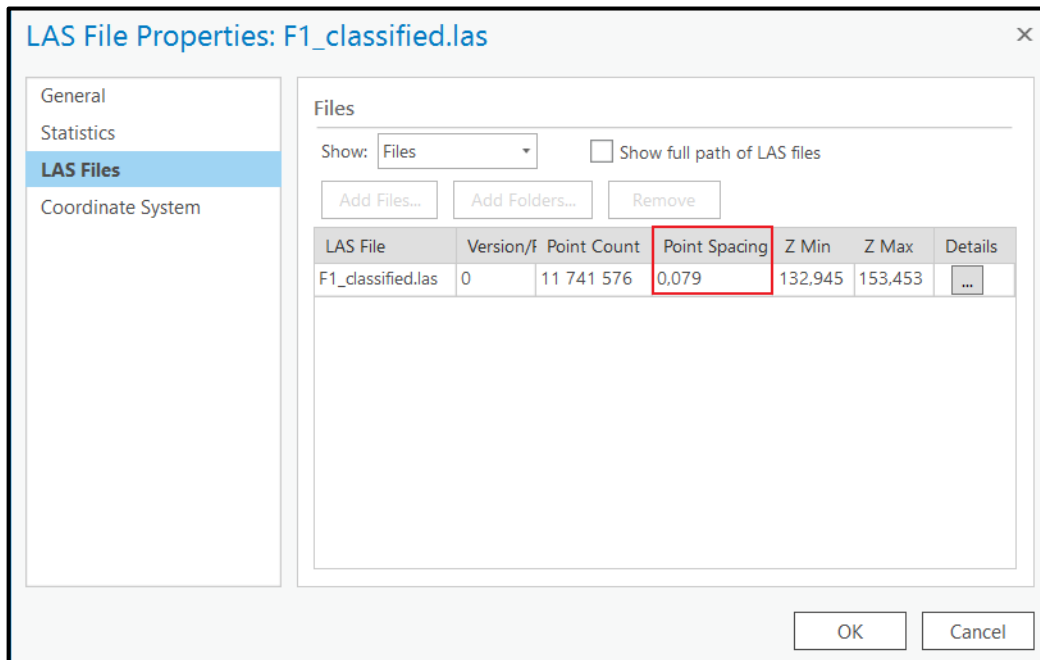
**Input LAS Overflate:** Legg inn las-filen med kun laget som viser overflaten til vannet.

**Input LAS Bunn:** Legg inn las-filen med kun laget som viser bunnen av elven.

**Pikselstørrelse på generert raster:** Denne parameteren oppgis i meter og bestemmer hvor store pikslene til rasteret som lages av las-filen blir. Anbefalt størrelse er tilsvarende attributten *Point Spacing*, se Figur 41, som finnes ved å trykke på *Catalog*, finne las-filen, høyreklikke og velge *Properties* og så velge *LAS Files*.



**Linje langs elvekanten:** Legg inn vektorlaget med elvekanter. Her må begge sidene av elven legges inn og hvilken side som er start- og slutt punkt velges i del tre av verktøyet.

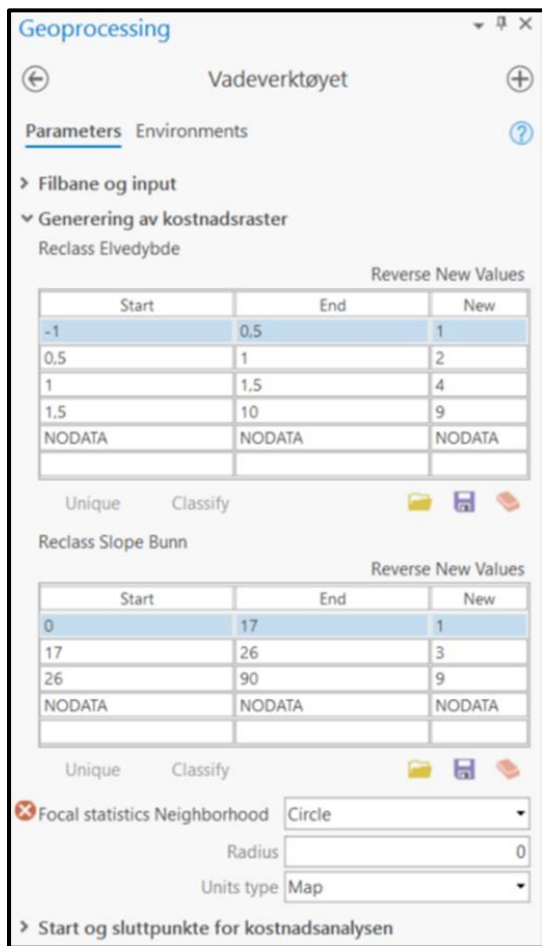


Figur 41: Point Spacing.

#### 4.2.2 Generering av kostnadsraster

*Generering av kostnadsraster*, Figur 42, starter med å konvertere punktskyene i las-filene over vannoverflaten og bunnen av elven med verktøyet *Las Dataset To Raster*. Rasterene verktøyet produserer er henholdsvis DOM (vannoverflate) og DTM (elvbunn). Disse legges så inn i rasterkalkulatoren *Minus* for å produsere nDOM, som i dette tilfellet beskriver dybden til elven. Videre brukes verktøyet *Surface Parameters* til å produsere en helningsmodell som representerer graden av endring i høyde mellom pikslene i DTMen. Både helnings- og dybdemodellen er kontinuerlige raster og har derfor behov for å reklassifiseres, med verktøyet *Reclassify*, til intervaller før det legges inn i verktøyet *Weighted Overlay*. *Weighted Overlay* brukes for å slå sammen verdiene til lagene og vekte dem, se kapittel 3.5.1. For å simulere en bredere trasé som et kjøretøy vil trenge, blir verktøyet *Focal Statistics* anvendt, se kapittel 3.5.2. Verktøyet omgjør

rasteret fra *Weighted Overlay* til et kostnadsraster, som er utgangspunktet for å lokalisere beste vaderute.



Figur 42: Generering av kostnadsraster

**Reclass Elvedybde:** Her kan brukeren legge inn nye verdier for elvedybde. På intervallet, *Start* til *End*, settes en ny verdi som vil bli brukt videre i vadeverktøyet. For å være på den sikre siden er lurt å legge inn feilmålingen til LiDAR-sensoren her. Har sensoren eksempelvis 5cm nøyaktighet bør dette trekkes fra maksdybden til kjøretøyet, slik at dette er den nye maksdybden. For å unngå NODATA er det viktig å inkludere alle rasterverdiene i intervallet. Utgangspunktet er derfor satt til å dekke intervallet fra -1 til 10m. Negative verdier kan oppstå som et resultat av interpolering eller feil klassifisering, -1m elvedybde er derfor lagt inn som utgangspunkt. I denne versjonen er

det er kun verdiene 1, 2, 4 og 9 som er tillatt i feltet *New*. Verdi 1 tildeles det intervallet som er best egnet for vading og 9 tildeles det intervallet som er minst egnet. Er det behov for å legge til andre verdier må dette gjøres i ModelBuilder, se kapittel 4.4. Om rasteret inneholder NODATA vil omklassifiseringen ikke gjøre noen endringer på dette. Som utgangspunkt er det definert fire intervaller. Om brukeren ønsker å bruke færre intervaller vil dette være mulig, men om brukeren ønsker flere må dette endres i ModelBuilder.

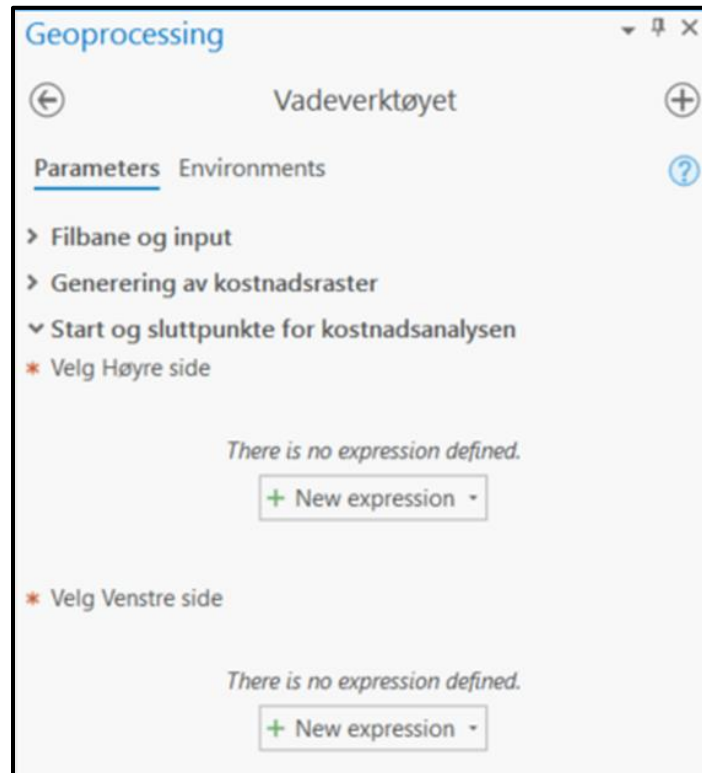
***Reclass Slope Bunn:*** Her gjøres det samme som *reclass elvedybde*, bare med helningsmodellen av bunnen. Som utgangspunkt er de standardiserte helningskravene i Hæren for farbart, begrenset farbart og ikke farbart omklassifisert til henholdsvis 1, 3 og 9 (Generalinspektøren for Hæren, 2015, s. 126). Her er det kun verdiene 1, 3 og 9 som er tilgjengelig. Er det behov å legge inn andre verdier må dette gjøres i ModelBuilder, se kapittel 4.4.

***Focal statistics Neighborhood:*** Her velges det hvordan nabolaget skal se ut når *Focal Statistics* gjennomføres. *Focal Statistics* brukes i vadeverktøyet til å simulere at det er et kjøretøy som skal vade. Hvis ikke *Focal Statistics* hadde blitt inkludert hadde analysen basert seg på pikselstørrelsen til rasteret, og på den måten kun blitt en tynn linje med pikselstørrelse bredde som beste rute over elven. Ved hjelp av nabolaget som defineres, regner *Focal Statistics* ut gjennomsnittet til alle cellene i nabolaget og gir cellen i fokus denne verdien. Det er derfor anbefalt å ha et nabolag med lik bredde som kjøretøyet som skal krysse det våte gapet. Sirkel er satt som utgangspunkt, men det er også mulig å velge andre former på nabolaget, se kapittel 3.2.5. Under *Units type* er *Map* satt som utgangspunkt, om brukeren ønsker å bruke denne parameteren er det viktig at brukeren er kjent med hvilken måleenhet kartet bruker. Det er også mulig å bruke pikselstørrelse. Resultatet fra *Focal statistics* er kostnadsrasteret, dette er utgangspunktet når beste rute over elven skal kalkuleres.

### 4.2.3 Start og sluttspunkt for kostnadsanalysen

Den siste delen av verktøyet har til hensikt å finne den beste ruten fra en side av det våte gapet til den andre. For å vite hva som er start og stopp for ruten, er vadeverktøyet avhengig av at brukeren

tegner inn dette, som forklart i kapittel 4.1. Verktøyet *Select* brukes så for å velge ut høyre og venstre side av elven i datasettet, se Figur 43. Høyre siden av elven er satt som startlinje og legges derfor inn i verktøyet *Cost Distance*. Her beregnes den akkumulerte kostnaden av å reise fra startlinjen, se kapittel 3.5.3. Resultatet brukes så i *Cost Path* sammen med sluttlinjen, venstre side, for å finne den ruten med lavest akkumulert kostnad. Resultatet fra *Cost Path* er et raster som til slutt vektoriseres til en vektorlinje med verktøyet *Raster To Polyline*.



