

Aneli Hovland Skaar

# Kvikkleireskred som konsekvens av elveerosjon

Ein simulasjonsbasert case om flaum i Nidelva

Bacheloroppgåve i Geografi  
Rettleiar: Pascal Emanuel Egli  
Mai 2024



Aneli Hovland Skaar



Aneli Hovland Skaar

# Kvikkleireskred som konsekvens av elveerosjon

Ein simulasjonsbasert case om flaum i Nidelva



Bacheloroppgåve i Geografi  
Rettleiar: Pascal Emanuel Egli  
Mai 2024

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet  
Fakultet for samfunns- og utdanningsvitskap  
Institutt for geografi



## Forord

Denne oppgåva er skriven som ei avsluttande oppgåve for mitt bachelorstudium i Geografi ved NTNU. Oppgåva er skriven på bakgrunn av mi eiga interesse for både naturfarar og korleis ein kan bruke ulike verktøy for å predikere eventuelt skadeomfang.

Oppgåva tek føre seg tema innan hydrologi, klima og kvartærgeologi samt korleis desse faktorane kan skape hendingar med store konsekvensar for menneske og samfunn. Geografi handlar om å sjå menneske og natur i samanheng, noko denne oppgåva gjer gjennom å analysere ei naturhending og kaste lys på konsekvensane denne hendinga vil føre med seg for samfunnet, samt korleis menneskeleg aktivitet påverkar naturlege hendingar. Oppgåva er basert på eit tenkt scenario som blir til dels til virtuell verkelegheit gjennom 2D-simulering. Scenarioet er basert på analyser av ulike aktsemdskart og rapportar frå relevante aktørar. Oppgåva har budd på utfordringar og mykje spennande utforsking, noko som har gjort oppgåva spennande og lærerik å jobbe med.

Eg vil gje ein takk til Pascal Emanuel Egli ved Institutt for Geografi ved NTNU for vegleing og mykje god hjelp på vegen. Hans hjelp har vore svært nyttig, særleg med funn av litteratur og hjelp til sjølvstendig forskning. I tillegg vil eg takke Anna Juárez Gómez for informativt læringsmateriell om bruk av simuleringsprogrammet HEC-RAS©. Til sist vil eg gje ein takk til alle medstudentar som har gitt meg nyttige råd og tatt gode kaffipausar med meg gjennom heile prosessen.

Aneli Hovland Skaar,

Trondheim, mai 2024



## Samandrag

Med klimaendringane er det venta at klima i Noreg vil endre seg til å bli betrakteleg mykje våtare. Med større vassmengder aukar også faren for både flaum og skred. Noreg bør difor førebu seg på ei framtid prega av fleire naturfarar og -katastrofar. I lys av dette, ser denne oppgåva på kor utsett bydelen Bakklandet i Trondheim vil vere for kvikkleireskred utløyst av flaum som ein mogleg konsekvens av auka nedbør. Oppgåva består av ein simulasjonsbasert case i kombinasjon med analyse av aktsemdskart og relevante rapportar i tillegg til kalkulasjonar basert på desse. Oppgåva argumenterer at kvikkleireskred i bydelen Bakklandet utløyst av flaum er lite sannsynleg, men ikkje umogleg. Sannsynet for kvikkleireskred grunna elveerosjon vil truleg auke på generell basis. Dette særleg i uregulerte vassdrag som er dårleg eller ikkje erosjonssikra. Gjennom oppgåva har eg kome fram til at HEC-RAS© er ei svært nyttig programvare for å analysere og å visualisere flaum. Denne oppgåva kan nyttast av til dømes nasjonale etatar og skredutsette kommunar som basis for å vurdere og undersøkje lokal og regional fare for liknande situasjonar. I tillegg bidreg oppgåva med nyttig innsikt for Trondheim Kommune angående situasjonen på Bakklandet.

# Innholdsliste

Forord.....	I
Samandrag.....	II
Innholdsliste .....	III
Figurliste .....	VI
1. Introduksjon.....	1
1.1 Bakgrunn for oppgåva.....	1
1.2 Avgrensing og problemstilling.....	1
1.3 Områdepresentasjon.....	2
1.3.1 Nidelvassdraget .....	2
1.3.2 Bakklandet .....	3
2. Teori.....	4
2.1 Marin leire .....	4
2.1.1 Kvikkleire .....	5
2.1.2 Utløysande faktorar .....	6
2.2 Hydrologi .....	6
2.2.1 Erosjon, transport og sedimentasjon.....	6
2.2.2 Elveavlaupet .....	7
2.2.3 Flaum .....	8
2.2.4 Klima .....	8
2.3 Kvikkleire og samfunn .....	9
2.3.1 Historiske skred .....	9
2.3.2 Konsekvensar av kvikkleirekred på Bakklandet .....	10
2.3.3 Erosjonssikring i Nidelva .....	11



3. Metode.....	13
3.1 Datainnsamling og -førebuing.....	13
3.1.1 Bestemming av studieområde.....	13
3.1.2 Litteratur.....	15
3.1.3 Romleg data.....	15
3.1.4 Førebuing av data.....	15
3.2 2D-simulering.....	16
3.2.1 HEC-RAS©.....	16
3.2.2 Framgangsmåte.....	16
3.2.3 Definerings av geometri.....	17
3.2.4 Flaumscenario.....	19
3.3 Beregninger og kalkulasjonar av sedimenttransport.....	20
3.3.1 Hjulstrøms diagram.....	20
3.3.2 Meyer-Peter & Müller korrelasjon.....	20
4. Resultat.....	23
4.1 – Flaumanalyse.....	23
4.1.1 Elvekvalitetar.....	24
4.2 - Sedimenttransport og erosjon.....	27
4.2.1 Hjulstrøms diagram.....	27
4.2.2 Meyer-Peter & Müller korrelasjon.....	28
5. Diskusjon.....	31
5.1 – Sannsyn for flaum.....	31
5.2 – Sannsyn for skred.....	31
5.3 – Feilkjelder.....	33
6. Konklusjon.....	35

7. Referansar .....	37
8. Kjelder for romleg data.....	40
9. Vedlegg.....	42

## Figurliste

Figur 1: Områdepresentasjon: Nidelva og Bakklandet.....	2
Figur 2: Lausmassekartet viser at ved Bakklandet kuttar elva inn i marin leire. Lausmassekart frå NGU.....	4
Figur 3: Utvikling av kvikkleire. Foto: Kristin Ødegård Bryhn, NVE (2017).....	5
Figur 4: Hjulströms diagram. Figur: Naganna et al. (2017).....	7
Figur 5: Erosjonssikring i Nidelva ved Bakklandet 2009. Foto: Kristin Skei (2009).....	12
Figur 6: Erosjonssikring i Nidelva ved Bakklandet mars 2024. Foto: Aneli Hovland Skaar (2024) .....	12
Figur 7: Kvikkleire faregrad Bakklandet. Utklipp frå NVE temakart kvikkleiresoner (2018).....	13
Figur 8: Kvikkleire risiko. Utklipp frå NVE temakart kvikkleiresoner (2018).....	14
Figur 9: Flaumsone Nidelva. Utklipp frå NVE temakart flomsone (2001).....	14
Figur 10: Framgangsmåte i HEC-RAS. Iqbal (2023).....	17
Figur 11: Bilete av korleis pilarane påverkar vasstraumen. Foto: Aneli Hovland Skaar (2024)..	18
Figur 12: Krysseksjonar og bruer på Bakklandet, tabell over bruer og tal pilarar, brumodellering frå HEC-RAS© Bridge Culvert Data.....	19
Figur 13: Breidda av Nidelva ved Bakklandet. Målinga er gjort ved bruk av måleverktøyet i NVE sine karttjenester. ....	21
Figur 14: Shields diagram. Figur frå Bosboom & Stive (2021).....	22
Figur 15: Flaumområde for 200-års flaum i Nidelva med vassdjupn (HEC-RAS) og faregrad for kvikkleireskred (NVE).....	23
Figur 16: Kantlinjer, tverrsnitt og vasshastigheit.....	24
Figur 17: Vasshastigheit ved flaum Q200. Resultat av HEC-RAS© analyse. Lausmassekart frå NGU.....	25
Figur 18: Vasstand ved Bakklandet ved 200-års flaum for kantlinke 3 og 4. Utklipp frå HEC-RAS© RASMapper Plot.....	25
Figur 19: Maks vassdjupn ved flaum Q200. Resultat frå HEC-RAS© flaumanalyse.....	26
Figur 20: Water Surface Elevation for tverrsnitt 1 (t.v.) og vasshastigheit for kantlinje 2 (t.h). Utklipp frå HEC-RAS© RASMapper Plot.....	26
Figur 21: Hjulströms diagram resultat for flaum Q200 for to ulike sedimentstorleikar. Utklipp frå ESRI Storymaps©.....	27

Figur 22: Shields diagram resultat 200-års flaum. Utklipp frå ESRI Storymaps© ..... 28

Figur 23: Shields diagram resultat gjennomsnittleg avrenning. Utklipp frå ESRI Storymaps© .. 29

# 1. Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn for oppgåva

Denne bacheloroppgåva vil undersøkje kva påverknad flaum i Nidelva vil ha på bydelen Bakklandet med tanke på kvikkleireskred. Det finnst lite forskning på kvikkleireskred relatert til elveerosjon, men det finnst fleire kjelder som hevder at kvikkleireskred ikkje kan koplast direkte til hydrologiske faktorar, til dømes Okamoto et al. (2004). Likevel meiner Norsk Klimaservicesenter at kvikkleireskred grunna elveerosjon vil krevje stor merksemd i framtida, spesielt i Sør-Trøndelag der det er mykje kvikkleire (Norsk Klimaservicesenter 2016). Norsk Klimaservicesenter anslår at med klimaendringane vil sannsynet for regnflaum, kraftig nedbør og stormflo auke, noko som kan føre til auka erosjon i elvelaupa og dermed potensielt leie til fleire kvikkleireskred.

Difor vil eg med denne oppgåva undersøkje om ein eventuell flaum i Nidelva kan føre til kvikkleireskred i bydelen Bakklandet. Grunnen til at akkurat Bakklandet er eit interessant analyseområde er fordi bydelen ligg i ei skråning der elveerosjon truleg er stor då skråninga ligg ved ein yttersving av Nidelva. Dette, i tillegg til andre faktorar, gjer at området har både høg faregrad og høg risikograd for kvikkleireskred. Informasjonen frå denne oppgåva vil vere relevant for blant andre kommunen med tanke på eventuell utbygging og/eller forbetring av erosjonssikring i bydelen. Det er også viktig for tryggleiken til innbyggjarane i Trondheim då eit eventuelt kvikkleireskred i bydelen vil ha store konsekvensar for alle som oppheld seg i byen.

