

Ingvild Brekke

# Modellering av terskelfjerning og terskelendringer i Nea

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Knut Alfredsen

Juni 2020

**NTNU**  
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg- og miljøteknikk





Ingvild Brekke

# Modellering av terskelfjerning og terskelendringer i Nea

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk  
Veileder: Knut Alfredsen  
Juni 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden



# MASTEROPPGÅVE I VASSDRAGSTEKNIKK

Student: Ingvild Brekke

Tittel: Modellering av terskelfjerning i Nea.

## 1 Bakgrunn

Nea frå Gresslidammen til Selbusjøen er regulert for kraftproduksjon gjennom Heggsetfoss og Nedre Nea kraftverk. Mellom dammen og utløpet til Nedre Nea kraftverk er vassføringa sterkt redusert, og det er bygd 38 tersklar for å oppretthalde vasspeilet på strekninga. Tersklar var på den tida Nea vart regulert rekna som eit viktig tiltak for å hindre negative verknader i vassdrag. I dag har ulemper med tersklar vorte meir klarlagde, og rehabilitering av elvestrekningar med tersklar er gjort fleire stadar. I Nea er det no på gang ei vurdering av funksjonen av tersklane, og ei mogleg løysing er fjerning med tanke på å lage betre miljøtilhøve for aure på strekninga.

Dette arbeidet er og ein del av arbeidspakke 4 i HydroCen som jobbar med utvikling av ein metodikk for miljødesign i innlandsvassdrag etter mal frå handboka for miljødesign i laksevassdrag. Metodar for å vurdere effekt av terskelendringar vil vere ein del av dette, og dette prosjektet vil gi eit viktig bidrag til dette.

## 2 Hovudpunkt i arbeidet

Arbeidet er eit sjølvstendig arbeid der kandidaten skal planlegge, førebu og gjennomføre det som er innhaldet i oppgåva. Arbeidet bygger på prosjektoppgåva som vart gjennomført i 2019.

Oppgåva skal innehalde, men ikkje nødvendigvis vere avgrensa til spørsmåla som er lista opp her:

- 1 Basert på tilrådinga gitt i prosjektarbeidet i haust skal det lagast eit endeleg raster for strekninga frå terskel 21 – 24 basert på dei måledata som vart samla inn og prosesserte i masteroppgåva.
- 2 Basert på rasteret frå 1) og HEC-RAS skal det settast opp ein 2D hydraulisk modell for strekninga. Det skal gjerast ei vurdering av størrelse på celler i modellen og kva simuleringsstrategi som skal brukast. Modellen skal om mogleg verifiserast mot flybilette eller mot dei målingane av vassflate som finst i datasettet Terratec målte inn med Lidar.
- 3 I modellen som er sett opp i 2) skal tersklar fjernast eventuelt erstattast med andre typar av struktur. Kva type struktur eller kva strategi for fjerning skal diskutierast som ein del av prosjektet og med utgangspunkt i den oversikta som er laga i prosjektoppgåva. Men to ulike analyser skal vere med i oppgåva:
  - a. Total fjerning av tersklane skal gjerast for å lage ein basis der vi kan rekne ut vassdekt areal utan tersklar
  - b. Eit forsøk med å erstatte ein eller fleire tersklar med ein cellederskel.

- 4 Med utgangspunkt i dei simuleringane som er gjort i 3) skal det gjerast ei vurdering av endringar i viktige habitatvariable mellom dei ulike løysingane (t.d. hastighet, djup, vassdekt areal). Det skal og om mogleg lage visuelle presentasjonar som viser korleis elva vil bli med ulike former for tersklar for å samanlikne dei ulike løysingane.
- 5 Rapportering av resultat frå prosjektet i form av ei masteroppgåve. I samband med rapporteringa er det viktig å levere alle modellar og data digitalt med tanke på vidareføring av arbeidet i prosjektet.

### **3 Rettleiing**

Professor Knut Alfredsen vil vere hovudrettleiar for oppgåva. Stipendiat Håkon Sundt vil fungere som medrettleiar.

Diskusjon med og bidrag frå kollegaer og medarbeidarar på NTNU, SINTEF og eventuelt andre er tilrådd. Bidrag som nyttast i oppgåva skal alltid refererast til på rett vis.

Arbeidet som vert gjort i samband med oppgåva er ein del av eit utdanningsløp og student og rettleiarar har fridom til å ta inn avgrensingar og føresetnader som kan oppfattast som urealistiske eller uvanlege i ein kommersiell samanheng.

### **4 Rapportformat, referanser og erklæring**

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som .pdf i Inspira/DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt. Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Kandidaten skal presentere oppgåva i slutten av semesteret. Tidspunkt for presentasjonen vil verte kunngjort seinare.

Innleveringsfrist er 11. juni 2020

Trondheim, 14. januar 2020

---

Knut Alfredsen  
Professor  
Institutt for bygg og miljøteknikk  
NTNU

# Sammendrag

I vassdrag med kraftproduksjon blir ofte vannføringa sterkt redusert, noe som fører til at elva blir liten sammenlignet med tidligere. For å bøte på dette er det bygget terskler i mange norske vassdrag. Tersklene demmer opp vann og skaper inntrykk av at elva er like stor som tidligere. Over tid har det blitt tydelig at terskler også medfører ulemper, som at de hindrer fiskepassasje og forverrer de økologiske forholdene i elva. Målet med oppgaven er å endre tersklene slik at fiskepassasjen forbedres, eller både forbedre fiskepassasjen og redusere det stillestående terskelbassenget.

I denne oppgaven er det laget en terrengmodell for en 2,8 km lang strekning i Nea med fire terskler. Grunnlaget for terrengmodellen er to Lidar-scanninger av terrenget supplert med ADCP-målinger i dypere delene av elva. Den hydrauliske modellen ble kalibrert mot Lidar-punkter på vannoverflaten og et ortofoto for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s.

Basert på alternative terskelutforminger beskrevet i *Tiltakshåndboka for bedre fysisk vannmiljø*, *Vassdragshåndboka* og andre kilder, er det utformet fire alternativer for tre av tersklene. Det første er fjerning av tersklene. De neste er to celleterskler med ulik høyde: Den samme som dagens terskler og halvparten så høy. Den siste varianten er en serie mindre terskeltrinn med en dypål som samler vannet ved liten vannføring. Endringene er laget med programmene HEC-RAS og ArcMap.

Alle terskelvariantene ble simulert i HEC-RAS for minstevannføringa 2 m<sup>3</sup>/s og vannføringene 10 og 100 m<sup>3</sup>/s. Resultat etter terskelfjerning for minstevannføring viser at det vanddekte arealet blir redusert til 73 % oppstrøms terskel 24, 69 % oppstrøms terskel 23 og 56 % oppstrøms terskel 22. De høye celletersklene har et oppstrøms vanddekt areal omtrent som dagens, trinntersklene har rundt 90 % og de lave celletersklene rundt 70 %. Når det vanddekte arealet ble redusert, økte hastigheten, mens dybden minsket. Både trinnterskelen og celletersklene bedrer fiskepassasjen siden de skaper en sammenhengende vannflate med omtrent 25 cm dyp over terskelen.

For terskel 24 vil det fremdeles være noen dype områder til oppholdsplasser etter fjerning. Samtidig reduseres elvas bredde til halvparten i deler av elvestrekningen. Den lave celleterskelen gir dype områder i terskelbassenget og et stillestående terskelbasseng halvparten så langt som dagens. I tillegg sprer celleterskelen strømmen utover stryket nedstrøms som har viktige oppholds- og gyteplasser, så både lav celleterskel og fjerning av terskelen kan være gode løsninger.

For terskel 23 vil terskelfjerning være en god løsning både med tanke på dybde i elvestrekningen og estetisk, og derfor er det lite aktuelt å bygge om terskelen.

Fjerning av terskel 22 viser at den er viktig for å skape dype områder i elvestrekningen. En terskel med redusert høyde vil derfor være den beste løsningen med tanke på de økologiske forholdene, og da er både lav celleterskel og lav trinnterskel aktuelle.

# Abstract

The water flow is often reduced a lot in regulated rivers, which causes the river to be small compared to its original size. To remedy this, weirs have been built in many Norwegian rivers. The weirs withhold water and give the impression that the rivers are the same size as it used to be. However, it has become clear that there are disadvantages with weirs, like hindering fish migration and worsened ecological conditions in the river. The goal of this thesis is to modify the weir to improve fish migration or both improve fish migration and reduce the weir-pool.

In this thesis a there has been made a 2,8 km long terrain model with four weirs in river Nea. The basis for the terrain model was two Lidar-scans which were supplemented with ADCP-measurements in the deep part of the river. The hydraulic model was calibrated against Lidar-point on the water surface and an orthophoto for 2 m<sup>3</sup>/s water flow.

Based on alternative weir configurations described in *Tiltakshåndboka for bedre fysisk vannmiljø*, *Vassdragshåndboka*, and other sources, four different alternative weir adjustments have been made for three of the weirs. The first is to remove the weir. The next is two cell weirs with different heights, the same as the existing weir and half their height. The last version is a series of small weir steps with a deeper part in the middle who collects the water at small water flows. The changes have been made with the software ArcMap and HEC-RAS.

All the versions were simulated in HEC-RAS for the minimum water flow 2 m<sup>3</sup>/s and water flows 10 and 100 m<sup>3</sup>/s. The results after weir removal for the minimum water flow shows that the water-covered area is reduced to 73 % upstream weir 24, 69 % upstream weir 23, and 56 % upstream weir 22. The high cell weirs had a water-covered area about the same as the existing weir, while the step weirs caused 90 % and the low cell weir 70 %. When the water-covered area was reduced, the water depth was also reduced while the velocities increased. Both the step weir and the cell weir improve fish migration since they create a continuous water surface with about 25 cm depth.

After removal of weir 24 will there still be some deep areas the fish can reside in. However, the width of the river is reduced to half in part of the river reach. The low cell weir makes deep areas in the weir-pool and the weir-pool is half as long as for the existing weir. In addition, the cell weir scatters the water flow river rapids downstream with important residence and spawning area, so both the low cell weir and weir removal is good solutions.

Removal of weir 23 is a good solution considering both depth in the river reach and aesthetically, so the alternative weir solutions are not relevant.

Removal of weir 22 shows that it is important to create deep areas upstream. Thus, a weir with reduces height is the best solution with regards to the ecological conditions, and then both the low cell weir and a lowered step weir are possible options.



# Forord

Denne masteroppgaven er avslutningen på mine 5 år som student på Bygg- og miljøteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Jeg valgte denne oppgaven fordi jeg ønsket å både bruke GIS-verktøy og hydraulisk modellering i masteroppgaven. Spesielt i bruk av GIS-verktøyene har læringskurven vært bratt, og det er fascinerende hvor mye mer effektivt og raskere det gikk å endre den siste terskelen enn det gjorde i starten.

Korona har gjort dette til et rart semester, der mesteparten av arbeidet er utført hjemmefra. Heldigvis har mitt arbeid med masteroppgaven i liten grad blitt påvirket, og kontakten med Knut har fungert godt gjennom hele semesteret.

Takk til hovedveileder Knut Alfredsen for at godt samarbeid gjennom hele semesteret, for veiledning og hjelp med R. Takk til biveileder Håkon Sundt for hjelp underveis. Takk til Ana Juarez for hjelp med å lage terrengmodellen. Takk til min søster, Kristin Brekke, for hjelp med å lage et bedre fyllbilde til visualiseringene.

Ingvild Brekke

Trondheim, 10. juni 2020



# Innhold

Figurer .....	xiii
Tabeller .....	xv
Forkortelser og noen begreper.....	xvi
1 Innledning .....	17
2 Bakgrunn og teori .....	18
2.1 Studieområdet.....	18
2.2 Terskelfjerning.....	19
2.3 Celleterskler .....	20
2.4 Hydraulisk modellering.....	22
2.5 Arbeid utført i prosjektoppgaven .....	22
3 Metode .....	24
3.1 Forbedre terrengmodell.....	24
3.2 Vannføring .....	25
3.3 Oppsett i HEC-RAS .....	25
3.3.1 Beregningsgrid .....	25
3.3.2 Tidssteg .....	26
3.3.3 Grensebetingelser og restartfil .....	26
3.3.4 Ligningssett og andre beregningsalternativer.....	27
3.3.5 Kalibrering av modell.....	27
3.4 Terskelfjerning.....	29
3.5 Terskelendring .....	29
3.5.1 Celleterskler .....	31
3.5.2 Trinnterskler.....	34
3.6 Visualisering .....	37
4 Resultater og diskusjon .....	39
4.1 Eksisterende terreng.....	39
4.1.1 Terskel .....	39
4.1.2 Elva.....	43
4.2 Uten terskler .....	47
4.2.1 Tersklene .....	47
4.2.2 Elva.....	51
4.2.3 Diskusjon .....	55
4.3 Høye celleterskler.....	56
4.3.1 Tersklene .....	56
4.3.2 Elva.....	60

4.3.3	Diskusjon .....	64
4.4	Lave celleterskler .....	65
4.4.1	Tersklene .....	65
4.4.2	Elva.....	69
4.4.3	Diskusjon .....	73
4.5	Trinnterskler.....	74
4.5.1	Tersklene .....	74
4.5.2	Elva.....	77
4.5.3	Diskusjon .....	82
4.6	Resultater for tersklene ved større vannføringer.....	83
4.6.1	Dagens terskler ved 10 m <sup>3</sup> /s .....	83
4.6.2	Uten terskler ved 10 m <sup>3</sup> /s .....	84
4.6.3	Høye celleterskler ved 10 m <sup>3</sup> /s .....	85
4.6.4	Lave celleterskler ved 10 m <sup>3</sup> /s.....	86
4.6.5	Trinnterskler ved 10 m <sup>3</sup> /s.....	87
4.6.6	Resultater ved vannføring 100 m <sup>3</sup> /s.....	88
4.6.7	Diskusjon .....	88
4.7	Visualisering av noen terskelutforminger .....	89
5	Diskusjon.....	90
5.1	Terrengmodell .....	90
5.2	Kalibrering av hydraulisk modell.....	91
5.3	Terrengendringer .....	91
5.3.1	Fjerning .....	91
5.3.2	Celle- og trinnterskler .....	92
5.4	Oppsummerende diskusjon.....	92
6	Konklusjon .....	95
	Referanser.....	96
	Vedlegg.....	98

# Figurer

Figur 1: Studieområdet .....	18
Figur 2: Grunnlag for celleterskel 22, brukt til høy kulpeterskel og trinnterskel.....	31
Figur 3: Elementene i celleterskel 22 .....	33
Figur 4: Ferdig sammensatt raster for kulpeterskel 22 .....	34
Figur 5: Profil for trinnterskel 22, kantene er skravert .....	35
Figur 6: Elementene i trinngrunnlag for terskel 22 .....	35
Figur 7: Konstruksjon av dypål i trinnterskel 22 .....	36
Figur 8: Ferdig sammensatt raster for trinnterskel 22 .....	37
Figur 9: Eksisterende terskel 24 .....	39
Figur 10: Eksisterende terskel 23 .....	39
Figur 11: Eksisterende terskel 22 .....	40
Figur 12: Dybdefordeling for eksisterende terskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	40
Figur 13: Hastighetsfordeling for eksisterende terskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	40
Figur 14: Dybdefordeling for eksisterende terskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	41
Figur 15: Hastighetsfordeling for eksisterende terskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	41
Figur 16: Dybdefordeling for eksisterende terskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	41
Figur 17: Hastighetsfordeling for eksisterende terskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	41
Figur 18: Dybdefordeling for eksisterende terskler.....	42
Figur 19: Hastighetsfordeling for eksisterende terskler .....	42
Figur 20: Dybdefordeling i elvestrekning 24 med eksisterende terskler for 2 m <sup>3</sup> /s .....	43
Figur 21: Hastighetsfordeling i elvestrekning 24 med eksisterende terskler for 2 m <sup>3</sup> /s...43	43
Figur 22: Dybdefordeling i elvestrekning 23 med eksisterende terskler for 2 m <sup>3</sup> /s .....	44
Figur 23: Hastighetsfordeling i elvestrekning 23 med eksisterende terskler for 2 m <sup>3</sup> /s...44	44
Figur 24: Dybdefordeling i elvestrekning 22 med eksisterende terskler for 2 m <sup>3</sup> /s .....	45
Figur 25: Hastighetsfordeling i elvestrekning 22 med eksisterende terskler for 2 m <sup>3</sup> /s...45	45
Figur 26: Dybdefordeling for elvestrekning mellom eksisterende terskler .....	46
Figur 27: Hastighetsfordeling for elvestrekning mellom eksisterende terskler .....	46
Figur 28: Rasteret som erstatter terskel 24.....	47
Figur 29: Rasteret som erstatter terskel 23.....	47
Figur 30: Rasteret som erstatter terskel 22.....	47
Figur 31: Dybdefordeling der terskel 24 er fjernet ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	48
Figur 32: Hastighetsfordeling der terskel 24 er fjernet ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	48
Figur 33: Dybdefordeling der terskel 23 er fjernet ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	48
Figur 34: Dybdefordeling der terskel 23 er fjernet ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	48
Figur 35: Dybdefordeling der terskel 22 er fjernet ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	49
Figur 36: Dybdefordeling der terskel 22 er fjernet ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	49
Figur 37: Dybdefordeling der tersklene er fjernet .....	49
Figur 38: Hastighetsfordeling der tersklene er fjernet.....	50
Figur 39: Dybdefordeling for elvestrekning 24 uten terskler for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	51
Figur 40: Hastighetsfordeling for elvestrekning 24 uten terskler for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s ..51	51
Figur 41: Dybdefordeling for elvestrekning 23 uten terskler for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	52
Figur 42: Hastighetsfordeling for elvestrekning 23 uten terskler for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s ..52	52
Figur 43: Dybdefordeling for elvestrekning 22 uten terskler for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	53
Figur 44: Hastighetsfordeling for elvestrekning 22 uten terskler for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s ..53	53
Figur 45: Dybdefordeling for terreng uten terskler .....	54
Figur 46: Hastighetsfordeling for terreng uten terskler .....	54
Figur 47: Høy celleterskel 24 .....	56

Figur 48: Høy celleterskel 23 .....	56
Figur 49: Høy celleterskel 22 .....	56
Figur 50: Dybdefordeling for høy celleterskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	57
Figur 51: Hastighetsfordeling for høy celleterskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	57
Figur 52: Dybdefordeling for høy celleterskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	58
Figur 53: Hastighetsfordeling for høy celleterskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	58
Figur 54: Dybdefordeling for høy celleterskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	58
Figur 55: Hastighetsfordeling for høy celleterskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	58
Figur 56: Dybdefordeling i høye celleterskler.....	59
Figur 57: Hastighetsfordeling i høye celleterskler.....	59
Figur 58: Dybdefordeling oppstrøms høy celleterskel 24 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	60
Figur 59: Hastighetsfordeling oppstrøms høy celleterskel 24 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	60
Figur 60: Dybdefordeling oppstrøms høy celleterskel 23 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	61
Figur 61: Hastighetsfordeling oppstrøms høy celleterskel 23 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	61
Figur 62: Dybdefordeling oppstrøms høy celleterskel 22 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	62
Figur 63: Hastighetsfordeling oppstrøms høy celleterskel 22 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	62
Figur 64: Dybdefordeling oppstrøms høye celleterskler.....	63
Figur 65: Hastighetsfordeling oppstrøms høye celleterskler.....	63
Figur 66: Lav celleterskel 24 .....	65
Figur 67: Lav celleterskel 23 .....	65
Figur 68: Lav celleterskel 22 .....	65
Figur 69: Dybdefordeling for lav celleterskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	66
Figur 70: Hastighetsfordeling for lav celleterskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	66
Figur 71: Dybdefordeling for lav celleterskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	66
Figur 72: Hastighetsfordeling for lav celleterskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	66
Figur 73: Dybdefordeling for lav celleterskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	67
Figur 74: Hastighetsfordeling for lav celleterskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	67
Figur 75: Dybdefordeling for lave celleterskler .....	67
Figur 76: Hastighetsfordeling i lave celleterskler.....	68
Figur 77: Dybdefordeling oppstrøms lav celleterskel 24 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	69
Figur 78: Hastighetsfordeling oppstrøms lav celleterskel 24 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	69
Figur 79: Dybdefordeling oppstrøms lav celleterskel 23 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	70
Figur 80: Hastighetsfordeling oppstrøms lav celleterskel 23 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	70
Figur 81: Dybdefordeling i elvestrekning 22 med lave celleterskler for 2 m <sup>3</sup> /s .....	71
Figur 82: Hastighetsfordeling i elvestrekning 22 med lave celleterskler for 2 m <sup>3</sup> /s .....	71
Figur 83: Dybdefordeling oppstrøms lave celleterskler.....	72
Figur 84: Hastighetsfordeling oppstrøms lave celleterskler.....	72
Figur 85: Trinnterskel 24.....	74
Figur 86: Trinnterskel 23.....	74
Figur 87: Trinnterskel 22.....	74
Figur 88: Dybdefordeling for trinnterskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	75
Figur 89: Hastighetsfordeling for trinnterskel 24 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	75
Figur 90: Dybdefordeling for trinnterskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	75
Figur 91: Hastighetsfordeling for trinnterskel 23 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	75
Figur 92: Dybdefordeling for trinnterskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	76
Figur 93: Hastighetsfordeling for trinnterskel 22 ved vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	76
Figur 94: Dybdefordeling i trinnterskler .....	76
Figur 95: Hastighetsfordeling i trinnterskler .....	77
Figur 96: Dybdefordeling oppstrøms trinnterskel 24 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	78
Figur 97: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnterskel 24 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	78

Figur 98: Dybdefordeling oppstrøms trinnterskel 23 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	79
Figur 99: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnterskel 23 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	79
Figur 100: Dybdefordeling oppstrøms trinnterskel 22 vannføring 2 m <sup>3</sup> /s.....	80
Figur 101: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnterskel 22 for vannføring 2 m <sup>3</sup> /s .....	80
Figur 102: Dybdefordeling oppstrøms trinnterskler .....	81
Figur 103: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnterskler .....	81
Figur 104: Dybdefordeling for eksisterende terskel 24 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	83
Figur 105: Dybdefordeling for eksisterende terskel 23 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	83
Figur 106: Dybdefordeling for eksisterende terskel 22 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	83
Figur 107: Dybdefordeling der terskel 24 er fjernet ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	84
Figur 108: Dybdefordeling der terskel 23 er fjernet ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	84
Figur 109: Dybdefordeling der terskel 22 er fjernet ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	84
Figur 110: Dybdefordeling for høy celleterskel 24 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	85
Figur 111: Dybdefordeling for høy celleterskel 23 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	85
Figur 112: Dybdefordeling for høy celleterskel 22 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	85
Figur 113: Dybdefordeling for lav celleterskel 24 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	86
Figur 114: Dybdefordeling for lav celleterskel 23 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	86
Figur 115: Dybdefordeling for lav celleterskel 22 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	86
Figur 116: Dybdefordeling for trinnterskel 24 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	87
Figur 117: Dybdefordeling for trinnterskel 23 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	87
Figur 118: Dybdefordeling for trinnterskel 22 ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	87
Figur 119: Visualisering av høy celleterskel 22, figuren er ¼ av original størrelse .....	89
Figur 120: Visualisering av trinnterskel 22, figuren er ¼ av original størrelse .....	89

## Tabeller

Tabell 1: Mannings ruhetstall .....	28
Tabell 2: Sammenligning av vannoverflatehøyden i Lidar-målinger og kalibrert modell..	28
Tabell 3: Utgangspunkt for celleterskler, full høyde.....	30
Tabell 4: Utgangspunkt for celleterskler, halv høyde. ....	30
Tabell 5: Grunnlag trinnterskel.....	34
Tabell 6: Resultater for eksisterende terskler .....	40
Tabell 7: Resultater for elva oppstrøms eksisterende terskler.....	43
Tabell 8: Resultater for terskelerstatningene.....	47
Tabell 9: Resultater for elva uten terskler.....	51
Tabell 10: Resultater for høye celleterskler .....	57
Tabell 11: Resultater for elva oppstrøms høye celleterskler.....	60
Tabell 12: Resultater for lave celleterskler .....	66
Tabell 13: Resultater for elva oppstrøms lave celleterskler.....	69
Tabell 14: Resultater for trinnterskler.....	75
Tabell 15: Resultater for elva oppstrøms trinnterskler .....	77
Tabell 16: Resultater for eksisterende terskler ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	83
Tabell 17: Resultater for terskelfjerning ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	84
Tabell 18: Resultater for høye celleterskler ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	85
Tabell 19: Resultater for lave celleterskler ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s .....	86
Tabell 20: Resultater for trinnterskler ved vannføring 10 m <sup>3</sup> /s.....	87
Tabell 21: Resultater for elva oppstrøms eksisterende terskler ved 100 m <sup>3</sup> /s .....	88

# Forkortelser og noen begreper

<b>ADCP</b>	Acoustic Doppler Current Profiler, et akustisk dopplerinstrument som blant annet måler dyp.
<b>Bune</b>	Utstikker (ofte av stein) fra elvebredden og ut i elva
<b>DTM</b>	Digital terrengmodell
<b>Dypål</b>	Dypeste renna i bunnen av en elv
<b>Elvestrekning</b>	Brukes her om strekningen fra nedstrøms en terskel til oppstrøms den neste terskelen
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>Grusbanke</b>	En avleiring av grus i elva som kommer til syne på lave vannføringer
<b>Habitat</b>	Det oppholdsstedet eller leveområdet en bestemt dyreart foretrekker (Halleraker, 2020)
<b>HEC-RAS</b>	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
<b>Høyre/venstre</b>	Sett nedover elvas strømmetning
<b>Konnektivitet</b>	Vandringsmuligheter for fisk eller grad av massetransport i elva (Pulg <i>et al.</i> , 2018)
<b>Lidar</b>	Light Detection and Ranging, en optisk fjernmålingsteknikk
<b>NEVINA</b>	Nedbørfelt-Vannføring-Indeks-Analyse
<b>Terskelbasseng</b>	Den vannansamlingen som opprettholdes av en terskel (Mellquist, 1976)
<b>Terskelkrone</b>	Terskelens høyestliggende parti som er bestemmende for nivået på vannspeilet i terskelbassenget (Mellquist, 1976)
<b>Terskeltå</b>	Terskelens tilslutning til opprinnelig elvebunn
<b>TIN</b>	Triangulated Irregular Network
<b>SMVF</b>	Sterkt modifisert vannforekomst



# 1 Innledning

I vassdrag med kraftproduksjon blir vannføringa ofte sterkt redusert i deler av vassdraget. Det kan føre til at det kun renner vann i den laveste delen av elva og at store deler av elvas bredde ligger tørr etter regulering. For å motvirke dette har terskler blitt brukt som miljøtiltak for å demme opp vann. Det skaper oppholdsplasser for fisk, og gir inntrykk av at vassdraget fremdeles er fullt av vann.

Endringen fra rennende til relativt stillestående vann i elva får imidlertid konsekvenser for leveforholdene til bunndyr og fisk (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017, s. 323). Sedimenter avsettes i terskelbassenget slik at mengden skjul minsker. Ørret og andre laksefisker gyter i rennende vann, noe som er ikke mulig i terskelbassengene. Andre fiskearter, som fremmedarten ørekyt (Forsgren *et al.*, 2018), foretrekker stillestående vann, og terskler fremmer dermed den uønska ørekyten på bekostning av laksefisk.

En annen uønsket effekt av terskler er at de kan fungere som vandringshindre for laks og ørret (Arnekleiv *et al.*, 2006). Fisken vandrer ned elva til hav eller innsjøer på næringssøk og tilbake oppover elva for gyting (Vøllestad, 2019). Dersom tersklene hindrer fisken i å nå de gode gyteplassene, vil også dette føre til dårligere gyting og minskede fiskebestander.

HydroCen er et forskningscenter for vannkraft, der et av forskningsområdene er miljødesign. Miljødesign går ut på å utrede, utvikle og gjennomføre tiltak som bedrer de økologiske forholdene i regulerte vassdrag, samtidig som det tas hensyn til kraftproduksjonen (HydroCen, u.å.). Metoder for å vurdere effekt av terskelendringer er en del av dette, og dette prosjektet kan bidra til det.

En elvestrekning i Nea med tre terskler utgjør studieområdet i denne oppgaven. Nea er en stor, kraftregulert elv i Trøndelag, med nedsatt økologisk funksjon og en ørretbestand som vandrer fra Selbusjøen opp mot Heggsetdammen. Tersklene fungerer som vandringshindre og har stillestående terskelbasseng oppstrøms. For å utbedre dette bør ulike alternative tiltak på tersklene vurderes. Flere aktuelle tiltak beskrives i håndbøker som baserer seg på mønsterpraksis og gir retningslinjer.

Målet med oppgaven er å bruke hydraulisk modellering til å undersøke hvilken effekt terskelfjerning og alternative terskelutforminger har på viktige habitatvariabler som vanddekt areal, dybde og hastighet.

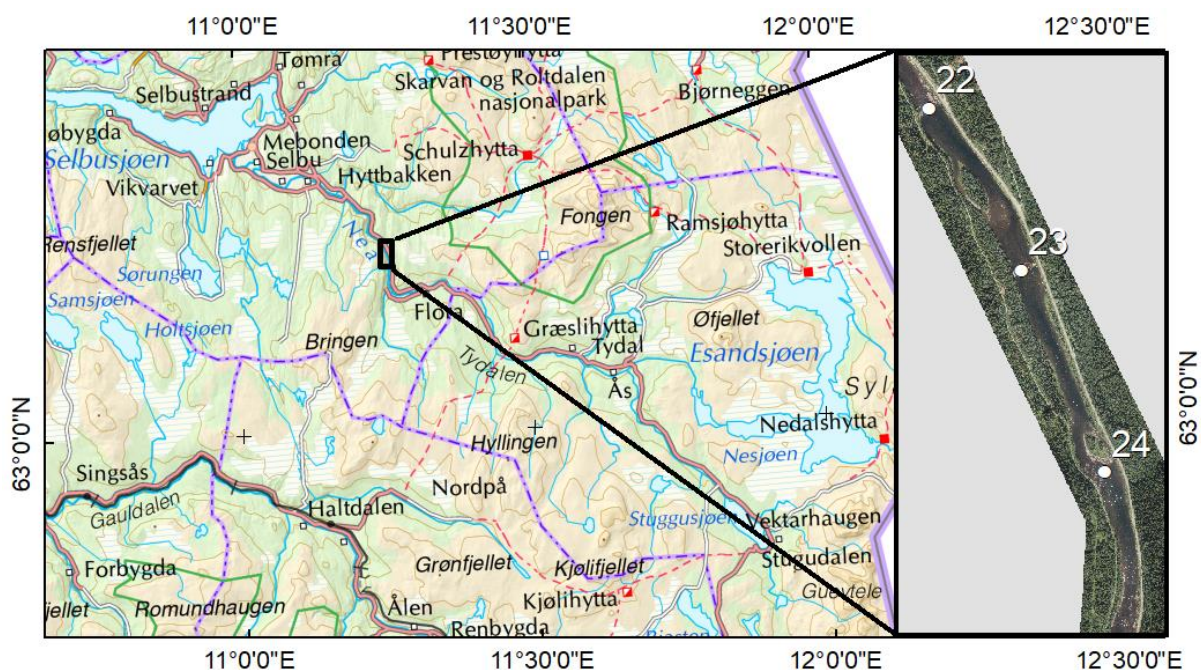
Oppgaven tar for seg konstruering av høydemodell, oppsett av den hydrauliske modellen og endring av terskler. De ulike resultatene redegjøres for og diskuteres. Til sist i oppgaven er det lagt ved visualiseringer av de ulike løsningene slik at det er enkelt å se og sammenligne de realistiske effektene av tiltakene.

## 2 Bakgrunn og teori

### 2.1 Studieområdet

Nea er ei 34 km lang elv i Tydal i Trøndelag som renner fra Sylsjøen i Åre kommune i Sverige og har utløp i Selbusjøen i Selbu kommune. Nea ble regulert for kraftproduksjon i 1962, noe som gjorde at vannføringen ble kraftig redusert. For å opprettholde et vannspeil i elva ble det bygget terskler mellom Hegset bru og utløpet fra Heggsetfoss kraftverk i 1978-1979 og flere terskler videre nedre til Selbusjøen i 1990-1992 (Bjølstad *et al.*, 2014, s. 6). I henhold til vannforskriften er Nea definert som en sterkt modifisert vannforekomst (SMVF) (NVE, 2019), noe som innebærer at god økologisk tilstand ikke kan oppnås fordi inngrepene har et samfunnsnyttig formål.

Studieområdet ligger 15 km oppstrøms Selbusjøen. Strekningen er 2,3 km lang, og er delt opp av tre terskler. I studieområdet renner elva nordover, fra terskel 24 videre til terskel 23 og 22, se Figur 1. I dette området er elva mellom 60 og 130 m bred. Det er krav om minstevannføring på 1,5 m<sup>3</sup>/s ved Tuset bru 4 km nedstrøms Heggsetdammen mellom 1. mai og 1. oktober (NVE, 2019), noe som er 5 km oppstrøms studieområdet. Resten av året er det kun lokalt tilsig, så vannføringen er sterkt redusert i forhold til naturtilstanden.



**Figur 1: Studieområdet**

I forbindelse med arbeidspakke 4 Miljødesign i HydroCen, så ble det gjennomført en undersøkelse av rekreasjonsinteresser i Nea (Skår og Köhler, 2019). Undersøkelsen viste at hovedaktiviteten i elva er fiske, men også padling, bading, turgåing foregår i og langs elva. Et av momentene undersøkelsen tar for seg er folks varierende holdning til tersklene. Et flertall av informantene synes vannspeilet som tersklene fører til er positivt fordi elva ser fin ut, mens andre synes de blir veldig unaturlige. Fiskere er spesielt

skeptiske til tersklene fordi de gjør elva kjedelig å fiske i, og fordi de mener at tersklene gir dårligere ørrethabitat. Det trekkes frem i undersøkelsen at det er vanskelig for folk å vurdere tersklene når de ikke kjenner til alternativet. Det kan derfor være nyttig å vise eksempler på hvordan ulike tiltak i elva kan se ut.

En undersøkelse utført med elfiske i strykstrekninger og garnfiske i terskelbassengene i 2016 viser at ørretbestanden i Nea har blitt kraftig redusert som følge av reguleringa (Arnekleiv *et al.*, 2017, s. 79). Det ble fanget mest ørret, noe ørekyt og en lake. Undersøkelsen viste en svært tynn ørretbestand, som synes å ha avtatt de siste 20-30 årene. Dette skyldes trolig økt sedimentering og konkurranse fra ørekyt, som spredde seg til Nea på 80-tallet. I nedre deler av Nea er det også observert gjedde, som også kan utgjøre en trussel mot ørretbestanden (Arnekleiv *et al.*, 2017).

Det blir årlig satt ut 10 000 ørretunger av Nea/Selbusjøstamme, som kompensasjon for tapt naturlig rekruttering. Settefisker virker i liten grad å øke antall større ørret i bestanden, og kan være uheldig for overlevelsen til naturlig fisk på grunn av konkurranse om plass og næring. I tillegg hindrer trolig den kraftige reguleringa oppvandring av ørret fra Selbusjøen, noe som også begrenser rekrutteringa (Bjølstad *et al.*, 2014). Bonitering er kartlegging av elvas egnethet for ørret, noe som sammen med en ungfiskundersøkelse i 2013 la grunnlaget for et forslag til plan for biotiltak i Nea (Bjølstad *et al.*, 2014).

Tiltaksplanen (Bjølstad *et al.*, 2014) beskriver terskel 24 som lang, middels høy og middels bratt. Over venstre side av terskelen er det er bredt overløp, og oppstrøms sideløpet går vannet smalet helt ute til høyre. Terskelen vurderes som vanskelig for fisk å passere. De nederste 500 m av terskelbassenget er stille, mens det videre oppover er moderat med innslag av stritt stryk. Hele strykstrekningen er godt egnet som oppvekstområde, og har i tillegg fire mindre svært gode gyteområder. For å lette oppgang for fisk anbefales det å sende et 2 m bredt parti på midten av terskelen 0,5 m, og tiltaket gis relativt høy prioritet.

Terskel 23 er forholdsvis høy, slak på sidene og relativt bratt på midten. Det meste av vannet går over midten, så strømmen er meget sterk der. Terskelen vurderes som relativt vanskelig for fisk å passere. I hovedløpet rett nedstrøms terskel 24 er det potensielle gyteområder egnet for stor ørret. Sideløpet og øvre deler av hovedløpet er gode oppvekstområder. Det anbefales at terskelen justeres for at den skal bli enklere å passere for fisk. Det foreslås at terskelen fjernes ellers at et 10 m bredt parti på midten av terskelen senkes 0,5 m. Tiltaket gis relativt høy prioritet siden terskelen er vurdert som relativt vanskelig for fisk å passere.

Terskel 22 er relativt høy, og utstrakt i nedkant. Vannet samles godt på midten, og terskelen vurderes som forholdsvis grei å passere for fisk. Terskelbassenget er stille frem til 80 m nedstrøms terskel 23, fra der av er det moderat stryk opp til terskel 23. I strykområdet er det oppvekstområder og noen mindre flekker med gyteområdet. Det anbefales ingen tiltak på terskelen.

Tiltakene som ble foreslått av Bjølstad *et al.* (2014) ble modellert i masteroppgaven *Remote Sensing Data and Hydraulic Modelling og Nea* (Moss, 2019).

## 2.2 Terskelfjerning

Terskelfjerning er den beste løsningen for å fremme oppvandring (Fjeldstad, Pulg og Forseth, 2018, s. 17), og er gjort i minstevannføringsstrekninger med god suksess. Også ifølge Forseth og Harby (2013, s. 86) bør det først vurderes å fjerne terskler dersom de

fører til dårligere gyte- og oppvekstforhold. Terskelfjerning er et restaureringstiltak som tilbakefører elva til en mer naturlig tilstand.

Terskler kan føre til at vannhastigheter og -dyp i elva ikke er lenger oppfyller fiskens krav til gytehabitat (Forseth og Harby, 2013, s. 86). Ørret foretrekker dype områder i elva med moderate til lave vannhastigheter og steinete substrat (Heggenes, 1996). Ørreten krever bevegelse i vannet for å gyte, og derfor ble gyteområder registrert ved rett substrattype og vannhastigheter 0,2-1 m/s under boniteringa utført i Nea i 2013 (Bjølstad et al., 2014, s. 12-13). I samme bonitering ble oppvekstområder registrert for rett substrat og vannhastigheter 0,2-1 m/s registrert fordi ørekyt utkonkurrerer ung ørret i stillestående vann. En gjennongang gjort av (Armstrong et al., 2003) viser at ørreten gyter ved rett substrattype ved vannhastigheter fra 0,11 til 0,8 m/s.

Fjeldstad et al. (2012) målte de biologiske endringene etter terskelfjerninger i en regulert elv i Sør-Norge. Resultatene viste at laksen tok i bruk gamle gyteområder første gytetesong etter at tersklene var fjernet siden vannhastigheten da var mer passende for gyting. I tillegg ble dødeligheten til fiskeeggene redusert, og antallet ungfisk økte. Gjedde og karpefisk ble funnet i terskelbassengene, men ikke etter terskelfjerning, noe som tyder på at fiskesammensetningen endret seg i ønsket retning.

Terskler fører til sedimentavsetning i terskelbassenget, noe som fører derfor til mindre skjul og dårligere gyteplasser for fisken (Pulg et al., 2018, s. 38-39). Terskelfjerning vil føre til at den naturlige sedimenttransporten gjeninnføres slik at sedimenter også fraktes videre ut av det tidligere terskelbassenget. I tillegg vil elvebunnen vil igjen bli naturlig rensed under flommer slik at det blir mer skjul i elva. Terskelfjerning kan også gi økt hydraulisk kapasitet i elva.

Samtidig vil terskelfjerning medføre vesentlige endringer i vassdragets form og overflate (Pulg et al., 2018, s. 38-39), noe som kan være ugunstig. Dersom det blir få eller små dype områder igjen etter terskelfjerning, så er det uheldig for større fisk som foretrekker dypere oppholdsplasser (Heggenes, 1996). Med tanke på overvintring for fisk er de dype områdene i terskelbasseng viktige (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017), så det kan terskelfjerning ha en uheldig effekt på.

## 2.3 Celleterskler

En celleterskel er utformet som flere celler for å danne en gradvis overgang mellom terskelbasseng og nedstrøms elv (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017, s. 326). Cellene skal lette opp- og nedvandring og kan skape oppholdsplasser for fisk og bunndyr, samtidig som terskeleffektene opprettholdes. Cellene skaper variasjon i strømningsmønsteret siden vannet strømmer fritt mellom cellene nedover terskelen. Celleterskler ses på som den nest beste løsningen etter terskelfjerning for å skape fiskepassasje over et hinder. Dersom de reetablerer full konnektivitet, er naturtypiske og ikke krever vedlikehold, betraktes de som restaurering av konnektivitet (Fjeldstad, Pulg og Forseth, 2018, s. 17) .

Ifølge *Vassdragshåndboka* (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017, s. 326) har celleterskelen normalt ikke har oppstuvende virkning, men stabiliserer elvebunnen oppstrøms terskelen. Derimot sier *Tiltakshåndbok for bedre fysisk vannmiljø* (Pulg et al., 2018) at celleterskler kan demme opp elva som tradisjonelle terskler, og stabilisere elvebunnen oppstrøms. Den oppstuvende effekten avhenger trolig av hvordan celleterskelen utformes og bygges.

Celleterskler kan gjenskape full konnektivitet for fisk og bunndyr året rundt. Det sikres ved at dimensjoneringa tilpasses både ulike vannføringer, som typisk vannføring i vandringsperioder (som medianvannføring om sommeren) og lavvannføring (Pulg et al., 2018). Dette kan løses ved å lage en lavvannsrenne som samler vannet ved små vannføringer (Pulg et al., 2018). Ved høyere vannføringer vil vannet gå utover lavvannsrenna, slik at elva blir bredere. Et annet alternativ er at det bygges celler med tetningsmasse i hver celle. Da vil konstruksjonen og steinformasjonene føre til at det er vann i cellene også ved lave vannføringer (Arnekleiv, 2012, s. 14). På høye vannføringer vil vannet gå over steinrekkene og skape dybde og turbulent vann i cellene.

Begge løsningene kan skape mer skjul og flere oppholdsplasser i elva, og derfor anbefales celleterskler som et mulig tiltak for å skape skjul ifølge *Håndbok for miljødesign i regulerte laksevassdrag* (Forseth og Harby, 2013, s. 82-83). Det er også mulig å utforme celleterskelen slik at forholdene legger til rette for gyting (Arnekleiv, 2012, s. 14). Spesielt ved menneskeskapt vandringshindre kan celleterskler være viktige for å utnytte fallet med økte vannhastigheter og gyteplassene og oppvekstområdene det gir (Pulg et al., 2018). Samtidig så fører celleterskler i likhet med andre terskler til sedimentavsetning i terskelbassenget, noe som minsker skjul og også kan føre til dårligere habitat.

Siden celleterskler fordeler fallet over en lengre strekning enn vanlige terskler, vil de kunne være mer motstandsdyktige mot flom (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017, s. 327). Det gjør også at celletersklene får en stor hydrologisk bremseeffekt under flommer, slik at erosjonspotensialet reduseres (Arnekleiv, 2012, s. 14). Konstruksjonen er selvreisende ved flom, men likevel vil det være nødvendig med oppsyn og reparasjon, særlig etter større flommer (Pulg et al., 2018, s. 57).

Ifølge *Vassdragshåndboka* (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017) har celleterskler et mer naturlig utseende enn andre terskler. De runde, kulpete celletersklene fordeler vannet over større deler av elvebredden og skaper mer variasjon i elvelandskapet enn et konsentrert stryk i lavvannsrenna (Arnekleiv, 2012). Ifølge Pulg et al. (2018) kan celleterskler fremstå som en naturtypisk del av elva, hvis det planlegges for det.

Ifølge *Tiltakshåndbok for bedre fysisk vannmiljø* (Pulg et al., 2018) er celleterskler godt egnet ved lave barrierer der høydeforskjellen er fra 0,5 m opp til 10 m. Konstruksjonen skal etterligne naturlige, passerbare stryk, med en helning tilpasset aktuell fiskeart. For laks- og ørretvassdrag betyr det en helning på 5-10 %. Det anbefales en kulp med sikring rett nedenfor rampen for å unngå uønsket erosjon.