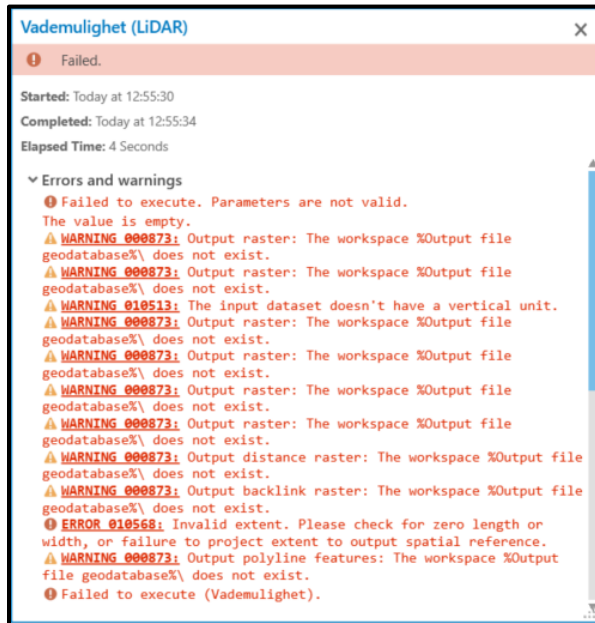
Figur 43: Start og slutt punkt for kostnadsanalysen velges ved hjelp av *Select*.

**Velg Høyre side:** Her skal høyre side av elvekanten velges. Denne siden blir brukt som startside for kostnadsanalysen.

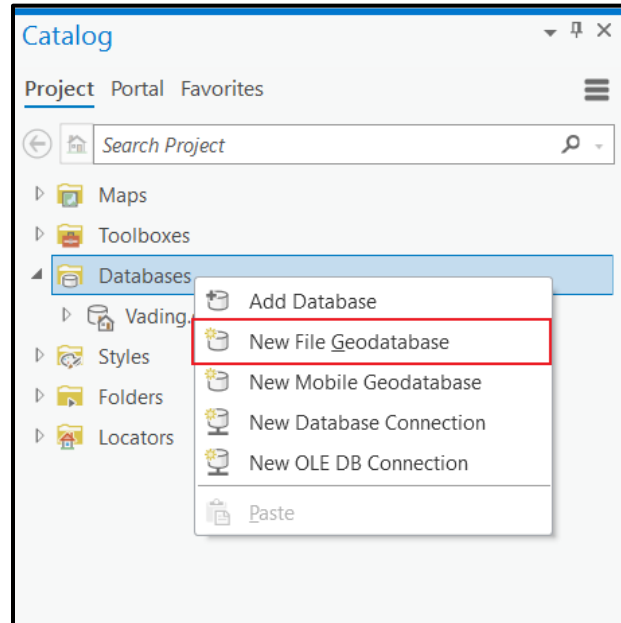
**Velg Venstre side:** Her skal venstre side av elvekanten velges. Denne siden blir brukt som sluttside for kostnadsanalysen.

## 4.3 Feilmelding og advarsler

Vadeverktøyet har blitt testet ut på flere steder, og etter første gjennomføring hadde verktøyet problemer med å finne riktig filbane. Om feilmeldingene vist på Figur 44 vises etter at hovedverktøyet har kjørt, er en løsning å etablere GDBen fra *filbane* og *input* manuelt, se Figur 45.

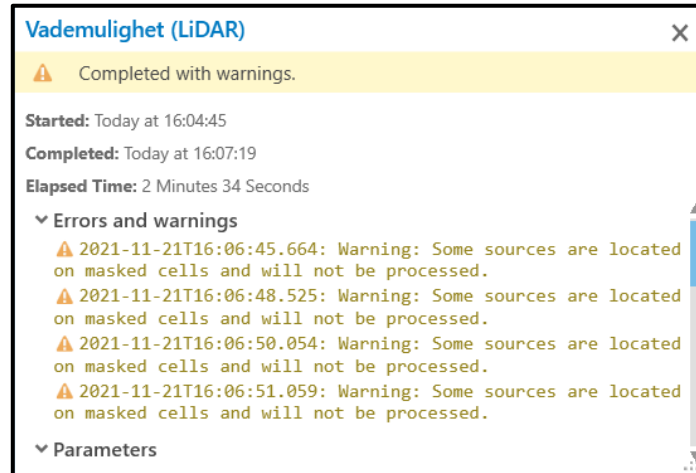


Figur 44: Feilmelding som følge av at ønsket GDB ikke er etablert.



Figur 45: Hvordan opprette en ny GDB manuelt.

Om elvekantene som tegnes inn går utenfor kostnadsrasteret som produseres vil advarselen vist på Figur 46 vises. Advarselen oppstår fordi hovedverktøyene *Cost Distance* og *Cost Path* ikke klarer å regne seg frem til de delene av elvekanten som går utenfor kostnadsrasteret, se Figur 63. Hvis denne advarselen oppstår er det anbefalt å sammenligne kostnadsrasteret og elvekantene, for så å redigere elvekantene slik at de faller innenfor kostnadsrasteret. Ved å gjøre dette vil verktøyet kunne teste alle mulige krysninger over hele rasteret, og dermed bedre kunne definere beste vaderute.

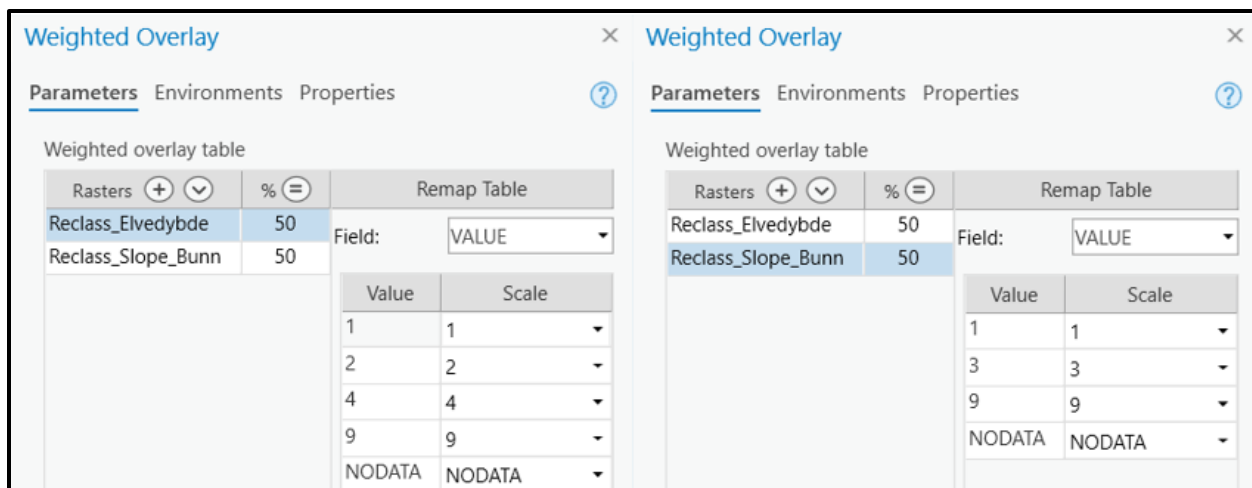


Figur 46: Advarsel om at Cost Distance og Cost Path er gjennomført, men ikke optimalt.

## 4.4 Egne tilpasninger

For å være mer brukervennlig inkluderer ikke vadeverktøyet alle tilpasningene som er mulig å gjøre. Dette kapitlet tar for seg noen av tilpasningene som kan gjøres. For å gjøre tilpasninger på vadeverktøyet må det åpnes i ModelBuilder, dette gjøres fra *Catalog --> Toolboxes --> Vadeverktøyet --> høyreklikk og velg Edit.*

*Weighted overlay* er satt til å vekte helningsmodellen av bunnen og elvedybden like mye, og de forskjellige verdiene er vektet fra 1 til 9, som vist på Figur 47. Er det ønskelig å dele inn helningsmodellen eller dybdemodellen i flere intervaller, med angitt verdi, kan dette gjøres i verktøyet *Reclassify*. Hvis dette gjøres, er det viktig å oppdatere *Weighted overlay table*. For at tabellen skal bli oppdatert må datasett som er reklassifisert legges inn i *Weighted Overlay* på nytt, dette krever derfor at man kjører *Reclassify* verktøyet i ModelBuilderen og legger inn det nye datasettet som en *Weighted overlay table*.



Figur 47: Vekting av *Reclass\_Elvedybde* (V) og *Reclass\_Slope\_Bunn* (H).

I *Focal Statistics* verktøyet er gjennomsnitt satt som utgangspunkt for utregning av nabolaget. Det er mulig å endre dette til en annen statistisk utregning om brukeren ønsker det, se kapittel 0 for mer informasjon.

Når det har blitt gjort endringer i vadeverktøyet kan verktøyet kjøres på to måter. Den første måten er å lagre vadeverktøyet og bruke det som beskrevet i kapittel 4.1. Den andre er å legge inn data direkte i ModelBuilderen og bruke vadeverktøyet derfra. Hvis *Weighted Overlay* skal endres er dette anbefalt metode.

## 4.5 Evaluering av resultater

Etter analysene er gjennomført er det viktig å evaluere resultatene som er produsert. Dette er for å sjekke at dataen produsert er gyldig, slik at de kan anvendes, eller om det er nødvendig å gjøre noen av stegene på nytt. For å gjøre det mulig å evaluere analysene blir samtlige filer produsert i verktøyet lagt i en felles GDB. Herfra kan alle filer hentes ut etter ønske. For å evaluere resultatet, undersøk om *AnbefaltVaderute* krysser områder som er klassifisert som uegnet for vading. Siden *Weighted Overlay* bruker en pikselskala fra 1-9, er det mulig at den anbefalte vaderuten går over

områder med helning og vanddybde som ikke egner seg for vading. Ved å skru på laget *AnbefaltVaderute* og sammenligne ruten med *Reclass\_Elvedybde* og *Reclass\_Slope\_Bunn*, er det mulig å sjekke om ruten går over et område som overskrider kjøretøyets krav.

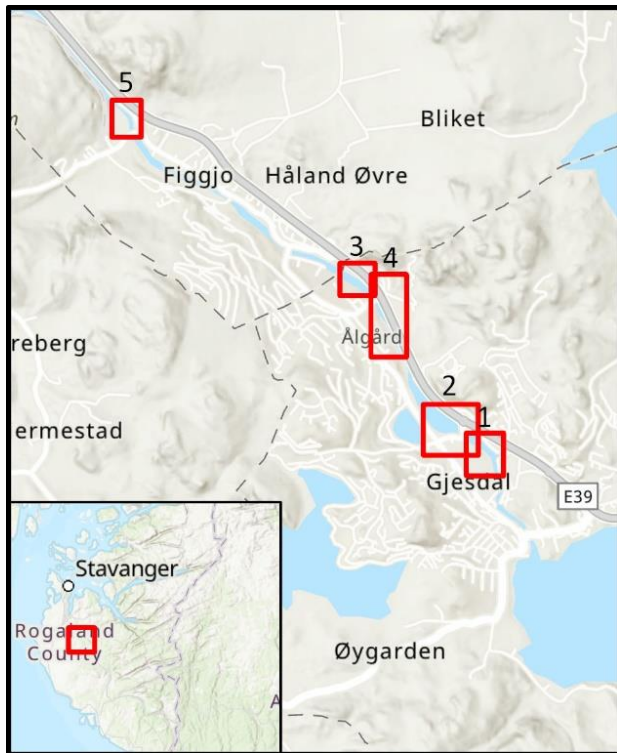


# 5 Resultater

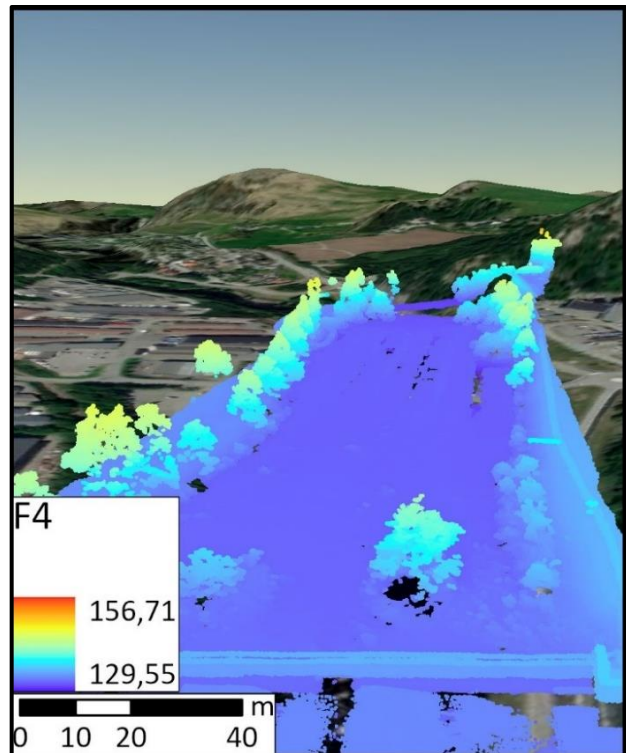
Dette kapitlet belyser resultatene fra stegene innsamling av data, analyse og evaluering av resultater i vademethoden. Siden det ikke har vært tilgang på en egen LiDAR-drone, har det blitt brukt data samlet inn av en ekstern part. Utgangspunktet for denne oppgaven er derfor et datasett fra Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) over Figgjoelva i Rogaland. Etersom inndataen påvirker resultatet i stor grad, vil inndataen først bli presentert, deretter presenteres og evalueres resultatene fra feltforsøket.