## 1.2 Avgrensing og problemstilling

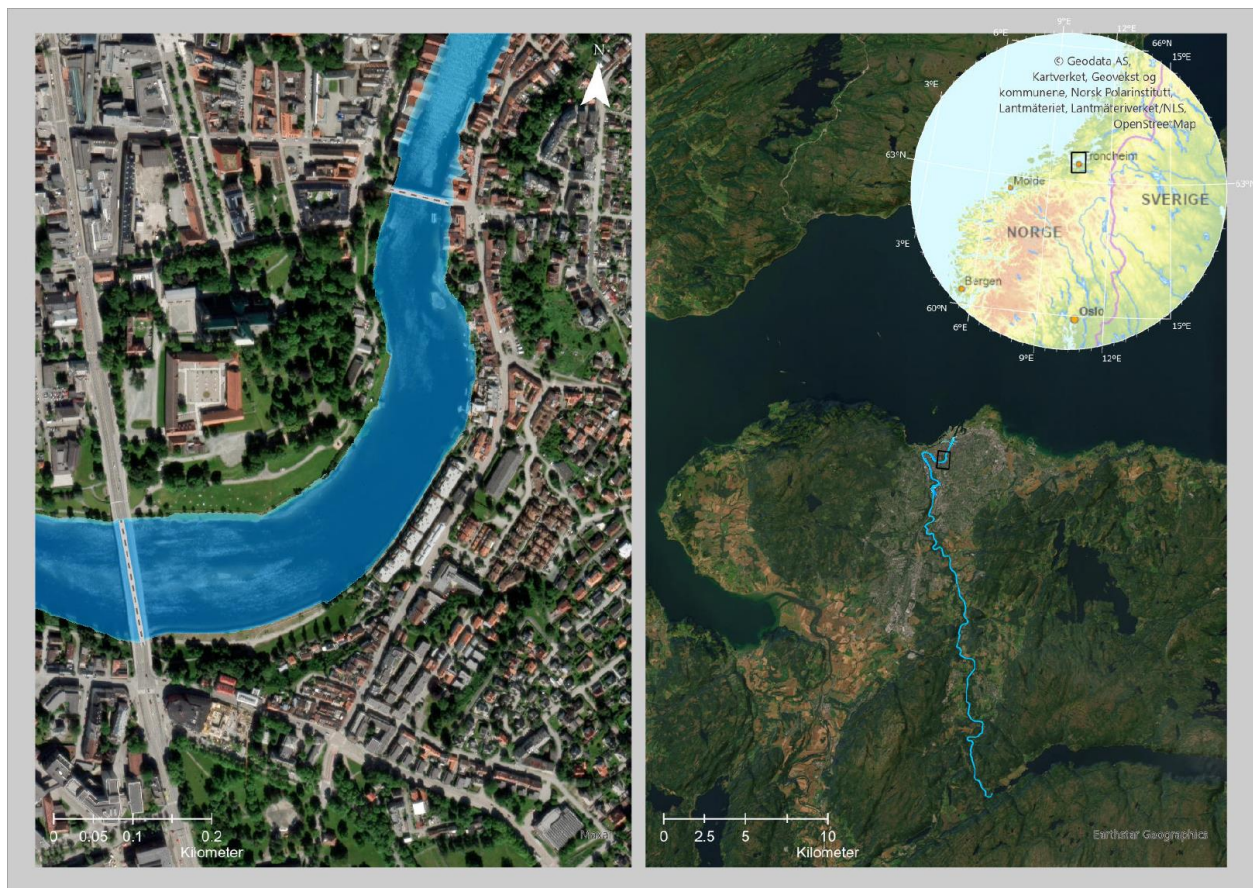
Kvikkleireskred og hydrologi er to store studieområder. For å studere samanhengen mellom desse på ein framtidsrelevant måte har eg vald å avgrense oppgåva til å fokusere på kvikkleireskred relatert til elveerosjon, spesifikt i Nidelva. Elveerosjon kan skje på fleire måtar i ulike typar vassdrag. For å avgrense oppgåva nærmare har eg difor vald å sjå på om ein eventuell 200-års flaum kan erodere nok til å utløyse eit kvikkleireskred i Nidelva. Då Nidelva omfattar eit stort område med fleire relevante interesseområder har eg vald å fokusere på bydelen Bakklandet mellom Elgeseter bru og Gamle bybru. Dersom det går eit kvikkleireskred på Bakklandet vil det gå utover dei omtrent 2000 menneska som bur der, næringar og historiske bygningar, i tillegg til

at det kan demme opp Nidelva og ramme omkringliggende områder. Eit kvikkleireskred på Bakklandet vil altså ha mange og store konsekvensar. På bakgrunn av dette har eg kome fram til problemstillinga:

*Kva påverknad vil ein 200-års flaum og påfølgjande elveerosjon ha på sannsyn for kvikkleireskred ved bydel Bakklandet?*

### 1.3 Områdepresentasjon

Figur 1 viser ei oversikt over interesseområdet til denne oppgåva.



Figur 1: Områdepresentasjon: Nidelva og Bakklandet.

#### 1.3.1 Nidelvassdraget

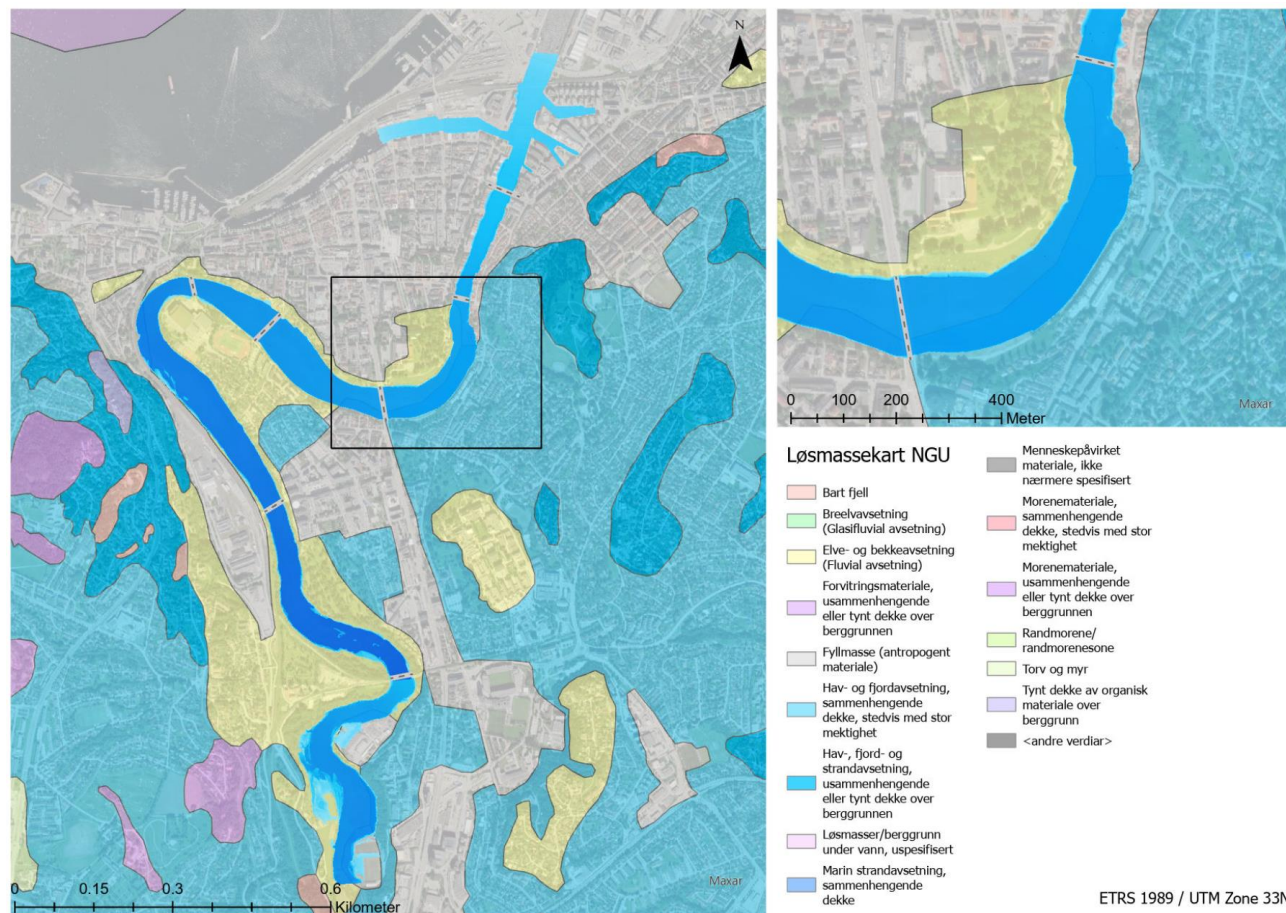
Nidelva er ein del av Nea-Nidelvassdraget og startar sitt laup frå Selbusjøen ved omtrent 160 m.o.h. og renn omtrent 30 km før den når Trondheimsfjorden ved Brattøra (Geodata, 2024).

Vassdraget har eit nedbørsfelt på 3119 km<sup>2</sup> frå Selbusjøen til utlaupet ved Trondheimsfjorden (Geovekst, 2024). Nidelva er eit regulert vassdrag med laksebestand nedstraums Nedre Leirfoss, noko som medfører at vassdraget har ein minimum vassføring på 30 m<sup>3</sup>/s og årleg middelvassføring på 95 m<sup>3</sup>/s (Harby et al., 2004).

Trondheim ligg ved kysten ved 63° nord og er prega av typisk kystklima der gjennomsnittleg temperatur og nedbør for perioden 1971-2000 i Trondheim var 5,5 °C / 950 mm (Norsk Klimaservicesenter 2016).

### 1.3.2 Bakklandet

Bakklandet oppstod som bydel tidleg på 1600-talet som respons på den store veksten Trondheim sentrum opplevde på den tida. Bydelen starta som ein forstad og utvikla seg til å huse både industri og handel (Bakklandet.info, 2011). I dag består Bakklandet hovudsakleg av diverse næringar med butikkar, kafear og restaurantar i tillegg til bustadar. Bydelen er kanskje mest kjend for den gamle bybrua som koplar Bakklandet til Midtbyen. Bakklandet ligg i ein yttersving av Nidelva i tillegg til at bydelen er bygd på marin leire (Figur 2), noko som gjer den historiske bydelen særleg utsett for kvikkleireskred. Dette er fordi erosjonen frå Nidelva på bydelen vil vere størst i yttersvingen av elva då vasshastigheita typisk er størst her. I tillegg har strøymeretninga til vatnet og sekundær sirkulasjon innverknad på erosjonen (Chanson, 2004; Syversen, 2016).



Figur 2: Lausmassekartet viser at ved Baklandet kuttar elva inn i marin leire. Lausmassekart frå NGU

## 2. Teori

### 2.1 Marin leire

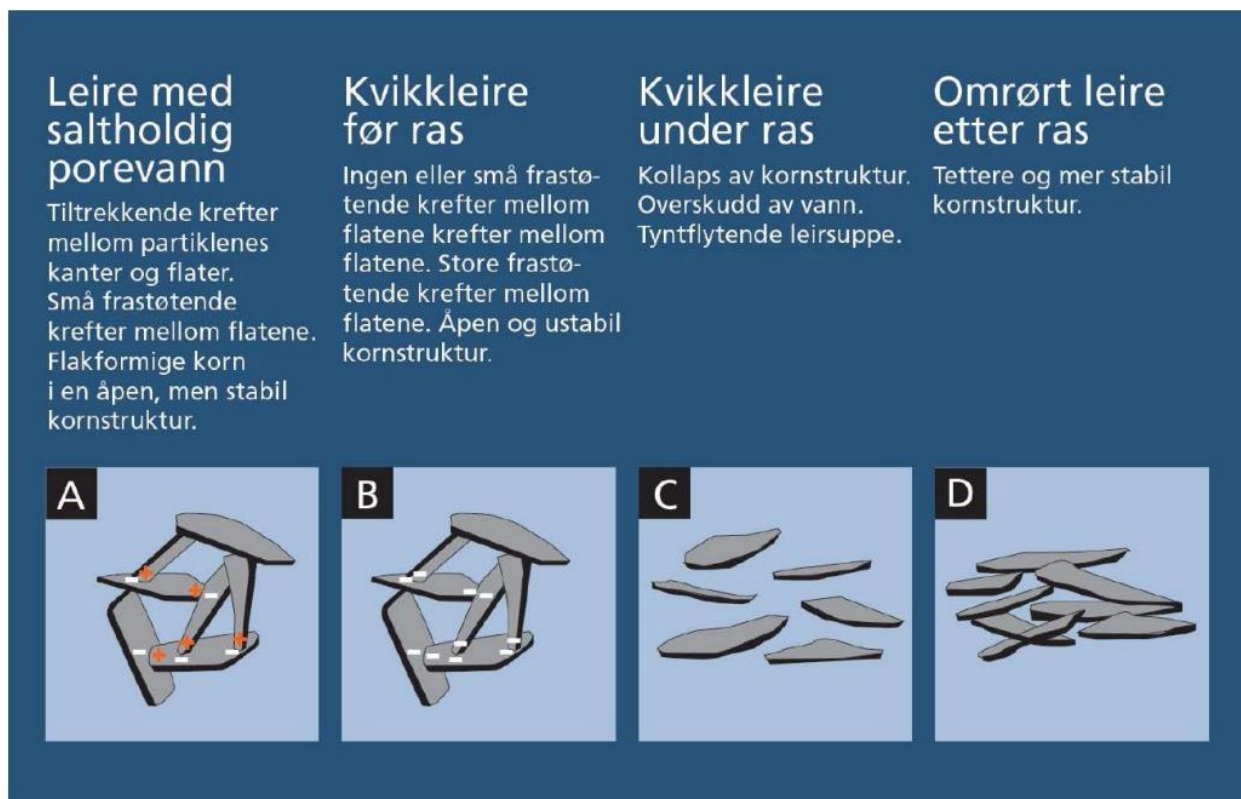
For 15000–11600 år sidan trakk isbreen som dekkja Trøndelag seg tilbake og la frå seg lausmassar som grus, sand og leire. Breelvane førte med seg slam ut i fjorden som vart avsett som leire på havbotnen (Reite et al., 1999). Grunna dei mektige ismassane, og det høge trykket desse førte til (glasial isostatisk justering), låg store delar av dagens Trondheim kommune under havnivå rett etter issmeltinga (Reite et al., 1999). I åra etter issmeltinga fram til i dag har jordskorpa heva seg grunna trykklettet jordskorpa opplevde etter issmeltinga. Dette kallast *isostatisk heving* (Trømborg, 2006). Grunna denne landhevinga har vi hatt ei *strandforskyving* gjennom heile etteristida (Reite et al., 1999). Det er denne strandforskyvinga som har gjort at dagens Trondheim er bygd på dei *marine leirene* som vart avsett i fjorden rett etter førre deglasiasjon. Sedimenta som



vart avsett på gamal fjordbotn kom med landhevinga opp og vart til tørt land. Det høgaste nivået havet låg på då isen trakk seg tilbake, såkalla *marin grense*, var på 175 meter over dagens havnivå (Fremstad & Thingstad, 2007).