Stabiliteten til celleterskler sikres med tilstrekkelig dimensjonering og forankring av stein. Ifølge Pulg et al. (2018) bør steinstørrelsen velges ut fra elvestrekningens morfologi (struktur/oppbygning), og det anbefales at dimensjoneringa gjøres med utgangspunkt i *Vassdragshåndboka* (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017) og NVEs *Veileder for dimensjonering av erosjonssikringer av stein* (Jenssen og Tesaker, 2009). *Vassdragshåndboka* anbefaler en steinstørrelse på 1-2 m for celleterskler (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017, s. 326). Forseth og Harby (2013, s. 83) anbefaler at steinene i celletersklene er 0,4-0,6 m, samt noen større til fundamentering. Noen av steinene kan godt stikke over vannflaten.

*Tiltakshåndbok for bedre fysisk vannmiljø* (Pulg et al., 2018, s. 54) anbefaler at celleterskler utformes som en rampe eller flere små terskeltrinn. Rampen bør utformes som kaskade, trinn-kulp type eller jevnt stryk. Det anbefales at mellomterskler har

spalteformede overløp og maksimalt 50 cm høydeforskjell i lakse- og ørretvassdrag. I større eller bratte elver kan høydeforskjellen økes opp til 1,5 m hvis det er en dyp kulp nedenfor og det kun er voksen fisk som skal vandre opp. I tillegg bør det etableres en lavvannsrenne med v-formet tverrprofil, der bunnen er 0,5-1 m lavere enn resten av elvebredden. Det samler vannet ved lave vannføringer og danner en vandringskorridor. Resten av elva heller inn mot lavvannsrenna, og har buner som gir en oppstuvende effekt.

En annen utforming av celleterskler er at steinene settes i en trekant eller rund formasjon slik at de presses mot hverandre av vannstrømmen (Arnekleiv, 2012). Et annet alternativ er at de er lagt ut slik at de danner celler som i en bikube, men med en "organisk" utforming (Forseth og Harby, 2013, s. 83). Vanligvis benyttes store steiner i konstruksjonene, og for fundamentering benyttes store steiner som graves ned i tetningsmasse. Ofte benyttes en stor stein i forkant (pralstein) for å fordele vannstrømmen og vanntrykket. Cellene forankres mot land med en større stein (flankestein). Forutsatt at det brukes tetningsmasse i hver celle, vil konstruksjonen og steinformasjonene føre til at det alltid er vann i cellene, også ved lave vannføringer.

Arnekleiv (2012) viser til eksempler på utførte celleterskelprosjekter. I store elver som Sira og Kvina er det bygget celleterskelkonstruksjoner. Siden elvene er brede, er flere av celletersklene bygget slik at de ikke fyller hele tverrsnittet, men består av en kombinasjon av celler eller trinn og eksisterende terskler. I Numedalslågen er det bygget celleterskler som en serie terskeltrinn med varierende oppstrøms utforming for å gi større variasjon i både vanddyp og linjeføring.

## 2.4 Hydraulisk modellering

Det anbefales å ta i bruk hydraulisk modellering ved planlegging av tiltak, slik at effekter kan bedømmes og avveies i forkant. På denne måten kan det finnes et gunstig høydenivå som gir både ønsket habitatkvalitet og -areal, slik at løsningen kan ivareta flere bruksinteresser (Pulg *et al.*, 2018, s. 39). Adeva-Bustos *et al.* (2019) brukte habitatsundersøkelser sammen med anbefalinger fra Forseth og Harby (2013) og Armstrong *et al.* (2003) sammen med habitatundersøkelser i elva til å sette grensene for potensielle gyte- og oppvekstområder for laks. Kombinert med resultater fra en hydraulisk modell for vassdraget ble de brukt til å simulere forholdene før og etter tiltak i vassdrag, og til å rangere ulike tiltak etter effektivitet og kostnadseffektivitet (Adeva-Bustos *et al.*, 2019).

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) er et program utviklet av US Army Corps of Engineers som brukes til å beregne 1D stasjonær strømning, 1D og 2D ikke-stasjonær strømning, sedimenttransport og til å modellere vanntemperatur eller vannkvalitet (Brunner, 2016b, s. 19). I denne oppgaven er versjon 5.0.7 benyttet. Det teoretiske grunnlaget for beregningene finnes i Brunner (2016a).

## 2.5 Arbeid utført i prosjektoppgaven

Under to flyvninger i 2018 og 2019 ble det samlet inn batymetrisk Lidar for området. De hadde en punktetthet på 2,796 pts/m<sup>2</sup> og 4,982 pts/m<sup>2</sup> i det aktuelle elvestrekningen. Likevel var dekningen relativt dårlig i elva, fordi laseren ikke har trengt gjennom vannet i noen særlig grad. For å skaffe bedre batymetridata i elva ble det gjort målinger med ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). ADCP-en ble trukket etter en båt som ble rodd frem og tilbake over elva, noe som gir dybden rett under ADCP-en. ADCP-målingene ble

ryddet ved å fjerne punkter fra flyttinga over terskler og punkter som tilsynelatende ligger på land, siden Lidaren dekker området godt. Høyden til vannspeilet ble målt inn med GNSS. Vannlinja ble beregnet ut fra GNSS-målinger, og bunnhøyden til ADCP-målingene ble beregnet.

For å lage rasteret ble Lidarpunktene (.las) transformert til shape-punkter (.shp) ved å bruke programmet LAsTools. Med utgangspunkt i høyden til ADCP-målingene ble det interpolert høyder til hjelpelinjer et stykke fra elvebredden slik at laserpunktene langs elvebredden ikke forårsaket forhøyede triangler i elva. Til slutt ble det laget et triangulært irregulært nettverk (TIN), og så et raster utfra det.

Det ble også diskutert hvilke tiltak for tersklene i Nea som vil være mest aktuelle å modellere. De tiltakene som ble foreslått var fullstendig fjerning av terskel, ombygging til senket celleterskel eller ombygging til ramper med dypål.

## 3 Metode

### 3.1 Forbedre terrengmodell

Grunnlaget for høydemodellen ble laget i prosjektoppgaven, se avsnitt 2.5. Svært synlige ADCP-målinger i terskelbasseng 21 på rasteret fra prosjektoppgaven, tydet på at den beregnede vannlinja ikke stemte. En terrengmodell med oppløsning 1 m, DTM1, ble lastet ned fra Hoydedata.no, og laserdataene og målingene fra GNSS-ene ble sammenlignet. Sammenligningen viste at målingene til Spectra-GNSS-en, som kun ble brukt i terskelbasseng 21, i gjennomsnitt lå 92 cm over DTM1. Høyden til ADCP-målingene ble beregnet på nytt ved å trekke fra 92 cm, og det ble laget et nytt og riktigere rasterutgangspunkt.

Punkttettheten (Point Density, PD) til Lidar-dataene er antall punkter per kvadratmeter, og er i dette tilfellet 2,796 pts/m<sup>2</sup> og 4,982 pts/m<sup>2</sup> for de to flyvningene. Punktene er ujevnt fordelt siden Lidaren har hatt problemer med å måle gjennom vann. Derfor er det få Lidar-punkter i elva, og punktene fra ADCP-en er kun rett under robåtens trasé. En fin rasteroppløsning vil derfor ha mange celler uten datapunkter i. Rasteroppløsninga 1 m er derfor valgt som et kompromiss som tar hensyn til punkttettheten til laserpunktene, ADCP-målingene og ønsket om en virkelighetstro terrengmodell. I forhold til elvas bredde, som varierer mellom 60 og 120 m i modellen, så gir det fremdeles mange celler tvers over elva.

*TIN to raster*-verktøyet ble brukt med desimaltall (datatype float), «Natural Neighbour» som metode og cellestørrelse 1 m. Naturlig nabo-metoden beregner cellehøyden ut fra de omkringliggende punktene. Dette vektet utfra størrelsen på overlappet mellom cellen og Thiessen-polygonene til de omkringliggende punktene (Esri, 2016c). Thiessen-polygoner konstrueres ved at det lages linjer mellom nærliggende punkter, og tegnes en normal ut fra midtpunktet til linja. Disse normalene utgjør grensene for polygonene til punktene. Naturlig nabo som interpolasjonsmetode er valgt fordi det gir en jevnere overflate enn lineær interpolering (Esri, 2016b).

Selv om 1 m oppløsning på rasteret er relativt fint i forhold til elvas bredde og datapunktene, så er det grovt i forhold til størrelsen på steinene i en terskel. For at terrenget i en konstruert celleterskel skal representeres på en god måte, er det valgt å endre rasteret til en oppløsning på 25 cm. Det er gjort ved å dele den ferdige 1 m-høydemodellen opp i mindre ruter ved å bruke ArcMap-verktøyet *Resample*. De ulike oppdelingsteknikkene for kontinuerlig data er testet ved å beregne forskjellen mellom det oppdelte og det opprinnelige laget. Teknikken «Bilinear», som benytter snittet av de fire nærmeste pikslene til å beregne høyden, ga best resultat der forskjellen mellom lagene i snitt var 0,0031 m. Alternativet, «Cubic», benytter høyden til 16 piksler i en sirkel rundt pikselen til å beregne resultatet, slik at overflaten blir veldig jevn (Esri, 2016a). Dette ga likevel en større gjennomsnittlig forskjell på 0,0038 m. 25 cm-høydemodellen oppdelt av teknikken «Bilinear» ble derfor benyttet videre som grunnlag for utforming av celleterskler.



Under kalibreringsprosessen i HEC-RAS ble det oppdaget flere områder der terrenngmodellen ikke stemmer. Eksempler på det er at sideløpene var svært grunne, forhøyede triangler ut fra elvebredden og falske øyer.

Det ble ikke målt inn batymetri med ADCP i noen av sideløpene, og interpolering basert på Lidar-punkter på land gjorde sideløpene svært grunne. Det samme gjaldt nederst i stryket nedstrøms terskel 24 der det ikke ble målt inn batymetri fordi det var så grunt. Dybden er endret i disse områdene ved å tegne tverrsnitt i HEC-RAS og endre dybden manuelt. Fremgangsmåten er beskrevet i 2D-manualen (Brunner, 2016c, s. 2-7). For at overgangen til det omkringliggende terrenget skal bli god, er det ikke gjort endringer på de ytterste tverrsnittene. Det er valgt å bruke HEC-RAS til dette fordi det er enkelt å få et resultat som stemmer godt med omgivelsene.

En annen, gjentakende feil var at opphøyede triangler fra elvebredden og ut i elva. Dette skyldes at Lidar-punktene på land eller rett ved elvebredden trekker opp interpoleringa fordi det er for langt ut til hjelpelinjene eller brådypt i elva. En siste feil var at det dukket opp små øyer i elva. Dette er korrigert med samme fremgangsmåte som sideløpene.

Korreksjonene ble lagt inn i terrenngmodellen ved å bruke ArcMap-verktøyet *Mosaic To New Raster*. Der gis korreksjonsrasterene prioritet over terrenngmodellen, og resultatet er et nytt, korrigert raster.

## 3.2 Vannføring

Nea er regulert av syv kraftverk, med et krav om minstevannføring på 1,5 m<sup>3</sup>/s fra Bjørga/Heggsetdammen mellom 1. mai og 1. oktober (Sørensen *et al.*, 2013, s. 222). Det er nesten 7 km i luftlinje mellom Heggsetdammen og oppstrøms ende av studieområdet, som gir et restnedbørsfelt på 169 km<sup>2</sup> (NVE, 2020).

Det blir antatt at vannføringa i studieområdet var 2 m<sup>3</sup>/s da Lidar-dataene og ortofotoet ble samlet inn. Modellen kalibreres derfor for den vannføringa. Det blir også antatt at 2 m<sup>3</sup>/s er den effektive minstevannføringa i studieområdet, siden det tilføres vann fra nedbørsfeltet nedstrøms Heggsetdammen.

Selve studieområdet har en lengde på 2,8 km, med et nedbørsfelt på 5 km<sup>2</sup> (NVE, 2020). Dette er lite i forhold til restnedbørsfeltet, så konstant vannføring brukes for hele studieområdet.

Det er også valgt å simulere de endrede tersklene for vannføring 10 m<sup>3</sup>/s og 100 m<sup>3</sup>/s for å undersøke tersklenes funksjon ved større vannføringer. Til sammenligning viser beregninger viser at middelflommen i Nea er ved utløpet til Selbusjøen er 420 m<sup>3</sup>/s (Pettersson, 2001).

## 3.3 Oppsett i HEC-RAS

### 3.3.1 Beregningsgrid

Griddet dekker hele den oppsatte terrenngmodellen, og består av 464 559 celler. Størrelsen på cellene er 1 x 1 m i terskelbassengene og 0,25 x 0,25 m over celledersklene, slik at det samsvarer med oppløsninga på terrenngmodellen.

Det er lagt inn flere bruddlinjer for å få et grid som er godt tilpasset terrenget. En bruddlinje er en linje som cellene genereres normalt ut fra. En bruddlinje kan legges langs eller på tvers av viktige strukturer slik at cellene følger retningen på strukturen.

Det er lagt inn bruddlinjer midt i elva for at griddet skal følge vannretningen. I tillegg er det lagt inn bruddlinjer langs elvebredden, slik at griddet går parallelt med elvebredden og strømrretninga. Det er også lagt inn bruddlinjer over tersklene, slik at simuleringa over dem blir best mulig.

Selv med bruddlinjene er det noen områder med veldig store beregningsceller. Da er det manuelt lagt ekstra beregningspunkter, «Computational points», for å dele opp cellene.

### 3.3.2 Tidssteg

Courant-kriteriet, se Formel 1, forteller om modellen kommer til å kjøre godt, og brukes for å bestemme rett tidssteg i forhold til cellestørrelse.

$$c = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (1)$$

I formelen er  $v$  = fart,  $\Delta t$  tidssteget og  $\Delta x$  cellelengden. Courant-kriteriet bør være under 2 for Diffusion Wave Equations som brukes i disse simuleringene, se avsnitt 3.3.4, men modellen kan kjøres for inntil 5 (Brunner, 2016c, s. 111). Courant-kriteriet brukes ved å finne områder med høy vannhastighet, og så finne vannhastigheten og cellestørrelsen i området, for så å regne ut nødvendig tidssteg.

Siden modellen ikke kommer til å kjøres med store variasjoner i vannføring, brukes  $C = C_{maks} = 5$  som bestemmende i Courant-kriteriet. Testing har vist at for  $Q = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  og gridoppløsning  $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ , så er  $v_{maks} = 2,0 \text{ m/s}$ , så Courant-kriteriet gir at tidssteget som bør brukes er  $\Delta t = 0,625 \text{ s} \approx 0,5 \text{ s}$ .

### 3.3.3 Grensebetingelser og restartfil

Grensebetingelser er nødvendig for å bestemme hvordan vannet skal komme inn i og renne ut av området. Oppstrøms grense er satt rett utenfor studieområdet og nedstrøms grense er satt utenfor studieområdet nedstrøms terskel 21 slik at grensebetingelsen ikke påvirker resultatene i studieområdet. For grensetverrsnittene fungerer alle cellene på tvers av elva som inn- og utløpsceller.

Øvre grensebetingelse er en konstant hydrograf med gitt vannføring, «Flow hydrograph». Energihellinga brukes til å beregne fordelinga av vannføringa over grensetverrsnittet (Brunner, 2016c, s. 101). Nedre grensebetingelse er «normal depth», der bunnhellinga til grensetverrsnittet brukes for å beregne normaldybden med Mannings formel. Energihellinga kan tilnærmes ved å finne gjennomsnittshellinga til elva i nærheten av grensetverrsnittet (Brunner, 2016a, s. 120-121).

Den gjennomsnittlige hellinga for elva ved grensene er funnet ved å lage to like lange parallelle linjer med henholdsvis 1,85 og 3,07 m avstand. Deretter er høydeforskjellen mellom de to funnet, og delt på avstanden mellom linjene. Det ga en helning på 0,025 inn og 0,0289 ut.

Sluttresultatet for vannstanden til en simulering kan lagres og brukes som et utgangspunkt for nye simuleringer (Brunner, 2016c, s. 103) slik at terskelbassengene er vannfylte fra start. Det sparer tid siden det ikke er nødvendig å fylle elva i hver simulering.

### 3.3.4 Ligningssett og andre beregningsalternativer

I HEC-RAS er det flere alternativer for 2D-beregninger. I stor grad ble standardinnstillingene benyttet, siden modellen er relativt enkel: Ingen brå endringer i vannføring eller terreng.

Parameteren Theta gjør det mulig å ta med forrige tidssteg inn i beregninga, noe som gir en mer nøyaktig løsning, men en mindre stabil simulering (Brunner, 2016c, s. 120). Grunninnstillinga Theta lik 1 innebærer at alle beregninger kun er basert på sitt tidssteg. Det er mulig å vekte forrige tidssteg mellom 1 og 0,6, der 1 er kun inneværende tidssteg. Som anbefalt i programbruksanvisninga, er modellen er prøvekjørt med Theta lik 0,6 for å undersøke effekten. Prøvekjøringa viste at forskjellen mellom Theta 1 og theta 0,6 var 0,001 m eller mindre for 99,85 % av cellene, så Theta utgjør ingen vesentlig forskjell. Grunninnstillinga Theta 1 benyttes derfor videre i simuleringene.

Et annet viktig valg er ligningssett, der det er mulig å velge mellom to ulike sett. Standardinnstillinga er Diffusion Wave, og alternativet er Full Momentum Equation (kalles også Shallow Water Equations eller 2D St. Venant Equations). Diffusion Wave er en forenkling av Full Momentum Equation der gravitasjons- og friksjonsleddet er bestemmende for strømningsforholdene og de andre leddene er neglisjert (Brunner, 2016a, s. 75).

Diffusion Wave er raskere å kjøre og mer stabil, men Full Momentum kan være mer nøyaktig ved for eksempel flodbølger (Brunner, 2016c, s. 121). Bruksanvisningen anbefaler at begge ligningssettene kjøres og sammenlignes. Sammenligning viser at gjennomsnittsforskjellen mellom de var 0,016 m med standardavvik 0,012 m. Forskjellen er liten, men veldig stor forskjell i kjøretid (15 mot 122 timer) gjør at Diffusion Wave brukes videre i oppgaven.

### 3.3.5 Kalibrering av modell

Modellen er kalibrert slik at simulert resultat stemmer med observerte data. Dette er gjort ved å endre Mannings ruhetstall  $n$  i modellen. Ruhetsallet påvirkes hovedsakelig av overflateruheten, vegetasjon og elvas ujevnheter og krumning. Andre faktorer som påvirker ruhetstallet er hindre, størrelsen, vannføring og vannstand (Chow, 1959, s. 101-104). Ved høyt ruhetstall blir vannet holdt tilbake, mens ved lave ruhetstall er gjennomstrømminga rask. I store, naturlige elver varierer Mannings ruhetstall mellom 0,025 og 0,100 (Chow, 1959, s. 113). I HEC-RAS brukes Manningstallet til å kompensere for andre hydrauliske tap eller faktorer som den hydrauliske modellen ikke fanger opp. Manningstallet fungerer derfor i praksis som en kalibreringskoeffisient heller enn et rent ruhetstall, og verdier utenfor «normalen» kan være nødvendige for å få en passende modell.

Kalibreringa kan gjøres ved å sammenligne utstrekninga til simulert vannoverflate med den observerte. Fordelen med denne metoden er at dette er enkelt å gjøre visuelt, men det kan ikke tallfestes. Et annet alternativ er å sammenligne simulert vannoverflatehøyde med høyden til Lidar-punkter på vannoverflaten. Dette gir en kvantifiserbar sammenligning av resultatet, men krever at de observerte dataene er gode.

Dataene for Lidar-scanninga ble klassifisert avhengig av hva de traff. Dekningen til Lidar-dataene for vannoverflaten er langt bedre enn dekingen til elvebunnen. Likevel er det flere områder i elva uten punkter, så denne metoden ville også vært ufullstendig.

Det er mulig å kombinere de to metodene, ved å velge ut områder med mange Lidar-punkter som et tillegg til visuell utstrekning. Det er derfor valgt å kalibrere med utgangspunkt i ortofotoet, for så å kontrollere at vannoverflatehøyden stemmer med Lidar-punktene i utvalgte områder. Det er valgt å ha to kontrollområder i hvert terskelbasseng, et rett oppstrøms terskelen og et øverst i terskelbassenget. Områdene har en relativt høy tetthet med Lidar-punkter, og varierer mellom 724 og 3523 punkter per område, se polygonene i Vedlegg 1.

Kalibreringa ble utført ved å starte med HEC-RAS' standardinnstilling for ruhetstall 0,03, for hele strekninga. Deretter ble strekninga delt inn i mindre områder med ulike ruhetstall, avhengig av hvordan de skiller seg fra de observerte dataene. I de fleste elvestrekningene fikk terskelen, terskelbassenget og stryket ulike Mannings ruhetstall. Å endre ruhetstall over terskelen hadde effekt på den nedre delen av terskelbassenget, mens å endre ruhetstallet i terskelbassenget påvirket hele bassenget. Totalt ble strekningen delt inn i 10 områder med ulike ruhetstall som gir omtrent sammenfallende resultat for simuleringa og de observerte dataene, se Tabell 1.

**Tabell 1: Mannings ruhetstall**

Område	Eksisterende terreng	Uten terskler	Celleterkler
<b>24 stryk</b>	0,02	0,02	0,02
<b>24 basseng</b>	0,045	0,045	0,045
<b>24 terskel hovedløp</b>	0,08	0,03	0,06
<b>24 terskel sideløp</b>	0,01	0,03	0,06
<b>23 stryk</b>	0,001	0,001	0,001
<b>23 nederst stryk</b>	0,01	0,01	0,01
<b>23 sideløp</b>	0,1	0,1	0,1
<b>23 basseng</b>	0,12	0,12	0,12
<b>23 terskel</b>	0,15	0,03	0,06
<b>22 elvestrekning</b>	0,03	0,03	0,03
<b>22 terskel</b>	0,04	0,03	0,06

For å omfordele mer av vannet til sideløpet nedstrøms terskel 24, ble det valgt å ha ulike ruhetstall for terskelen over hovedløpet og sideløpet. Differensieringa i ruhetstall gjorde at vannføringa i sideløpet økte fra 0,05 til 0,06 m<sup>3</sup>/s.

Tabell 2 viser at den største forskjellen mellom Lidar-målingene og den simulerte vannstanden er 7,4 cm. Den største forskjellen i studieområdet var 4 cm øverst i terskelbasseng 24. Dette er akseptabelt siden bølger, vind og andre varierende forhold skaper en usikkerhet i Lidar-målingene. Vannstanden i simuleringene ligger noe over observert vannstand i de fleste kontrollområdene.

**Tabell 2: Sammenligning av vannoverflatehøyden i Lidar-målinger og kalibrert modell**

Område	Antall	Gjennomsnitt	Median	Standardavvik
<b>24 øvre</b>	2355	-0,040	-0,045	0,061
<b>24 nedre</b>	3523	-0,021	-0,013	0,034
<b>23 øvre</b>	2526	-0,038	-0,031	0,028
<b>23 nedre</b>	2353	-0,019	-0,016	0,024
<b>22 øvre</b>	2088	-0,002	0,004	0,034
<b>22 nedre</b>	2369	0,013	0,019	0,025
<b>21 øvre</b>	1365	-0,055	-0,051	0,023
<b>21 nedre</b>	724	-0,074	-0,071	0,032

For de modifiserte terrengene, finnes det ikke målinger å kalibrere modellen mot. Det ble tatt utgangspunkt i resultatet fra kalibreringa av eksisterende terreng. Manningsområdet for tersklene ble endret til å dekke området der terskelen ble fjernet eller celleterskelen.

Det blir antatt at ved terskelfjerning, så vil resultatet bli en jevn elvebunn som ligner elvebunnen i terskelbassengene. Den vil da gli godt inn i terrenget og være et restaurerende tiltak. Ruhetstallet settes til 0,03 fordi det er HEC-RAS' standardinnstilling og har vist å passe godt i flere av terskelbassengene (21 og 22).

Ifølge *Tiltakshåndbok for bedre fysisk vannmiljø* (Pulg *et al.*, 2018, s. 56) bør celleterskler utformes med sterkt varierende steinoverflate og uten glatt plastring, noe som gir høy hydraulisk ruhet. Store elver med ujevnt løp og grove ruhetsforhold har ifølge Chow (1959, s. 113) et Mannings ruhetstall mellom 0,035 og 0,100. Løpet i aktuell strekning av Nea er relativt rett, men i en celleterskel samles strømmen rundt store steiner/blokker midt i elva slik at ruheten blir større. Velger derfor å bruke 0,068 siden det er midt i intervallet.

### 3.4 Terskelfjerning

Tersklene er fjernet ved å bruke lage tverrsnitt i HEC-RAS, på samme måte som korleksjonene beskrevet i avsnitt 3.1. Midtlinja for elva og elvekantene er tegnet opp. I tillegg tegnes et øvre og nedre tverrsnitt, som HEC-RAS interpolerer mellom. Tverrsnittene plasseres rett oppstrøms øvre terskeltå og rett nedstrøms nedre terskeltå, slik at terskelen fjernes i interpoleringa.

Plasseringa til øvre og nedre terskeltå er bestemt ved å se på ortofotoet og langsgående profil over terskelen. Øvre terskeltå ligger gjerne i et lavbrekk siden terskel og elvebunnen heller i motsatt retning. For nedre terskeltå har ortofotoet vært nyttig, siden vannstanden er lavere blir det mulig å se hvor terskeltåa slutter. Kombinert med et eventuelt lavbrekk i terrenget nedstrøms har plasseringa blitt bestemt.

Etter at plasseringene til tverrsnittene er bestemt, har det blitt interpolert mellom dem uten å gjøre ytterligere tilpasninger av høydeprofilene. Denne fremgangsmåten er valgt fordi det delvis gjensker naturlige formasjoner i terrenget, som gjerne følger strømretningen. Under en eventuell fysisk terskelfjerning, vil det trolig gjøres tiltak for å etterligne naturtilstanden heller enn å gjøre terskelområdet flatt tvers over elva.

### 3.5 Terskelendring

For konstruksjon av celleterskler har terrenget uten terskler har blitt brukt som utgangspunkt, slik at celletersklene konstrueres etter egne mål og forutsetninger. Felles for de tre celleterskelvariantene er at ny terskelkrone er plassert på samme sted som eksisterende terskelkrone. Det er også valgt å beholde oppstrøms terskeltå, slik at ny oppstrøms fylling får samme utstrekning som eksisterende fylling. Det blir antatt at det for celleterskler med høyde som eksisterende terreng eller lavere vil dette være en akseptabel løsning uten behov for beregning siden tersklene i dag er stabile.

Grunnlaget for celleterskelkonstruksjonene ble laget som tverrsnitt i HEC-RAS, med oppstrøms fylling, terskelkrone og en relativt plan nedstrøms fylling. Terskelkrona er utsatt for skader fra både vann, drivgods og is, så den bør være 4 m bred (Jenssen og Tesaker, 2009, s. 118).

Gradienten i celleterskler bør være fra  $< 0,05$  til  $0,1$  (Pulg *et al.*, 2018, s. 56). Det er derfor tatt utgangspunkt i en gradient på  $0,075$ . Terreng høyden til terskelkrona er bestemt ved å undersøke terrengmodellen for eksisterende terreng, se Tabell 3. Terreng høyden nedstrøms og lengden på terskelen har blitt bestemt ved prøving og feiling, slik at det gir ønsket gradient. Terreng høyden til ny terskeltå er satt litt over terrengutgangspunktet, slik at vannet ikke blir demmet opp i overgangen fra celleterskelen til elvebunn.

**Tabell 3: Utgangspunkt for celleterskler, full høyde.**

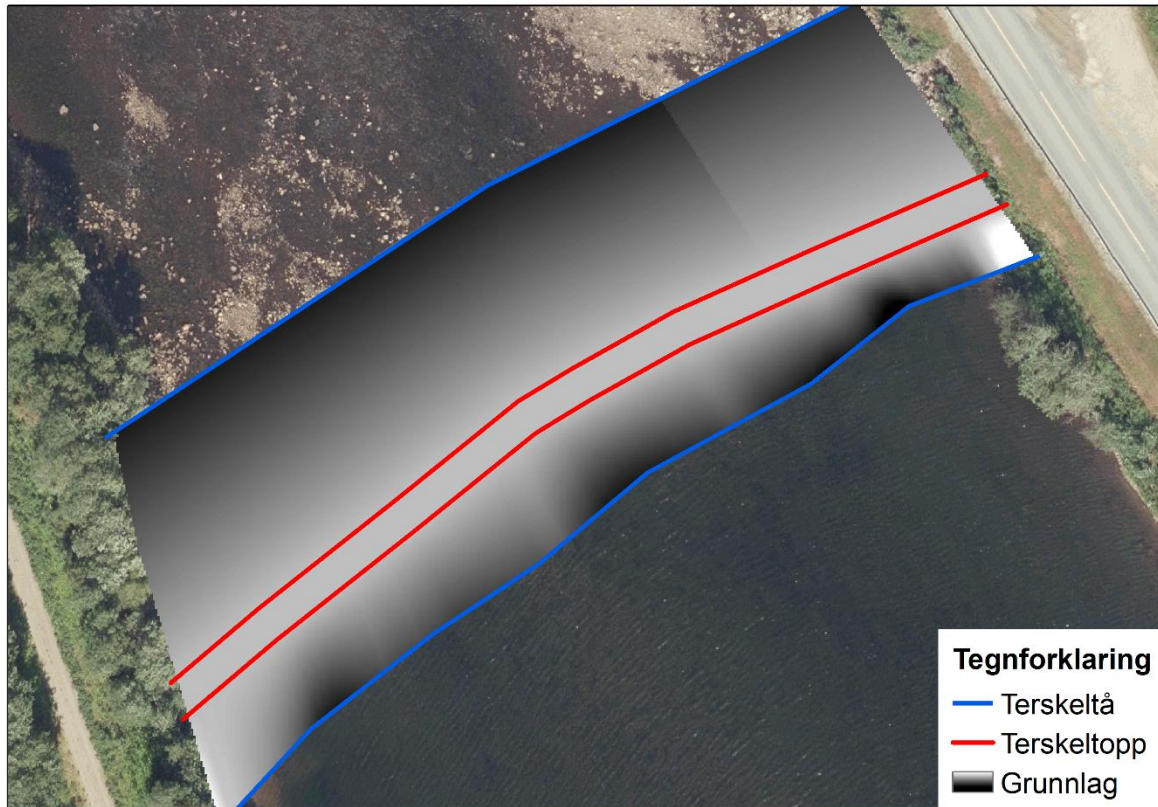
Terskel	Terreng høyde terskeltopp [moh]	Terreng høyde nedstrøms [moh]	Terskelhøyde [m]	Terskellengde [m]	Gradient terskel
24	198,8	197,7	1,1	19	0,058
23	196,85	195,5	1,35	16	0,084
22	195,7	194,2	1,5	22	0,068

Celleterskelutgangspunktet for halv terskelhøyde er bestemt ved å ta full terreng høyde og trekke fra halve terskelhøyden. Samme terreng høyde for terskeltåa er beholdt hvis terrenget tillater det, eller hevet hvis den kortere terskellengden krever en høyere terreng høyde, se Tabell 4.

**Tabell 4: Utgangspunkt for celleterskler, halv høyde.**

Terskel	Terreng høyde terskeltopp [moh]	Terreng høyde nedstrøms [moh]	Terskelhøyde [m]	Terskellengde [m]	Gradient terskel
24	198,25	197,7	0,55	7	0,079
23	196,18	195,5	0,68	9	0,076
22	194,95	194,25	0,7	10	0,070

Basert på Tabell 3 og Tabell 4 er det laget grunnlag tilsvarende Figur 2 for alle tersklene. Plasseringa til eksisterende terskelkrona er beholdt og har form som en motstrøms bue, mens nedstrøms tverrsnitt er relativt rett. Dermed varierer lengden til celleterskelgrunnlaget litt. Den beregna lengden gjelder midt i kulpelle- eller trinnterskelområdet.



**Figur 2: Grunnlag for celleterskel 22, brukt til høy kulpeterskel og trinnterskel**

### 3.5.1 Celleterskler

Celletersklene er utformet med utgangspunkt i beskrivelser og figurer i Vassdragshåndboka (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017) og Arnekleiv (2012). Nedstrøms ende av terskelen er bygd opp med steiner i formasjoner som danner mange små kulper, slik at vandring blir enkel fra celle til celle.

Det er valgt å kun lage celler i deler av terskelen fordi elva er svært bred. For plasseringa og utforminga av kulpene er det tatt utgangspunkt i naturlige forhold som grusbanker, dypåler og strømningsmønstre, slik at kulpområdet totalt utgjør omtrent halve terskelbredden.

Overgangen nedstrøms mellom celleterskelområdet og naturlig elvebunn utformes som en motstrøms bue for å sikre stabilitet og hindre utglidning (Fergus, Hoseth og Sæterbø, 2017, s. 326 og s. 340). Buen er laget ved å lage en oval langs kanten av celleterskelgrunnlaget. Denne ovalen fungerer også som en retningslinje for utforming av kulpene oppstrøms. ArcMap-verktøyet *Clip*, med ovalen som grense, ble brukt til å klippe ut en del av terrenngutgangspunktet, se Figur 3. Dette gir en sømløs overgang fra nederste celleterskelen til elva nedstrøms.

Oppstrøms ende utformes som flere celler med buer mot strømmen. Oppstrøms ende av cellene er plassert på terskelkrona, slik at den øverste delen av celleterskelen får den samme høyden. Mellom oppstrøms og nedstrøms ende av celleterskelen lages det celler med varierende utstrekning. Ifølge Pulg *et al.* (2018, s. 54) er maksimal høydeforskjell for mellomterskler i laks- og ørretvassdrag 50 cm. For en strekning med gradient 0,075 så er maksimal cellelengde dermed 6,67 m.

For at terreng høyden til toppen av terskelen skal være fast, er det valgt å senke bunnene til cellene istedenfor å legge til steinene som demmer opp. Hovedfordelen med denne fremgangsmåten er at det er mye lettere å tegne flate bunner enn å bygge opp steiner og steinrekker. Denne fremgangsmåten gjør at steinene har konstant helning, men den er ikke så stor og dessuten renner vannet over uansett, og det hjelper med å demme opp mer.

Bunnen av cellene tegnes i ArcMap ved å opprette en shapefil, og bruke *Editor* med konstruksjonsverktøyet frihåndstegning. Verktøyet runder av tegningene, så det gir relativt fine celler med en realistisk utforming, se Figur 3. Terreng høyden til bunnen settes lik terreng høyden til cellas midtpunkt, slik at bunnen av cella blir flat. Cellas midtpunkt blir funnet ved å bruke ArcMap-verktøyet *Feature to Point*. Deretter brukes verktøyet *Extract Values to Points*, som finner høyden til punktene på grunnlagsrasteret.

Disse høydene eksporteres til Excel, der 0,4 m trekkes fra. Det er valgt å trekke fra 0,4 m fordi det blir antatt at det vil gi en passende og realistisk vanddybde i cellene som muliggjør både vandring og opphold for fisk. For en celle som er 4 m lang i strømreretning, gir dette en potensiell vanddybde på  $0,4\text{ m} - 0,4\text{ m} / 2 \cdot 0,075 = 0,25\text{ m}$ . For en celle som er 6 m blir den potensielle dybden 0,18 m, slik at dybden vil variere i de forskjellige cellene. Disse høydene limes inn i cellebunnsfilas *Attribute table*. Cellebunnsfila konverteres så til raster ved å bruke verktøyet *Polygon to Raster* med høyden som verdifelt.

Områdene mellom cellebunnene representerer steinene som demmer opp celletersklene. Siden cellene er tegnet med frihåndstegning, varierer størrelsen til steinene. De fleste celleterskelkantene er likevel i området 0,75-1 m, noe som er mellom anbefalingene gitt av Fergus, Hoseth og Sæterbø (2017) og anbefalingene av Forseth og Harby (2013).

I en reell terskel bygd av stein, kan vann renne mellom steinene. For å inkludere dette i modellen, er det laget passasjer mellom cellene ved å tegne opp polylinjer fra celle til celle gjennom celleveggene. For at det skal være mulig for vannet å strømme fritt mellom cellene, er det laget en eller flere passasjer mellom alle naboceller. ArcMap-verktøyet *Buffer* med en radius på 0,15 m har blitt brukt for å gi linjene en bredde på en rastercelle, se Figur 3. Denne bredden er valgt for at vannet skal kunne strømme, samtidig som cellene likevel er relativt vannfylte, selv ved lav vannføring. Høydene blir bestemt som for cellene, og de transformeres til raster ved å bruke verktøyet *Polygon to Raster*.

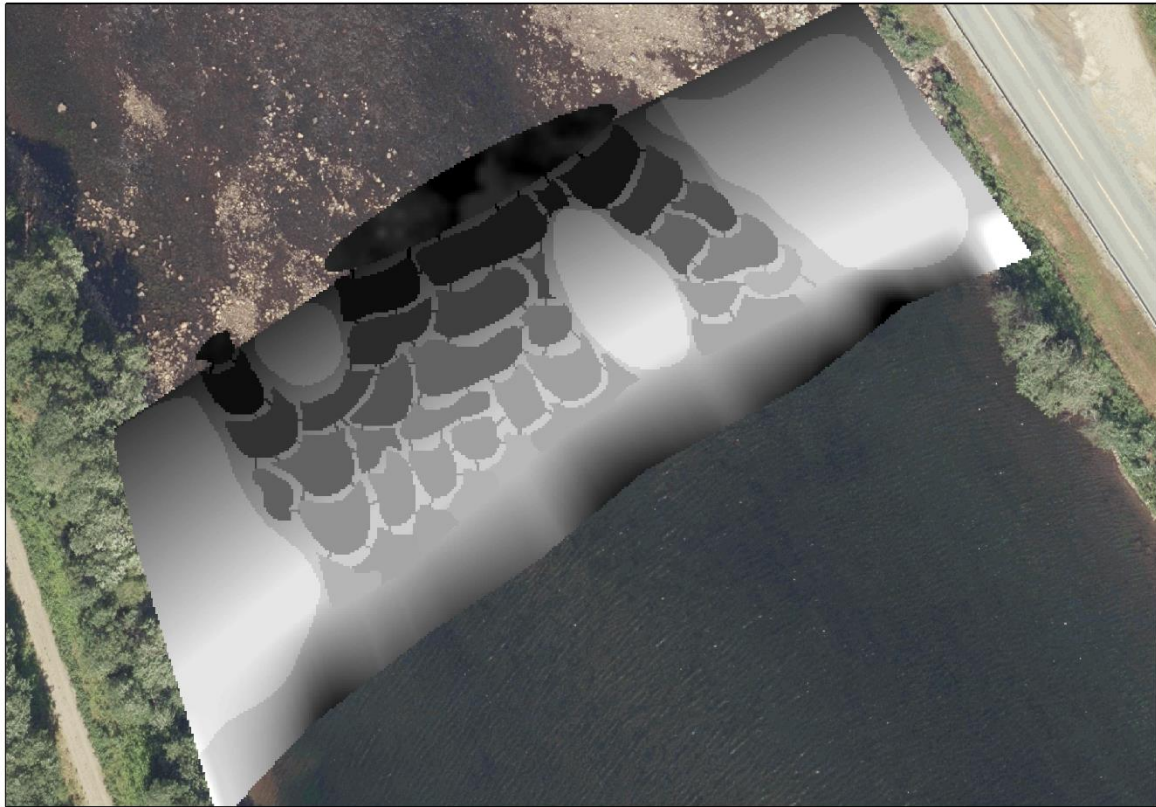
For å konsentrere strømmen over celleterskelområdet, er mesteparten av resten av terskelen hevet 0,2 m, se Figur 3. Det er utført ved å tegne avrundede områder, gi de verdi 1 og transformere de til rastery. Deretter brukes *Raster Calculator* til å heve grunnlagsfila 0,2 m i de utvalgte områdene.





**Figur 3: Elementene i cellederskel 22**

Til slutt settes det hele sammen til et raster ved å bruke verktøyet *Mosaic to New Raster*. I prioritert rekkefølge: Grunnlag, passasjer, cellebunner, hevet terskel og nedstrøms overgang, der den siste input-fila blir gjeldende i området. Figur 4 viser resultatet fra sammensetningen av elementene i Figur 3. De ferdige resultatrasterene for de andre terskelutformingene vises i Resultat-kapittelet.



**Figur 4: Ferdig sammensatt raster for kulpeterskel 22**

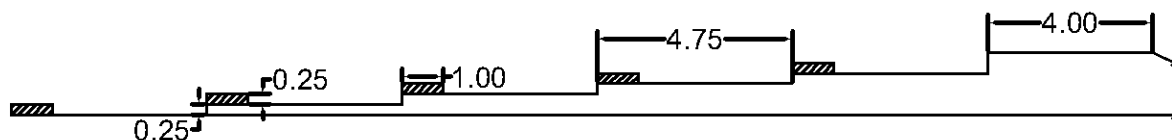
### 3.5.2 Trinnterskler

Trinnterskelene er utformet etter *Tiltakshåndboka for bedre fysisk vannmiljø* (Pulg *et al.*, 2018). Utforminga skal danne en dypål nedover terskelen som samler vannet. Det skal holdes en viss vannstand i dypålen, og i tillegg fylle bredere opp med vann over terskelen ved høyere vannføring. Dette gjøres ved å lage kanter ytterst på hvert trinn.

Samme grunnlag som for kulpcelletersklene benyttes. Trinnene lages som polygoner, der trinnkanten er den ytterste delen av hvert trinn. Det er valgt å gjøre trinnkanten 1 m bred for å følge anbefalinga fra Fergus, Hoseth og Sæterbø (2017). Terreng høyden til trinnbunnene og trinnkantene blir beregnet i et regneark med utgangspunkt i Tabell 5, se Vedlegg 2, og limt inn i filenes *Attribute Table*. Kanten gis en høyde som er 25 cm høyere enn trinnene for at det skal kunne skapes samme vanddybde på trinnene som for celletersklene, se Figur 5.

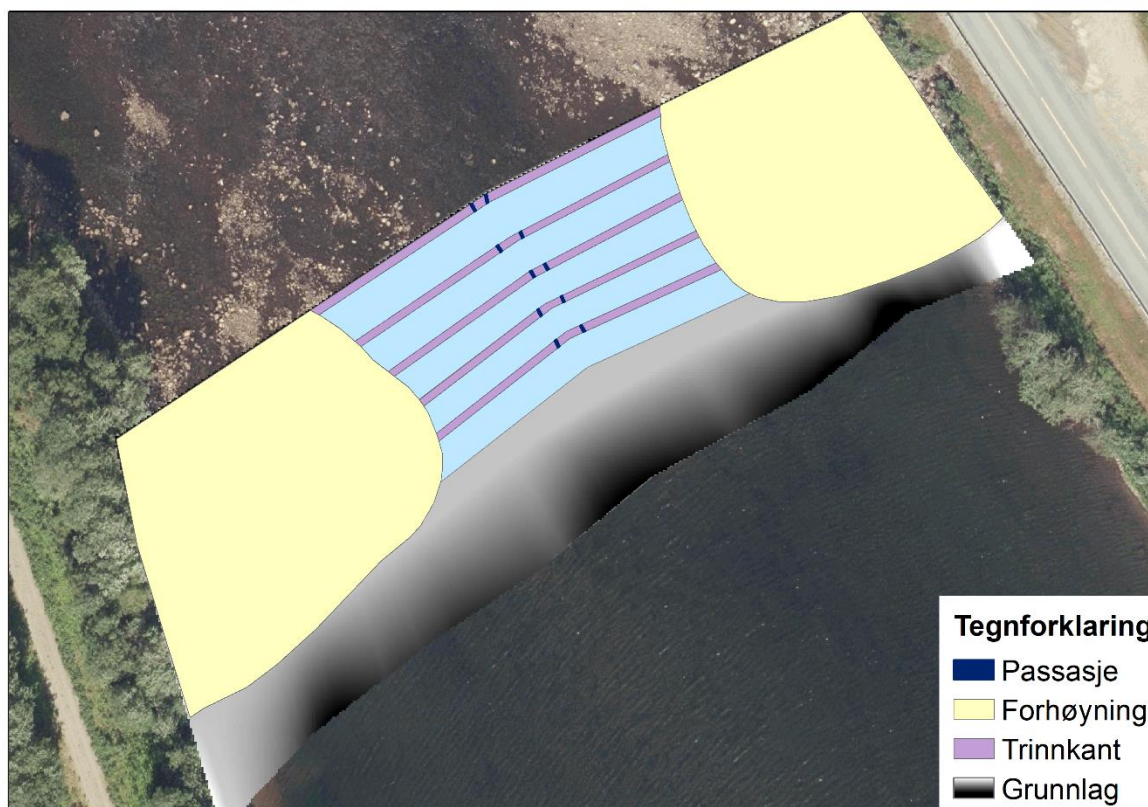
**Tabell 5: Grunnlag trinnterskel**

Terskel	Terskelhøyde [m]	Antall trinn	Høydeforskjell [m]	Trinnlengde [m]
24	1,1	4	0,22	4,75
23	1,35	4	0,27	4
22	1,5	5	0,25	4,4



**Figur 5: Profil for trinnterskel 22, kantene er skravert**

For at elva skal fremstå mindre som et «byggverk» er det valgt å kun lage trinn over halve elvas bredde, se Figur 6. Deler av terskelen er hevet slik som celletersklene.