## 5.1 Inndata

På oppdrag fra NVE samlet selskapet Nordic Unmanned i november 2020 inn data med LiDAR over flere områder av Figgjoelva (Vedlegg C; Vedlegg D). Dette ble gjennomført som et testforsøk og er Nordic Unmanned sitt første forsøk på innhenting av LiDAR-data med Astralite. Resultatet fra deres innsamling er fem las-filer over forskjellige områder av elven, se Figur 48. Hvert område inneholder en punktsky som vist på Figur 49.



Figur 48: De 5 analyseområdene.



Figur 49: 3D-visning av punktskyen fra område 4.

Utstyret som ble brukt til innsamlingen er vist i Tabell 3, sammen med flyhøyde, flytid og antall vellykkede flygninger. Grunnet høy vegetasjon i område 3, 4 og 5 måtte dronen fly høyere enn planlagt i disse områdene. Tabell 4 viser at punktettheten i område 4 er lavere og kan være et resultat av dette. Under innsamlingen hadde Nordic Unmanned problemer med å registrere om sensoren registrerte data, dette førte til ekstra flygninger og tap av tid (Vedlegg D).

Tabell 3: Parametere for Figgjo innsamlingen (Vedlegg C) (ASTRALite, 2020; New Chc X900 Rtk Gnss GPS, u.å.; Stein Engen, u.å.).

<p><b>Drone:</b></p>	<p>Staaker BG-200:</p> 
<p><b>Batymetrisk sensor:</b></p>	<p>ASTRALite Edge Green LiDAR:</p> 
<p><b>Flyhøyde:</b></p>	<p>20-25 meter</p>
<p><b>Total flytid:</b></p>	<p>3 timer</p>
<p><b>Flygninger som ga resultat:</b></p>	<p>5 av 7</p>
<p><b>Rover/basestasjon:</b></p>	<p>CHC X900R:</p> 

Tabell 4 viser den overordnede punkttettheten til hver av filene, og Figur 50 og Figur 51 viser områdedekkende punkttetthet. Med en punktavstand på rundt 0,1m var vadeverktøyet i stand til å produsere rastre med 10x10cm oppløsning.

*Tabell 4: Punktavstand og punkttetthet til LAS-filene*

LAS-fil	Punktavstand	Punkttetthet
<b>Flight 1 (Område 1)</b>	0,079 m	160,2 p/m <sup>2</sup>
<b>Flight 2 (Område 2)</b>	0,104 m	92,5 p/m <sup>2</sup>
<b>Flight 3 (Område 3)</b>	0,079 m	160,2 p/m <sup>2</sup>
<b>Flight 4 (Område 4)</b>	0,140 m	51,0 p/m <sup>2</sup>
<b>Flight 5 (Område 5)</b>	0,085 m	138,4 p/m <sup>2</sup>



Figur 50: Områdedekkende punkttetthet for område 1 og 2 (Vedlegg C).

Point density - Area 3

Area 3	
Points	Percentage
<5	3.61%
5<10	5.97%
10 < 20	15.60%
20 <50	54.96%
> 50	19.87%

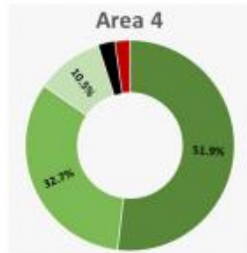


■ <5 ■ 5<10 ■ 10 < 20 ■ 20 <50 ■ > 50



Point density - Area 4

Area 4	
Points	Percentage
<5	2.58%
5<10	2.33%
10 < 20	10.46%
20 <50	32.72%
> 50	51.91%



■ <5 ■ 5<10 ■ 10 < 20 ■ 20 <50 ■ > 50



Point density - Area 5

Area 5	
Points	Percentage
<5	3.27%
5<10	4.12%
10 < 20	12.50%
20 <50	68.59%
> 50	11.52%



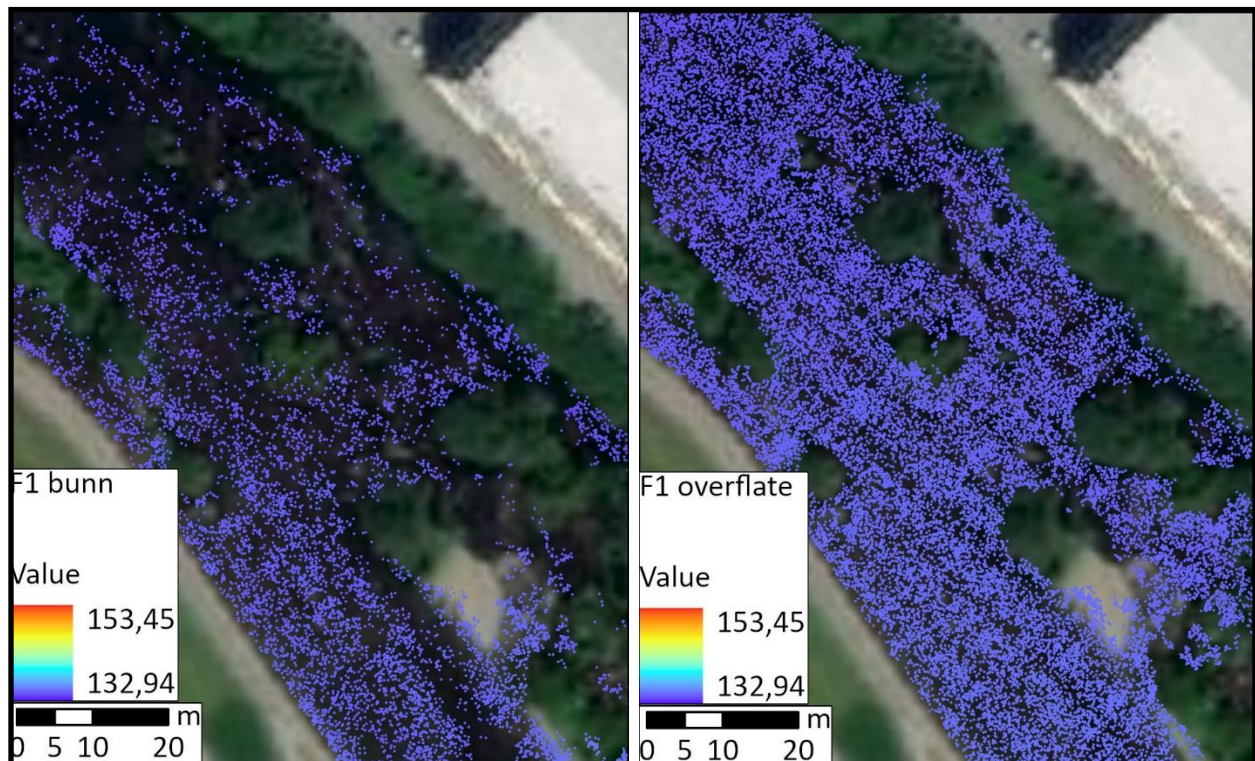
■ <5 ■ 5<10 ■ 10 < 20 ■ 20 <50 ■ > 50



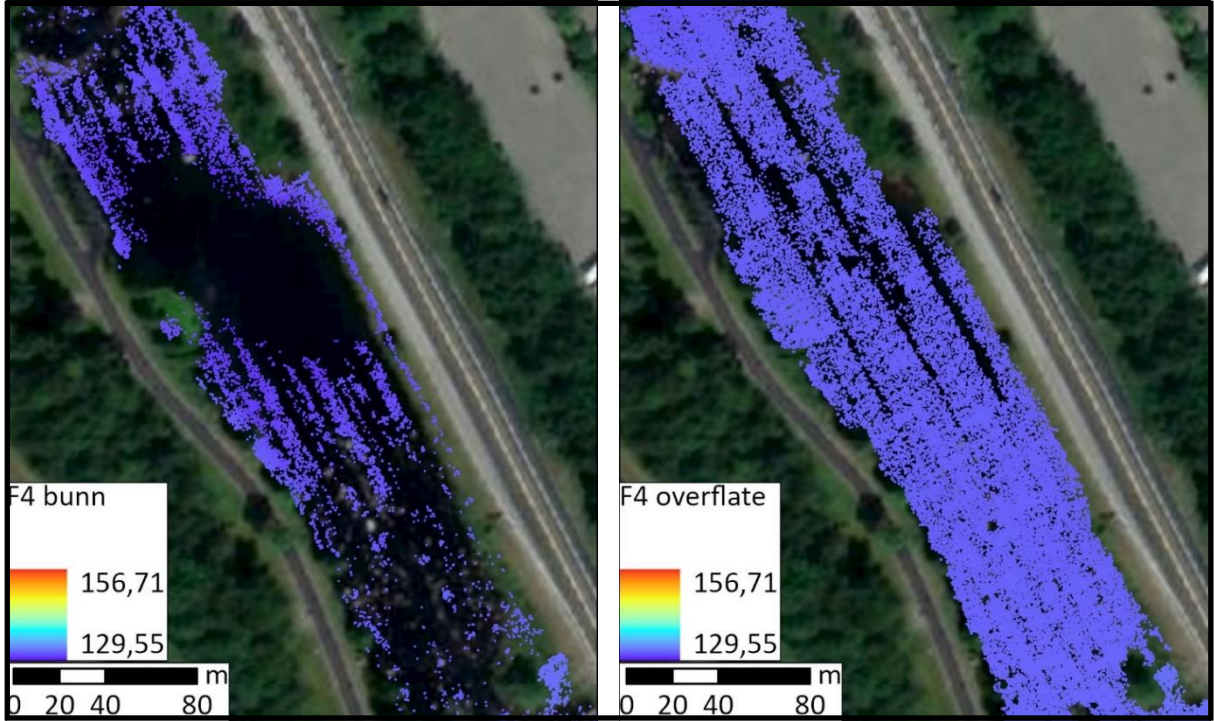
Figur 51: Områdedekkende punkttetthet område 3, 4 og 5 (Vedlegg C).



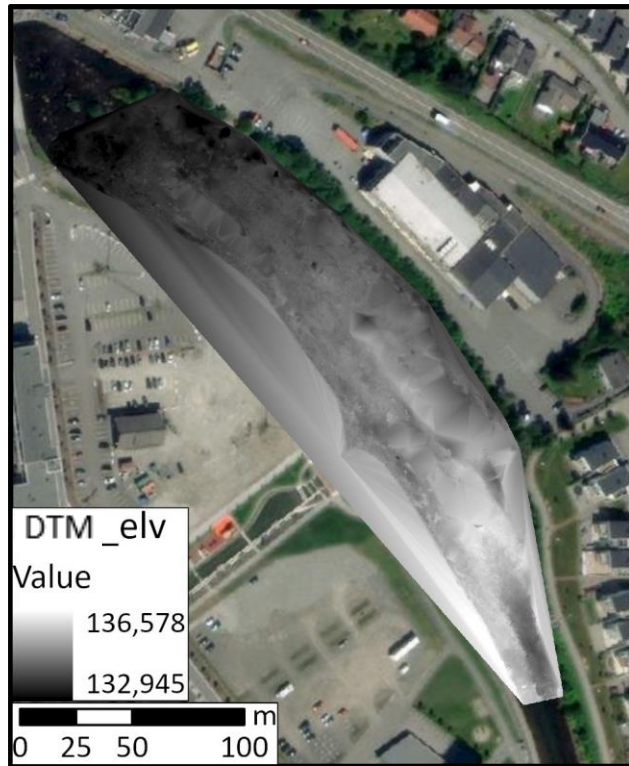
Når punktene på vannoverflaten og bunnen skilles fra hverandre, ser en at det er stor forskjell på punkttettheten, se Figur 52. Dette førte til mer interpolasjon på bunnen enn overflaten. Øyer i vannet og hull førte også til interpolasjon over større områder. Over område 4 var punkttettheten på bunnen av elven så lav at det oppsto hull i bunndatasettet, se Figur 53. Figur 54 viser at det også blir gjort interpolasjon utenfor elven der elven svinger. Dette har likevel ingen påvirkning på resultatet ettersom analysen blir gjort mellom elvekantene.