### 2.1.1 Kvikkleire

Den marine leira som etter kvart kom opp på land var metta av salt grunna sjøvatnet den vart avsett i. Salt-iona inneheld elektrostatiske krefter som bind leirpartiklane saman og gir leira ein «korthusstruktur» (Syversen, 2016). Denne leira er relativt stabil. Dersom salta i leira vert vaska ut og leira vert overbelasta kollapsar kornstrukturen og leira blir ustabil eller «kvikk» (Figur 3). Dette vil seie at leirepartiklane flyter i sitt eige porevatn og blir tyntflytande. Kvikkleire er med andre ord marin leire metta på salt som har blitt ustabil grunna overbelasting eller forstyrring (Wiig et al., 2019). Det er dette som dannar eit kvikkleireskred. Eit slikt skred kan ta menneskeliv, øydelegge infrastruktur og demme opp elvar som seinare kan føre til ei destruktiv flodbølge dersom vatnet som demmast opp av kvikkleire bryt gjennom massane (Tillerbakk, 2011).



Figur 3: Utvikling av kvikkleire. Foto: Kristin Ødegård Bryhn, NVE (2017)

### 2.1.2 Utløysande faktorar

I følge NVE utløysast dei fleste kvikkleireskred av menneskeleg aktivitet eller naturlege prosessar som erosjon i elvar og bekkar (Hillestad, 2015). Menneskelege inngrep som til dømes fylling i topp av skråning, graving i skråningsfot og bakkeplanering er døme på inngrep som har utløyst skred (Wiig et al., 2019). NVE anslår at kvikkleire dannast når porevatnet i leira vaskast ut, men at dette er ein prosess som tar hundre til tusenvis av år. Difor er, i følge NVE, hyppigare og meir intenst nedbør ikkje ein direkte årsak til kvikkleireskred. Likevel anslår Norsk Klimaservicesenter at med auka nedbør er det potensielt auka sannsyn for kvikkleireskred. Dette er fordi hyppigare og kraftigare nedbør fører til auka vassføring i elver og bekker, som igjen kan føre til auka erosjon i kvikkleireutsette områder langs elvelaupet (Wiig et al., 2019).

## 2.2 Hydrologi

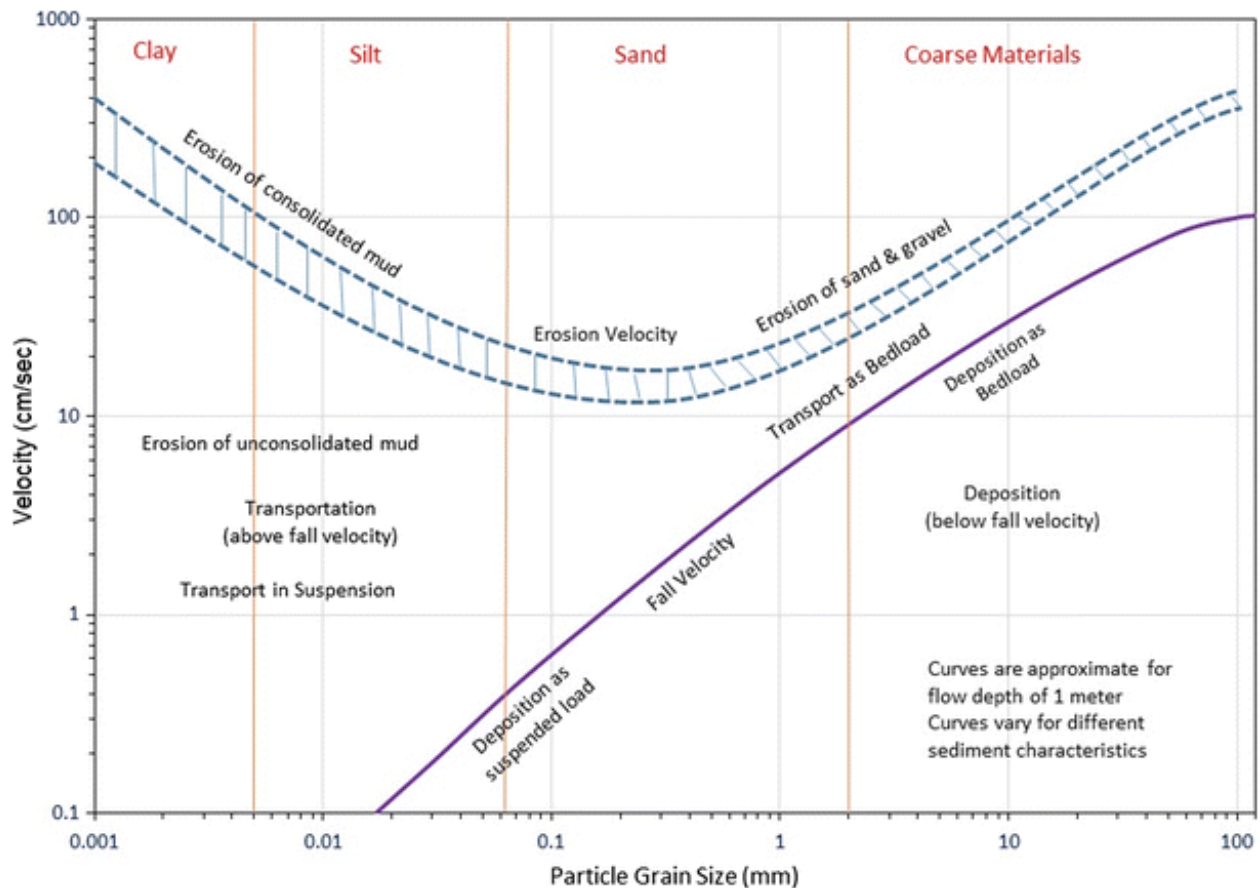
Hydrologi omhandlar korleis vatn beveger seg og fordelar seg på jorda. I denne seksjonen vil klima og faktorane som påverkar elva sin geomorfologi presenterast.

### 2.2.1 Erosjon, transport og sedimentasjon

Når ei elv eroderer lausmateriale er det lausmassen sin tregleik og vekt som bestemmer kor vidt lausmassane vil la seg erodere (Sulebak, 2018). «Erosjon oppstår når det blir fjerna meir sediment enn det blir avsett» (Syversen, 2016). I ei elv skjer dette ofte i størst grad i yttersvingen då vasshastigheita er størst her. Ofte kan erosjon i yttersvingen føre til underkutting grunna sekundærsirkulasjon, noko som kan danne ustabile parti i elvelaupet. Sekunder sirkulasjon er strøymemønster som ikkje går langs med elvelaupet men på tvers av det (Corney et al., 2006). Erosjonen er ofte større i smale bekkar då dei «...ofte har meir turbulente straumar og lokal erosjon på grunn av større tilknytning til skråningane» (Syversen, 2016). Materialet som blir erodert transporterast vidare ned elvelaupet både som faste og oppløyste stoff. Der vasshastigheita tek av eller sedimenta møter på hindringar i elvelaupet vil sedimenta bli avsett (Sulebak, 2018). Dette er til dømes når elva treffer stillestående vatn, i innersvingen av ein meandersving der vasshastigheita tek av, eller ved oppdemming grunna hindringar i elvelaupet som hindrar sedimenta i å transporterast vidare.

### 2.2.2 Elveavlaupet

Det er mange faktorar som påverkar geomorfologien og energien til ei elv, blant annet vasshastigheit og vassføring, elveleiet si tverrform og hydraulisk radius, samt sedimentstorleik (Sulebak, 2018). For denne oppgåva er vasshastigheita og vassføringa viktigast. I følgje Sulebak er vasshastigheit «...eit mål på strekninga vatnet tilbakelegger i løpet av ei viss tid». Litt forenkla er det at vasshastigheita (V) multiplisert med tverrarealet (A) gir vassføringa (Q) i form av likninga  $Q = AV$  (Sulebak, 2018). Det er difor desse faktorane som avgjer sedimentasjons- transport- og erosjonsevna til ei elv. Dette visualiserast i Hjulströms diagram (Figur 4) som utgjer ei kurve basert på sedimentstorleik og vasshastigheit. Hjulströms diagram vart publisert av Filip Hjulström i 1939, der han målte gjennomsnittleg strøymehastigheit for partiklar av ulik storleik ved å undersøke ved kva vasshastigheit dei ulike partiklane viste rørsle (*Fluid flow: Shields and Hjulstöms diagrams*, u.d.).



Figur 4: Hjulströms diagram. Figur: Naganna et al. (2017)

### 2.2.3 Flaum

Kva som er definisjonen på flaum er noko uklart, men flaum definerast generelt som ein vasstand som er så høg at elva går over sine breidder (Sulebak, 2018). Flaum kan oppstå både som konsekvens av hyppig og langvarig nedbør, grunna snøsmelting om våren, eller ein kombinasjon (*Orddliste for flom*, 2024). Når det er snakk om flaum refererer ein ofte til flaumens *gjentaksintervall*. Eit gjentaksintervall er eit mål på kor sannsynleg det er at ein flaum av ein viss storleik hender. Ein 200-års flaum, altså ein flaum med gjentaksintervall på 200 år, vil i gjennomsnitt hende kvart to-hundrede år. Det betyr derimot ikkje at det ikkje kan oppstå 200-års flaum to år på rad, sjølv om dette er heller sjeldan (Glad et al., 2022). Difor er det meir riktig å seie at ein 200-års flaum har 0,5% sannsyn for å skje kvart år.

Når ein omtalar flaum skil ein mellom ulike flaumregimer og kva som er årsaka til flaumen. Ulike nedbørsfelt klassifiserast av ulike flaumregimer avhengig av om området er prega av kraftig nedbør, stor snøsmelting eller inneheld områder med bre. Eit typisk regnflaumregime er definert av at «meir enn 2/3 av åra hadde største årlege flaum karakterisert som regnflaum» (Steinus et al., 2014).

### 2.2.4 Klima

I Januar 2016 publiserte Norsk Klimaservicesenter ein klimaprofil for Sør-Trøndelag. Klimaprofilen baserer seg på rapporten *Klima i Norge 2100* som samanliknar korleis klima vil bli mot slutten av dette hundreåret med korleis det var i slutten av førre hundreår (Hanssen-Bauer et al., 2016). Sør-Trøndelag er ein region med store ulikskapar i både temperatur og nedbør. Fordi mitt interesseområde er Trondheim vil eg difor berre omtale det rapporten anslår for dei kystnære strøka i Sør-Trøndelag.

Klimaprofilen anslår at regionen vil oppleve ein temperaturouke på 4,0 °C som då vil opplevast størst i indre strøk basert på klimascenario RCP 4.5 (Hanssen-Bauer et al., 2016). Vintertemperaturen vil auke og det vil bli sjeldan med svært låge vintertemperaturar (Norsk Klimaservicesenter 2016). Dette vil føre til at nedbøren på vinterstid vil falle som regn i større grad enn snø, noko som kan bidra til å auke vassføringa både om hausten og om vinteren.

Rapporten anslår at nedbørsintensiteten for døgn med kraftig nedbør vil auke med ~20%. Norsk Klimaservicesenter meiner at ein kan rekne med eit klimapåslag på minst 40% for regn med kortare varigheit enn 3 timar (Norsk Klimaservicesenter 2016). Dette betyr auke i hyppig og intens nedbør.

Den predikerte auka nedbøren kan føre til problem knytt til auka vassføring og overflateavrenning. I dag er det regnflaum på haust og vinter som dominerer ved kysten, men Nidelva er eit regulert vassdrag og dominerast av snøsmelting om våren. (Norsk Klimaservicesenter 2016).

## 2.3 Kvikkleire og samfunn

Når ein avgjer kor store konsekvensar eit kvikkleireskred kan ha for eit samfunn må ein avgjere dette på grunnlag av faregrad, konsekvens og risiko. I følgje NVE skal faregrad «fastleggast slik at den speglar graden av uvisse med omsyn til stabiliteten til løyseområdet» (Moholdt, 2020). Faregrad delast inn i låg, middels og høg, og inkluderer både naturlege- og menneskeskapte årsaker. For skadekonsekvens tek ein omsyn til «fare for at liv kan gå tapt, skade på menneske, økonomiske tap og verdiforringelse, samt fare for at viktige samfunnsmessige funksjoner skal stoppe opp» (Moholdt, 2020). Konsekvensgraden delast inn i mindre alvorleg, alvorleg og meget alvorleg der både løyse- og utlaupsområde vurderast. Til slutt bereknast risiko, som er lik skadekonsekvens x faregrad, og delast inn i risikoklasse 1-5 ut frå prosentverdi av skadekonsekvens og faregrad (Moholdt, 2020).