**Figur 6: Elementene i trinngrunnlag for terskel 22**

Plasseringa til dypåleens senterlinje tegnes opp ved å bruke *Editor*-verktøyet i ArcMap, basert på dybder og strømningsforhold opp- og nedstrøms i terreng med og uten terskler. Så brukes verktøyet *Buffer* rundt senterlinja til å lage dypåleens bredde (tverrsnitt 5 m), og avgrensning for smal (tverrsnitt 9 m) og bred (tverrsnitt 29 m) skråning inn mot dypålen, se Figur 7. Den smale skråningen inn mot dypålen skal samle vannet ved minstevannføring, mens den vide skråningen videre utover skal samle vannet ved middels vannføring. Utforminga skal gjøre det mulig for fisk å vandre ved alle vannføringer. Bredden til skråningene ble funnet ved å prøvekjøre terrenget i HEC-RAS.

Dypålen er senket 0,5 m i forhold til grunnlaget, og overgangen mellom smal og vid dypål er ved 0,25 m dyp i forhold til grunnlaget. I likhet med kulpcelletersklene, lages det passasjer gjennom kanten i dypålen, se Figur 6. Passasjene gis samme høyde som trinnet oppstrøms. Filene transformeres til rastere, og en trinngrunnlagsfil lages ved å bruke verktøyet *Mosaic to New Raster* med trinn-, kant-, passasje- og grunnlagfila som input, se Figur 6.

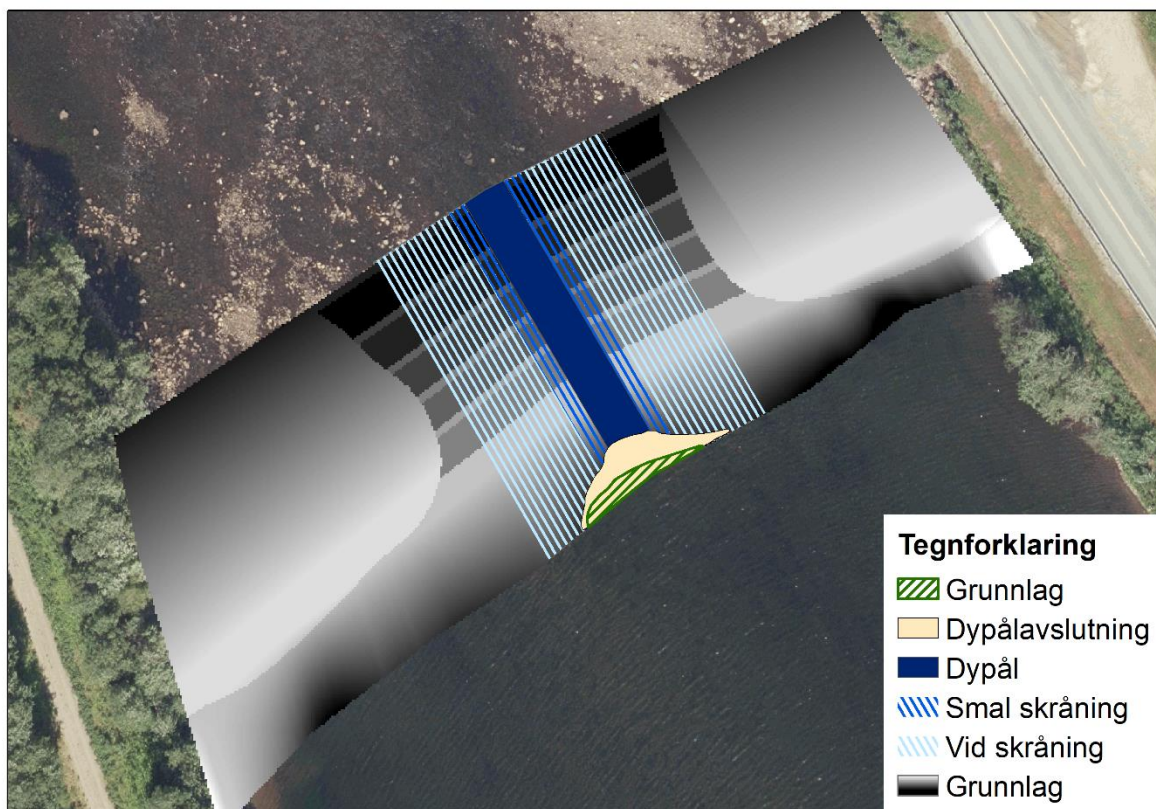
Skråningen inn mot dypålen lages ved at de to smaleste bufferne gis verdi 1 og transformeres til raster. QGIS-verktøyet *Proximity* gir et nærhetsraster der verdien på cellene tilsvarer avstanden fra inputrasteret. *Proximity* brukes på bufferne, med maksimal avstand som tilsvarer henholdsvis 2 m (smal skråning, 8 celler) og 10 m (bred skråning, 40 celler). Deretter brukes *Raster Calculator* for at *Proximity*-rasteret skal gå fra 1 nærmest dypålen, til 0 ved ytre grense av skråningen, se Formel 2.

$$\text{Skråningsutgangspunkt} = (\text{Proximity} > 0) \cdot \left(1 - \frac{\text{Proximity}}{\text{Avstand}}\right) \quad (2)$$

Skråningsutgangspunktene klippes med 9 m og 29 m-bufferne, slik at kun selve skråningen gjenstår. *Raster Calculator* brukes for å senke dypålen, og beregne terrenghøyde for skråninger ut fra Formel 3 og 4.

$$\text{Smal skråning} = \text{trinngrunnlag} - 0,25 \cdot \text{smalt skråningautgangspunkt} - 0,25 \text{ m} \quad (3)$$

$$\text{Vid skråning} = \text{trinngrunnlag} - 0,25 \cdot \text{vidt skråningsutgangspunkt} \quad (4)$$

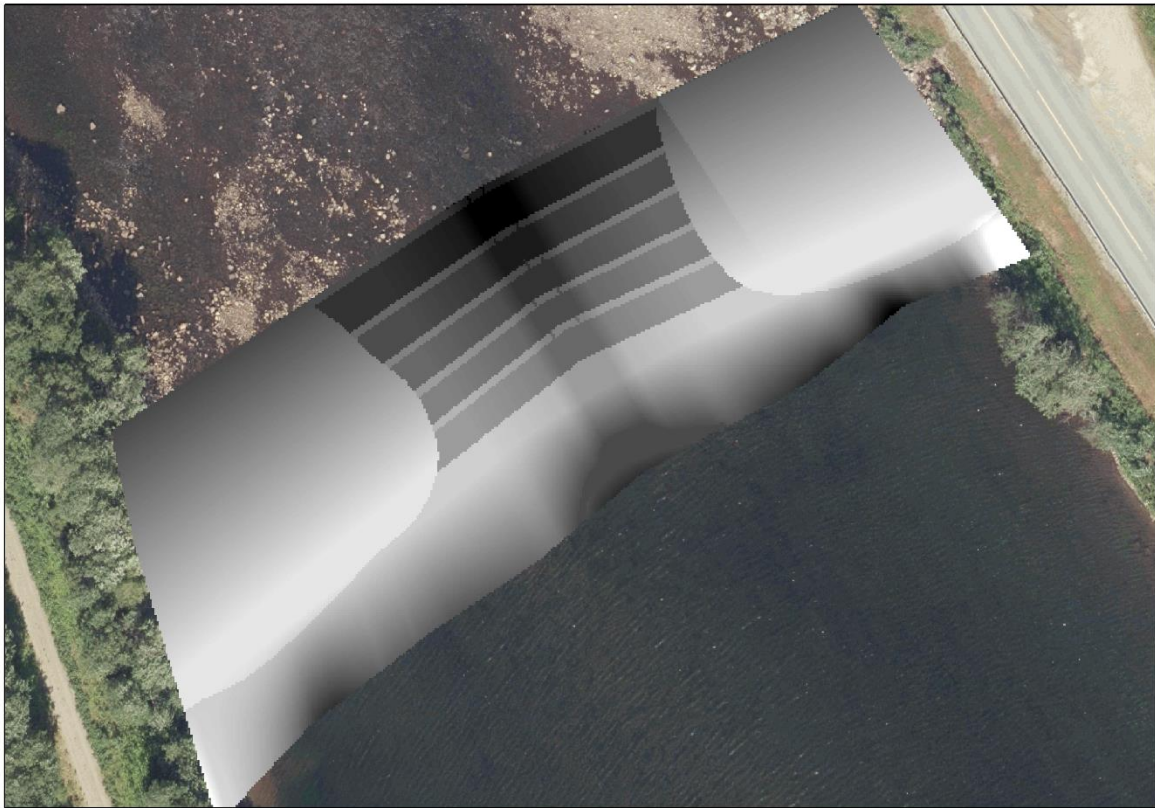


**Figur 7: Konstruksjon av dypål i trinnterskel 22**

For å unngå at dypålen lager en grop ved overgangen til oppstrøms terreng er det laget to polygoner. Ett lager en flate som «fyller» gropa til dypålen nederst på terskeltåa, se det gule området på Figur 7. Oppå denne flaten er det laget et polygon som klipper ut en del av grunnlagsrasteret, se det grønne skraverte området på Figur 7. Overgangen fra flaten til grunnlagsutklippet er satt der høyden til flaten er lik grunnlagsutklippet, slik at overgangen blir jevnere, se Figur 8.

*Mosaic to New Raster* brukes så til å sette sammen til et raster i prioritert rekkefølge. Først trinngrunnlag, så vid skråning, smal skråning, dypål, hevet terskel og oppstrøms overgang, se Figur 8. Ved et par anledninger ble det enkelte rasterceller med høyde fra

grunnlaget i overgangen mellom dypålen og skråningen eller de to skråningene. Dette ble rettet ved å utvide klippegrensene for den fila med høyest prioritet, slik at overgangen blir sømløs.



**Figur 8: Ferdig sammensatt raster for trinnterskel 22**

Resultatrasterene for de andre trinntersklene vises i Resultat-kapittelet.

### 3.6 Visualisering

Formålet med visualisering av terskelendringene er å vise hvordan elva kan se ut med de ulike utformingene, slik at resultatet fra simuleringene kan brukes for at det er lettere for vanlige folk skal forstå effekten av terskeltiltakene.

Utgangspunktet for visualiseringa av endret vanndekt areal i terskelbassengene er forskjellen mellom vanndekt areal for terrenget med terskler og vanndekt areal ved de andre terskelutformingene. ArcMap-verktøyet *Erase* brukes til å finne forskjellen mellom de to filene, der vannflaten skal erstattes med grus. I områder der det simulerte vanndekte arealet for dagens terreng ikke dekker hele den vanndekte området på ortofotoet, er grusfilområdet tilpasset slik at det blir en direkte overgang fra elvebredden til det grusfylte området.

For lave og høye kulpterskler ble det først laget en shapefil tvers over elva for lengden til terskelen, tilpasset vegetasjon langs elvebredden. For trinnterskler ble shapefilene for trinnbunn, trinnkant og den hevede terskelen tilpasset vegetasjonen på kantene. For visualisering av terskelfjerningen brukes kun fila for forskjell i vanndekt areal.

Tersklene ble fylt med vann ved å klippe resultatfila for vanndekt areal fra simulering av terrenget med aktuelt analysepolygon. Hvis den eksisterende terskelen var synlig etter dette, ble det laget en shapefil for vann som skal dekke terskelen.

De ulike elementene i visualiseringa ble fylt med et bilde. Bildene er lagt til på den aktuelle shapefila ved å *velge Layer Properties > Symbology > Features > Edit Symbol*. Deretter velges typen «Picture Fill Symbol», og aktuelt fyllbilde velges. Skaleringa til bildet har blitt tilpasset slik at bildet passer med omgivelsene og målestokken på kartet.

Til tørr elvebunn ble et lett redigert utsnitt av grusbanken rett nedstrøms terskel 22 brukt som bildefyll. Kontrastene er sløvet for at det skal være mindre synlig at bildet repeteres. Ortofotoet for høyre side av terskel 22 ble brukt som utgangspunkt for mønsteryfill i tersklene. Bildet ble beskåret slik at det ble mindre synlig at det gjentas over hele terskelen. For å gjøre det mulig å skille trinnkantene og trinnbunnen for trinnerskelen, ble et annet utsnitt av samme terskel brukt for trinnkantene, og med litt større målestokk sånn at steinene ser større ut. For den vannfylte delen av terskelen ble et utsnitt av ortofotoet i stryket nedstrøms terskel 24 brukt, mens for vann som skal dekke eksisterende terskler eller trær i elva ble to forskjellige utsnitt brukt, et for grunt vann og det for dypt vann.

## 4 Resultater og diskusjon

Terskelutformingene av samme type er simulert samtidig i HEC-RAS, og resultatene vanddekte areal, dybde og hastighet er eksportert. Resultatene er delt opp i områder for å kunne analysere resultatene for de ulike tersklene. Området nedstrøms en terskel og oppstrøms den neste kalles elvestrekning, og er nummerert etter terskelen nedstrøms. I elvestrekningen inngår både terskelbassenget oppstrøms terskelen og stryket opp mot neste terskel. Siden overgangen mellom terskelbasseng og stryk avhenger av terskelutforminga, er elvestrekningsområdet det samme uansett terskelutforming. Resultatområdene til tersklene er derimot avhengig av tersklens utforming, siden størrelsen til tersklene varierer.

Fordi diskusjonen er tett knyttet til figurer og grafer som inngår i resultatene, er det valgt å skrive resultatene og diskusjonen delvis sammen. Hovedfokuset for resultatene er simuleringer med vannføring  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , siden det er viktigst at terskeltiltakene forbedrer forholdene ved minstevannføringa. En kort gjennomgang av resultatene ved vannføringene  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  kommer sist i dette kapitlet. I neste kapittel diskuteres terrengmodellen og andre mer generelle aspekter ved oppgaven, før diskusjonen avsluttes med en oppsummerende diskusjon rundt hvilke tiltak som er mest aktuelle.

### 4.1 Eksisterende terreng

#### 4.1.1 Terskel

De eksisterende tersklene er løsmasseterskler. Figur 9 viser at eksisterende terskel 24 går over elva i en sving, og er 130 m lang. Det ser ut til at vannstrømmen fordeler som utover hele terskelen, Figur 10 viser eksisterende terskel 23, og Figur 11 viser eksisterende terskel 22, og begge er 100 m lange. Vannstrømmen over begge tersklene ser ut til å være samlet på midten.



**Figur 9: Eksisterende terskel 24**



**Figur 10: Eksisterende terskel 23**



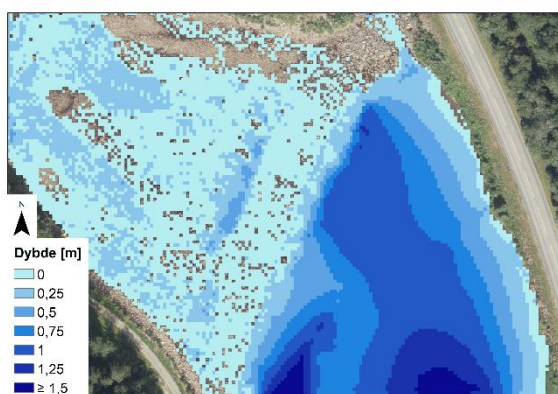
**Figur 11: Eksisterende terskel 22**

Tabell 6 viser at terskel 24 og 23 har et stort vanddekt areal. Vanddybden over alle de eksisterende tersklene i gjennomsnitt er lav, mens gjennomsnittshastigheten er relativt høy.

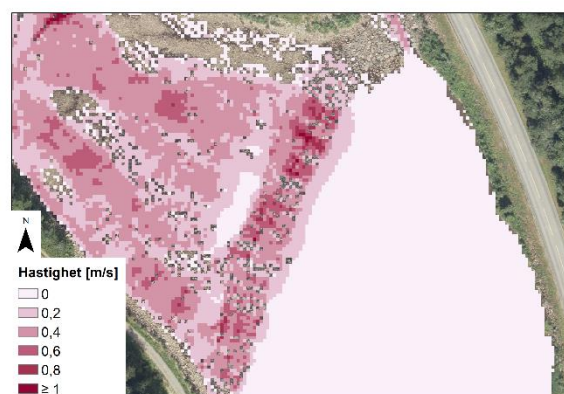
**Tabell 6: Resultater for eksisterende terskler**

	Vanddekt areal [m]	Gjennomsnittsdypde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
<b>Terskel 24</b>	1 384	0,06	0,40
<b>Terskel 23</b>	1 586	0,12	0,31
<b>Terskel 22</b>	759	0,07	0,67

Figur 12 viser at for eksisterende terskel 24 fordeler vannstrømmen seg over nesten hele hovedløpet, samt noe i sideløpet helt til høyre, noe som gir et stort vanddekt areal, se Tabell 6. For terskel 24 er gjennomsnittsdypden 0,06 m, og som Figur 12 viser, så er det meste veldig grunt. Gjennomsnittshastigheten er 0,40 m/s, og de raske områdene fordeler seg utover hele hovedløpet, se Figur 13.



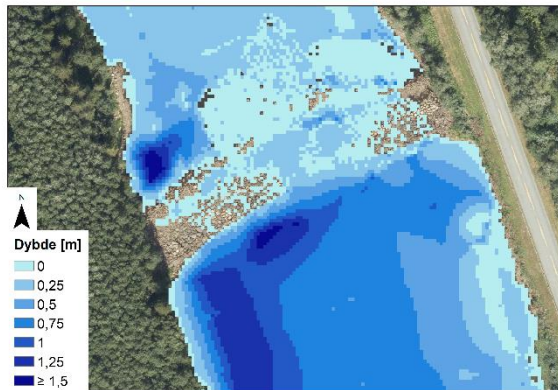
**Figur 12: Dybdefordeling for eksisterende terskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



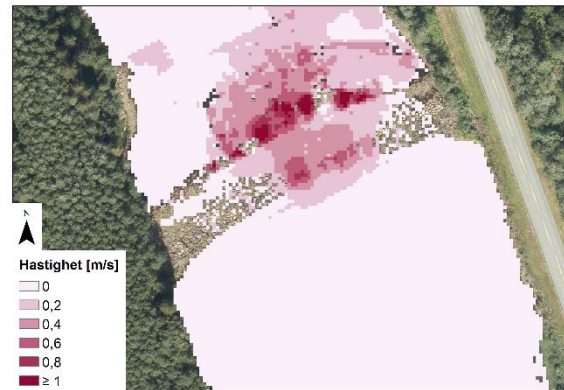
**Figur 13: Hastighetsfordeling for eksisterende terskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



Figur 14 viser at vannstrømmen over terskel 23 er konsentrert over midten, og at det er rundt 25 cm dypt der. Vannhastigheten er høy, se Figur 15, i særlig nedre del av terskelen, i overgangen til stryket nedstrøms. Gjennomsnittsdybden er 12 cm, og gjennomsnittshastigheten er relativt lav, 0,31 m/s, se Tabell 6.

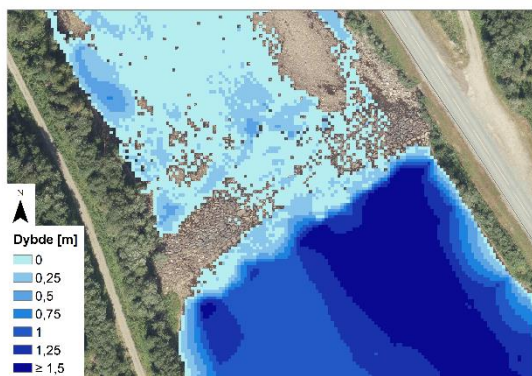


**Figur 14: Dybdefordeling for eksisterende terskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

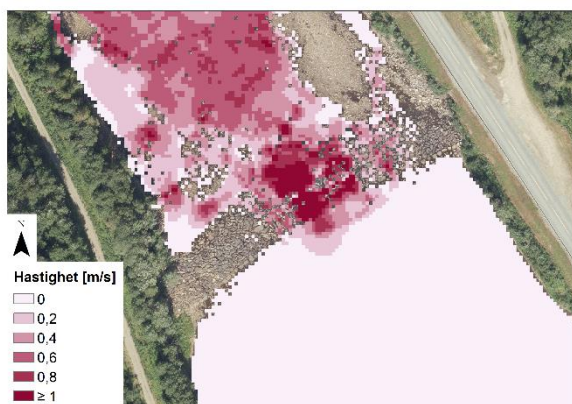


**Figur 15: Hastighetsfordeling for eksisterende terskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 16 viser at også over terskel 22 er vannstrømmen konsentrert på midten av terskelen, noe som gir et lite vanddekt areal, se Tabell 6. Figur 18 viser at vannet er veldig grunt over terskelen, med en gjennomsnittlig dybde på 7 cm. Gjennomsnittshastigheten er derimot høy, 0,67 m/s, noe Figur 17 også viser.

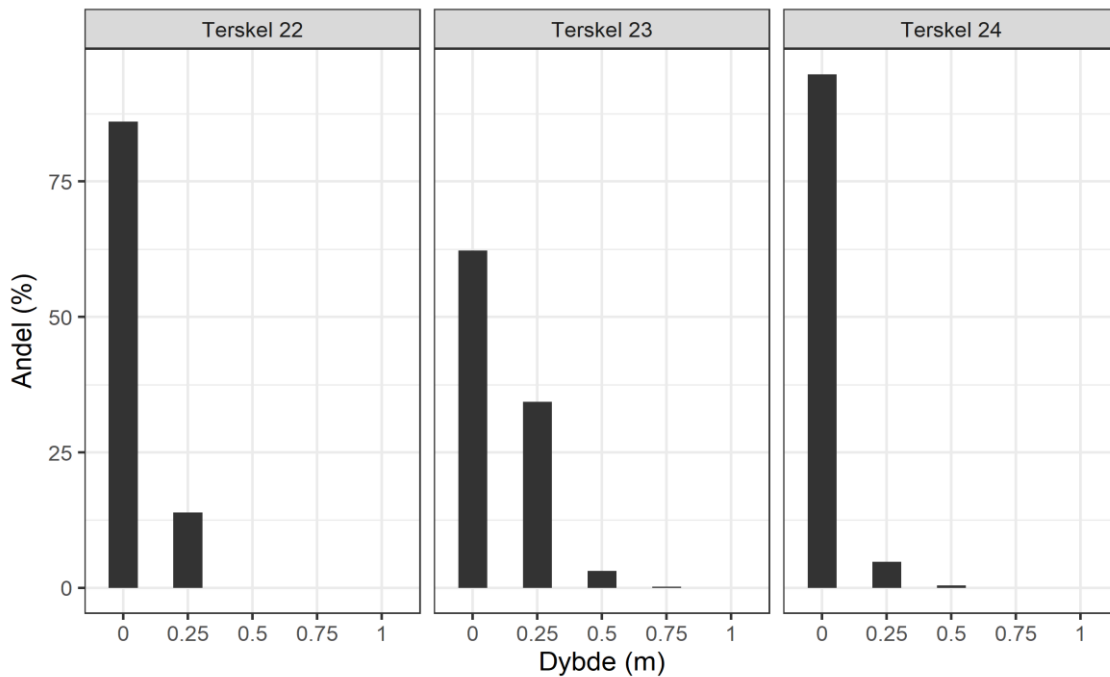


**Figur 16: Dybdefordeling for eksisterende terskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



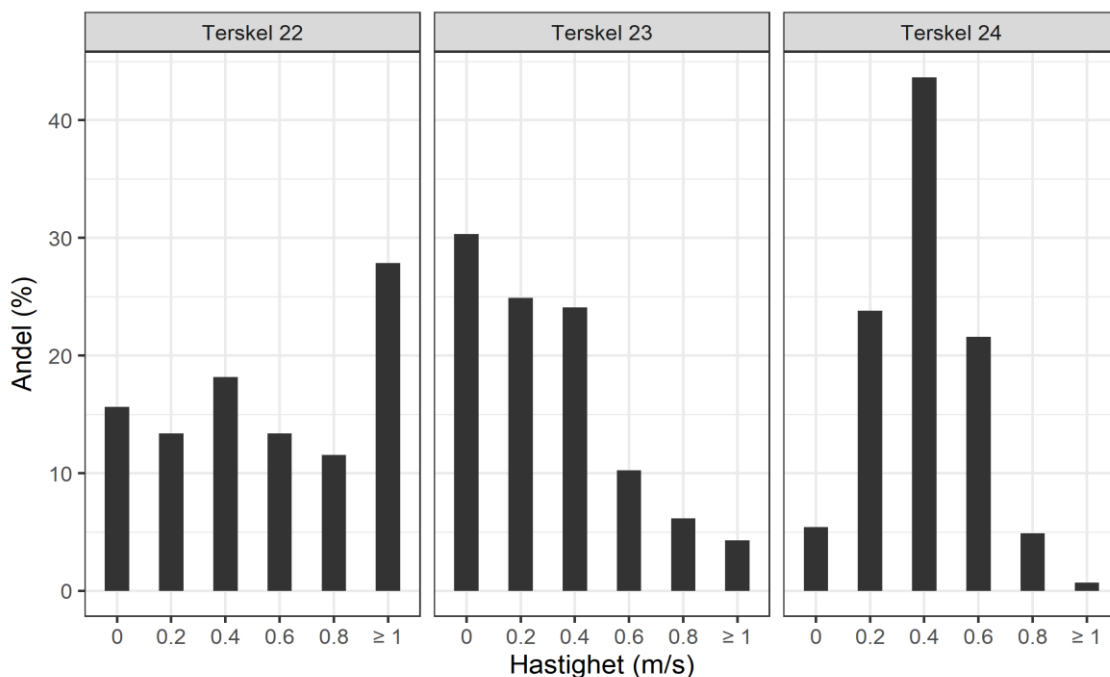
**Figur 17: Hastighetsfordeling for eksisterende terskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Dybdefordelinga i Figur 18 viser at mesteparten av det vanddekte arealet er svært grunt over terskel 22 og 24, mens vannet er litt dypere over terskel 23.



**Figur 18: Dybdefordeling for eksisterende terskler**

Hastighetsfordelinga i Figur 19 viser at nesten 30 % av det vanddekte arealet over terskel 22 har en vannhastighet høyere enn 1 m/s. Kombinert med at over 80 % av arealet er svært grunt, kan det gjøre terskelen vanskelig å passere for fisk. Hastigheten på strømmen er lavere for terskel 23 og 24, og det er i liten grad hastigheter større enn 1 m/s.



**Figur 19: Hastighetsfordeling for eksisterende terskler**

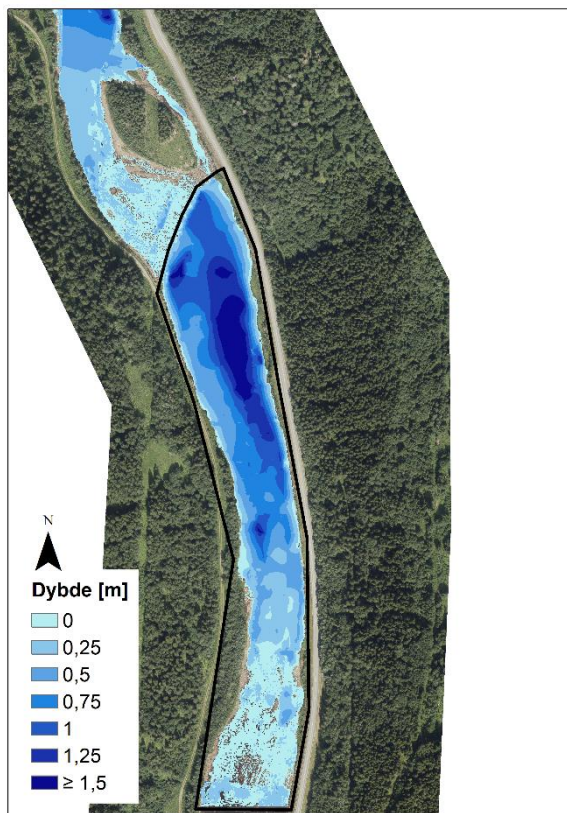
#### 4.1.2 Elva

Tabell 7 viser at både elvestrekning 23 og 22 har en utbredelse på mer enn 60 000 m<sup>2</sup>, mens det vanddekte arealet i elvestrekning 24 er mindre. Alle elvestrekningene har en gjennomsnittsdybde på rundt 60 cm, og lave gjennomsnittshastigheter rundt 0,1 m/s.

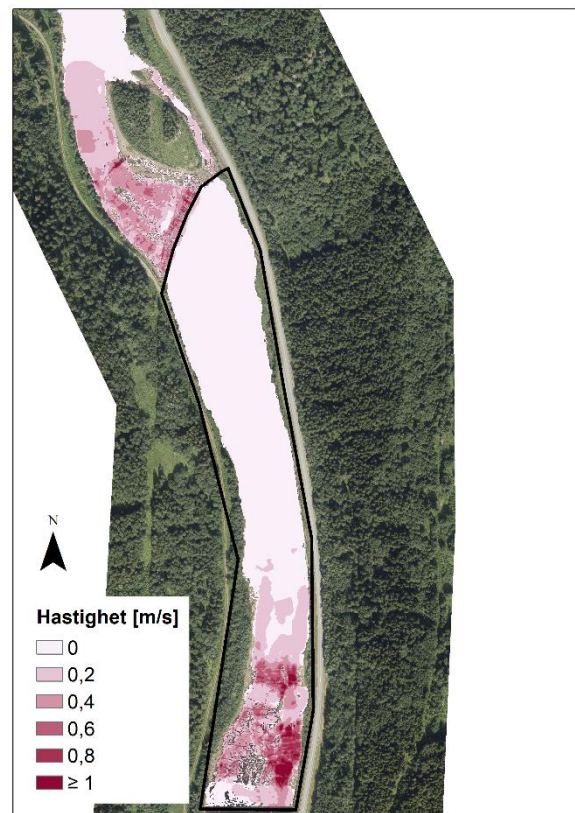
**Tabell 7: Resultater for elva oppstrøms eksisterende terskler**

	Vanddekt areal [m <sup>2</sup> ]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Elvestrekning 24	46 658	0,57	0,12
Elvestrekning 23	60 049	0,65	0,07
Elvestrekning 22	64 901	0,59	0,05

Figur 20 viser at det er et stort, dypt område midt i terskelbassenget oppstrøms terskel 24. Elvestrekningen har en gjennomsnittlig dybde på 0,57 m. Figur 21 viser at det stillestående terskelbassenget omtrent 380 m av det modellerte elvestrekningen, som totalt er 660 m lang. Stryket i øvre del av elvestrekningen gjør at gjennomsnittshastigheten er 0,12 m/s, noe som er høyest blant de eksisterende elvestrekningene. Stryket fortsetter opp til terskel 25, som ligger 2,3 km oppstrøms terskel 24. Det er ikke påvirket av terskel 24, så det er lite interessant å modellere.



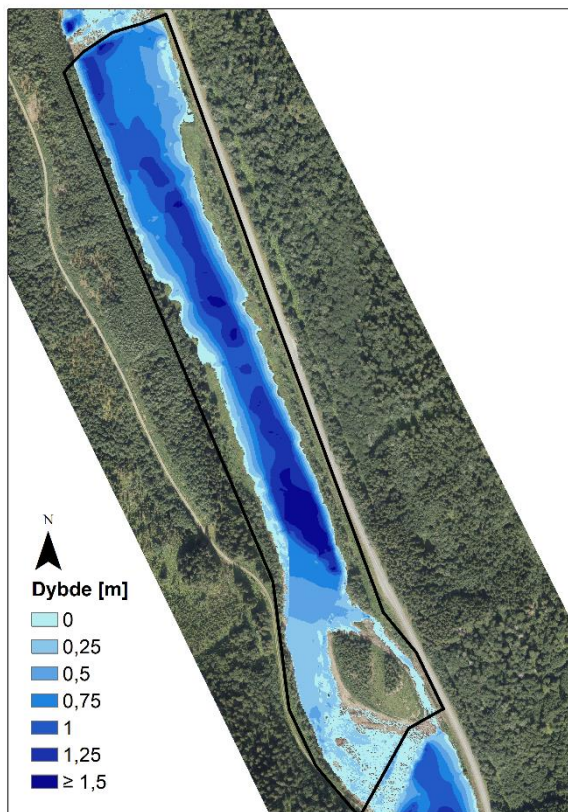
**Figur 20: Dybdefordeling i elvestrekning 24 med eksisterende terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



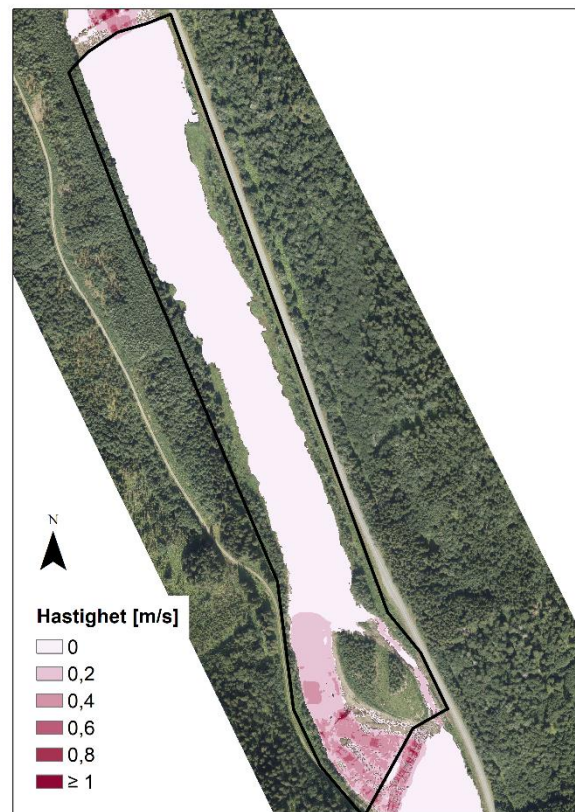
**Figur 21: Hastighetsfordeling i elvestrekning 24 med eksisterende terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Elvestrekning 23 er 870 m lang. Elva deler seg i to løp over terskel 24, som samler seg etter omtrent 200 m. Figur 22 viser at terskelbassenget er 1,5 m dypt eller dypere fra løpene samles og videre ned til terskelen. De dypeste områdene i elva ligger på høyre side midt av elvestrekningen, og skifter til venstre side nede ved terskelen.

Elvestrekningen har en gjennomsnittlig dybde på 65 cm. Figur 23 viser at hele terskelbassenget er tilnærmet stillestående. I elvestrekningen inngår også stryket i hovedløpet og sideløpet nedstrøms terskel 24. Der er vannstanden lavere, og spesielt i hovedløpet er hastigheten høyere, noe som trekker gjennomsnittshastigheten opp til 0,07 m/s.

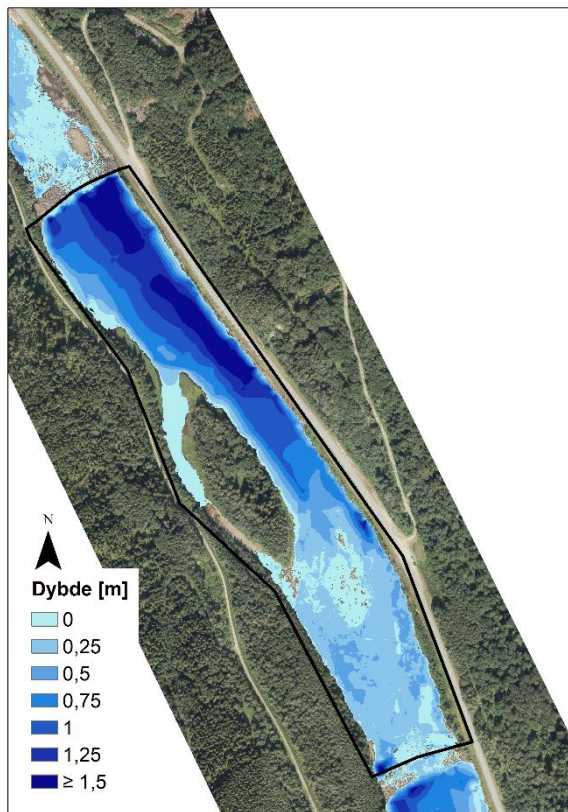


**Figur 22: Dybdefordeling i elvestrekning 23 med eksisterende terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

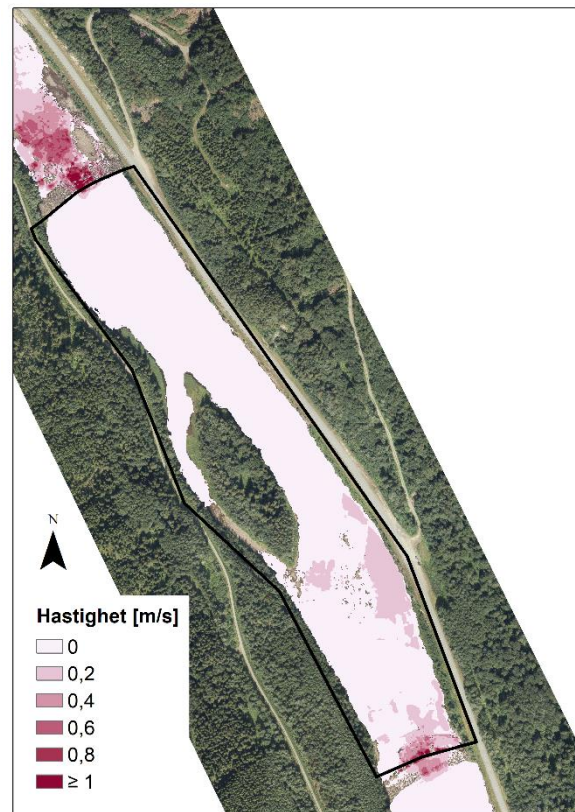


**Figur 23: Hastighetsfordeling i elvestrekning 23 med eksisterende terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Elvestrekning 22 er 720 m lang. Øvre halvdel av elvestrekningen er relativt grunn, mindre enn 0,5 m dyp, mens i terskelbassenget i nedre halvdel er det områder langs høyre side som er dypere enn 1,5 m, se Figur 24. Det gir en gjennomsnittlig dybde på 0,59 m. Figur 25 viser at det kun er raskere områder rett nedstrøms terskel 23, mens vannhastigheten ellers er stillestående til lav i resten av elvestrekningen. Det tyder på at hele elvestrekningen er et oppdemmet terskelbasseng. Den gjennomsnittlige hastigheten i elvestrekningen er på kun 0,05 m/s.

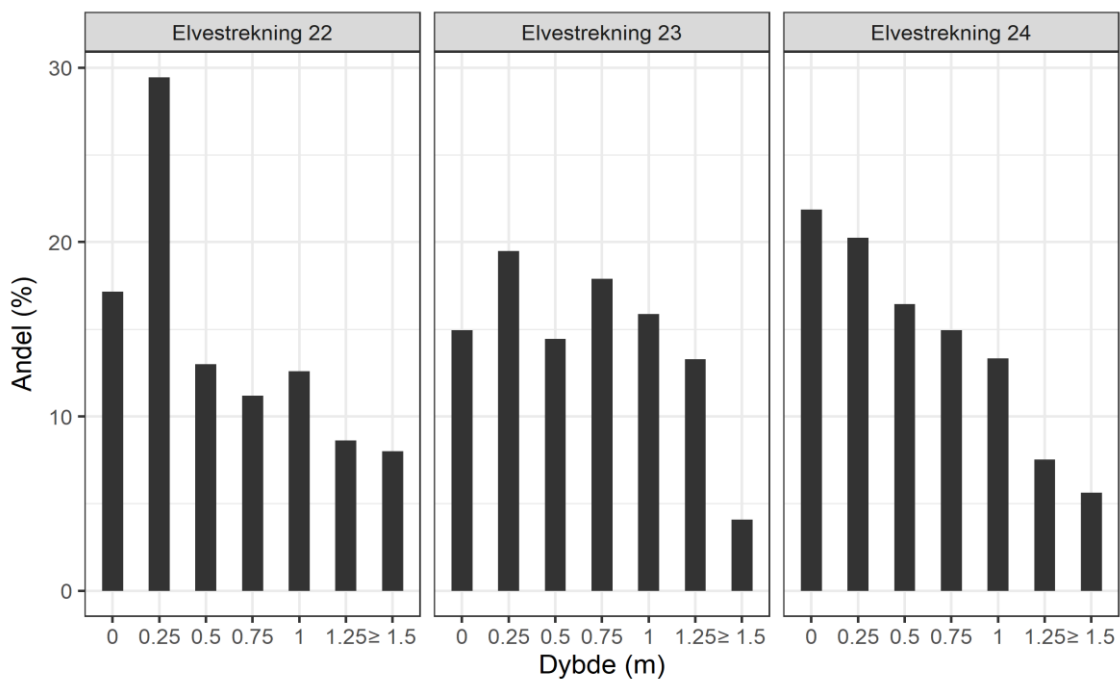


**Figur 24: Dybdefordeling i elvestrekning 22 med eksisterende terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



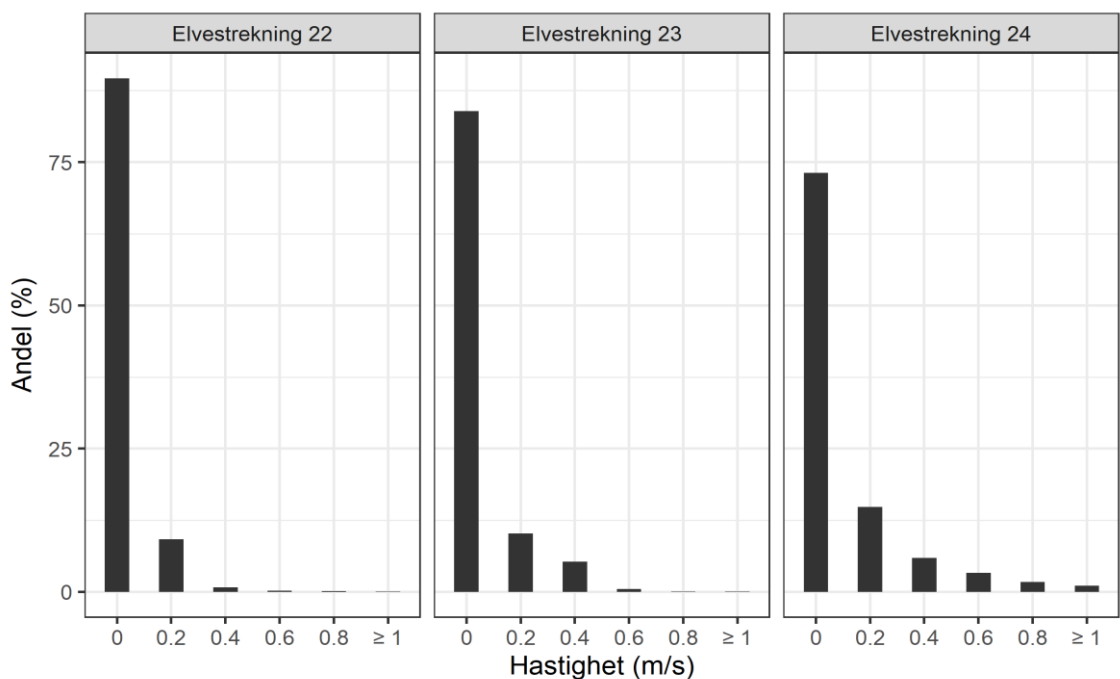
**Figur 25: Hastighetsfordeling i elvestrekning 22 med eksisterende terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 26 viser at for elvestrekning 22 er 29 % av vannet rundt 25 cm dypt, mens ellers er dybden jevnt fordelt fra 0 til 1,5 m. I elvestrekning 23 er dybden relativt jevnt fordelt fra 0 til 1,25 m, med noen områder som er 1,5 m eller dypere. Figuren viser også at dybden i elvestrekning 24 er jevnt avtakende fordelt fra 0 til 1,5 m. Det vanddekte arealet er stort, og terskelbassengene er dype, som noe som skaper oppholdsplasser og gode forhold over overvintring.