Figur 52: Forskjell i punkttettheten mellom bunn og overflate i område 1.



Figur 53 Hull oppstått i bunndatasettet over område 4.



Figur 54: Interpolering i sving.



## 5.2 Parametere brukt under forsøket

I analysen ble parameterne i Tabell 5 brukt.

Tabell 5: Parametere brukt under forsøket.

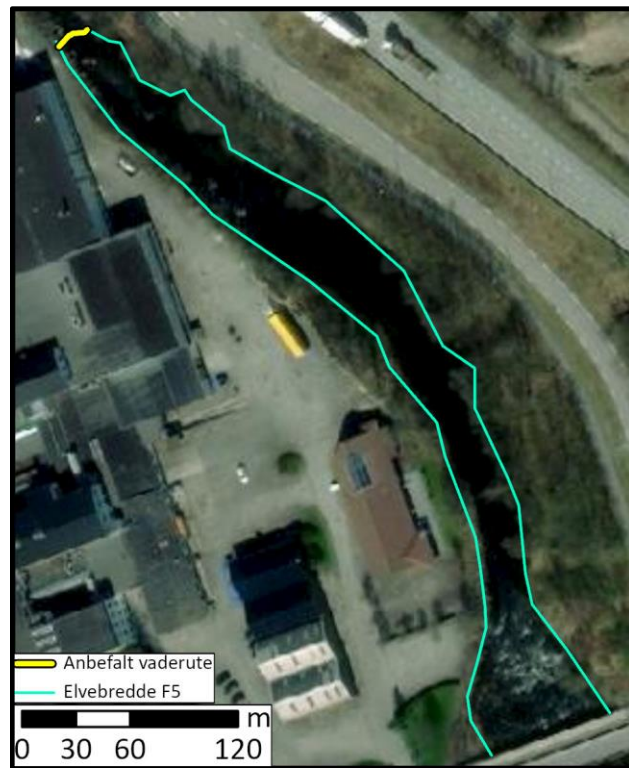
Parameter	Verdi
<b>Pikselstørrelse på generert raster</b>	0,1
<b>Reclass Elvedybde</b>	Utgangspunktet ble brukt.
<b>Reclass Slope Bunn</b>	Utgangspunktet ble brukt.
<b>Focal statistics Neighbourhood</b>	Nabolag = Circle Radius = 2 Unit type = Map

## 5.3 Resultater fra oppgaven

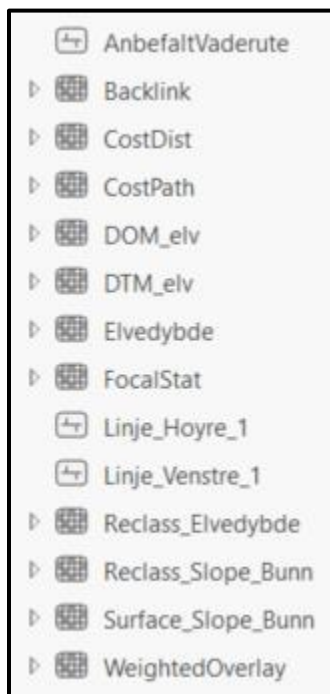
I denne analysen er det gjennomført fem feltforsøk på den forhåndsinnsamlede dataen. Resultatet fra feltundersøkelsen er vist på Figur 55 og Figur 56. *AnbefaltVaderute* er hovedresultatet til vadeverktøyet, men i GDBen som produseres finner brukeren 13 andre datasett, se Figur 57. Disse er med på å skape forståelse for hvordan vadeverktøyet kommer frem til den anbefalte vaderuten.



Figur 55: Anbefalt vaderute for område 1-4.



Figur 56: Anbefalt vadeområde fra område 5.

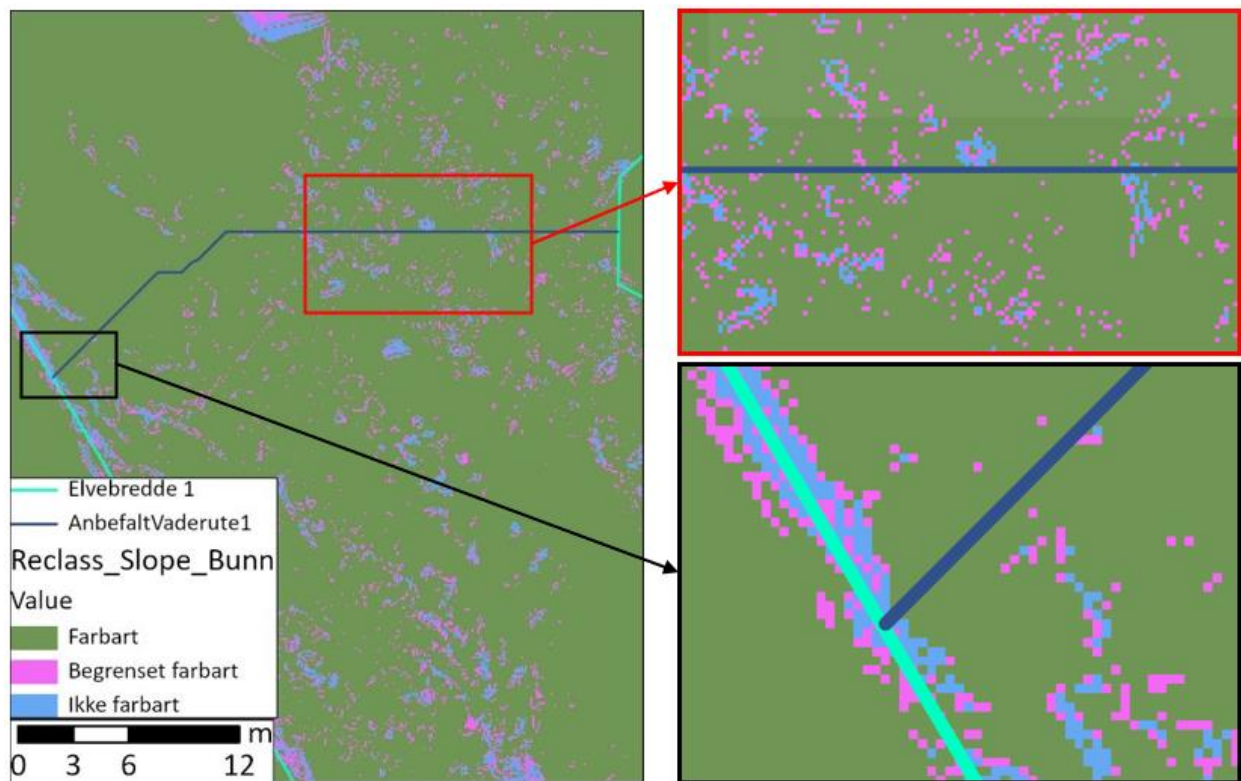


Figur 57: Innholdet i den nye GDB som produseres.

## 5.4 Vurdering av resultatet

For å vurdere kvaliteten til de anbefalte vaderutene, kan rutene ses på i sammenheng med de reklassifiserte datasettene *Reclass\_Slope\_Bunn*,

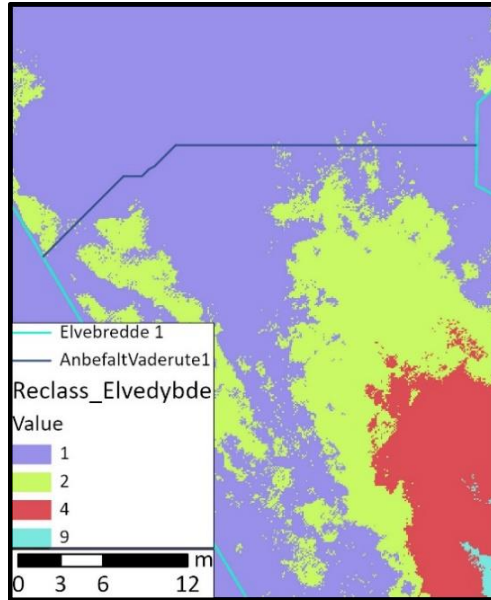
Figur 58, og *Reclass\_Elvedybde*, Figur 59. Av de fem rutene krysser fire ruter helning som er klassifisert som ikke farbar, men dette er kun over korte perioder som vist på Figur 58. Når det kommer til elvedybde går fire av fem ruter gjennom dybde 2, som er intervallet 0,5m til 1,0m dypt.



Det at vaderutene holder seg unna de dypeste områdene tyder på at denne vektingen har hatt en ønsket innvirkning på resultatet.

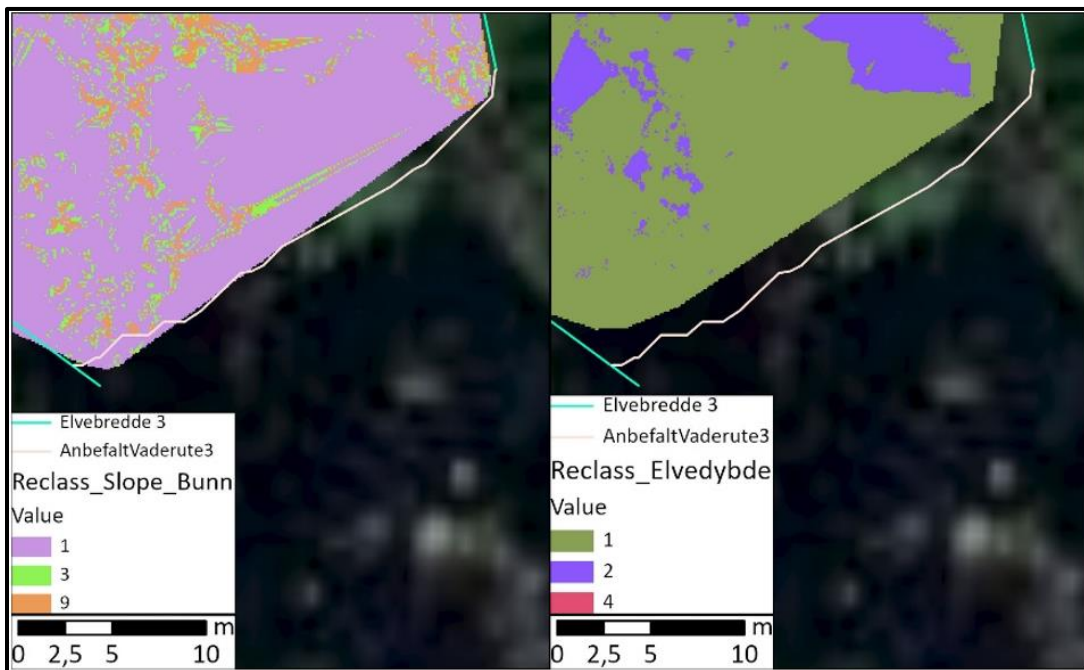
Figur 58: *AnbebalVaderute1* sett opp imot helning.



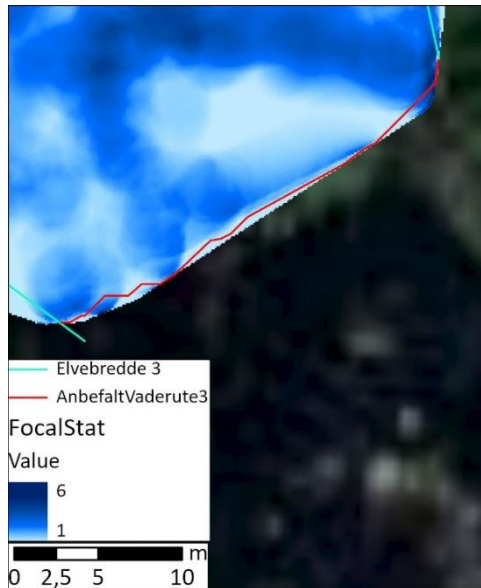


Figur 59: AnbefaltVaderute1 sett opp imot evledybde.