### 2.3.1 Historiske skred

Gjennom åra har det gått fleire kvikkleireskred i Noreg som har gitt store konsekvensar. I denne seksjonen vil eg ta føre meg nokre av dei mest kjende kvikkleireskreda som har gått i Noreg og omtale kva som utløyste skreda og kva konsekvensar skreda fekk for samfunnet.

#### *Verdalsskredet, Trøndelag 1893*

Natt til 19. mai i 1893 gjekk det eit skred i Verdal som førte med seg 55 millionar m<sup>3</sup> masse og tok 105 gardsbruk og 112 menneskeliv (Olsen, 1893). Årsaka til skredet var erosjon i Follobekken vest for Stiklestad som renn ut i Verdalselva. I dagane før kvikkleireskredet gjekk hadde det gått fleire mindre skred i Follobekken, noko dei som fiska i Verdalselva merka ved at dei observerte mørkt og uklart vatn i elva. Skredet rann totalt 6-7 kilometer og demma opp Verdalselva slik at elva vart tørrlagt nedstrøms og danna ein 4 kilometer lang innsjø oppstrøms (Janbu, 1965).

#### *Rissa, Trøndelag 1978*

29. april 1978 gjekk det eit kvikkleireskred i Rissa, kjend som *Rissaraset*, med eit volum på 5-6 millionar m<sup>3</sup> og resulterte i ei skredgrop på over 1km (NGU, u.d.). Årsaka til skredet var ei fylling lagt i strandkanten til innsjøen Botn grunna utviding av eit driftsbygg. Skredet tok med seg sju

gardar og fem bustadhus. Skredet produserte ein skredkant på 1,5 kilometer, og skapte ein tre meter høg flodbølge som øydela bygningar i tettstaden Leira på andre sida av innsjøen (Stranden, 2020). Før skredet gjekk visste ein ikkje at det var fare for kvikkleireskred i området. Dette førte til at Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) sette i gong nasjonal kvikkleirekartlegging, ein prosess som framleis held fram og oppdaterast kontinuerleg (NGU, u.d.).

#### *Gjerdrum, Akershus 2020*

30. desember 2020 gjekk eit stort kvikkleireskred på Ask i Gjerdrum. Skredet skjedde på natta, noko som førte til at 10 personar mista livet, 1600 vart evakuerte og fleire måtte reddast frå skredgropa (NVE, 2020). Skredet hadde eit volum på 1,35 millionar m<sup>3</sup>. NGU konkluderer med at skredet skjedde truleg grunna dårleg stabilitet i skråninga der skredet starta, store mengder kvikkleire i området, og erosjon frå Tistilbekken sør for Ask sentrum. I tillegg til dette hadde det vore mykje og langvarig nedbør i området, noko som truleg auka poretrykket i leira og førte til auka vassføring i bekken som igjen reduserte stabiliteten i skråninga (NGU, 2020).

#### 2.3.2 Konsekvensar av kvikkleireskred på Bakklandet

I 2019 publiserte Direktorat for Samfunnssikkerheit og Beredskap (DSB) ein rapport med analyser av ulike krisescenario. Denne rapporten tok føre seg *Scenario 04.2 Kvikkleireskred i by* som beskriver eit potensielt kvikkleireskred på Bakklandet som demmar opp Nidelva. I skredscenarioet glir 3 millionar m<sup>3</sup> med leire ut og fører til at eit areal på 1,5 km<sup>2</sup> med omtrent 1000 innbyggjarar leggast under vatn i Midtbyen og på Øya (DSB, 2019). Rapporten vurderer eit slikt scenario til å ha store konsekvensar, men òg til å vere svært usannsynleg. Sannsynsvurderinga baserer seg på «at det historisk sett går eitt større kvikkleireskred i Norge per år» og «at 80 prosent av desse skreda skjer i en av de kartlagde kvikkleiresonene» (DSB, 2019). I tillegg anslår rapporten at sannsynet er lågt fordi det er gjennomført erosjonssikring av Nidelva i tillegg til stor kontroll angående byggetiltak og annan menneskeleg aktivitet.

Rapporten anslår at tal døde er forventa å vere omlag 200 i tillegg til at hendinga vil ha store konsekvensar for kulturmiljøet. Hendinga vil i følgje rapporten føre til eit direkte økonomisk tap på 30 milliardar kroner i tillegg til at samfunnsstabiliteten vil forstyrrast i stor grad. Uvissa rundt desse konsekvensane er vurdert som moderat fordi sensitiviteten rundt forutsetningane er høg. Til dømes bygger dette scenarioet på at det går eit mindre initialscred meir enn tre timar før hovudskredet som gir innbyggjarane tid til å evakuere.

### 2.3.3 Erosjonssikring i Nidelva

NVE publiserte i 2019 ein *vegleiar for sikkerheit mot kvikkleireskred*. Der kom dei med konkrete stabiliserande tiltak for å sikre mot skred. «Med flaum- og erosjonssikring forstår vi fysiske tiltak for å redusere risiko for skade på bebyggelse, kommunikasjonar, dyrka mark m.m.» (Skei et al., 2009). Desse inneberer *erosjonssikring*, *topografiske tiltak*, og *grunnforsterkning*. Desse tiltaka går ut på å bruke sprengstein til å erosjonssikre skråningar i kvikkleiresoner, heve elveprofilet, flytte elveleiet, motfylle skråninga, avlaste skråninga, eller bruke kalksement eller salt til å stabilisere (Wiig et al., 2019).

I 2009 utførte NVE eit oppdrag for Trondheim kommune og Trondheim Energi der dei kartla tilstanden av elvebreidder innan Trondheim kommune. I rapporten undersøkte dei blant annet erosjonssikringa langs Nidelva. I denne presenterte dei at mellom Elgeseter bru og Bakke bru er det ulike typar erosjonssikring, blant annet trepælar, steinfylling og betongmur (Skei et al., 2009). Generelt var anlegget i god stand, men noko slitt der trepælar er brukt til å erosjonssikre (Figur 5). Rapporten anslår at anlegget er i god stand, men ein må følgje med der anlegget er slitt med tanke på at det er kvikkleireførekomstar i bakkanten (Skei et al., 2009). I 2024 ser ein at tilstanden til erosjonssikringa mellom Elgeseter bru og Gamle bybru er noko verre enn den var i 2009 (Figur 6).



Figur 5: Erosjonssikring i Nidelva ved Baklandet 2009. Foto: Kristin Skei (2009)



Figur 6: Erosjonssikring i Nidelva ved Baklandet mars 2024. Foto: Aneli Hovland Skaar (2024)



### 3. Metode

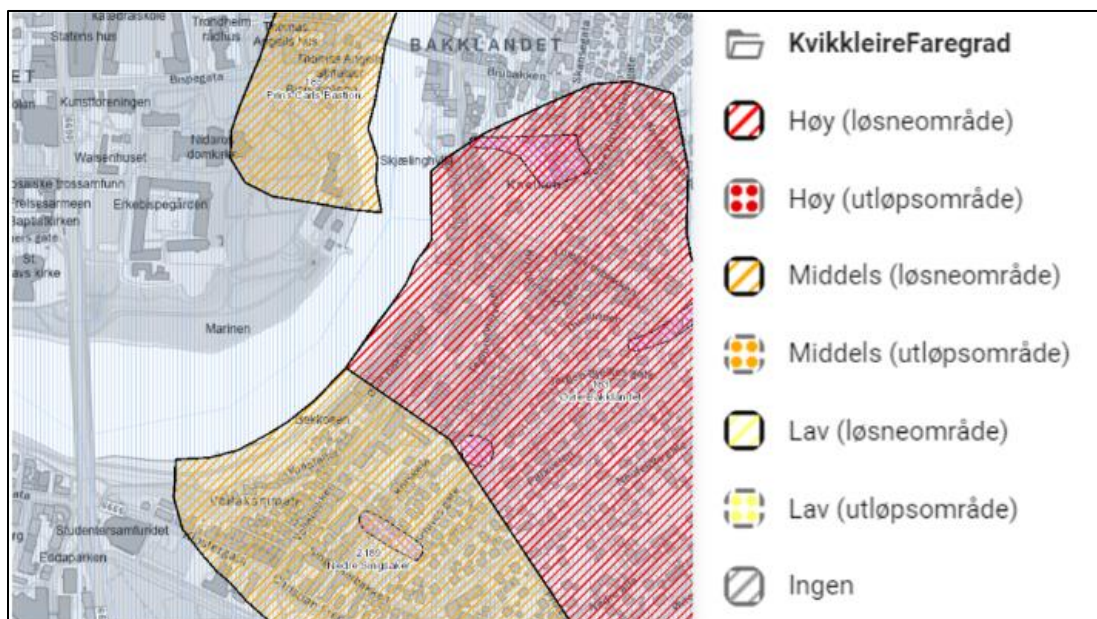
Denne seksjonen vil ta føre seg korleis oppgåva vart utført frå start til slutt. Her presenterast korleis data vart innhenta og førebudd, korleis analysen vart gjennomført, samt berekning av resultat.

#### 3.1 Datainnsamling og -førebuing

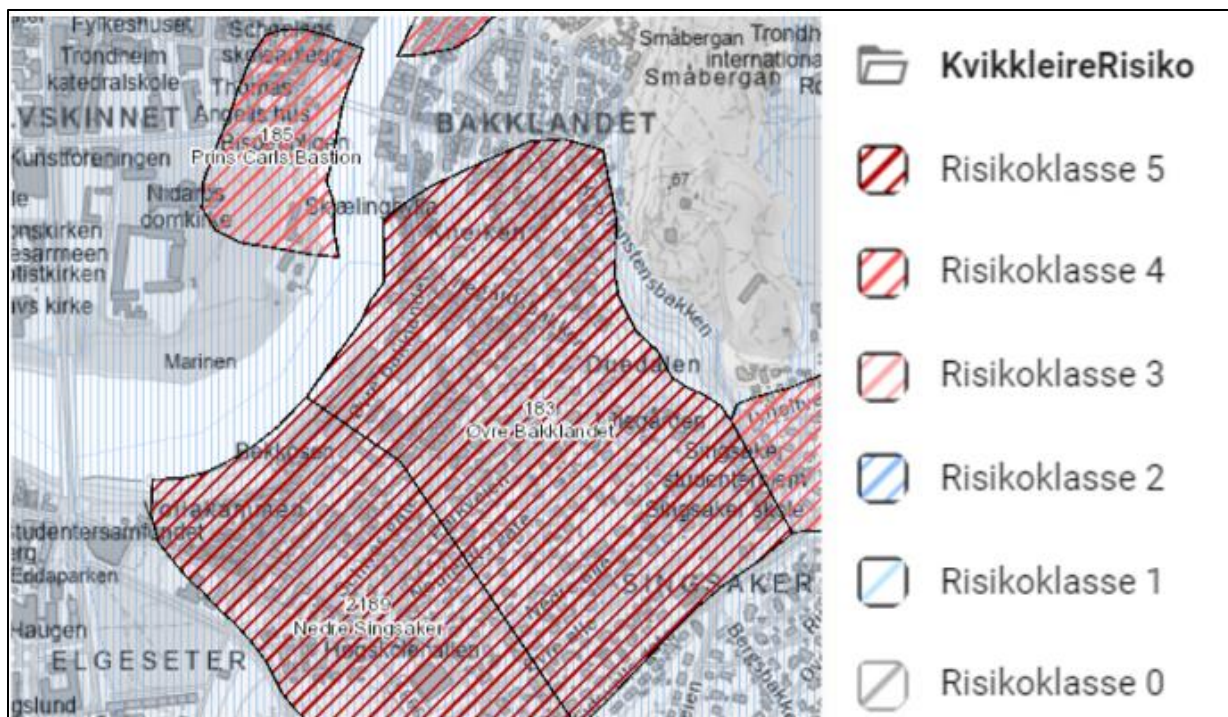
Ved datainnsamling vart litteratursøk nytta samt nedlasting av ulike kartlag frå relevante kjelder. Førebuing av data vart gjort i ArcGIS Pro©.