**Figur 26: Dybdefordeling for elvestrekning mellom eksisterende terskler**

Figur 27 viser at 73 % av elvestrekning 24 består av stillestående eller nesten stillestående vann, noe som faktisk gjør dette til det elvestrekningen med mest bevegelse. I elvestrekning 23 viser figuren at 84 % består av stillestående eller nesten stillestående vann. I elvestrekning 22 er 90 % av vannet stillestående eller tilnærma stillestående.



**Figur 27: Hastighetsfordeling for elvestrekning mellom eksisterende terskler**

## 4.2 Uten terskler

### 4.2.1 Tersklene

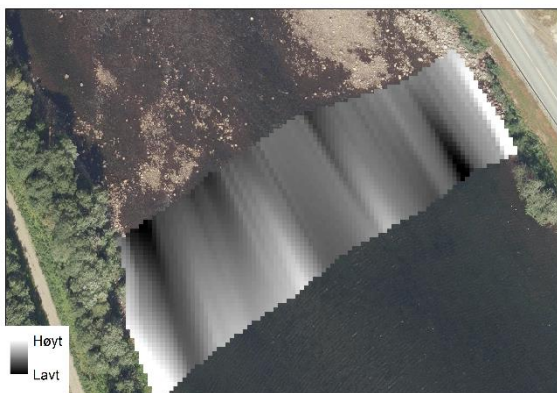
Figur 28 viser rasteret som erstatter terskel 24. Terrenget er høyere i de lyse områdene helt til høyre, mens den dypeste delen av terskelerstatningen er midt i hovedløpet. Figur 29 viser rasteret som erstatter terskel 23. Det er dypt til venstre, og ellers relativt flatt. Figur 30 viser rasteret som erstatter terskel 22. Det varierer mer enn de andre terskelerstatningene, med høye og lave områder gjennom hele bredden. Felles for alle terskelerstatningene er at de på grunn av interpoleringa har høydestriper i strømretningen, og mer varierende høyde tvers over elva.



**Figur 28: Rasteret som erstatter terskel 24**



**Figur 29: Rasteret som erstatter terskel 23**



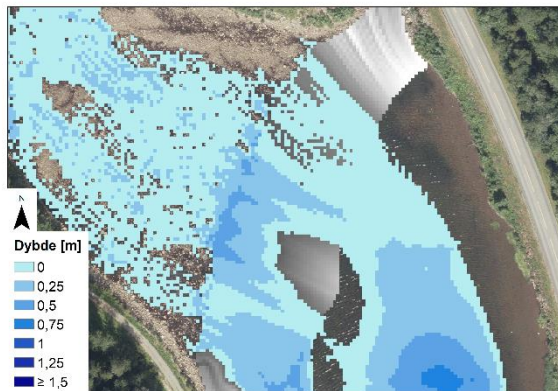
**Figur 30: Rasteret som erstatter terskel 22**

Tabell 8 viser at det vanddekte arealet i terskelområdene er i overkant av 1000 m<sup>2</sup> for alle terskelerstatningene. Gjennomsnittsdybden er fra 13 cm og dypere, og gjennomsnittshastigheten er fra 0,31 m/s ned til 0,11 m/s.

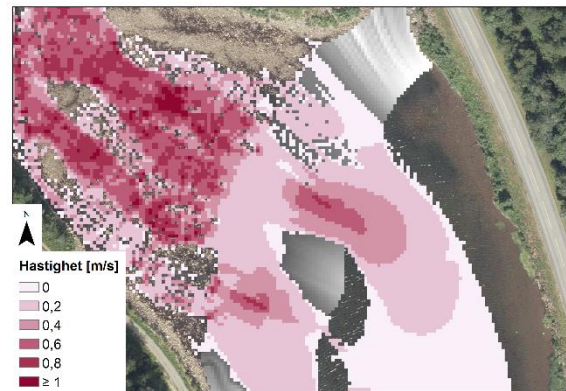
**Tabell 8: Resultater for terskelerstatningene**

	Vanndekt areal [m]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Terskel 24	1 247	0,15	0,21
Terskel 23	1 034	0,27	0,11
Terskel 22	1 123	0,13	0,31

Figur 31 viser at dersom terskel 24 fjernes, vil vannstrømmen kun gå i hovedløpet. I likhet med eksisterende terreng, så vil det renne vann i store deler av hovedløpet. Figur 32 viser at hastigheten vil være relativt lav over terskelerstatninga.

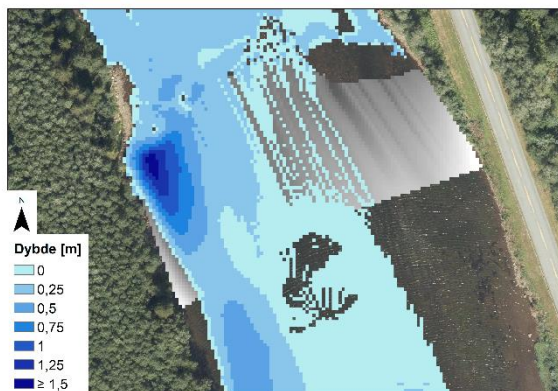


**Figur 31: Dybdefordeling der terskel 24 er fjernet ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

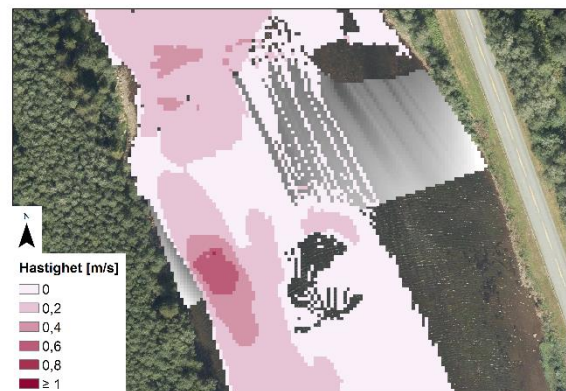


**Figur 32: Hastighetsfordeling der terskel 24 er fjernet ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

For terskel 23 viser Figur 33 at vannstrømmen, og selve elva, vil renne på venstre halvdel av elvas bredde. Elva er dyppest på venstre side, og terskelerstatninga kobler sammen dypålen i terskelbassenget og kulpen rett nedstrøms terskelen. Figur 34 viser at vannet vil renne rolig gjennom terskelerstatninga. Vannstripene midt i elva skyldes at det er interpolert mellom tverrsnitt av elvebredden med varierende terrenghøyde.



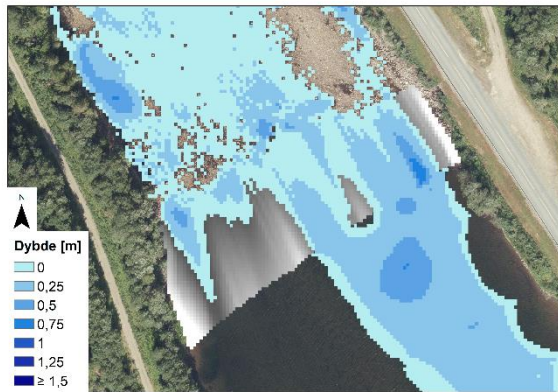
**Figur 33: Dybdefordeling der terskel 23 er fjernet ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



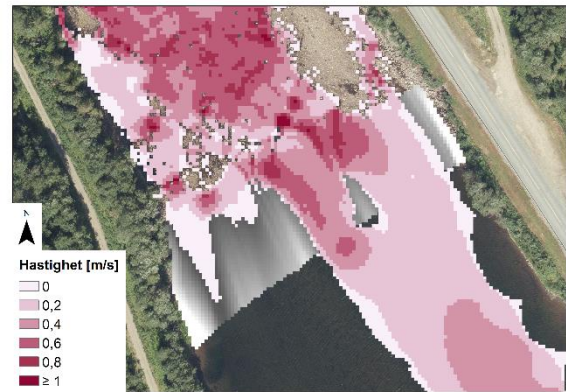
**Figur 34: Dybdefordeling der terskel 23 er fjernet ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



Figur 35 viser at uten terskel 22 vil elva være samlet på høyre halvdel oppstrøms terskelen og på venstre side nedstrøms terskelen. Fjerning av terskel ved interpolering fører til en trekanta bakevje ved venstre elvebredde, som trolig ville vært utforma annerledes i en reell terskelfjerning. Figur 36 viser at hastigheten er høyest midt i elva.

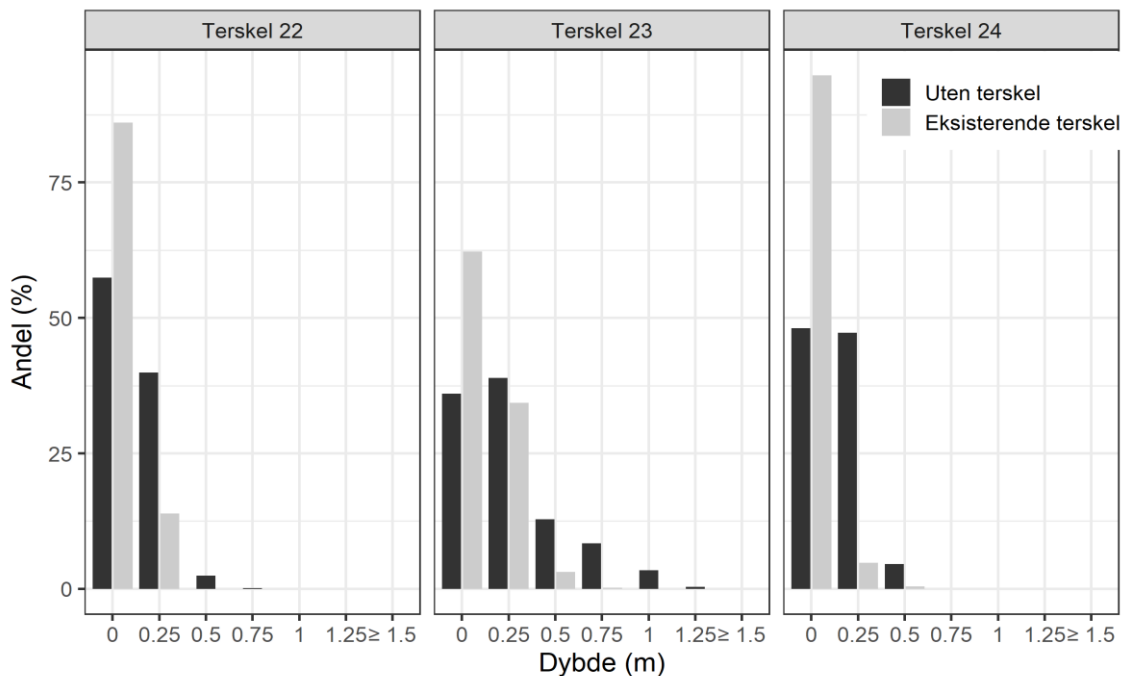


**Figur 35: Dybdefordeling der terskel 22 er fjernet ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



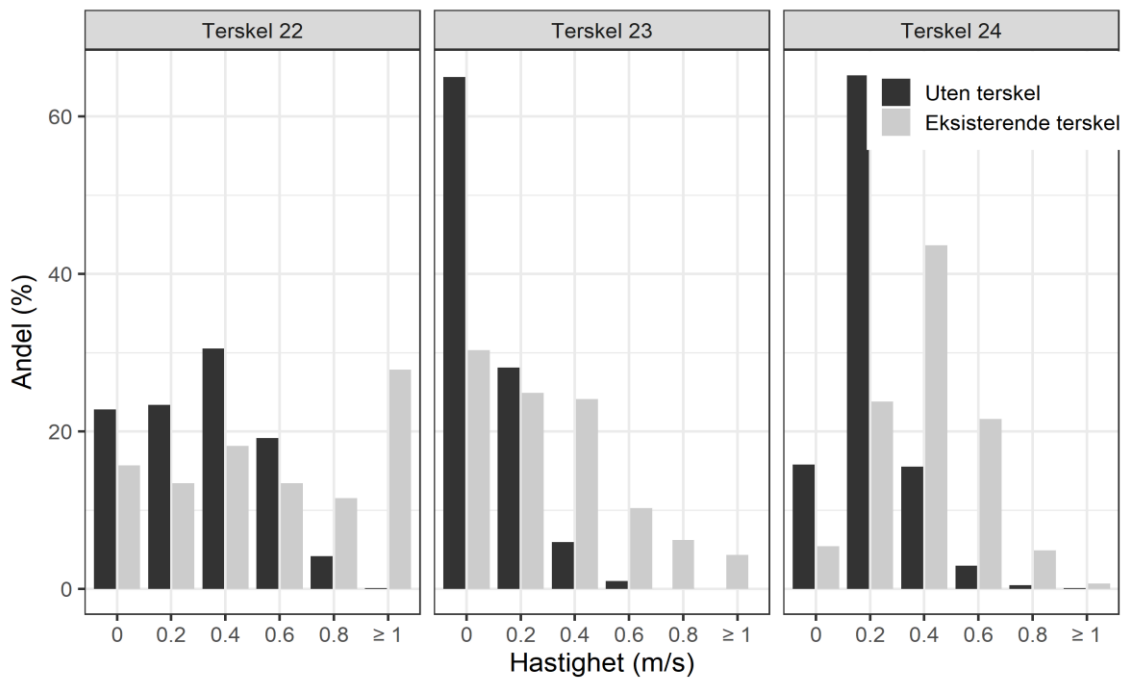
**Figur 36: Dybdefordeling der terskel 22 er fjernet ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 37 viser at vannet er dypere over terskelerstatninga enn over de eksisterende tersklene. Dette er naturlig siden fjerninga av terskelen gjør at terskelerstatninga egentlig bare er interpolert elvebunn og dermed bare en vanlig del av elva. For terskel 22 og 24 er nesten alt vannet 0 til 25 cm dypt, men for terskel 23 gjør dypålen gjennom terskelerstatninga at vannet er litt dypere.



**Figur 37: Dybdefordeling der tersklene er fjernet**

Figur 38 viser at hastighetene er lavere over terskelerstatninga enn de var over tersklene. Det er en naturlig effekt av at terskelerstatninga er relativt flat, mens tersklene har en større gradient som gir fart på vannet. Ideelt sett så bør området der terskelen fjernes tilbakeføres slik at det fungerer som en naturlig del av elva.



**Figur 38: Hastighetsfordeling der tersklene er fjernet**

#### 4.2.2 Elva

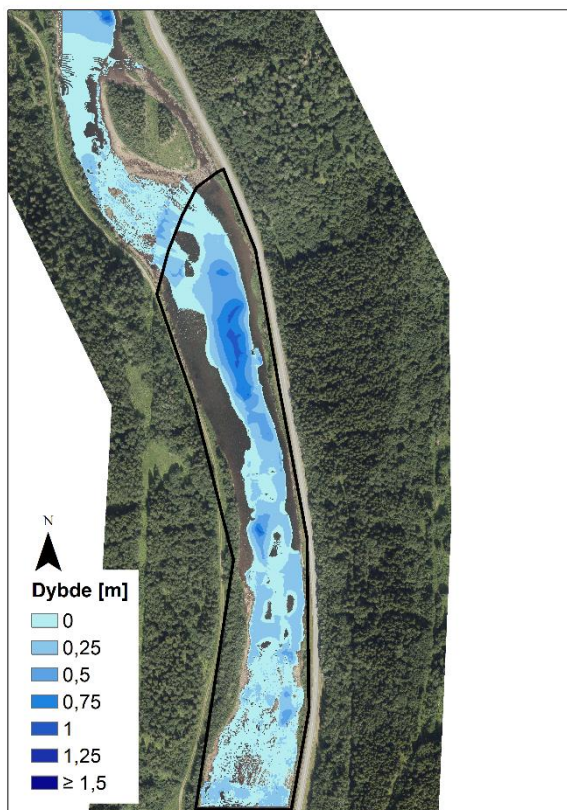
Tabell 9 viser det når tersklene fjernes reduseres det vanddekte arealet i elvestrekningene til 35 000-40 000 m<sup>2</sup>. Det fører til at gjennomsnittsdybden minker, mens gjennomsnittshastigheten øker for alle elvestrekningene.

**Tabell 9: Resultater for elva uten terskler**

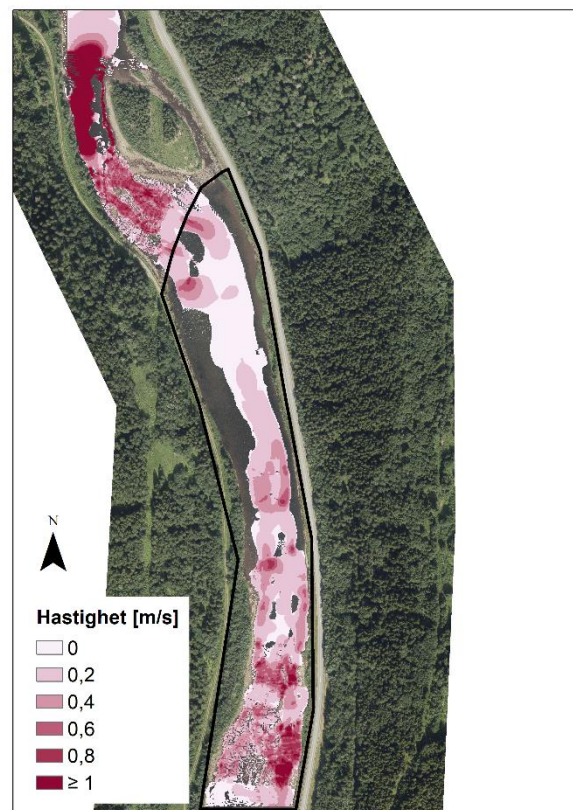
	Vanddekt areal [m <sup>2</sup> ]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Elvestrekning 24	34 084	0,21	0,25
Elvestrekning 23	41 578	0,36	0,34
Elvestrekning 22	36 336	0,21	0,20

I elvestrekning 24 blir det vanddekte arealet redusert til 73 % av dagens. I det tidligere terskelbassenget reduseres elva på den meste til under halve dagens bredde. Figur 39 viser at for stryket i den øvre tredjedelen av elvestrekningen, så er dybden relativ lik som for eksisterende terreng. Det er trolig derfor det vanddekte arealet ikke er mer redusert i forhold til eksisterende terreng. Figuren viser også gjenstår det et dypt område midt i det tidligere terskelbassenget, og at det er sammenhengende vannoverflate i hele elva, selv om flere grusbanker dukker opp midt i elva.

Figur 40 viser at det er flekkvis områder med høy hastighet gjennom nesten hele elvestrekningen, bortsett fra i det tidligere terskelbassenget der det fremdeles er områder med stillestående vann.



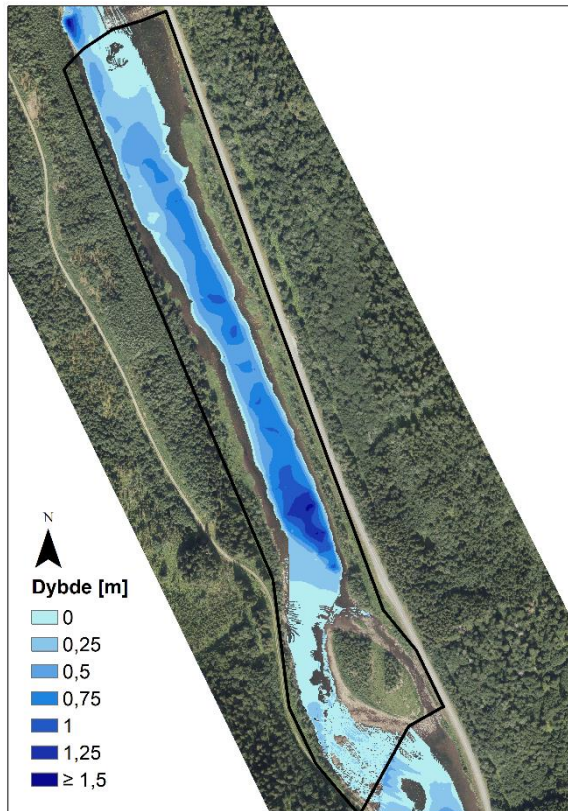
**Figur 39: Dybdefordeling for elvestrekning 24 uten terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



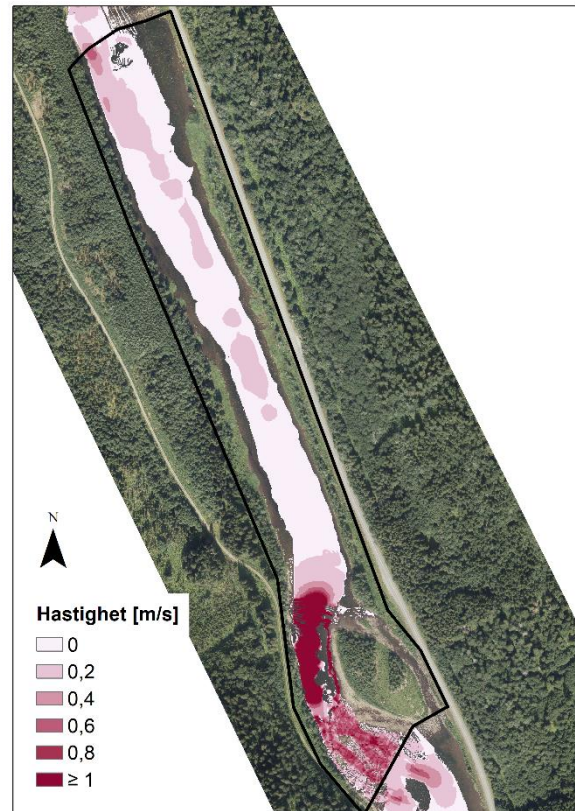
**Figur 40: Hastighetsfordeling for elvestrekning 24 uten terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

I elvestrekning 23 reduseres det vanddekte arealet til drøye 41 000 m<sup>2</sup>, en reduksjon til 69 % av dagens. Figur 41 viser at sideløpet er tørt, og terskelbassenget rett oppstrøms terskelen er borte, mens ellers er reduksjonen i elvas bredde liten og fordelt på begge sidene. Gjennomsnittsdybden er redusert med nesten en halvmetre, til 0,38 m.

Figur 42 viser at hastigheten fremdeles er relativt lav i mesteparten av elvestrekningen, men økt betydelig i stryket ved øya nedstrøms terskel 24. Gjennomsnittshastigheten øker fra 0,07 til 0,34 m/s.



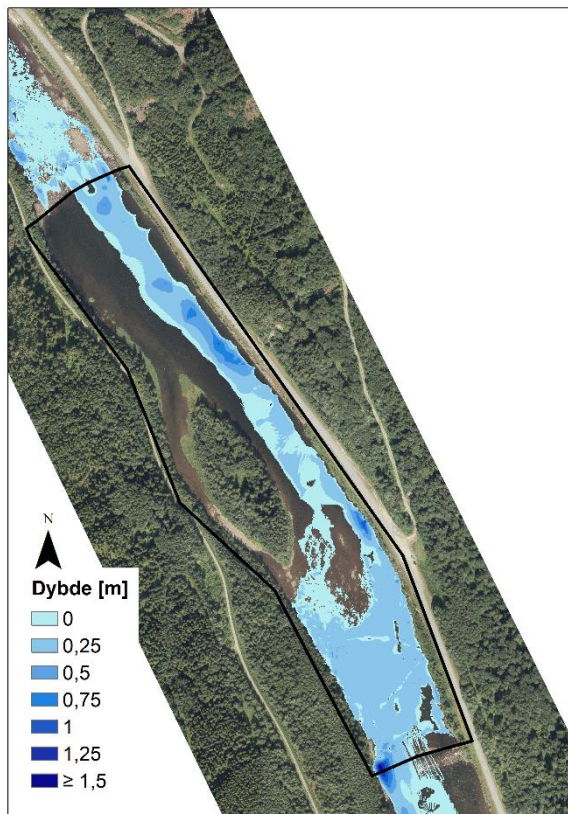
**Figur 41: Dybdefordeling for elvestrekning 23 uten terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



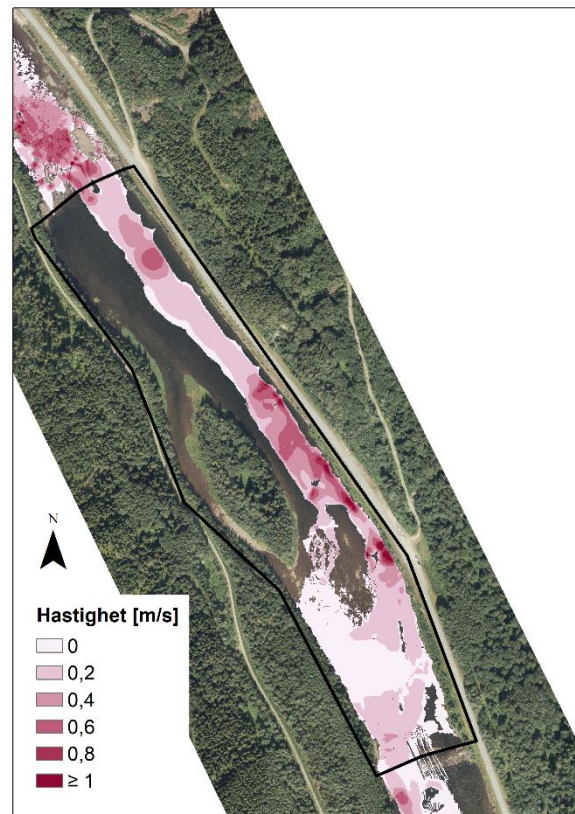
**Figur 42: Hastighetsfordeling for elvestrekning 23 uten terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

I elvestrekning 22 reduseres det vanddekte arealet til knappe 36 000 m<sup>2</sup>, noe som kun er 56 % av dagens elv. Det grunne, tilnærma stillestående området i øvre tredjedel er fortsatt vanddekt, men med noe økt vannhastighet. I nedre del av elvestrekningen er bredden til elva på det meste redusert til en tredjedel, og sideløpet er helt tørt. Som Figur 43 viser, så er det knapt områder dypere enn 0,5 m igjen i terskelbassenget.

Samtidig, så viser Figur 44 at vannhastigheten vil er middels til høy i hovedløpet ved øya, og rundt 0,2 m/s i store deler av elvestrekningen. Vannoverflaten er sammenhengende i hele elvestrekningen, men kun 33 m på det smaleste.

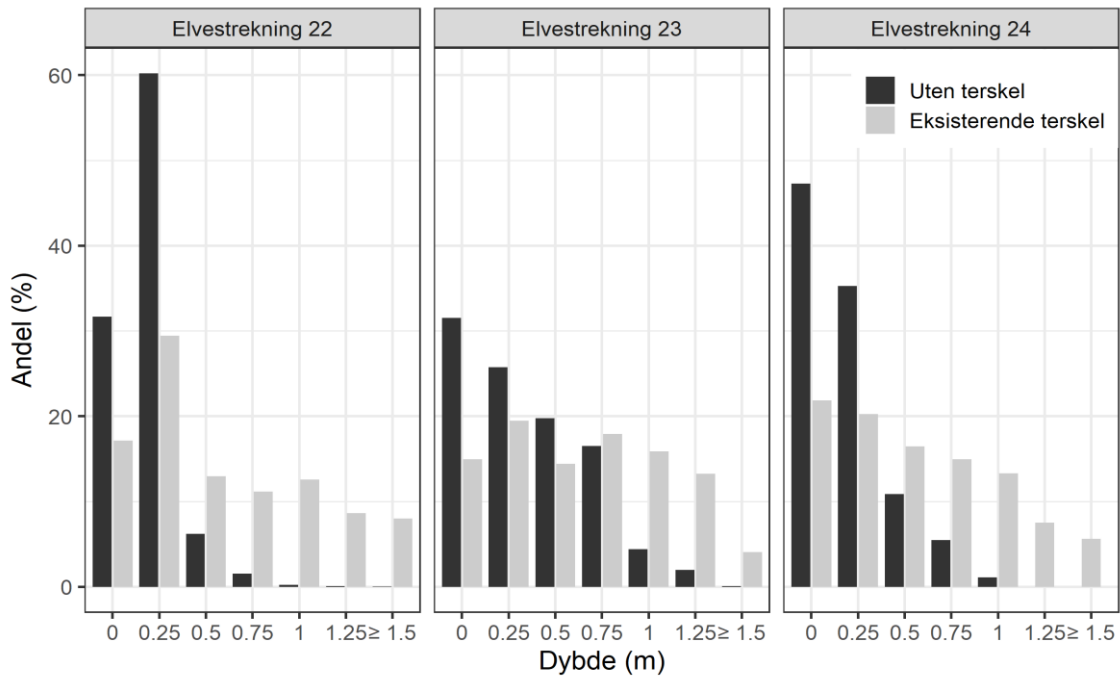


**Figur 43: Dybdefordeling for elvestrekning 22 uten terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



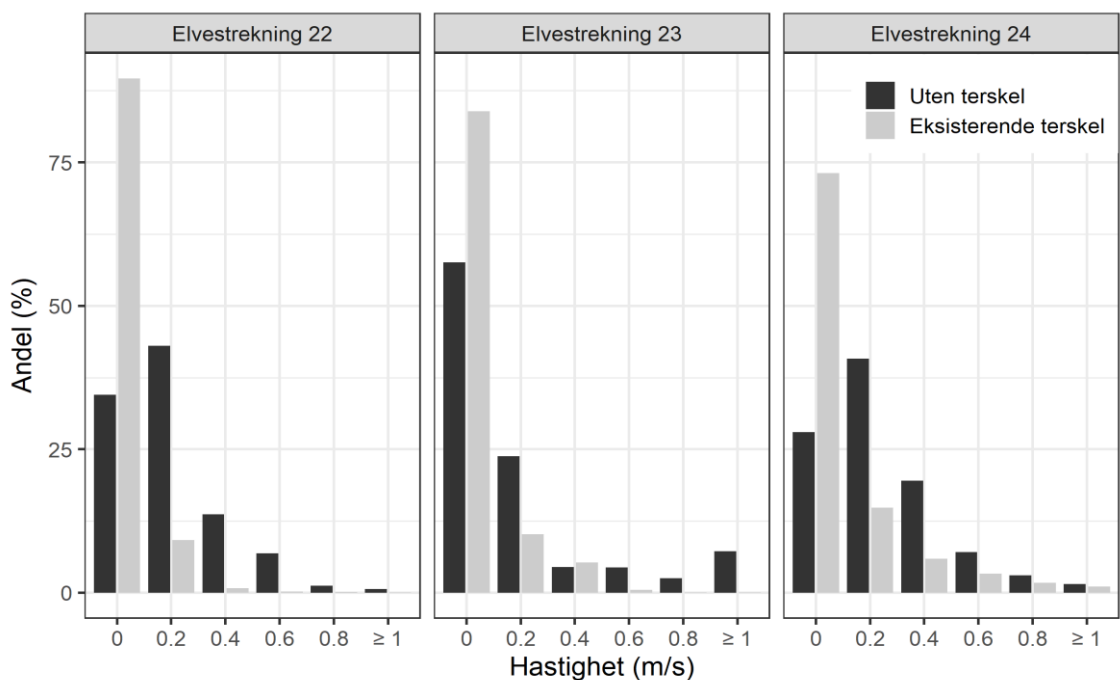
**Figur 44: Hastighetsfordeling for elvestrekning 22 uten terskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 45 viser at elvestrekning 22 blir veldig grunt, der 92 % av vannet er 25 cm eller grunnere. Dybdevariasjonen er større i elvestrekning 23 der dybdefordelinga er jevnt avtakende fra 0 til 0,75 m, og 6 % er 1 m eller dypere. For terskel 24 er nesten halve (47 %) av terskelbassenget rundt 0 m dypt, men det er også noen områder som er ned mot 1 m dype.



**Figur 45: Dybdefordeling for terreng uten terskler**

Figur 46 viser at hastigheten øker i alle elvestrekningene. I elvestrekning 22 og 24 er det ikke lenger stillestående vann som dominerer, mens det fremdeles gjør det i elvestrekning 23.



**Figur 46: Hastighetsfordeling for terreng uten terskler**

### 4.2.3 Diskusjon

Fjerning av terskler er det foretrukne tiltaket når det skal gjøres miljøtiltaket i vassdrag dersom forholdene er akseptable etter fjerninga (Fjeldstad, Pulg og Forseth, 2018). Terskelfjerning er et permanent og vedlikeholdsfritt tiltak som gjenskaper konnektivitet for fisk, bunndyr og sedimenter.

Eksisterende terskel 23 og 24 er vandringshindre (Bjølstad *et al.*, 2014). Fjerning av tersklene og gjenskaping av elvebunnen fjerner også vandringshinderet. Vannet er fremdeles grunt over terskelerstatningene, som Figur 37 viser, men hastigheten er mye lavere ifølge Figur 38, så terskelerstatningene hindrer ikke vandring.

Figur 45 viser at elvestrekningen oppstrøms terskel 22 blir svært grunn etter terskelfjerning. Ørreten foretrekker dype områder (Heggenes, 1996) og er avhengig av et visst dyp for å kunne overvintre når elva fryser. Etter terskelfjerning kan dette være utfordrende siden det er få dype områder igjen. Det vil derfor være hensiktsmessig å bevare en form for terskel 22 på grunn av fiskehabitat. I tillegg reduseres elvebredden etter terskefjerning på det meste til en tredjedel av dagens, noe som ikke ser pent ut, så det kan også teller for å videreføre en form for terskel.

Etter fjerning av terskel 23 finnes det gjenværende dype områder. I elvestrekning 23 er det fremdeles relativt dype områder i det tidligere terskelbassenget, som bør kunne være gode oppholdsplasser. Reduksjonen i vanddekt areal er til 69 % av dagens, men den geografiske fordelinga gjør at elva fortsatt fremstår med et stort vannflate. Fjerning av terskel 23 ser ut til å være et godt tiltak, både med tanke på vandring, oppholdsplasser for fisk og det estetiske.

Etter fjerning av terskel 24 er det fremdeles noen dype områder som kan brukes som oppholdsplasser av fisk selv om det vanddekte arealet reduseres til 73 % og gjennomsnittsdypden til 21 cm. Fjerning av terskel 24 gjenskaper vandring, naturlig sedimenttransport og gir akseptable oppholdsplasser, så fra et rent økologisk perspektiv kan det være en god løsning. Samtidig reduseres elvas bredde til det halve i det tidligere terskelbassenget, noe som gjør at den lave vannføringa blir veldig tydelig.

## 4.3 Høye celleterskler

### 4.3.1 Tersklene

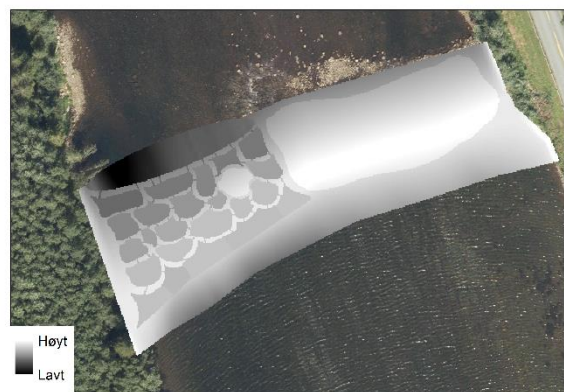
Figur 47 viser utforminga til høy celleterskel 24. Den består av to celleområder i hovedløpet og et i sideløpet. Terskelen er totalt 130 m lang, og av det er 61 m celleområde. Celleområdet er utformet for å passe strømningsmønsteret oppstrøms og den venstre øya er plassert oppstrøms et område som med dagens terskler renner lite vann over. Cellene har et totalt areal på 1 119 m<sup>2</sup>.

Figur 48 viser utforminga til høy celleterskel 23. Den består av et celleområde lagt fra venstre side av elva og ut. Cellene er plassert der fordi det er den dypeste delen av elva, med en kulp nedstrøms som er et godt utgangspunkt for hopp. Terskelen er 100 m lang, og av det er celleområdet 42 m langt. Det er et lite forhøya område i celleområdet for å skape litt mer variasjon. Det totale cellearealet er 539 m<sup>2</sup>.

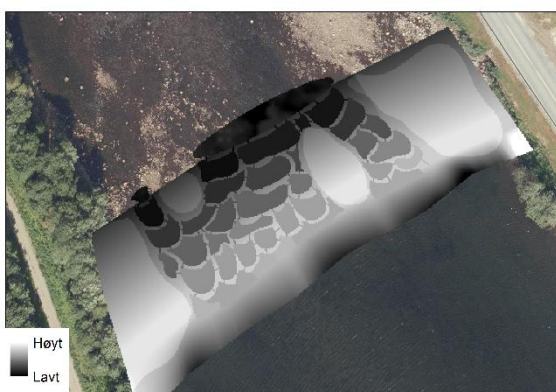
Figur 49 viser utforminga til høy celleterskel 22. Utforminga er tilpasset vannstrømmen nedstrøms, der det er synlig elvebunn på begge siden av elva. Terskelen er 100 m lang, og av det er 52 m celleområde. Det er to forhøya områder mellom cellene for å skape variasjon. Cellearealet er 894 m<sup>2</sup>.



**Figur 47: Høy celleterskel 24**



**Figur 48: Høy celleterskel 23**



**Figur 49: Høy celleterskel 22**

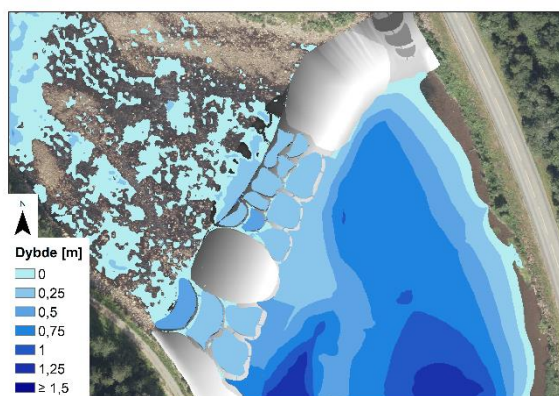


Siden de høye celletersklene består av mange kulper, bør det vanddekte arealet være cellearealet eller større. Gjennomsnittsdybden, se Tabell 10, er rundt den teoretiske på 0,2 til 0,25 m (se avsnitt 3.5.1). Samtidig gjør oppdemminga av vannet i kulpene at gjennomsnittshastigheten synker til er rundt 0,3 m/s.

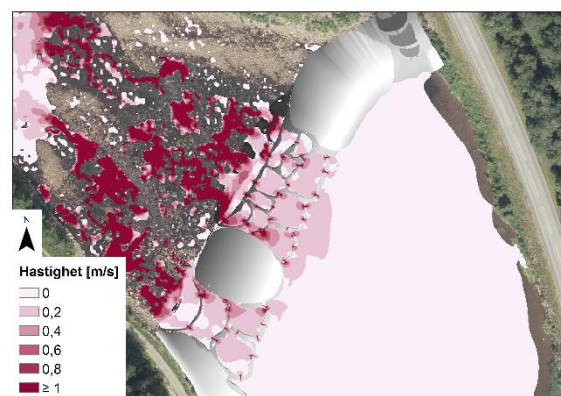
**Tabell 10: Resultater for høye celleterskler**

	Vanddekt areal [m <sup>2</sup> ]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
<b>Terskel 24</b>	1 201	0,23	0,27
<b>Terskel 23</b>	997	0,29	0,26
<b>Terskel 22</b>	1 121	0,22	0,30

Figur 50 viser at alt vannet renner gjennom de to celleterskelområdene i hovedløpet, og at alle cellene i celleterskel 24 er vannfylte. De har en gjennomsnittsdybde på 0,23 m, og et par av cellene ser ut til å være dypere enn resten med en dybde rundt 0,5 m. «Steinene» som demmer opp cellene er stort sett tørre, noe som tyder på at vannet renner gjennom passasjene mellom kulpene. Figur 51 viser at hastigheten i de fleste cellene er rundt 0,2 m/s, men at det i noen celler både renner raskere og saktere. I tillegg er det mulig å se mange av passasjene i Figur 51 fordi vannhastigheten er høy og mørkerosa.

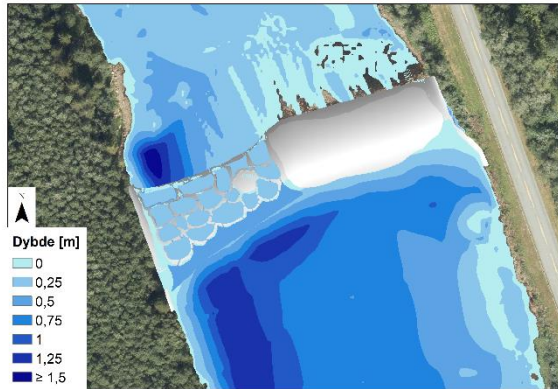


**Figur 50: Dybdefordeling for høy celleterskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

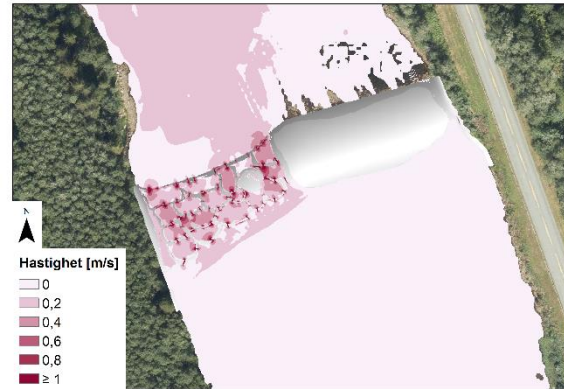


**Figur 51: Hastighetsfordeling for høy celleterskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 52 viser at alt vannet renner gjennom celleterskel 23, og at alle cellene er vannfylte. Vanddybden i cellene er rundt 0,25 m. Gjennomsnittsdybden er 0,29, noe som kan skyldes at analyseområdet for terskelen også inkluderer litt opp- og nedstrøms celleterskelen. Figur 53 viser at hastigheten på vannet i de fleste cellene er rundt 0,2 m/s, men raskere i et par celler. Også for denne terskelen er det mulig å se passasjene fordi vannstrømmen er raskere gjennom dem, og de fremstår mørkerosa på figuren.

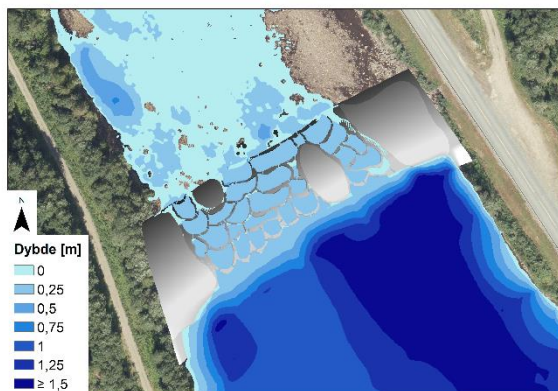


**Figur 52: Dybdefordeling for høy celleterskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

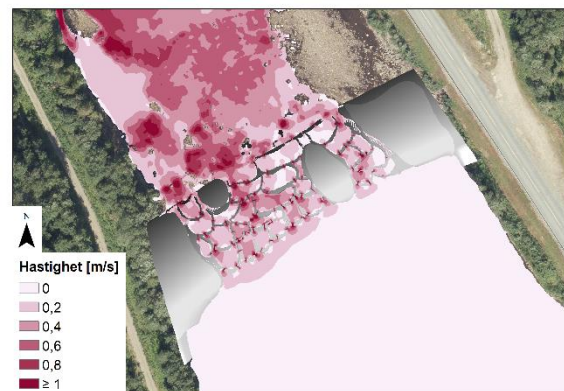


**Figur 53: Hastighetsfordeling for høy celleterskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 54 viser at alt vannet renner gjennom celleterskelen, og at alle cellene i celleterskel 22 er vannfylte. Dybden i nesten alle cellene er rundt 0,25 m, og det er lite vann mellom cellene. Figur 55 viser at hastigheten i cellene varierer fra stillestående til rundt 0,6 m/s. Mange av passasjene er synlige på figuren fordi de har høyere hastighet.