Anbefalt rute for område 3 overlapper kun med deler av *Reclass\_Slope\_Bunn*, og ikke med datasettet for *Reclass\_Elvedybde*, se Figur 60. Dette er mulig fordi kostnadsrasteret som produseres resulterer i en utvidet versjon av *Weighted Overlay*, og som Figur 61 viser overlapper ruten helt med kostnadsrasteret.

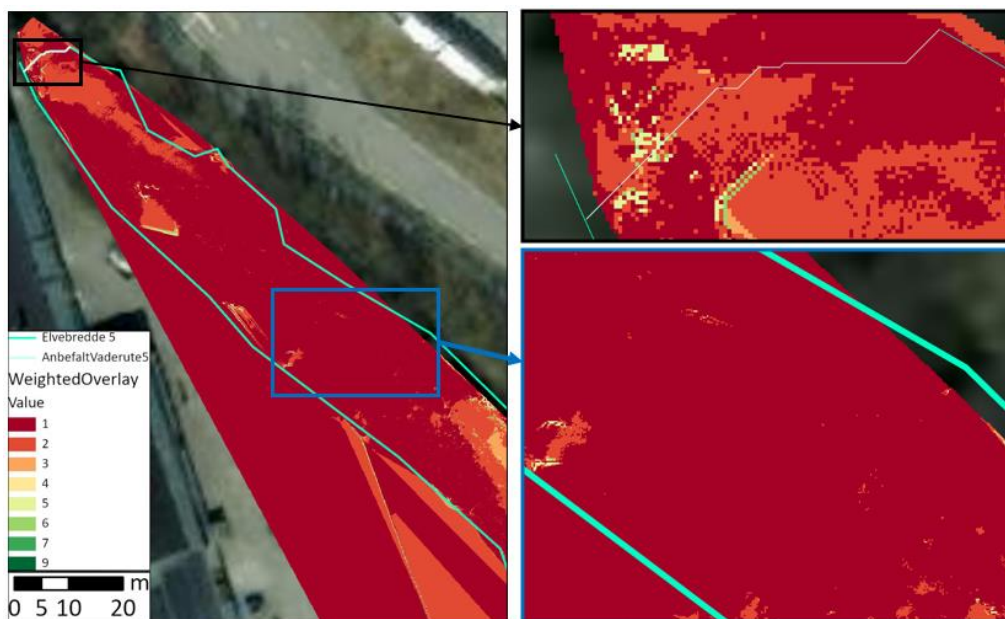


Figur 60: AnbefaltVaderute3 sammen med *Reclass\_Slope\_Bunn* (V) og *Reclass\_Elvedybde* (H).



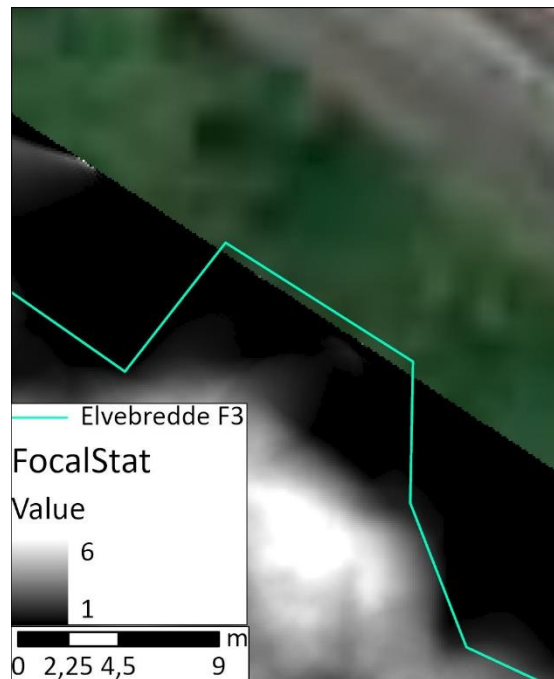
Figur 61: AnbefaltVaderute3 sammen med kostnadsrasteret.

Fra Figur 55 og Figur 56 er det tydelig at bredden på vadestedet har stor innvirkning på anbefalt vaderute. Det at bredden av gapet inngår i analysen tillater verktøyet å velge et mindre egnet vadested basert på elvedybde og helning, så lenge det kun er over en kort strekning. Område 5 er et eksempel på dette, se Figur 62. I område 5 er det et lengre område med de gunstigste verdiene for elvedybde og helning som ikke anbefales på grunn av lengden av vadestedet.



Figur 62: Effekten bredde har på AnbefaltVaderute5.

Om elvekanten blir unøyaktig tegnet inn vil ikke alle mulige ruter vurderes. Dersom linjene som definerer elvekantene ikke er innenfor kostnadsrasteret, se Figur 63, vil ikke vadeverktøyet se pikslene som mulige start- eller sluttpunkter. Dette er fordi disse linjene definerer start og stopp for vadingen. Konsekvensen kan være at den beste ruten ikke identifiseres. Om start- eller sluttpunkter er utenfor kostnadsrasteret vil feilmeldingen på Figur 46 vises etter at vadeverktøyet har kjørt.



*Figur 63: Elvekanten er utenfor kostnadsrasteret.*

## 6 Drøfting

I dette kapitlet diskuteres oppgavens metodevalg og vademethoden. Siktemålet er å besvare problemstillingen, og i dette arbeidet anvendes den teknologivitenskapelige metode. Det må derfor vurderes hvor godt metoden egner seg i oppgaven. Det første trinnet i vademethoden, oppdragsanalyse, står som en grunnstein for planlegging av både militær- og GIS-operasjoner, men inneholder flere aspekter som oppgaven avgrenser mot. Det nest siste trinnet, evaluering av resultater, er kritisk for å etterse at det ikke blir gjort feil i prosessen og at verktøyet har fungert som det skal. På den andre siden er dette en tidkrevende prosess og krever kompetanse innen GIS. Det siste trinnet, distribusjon, vil skje i Forsvarets standardiserte distribusjonskanaler, som er godt kjente plattformer for MilGeoer og vil derfor ikke drøftes.

Imidlertid omhandler problemstillingen hvordan ALB kan benyttes til å lokalisere vadeområder. Dette ble deretter spisset i metoden ved å definere et artefaktbehov, et verktøy som automatisk lokaliserer vadeområder. Kjernen til oppgaven handler dermed om trinn to og tre av vademethoden, innsamling av data og analyse, og disse er derfor objektet for diskusjon. Som tidligere skrevet, førte manglende ressurser og tilgang til utstyr at oppgaven tok utgangspunkt i allerede innsamlet data og det ble ikke gjennomført en selvstendig innsamling. Dette er ikke i tråd med vademethoden, som er iterativ. At metoden er iterativ fører til at en hadde gjennomført innsamlingen på nytt hvis resultatene ikke var adekvat. På grunn av fiendebildet i et operasjonsområde er det på den andre siden ofte ikke mulig å gjennomføre flere innsamlinger. Det er også ofte andre enn MilGeoene som står for innsamling av data. Den innsamlede dataen er derfor realistisk. Derfor vil ALBs evne til å samle inn data drøftes med utgangspunkt i den fremlagte droneteknologien. Som uttrykk for hvor effektiv datainnhenting med ALB er vil dette drøftes sammen med datakvalitet, det eneste databehovet til vadeverktøyet. Deretter løftes egenskapene til vadeverktøyet frem, og det blir diskutert hvor effektivt verktøyet er. Avslutningsvis presenterer oppgaven metoder for mer effektiv krigføring. Krigføring er i seg selv et svært lite klimavennlig fenomen, men det er likevel flere bærekraftsfremmende aspekter ved artefaktet som vil bli løftet frem.

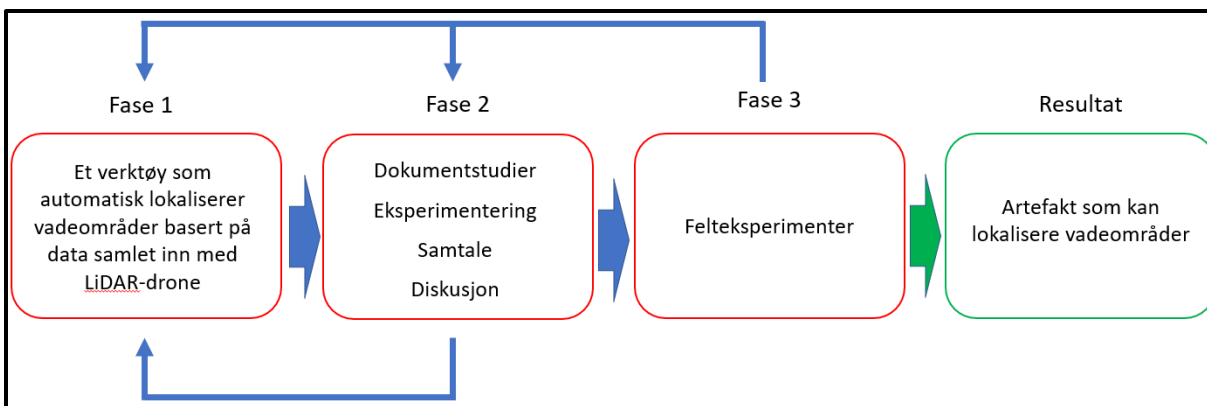


## 6.1 Teknologivitenskapelig metode

I arbeidet med å konkretisere hvordan LiDAR-drone kan lokalisere vadeområder ble den teknologivitenskapelige metode brukt. Målet var å lage et egnet verktøy til nettopp dette. For å evaluere metoden er det hensiktsmessig å gjennomføre forsøk som fører til generalitet, presisjon og realisme. Metoden er kun evaluert med feltforsøk, noe som fører til realisme, men gjør samtidig at en mister generaliteten en kan oppnå med metodetriangulering. Videre mangler feltforsøk også presisjon, noe eksempelvis et laboratorieforsøk ville gitt. For å likevel sikre kvalitet er verktøyet blitt evaluert i fem feltforsøk, noe som skaper generalitet innen evalueringsformen. Selv om metoden har mangler innen presisjon og generalitet, demonstrerer verktøyet ikke bare hvordan man kan lokalisere egnede vadeområder, men verktøyet gjør det også automatisk.

Til tross for dette kan problemstillingen implisere at det søkes etter flere løsninger på problemet. Flere metoder og verktøy som lokaliserer egnede vadeområder ville gitt sammenligningsgrunnlag, og mulighet til å velge den mest egnede av dem. Flere metoder og verktøy betyr også at problemet kan adresseres fra flere sider. Å velge ut et fåtall kan medføre at innsikten blir snevrere, og at andre løsninger neglisjeres. Gjennom eksperimentering har vadeverktøyet likevel vært gjenstand for omfattende prøving og feiling. Det kan derfor hevdes at flere avarter faktisk har blitt vurdert og at resultatet samlet sett er det mest egnede.

Til tross for at teknologivitenskapelig metode kun spisser oppgaven mot én løsning, er dette en løsning som fungerer. Fremgangsmåten for å tilfredsstille artefaktbehovet sikrer også at hensikten med oppgaven blir oppfylt. Hensikten; å utforske LiDAR og dens muligheter til innsamling av data om vadeområdet, oppfylles primært gjennom idegenerering i fase to, se Figur 64. For å løse artefaktbehovet tvinger idegenerering forskeren til å bli kjent med relevant teori. Idegenerering gjennom litteraturstudier og eksperimentering med ulike løsninger på artefaktbehovet gir innsikt om LiDAR. Videre har samtaler, og diskusjon med eksperter innen LiDAR og geodesi ført til at teori om LiDAR og dens muligheter til innsamling av data om vadeområdet i stor grad har blitt dekket.



Figur 64 Teknologivitenskapelig metode i denne oppgaven.

Selv om teknologivitenskapelig metode forsikrer at LiDAR utforskes og blir redegjort for i et betydelig teorikapittel, dras fokuset tidvis vekk fra temaet. For å kunne produsere verktøyet som tilfredsstillende artefaktbehovet har det vært nødvendig å fordype seg i ArcGIS Pro. Selv om forfatterne er kjent med programvaren, har det vært behov for å sette seg inn i nye verktøy og bruke tid på å lage et fungerende vadeverktøy. I noen grad har fokus derfor dreid seg om ArcGIS Pro i stedet for LiDAR, noe som medfører at artefaktet kan stå i veien for hensikten. Likevel fører eksperimentering med vadeverktøyet til en mer praktisk tilnærming til LiDAR-data. Den praktiske tilnærmingen til LiDAR-data kan dermed også anses som en annen måte å utforske LiDAR-data og dens muligheter på, og dermed oppfylle hensikten.