##### 3.1.1 Bestemming av studieområde

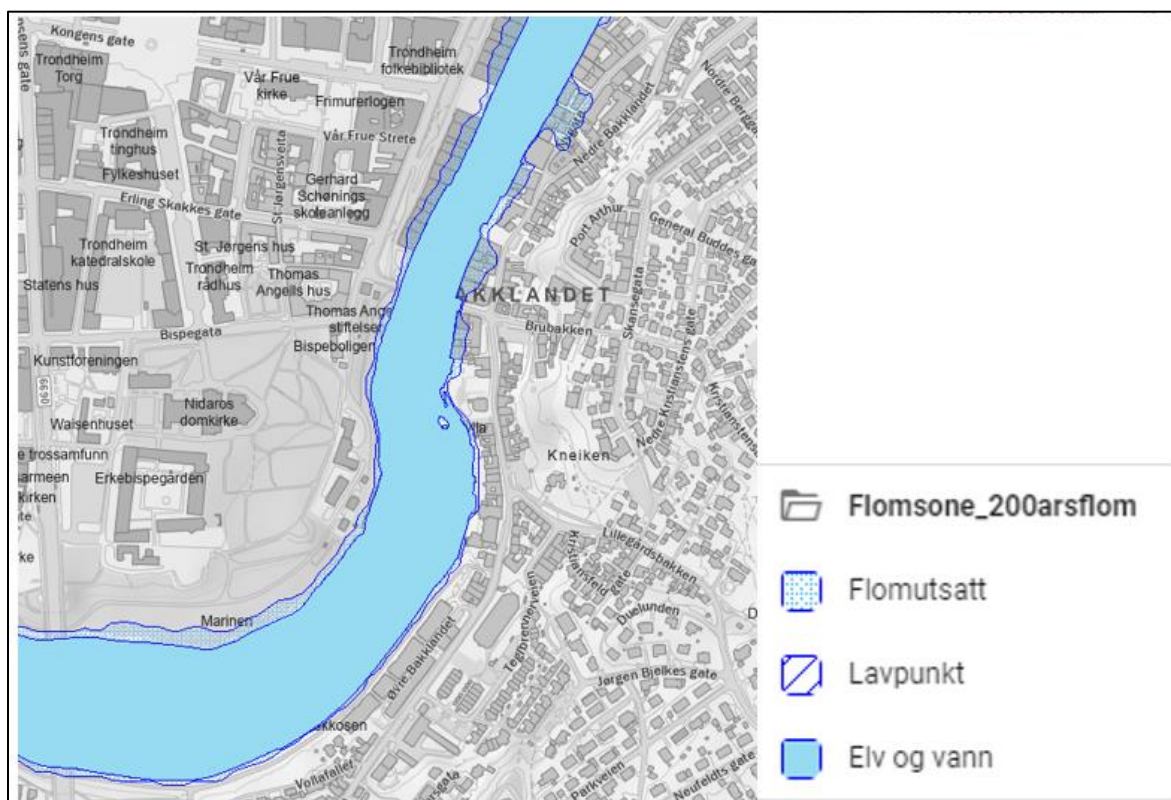
Før undersøkinga kunne starte måtte eit analyseområde definerast. Dette vart gjort ved å studere NVE sine temakart for kvikkleiresoner og flaumaktsemd. For kvikkleire var fokuset på områda som er i *høg faregradklasse* (Figur 7) og *høg risikoklasse* (Figur 8). Sidan denne oppgåva undersøker om ein potensiell flaum kan utløyse kvikkleireskred, vil det vere hensiktsmessig å undersøkje områder der det kan oppstå flaum i områder med høg faregrad og høg risikoklasse for kvikkleireskred (Figur 9). NVE har ein rapport som inneheld flaumsonekart for 200-års flaum grunna naturleg høg vassføring som analysen min samanliknast med (Vedlegg 3).



Figur 7: Kvikkleire faregrad Bakklandet. Utklipp frå NVE temakart kvikkleiresoner (2018)



Figur 8: Kvikkleire risiko. Utklipp frå NVE temakart kvikkleiresoner (2018)



Figur 9: Flaumsone Nidelva. Utklipp frå NVE temakart flomsone (2001)

### 3.1.2 Litteratur

I tillegg til å gjere egne vurderingar basert på NVE sine farekart om kvar ein flaum kan utløyse kvikkleireskred vart litteratur og ulike rapportar undersøkte. For å avgrense søk og finne mest mogleg relevant litteratur vart strategiske søkeord som «Nidelva», «kvikkleire», «flom», «erosjon» og liknande både på norsk og engelsk nytta for å få eit breiast mogleg søkeresultat. I undersøkinga av litteraturen var fokuset på å finne sikre kjelder ved å undersøkje kvar litteraturen var publisert, når den var publisert og kven som hadde produsert den.

### 3.1.3 Romleg data

For å utføre ei flaumanalyse trengs ein digital terreng modell (DTM). Denne vart lasta ned frå Høydedata.no. Modellen har ei oppløysing på 1 meter og inkluderer batymertien i Nidelva. Kartverket er ein dataportal som produserer digitale terrengkart for Noreg. Karta har oppløysingar heilt ned til 1 meter, kan nyttast til blant anna flaum- og rasanalyser, og er gratis tilgjengeleg for alle (Høydedata, 2024).

For å legge inn verdiar for Manning's  $n$  (ruheten i elveleiet) i flaumanalysen trengs eit *Land cover* kartlag. For dette vart Geovekst sitt FKB-AR5 kartlag for arealbruk lasta ned. For å legge til verdiar for Manning's  $n$  opna eg kartlaget for arealbruk i ArcGIS Pro©, la til ei kolonne i attributtabelen kalla «Mannings\_n» og la inn verdiane for dei ulike arealtypepane. Desse verdiane er basert på tabell 4.1 i Vassdraghåndboka (Vedlegg 2, Fergus et al., 2010).

Ved å laste ned Nidelva sitt nedbørsfelt via NVE si nettside for Nedbørsfelt-Vannføring-Indeks-Analyse (NEVINA) kunne kartlaget for arealbruk avgrensast til å passe kunn nedbørsfeltet til Nidelva. I NEVINA vart nedbørsfeltet generert ved å velje Nidelva, som er analyseområdet i denne oppgåva, redigerte nedbørsfeltet og genererte feltparameter og indeksar før nedbørsfeltet vart eksportert som shapefile.

For å samanlikne flaumanalysen min med kvikkleirekarta til NVE lasta eg ned kvikkleirekartet frå NVE sine nedlastingssider og plotta det saman med flaumanalysen min i ArcGIS Pro© (Figur 15). *Det er verdt å merke at dette vart gjort etter at NVE oppdaterte kvikkleirekartet.*

### 3.1.4 Førebuing av data

Før kartlaget for arealbruk kunne leggest inn i HEC-RAS© måtte verdiar for Manning's  $n$  definerast, som beskrive i seksjonen over. I tillegg til dette klipte eg kartlaget for arealbruk til å

passer nedbørsfeltet fordi det omfatter heile Trøndelag, noko som gjorde at kartlaget inneheldt mykje overflødig data. Dette vart gjort i ArcGIS Pro© ved å klippe arealbruk kartlaget til nedbørsfeltet ved å bruke verktøyet *pairwise clip*.

## 3.2 2D-simulering

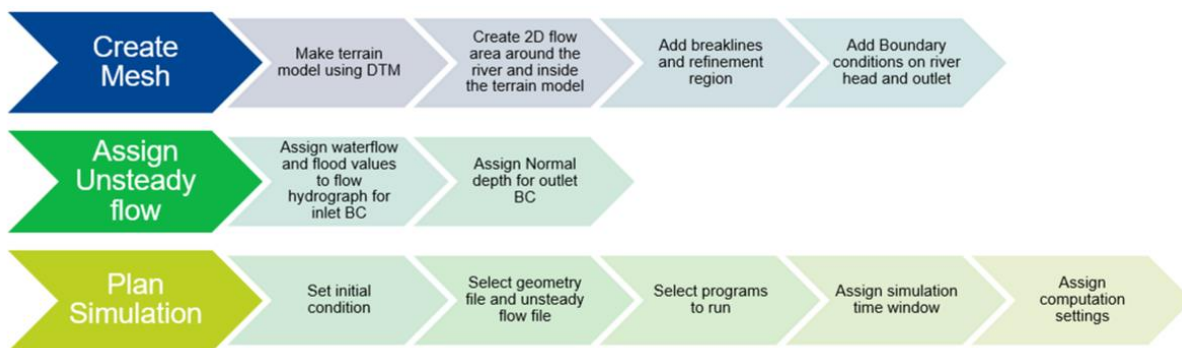
2D-simuleringa for denne oppgåva vart utført med programvara HEC-RAS©. Denne seksjonen forklarar korleis dette vart gjort samt kva HEC-RAS© er og kva det kan nyttast til.

### 3.2.1 HEC-RAS©

Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) er eit flaumsimuleringsprogram utvikla av US Army, brukt til å simulere flaum både 1-dimensjonelt og 2-dimensjonelt, basert på ein forenkla versjon av Navier-Stokes likningane (U.S. Army, 2024). Eg har vald å nytte HEC-RAS© i denne oppgåva til å simulere ein 200-års flaum og nytte verdiane frå resultatet til å berekne påverknaden ein 200-års flaum vil ha på kvikkleirestabiliteten på Bakklandet. Sidan Nidelva er eit langt vassdrag har eg vald å avgrense analyseområdet til å følgje elva frå Sluppen til Bakke bru fordi eit mindre område vil vere for lite nøyaktig i flaumsimuleringa og kartet over arealbruk frå kartdatabasen definerer området av elva etter Bakke bru som hamneområde. Grunnen til at eg har vald å simulere ein 200-års flaum i staden for å nytte flaumsonekartet til NVE er fordi flaumsonekartet ikkje inneheld alle verdiane eg treng, som vasshastigheit og vassdjupn. I tillegg viser flaumsonekartet til NVE flaum ved stormflo medan denne oppgåva fokuserer på flaum relatert til regn eller snøsmelting.

### 3.2.2 Framgangsmåte

Den digitale terreng modellen frå Høydedata.no vart opna i HEC-RAS© og bruk til å definere geometrien til elva. Denne inkluderer elvelaupet, fleire tverrsnitt og dei sju bruene analyseområdet (Figur 15). Dei ulike verdiane som er nytta er i stor grad basert på Nguyen (2018) sin rapport, dette forklarast nærmare i seksjon 3.2.4. For å produsere ein flaumsimulasjon med variable utlaup over tid må ein definere *unsteady flow data* og deretter gjennomføre ein *unsteady flow* simulasjon. Verdiane brukt i unsteady flow simulasjonen beskrivast i seksjon 3.2.4. Føremålet med dette var å berekne vasstand og -hastigheiter ved flaum, som basis for berekningar om sediment-erosjon og -transport. Figur 10 viser framgangsmåten nytta i HEC-RAS.



Figur 10: Framgangsmåte i HEC-RAS. Iqbal (2023)

### 3.2.3 Definerer av geometri

Geometrien ein definerer dannar grunnlaget for simuleringa. For å produsere ein mest mogleg nøyaktig simulasjon bør geometrien innehalde flest moglege nøyaktige verdiar. I desse inngår *2D Flow Area* som er analyseområdet for flaumen, *Boundary conditions* som definerer starten og enden av elvelaupet, *Land cover layer* som inneheld verdiar for Manning's *n*, samt bruer og andre forstyringar i elvelaupet.

#### *Manning's n*

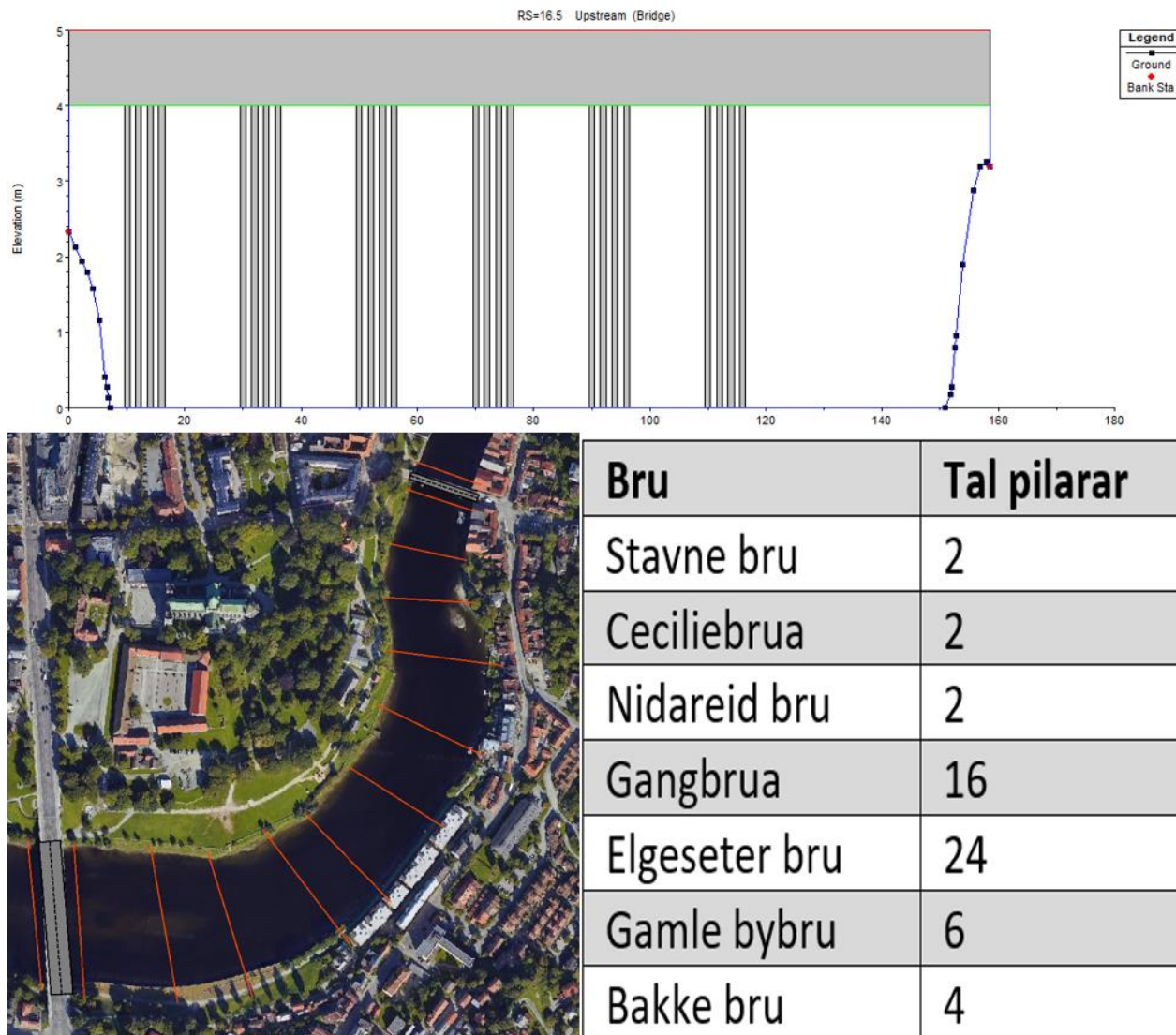
Nguyen (2018) sin rapport inneheld spesifikke verdiar for Manning's *n* i Nidelva på strekka mellom sluppen og utlaupe ved fjorden (Vedlegg 3). Desse verdiane la eg inn i flaumsimuleringa mi for å få meir nøyaktige verdiar for Manning's *n* i sjølve elvelaupet.