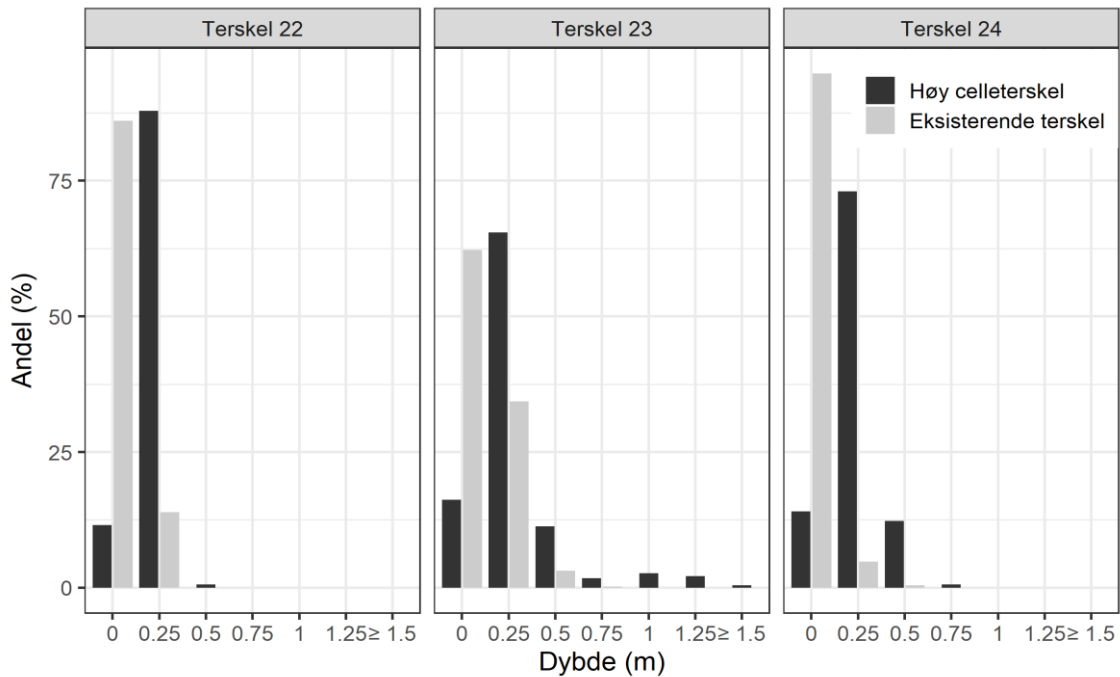


**Figur 54: Dybdefordeling for høy celleterskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



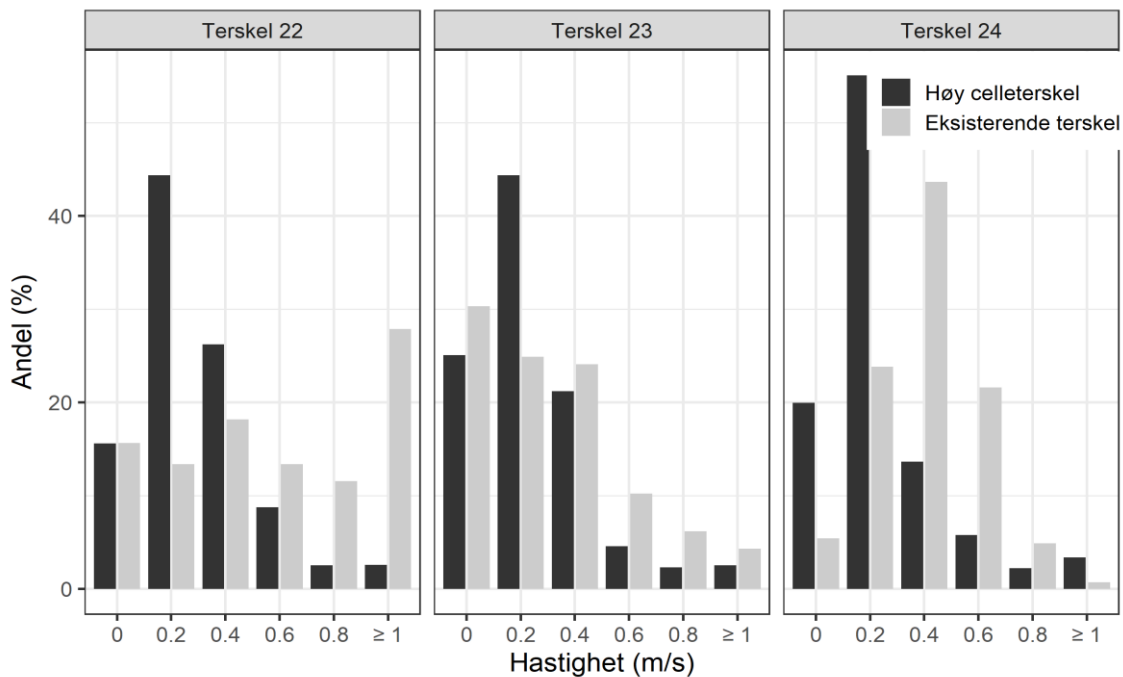
**Figur 55: Hastighetsfordeling for høy celleterskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 56 viser at for alle de høye celletersklene er det dybden 0,25 m som dominerer. Dette er et viktig skifte fra de eksisterende tersklene, der vannstander rundt 0 dominerte. For terskel 23 er det noen veldig dype områder som bidrar til å trekke opp gjennomsnittsdybden. Disse skyldes trolig at deler av kulpen nedstrøms er inkludert i resultatene for terskelen. For de andre tersklene er det ikke dype områder.



**Figur 56: Dybdefordeling i høye celleterskler**

Figur 57 viser at hastigheten over de høye celletersklene er lavere enn for eksisterende terskler, og reduksjonen har vært størst for terskel 22. For alle tersklene utgjør hastigheten 0,2 m/s opptil halvparten, men det er også stillestående områder i cellene.



**Figur 57: Hastighetsfordeling i høye celleterskler**

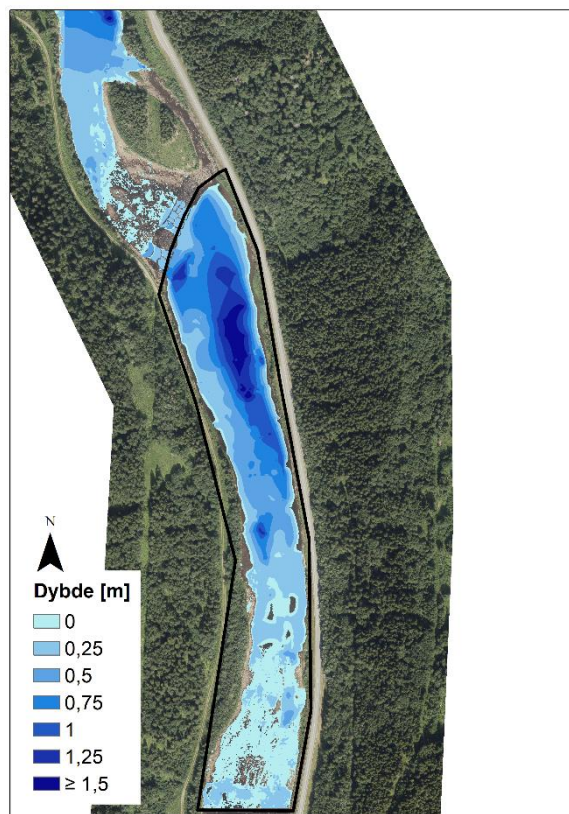
### 4.3.2 Elva

Terskelkrona til celletersklene er plassert på samme sted og med omtrent samme høyde som de eksisterende tersklene. Resultatene for elvestrekningen oppstrøms er derfor omtrent likt. Tabell 11 viser blant annet det vanddekte areal oppstrøms de høye celletersklene, noe som er henholdsvis 94 %, 95 % og 100 % av det vanddekte arealet for eksisterende terreng for terskel 24, 23 og 22.

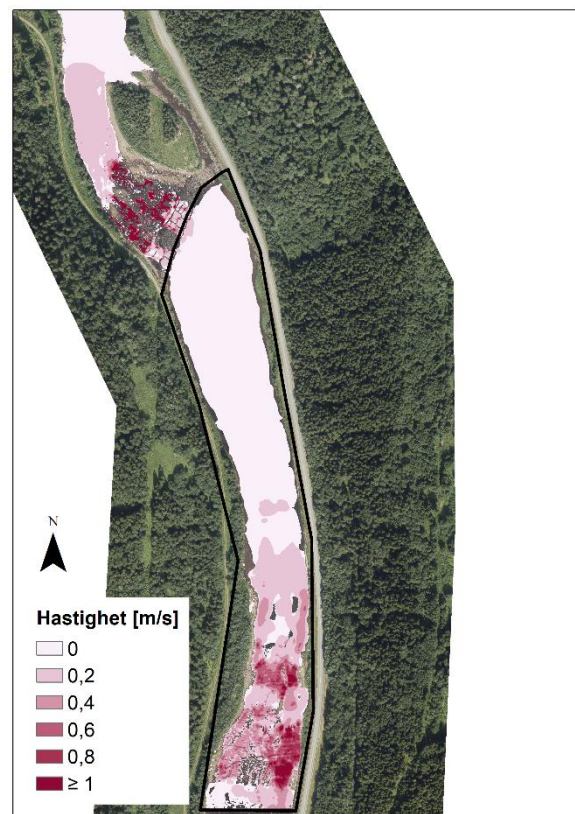
**Tabell 11: Resultater for elva oppstrøms høye celleterskler**

	Vanddekt areal [m <sup>2</sup> ]	Gjennomsnittsdypde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Elvestrekning 24	43 956	0,46	0,14
Elvestrekning 23	56 750	0,68	0,10
Elvestrekning 22	65 129	0,60	0,05

I elvestrekning 24 reduseres det vanddekte arealet med 6 %, noe som skyldes at terskelbassenget reduseres noe, Figur 58. De to tørre områdene en tredjedel fra bunnen er for eksempel vanddekte med dagens terskler. Figur 59 viser at det er mer bevegelse i elvestrekningen, som i et område med hastighet 0,2 m/s nord for øyene, der det er stillestående terskelbasseng med eksisterende terskel.

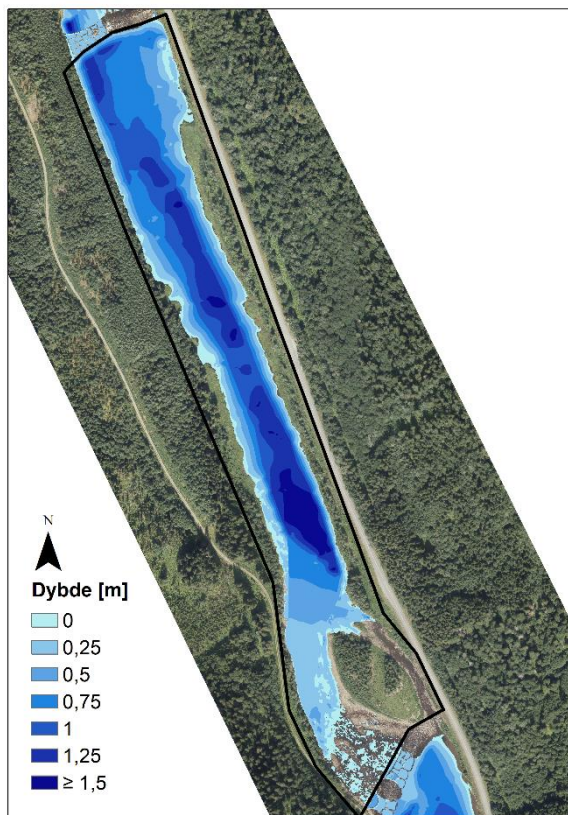


**Figur 58: Dybdefordeling oppstrøms høy celleterskel 24 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

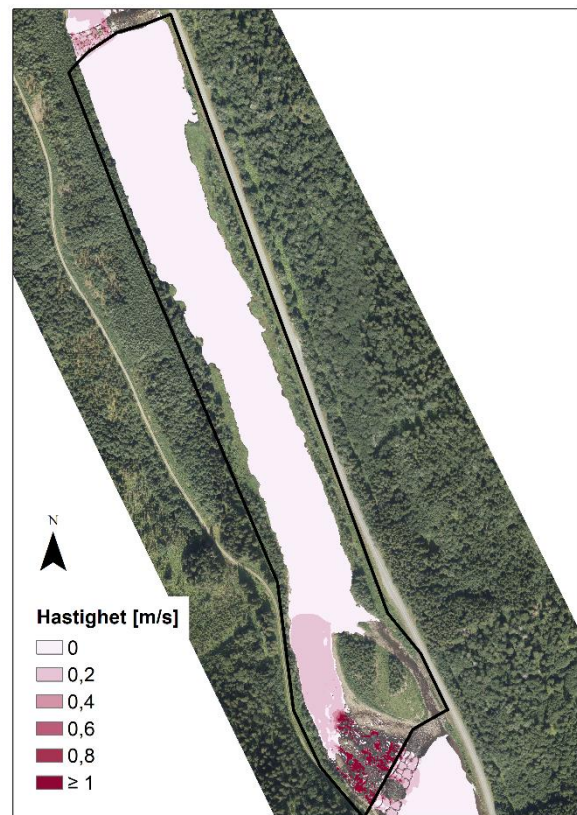


**Figur 59: Hastighetsfordeling oppstrøms høy celleterskel 24 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 61 viser at i elvestrekning 23 går overgangen mellom terskelbasseng og stryk rett nord for øya, hvor elveløpene samles. Det er samme sted som for eksisterende terreng. Figur 60 viser også samme dyp for terskelbassenget. Reduksjonen på 5 % av vanddekt areal skyldes trolig at vannstrømmen er mer samlet ned fra terskel 24.

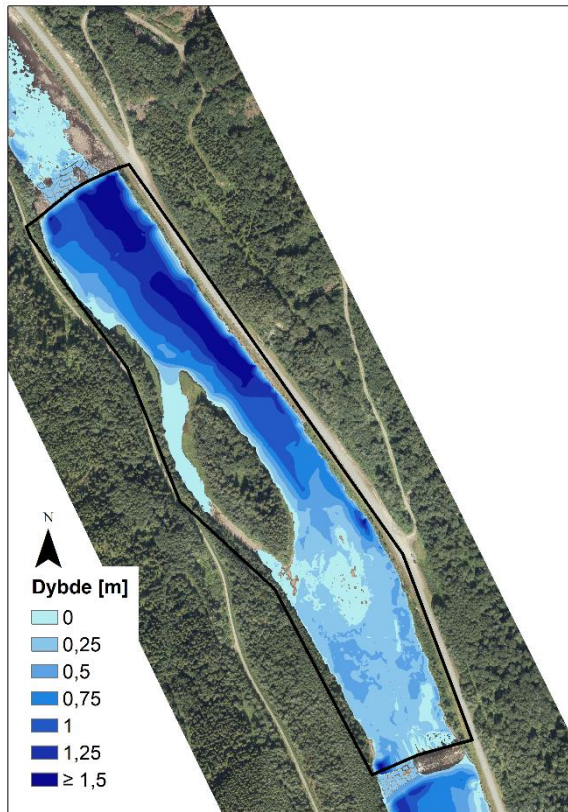


**Figur 60: Dybdefordeling oppstrøms høy cellederskel 23 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

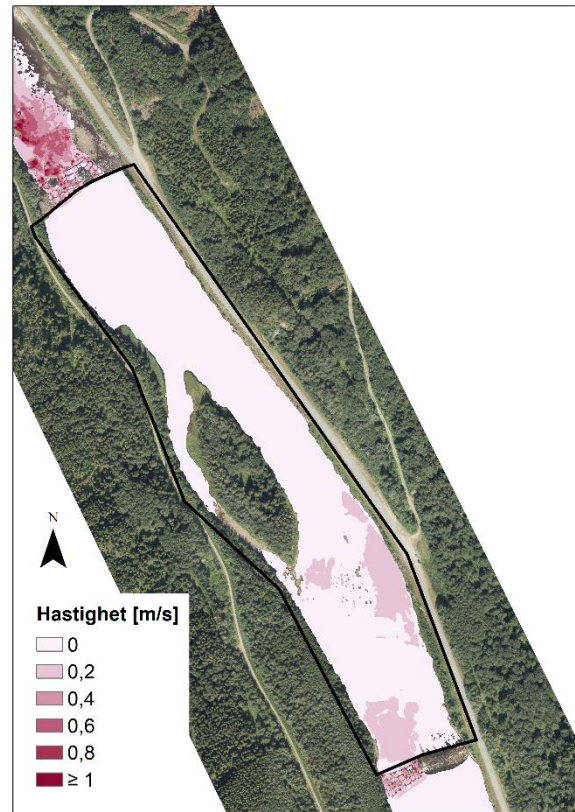


**Figur 61: Hastighetsfordeling oppstrøms høy cellederskel 23 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

For elvestrekning 22 er det vanddekte arealet, dybden (Figur 62) og hastigheten (Figur 63) tilnærma likt eksisterende situasjon. Endringa av vannstrøm over terskel 23 gir ikke effekt på elvestrekning 22 fordi terskelbassenget går helt opp til terskel 23 og uansett er stillestående.

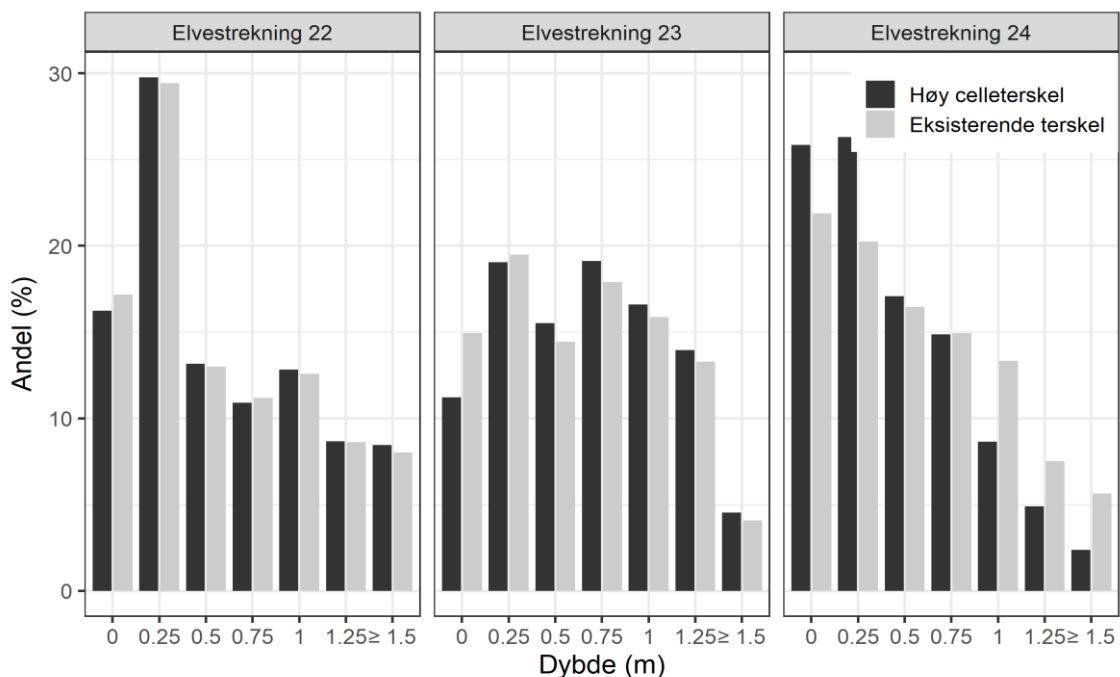


**Figur 62: Dybdefordeling oppstrøms høy celleterrskel 22 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



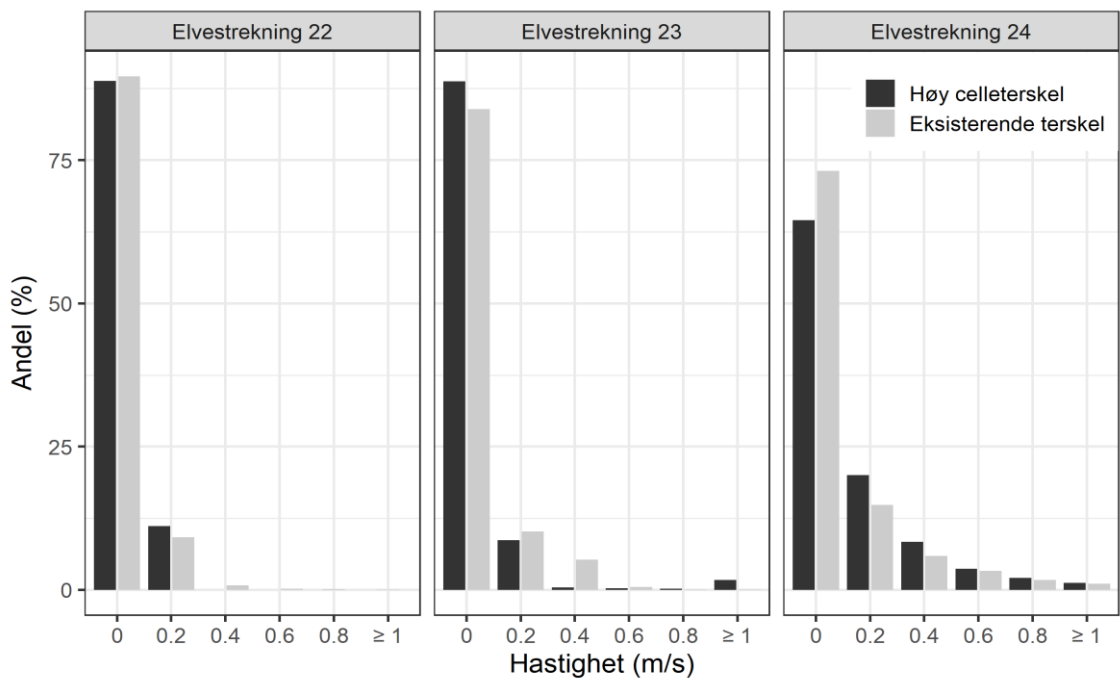
**Figur 63: Hastighetsfordeling oppstrøms høy celleterrskel 22 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 64 viser at for elvestrekning 22 og 23 er det kun små forskjeller i dybdefordelinga mellom høy celleterrskel og eksisterende terreng. For terskel 24 har den høye celleterrsken litt mindre oppdemningseffekt enn eksisterende terskel, noe som gir et lite skifte mot grunnere vann.



**Figur 64: Dybdefordeling oppstrøms høye celleterskler**

Figur 65 viser at for elvestrekning 22 er det en veldig liten økning i hastighet. Dette skyldes trolig at selv om strømmen ned fra terskel 23 er tregere, så skaper den bevegelse over et større område enn dagens. Gjennomsnittshastigheten er likevel den samme, 0,05 m/s. For elvestrekning 23 har andelen med hastighet over 1 m/s økt. Dette skyldes trolig den mer konsentrerte strømmen ned fra terskel 24, der vannhastigheten er middels for den eksisterende terskelen, og høy for celleterskelen. For elvestrekning 24 har terskelbassenget blitt redusert litt, noe som gir litt raskere hastigheter.



**Figur 65: Hastighetsfordeling oppstrøms høye celleterskler**

### 4.3.3 Diskusjon

Målet med denne utforminga var å lage en løsning som forbedrer fiskepassasjen, men bevarer terskelbassengene slik de er i dag. De høye celletersklene 22 og 23 ga samme terskelbasseng som de eksisterende tersklene, men for terskel 24 ble det litt redusert. Det skyldes trolig at høyden til terskelkrona er for lav, noe som enkelt kan justeres. Til tross for det så er terskelbassenget relativt likt og gir hovedsakelig de samme forholdene som dagens terskelbasseng.

I alle de høye celletersklene skapes en relativt sammenhengende vannflate med rundt 25 cm dyp, så ørreten bør kunne passere dem. Cellene er skilt fra hverandre av stein som er omtrent 1 m bred. De kan bygges med hulrom mellom noen av steinene slik at det dannes skjul som kan benyttes til oppholdsplasser av mindre fisk (Forseth og Harby, 2013).

De to celleområdene i hovedløpet til terskel 24 fordeler vannet utover strykområdet nedstrøms, slik at det er vannfylt. Sideløpet vil tas i bruk ved høyere vannføringer, for eksempel 10 m<sup>3</sup>/s i avsnitt 4.6.3.

Terskelbasseng 22 går helt opp til terskel 23, så terskel 23 fremstår som et brudd i den sammenhengende vannflaten. Det kunne derfor vært bedre å plassere en bredere celleterskel midt i elva slik at vannflaten ser mer sammenhengende ut. Likevel, så vil den valgte plassering av celleterskelen passe godt dersom terskelbasseng 22 reduseres, siden vannstrømmen nedstrøms naturlig samles på venstre side av elva.

Utforminga av høy celleterskel 22 med kulper og øyer og plassering i forhold til grusbanken og stryket nedstrøms gjør at den glir veldig naturlig inn i terrenget.

Siden denne løsningen kun forbedrer vandring, vil det ikke være en aktuell løsning for terskel 22, som i dag vurderes som relativt grei for fisk å passere (Bjølstad *et al.*, 2014). For terskel 23 og 24, som vurderes som relativt vanskelig og vanskelig for fisk å passere, kan dette være et aktuelt alternativ.



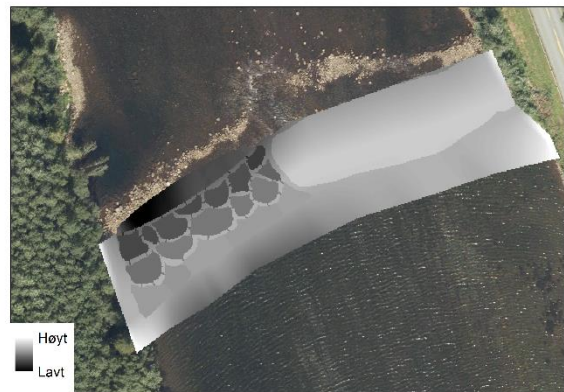
## 4.4 Lave celleterskler

### 4.4.1 Tersklene

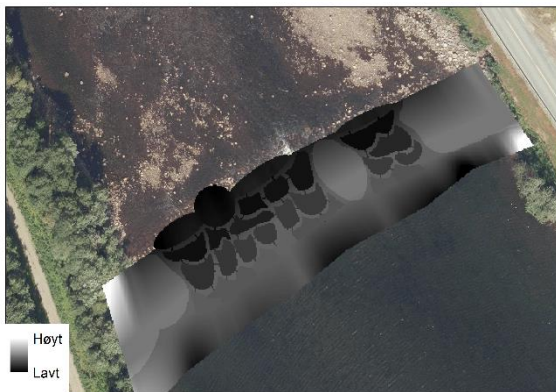
Figur 66 viser utforminga til lav celleterskel 24. Celleterskelen består av to områder med celler i hovedløpet som er skilt av et forhøyet område, plassert omtrent likt som den høye celleterskelen. Celleområdet er 52 m av terskelens totale 130 m. Det totale cellearealet er 427 m<sup>2</sup>, og fordelt på to rader med celler. Terskelen er lavere oppstrøms sideløpet, slik at det kan tas i bruk ved høyere vannføringer. Figur 67 viser utforminga til lav celleterskel 23. Celleområdet er plassert på samme sted som den høye celleterskelen, og består av to rader med celler. Celleområdet er 42 m av terskelens totale 100 m. Det totale cellearealet er 336 m<sup>2</sup>. Figur 68 viser utforminga til lav celleterskel 22. Celleterskelen består av to rader med celler med et totalt celleareal på 451 m<sup>2</sup>. Den er basert på øvre del av den høye celleterskelen, har derfor et omtrent like langt celleområde, 50 m.



**Figur 66: Lav celleterskel 24**



**Figur 67: Lav celleterskel 23**



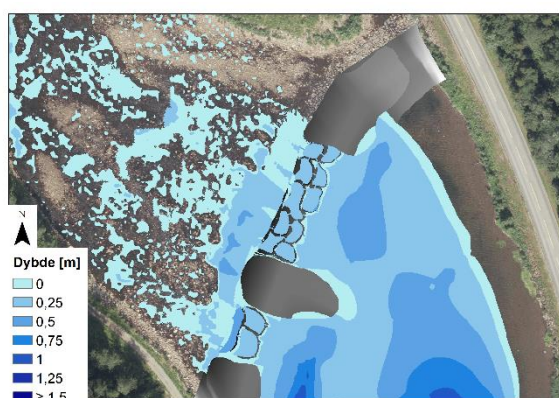
**Figur 68: Lav celleterskel 22**

Tabell 12 viser at det vanddekte arealet for de lave celletersklene er omtrent fra 600 til 700 m<sup>2</sup>. Gjennomsnittsdypden varierer fra 19 cm til 21 cm for de ulike tersklene, noe som er omtrent den teoretiske på 2 til 25 cm (se avsnitt 3.5.1). Gjennomsnittshastighetene er fra 0,26 til 0,29 m/s.

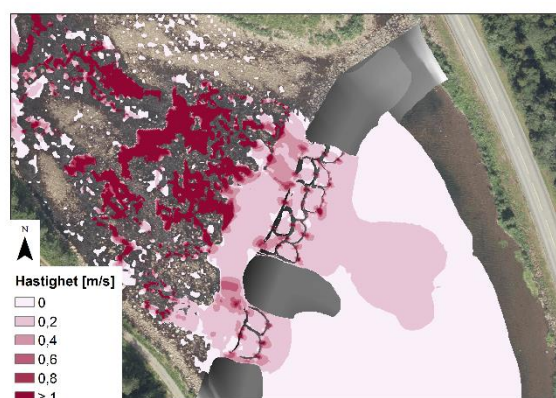
**Tabell 12: Resultater for lave celleterskler**

	Vanddekt areal [m]	Gjennomsnittsdypde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Terskel 24	649	0,21	0,26
Terskel 23	597	0,22	0,29
Terskel 22	704	0,19	0,28

Figur 69 viser at alt vannet renner gjennom celleterskel 24, og at alle cellene er vannfylte. Dybden i cellene er rundt 0,25 m. Figur 70 viser at hastigheten i cellene stort sett er rundt 0,2 m/s, og at hastigheten er høy i de fleste passasjene mellom cellene. Denne terskelutforminga er kortere enn terskelstatninga, så siden nedstrøms ende for fjerning av terskelen ble lagt til et lavbrekk, dannes det en grunn kulp nedstrøms terskelen

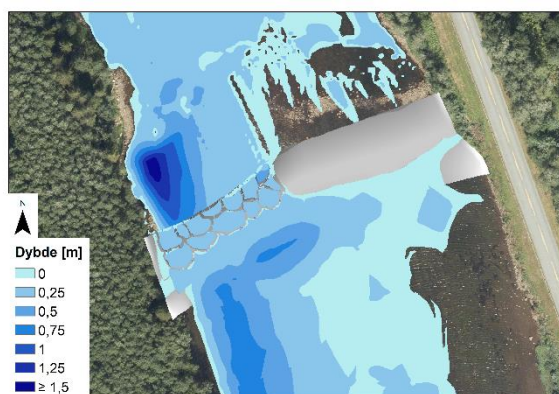


**Figur 69: Dybdefordeling for lav celleterskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

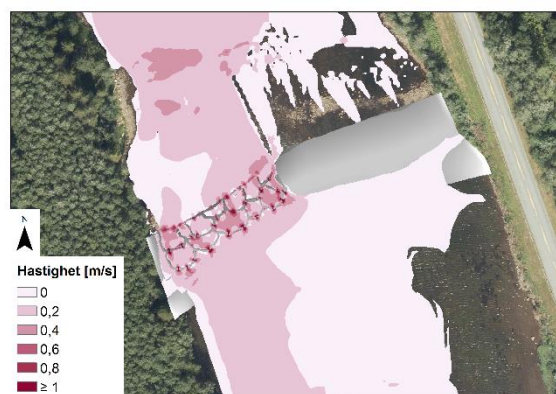


**Figur 70: Hastighetsfordeling for lav celleterskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 71 viser at alt vannet renner gjennom celleterskel 23, og at alle kulpene er vannfylte. De fleste kulpene har et vanddyb på rundt 0,25 m. Figur 72 viser at hastigheten i kulpene varierer mellom 0,2 og 0,4 m/s, og at den er høyere gjennom passasjene. Plasseringa av celleterskelen til venstre i elva ser mer naturlig ut for den lave celleterskelen enn for den høye side terskelbassenget oppstrøms terskel 22 er redusert.

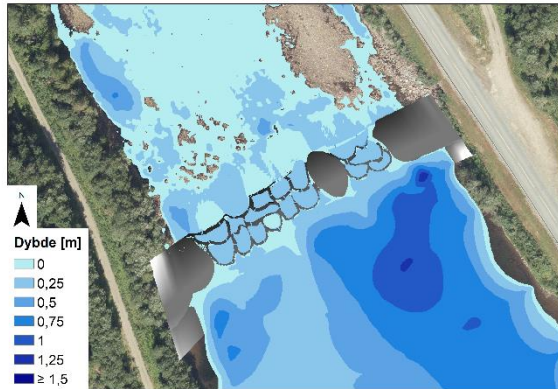


**Figur 71: Dybdefordeling for lav celleterskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

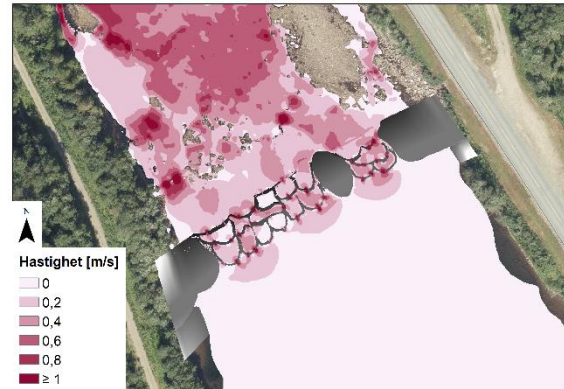


**Figur 72: Hastighetsfordeling for lav celleterskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 73 viser at alt vannet renner gjennom celleterskelen, og at alle cellene er vannfylte. Vanddybden i de fleste cellene er rundt 0,25 m. I likhet med lav celleterskel 24, så dannes det en grunn kulp nedstrøms terskelen fordi terskelen er kortere enn terskelerstatninga. Figur 74 viser at i likhet med høy celleterskel 22, så varierer hastigheten på vannet i cellene mellom 0 og 0,4 m/s. Mange av passasjene har høy hastighet, men de som går til eller fra stillestående celler har lav hastighet.

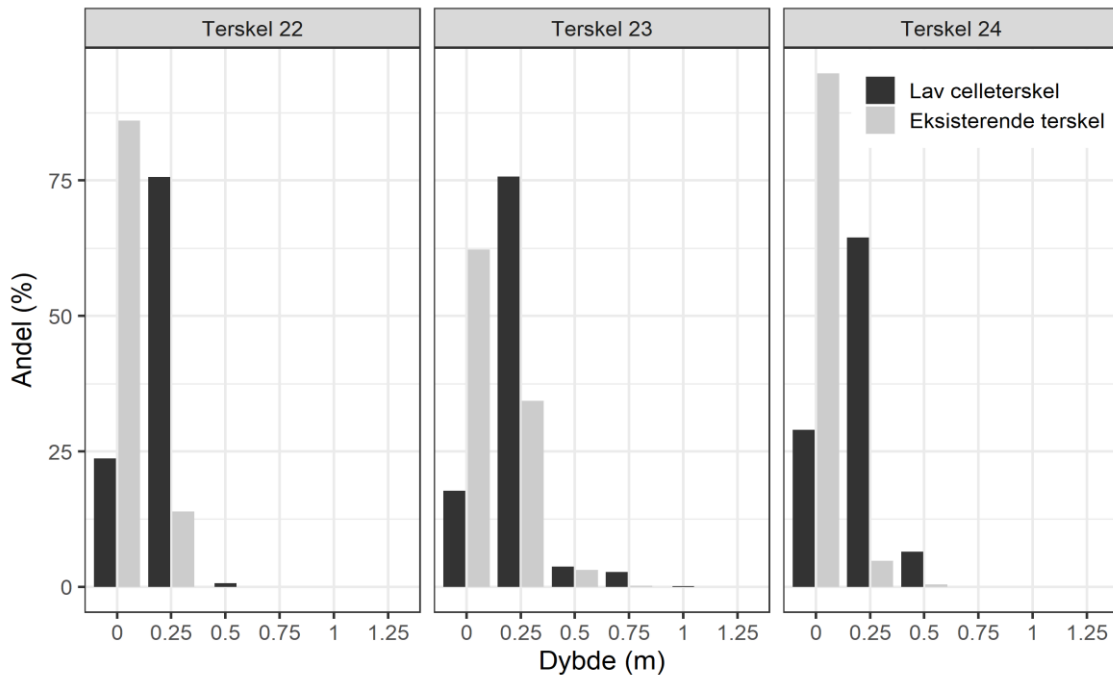


**Figur 73: Dybdefordeling for lav celleterskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



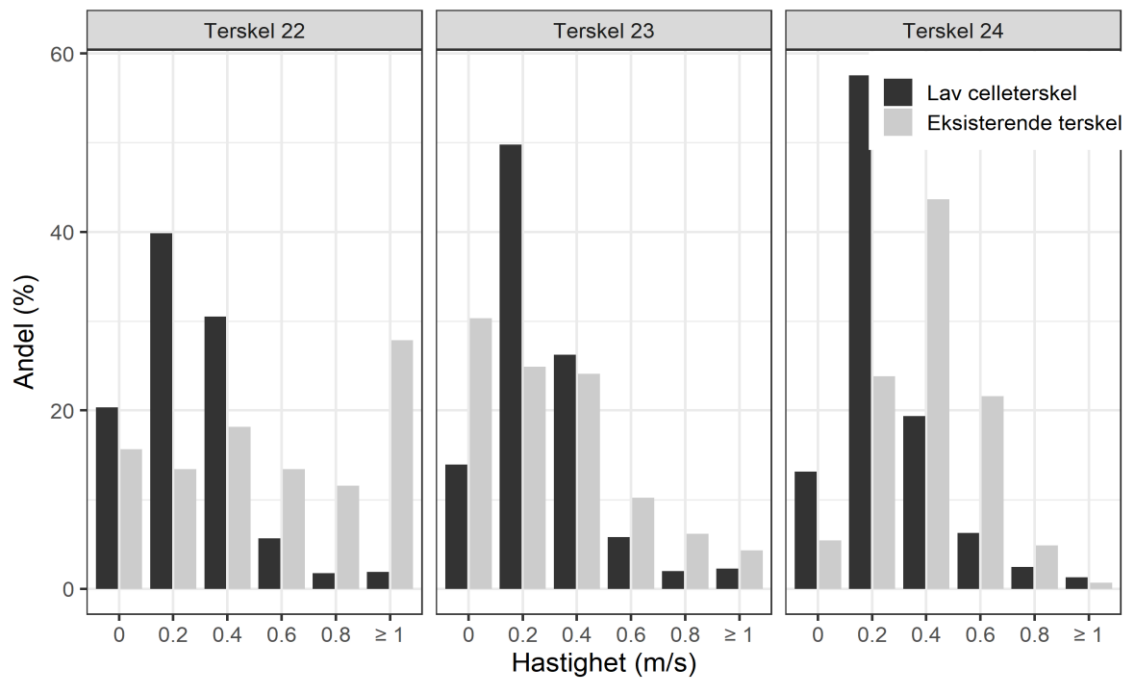
**Figur 74: Hastighetsfordeling for lav celleterskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 75 viser at 0,25 m er den dominerende dybden for alle tersklene, noe som er naturlig siden det er dybden på cellene. Alle tersklene har større vannstand enn de eksisterende tersklene.



**Figur 75: Dybdefordeling for lave celleterskler**

Figur 76 viser at 0,2 m/s er den dominerende hastigheten for alle tersklene, og at hastigheten har gått ned i forhold til eksisterende terskler. Hastighetsfordelinga er nokså lik de høye celletersklene.



**Figur 76: Hastighetsfordeling i lave celleterskler**

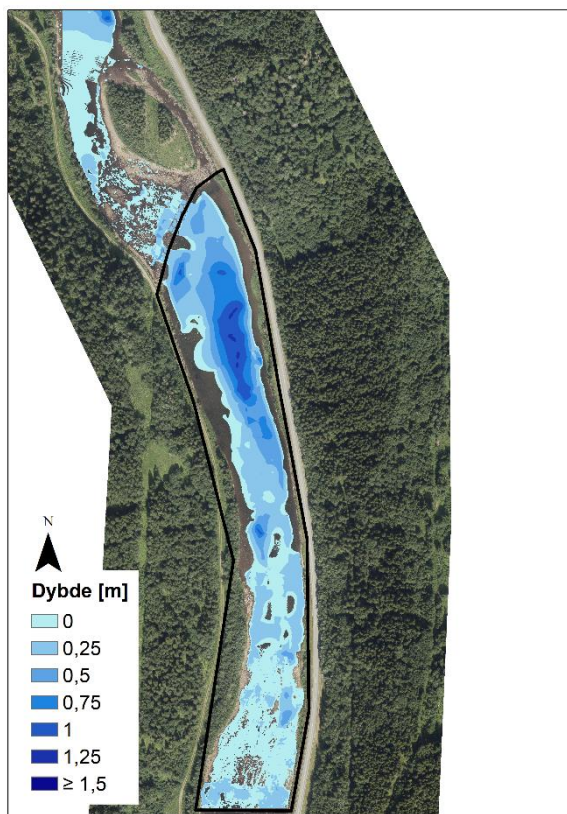
#### 4.4.2 Elva

Tersklene er omtrent halvparten så høye som dagens terskler, noe som gjør at det vanddekte arealet reduseres til rundt 40 000 m<sup>2</sup>, se Tabell 13. Samtidig reduseres dybden, mens hastigheten øker i alle elvestrekningene.

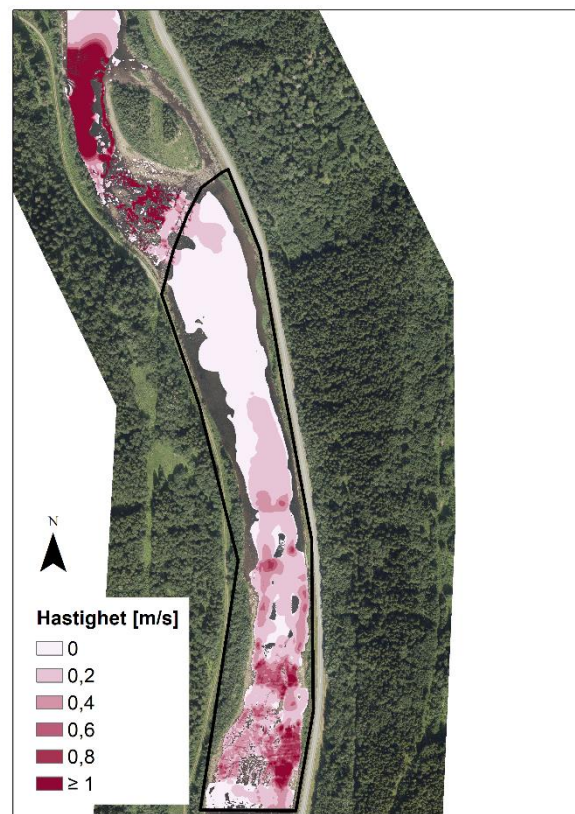
**Tabell 13: Resultater for elva oppstrøms lave celleterskler**

	Vanddekt areal [m <sup>2</sup> ]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Elvestrekning 24	38 327	0,28	0,20
Elvestrekning 23	41 747	0,40	0,42
Elvestrekning 22	47 524	0,33	0,12

I elvestrekning 24 reduseres det vanddekte arealet til 82 %, noe som skyldes at terskelbassenget blir smalere og grusbanker tørrelegges i øvre del, se Figur 77. Det dype området i terskelbassenget bevares likevel. Figur 78 viser at det dannes et stillestående terskelbasseng i nedre tredjedel av elvestrekningen, men at vannhastigheten øker midt i elvestrekningen, der det ikke lenger er terskelbasseng.

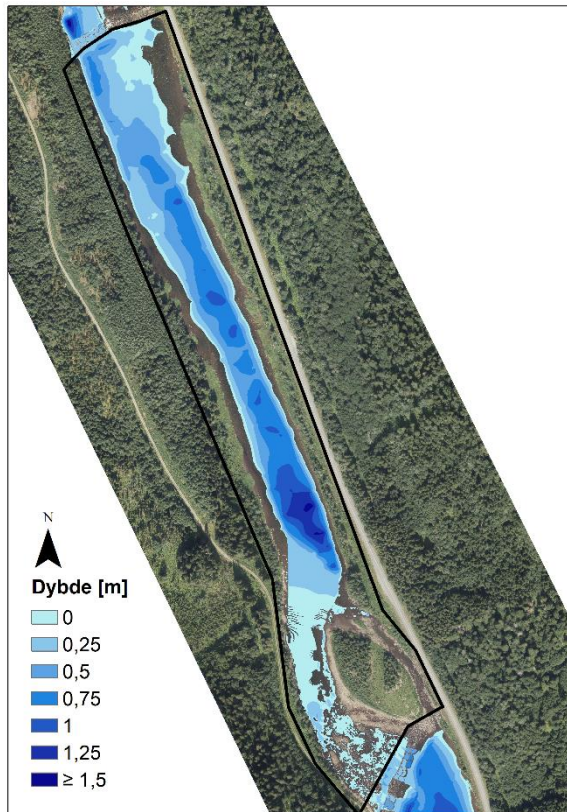


**Figur 77: Dybdefordeling oppstrøms lav celleterskel 24 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 78: Hastighetsfordeling oppstrøms lav celleterskel 24 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

I elvestrekning 23 gir denne terskelutforminga et lite terskelbasseng rett oppstrøms terskelen, og ellers en smalere elv, se Figur 79. Samtidig renner vannet relativt samlet ned fra terskel 24, noe som totalt gir omtrent samme vanddekt areal som terrenget uten terskler. Også hastighetsfordelinga, se Figur 80, er relativt lik terrenget uten terskler.