## 6.2 ALB – innsamling og datakvalitet

Innhenting av data om vadeområdet med ALB har fordeler og ulemper. Slik kapittel 3.2 forklarer, er ALB blant de beste alternativene til å kartlegge elver. I motsetning til ekkolodd er ALB kun avhengig av flyhøyde og vannets dybde i grunne områder for å kunne samle inn data. ALB muliggjør også simultankartlegging av vannoverflaten, vannsøylen, bunnen av vannet og land. Med andre ord kan ALB samle inn data om både land og vann, og kan videre brukes til videre geoanalyser.

ALB har i tillegg fordelen av å kunne dekke store arealer, generere homogen punkttetthet og raskt samle inn data, uten å være i kontakt med vannet. Eksempelvis var den gjennomsnittlige innsamlingstiden over områdene ved Figgjoelva i underkant av 26 minutter, samtidig som ALBen sørget for homogen punkttetthet. Innsamlingen ble gjennomført med Astralite, som på grunn av sin lave skannevinkel og krav til at dronen flyr lavt med lav hastighet, er en sensor som skanner områder sakte. Til sammenligning viser kapittel 3.4.1 at Riegl, med 2,5 ganger høyere hastighet og fire ganger større skannebredde, kan oppnå tilnærmet likt resultat ( $92 \text{ p/m}^2$ ) ca. ti ganger fortere.

På den andre siden viser felteksperimentene at selv om dataen blir hentet inn raskt over store områder og med generell god punkttetthet, er det ikke alltid at sensoren evner å hente ut data om selve elven. Dette eksemplifiseres i kapittel fem, over område 4, se Figur 53. I dette området evnet nesten ingen av laserpulsene å penetrere ned til bunnen av elven, noe som medførte store hull i bunnlaget. Også andre datainnsamlinger var mangelfulle. Av de syv skannede områdene var det kun fem som inneholdt god nok data til å kunne prosesseres. Vurderes innhentingene isolert, vil det altså innebære at innsamlinger har en feilrate på 28,6%. Om datainnsamlingen feilet på grunn av ALBen, eller om det var faktorer ved elven, som strøm, vanndybde eller lite gjennomsiktig vann, er derimot usikkert. Dette usikkerheten kunne blitt fjernet med ortofotoer av elven under innhentingene, eller ved bruk av secchiskiver.

Ettersom innsamlingen over Figgjoelva var et førstegangsforsøk for Nordic Unmanned, kan man forvente bedre resultater ved neste flygning. Anvendes prinsippene om planlegging av flyrute, forklart i kapittel 3.4.1, sammen med lærdommene fra testforsøket, er det mulig å justere ruten slik at egenskapene til dataen blir nesten nøyaktig slik brukeren ønsker. Brukes applikasjoner til innhentingene vil det i tillegg foregå autonomt. En kan derfor hevde at så lenge forholdene ligger til rette vil ALB gi gode resultater.

Imidlertid ligger ikke alltid forholdene til rette for at ALB skal gi gode resultater. Partikler i vannet, luftbobler og for dypt vann til at sensoren kan penetrere ned til elvebunnen er vanlige problemer. Værforholdene vil også spille inn og kan påvirke datakvaliteten. Partikler i luften, regn o.l., kan føre til lysspredning i lufta og skaper en mer ujevn vannoverflate som laserstrålene har vanskeligheter med å penetrere. Selve dronen LiDAR-sensoren er festet på vil også slite i harde værforhold. Værproblematikken kan derimot løses ved å gjennomføre datainnsamlingen på et

tidspunkt hvor været ikke står til hinder. På den andre siden har ikke Forsvaret denne friheten, som må kunne løse oppdrag uavhengig av værforhold. Forholdene er heller ikke optimale om ikke dronen har tilgang til GNSS, noe som kan være et problem i deler av landet.

Problemet med GNSS-dekning kan derimot løses relativt enkelt med en rover/basestasjon og etterprosessering av innsamlet data. GNSS-dekning er blant mange faktorer som kan føre til dårligere oppløsning i LiDAR-datasettet, men innsamling med ALB kan generelt hevdes å være god. Innsamlingsmetoden sikret punktavstand på 0,079m over område 1 og 3, og 0,140m som dårligste anvendbare resultat. Dette er svært godt, selv om ikke alle disse punktene når ned til elvebunnen. Sammenlignes dette med standard høydemodeller DTM 1m- og 10m, kan oppløsningen ALB sikret over områdene hevdes å være enestående.

Under innsamlingen over Figgjoelva ble det brukt rover/basestasjon for å sikre god nøyaktighet. Som nevnt i kapittel 3.4.2 er det ikke nødvendig med bakkekontrollpunkter om dataene skal vurderes internt. Det reduserer også behovet for rover/basestasjon, siden dette er et tiltak for å øke nøyaktigheten. Under innsamling av data over elver kan en flystripe med stor skannebredde være bred nok til å dekke hele gapet. Eksempelvis har Riegl en skannebredde på 109,2m ved optimal flyhøyde, noe som er bredt nok for mange elver. Om dette er tilfellet vil det ikke være nødvendig å synkronisere laserskanninger sammen. Med kun én laserskanning vil punktskyen være helt isolert, og interne målinger bør ha høy grad av nøyaktighet. På den andre siden er ikke denne metoden forankret i teori, men et resultat av diskusjon med eksperter inne LiDAR og geodesi, og derfor noe som bør undersøkes i videre arbeid.

## 6.3 Vadeverktøyet

Vadeverktøyet finner gjennom analysen av dataene ut den beste vaderuten, så lenge et start- og slutt punkt overlapper med kostnadsrasteret. Siden alle pikslene er tildelt en tallverdi vil vadeverktøyet finne en vei selv om elven er for dyp eller bratt for vading. Fordi NODATA ignoreres blir kostnadsrasteret også større enn punktskyen verktøyet tar utgangspunkt i. Dette fører

til at start- og sluttpunktene for vaderuten i større grad overlapper med kostnadsrasteret, og sikrer analyse av flere ruter.

Selv om NODATA gjør kostnadsrasteret større, er det likevel en svakhet ved verktøyet at start- og sluttpunktet for vaderuten må overlapse med kostnadsrasteret for at ruten skal vurderes. Dermed risikeres det at verktøyet ikke finner den ruten som reelt sett er mest egnet, ettersom punktene ruten beregnes fra ikke overlapper med kostnadsrasteret. Dette argumenterer for at NODATA skal ignoreres i verktøyet *Focal Statistics*.

På den andre siden ville vadeverktøyet unngått ugunstige områder hvis pikslene hadde fått verdien NODATA istedenfor høy vektning. Ved å gjøre dette hadde det vært lettere å kontrollere hvor ruten blir lagt. Dette byr likevel på utfordringer ved at kostnadsrasteret blir mindre når bredden av kjøretøyet simuleres. I denne oppgaven er det derfor fokusert på at bredden av kjøretøyet implementeres på en god måte og at vektingen tilpasses.

Med tilpasset vektning vil brukeren kunne unngå problemet med en ikke farbar vaderute. Så lenge en egnet evalueringsskala velges, se Figur 29, er det mulig å unngå områder som er dypere enn det kjøretøyet tillater. Eksempelvis kan dype områder settes til å være 100 ganger mer ugunstige å krysse enn de grunne områdene, og slik øke sannsynligheten betraktelig for at verktøyet velger en rute som er mulig å vade gjennom. Ved å legge inn realistiske verdier vil brukeren kunne simulere virkeligheten. Et eksempel i ytterkanten er at resultatet kan tilsa at det er mer gunstig å legge en bro enn å vade. Realistiske verdier er likevel vanskelig å definere ettersom verktøyet ikke inkluderer alle faktorer som påvirker vadingen, og er en forenkling av virkeligheten. Korte og bratte gap vil eksempelvis bli omgått av verktøyet, men i virkeligheten vil mindre stigninger ikke være til hinder dersom kjøretøyets klatreevne er større en stigningen. En kan også se i resultatene, at verktøyet har anbefalt en rute som er kort og ugunstig, istedenfor gunstig og lengre. Dette tyder på at de ugunstige områdene er vektet for lavt i dette tilfellet.

Vadeverktøyet gir bare brukeren én vaderute, og sier derfor lite om den generelle muligheten til å vade i analyseområdet. Hvis det skulle vise seg at den anbefalte vaderuten ikke var mulig å bruke, kunne brukeren hatt nytte av flere alternative vaderuter. Ved å se på kostnadsrasteret vil brukeren få et inntrykk av hvor man bør og ikke bør vade, uten at et konkret alternativ fremheves. En løsning

hvor flere vaderuter, med vektning av rutene, presenteres for brukeren kan derfor være med på å styrke vadeverktøyets relevans. En mulig løsning er å endre *Cost Path* til første banetype og endre destinasjonsdatasettet til punkter. Dette vil tvinge verktøyet til å finne en vaderute til hvert endepunkt, og generere like mange ruter som destinasjonspunkter. Svakheten med dette er at rutene ikke representere de beste alternativene, men heller beste rute til dette punktet.

Analysen av dataene er i stor grad automatisert og brukeren bør derfor kontrollere at resultatet er basert på det grunnlaget brukeren ønsker. Brukeren kan anvende analysene som et utgangspunkt for videre analyser, eller endre på selve verktøyet i ModelBuilder hvis det er ønskelig. Hvis brukeren er misfornøyd med resultatet verktøyet produserer, og deretter ønsker å endre verktøyet, vil dette gjøre prosesseringstiden lengre. Dersom brukeren vet at vedkommende ønsker å gjøre endringer kan dette gjøres før verktøyet kjøres, slik at mindre tid går tapt. Er det behov for å raskt finne en rute, anbefales det først å kjøre verktøyet, for deretter å evaluere og eventuelt bygge videre på analysen. Med vadeverktøyet som utgangspunkt er det altså mulig å legge til, fjerne og endre funksjoner så lenge en har tid tilgjengelig.

Vadeverktøyet benytter kun las-filene til vannoverflaten og bunnen, og derfor blir øyer eller store steiner som bryter vannoverflaten i det våte gapet sett bort ifra. Siden bunnmodellen kun tar utgangspunkt i punktene fra bunnen av elven, vil øyer og store steiner skape hull i punktskyen. Når rasteret produseres, vil disse hullene bli tettet med interpolasjon, og på den måten ignoreres disse hindrene. Det samme gjelder for rasteret som lages av overflatepunktene. En løsning er å inkludere bakke- og vegetasjonspunkter fra las-filen, og sette pikslene som NODATA. Ulempen med dette er at det igjen vil oppstå problemer med at *Focal Statistics* fyller igjen hull i rasteret, om NODATA blir ignorert.

En brukervennlig funksjon med vadeverktøyet er at brukeren får tilgang til alle filene som produseres i GDBen verktøyet oppretter. For at brukeren skal slippe å skrive inn navn på de 13 filene som produseres er disse forhåndsbestemte i vadeverktøyet. Forhåndsbestemte navn kan på den andre siden skape forvirring ved gjennomføring av flere analyser. Løsningen på dette problemet har derfor blitt å legge alle filene i en ny GDB automatisk, og på den måten bevare en god filstruktur.

## 6.4 Bærekraft

Droneteknologi og automatiserte prosesseringsverktøy kan bidra til samfunnsmessig- og miljømessig bærekraft. Teknologien effektiviserer både tidligere metoder for kartlegging, som ofte er et synonym på bærekraft, og bidrar til kritisk kartlegging. Kartlegging er viktig for næringslivet og samfunnsplanlegging, men også for å måle hvor godt en evner å gjennomføre FNs bærekraftsmål. I de 17 bærekraftsmålene kan LiDAR-data være med på å kartlegge og skape grunnlag for analyser i samtlige kategorier. Teknologien er spesielt gunstig for å kartlegge klimaendringer som isbresmelting, avskoging, omfang av skogbranner og forsøpling av havområder.