#### *Bruer*

Dei sju bruene inkludert i analysen (Figur 12) vart observert i felt for å undersøke forma til bruene og tal pilarar. Grunnen til at eg valde å inkludere bruene er at dei kan påverke verdiane for Manning's *n* og resultatet av flaumsimuleringa grunna strøymotstanden dei bidreg med (Figur 11). Figur 12 viser ei oversikt over framgangen i brumodelleringa i HEC-RAS©.



*Figur 11: Bilete av korleis pilarane påverkar vasstraumen. Foto: Aneli Hovland Skaar (2024)*



Figur 12: Krysseksjonar og bruer på Baklandet, tabell over bruer og tal pilarar, brumodellering frå HEC-RAS© Bridge Culvert Data

### 3.2.4 Flaumscenario

Eg har vald å simulere eit flaumscenario der flaumen har eit gjentaksintervall på 200 år med ein flaumtopp på  $840 \text{ m}^3/\text{s}$  og ein start- og slutthastigheit på  $140 \text{ m}^3/\text{s}$ . Desse tala er basert på flaumberekninga gjort av NVE i 2001 og Nguyen (2018) sin rapport om elvebankemodifikasjon. Det er vanskeleg å vite kor lang tid ein flaum vil bruke på å nå flaumtoppen og gå tilbake til normalen, særleg for Nidelva då det ikkje finnast noko flaumkurve for dette vassdraget. Den største observerte flaumen i Nidelva hendte 14. juni 1944 og vurderast som ein 200-års flaum (Bævre, 2001). Fordi Nidelva er eit regulert vassdrag og difor er meir motstandsdyktig mot flaum kan ein

tenkje seg at det vil ta ei stund før ein eventuell flaum når flaumtoppen. I oktober 2014 var det flaum i Opo-vassdraget ved Odda. Denne flaumen brukte omtrent 36 timar på å stige frå middelflaumverdien  $235 \text{ m}^3/\text{s}$  til flaumtoppen ved  $778 \text{ m}^3/\text{s}$  og gå tilbake til middelflaumverdien (Væringstad, 2018). Etter eiga vurdering, med reguleringa av Nidelva tatt i betraktning, kom eg fram til at flaumverdiane for Opo kan vere omtrentleg realistiske tal for Nidelva. Med tanke på at Opo er eit verna og uregulert vassdrag med eit nedbørsfelt seks gongar mindre enn Nidelva sitt (Væringstad, 2018), er det truleg at 36 timar kan til ein viss grad vere eit realistisk tidsintervall for ein flaum i Nidelva. Difor har eg vald å definere ein flaum som brukar 36 timar på å gå frå normal vassføring til flaumtoppen og tilbake.

### 3.3 Berekingar og kalkulasjonar av sedimenttransport

For å berekne eit resultat blir det nytta to ulike, men liknande, metodar for bereking av sedimenttransport og -erosjon. Metodane komplementarar kvarandre og er nyttig for å få eit meir nøyaktig resultat.

#### 3.3.1 Hjulströms diagram

For å avgjere om interesseområdet i Nidelva vil oppleve erosjon ved ein eventuell 200-års flaum vil resultatata for vasshastigheit frå flaumsimuleringa i HEC-RAS© plottast saman med den antekne sedimentstorleiken i Hjulströms diagram.

#### 3.3.2 Meyer-Peter & Müller korrelasjon

Meyer-Peter & Müller korrelasjonen er ein måte å berekne botntransport per breiddeining ( $q_s$ ) i ei elv (Chanson, 2004). Dette er ein semi-empirisk formel som vart utvikla ved å bruke teoretiske likningar og laboratorieforsøk. Formelen brukast til å berekne kor fort ei elv av ein viss hastigheit med ein viss sedimentstorleik kan flytte sedimentlasten i elva. Formelen baserer seg på at ein veit eller kan berekne:

- Gjennomsnittleg skjærstress ( $\tau_o$ )
  - $\tau_o = \rho g d \sin\theta$
- Gjennomsnittleg skjærhastigheit ( $V_*$ )
  - $V_* = \sqrt{gd \sin\theta}$
- Shields parameter ( $\tau_*$ )



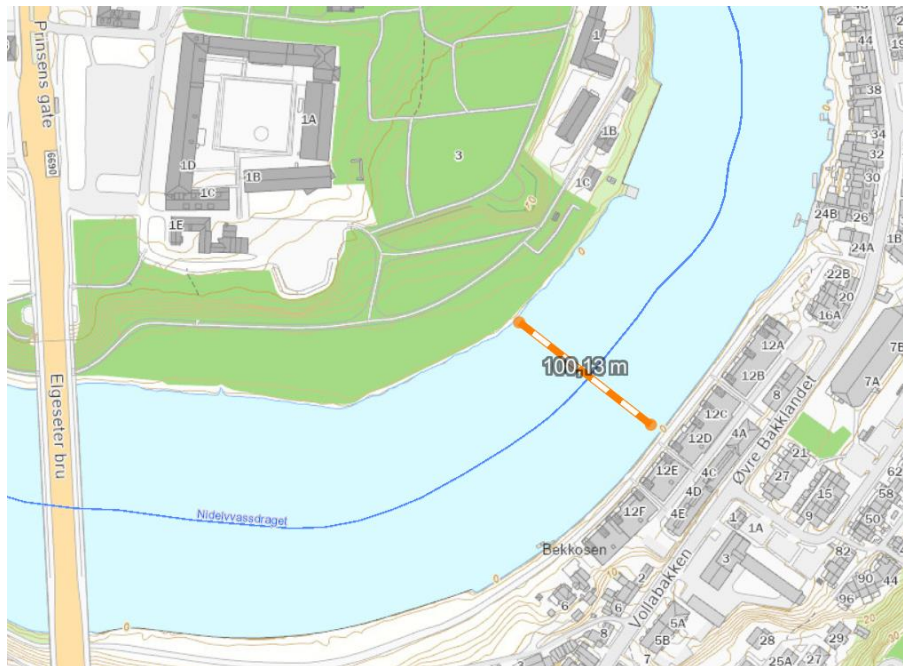
- $\tau_* = \frac{\tau_o}{\rho(S-1)gd_s}$
- Reynolds talet ( $Re_*$ )
  - $Re_* = \frac{V_*d_s}{\nu}$
- Kritisk Shields parameter ( $(\tau_*)_c$ )

Der  $d$  er vassdjupn,  $g$  er gravitasjon,  $\rho$  er vassettleik,  $S$  er  $\rho_{\text{stein}} / \rho_{\text{vatn}}$ ,  $d_s$  er sedimentstorleik og  $\nu$  er viskositeten til vatn. Skjærstresset må vere større enn kritisk Shields parameter for å indikere sedimentrørsle. Chanson (2004) definerer denne som  $\sim 0,05$ .

Når ein har desse verdiane kan ein plote dei i Meyer-Peter & Müller formelen som ser slik ut:

$$\frac{q_s}{\sqrt{(S-1)gd_s^3}} = \left( \frac{4\tau_o}{\rho(S-1)gd_s} \right)^{3/2}$$

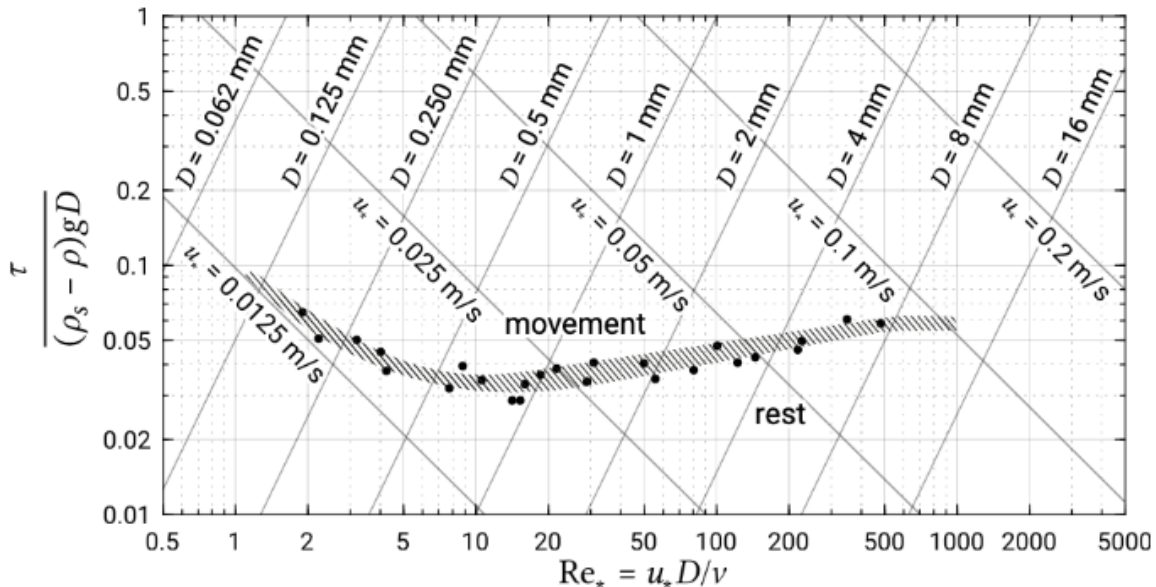
Ved å snu om på denne formelen finn ein  $q_s$  som ein deretter kan bruke til å berekne *sedimenttransport raten* ( $Q_s$ ). Denne er  $q_s$  multiplisert med breidda av elva. Breidda av elva er  $\sim 100\text{m}$  (Figur 13).



Figur 13: Breidda av Nidelva ved Baklandet. Målinga er gjort ved bruk av måleverktøyet i NVE sine kartjenester.

Hydrologiske verdier som vasshastigheit og vassdjupn hentast frå flaumsimuleringa i HEC-RAS©. Sedimentstorleiken er basert på seksjon 10.4.1 i boka *Hydraulics of Open Channel Flow* der ein seksjon av elva Danube, som liknar denne oppgåva sitt interesseområde, er presentert. Her er den relative sedimenttettleiken 1,65, antatt at sedimenta består av vanleg stein, altså granitt, gneis eller liknande ( $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ ), vassetteteiken ( $\rho$ ) er  $998,2 \text{ kg/m}^3$  og skråninga ( $\sin\theta$ ) er lik 0,001 (Chanson, 2004). Liknande verdier er også brukt i Nguyen sin rapport frå 2018, noko som gjer det sikrere at desse tala er reelle å nytte. Sidan sedimentstorleiken i og ved yttersvingen av Nidelva som definerer Bakklandet er ukjend, vel eg å definere sedimentstorleiken som 14 mm sidan dette, i følgje Hjulströms diagram, er den største verdien for sedimentstorleik min simulerte 200-års flaum i Nidelva kan transportere (Figur 21).