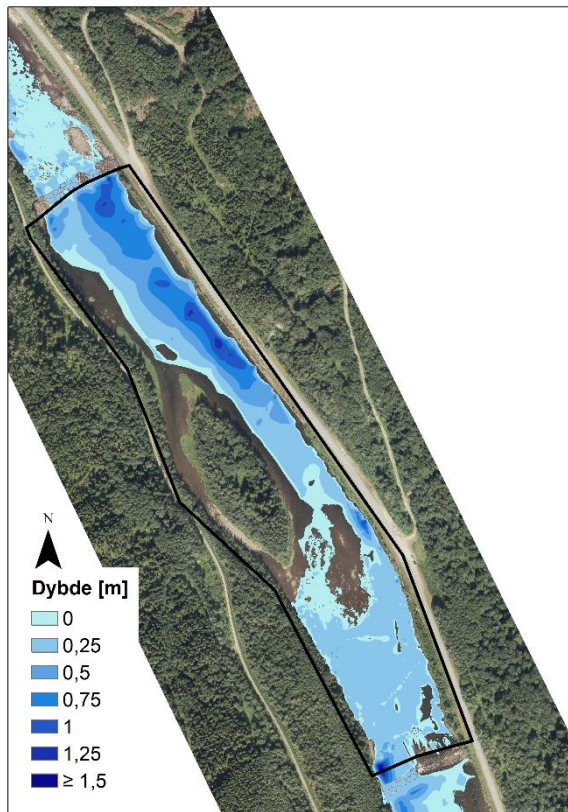


**Figur 79: Dybdefordeling oppstrøms lav celleterstel 23 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

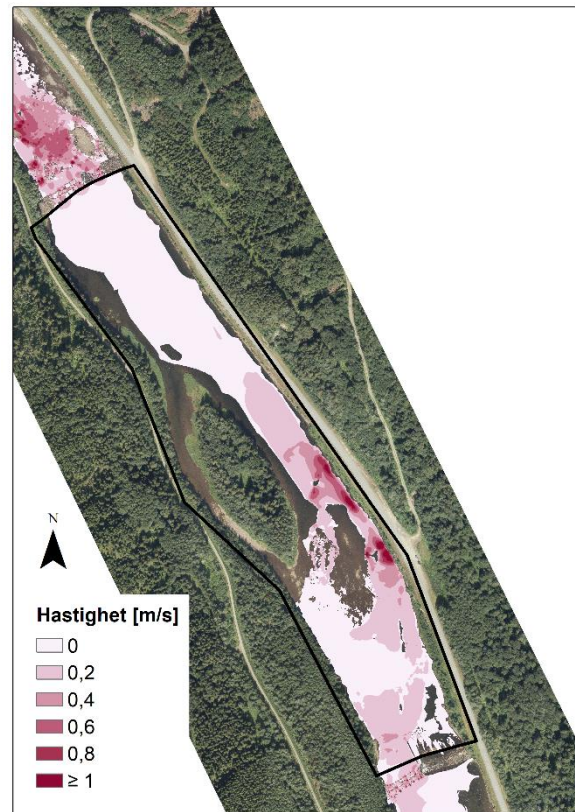


**Figur 80: Hastighetsfordeling oppstrøms lav celleterstel 23 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

I elvestrekning 22 reduseres det vanddekte arealet til 73 % av dagens. Sideløpet ligger helt tørt sammen med deler av venstre side av elvestrekningen, se Figur 81. Øvre del av elvestrekningen er rundt 0,25 m dypt, i likhet med terrenget uten terskler. Samtidig demmes det opp et terskelbasseng som går bort til øya, se Figur 82. Elva har høyere hastighet sør for øya, der en grusbanke fører til at elva blir smalere.

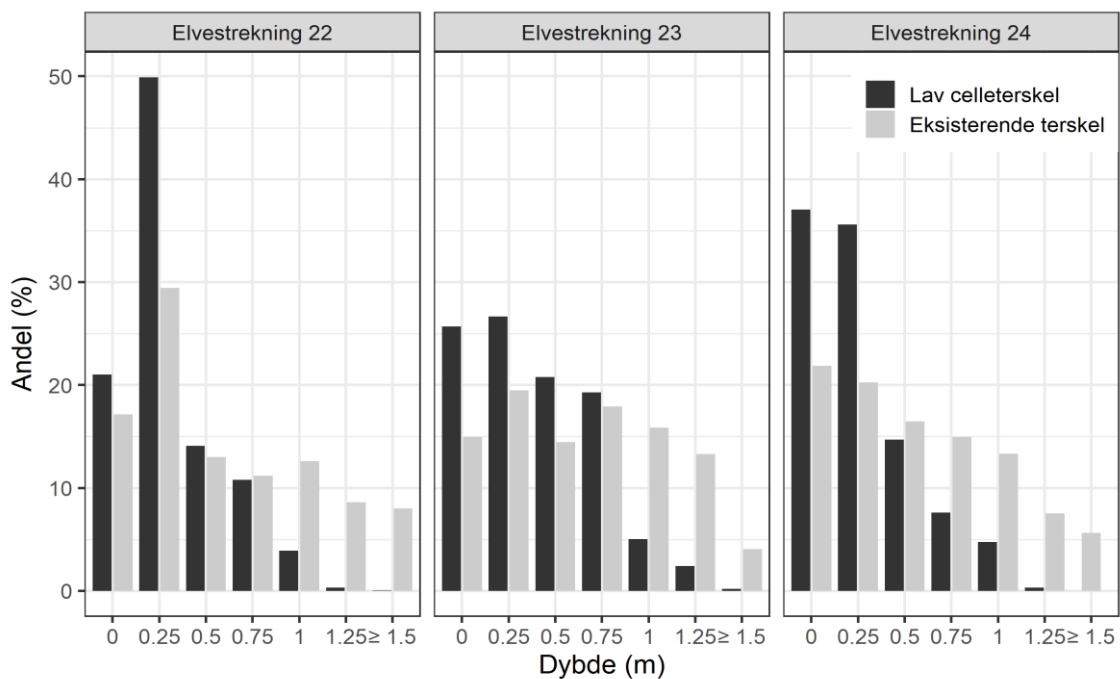


**Figur 81: Dybdefordeling i elvestrekning 22 med lave celleterskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



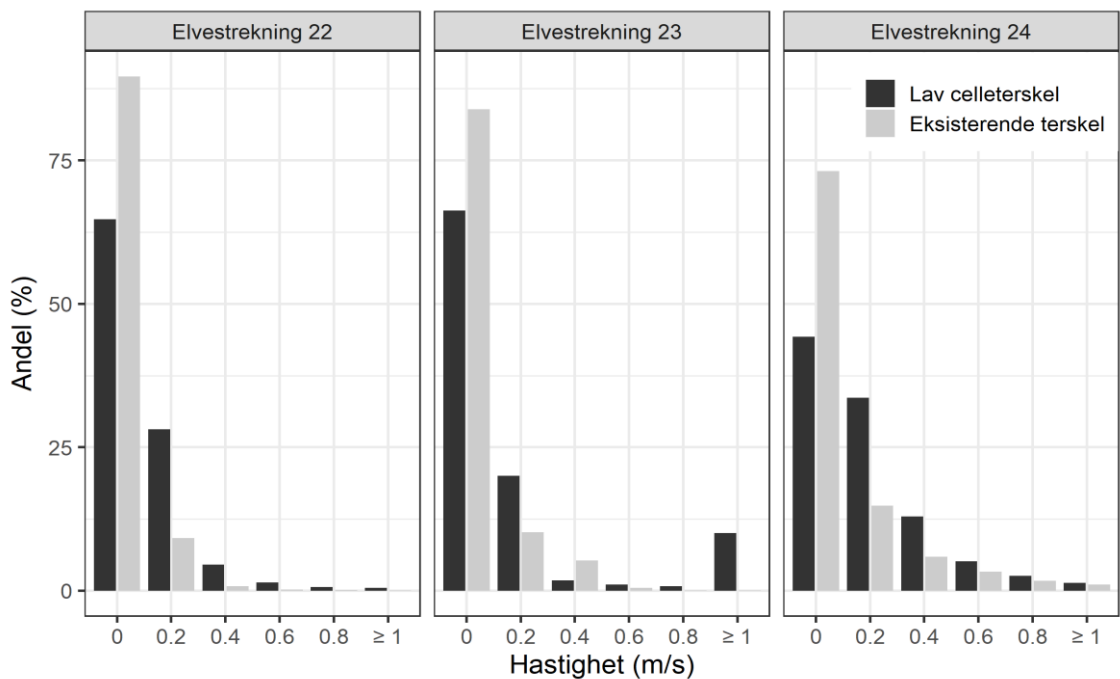
**Figur 82: Hastighetsfordeling i elvestrekning 22 med lave celleterskler for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 83 viser at dybden synker i alle elvestrekningene med lave celleterskler sammenlignet med eksisterende terskler. I terskelbasseng 22 er 71 % rundt 0,25 m eller lavere, men noen områder er fremdeles ned mot 1,25 m dype. I terskelbasseng 23 er endringen minst i forhold til eksisterende terreng, der dybdefordelinga er relativt jevn fra 0 til 0,75 m, og med noen områder ned mot 1,5 m. I elvestrekning 24 er 73 % av dybdefordelinga 0 eller 0,25 m, og i likhet med elvestrekning 22 er det noen områder som er ned mot 1,25 m dype.



**Figur 83: Dybdefordeling oppstrøms lave celleterskler**

Figur 84 viser at hastigheten øker i alle elvestrekningene, men at rundt 2/3 fremdeles er tilnærmet stillestående oppstrøms terskel 22 og 23. At nesten 10 % av elvestrekning 23 har en hastighet på 1 m/s eller mer skyldes trolig den mer konsentrerte strømmen nedstrøms terskel 24. I elvestrekning 24 er mindre enn halvparten stillestående.



**Figur 84: Hastighetsfordeling oppstrøms lave celleterskler**



### 4.4.3 Diskusjon

Målet med denne utforminga er å både forbedre fiskepassasjen og redusere det stillestående terskelbassenget. De lave celletersklene kan være et kompromiss mellom ønsket om å redusere terskelbassenget for å forbedre forholdene for ørreten, men samtidig bevare et terskelbasseng som skaper vannspeil i elva og gjør at kan benyttes til andre former for rekreasjon som padling og bading.

De lave celletersklene har omtrent de samme egenskapene som de høye celletersklene, og oppfyller vandringskravene i samme grad. De skaper også mulige oppholdsplasser for fisk på samme måte.

Fordi eksisterende terskel har en større utstrekning enn de lave celletersklene, så er terrenget rett nedstrøms celletersklene det som ble interpolert i forbindelse med terskelfjernainga. Grensa for terskelfjernainga ble plassert i et lavbrekk siden det tydet på at det var der terskeltåa var. Det gjør at det dannes en liten kulp nedstrøms celletersklene. En kulp nedstrøms terskelkonstruksjonen anbefales for å unngå erosjon (Pulg *et al.*, 2018), og kan også gjøre det mulig for stor fisk å passere større høyder. Kulpene kunne vært utformet mer bevisst.

Siden de lave celletersklene er simulert samtidig, gjør reduksjonen av terskelbasseng 22 at plasseringa til celleterskel 23 til venstre i elveløpet virker mer naturlig. Terskelen fremstår mer som en naturlig del av elva, siden elva opp- og nedstrøms terskelen er samlet på venstre side. For terskel 22 og 24, så fremstår den lave celleterskelen som en relativt naturlig overgang mellom stryket nedstrøms og terskelbassenget oppstrøms, siden den skaper inntrykk av en kontinuerlig vannflate.

Lav celleterskel 24 skaper et terskelbasseng som er 82 % av dagens, større enn uten terskel (73 %), noe som gjør at elva ikke ser like smal ut. Denne løsningen kan derfor være et godt kompromiss mellom ønsket om bedret fiskepassasje, redusert terskelbasseng og samtidig et pent vannspeil i elva.

Oppstrøms lav celleterskel 23 dannes det et svært lite terskelbasseng. Det gir derfor få av terskelfordelene, mens terskelulempene som oppdelt sedimenttransport og vedlikeholdsbehov opprettholdes. Det vil derfor trolig være et bedre tiltak å fjerne terskelen.

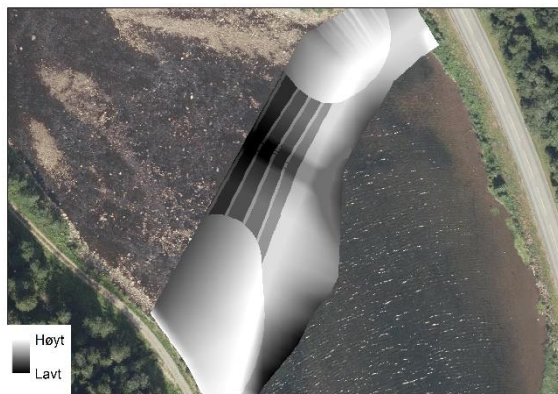
For elvestrekning 22 ser den lave celleterskelen ut til å være et godt kompromiss, siden det dannes et dypt og bredt terskelbasseng i nedre halvdel, mens elva samtidig får strømme fritt i øvre halvdel. Ser bedre ut enn fjerning av terskelen fordi det vanndekte arealet blir redusert i mindre grad, så det estetiske skal vektlegges er dette et bedre alternativ.

## 4.5 Trinnterskler

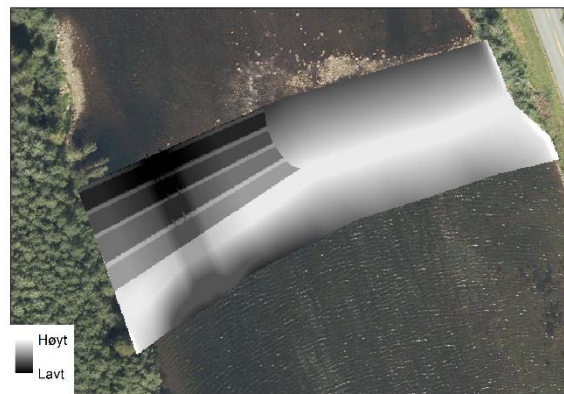
### 4.5.1 Tersklene

Felles for alle utformingene er at bunnen av dypålen er 5 m bred, og 0,5 m dyp. Den smale skråningen går 2 m ut fra hver side og 25 cm opp fra bunnen av dypålen, og den vide skråningen går 10 m ut fra den smale skråningen, og de siste 25 cm opp. Kanten som demmer opp hvert trinn er 0,25 m høy og omtrent 1 m bred.

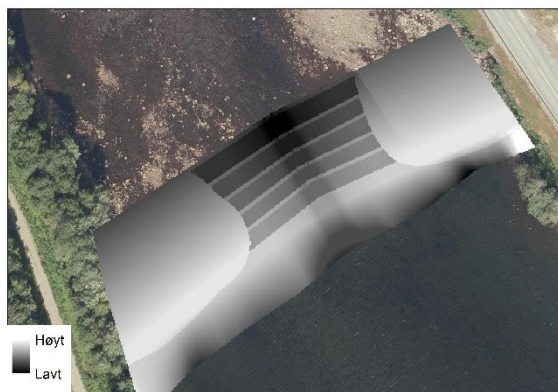
Figur 85 viser utforminga til trinnterskel 24. Hele terskelen er 130 m lang, der trinnene er 4,75 m lange, og 44 m brede. Plasseringa til dypålen omtrent midt på terskelen er tilpasset strømningsmønsteret oppstrøms. Figur 86 viser utforminga til trinnterskel 23, som er plassert på venstre sida av elva, i likhet med celletersklene. Hele terskelen er 100 m, der trinnene er 4 m lange og 48 m brede. Figur 87 viser utforminga til trinnterskel 22, som er plassert midt i elva. Hele terskelen er 100 m, der trinnene er 4,4 m lange og 36 m brede.



**Figur 85: Trinnterskel 24**



**Figur 86: Trinnterskel 23**



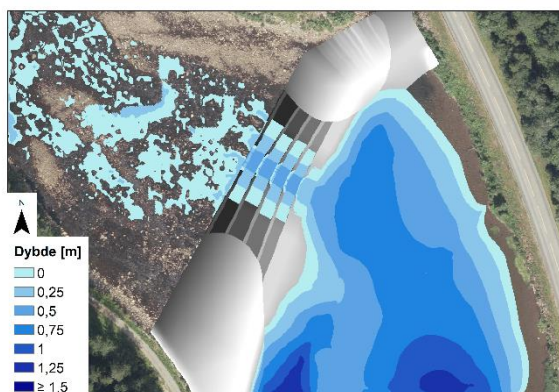
**Figur 87: Trinnterskel 22**

Trinntersklene samler vannet på midten, så de har et lavt vanddekt areal sammenlignet med de andre terskelutformingene, se Tabell 14. Kanten demmer opp inntil 0,25 m på hvert trinn, og gjennomsnittsdybden for de ulike tersklene er rundt 0,2 m. Gjennomsnittshastigheten varierer mellom 0,28 og 0,41 m/s.

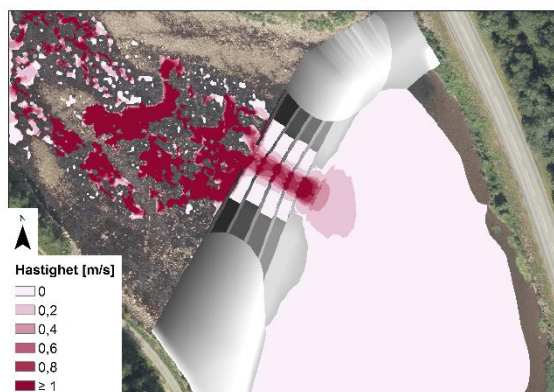
**Tabell 14: Resultater for trinnterskler**

	Vanddekt areal [m <sup>2</sup> ]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Terskel 24	413	0,20	0,41
Terskel 23	644	0,23	0,28
Terskel 22	601	0,20	0,30

Figur 88 viser at alt vannet samles i dypålen i trinnterskel 24, og nesten 10 m ut på hver side av dypålen. Figur 89 viser at hastigheten er høy gjennom dypålen, men rolig ut i skråningen. Hastigheten er også høyere fra terskelbassenget og inn i dypålen, siden strømminga er konsentrert gjennom trinnterskelen.

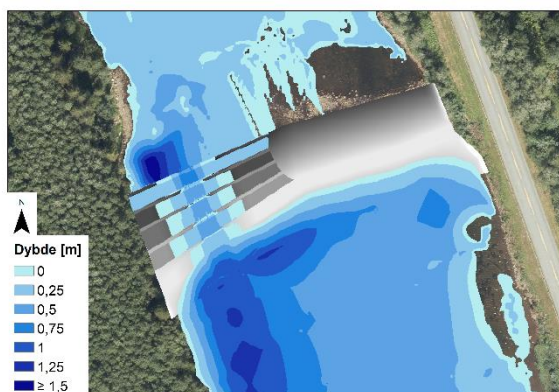


**Figur 88: Dybdefordeling for trinnterskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

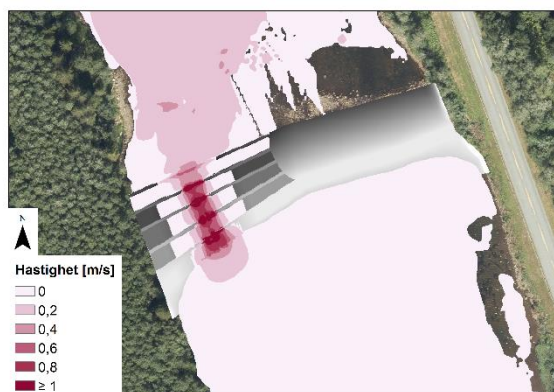


**Figur 89: Hastighetsfordeling for trinnterskel 24 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

For trinnterskel 23 viser Figur 90 at all vannstrømmen foregår i dypålen, og nesten 10 m ut på hver side av dypålen for de øverste tre trinnene. Fordi elva nedstrøms terskelen er flat er 20 m av den nederste kanten er vanddekt noe som fører til at det nederste trinnet er fylt med vann. Figur 91 viser at hastigheten er høy gjennom dypålen, men stillestående ute i skråningene.

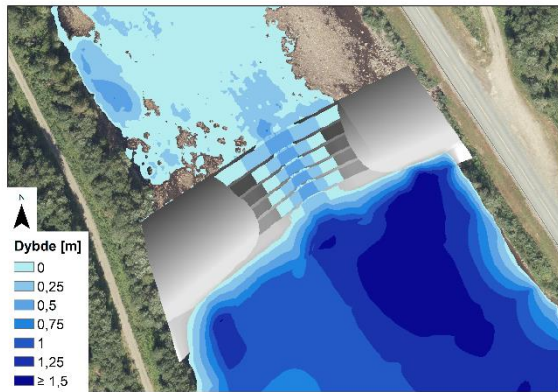


**Figur 90: Dybdefordeling for trinnterskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

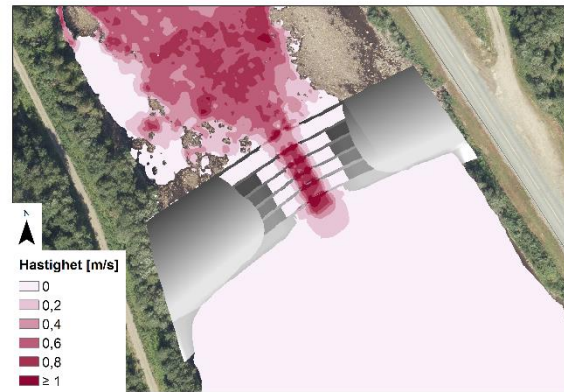


**Figur 91: Hastighetsfordeling for trinnterskel 23 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

For trinnerskel 22 ser resultatene veldig like ut som trinnerskel 23. Figur 92 viser at alt vannet samles i dypålen, og nesten 10 m ut på hver side av dypålen og at det nederste trinnet er helt fylt. Figur 93 viser at vannhastigheten er høy gjennom dypålen og rolig på sidene.

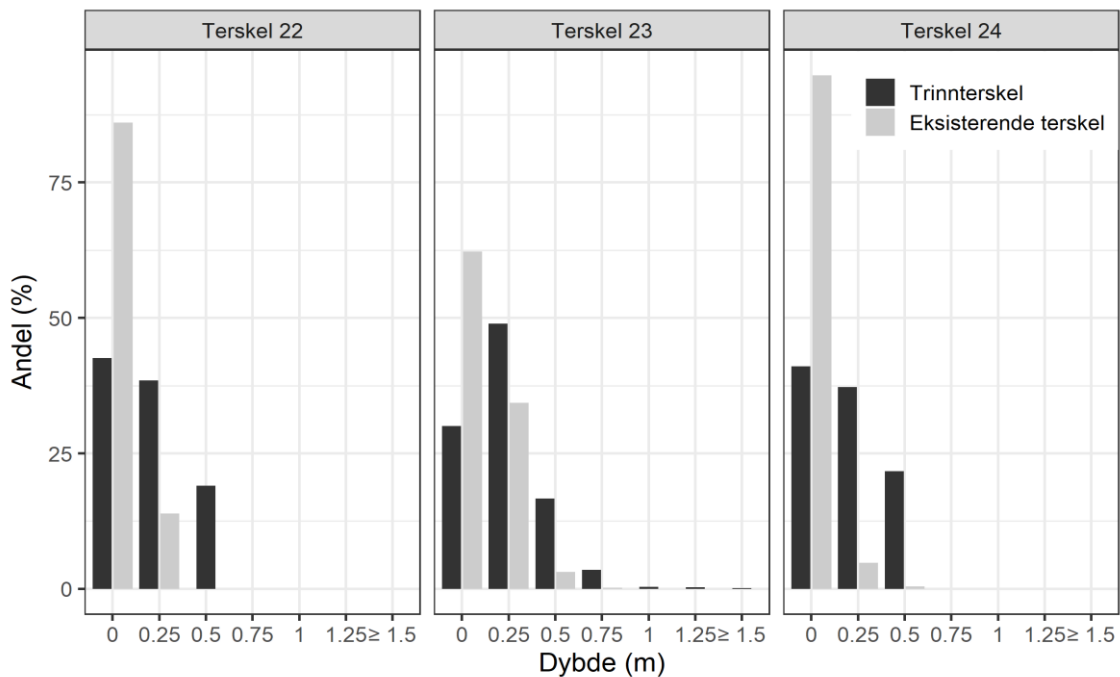


**Figur 92: Dybdefordeling for trinnerskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



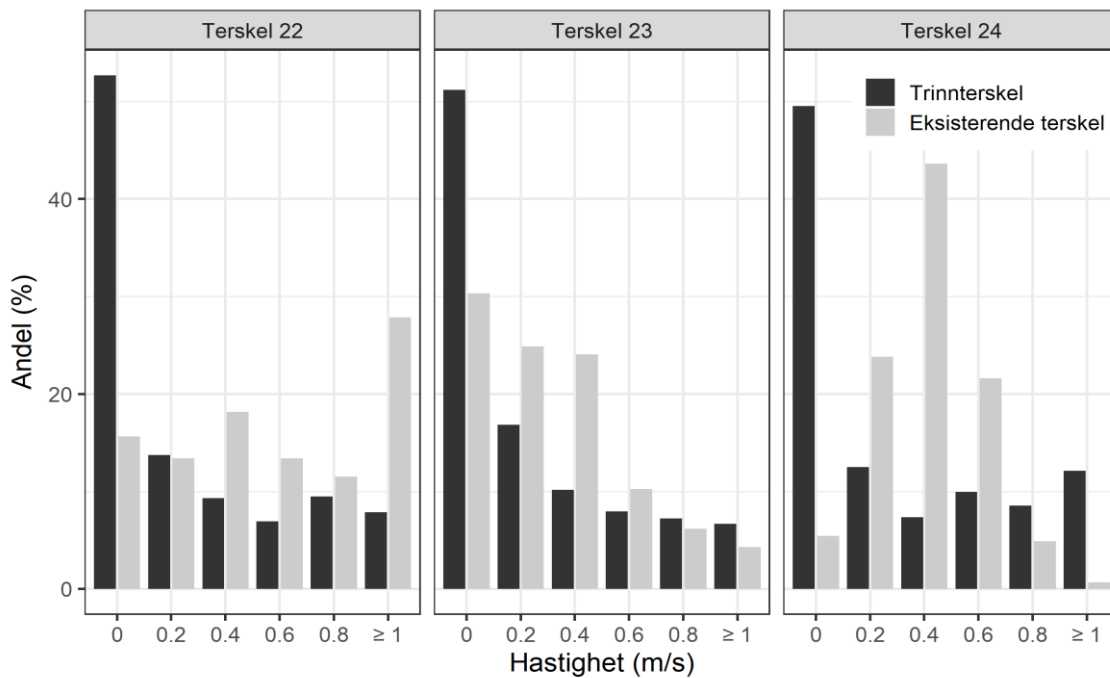
**Figur 93: Hastighetsfordeling for trinnerskel 22 ved vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

Figur 94 viser at mesteparten av dybden i trinnerskelen fordeles seg relativt jevnt mellom rundt 0 og 0,25 m. For terskel 22 og terskel 24, hvor vannet er veldig grunt over eksisterende terskler, så er dette en klar forbedring. Terskel 23 har noen områder med dybde opptil 0,75 m, og dette skyldes trolig at deler av kulpen nedstrøms er inkludert i resultatene for terskelen.



**Figur 94: Dybdefordeling i trinnerskler**

Figur 95 viser at rundt halvparten av det vanddekte arealet for trinntersklene er nesten stillestående. Dybdefordelingsfigurene over viste at de stillestående områdene er ytterst i skråningene. Ellers fordeler resten av hastigheten seg jevnt utover opp til 1 m/s eller høyere.



**Figur 95: Hastighetsfordeling i trinnterskler**

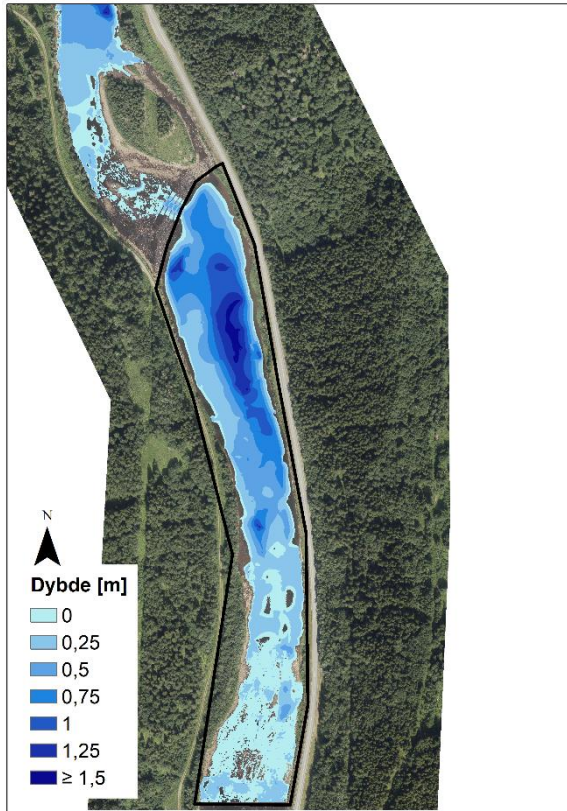
#### 4.5.2 Elva

Terskelkrona til trinnterskelen er plassert på samme sted og med samme høyde som eksisterende terreng, men på grunn av dypålen, så har trinntersklene mindre oppdemmingseffekt. Det vanddekte arealet, se Tabell 15, er rundt 90 % av det eksisterende. Gjennomsnittsdybden er litt lavere, mens gjennomsnittshastigheten er litt høyere.

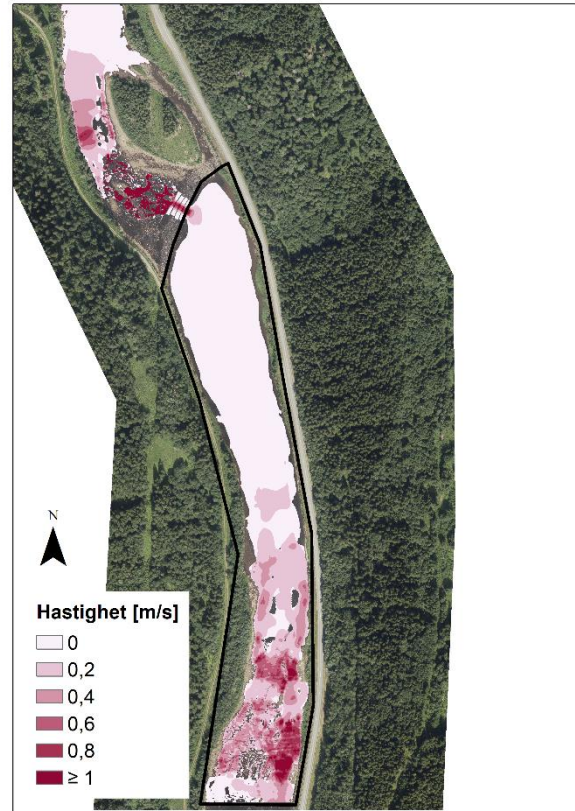
**Tabell 15: Resultater for elva oppstrøms trinnterskler**

	Vanddekt areal [m]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Elvestrekning 24	42 609	0,42	0,16
Elvestrekning 23	51 647	0,62	0,14
Elvestrekning 22	58 139	0,58	0,06

Figur 96 viser at det for trinnerskel 24 demmes opp et relativt stort terskelbasseng, som er 91 % av det eksisterende. Reduksjonen i vanddekt areal er delvis langs elvebreddene, og delvis ved at grusbanker kommer til syne i stryket i øvre del av elvestrekningen. Figur 97 viser at halve elvestrekningen fremdeles er et stillestående terskelbasseng, men at det er en del bevegelse på vannet i stryket i øvre halvdel av elvestrekningen.

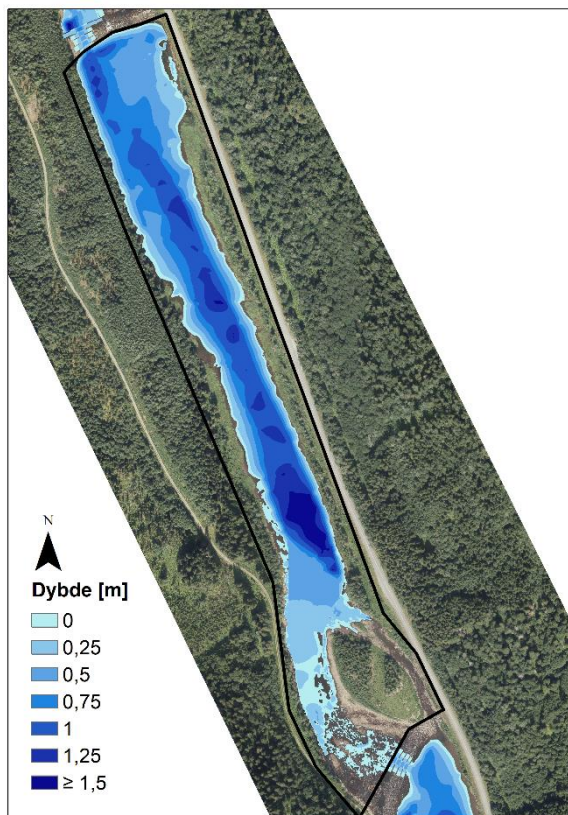


**Figur 96: Dybdefordeling oppstrøms trinnerskel 24 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

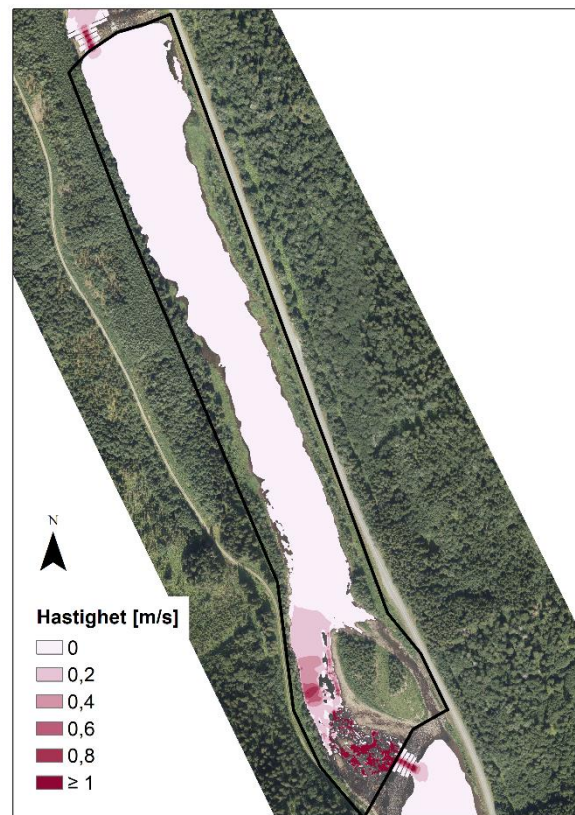


**Figur 97: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnerskel 24 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

For elvestrekning 23 så gir trinnterskelen et vanddekt areal på 86 % av det eksisterende. Det skyldes delvis tørre områder langs elvebreddene og delvis at strømmen ned fra terskel 24 er så konsentrert, se Figur 98. Figur 99 viser at terskelbassenget er stillestående helt frem til øya der elveløpene samles.

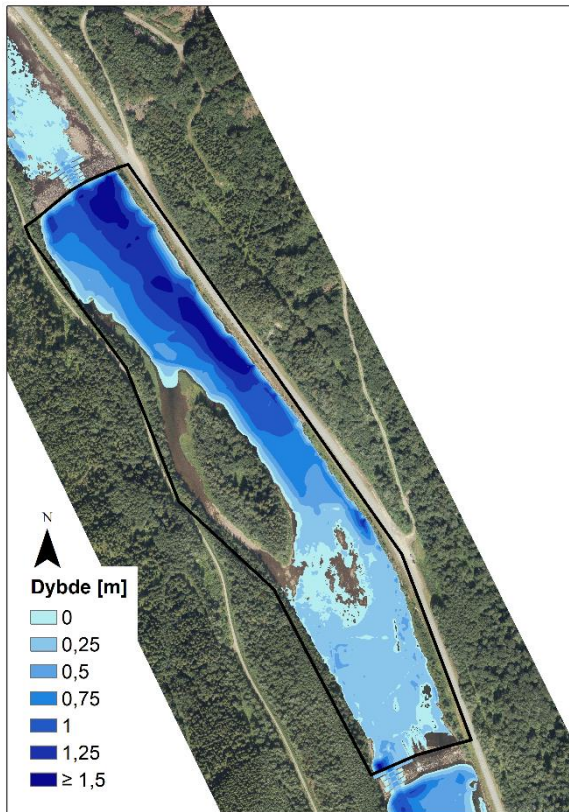


**Figur 98: Dybdefordeling oppstrøms trinnterskel 23 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

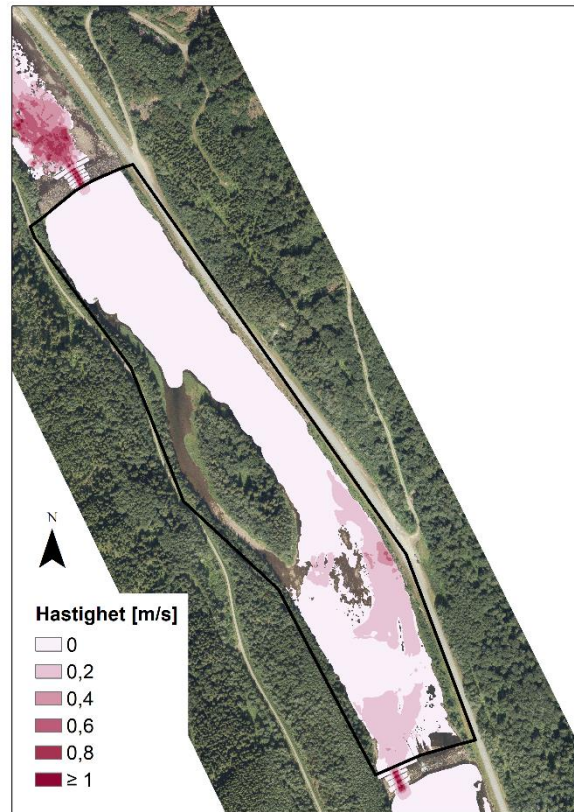


**Figur 99: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnterskel 23 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

I elvestrekning 22 gir trinnterskelen er vanddekt areal som er 90 % av dagens. Det skyldes at sideløpet og en grusbank sørøst for øya ligger tørt, se Figur 100. Figur 101 viser at mesteparten av elvestrekningen er stillestående, med unntak av utløpet fra terskel 23 og i det smale området ved grusbanken.



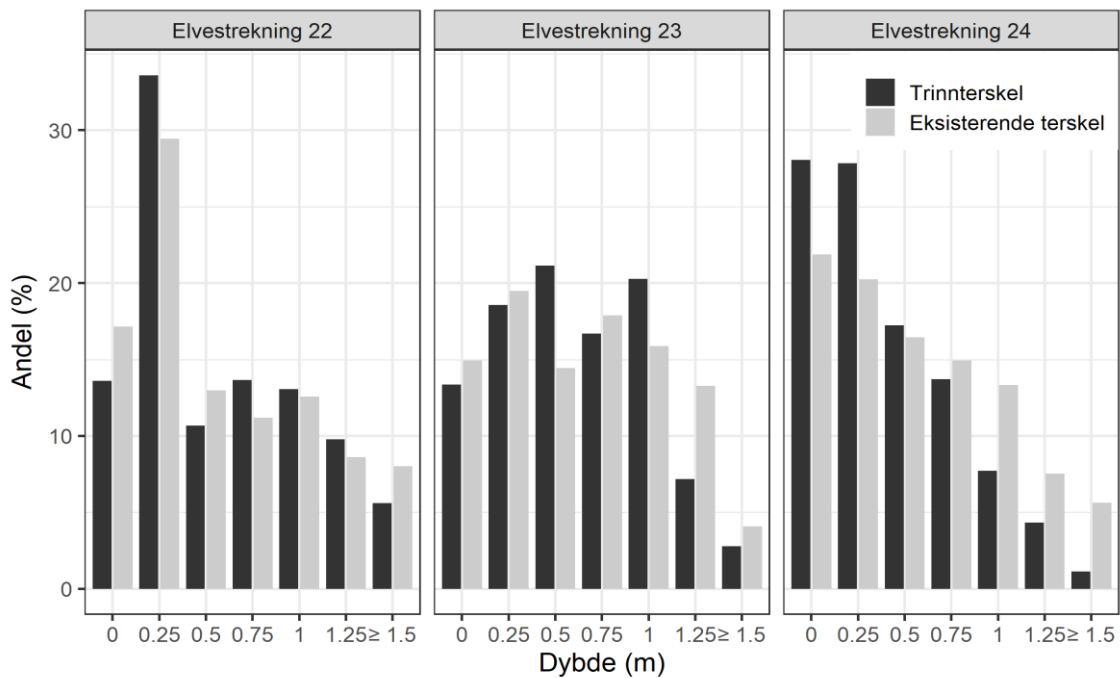
**Figur 100: Dybdefordeling oppstrøms trinnterskel 22 vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 101: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnterskel 22 for vannføring 2 m<sup>3</sup>/s**

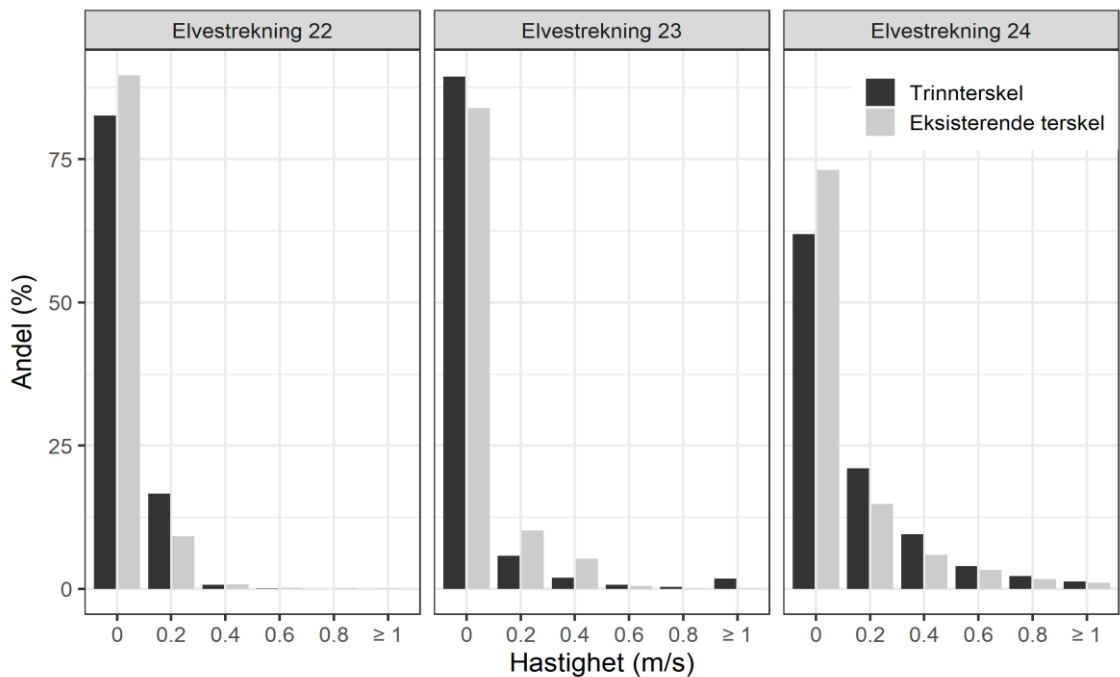


Figur 102 viser at dybdefordelinga er litt grunnere i alle elvestrekningene for trinnterskler enn eksisterende terskler, men at det fremdeles er ganske dypt. Den største endringen er i elvestrekning 24 der det reduserte terskelbassenget fører til en større andel grunne og veldig grunne områder.