Likevel står hensikten til bruken av ALB og vadeverktøyet noe i veien for klimamessig bærekraft. Hensikten til systemet er å effektivisere krigføring, antakelig vis noe av det minst miljøvennlige en kan foreta seg. Det kan derfor argumenteres for at systemet vadeverktøyet er designet for å anvendes i hindrer artefaktet i å være miljøfremmende. Dessuten kan en heller ikke utelukke at effektiviseringen ALB og vadeverktøyet gir ikke ville fått en tilbakekoblingseffekt, altså at ressurser som tidligere ville blitt brukt på å rekognosere vadeområder blir benyttet til noe annet. Denne effekten vil i så fall stryke ut det klimamessige fortrinnet ALB og vadeverktøyet har.

Likevel vil en mer miljøbevisst metode for et allerede lite miljøvennlig fenomen styrke bærekraften. Dette gjelder både det å gjøre krig «grønnere», men også selve prosessen med å finne ut om elver og våte gap kan krysses. Metoden, som per nå består av at ingeniørrekognoseringsstopper kjører sekshjuling eller over 30 tonn tunge beltedrevne stormpanservogner ut i vannet for deretter bruke målepinne, forstyrrer i stor grad både livet på land og i vann. ALB vil på den andre siden ha et mindre fotavtrykk og kan kartlegge disse områdene uten å selv være i kontakt med hverken bakken eller vannet.

## 7 Konklusjon

LiDAR-droner kan samle inn informasjon om elver og våte gap som er kritisk for å avgjøre om det er mulig å vade. Droner har fordel av å raskt kunne dekke store områder, og har en arealdekning kun avhengig flyhøyden og ikke vanndybden. Dessuten sørger ALB for høy homogen punkttetthet, samtidig som dronen simultankartlegger vannoverflaten, vannsøylen, bunnen av vannet og land. På den andre siden er ALB avhengig av at værforhold, det våte gapets karakteristikk og GNSS ligger til rette, noe som ikke alltid er tilfelle. Dette kan være et problem for Forsvaret, som må kunne løse oppdrag når som helst, i alle forhold.

Etter innsamlingen brukes datasettet til å utforme relevante høydemodeller. I denne sammenhengen er det både laget en modell for å kalkulere helningen under vann, og en for å måle vanndybden. Samlet sett bidrar høydemodellene til å gi et sammensatt bilde på hvor kjøretøy kan kjøre, og hvor dette vil være mindre gunstig.

For å automatisere prosessen har det blitt laget et verktøy som finner den beste vaderuten. Vadeverktøyet gjør først om LiDAR-dataen til de to høydemodellene, og fra disse lages et kostnadsraster. I tillegg tar verktøyet hensyn til kjøretøyets bredde. Basert på rasteret finner verktøyet til slutt den mest egnede ruten. Likevel er det vanskelig å kombinere realistiske vektingsverdier i kostnadsrasteret, simulere bredden til kjøretøyet og ta hensyn til områder med manglende data (NODATA). NODATA er derfor ignorert i vadeverktøyet.

Las-filene LiDAR-dronen produserer etter innhenting er den eneste inndataen verktøyet trenger, og disse spiller derfor en avgjørende rolle. LiDAR-droner kan samle inn data raskt over store områder. Den produserte punktskyen kan også bli svært detaljert og fører til tilsvarende detaljgrad i høydemodellene. Sensoren sliter likevel med å hente ut god data når forholdene ikke ligger til rette. Partikler i luften, uklart vann og for stor dybde til at laseren kan nå bunnen er vanlige problemer.

Den overordnede konklusjonen er at LiDAR-droner er en godt egnet kapasitet til å lokalisere vadeområder. Sensoren har mulighet til å hente inn enestående data som forteller mye om batymetrien til elver. LiDAR-droner er også raske og kan dekke store arealer. Den har likevel flere



svakheter som må hensyntas hvis den skal anvendes. Teknologien i seg selv kan også bidra til mer effektiv kartlegging av områder og således være en mer bærekraftig metode enn tidligere metodikker. Gjennom en helhetlig vurdering av sensorens kapasiteter er det derfor mulig å besvare problemstillingen; *Hvordan kan man lokalisere vadeområder med LiDAR på drone?*

Vadeområder kan lokaliseres med LiDAR på drone ved å først hente inn data om elven som er i fokus, for deretter å legge las-filen sensoren lager inn i vadeverktøyet. Resultatet fra vadeverktøyet er den mest egnede vaderuten.

## 8 Videre arbeid

Stølen forklarer at artefaktet kan være et førsteutkast for et produkt, eller metode, som videre kan forbedres. I den sammenheng er det flere tematikker som kan forbedre artefaktet.

Artefaktet er basert på teori og er testet ut med data samlet inn av en ekstern part. Det vil være hensiktsmessig å selv kunne gjennomføre en innsamling med ALB, gjerne med ulike modeller. Dette muliggjør testing av hvordan flyruten bør gjennomføres og hvordan innsamlingsapplikasjoner som tillater autonom flyging kan brukes. Det vil også gi en større indikasjon på om teorien artefaktet er basert på stemmer i realiteten.

Foruten de svakhetene som blir adressert i drøftelsen, er det også flere andre forbedringer som kan gjøres på vadeverktøyet. De vannbaserte faktorene bunnforhold og vannstrøm er faktorer som vil påvirke kjøretøys evne til å krysse elver. Disse er ikke inkludert i analysen og bør innlemmes ved en videreutvikling av produktet. Videre vil automatisk klassifisering av vannoverflaten og bunnen medføre lavere sannsynlighet for brukerfeil, men vil kreve en standardisering av las-kode.

En av årsakene til at dagens metode for rekognosering av elver bør erstattes, er at droner fjerner soldater fra vadeområdet og dermed minker risikoen for å bli engasjert. Under krigen mellom Armenia og Aserbajdsjan i Nagorno-Karabakh, 27.09-10.10.2020, hevder professor Michael Clarke at små, billige droner var avgjørende for utfallet av krigen. (Dixon, 2020; Sabbagh et al., 2020). Droner har også hatt avgjørende karakter i den Russisk-Ukrainske krigen (Alayoubi, 2023). Droner er også svært vanskelig å detektere og skyte ned (United States Army Fires Center of Excellence, 2017, ss. 1-1 - 1-2; Vlasak & Pidanic, 2016, ss. 143-144). Det vil derfor være interessant å finne ut mer om dronenes potensiale i krigføring.

Vademethoden er avhengig av etterprosessering av data. Hvis dette kunne blitt gjort i sanntid med innsamlingen av data, ville dette kortet ned totaltiden på vademethoden, samt kunne gi svaret på om området kan vades ute hos de som gjennomfører innsamlingen.

De fleste ALBer er kombinasjonssensorer mellom batymetrisk og topografisk. Det er altså mulig å hente inn data om både vann- og landbaserte faktorer, noe som vil forsterke analysene av

vadeområdet. Dette gjør det også mulig å anvende LiDAR-dronen på andre områder, som akserekognosering. Eksempelvis er både Astralite og Riegl topobatymetriske LiDAR-sensorer. Dette gjør det mulig å analysere både land og vann, og det er relevant å undersøke det utvidete potensialet.

# Litteraturliste

- Abdallah, H., Baghdadi, N., Bailly, J.-S., Pastol, Y., & Fabre, F. (2012). Wa-LiD: A New LiDAR Simulator for Waters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4), 744–748. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2180506>
- Alayoubi, M. (2023, januar 30). *Norsk næringsliv sponser avanserte droner som dreper russiske soldater i Ukraina*. NRK. <https://www.nrk.no/norge/norsk-naeringsliv-sponser-avanserte-droner-til-bombing-av-russiske-soldater-1.16267411>
- Alsadik, B., & Remondino, F. (2020). Flight Planning for LiDAR-Based UAS Mapping Applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 378. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060378>
- ASTRALite. (2020). *ASTRALite EDGE*. [https://aee4ebaf-7db8-4c06-9690-92fca2867269.filesusr.com/ugd/7f51ca\\_490c729a3c80449a85f56d37eb535f15.pdf](https://aee4ebaf-7db8-4c06-9690-92fca2867269.filesusr.com/ugd/7f51ca_490c729a3c80449a85f56d37eb535f15.pdf)
- Bakshi, B. R. (2019). *Sustainable engineering*. Cambridge University Press.
- Bjerke, H. (2017). *Geomatikk og statistikk—LiDAR-data i ArcMap*.
- Buján, S., González-Ferreiro, E., Reyes-Bueno, F., Barreiro-Fernández, L., Crecente, R., & Miranda, D. (2012). Land use classification from LiDAR data and ortho-images in a rural area. *The Photogrammetric Record*, 27(140), 401–422. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2012.00698.x>
- C. Stöcker, F. Nex, M. Koeva, & M. Gerke. (2017). Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 355.
- Cambridge Dictionary. (u.å.). *Wading*. Cambridge Dictionary. Hentet 27. oktober 2021, fra <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/wading>
- Chen, Z. (2017). *The Application of Airborne Lidar Data in the Modelling of 3D Urban Landscape Ecology*. Cambridge Scholars Publishing. [https://books.google.no/books?hl=en&lr=&id=g-62DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=The+Application+of+Airborne+Lidar+Data+in+the+Modelling+of+3D+Urban+Landscape+Ecology&ots=bi9rpVUioW&sig=HqtjrPRkSd7vdpnHn41FhKLoL0&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.no/books?hl=en&lr=&id=g-62DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=The+Application+of+Airborne+Lidar+Data+in+the+Modelling+of+3D+Urban+Landscape+Ecology&ots=bi9rpVUioW&sig=HqtjrPRkSd7vdpnHn41FhKLoL0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental approach* (2. utg.). CRC Press.
- Clausewitz, C. von. (1989). *On War* (M. Howard & P. Paret, Overs.; Indexed). Princeton University Press.

- Columbia University. (u.å.). *Lecture 11-12. Data interpolation. Statistical methods of interpolation. Map Algebra. Interpolation with raster and vector GIS data.* Columbia University. Hentet 27. oktober 2021, fra <http://www.columbia.edu/itc/eee/e1001/edit/lect6.html>
- Csanyi, N., & Toth, C. K. (2006). *LiDAR DATA ACCURACY: THE IMPACT OF PUSLE REPETITION RATE.* <https://www.asprs.org/a/publications/proceedings/fall2006/0009.pdf>
- Dalland, I. (2017). *METODE OG OPPGAVESKRIVING* (6. utg.). Gyldendal.
- Davis, Dr. C. L. (u.å.). *Reflection.* University of Louisville Department of Physics. [https://www.physics.louisville.edu/cldavis/phys299/notes/lo\\_reflection.html](https://www.physics.louisville.edu/cldavis/phys299/notes/lo_reflection.html)
- Diamond Cut Information.* (u.å.). Hentet 17. april 2023, fra <https://www.candeodiamonds.com/Diamond-cut>
- Dixon, R. (2020, november 11). Azerbaijan's drones owned the battlefield in Nagorno-Karabakh—And showed future of warfare. *Washington Post.* [https://www.washingtonpost.com/world/europe/nagorno-karabkah-drones-azerbaijan-aremenia/2020/11/11/441bcbd2-193d-11eb-8bda-814ca56e138b\\_story.html](https://www.washingtonpost.com/world/europe/nagorno-karabkah-drones-azerbaijan-aremenia/2020/11/11/441bcbd2-193d-11eb-8bda-814ca56e138b_story.html)
- Esri. (u.å.-a). *ArcGis Pro.* Esri. Hentet 15. november 2021, fra <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Esri. (u.å.-b). *Cost Distance (Spatial Analyst).* ArcGIS Pro. Hentet 16. november 2021, fra <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/cost-distance.htm>
- Esri. (u.å.-c). *Cost Path (Spatial Analyst).* ArcGIS Pro. Hentet 17. november 2021, fra <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/cost-path.htm>
- Esri. (u.å.-d). *How Focal Statistics works.* ArcGIS Pro. Hentet 16. november 2021, fra <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-focal-statistics-works.htm>
- Esri. (u.å.-e). *How Weighted Overlay works.* ArcGIS Pro. Hentet 16. november 2021, fra <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-weighted-overlay-works.htm>
- Esri. (u.å.-f). *LAS dataset statistics.* ArcGIS Pro. Hentet 29. november 2021, fra <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/las-dataset/work-with-las-dataset-statistics.htm>
- Esri. (u.å.-g). *Raster dataset zones and regions.* ArcGIS for Desktop. Hentet 17. november 2021, fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/raster-dataset-zones-and-regions.htm>