For å bestemme om Meyer-Peter & Müller formelen kan brukast, må ein gjere forkalkulasjonar der ein bereknar Shields parameter ( $\tau_*$ ) og Reynolds talet ( $Re_*$ ) og ut ifrå Shields diagram (Figur 14) avgjer om elva vil oppleve sedimenttransport med dei gitte verdiane. Shields diagram vart utvikla av Albert Shields og presenterer forholdet mellom skjærstresset på elvebotnen og gravitasjonskrafta som verkar på den gitte partikkelen (Miedema, 2010). Dersom verdiane danner eit punkt som hamnar under Shields kurve vil ikkje elva oppleve sedimenttransport for dei gitte verdiane. Difor avhenger bruken av Meyer-Peter & Müller formelen av at punktet ligg over kurva i diagrammet.

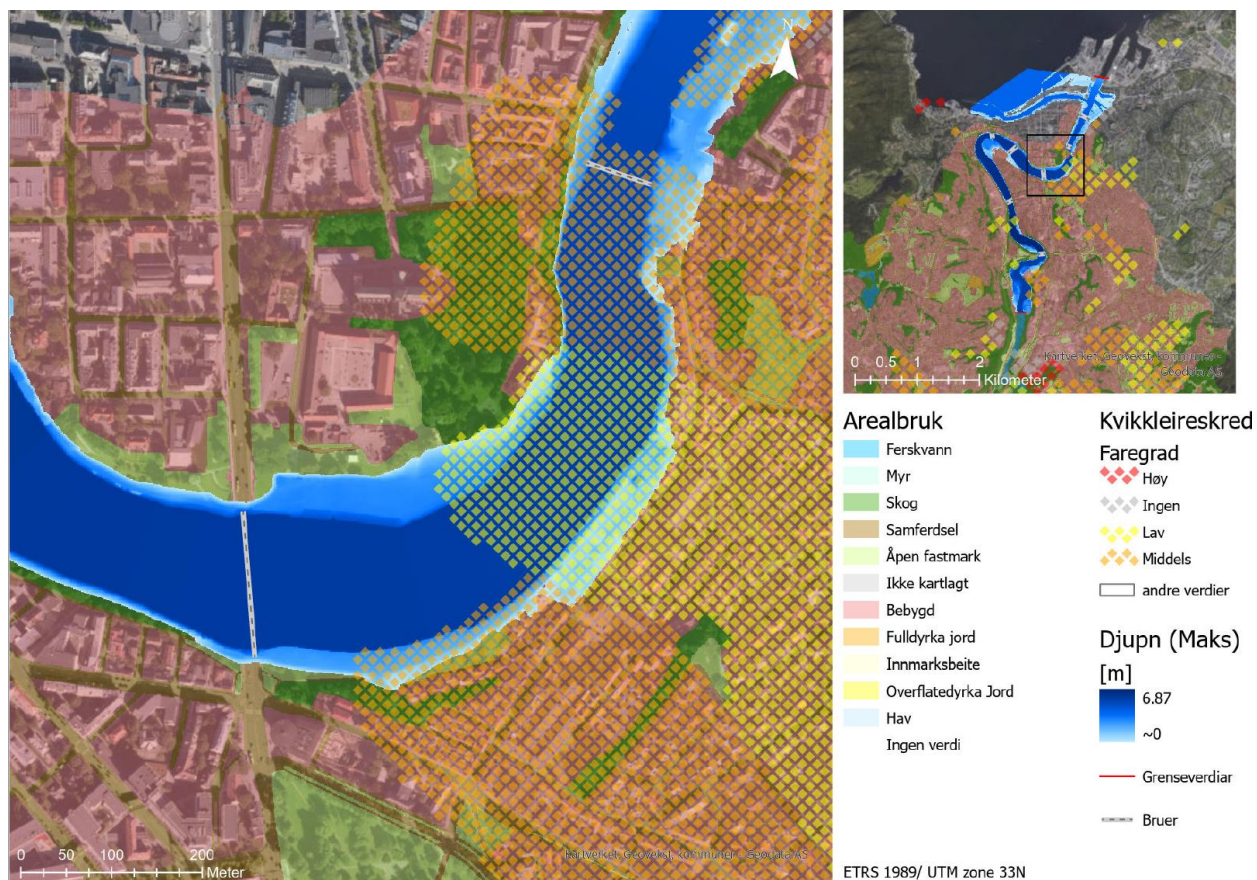


Figur 14: Shields diagram. Figur frå Bosboom & Stive (2021)

## 4. Resultat

Denne seksjonen presenterer resultatene fra både flaumsimuleringa og beregningane gjort basert på simuleringa.

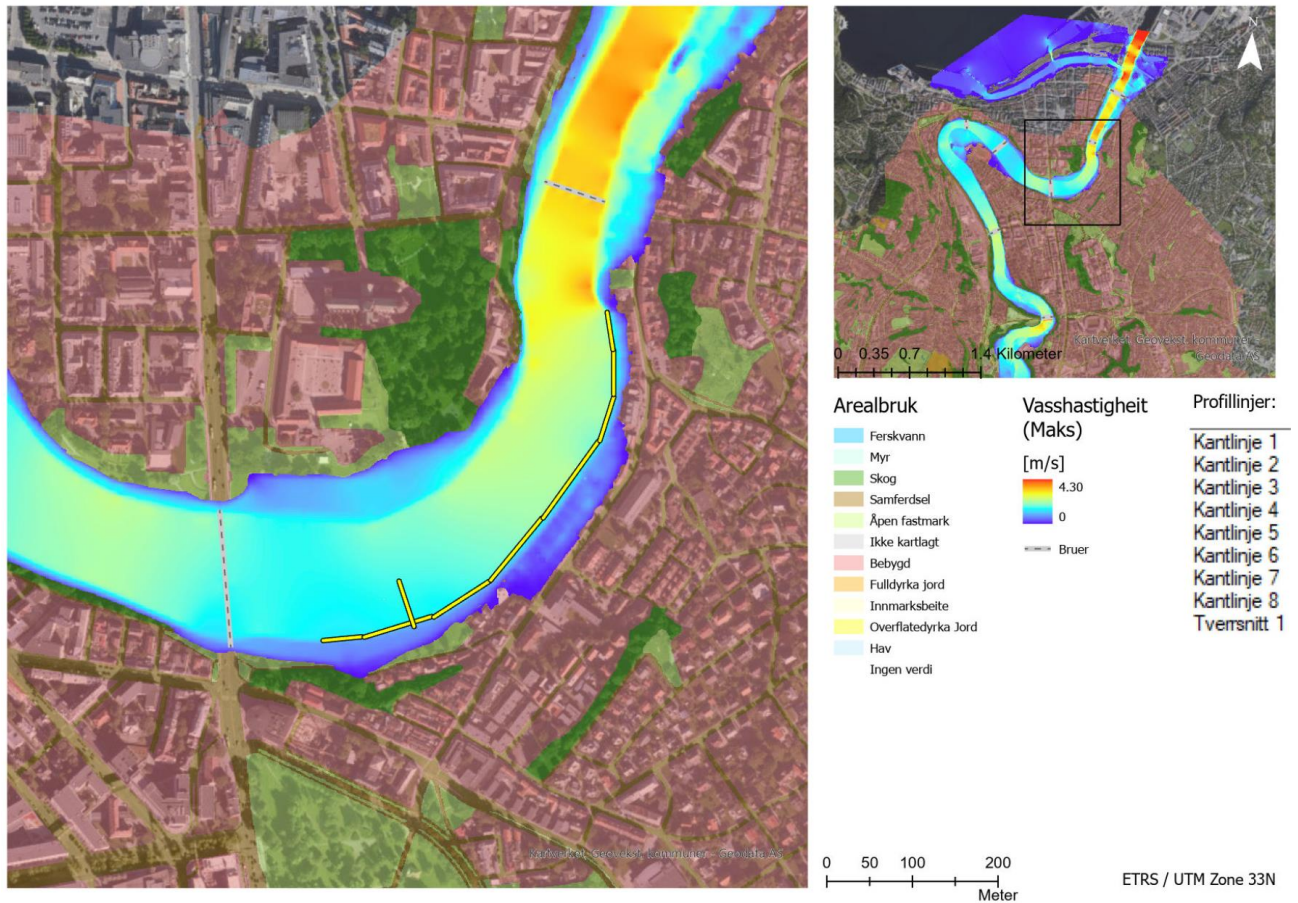
### 4.1 – Flaumanalyse



Figur 15: Flaumområde for 200-års flaum i Nidelva med vassdjupn (HEC-RAS) og faregrad for kvikkleireskred (NVE).

Figur 15 viser resultatet av flauanalysen saman med faregraden for kvikkleireskred. Her er det verdt å merke at faregraden for kvikkleireskred er låg-middels, medan Figur 7 viser middels-høg faregrad for same området. Dette er fordi NVE oppdaterte kvikkleirekartet under arbeidet med denne oppgåva. I vidare diskusjon vil denne oppgåva ta utgangspunkt i det tidlegare kvikkleirekartet og ikkje ta omsyn til det oppdaterte kartet.

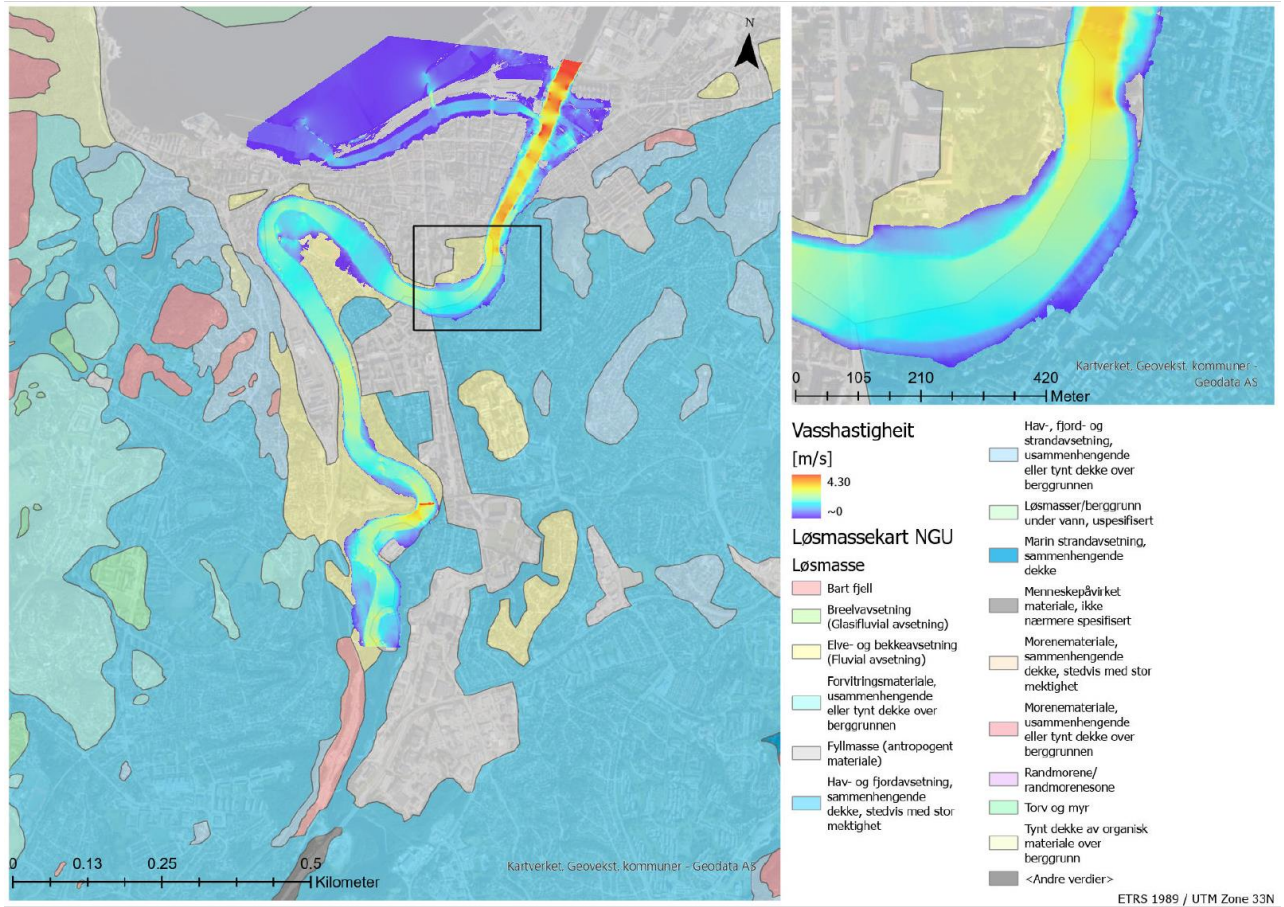
#### 4.1.1 Elvekvalitetar



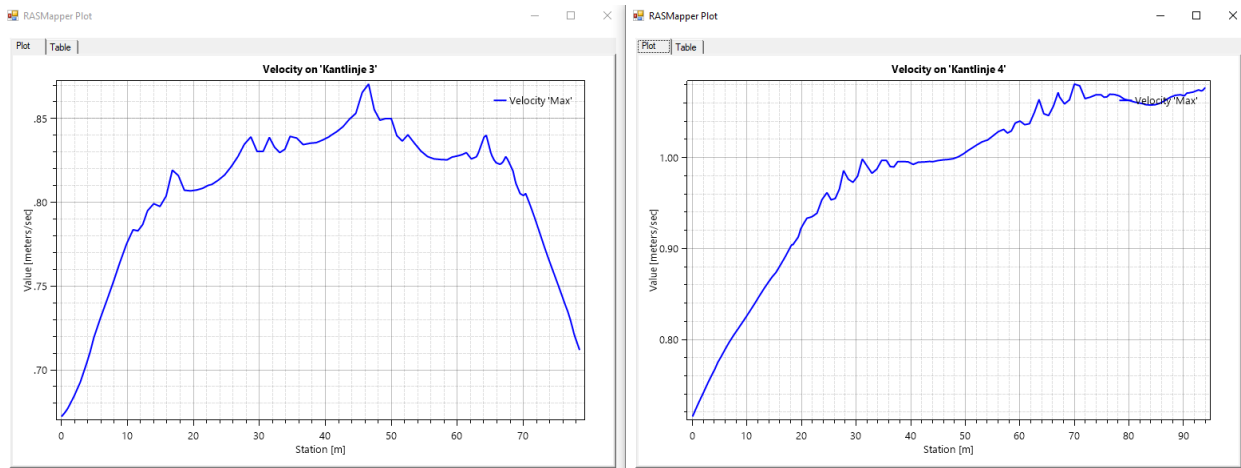
Figur 16: Kantlinjer, tversnitt og vasshastigheit.