**Figur 102: Dybdefordeling oppstrøms trinnterskler**

Figur 103 viser at hastigheten øker litt oppstrøms trinnterskel 22, mens den synker oppstrøms trinnterskel 23. Hastigheten 1 m/s eller større i elvestrekning 23 skyldes stryket nedstrøms terskel 24. I elvestrekning 24 øker hastigheten litt, og de stillestående områdene reduseres til 62 %.



**Figur 103: Hastighetsfordeling oppstrøms trinnterskler**

### 4.5.3 Diskusjon

Målet med denne utforminga var å forbedre fiskepassasjen ved å følge anbefalingene gitt i Tiltakshåndboka. Samtidig virket det trolig at dypålen ville føre til en noe senket vannstand oppstrøms, som kan føre til et minsket terskelbassenget.

Denne utforminga er laget for å forbedre vandring med utgangspunkt i utforminga som ble anbefalt i Tiltakshåndboka. Trinntersklene bør forbedre fiskepassasje, siden de skaper en sammenhengende vannstrøm over terskelen med noe dybde. Steinene i trinnterskelen kombinert med det roligere vannet i skråningene inn mot dypålen kan gi oppvekstarealer og skjul for mindre fisk (Pulg *et al.*, 2018).

Det er mulig å tilpasse både bredden og dybden på dypålen slik at terskelen får ønsket oppdemmingsevne. Dybden 0,5 m ble valgt fordi en midlertidig test med 1 m dyp dypål ga liten oppdemmingseffekt. Dypålen gjør at strømminga gjennom trinnterskelen er konsentrert, i motsetning til celletersklene som sprer strømminga over et større område. Dette fører til at strømminga videre i stryket nedstrøms også er mer konsentrert, noe som kan gjøre stryket lettere å passere.

I utforminga av trinnterskelen anbefales det at vanddypet i lavvannsrenna bør tilsvare vanddypet i dypålen i elva opp og nedstrøms (Pulg *et al.*, 2018) med foreslått dybde 0,5 til 1 m. Dybden 1 m med ellers likt utforma trinnterskler ble forsøkt, men det ga liten oppdemmingseffekt, så 0,5 m dybde ble brukt videre.

Med tanke på oppstrøms dybde, så passer 0,5 m dybde bra for terskel 24 siden dypålen oppstrøms er 75 cm dyp. 0,5 m dybde blir grunt i forhold til terskel 23 og 22 der dypålene er 1 til 1,25 m dype. Samtidig er vannet nedstrøms terskel 22 og 24 veldig grunt, mens kulpen nedstrøms terskel 23 gjør at det er rundt 1,25 m dypt. Dybden som er valgt passer bra for trinnterskel 24 og 22, men burde vært dypere for trinnterskel 23.

Det kunne vært aktuelt å gjøre trinnene mer naturlige ved å velge buede/bølgete kanter istedenfor de rette. En annen mulighet er å variere trinnene ved å skape større kulper i eller ved dypålen. Begge deler vil gjøre at trinnene i mindre grad ser ut som menneskeskapte naturinngrep. Trinntersklene vil trolig både se bedre ut og fungere bedre i en mindre elv siden de da kan fylle hele elvas bredde og gjøre at den fremstår vannfylt. Dersom det planlegges for, kan de fremstå som en naturtypisk del av elva (Pulg *et al.*, 2018).

Oppdemmingseffekten til trinntersklene ligger mellom de høye og de lave celletersklene. Trinntersklene kan være en aktuell løsning for alle tersklene, og utforminga kan tilpasses slik at terskelen gir ønsket vanddekt areal oppstrøms.

## 4.6 Resultater for tersklene ved større vannføringer

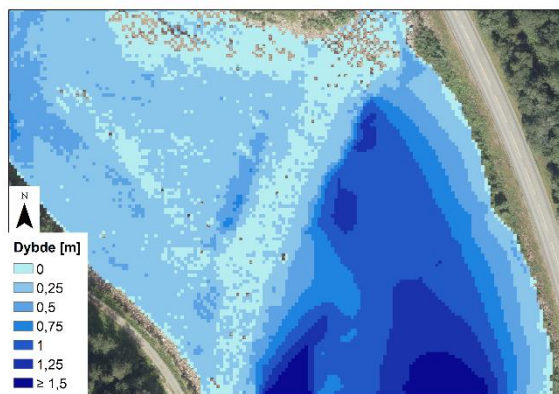
For å se på tersklenes funksjon ved større vannføringer er vannføringene 10 m<sup>3</sup>/s og 100 m<sup>3</sup>/s simulert.

### 4.6.1 Dagens terskler ved 10 m<sup>3</sup>/s

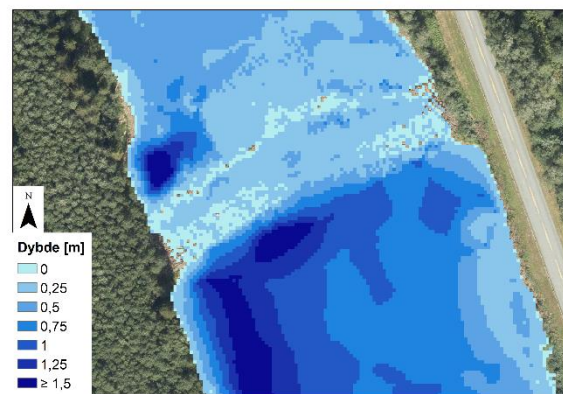
Ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s strømmet det vann både over hele hovedløpet og i sideløpet for terskel 24, se Figur 104. Det strømmet også vann over hele terskel 23, se Figur 105. For terskel 22 er det vann over store deler av terskelen, men det strømmet hovedsakelig på midten. De vanddekte arealer er omtrent 3 000 m<sup>2</sup> større enn ved 2 m<sup>3</sup>/s, se Tabell 16.

**Tabell 16: Resultater for eksisterende terskler ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

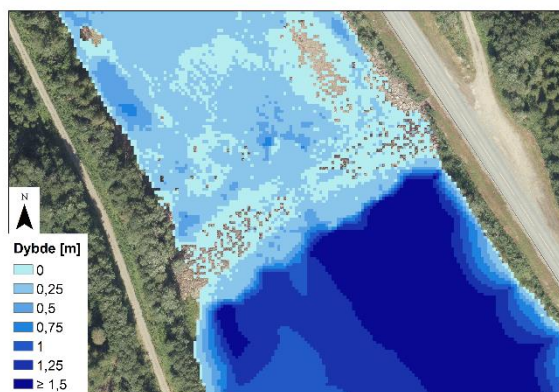
	Vanddekt areal [m]	Gjennomsnittsdypde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Terskel 24	1 717	0,11	0,71
Terskel 23	2 277	0,21	0,56
Terskel 22	1 518	0,10	1,16
Elvestrekning 24	49 236	0,64	0,33
Elvestrekning 23	64 997	0,83	0,18
Elvestrekning 22	67 645	0,70	0,17



**Figur 104: Dybdefordeling for eksisterende terskel 24 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 105: Dybdefordeling for eksisterende terskel 23 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 106: Dybdefordeling for eksisterende terskel 22 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

Dybdefordelinga i elvestrekningene er i Vedlegg 3.

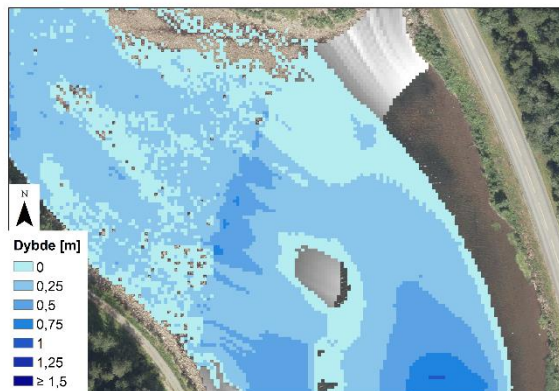
#### 4.6.2 Uten terskler ved 10 m<sup>3</sup>/s

Ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s strømmet det kun vann i hovedløpet når terskel 24 fjernes, se Figur 107. Det strømmet vann over mesteparten av terskel 23, bortsett fra helt ute til høyre, se Figur 108. Over terskel 22 renner det kun vann på høyre side av elva, se Figur 109, så større vannføring fyller ikke elva helt.

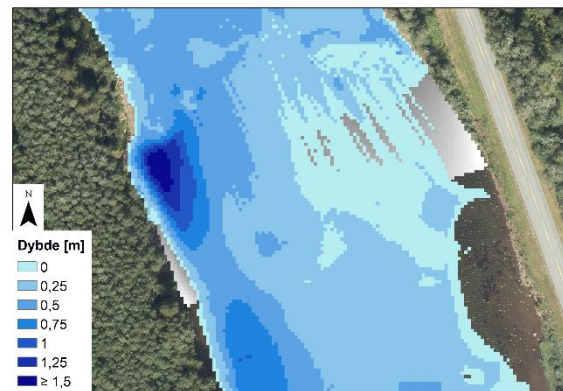
Elvestrekning 24 har et vanddekt areal som er 82 % av det eksisterende terskler gir, mens elvestrekning 23 har 88 % og elvestrekning 22 har 72 %, se størrelser i Tabell 17.

**Tabell 17: Resultater for terskelfjerning ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

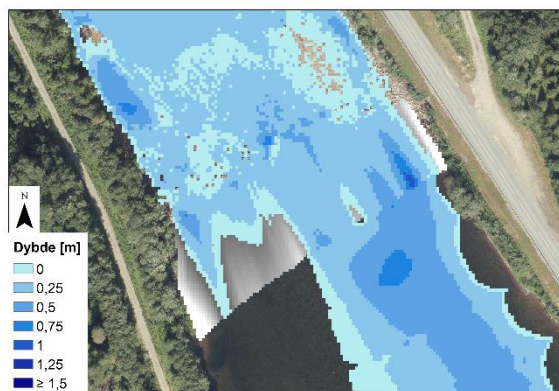
	Vanddekt areal [m]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
<b>Terskel 24</b>	1 371	0,23	0,55
<b>Terskel 23</b>	2 043	0,28	0,35
<b>Terskel 22</b>	1 422	0,22	0,64
<b>Elvestrekning 24</b>	40 613	0,32	0,55
<b>Elvestrekning 23</b>	57 232	0,60	0,30
<b>Elvestrekning 22</b>	48 836	0,32	0,44



**Figur 107: Dybdefordeling der terskel 24 er fjernet ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 108: Dybdefordeling der terskel 23 er fjernet ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 109: Dybdefordeling der terskel 22 er fjernet ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

Dybdefordelinga for elvestrekningene er i Vedlegg 3.

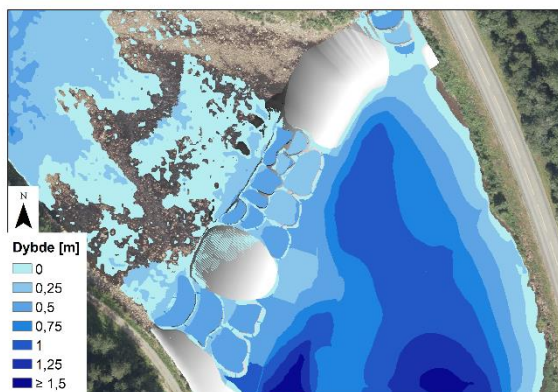
### 4.6.3 Høye celleterskler ved 10 m<sup>3</sup>/s

Ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s strømmer det vann i alle tre celleområdene på høy celleterskel 24, se Figur 110. For terskel 23 strømmer mesteparten av vannet i celleterskelen, men noe strømmer også helt til høyre på terskelen, se Figur 111. For høy celleterskel 22, så strømmer alt vannet i celleområdet, se Figur 112. Dette viser at celletersklene samles vannet ved høyere vannføring. Alle de høye celletersklene gir omtrent det samme vanddekte areal i elvestrekningen oppstrøms, se Tabell 18, som de eksisterende tersklene.

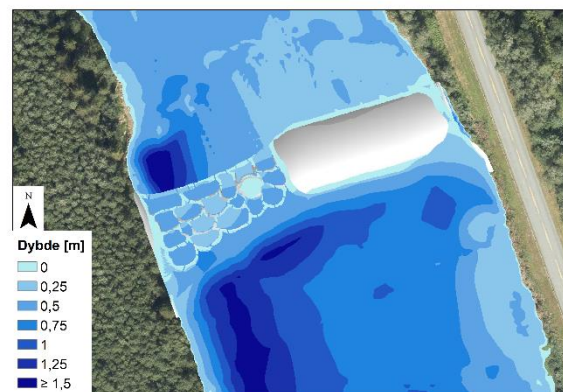
Elvestrekning 24 har et vanddekt areal som er 98 % av det eksisterende terskler, mens elvestrekning 23 har 96 % og elvestrekning 22 har 101 %, se størrelser i Tabell 18.

**Tabell 18: Resultater for høye celleterskler ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

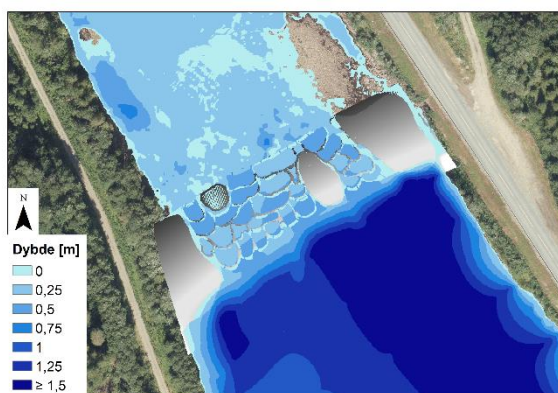
	Vanndekt areal [m]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Terskel 24	1 724	0,29	0,61
Terskel 23	1 329	0,35	0,65
Terskel 22	1 499	0,29	0,68
Elvestrekning 24	48 422	0,56	0,36
Elvestrekning 23	62 199	0,83	0,41
Elvestrekning 22	68 037	0,73	0,16



**Figur 110: Dybdefordeling for høy celleterskel 24 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 111: Dybdefordeling for høy celleterskel 23 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 112: Dybdefordeling for høy celleterskel 22 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

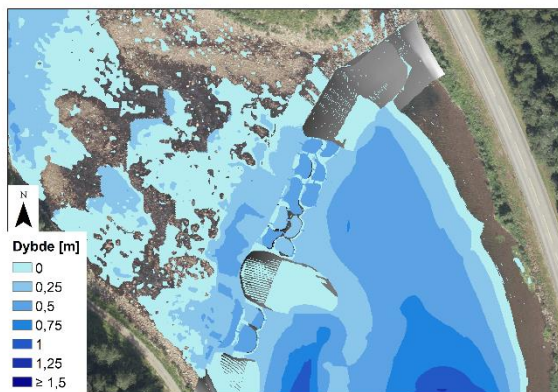
#### 4.6.4 Lave celleterskler ved 10 m<sup>3</sup>/s

Ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s strømmer det meste av vannet i celleområdet til lav celleterskel 24, se Figur 113, men noe strømmer også over de hevede delene av terskelen i hovedløpet. For lav celleterskel 23, se Figur 114, så strømmer det vann over hele terskelen, både celleområdet og den hevede delen av terskelen. Det strømmer vann i begge celleområdene på lav celleterskel 22, se Figur 115, og de heva delene av terskelen er tørre.

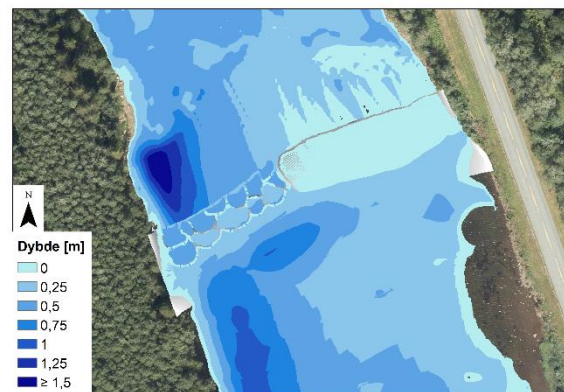
Elvestrekning 24 har et vanddekt areal som er 95 % av det eksisterende terskler, mens elvestrekning 23 har 81 % og elvestrekning 22 har 82 %, se størrelser i Tabell 19.

**Tabell 19: Resultater for lave celleterskler ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

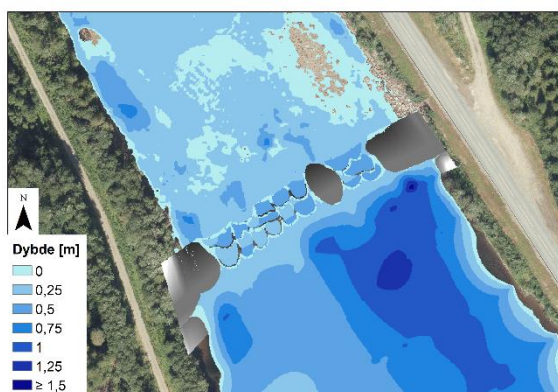
	Vanddekt areal [m <sup>2</sup> ]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Terskel 24	1 604	0,22	0,51
Terskel 23	1 169	0,18	0,44
Terskel 22	1 918	0,27	0,59
Elvestrekning 24	46 924	0,38	0,46
Elvestrekning 23	52 369	0,63	0,44
Elvestrekning 22	55 642	0,42	0,32



**Figur 113: Dybdefordeling for lav celleterskel 24 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 114: Dybdefordeling for lav celleterskel 23 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 115: Dybdefordeling for lav celleterskel 22 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

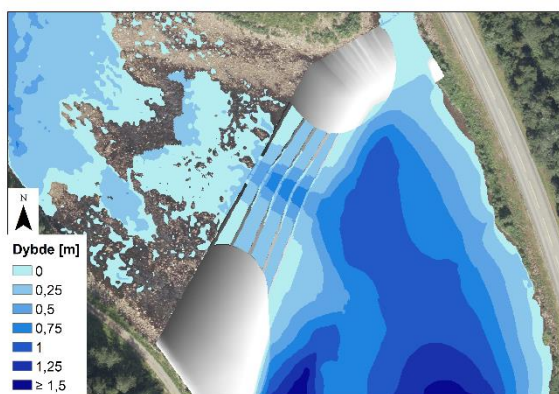
#### 4.6.5 Trinnterskler ved 10 m<sup>3</sup>/s

Ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s er hele trinnterskel 24 vanddekt, se Figur 116, og i tillegg strømmer det vann i sideløpet. Trinnterskel 23, se Figur 117, er i likhet med lav celleterskel 23 helt dekket av vann. Over trinnterskel 22 strømmer alt vannet i trinnområdet, og de hevede delene av terskelen ligger tørre, se Figur 118. Trinnterskel 24 og 22 fungerer som tenkt ved at trinnterskelen fylles av vann ved større vannføringer, inntil vannføringa er stor nok til å fylle hele elva, slik trinnterskel 23 er ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s.

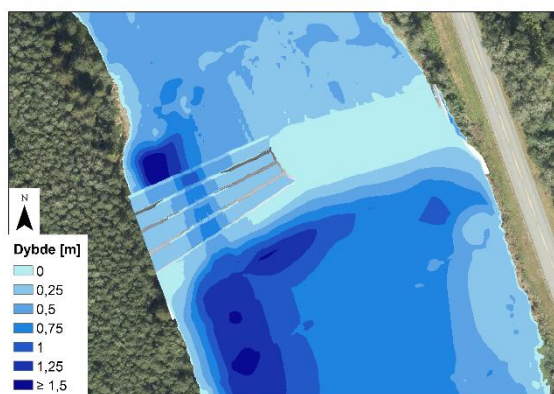
Elvestrekning 24 har et vanddekt areal som er 99 % av det eksisterende terskler, mens elvestrekning 23 har 94 % og elvestrekning 22 har 100 %, se størrelser i Tabell 20.

**Tabell 20: Resultater for trinnterskler ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

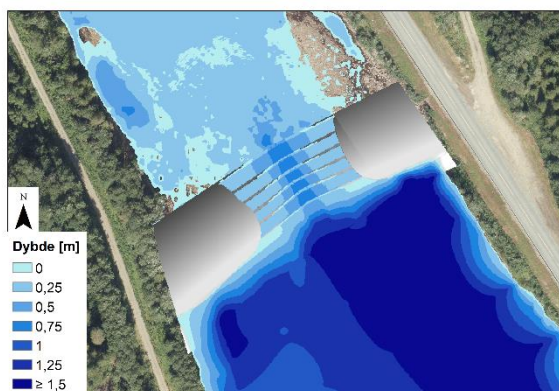
	Vanddekt areal [m]	Gjennomsnittsdybde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Terskel 24	921	0,24	0,68
Terskel 23	2 204	0,19	0,48
Terskel 22	961	0,33	0,63
Elvestrekning 24	48 558	0,57	0,36
Elvestrekning 23	61 382	0,80	0,40



**Figur 116: Dybdefordeling for trinnterskel 24 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 117: Dybdefordeling for trinnterskel 23 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**



**Figur 118: Dybdefordeling for trinnterskel 22 ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s**

#### 4.6.6 Resultater ved vannføring 100 m<sup>3</sup>/s

Ved vannføring 100 m<sup>3</sup>/s er elva helt fylt av vann uansett terskelutforming, se Tabell 21. De høye celletersklene og trinntersklene gir like store vanndekte areal, henholdsvis 102 %, 100 % og 100 % av det de eksisterende tersklene gir for terskel 22, 23 og 24. Årsaken til at de får et større vanndekt areal oppstrøms enn eksisterende terskler er at både trinnterskelen og den høye celleterskelen er oppbygd 20 cm utenfor celle- og trinnområdet. For den lave celleterskelen har elvestrekningene er vanndekt areal på 95 % til 98 % av det eksisterende terskler skaper. For elva uten terskler er det vanndekte arealet 91 % oppstrøms terskel 22, 98 % for terskel 23 og 96 % for terskel 24. Alle de vanndekte arealene er større enn det vanndekte arealet for eksisterende terskler ved vannføring 10 m<sup>3</sup>/s.

**Tabell 21: Resultater for elva oppstrøms eksisterende terskler ved vannføring 100 m<sup>3</sup>/s**

	Vanndekt areal [m]	Gjennomsnittsdypde [m]	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Elvestrekning 24	54 183	1,15	1,04
Elvestrekning 23	82 840	1,69	0,61
Elvestrekning 22	73 287	1,13	0,81

Dybdefordelinga over tersklene og for elvestrekningene med eksisterende terskler eller uten terskler finnes i Vedlegg 4 og 5.

#### 4.6.7 Diskusjon

Celle- og trinnterskelområdene går bare over omtrent halve elvas bredde for at de skal være vannfylte og samle vannføringen når den er lav. Det er viktigst at tersklene samler vannet ved lave vannføringer, men de bør også være utformet slik at de fungerer godt ved større vannføringer. Det ser ut til å fungere godt ved vannføringa 10 m<sup>3</sup>/s i de høye celletersklene. Det renner vann over de oppbygde områdene på lav celleterskel 23 og delvis for 24 fordi vannføringa er større enn celle- og trinnterskelområdenes kapasitet til å samle strømmen.

Trinntersklene er spesifikt utforma for å fylles gradvis utover ved vannføringer som er større enn minstevannføringa. Det ser ut til å fungere godt for trinnterskel 24 og 22, men for trinnterskel 23 så renner det vannover den oppbygde delen i tillegg til trinnområdet. 10 m<sup>3</sup>/s er tydeligvis en større vannføring enn trinnområdet er utforma for. Kan anta at også trinnterskel 23 fungerer som tenkt for en mindre vannføring.

Trinntersklene og de høye celletersklene demmer opp omtrent det samme vanndekte arealet oppstrøms som de eksisterende tersklene. Det er dermed terskelkronas høyde og ikke terskelutforminga som er avgjørende. Den hydrauliske kapasiteten er relativt lik for de løsningene og eksisterende terskler.



## 4.7 Visualisering av noen terskelutforminger

Vanddekt areal og terskelutforminga har blitt brukt som utgangspunkt for disse visualiseringene. Visualisering av alle terskelvariantene og elvestrekningene oppstrøms er i Vedlegg 6.



**Figur 119: Visualisering av høy celleterskel 22, figuren er 1/4 av original størrelse**



**Figur 120: Visualisering av trinnterskel 22, figuren er 1/4 av original størrelse**

# 5 Diskusjon

## 5.1 Terrengmodell

Utgangspunktet for terrengmodellen ble laget i prosjektoppgaven, med en oppløsning på 1 m. Terrengmodellen ble forbedret ved å endre områder der test-simuleringer i HEC-RAS gjorde det tydelig at terrenget ikke stemte. Korreksjoner ble i hovedsak utført i grunne områder, som mellom hjelpelinjene og elvebredden, eller i grunne områder uten ADCP-målinger.

Korreksjonene ble gjort ved å tegne opp øvre, nedre og eventuelt midtre tverrsnitt, samt kantlinjer, og så interpolere mellom. For at interpoleringsresultatene skal bli gode, er plasseringa av tverrsnittene og kantlinjene viktig. Øvre tverrsnitt er plassert der terrenget skal være tørt, og nedre er plassert et stykke nedenfor vannkanten. Prøving og feiling har blitt utført for å finne rett plassering av midtre og nedre tverrsnitt samt bruddlinjene. Korreksjonene som er laget på denne måten er basert på ortofotoet, og bør gi en riktigere terrengmodell, siden korreksjonene hovedsakelig erstatter andre avledede punkter.

For områder der terrenget fortsatt ligger for høyt etter interpolering, ble det lagt inn et midtre tverrsnitt, det høyden mellom kantlinjene ble endra. Siden øvre og nedre tverrsnitt, samt punktene som krysser kantlinjene har blitt bevart, bør dette også gi en god overgang til det omkringliggende terrenget. Denne fremgangsmåten er kun brukt i forbindelse med forhøyede nes, der en brå overgang fra land til vannflate forsvinner i interpoleringa mellom målepunktene.

Simuleringer etter terskelfjerna ga en mye lavere vannstand i terskelbassengene. Da kom det frem nye områder der terrenget ser ut til å være for høye. Dette har det ikke blitt endret, fordi det hverken finnes data å kalibrere mot eller er sikkert at korreksjoner vil gi et sannere gjengivelse av terrenget. ADCP-målingene er synlige i alle terskelbassengene, men det er greit fordi det viser faktisk terrenghøyde, mens omgivelsene består av avledede høyder.

Nederst i stryket ved øya i elvestrekning 23 ble veldig grunt, og kun med litt dypere områder på siden hvor vannstrømmen samlet seg. Det skyldes at det også her kun er Lidar-punkter på elvebredden og uten ADCP-punkter fordi det er grunt. Dette er også korrigerert ved å tegne og endre tverrsnitt. Vanskelig å få til gode overganger fordi det er uklart hvor overgangen til riktigere høyder går. Ser derfor litt kantete ut. Det går fint fordi det uansett er en del av stryk uten terskelbasseng, så det er ikke en så interessant del av elvestrekningen.

I forbindelse med konstruering av celleterskler, ble det klart at det var hensiktsmessig at rasteret hadde en finere oppløsning enn 1 m, så 0,25 m ble valgt. Oppløsninga på rasteret ble gjort ved å bruke ArcMap-verktøyet Resample til å dele cellene. I terskelbassengene gjør det sparsomme datagrunnlaget at det er lite utbytte med finere oppløsning på rasteret. På land er det mye å hente siden tettheten av Lidarpunkter er høyere, men det er av liten interesse for simuleringene. Det kan også være en del å hente over tersklene, siden vannstanden er liten og mange Lidar-punkter.

For å unngå dette tapet, burde alt arbeidet vært gjort med en 1x1 m-raster. Dessverre var korreksjonene eksportert i 1x1 m-raster, så det ville vært tidkrevende å gjenta prosessen med å transformere og korrigere rasteret. Likevel, så er ikke nøyaktighetstapet så stort siden forskjellen før og etter resamplinga var 0,0031 m. I tillegg er det kun for eksisterende terskler at nøyaktighetstapet over tersklene kan ha en effekt siden de erstattes av et annet raster for de andre terskelutformingene.

Det virker rimelig at terrenngmodellen stemmer godt ved dagens vannstand, og har større usikkerhet i dypere vann. Det skyldes at Lidar-målingene ikke har trengt gjennom vannet, ADCP-en kun består av skrå tverrsnitt over elva og at det kun er mulig å sammenligne terrenget mot ortofoto ved eksisterende vannstand. Siden alle simuleringene tar utgangspunkt i det samme terrenget i terskelbassengene, som stort sett er vanddekt, og kun blir sammenlignet med hverandre, så påvirker ikke disse feilkildene resultatet i spesielt stor grad.

## 5.2 Kalibrering av hydraulisk modell

Mannings ruhetstall i modellen varierer fra 0,001 til 0,15. Den største gjennomsnittsforskjellen var i sjekkområdet rett oppstrøms terskel 21, der forskjellen var 0,074 m. Vannstanden i simuleringene ligger noe over observert vannstand i de fleste kontrollområdene. Det er akseptabelt fordi bølger og vind og andre forhold under Lidar-scanninga medfører en viss usikkerhet.

Det var utfordrende å få fylt sideløpet ned fra terskel 24 med vann. Dette ble løst ved å sette ruhetstallet til 0,1 i sideløpet. I tillegg ble det satt et lavere ruhetstall for terskelstykket rett oppstrøms sideløpet, for å justere vannføringsfordelinga mellom hovedløp og sideløp. Mannings ruhetstall i stryket rett nedstrøms terskel 24 er lave 0,001, og resultatene for de alternative terskelutformingene viser at vannstrømmen er svært rask i stryket. Det kan være at fordelinga av vannføring mellom hovedløp og sideløp fremdeles ikke er god nok, og at ytterligere endring av terrenget oppstrøms sideløpet ville vært riktigere enn å justere ruhetstallet. Dette kunne vært undersøkt ved å kontrollere kalibreringa mot en annen vannføring.

## 5.3 Terrengendringer

### 5.3.1 Fjerning

For fjerninga av tersklene, ble det tatt utgangspunkt i det eksisterende terrenget. Det ble tegnet opp et øvre og nedre tverrsnitt, og interpolert mellom dem. Tverrsnittene ble tilstrebet plassert på øvre og nedre terskeltå, basert på en knekk i høyden til terrenget og til ortofotoet. Det var ikke alltid like tydelig hvor tverrsnittene burde plasseres, og siden hele interpoleringa avhenger av det, så utgjør det er liten usikkerhet.

Interpolering mellom tverrsnittene er en rask og enkel måte å fjerne tersklene, og samtidig få en god overgang til omkringliggende terrenget. Interpolering forlenger konturene av høydeprofilen til tverrsnittene i lengden, slik at dypere områder fortsetter gjennom terskelområdet. Dermed kan mindre krusninger i terrenget der hvor tverrsnittet legges, påvirke høyden til hele terskelstatninga. Et aktuelt tiltak for å minske denne effekten hadde vært å jevne ut høyden til tverrsnittene ved å justere de manuelt før interpolering. Det ble likevel valgt å bevare høyden til tverrsnittene, i håp om at de er plassert på naturlig elvebunn og dermed representerer naturlige formasjoner på elvebunnen. Det er derfor tenkt at den ujevne flaten på tvers av elva som erstatter

tersklene til en viss grad er naturlig. Likevel er det synlige vannstriper over terskelerstatning over for eksempel terskel 23, se Figur 33, som ser unaturlige ut. Dette kunne vært forsøkt utbedret ved å glatte terrenget, for eksempel med ArcMap-verktøyet *Filter*.

En annen faktor som kunne blitt inkludert er hvordan terrenget så ut før tersklene ble bygget, og så forsøke å gjenskape det. Det finnes for eksempel fritt tilgjengelige ortofoto fra 1975, 1962 eller 1952. Det fra 1952 (Geovekst, 2016b) viser grunner som tersklene er plassert i nærheten av, og som kan vurderes å gjenskape i et restaureringstilfelle. Sammenligning av ortofotoene fra 1952 og 1962 (Geovekst, 2016a) viser også at under utvidelsen av veien ble det lagt en fylling langs høyre elvebredde, slik at elva er smalnet. Selv ved fjerning av tersklene vil det derfor ikke være mulig å restaurere til naturtilstanden.

### 5.3.2 Celle- og trinnterskler

Celletersklene ble konstruert med terrenget etter terskelfjerning som grunnlag. Likevel ble det valgt at terskelkrona og oppstrøms fylling ble plassert på samme sted, for at resultatene skulle være enklere å sammenligne med eksisterende terreng. Det kunne vært mulig å bruke samme fremgangsmåte for å lage celletersklene, men bevare terskelkrona hele veien. Det å ha en fast høyde på terskelkrona gjør det lettere å sammenligne forskjellige høyder.

Siden både de høye celletersklene og trinntersklene kun bruker deler av elvas bredde og i utgangspunktet bevarer terskelen på siden, hadde det vært en billigere løsning å bevare eksisterende terskel på sidene og senke celle-/trinnområdet i stedet for å heve terskelen på sidene og på den måten likevel sikre strømning der det er ønskelig.

Det ble laget passasjer mellom cellene og i dypålen i trinnterskelen. Ved lav vannføring renner vannet i passasjene, slik at ville gjort mellom steinene i en reell celleterskel. Ved høyere vannføring renner vannet over kantene mellom cellene, noe som også er realistisk, så for celleterskler representerer de virkeligheten på en god måte. I trinnterskelen burde det vært plassert flere passasjer utover i skråningen for å spre strømmen mer.

Pulg *et al.* (2018) anbefaler at det utformes en kulp nedenfor terskelkonstruksjonen. Det er hovedsakelig for å hindre erosjon, men det kan også lette vandringen for stor fisk som hopper. Dette ble det ikke laget bevisst fordi fokuset heller lå på å lage en naturlig overgang til terrenget nedstrøms. Som effekt av konstruksjonsmetoden er det likevel dannet grunne vandekte områder rett nedstrøms de lave celletersklene. Det kunne blitt gjort i større grad, også for de andre terskelutformingene for å lage dem enda bedre med tanke på fiskevandring.

## 5.4 Oppsummerende diskusjon

Fjerning av tersklene er den foretrukne løsningen siden det gjenskaper full konnektivitet både for sedimenttransport og for fisk hvis det gir akseptable forhold. Hvis fjerning av terskelen ikke er mulig er den nest beste løsningen alternative terskelutforminger som restaurere konnektiviteten for fisk, men ikke for sedimenter (Fjeldstad, Pulg og Forseth, 2018).

Etter fjerning av terskel 24 er det fremdeles noen dype områder som kan brukes som oppholdsplasser av fisk selv om det vandekte arealet og gjennomsnittsdypden

reduseres. Samtidig reduseres elvas bredde til det halve i det tidligere terskelbassenget, noe som gjør at den lave vannføringa blir synlig.

Med tanke på habitatvariablene i elva, så er fjerning av tersklene aktuelt for terskel 23 og 24. For terskel 23 vil det være en god løsning både med tanke på dybde, bevegelse på vannet gjennom hele elvestrekningen, men også estetisk. Det vanddekte arealet reduseres til 69 % av dagens, men en del av det skyldes at strømmen gjennom stryket nedstrøms terskel 24 er mer konsentrert. Det kunne vært lurt å minske utsnittet for elvestrekning 23 i den enden, slik at effekten av terskelutforming 24 i mindre grad påvirker resultatene for elvestrekning 23. Samtidig, så varierer lengden på terskelbassenget. Det kunne vært mulig å sette den lenger nede, men klart oppstrøms det største terskelbassenget.

Det blir foreslått å fjerne terskel 22 som biotoptiltak (Bjølstad *et al.*, 2014).

Terrengmodellen viser at dyphølen oppstrøms eksisterende terskel er grunnere (rundt 1,5 m) enn det som ble antatt (2-3 m). Resultatet etter terskelfjerning viser at terskel 22 har en viktig funksjon i å skape dype områder i elvestrekningen. Det blir antatt at den øvre delen av elvestrekning 22 vil være tørr om vinteren (Bjølstad *et al.*, 2014) og etter terskelfjerning vil halve elvestrekningen ha samme vanndybde som den øvre delen. Kombinert med få dype områder er det derfor trolig at forholdene i elvestrekningen om vinteren kan bli vanskelig etter terskelfjerning. En terskel med redusert høyde vil derfor være bedre med tanke på de økologiske forholdene.

Felles for alle de alternative terskelutformingene er at de samler strømmingen i deler av elvas bredde, mens vanlig terskel videreføres på sidene. Ifølge Pulg *et al.* (2018) bør hele elvebredden benyttes som fiskepassasje, men det er tenkt i motsetning til omløp og fisketrapper (Fjeldstad, Pulg og Forseth, 2018). Siden hele vannføringa kan benyttes til fiskepassasje og høydeforskjellene ikke er så store, er det ikke aktuelt med omløp eller fisketrapper. I tillegg er Nea en stor elv, og eksempler på bygde celleterskler i Sira og Kvina er den eksisterende terskelen delvis bevart (Arnekleiv, 2012). Resultatene for vannføring 10 m<sup>3</sup>/s viser at det da er aktuelt med celle- eller trinnterskel over hele elvebredden, men når minstevannføringa er 2 m<sup>3</sup>/s så er det unødvendig å bruke hele elvas bredde.

Trinnterskelen fremstår mer oppdelt og unaturlig enn celletersklene, se kapittel 0 og Vedlegg 2. For begge utformingene er det viktig å tilpasse plasseringa til terrenget, spesielt nedstrøms for at det skal fremstå som et mer naturlig element i elva. Det kan gjøres for begge utformingene (Pulg *et al.*, 2018), men er vanskeligere å få til i Nea for trinnterskler fordi Nea er så bred og trinnterskelen baserer seg på å konsentrere strømmen et sted. Det kunne eventuelt vært utbedret ved å lage to smalere renner/dypåler gjennom trinnterskelen slik at vannet spres over et større område.

Stryket nedstrøms terskel 24 ble i en bonitering (Bjølstad *et al.*, 2014) registrert som gyteområde og potensielt oppvekstområde. Det vil derfor være bedre å spre strømmen over terskelen utover slik celletersklene gjør heller enn trinnterskelen som har konsentrert strømming nedstrøms. For terskel 22 og 23 hvor strømminga over eksisterende terskler er relativt samlet på midten og helninga nedstrøms terskelen er flatere, så vil alle de alternative terskelutformingene fylle oppvekst- og gyteområdene (Bjølstad *et al.*, 2014) rett nedstrøms tersklene.

Trinnterskelen kan utformes slik at den har lik oppdemningseffekt som den eksisterende terskelen ved å endre dybde og bredde på dypålen, slik at den i likhet med celleterskelen

kun forbedrer vandring. Trinnterskelen er utformet etter Tiltakshåndboka for bedre fysisk vannmiljø ((Pulg *et al.*, 2018) der tiltakene i hovedsak er rettet mot anadrom fisk. Både trinn- og celleterskelen er basert på at steiner med diameter på omtrent 1 m gjør at tersklene er vannfylte. Hastigheten er høyere over midten av trinnterskelen enn den er i celletersklene, men lavere på sidene så begge løsningene er gode fiskepassasjer.

Celle- og trinnterskler kan utformes slik at de skaper gyteplasser og skjulrike oppvekstarealer (Pulg *et al.*, 2018), noe som er viktig når resten av elvestrekningen har stillestående vann. De kan dermed i seg selv føre til økt areal med potensielt godt habitat, selv om terskelbassenget bevares. Ørret optimaliserer energiforbruket mellom tilgjengeligheten til mat som kommer med strømmen og hvor energikrevende det er å svømme i strømmen (Heggenes, 1996). Mer bevegelse i vannet i celleterskler gjør at maten kommer lettere, og derfor kan de utgjøre gode oppholdsplasser hvis ikke hastigheten er for høy.

Det kan diskuteres hvor viktig det er å ta hensyn til at folk ønsker et stort vannspeil og at elva skal se fin ut (Skår og Köhler, 2019), men en gang i tida ble det alene oppfattet som viktig nok til å bygge terskler (Mellquist, 1976). Riktignok uten at ulempene ble vurdert eller funnet tunge nok. Dersom det estetiske vektlegges høyere enn bedre habitatforhold i elva over er de høye celletersklene eller en justert trinnterskelutforming med samme oppdemmingseffekt den beste løsningen. Håp om at visualiseringer, som de som er lagt ved denne oppgaven, kan gjøre det enklere for beslutningstagere og ikke-fagfolk å vurdere de ulike alternativene opp mot hverandre. Selv ved terskelfjerning, det mest drastiske alternativet vil elva gjennom studieområdet ha en sammenhengende vannflate, og på det smaleste bli 28 m der dagens elv er 67 m bred.

## 6 Konklusjon

Fjerning av tersklene gjør at terskelbassengene forsvinner og at det vanndekte arealet reduseres til 73 % oppstrøms terskel 24, 69 % oppstrøms terskel 23 og 56 % oppstrøms terskel 22. Gjennomsnittsdybden reduseres fra rundt 60 cm til 21 cm oppstrøms terskel 24 og 22, og 36 cm oppstrøms terskel 23. Reduksjonen i stillestående terskelbasseng gjør at vannhastigheten øker til 0,25, 0,34 og 0,2 m/s.

De høye celletersklene er utformet for å gi samme terskelbasseng som de eksisterende tersklene, og det gjør de for terskel 23 og 22, mens det for terskel 24 reduseres til 94 %. Dette tiltaket bedrer kun vandring, fordi det gir en tilnærmet sammenhengende vannflate med 25 cm over terskelen.

De lave celletersklene er utformet for både å forbedre vandring, men også for å danne et mindre terskelbasseng enn dagens. De gir et vanndekt areal på 82, 70 og 73 % av dagens, og forbedret vandring på lik linje med de høye celletersklene. Dybden i elvestrekningen synker, mens hastigheten øker i forhold til eksisterende terreng.

Trinntersklene er utformet for å forbedre vandring og redusere terskelbassenget noe. De ga et terskelbasseng rundt 90 % av dagens. De har også en sammenhengende vannflate over terskelen, så utforminga gjensker konnektivitet for fisk.

Etter fjerning av terskel 24 er det fremdeles noen områder som er ned mot 1 m dype og kan brukes som oppholdsplasser av fisk selv om det vanndekte arealet reduseres til 73 % og gjennomsnittsdybden til 21 cm. Fra et rent økologisk perspektiv kan det være en god løsning. Samtidig reduseres elvas bredde til det halve i det tidligere terskelbassenget, noe som gjør at det blir veldig tydelig at elva er regulert. Av estetiske årsaker kan det vurderes å videreføre en terskel med bedret fiskepassasje. En terskel med halvert høyde fører til at de dype områdene blir ned mot 1,25 m dype og at det stillestående terskelbassenget blir halvparten så langt. Den lave celleterskelen sprer også strømmen utover stryket nedstrøms som har viktige oppholds- og gyteplasser, så det er derfor en god løsning.

For terskel 23 vil terskelfjerning være en god løsning både med tanke på dybde, bevegelse på vannet gjennom hele elvestrekningen og estetisk. Siden terskelfjerning anses som det miljøtiltaket som gir akseptable forhold, er det lite aktuelt å bygge om terskelen.

Resultatet etter terskelfjerning viser at terskel 22 har en viktig funksjon i å skape dype områder i elvestrekningen. Det er kun 8 % av det gjenværende vanndekte arealet i elvestrekningen som er 0,5 m eller dypere. En terskel med redusert høyde vil derfor være bedre med tanke på de økologiske forholdene. Både en lav celleterskel eller en lavere trinnterskel er aktuelle løsninger.