- Esri. (u.å.-h). *What is ModelBuilder?* ArcGIS Pro. Hentet 15. november 2021, fra <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>
- Fujii, T., & Fukuch, T. (2005). *Laser Remote Sensing*. Taylor & Francis Group.
- Gatziolis, D., & Andersen, H.-E. (2008). *A Guide to LIDAR Data Acquisition and Processing for the Forest of the Pacific Northwest*. United States Department of Agriculture. [https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw\\_gtr768.pdf](https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr768.pdf)
- Generalinspektøren for Hæren. (2015). *Stabshåndbok for Hæren—Plan- og beslutningsprosessen*.
- Generalinspektøren for Hæren. (2016). *UD 2-1 Forsvarets sikkerhetsbestemmelser for landmilitær virksomhet*.
- Graham, L. (2019, april 1). *Wide Angle Blues*. LIDAR Magazine. <http://lidarmag.com/2019/04/01/random-points-wide-angle-blues/>
- Grinderud, K., Haavik-Nilsen, A. C., Bjerke, H., Sanderud, Ø., Ulveseth, P. G., Mauseth, Ø., Nilsen, S., Fjetland, M., Steffensen, A., & Richardsen, I. (2016). *GIS geografiens språk i vår tidsalder*. Fagbokforl.
- Ground control points: How many do you need (and when are checkpoints enough)?* (2021, mars 23). Wingtra. <https://wingtra.com/ground-control-points-how-many-do-you-need-and-when-are-checkpoints-enough/>
- Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E., & Reid, D. J. (2000). Meeting the accuracy challenge in airborne bathymetry. *NATIONAL OCEANIC ATMOSPHERIC ADMINISTRATION/NESDIS SILVER SPRING MD*. file:///C:/Users/jditlevsimons/OneDrive%20-%20forsvarssektoren/Bachelor-UFUNB0000184/Readings/Guenther\_MeetingAccuracyChallenge.pdf
- Herrick, S. (2017, november 14). *What's The Difference Between A Drone, UAV and UAS?* Botlink. <https://botlink.com/blog/whats-the-difference-between-a-drone-uav-and-uas>
- Hosler, J. D. (2020). *Gap-Crossing Operations I Medieval and Modern*. 100(2), 57–65.
- Huang, M.-J., Shyue, S., Lee, L.-H., & Kao, C.-C. (2008). A Knowledge-based Approach to Urban Feature Classification Using Aerial Imagery with Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74, 1473–1485. <https://doi.org/10.14358/PERS.74.12.1473>
- Im, J., John R. Jensen, & Michael E. Hodgson. (2008). Object-Based Land Cover Classification Using High-Posting-Density LiDAR Dat. *GIScience & Remote Sensing*, 45(2), 209–228. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.2.209>

- Jinhai, C., & Miklavcic, S. (2011). The generation of digital terrain models from LiDAR data using seeding and filtering and its application to flood modelling. I *2011 International Conference on Multimedia Technology* (s. 5622–5625). IEEE.
- Kartverket. (2022). *SOSI abstrakte spesifikasjoner: FKB generell del 5.0.1*.
- Kartverket. (2023). *Standard for geografisk informasjon: Produksjon av basis geodata 2.0*. [https://sosi.geonorge.no/Standarder/Produksjon\\_av\\_basis\\_geodata/#\\_orientering\\_og\\_intrroduksjon](https://sosi.geonorge.no/Standarder/Produksjon_av_basis_geodata/#_orientering_og_intrroduksjon)
- Kinzel, P. J., Legleiter, C. J., & Nelson, J. M. (2013). Mapping River Bathymetry with a Small Footprint Green LiDAR: Applications and Challenges. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(1), 183–204. <https://doi.org/10.1111/jawr.12008>
- Klemas, V. (2011). Beach Profiling and LIDAR Bathymetry: An Overview with Case Studies. *Journal of Coastal Research*, 27, 1019–1028. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00017.1>
- LAS Specification 1.4—R15*. (2019). The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. [http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS\\_1\\_4\\_r15.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf)
- Li, Y., & Ibanez-Guzman, J. (2020). Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems. *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(4), 50–61. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2973615>
- LiDAR Drone Mapping, High-Precision Navigation, & Advanced Sensing*. (u.å.). Geodetics. Hentet 30. november 2021, fra <https://geodetics.com/>
- Mandlbürger, G. (2017). *Interaction of Laser Pulses with the Water Surface—Theoretical Aspects and Experimental Results. 11–12*, 343–352.
- Mandlbürger, G. (2020). A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. *Hydrographische Nachrichten*, 116, 6–15. <https://doi.org/10.23784/HN116-01>
- Mandlbürger, G., Hauer, C., Wieser, M., & Pfeifer, N. (2015). Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and Instream Habitats—A Case Study at the Pielach River. *Remote Sensing*, 7(5), 6160–6195. <https://doi.org/10.3390/rs70506160>
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., & Pfeifer, N. (2013). Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry – A case study at the River Pielach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 175–180. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W2-175-2013>
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Schwarz, R., Flöry, S., & Nussbaumer, L. (2020). Concept and Performance Evaluation of a Novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR Sensor. *Remote Sensing*, 12(6), 28. <https://doi.org/10.3390/rs12060986>

- Mark G. Petovello. (2003). *Real-Time Integration of a Tactical-Grade IMU and GPS for High-Accuracy Positioning and Navigation* (UCGE Nr. 20173; s. 208). Department of Geomatics Engineering. [https://www.ucalgary.ca/engo\\_webdocs/GL/03.20173.MGPetovello.pdf](https://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/GL/03.20173.MGPetovello.pdf)
- Miljøverndepartementet. (2012). *Om forskrift om infrastruktur for geografisk informasjon (geodataforskriften)*. <https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/md/2012/pmer/geodataforskriften.pdf>
- Moussy, L. (2021, februar 25). *What are the different patterns of LiDAR scanners?* YellowScan. <https://www.yellowscan-lidar.com/knowledge/what-are-the-different-patterns-of-lidar-scanners/>
- New Chc X900 Rtk Gnss GPS*. (u.å.). Hentet 22. november 2021, fra <https://galasurvey.en.made-in-china.com/product/BNnQGKrubSke/China-New-Chc-X900-Rtk-Gnss-GPS.html>
- Norborg, A. (1981). *Vitenskapsteori*. NLA. [https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2014091008054](https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2014091008054)
- Norges Geologiske Undersøkelse. (2015, februar 2). *Digitale høydemodeller | Norges geologiske undersøkelse*. Norges Geologiske Undersøkelse. <https://www.ngu.no/emne/digitale-h%C3%B8ydemodeller>
- Paschotta, R. (u.å.). *Beam Divergence*. Hentet 5. november 2021, fra [https://www.rp-photonics.com/beam\\_divergence.html](https://www.rp-photonics.com/beam_divergence.html)
- Pfennigbauer, M., & Ullrich, A. (2011). Multi-Wavelength Airborne Laser Scanning. In *Proceedings of the International Lidar Mapping Forum, ILMF, New Orleans*.
- Pharr, M., Wenzel, J., & Humphreys, G. (2018). *8.4 Microfacet Models*. [https://www.pbr-book.org/3ed-2018/Reflection\\_Models/Microfacet\\_Models#](https://www.pbr-book.org/3ed-2018/Reflection_Models/Microfacet_Models#)
- Phoenix Flight Planner*. (u.å.). Phoenix LiDAR Systems. Hentet 30. november 2021, fra <https://www.phoenixlidar.com/flightplan/>
- R. Brennan & T L Webster. (2006). Object-oriented land cover classification of lidar-derived surfaces. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2), 162–172. <https://doi.org/10.5589/m06-015>
- RIEGL. (2021). *RIEGL VQ-840-G*. [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxriegldownloads/RIEGL\\_VQ-840-G\\_Datasheet\\_2021-09-01.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/RIEGL_VQ-840-G_Datasheet_2021-09-01.pdf)
- Rough Glass Microfacet Model*. (2012, oktober 7). gamedev.net. <https://www.gamedev.net/blogs/entry/2255191-rough-glass-microfacet-model/>



- Sabbagh, D., Defence, D. S., & editor, security. (2020, desember 29). UK wants new drones in wake of Azerbaijan military success. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2020/dec/29/uk-defence-secretary-hails-azerbajjans-use-of-drones-in-conflict>
- Saylam, K., Hupp, J. R., Andrews, J. R., Averett, A. R., & Knudby, A. J. (2018). Quantifying Airborne Lidar Bathymetry Quality-Control Measures: A Case Study in Frio River, Texas. *Sensors*, 18(12), 4153. <https://doi.org/10.3390/s18124153>
- Shafiq Muhammad. (2014). *GNSS/INS Integration in Urban Areas* [Norwegian University of Science and Technology]. [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2370962/726195\\_FULLTEXT01.pdf](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2370962/726195_FULLTEXT01.pdf)
- Shinohara, T., Xiu, H., & Matsuoka, M. (2021). Point2color: 3D Point Cloud Colorization Using a Conditional Generative Network and Differentiable Rendering for Airborne LiDAR. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1062–1071.
- Siyang, C., Hongchao, M., Yinchao, Z., Liang, Z., Jixian, X., & He, C. (2012). Boresight Calibration of Airborne LiDAR System Without Ground Control Points. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(1), 85–89. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2161070>
- Sjef Hærens våpenskole. (2019). *Håndbok Ingeniørrekognosering*. Sjef Hærens våpenskole.
- Skaar, J. (2018a, januar 9). *Innfallsvinkel (fysikk)*. Store norske leksikon. [https://snl.no/innfallsvinkel\\_-\\_fysikk](https://snl.no/innfallsvinkel_-_fysikk)
- Skaar, J. (2018b, mai 15). *Fresnels ligninger*. Store norske leksikon. [http://snl.no/Fresnels\\_ligninger](http://snl.no/Fresnels_ligninger)
- Stein Engen. (u.å.). *STAAKER BG-200 UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM*. Nordic Unmanned. Hentet 22. november 2021, fra <https://nordicunmanned.com/wp-content/uploads/2021/01/Staaker-BG200-data-sheet.pdf>
- Stockholm Resilience Centre. (2016, juni 14). *The SDGs wedding cake*. Stockholm Resilience Centre. <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-the-sdgs-wedding-cake.html>
- Stølen, K. (2019). *TEKNOLOGIVITENSKAP: Forskningsmetode for teknologer*. Universitetsforlaget.
- Sunzi, & Bin, S. (1999). *Sunzi: The Art of War & Sun Bin: The Art of War* (L. Wusun, W. Rusong, & W. Xianlin, Overs.; 1. utg.). Foreign Language Press.
- Tranøy, K. E. (1986). *Vitenskapen, samfunnsnæring og livsform* (1. utg.). Universitetsforlaget.

- Tulldahl, H., Vahlberg, C., Axelsson, A., Karlsson, H., & Jonsson, P. (2007). Sea floor classification from airborne lidar data. *Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III*, 6750, 675003. <https://doi.org/10.1117/12.737922>
- United States Army Fires Center of Excellence. (2017). *Army Techniques Publication (ATP) 3-01.81 Counter-Unmanned Aircraft System (C-UAS) Techniques*. Department of the Army. <https://irp.fas.org/doddir/army/atp3-01-81.pdf>
- US Department of Commerce, N. O. and A. A. (2021, februar 26). *What is LIDAR*. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>
- Vermont Center for Geographic Information. (2021, januar 26). *Statewide Normalized Digital Surface Model (nDSM) Service Now Available*. Vermont Center for Geographic Information. <https://vcgi.vermont.gov/data-release/statewide-normalized-digital-surface-model-ndsm-service-now-available>
- Vlasak, V., & Pidanic, J. (2016). The analysis of small RCS target detection in primary radar system. *2016 International Symposium ELMAR*, 141–145. <https://doi.org/10.1109/ELMAR.2016.7731773>
- Weik, M. H. (2001). Pulse repetition rate. I M. H. Weik (Red.), *Computer Science and Communications Dictionary* (s. 1376–1376). Springer US. [https://doi.org/10.1007/1-4020-0613-6\\_15108](https://doi.org/10.1007/1-4020-0613-6_15108)
- Wolfgang Wagner. (2010). Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6), 505–513.
- Yan, W. Y., Shaker, A., & El-Ashmawy, N. (2015). Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote Sensing of Environment*, 158, 295–310.
- Aarseth, O.-K. (2021, november 4). *Metodikk for rekognosering av elver og våte gap* [Personlig kommunikasjon].