## Referanser

- Adeva-Bustos, A. *et al.* (2019) Ecohydraulic modelling to support Fish Habitat Restoration Measures, *Sustainability (Switzerland)*, 11(5). doi: 10.3390/SU11051500.
- Armstrong, J. D. *et al.* (2003) Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams, *Fisheries Research*, 62(2), s. 143-170. doi: 10.1016/S0165-7836(02)00160-1.
- Arnekleiv, J. V. *et al.* (2006) *Evaluering av terskler som avbøtende tiltak i et utvalg vassdrag i Midt- og Vest-Norge.* (Miljøbasert vannføring 3-06). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport\\_miljoebasert\\_vannfoering/2006/miljoebasert\\_2006\\_03.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport_miljoebasert_vannfoering/2006/miljoebasert_2006_03.pdf).
- Arnekleiv, J. V. (2012) *Evaluering av celleterskler som avbøtende tiltak.* (Miljøbasert vannføring 6). Oslo: NVE. Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/11185565-Evaluering-av-celleterskler-som-avbotende-tiltak.html>.
- Arnekleiv, J. V. *et al.* (2017) *Fiskebiologiske undersøkelser i Selbusjøen og Nea med sideelver i 2016.* (NTNU Vitenskapsmuseet naturhistorisk rapport). Trondheim.
- Bjølstad, O. K. H. *et al.* (2014) *Forslag til plan for biotoptiltak i Nea på strekningen Bogstadhølen til Gresslidammen.* Trondheim: Sweco Norge AS. Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/42267563-Forslag-til-plan-for-biotoptiltak-i-nea-pa-strekningen-bogstadhølen-til-gresslidammen-ungfiskundersokelse-bonitering-og-forslag-til-tiltak.html>.
- Brunner, G. W. (2016a) *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual.* US Army Corps of Engineers. Tilgjengelig fra: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf> (Hentet: 29.01.20).
- Brunner, G. W. (2016b) *HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0.* US Army Corps of Engineers. Tilgjengelig fra: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf> (Hentet: 29.01.20).
- Brunner, G. W. (2016c) *HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0.* US Army Corps of Engineers. Tilgjengelig fra: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%202D%20Modeling%20Users%20Manual.pdf>.
- Chow, V. T. (1959) *Open-Channel Hydraulics.*
- Esri (2016a) *Resample.* Tilgjengelig fra: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/resample.htm> (Hentet: 20.03.20).
- Esri (2016b) *How TIN To Raster works.* Tilgjengelig fra: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-tin-to-raster-3d-analyst-works.htm> (Hentet: 26.02.20).
- Esri (2016c) *How Natural Neighbor works.* Tilgjengelig fra: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-natural-neighbor-works.htm> (Hentet: 26.02.20).
- Fergus, T., Hoseth, K. A. og Sæterbø, E. (red.) (2017) *Vassdragshåndboka.* 2. utg. Bergen: Fagbokforlaget.
- Fjeldstad, H.-P., Pulg, U. og Forseth, T. (2018) *Sikker toveis fiskevandring forbi vannkraftverk.* SINTEF Energi. Tilgjengelig fra: [https://www.researchgate.net/publication/323280282\\_Sikker\\_toveis\\_fiskevandring\\_forbi\\_vannkraftverk\\_Kunnskapsoppdatering\\_og\\_monsterpraksis\\_Forfattere/link/5a8bf60f458515b8af96ade4/download](https://www.researchgate.net/publication/323280282_Sikker_toveis_fiskevandring_forbi_vannkraftverk_Kunnskapsoppdatering_og_monsterpraksis_Forfattere/link/5a8bf60f458515b8af96ade4/download).



- Fjeldstad, H. P. *et al.* (2012) Removal of weirs and the influence on physical habitat for salmonids in a norwegian river, *River Research and Applications*, 28(6), s. 753-763. doi: 10.1002/rra.1529.
- Forseth, T. og Harby, A. (red.) (2013) *Håndbok for miljødesign i regulerte laksevassdrag*. Trondheim: Norsk institutt for naturforskning.
- Forsgren, E. *et al.* (2018) *Phoxinus phoxinus, vurdering av økologisk risiko*. Tilgjengelig fra: <https://artsdatabanken.no/Fab2018/N/2795> (Hentet: 21.12.19).
- Geovekst (2016a) *Selbu-Tydal-Holtålen sør 1962*. Tilgjengelig fra: <https://www.norgebilder.no/> (Hentet: 10.06.20).
- Geovekst (2016b) *Selbusjøen-Tya-Nea 1952*. Tilgjengelig fra: <https://www.norgebilder.no/> (Hentet: 10.06.20).
- Halleraker, J. H. (2020) Habitat *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/habitat> (Hentet: 11.06.20).
- Heggenes, J. (1996) Habitat selection by Brown trout (*Salmo trutta*) and young atlantic salmon (S. SALAR) in streams: Static and dynamic hydraulic modelling, *Regulated Rivers: Research and Management*, 12(2-3), s. 155-169. Tilgjengelig fra: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030454195&partnerID=40&md5=1e1e2a74602a07d7e58f3f0176121802>.
- HydroCen (u.å.) *Miljødesign*. Tilgjengelig fra: <https://www.ntnu.no/hydrocen/milj-design> (Hentet: 24.02.2020).
- Jenssen, L. og Tesaker, E. (2009) *Veileder for dimensjonering av erosjonssikringer av stein*.
- Mellquist, P. (1976) *Informasjon om terskelprosjektet*.
- Moss, S. H. (2019) *Remote Sensing Data and Hydraulic Modelling of Nea*. Master, NTNU.
- NVE (2019) Nea fra Heggsettdammen til Selbusjøen. Tilgjengelig fra: <https://vannnett.no/portal/#/waterbody/123-285-R> (Hentet: 14.11.19).
- NVE (2020) *NEVINA (Nedbørfelt-Vannføring-INdeks-Analyse)* (Hentet: 3.2.20).
- Pettersson, L.-E. (2001) *Flomberegning for Nea-Nidelvvassdraget* Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Pulg, U. *et al.* (2018) *Tiltakshåndbok for bedre fysisk vannmiljø: God praksis ved miljøforberedende tiltak i elver og bekker*. (NORCE LFI 296). NORCE Bergen. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1051/m1051.pdf>.
- Skår, M. og Köhler, B. (2019) *Rekreasjonsinteresser i utvidet miljødesign: demovassdrag Nea*. Trondheim: HydroCen.
- Sørensen, J. *et al.* (2013) *Vannkraftkonsesjoner som kan revideres innen 2022*. (49/2013). NVEs hustrykkeri: NVE. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M49/M49.pdf> (Hentet: 3.2.20).
- Vøllestad, A. (2019) Anadrom *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/anadrom> (Hentet: 21.12.19).

# Vedlegg

**Vedlegg 1:** Polygoner til kontroll av kalibrering

**Vedlegg 2:** Høyder trinnterskler

**Vedlegg 3:** Dybdefordeling i elva for noen utforminger ved  $10 \text{ m}^3/\text{s}$

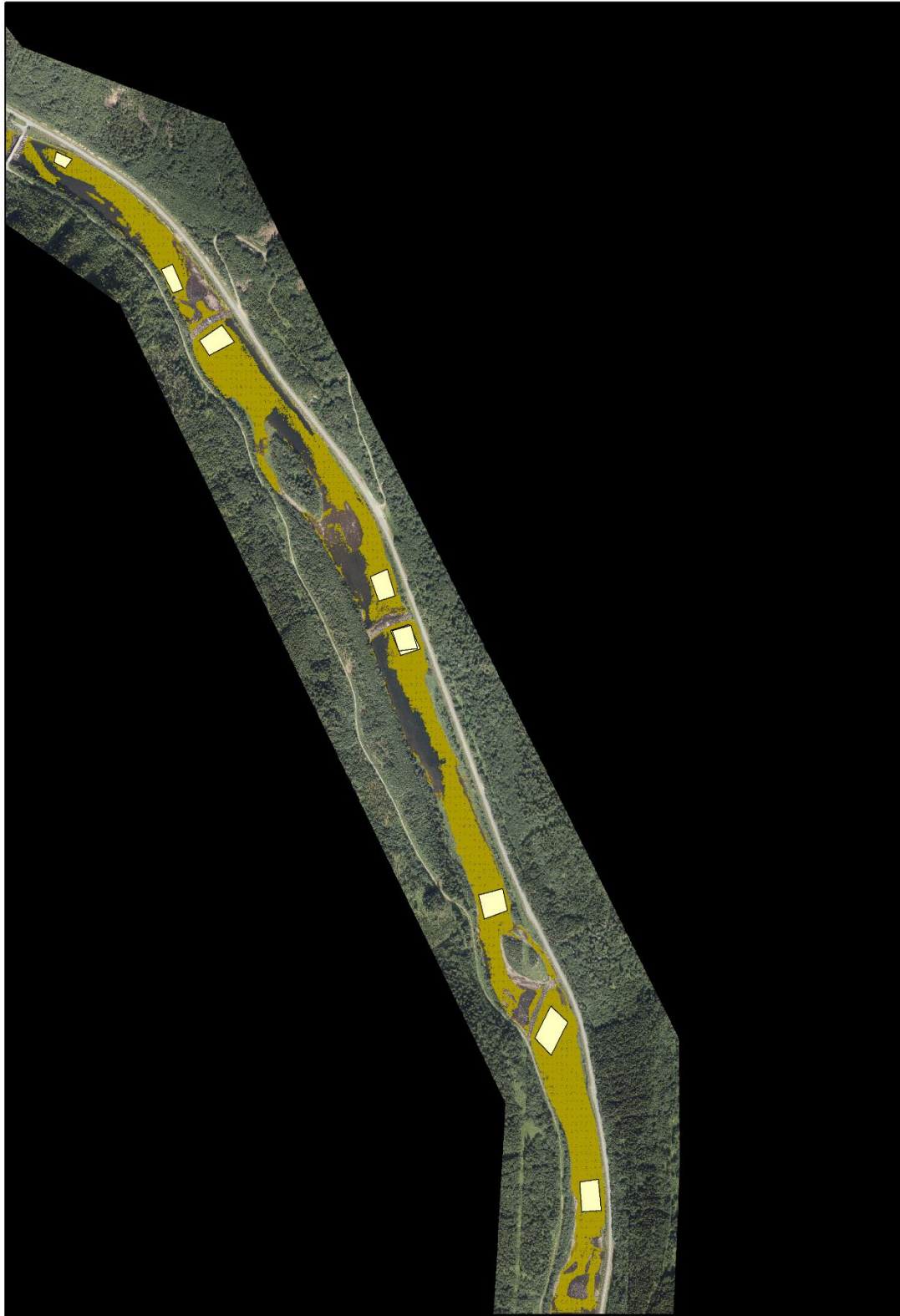
**Vedlegg 4:** Dybdefordeling over tersklene ved  $100 \text{ m}^3/\text{s}$

**Vedlegg 5:** Dybdefordeling i elva for noen utforminger ved  $100 \text{ m}^3/\text{s}$

**Vedlegg 6:** Visualisering av resultatene

# Vedlegg 1: Polygoner for kontroll av kalibrering

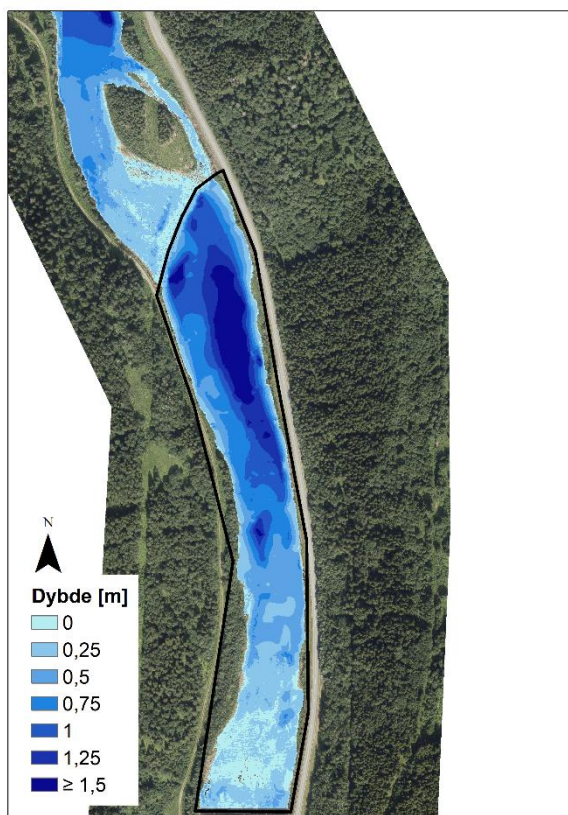
Polygonene i gult, Lidar-punkter fra vannoverflaten i oliven.



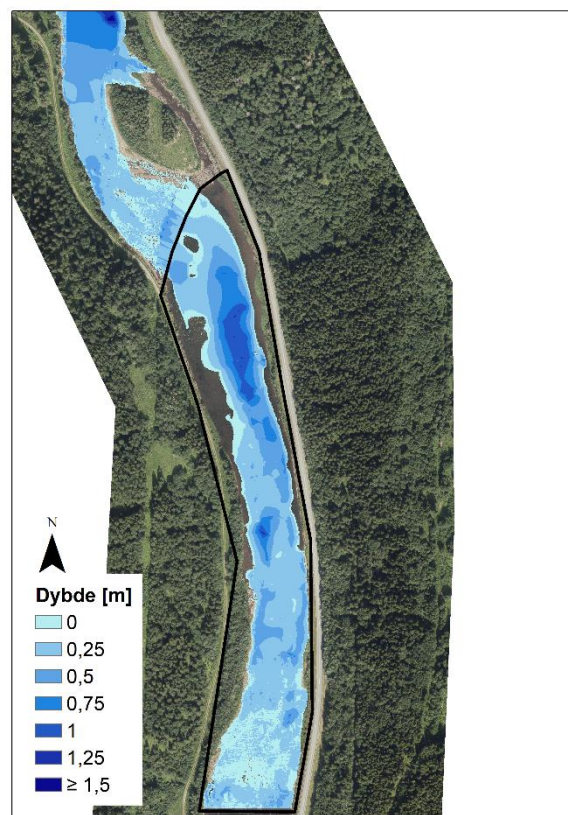
## Vedlegg 2: Høyder trinnterskel

<b>Terskel 24</b>			<b>Terskel 23</b>			<b>Terskel 22</b>		
	Trinn	Kant		Trinn	Kant		Trinn	Kant
Bunn	<b>197,7</b>	197,95	Bunn	<b>195,5</b>	195,75	Bunn	<b>194,2</b>	194,45
	197,92	198,17		195,77	196,02		194,45	194,70
	198,14	198,39		196,04	196,29		194,70	194,95
	198,36	198,61		196,31	196,56		194,95	195,20
Topp	<b>198,8</b>		Topp	<b>196,85</b>			195,20	195,45
						Topp	<b>195,70</b>	

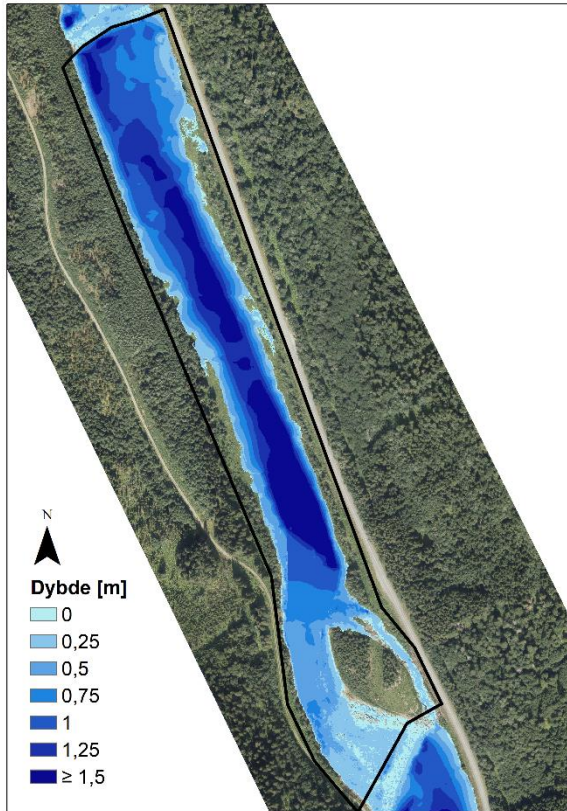
### Vedlegg 3: Dybdefordeling i elva for noen utforminger ved 10 m<sup>3</sup>/s



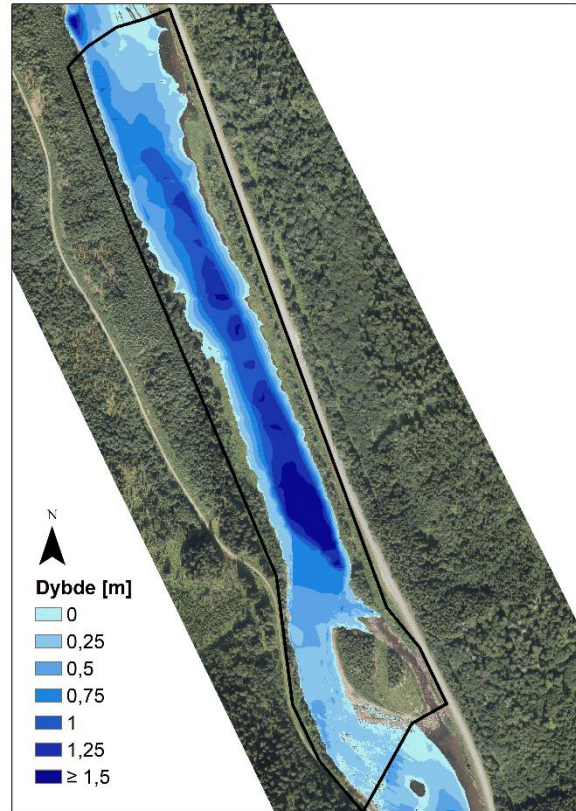
**Eksisterende terskel 24**



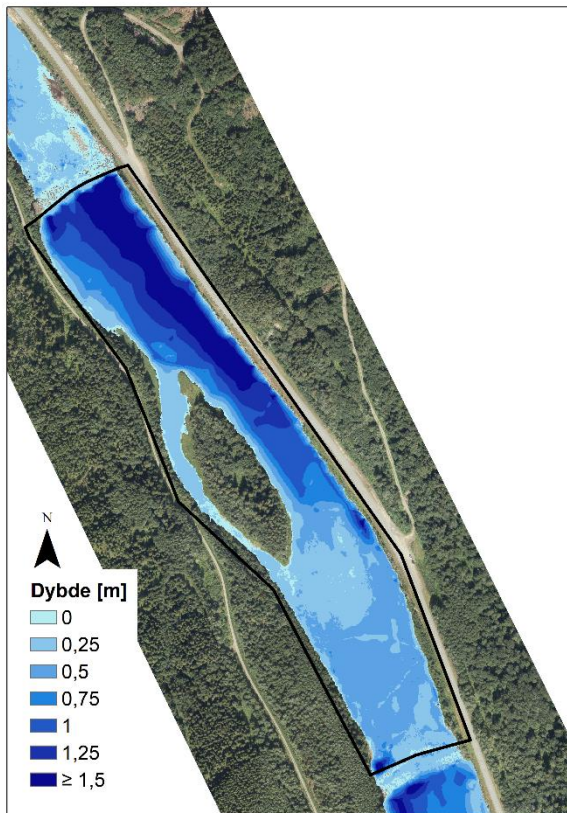
**Uten terskel 24**



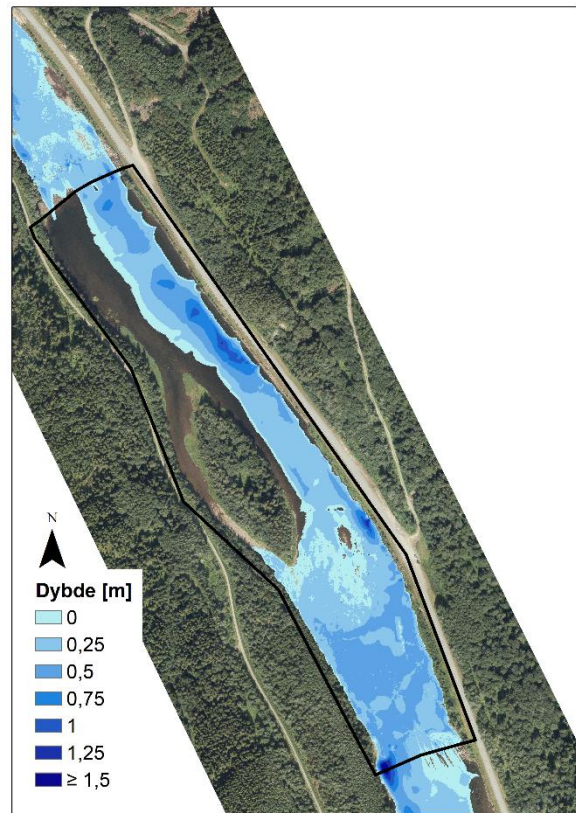
**Eksisterende terskel 23**



**Uten terskel 23**

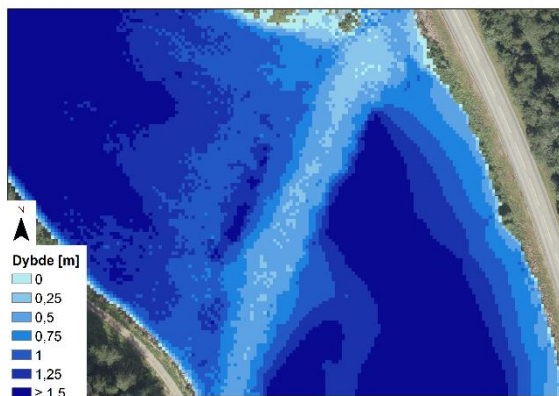


**Eksisterende terskel 22**

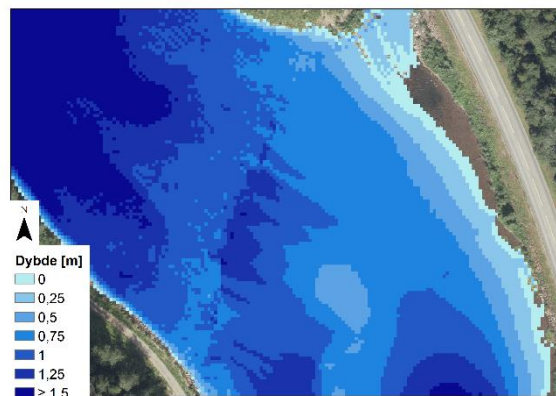


**Uten terskel 22**

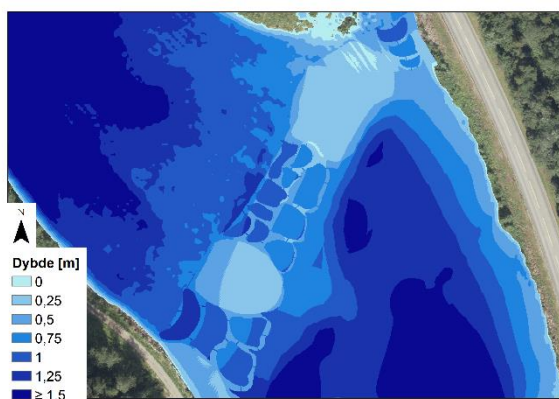
## Vedlegg 4: Dybdefordeling over tersklene ved 100 m<sup>3</sup>/s



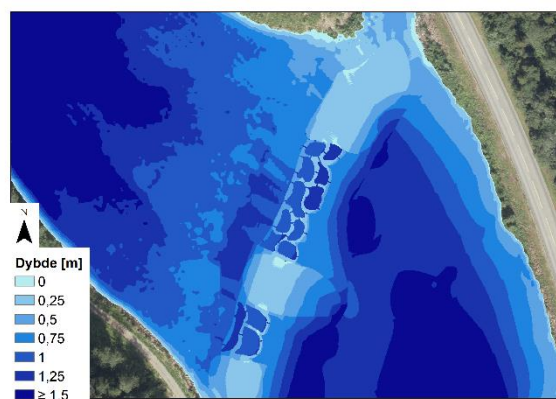
**Eksisterende terskel 24**



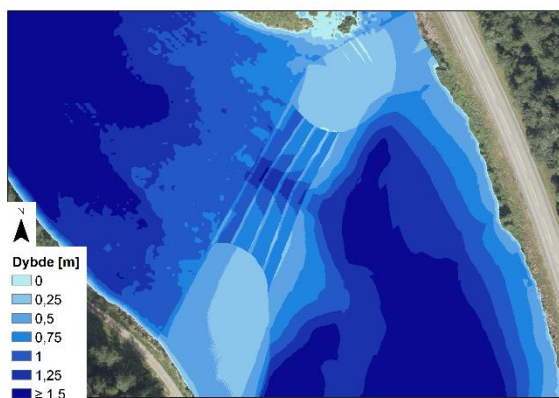
**Uten terskel 24**



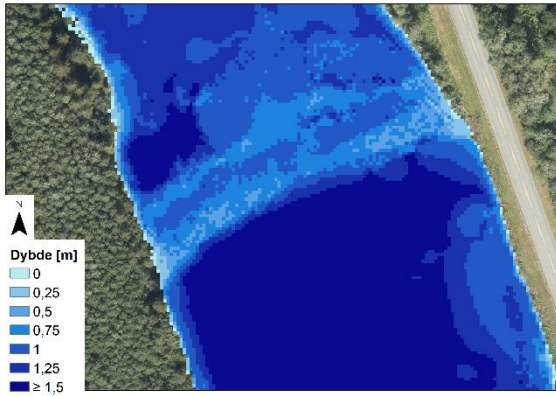
**Høy celleterskel 24**



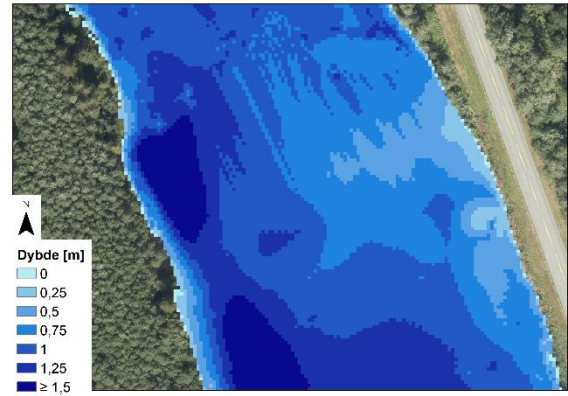
**Lav celleterskel 24**



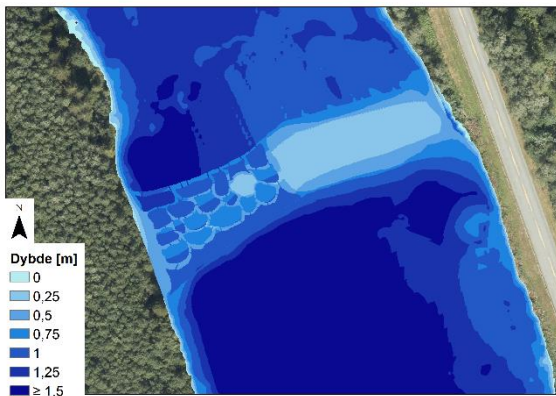
**Trinnterskel 24**



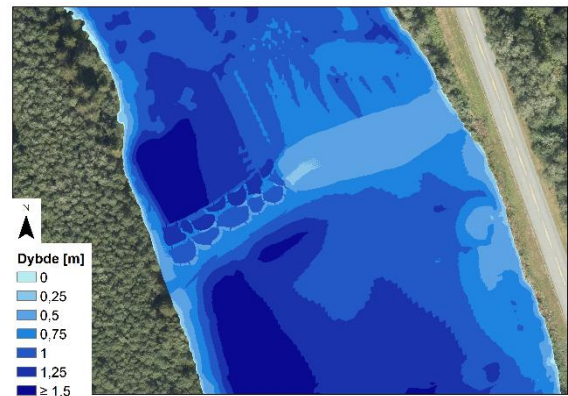
**Eksisterende terskel 24**



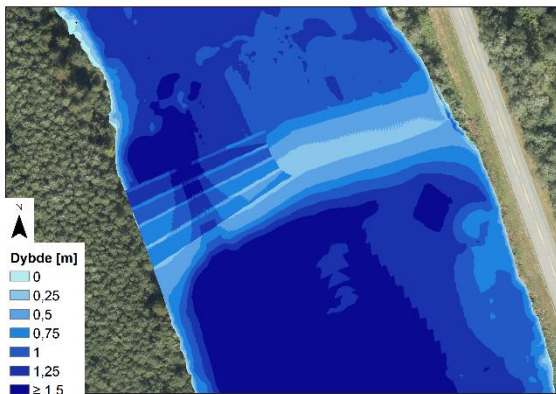
**Uten terskel 23**



**Høy cellederskel 23**

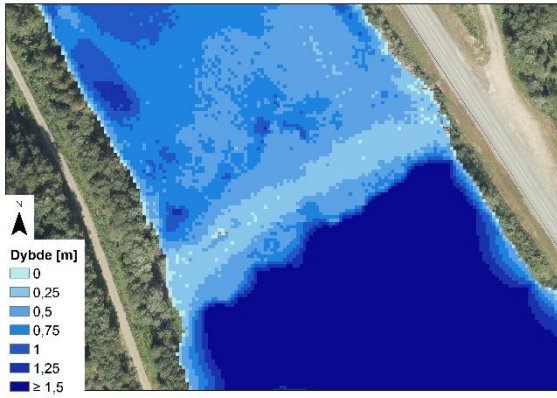


**Lav cellederskel 23**

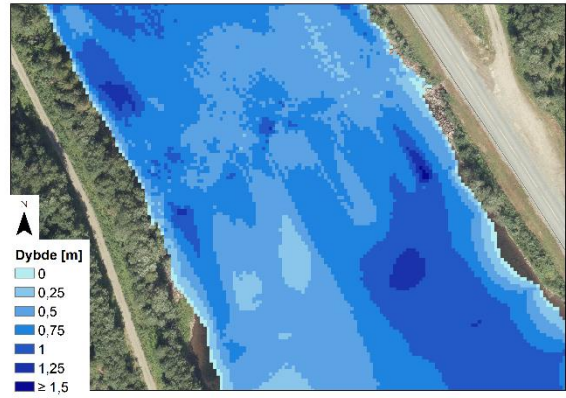


**Trinnterskel 23**

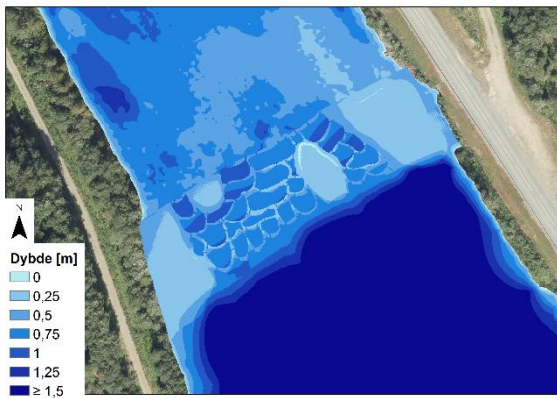




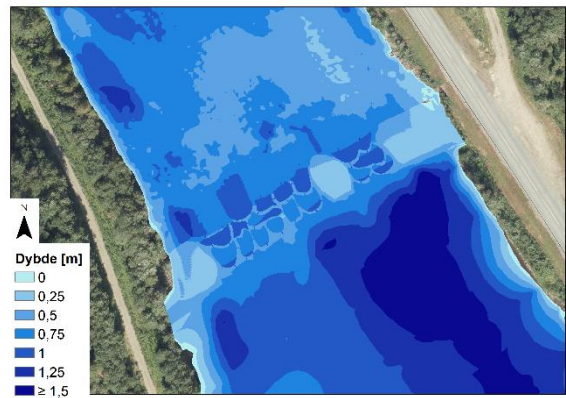
**Eksisterende terskel 22**



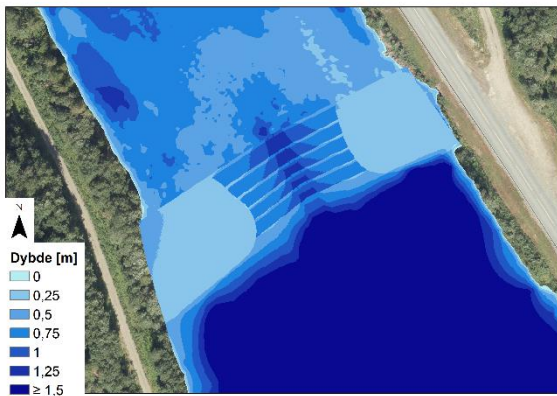
**Uten terskel 22**



**Høy celleterskel 22**

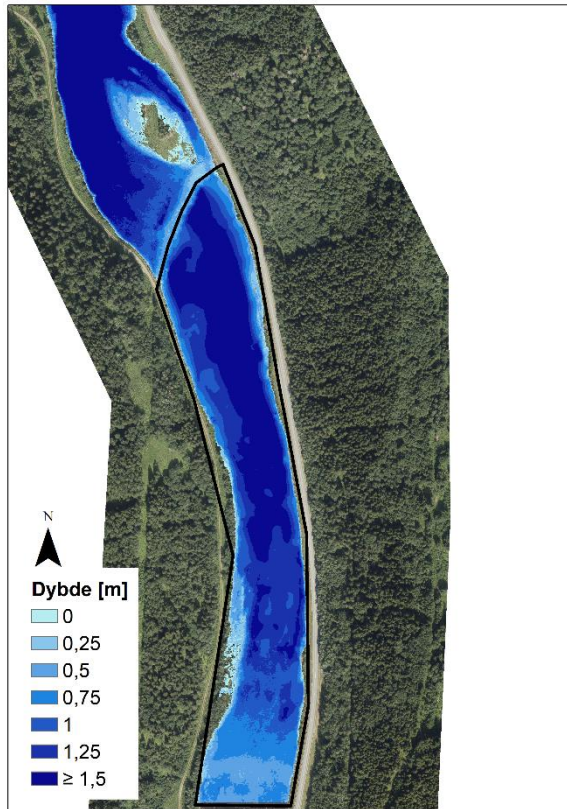


**Lav celleterskel 22**

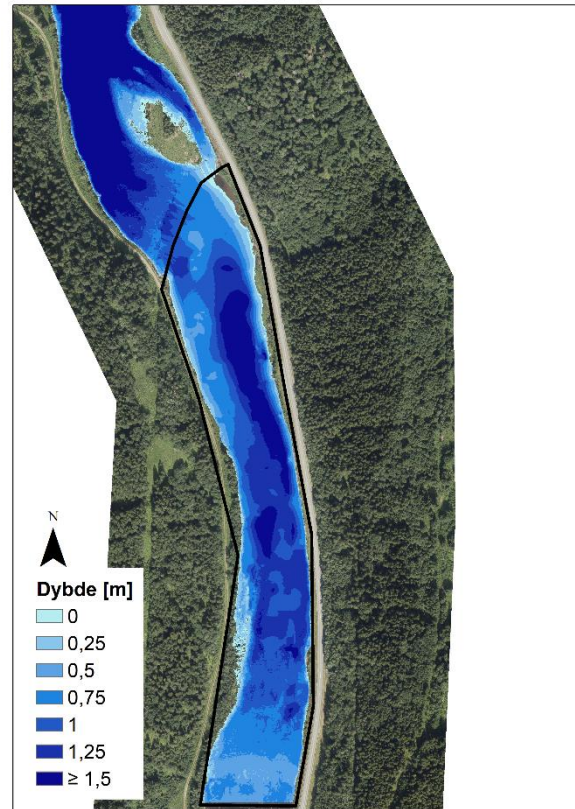


**Trinnterskel 22**

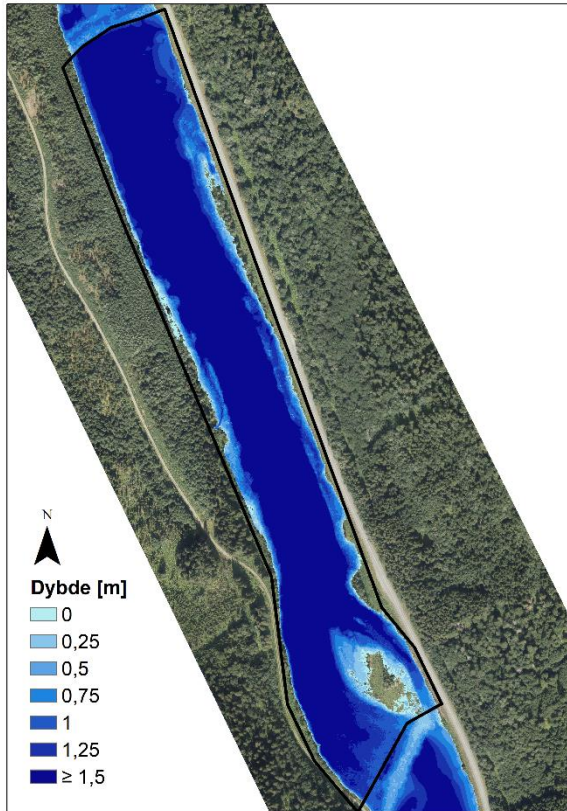
## Vedlegg 5: Dybdefordeling i elva for noen utforminger ved 100 m<sup>3</sup>/s



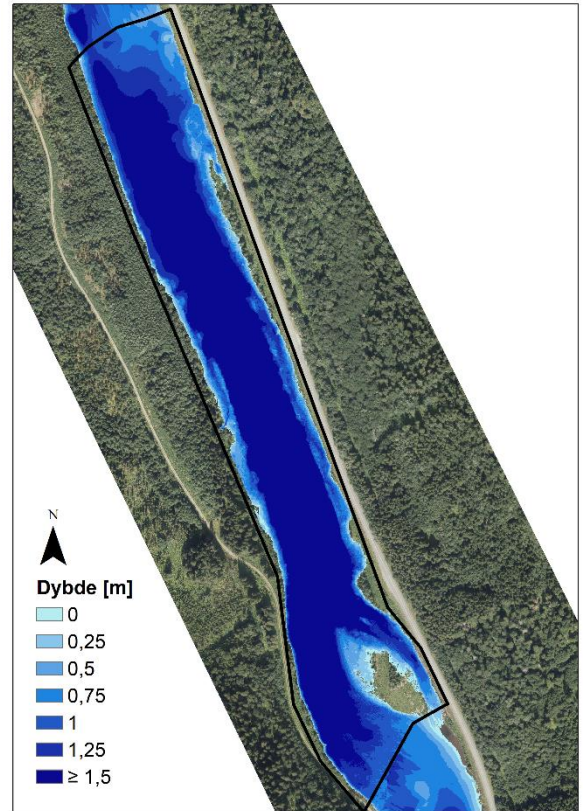
**Eksisterende terskel 24**



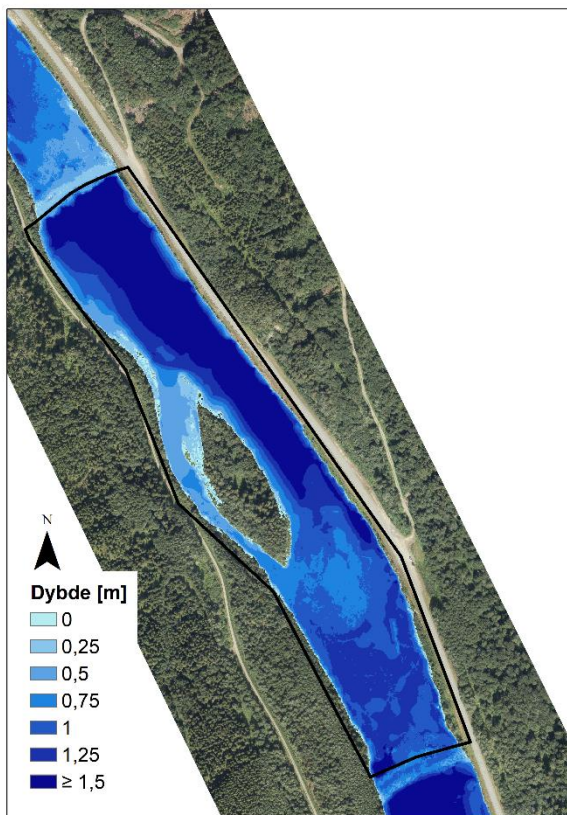
**Uten terskel 24**



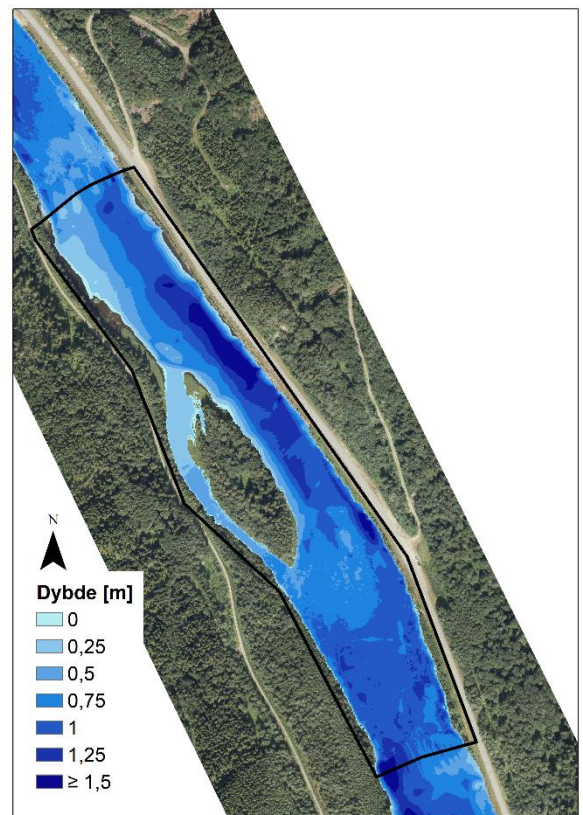
**Eksisterende terskel 23**



**Uten terskel 23**



**Eksisterende terskel 22**



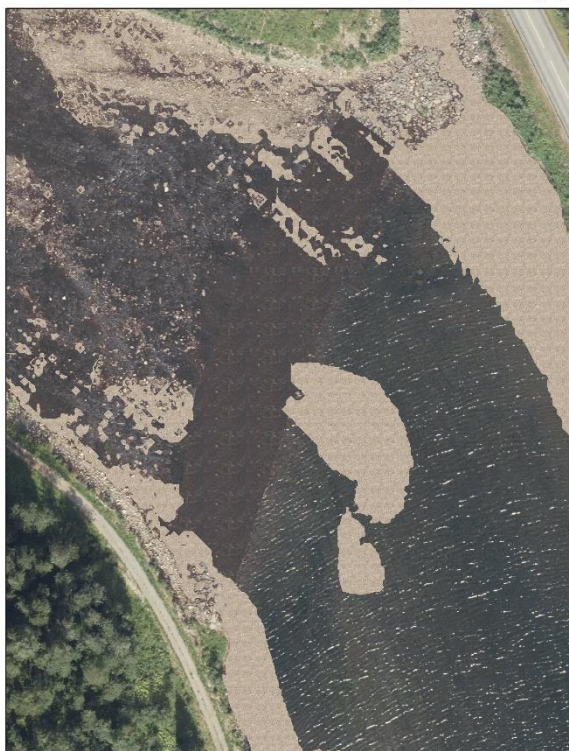
**Uten terskel 22**

## Vedlegg 6: Visualisering av resultatene

Alle figurene er laget i A4-størrelse, så figurene er omtrent  $\frac{1}{4}$  av original størrelse.

Uten terskel 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



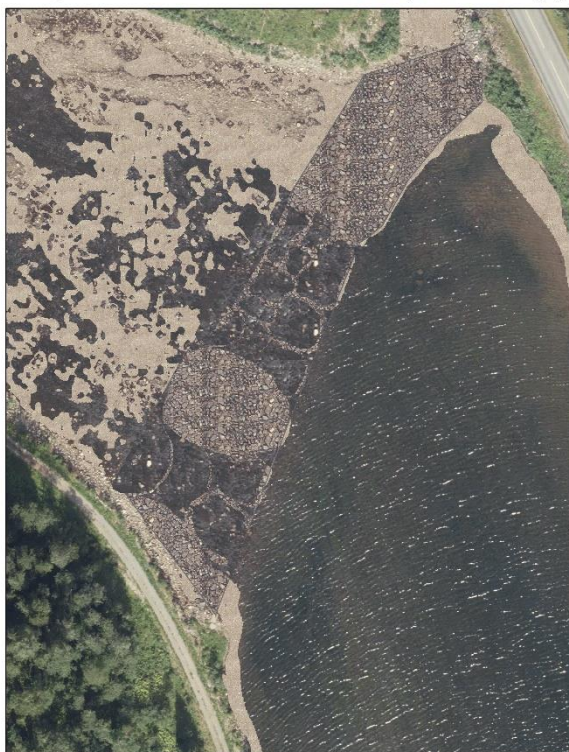
Uten terskel 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3000



Høy celleterskell 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Høy celleterskel 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3000



Lav celleterskel 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Lav celleterskel 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3000



Trinnterskel 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Trinnterskel 24

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3000



Fjernet terskel 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Uten terskel 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3500



Høy celleterskell 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Høy celleterskel 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3500



Lav celleterskell 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Lav celleterskell 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3500



Trinnterskel 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Trinnterskel 23

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3500



Fjernet terskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Uten terskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3500



Høy celleterskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Høy celleterskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3000





Lav cellederskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Lav cellederskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3000



Trinnterskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:600



Trinnterskel 22

Vannføring 2 m<sup>3</sup>/s 1:3000