Figur 16 viser oversikt over kantlinjene og tversnittet der verdiane som er brukt i berekningane er henta frå. Profillinjene startar frå vest der «Kantlinje 1» er profillinja nærmast Elgeseter bru. Linja som går på tvers frå midten av elva til kantlinje 2 er profillinja markert som «Tversnitt 1». Under defineringsa av profillinjene vart kartlaget for arealbruk nytta for å få kantlinjene så nærme elvekanten som mogleg. I tillegg viser figuren vasshastigheita i Nidelva ved ein 200-års flaum. Her er det interessant å merke at vasshastigheita aukar rett før Gamle bybru. Dette er fordi elva blir smalare akkurat i dette området, i samsvar med Bernoullis likning, i tillegg til at bruene kan påverke hastigheita.

## Vasshastighet

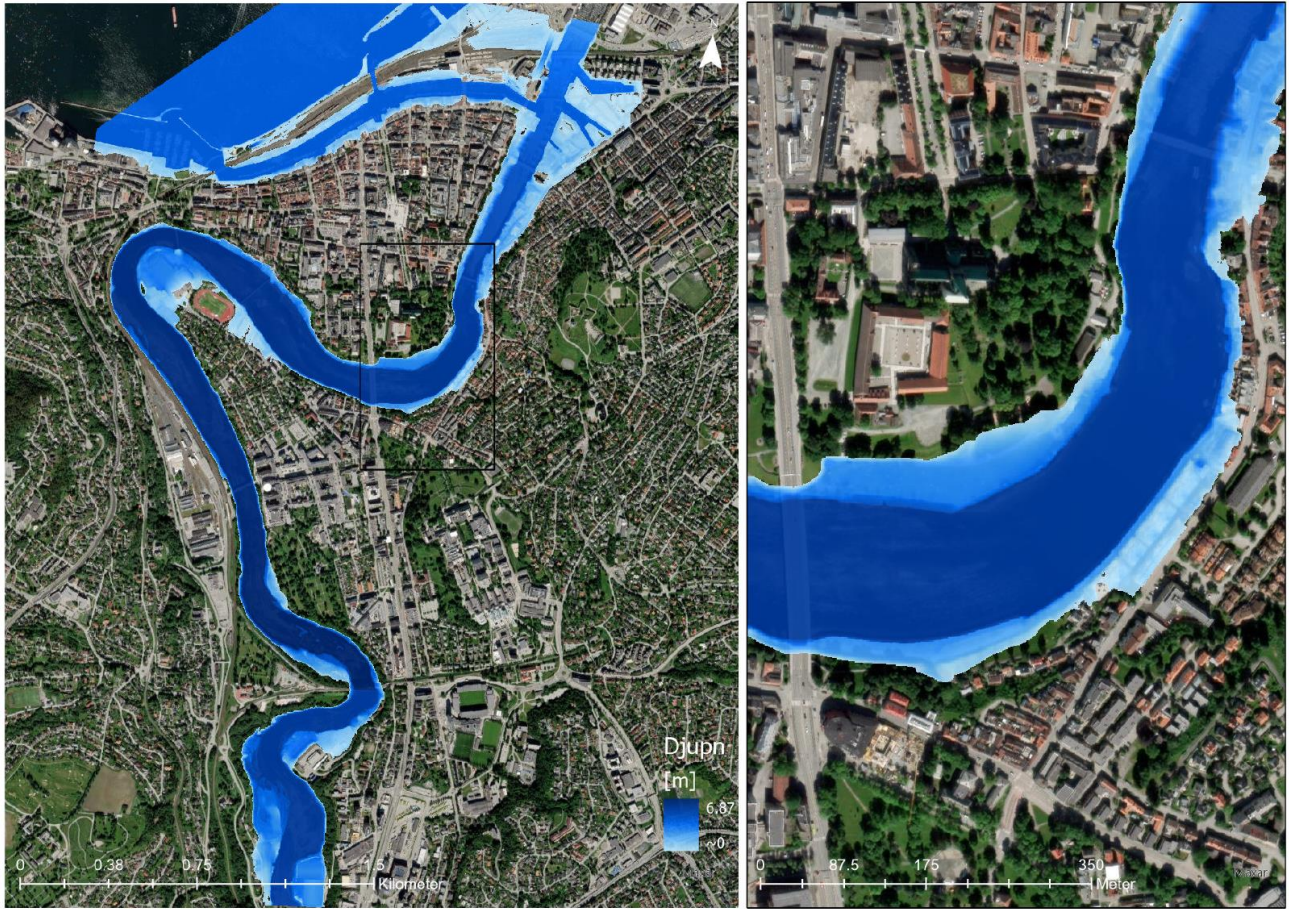


Figur 17: Vasshastighet ved flaum Q200. Resultat av HEC-RAS© analyse. Lausmassekart frå NGU

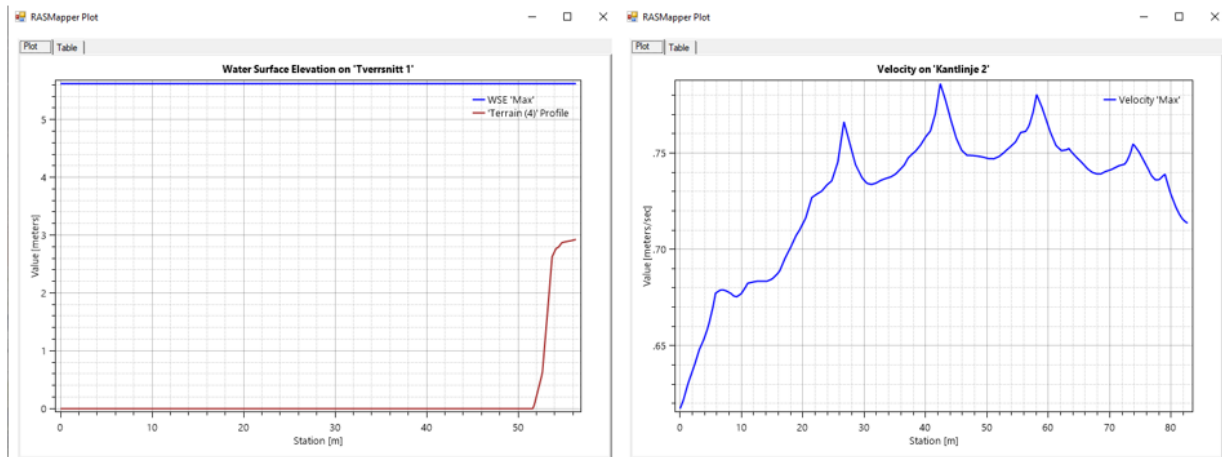


Figur 18: Vasstand ved Baklandet ved 200-års flaum for kantlinje 3 og 4. Utklipp frå HEC-RAS© RASMapper Plot

## Vassdjupn



Figur 19: Maks vassdjupn ved flaum Q200. Resultat frå HEC-RAS© flaumanalyse

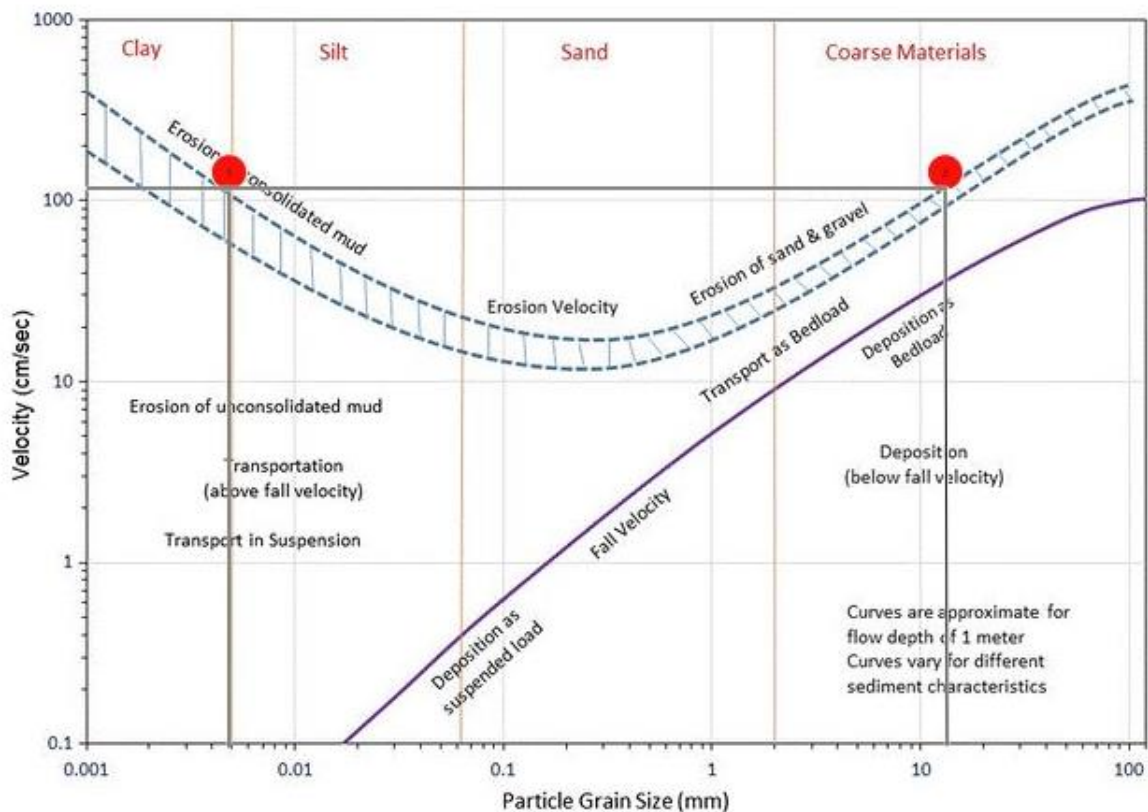


Figur 20: Water Surface Elevation for tverrsnitt 1 (t.v.) og vasshastighet for kantlinje 2 (t.h). Utklipp frå HEC-RAS© RASMapper Plot

Frå Figur 18 ser ein at ved elvekanten på Bakklandet er hastigheita gjennomsnittleg 0,97 m/s, med maks hastigheit 1,08 m/s. Figur 20 viser eit plot av *Water Surface Elevation* (maks vasstand) ved tverrsnitt 1 og vasshastigheita ved kantlinje 2. Denne viser at ved ein 200-års flaum vil vasstanden gå meir enn 2 meter over kanten av elvebreidda, med maksimal vassdjupn lik 5,3m, og vasshastigheita vil ha maks hastigheit på ~0,80 m/s.

## 4.2 - Sedimenttransport og erosjon

### 4.2.1 Hjulströms diagram



Figur 21: Hjulströms diagram resultat for flaum Q200 for to ulike sedimentstorleikar. Utklipp frå ESRI Storymaps©

Ved å plote maks hastigheit for ein 200-års flaum i Nidelva ved Bakklandet viser Hjulströms diagram (Figur 21) at elva kan erodere sediment i storleiken  $\sim 0,005 < > \sim 14$  mm. Dette svarar til grus, sand og silt (NGU, 2024).

#### 4.2.2 Meyer-Peter & Müller korrelasjon

Forkalkulasjon for sedimenttransport for 200-års flaum:

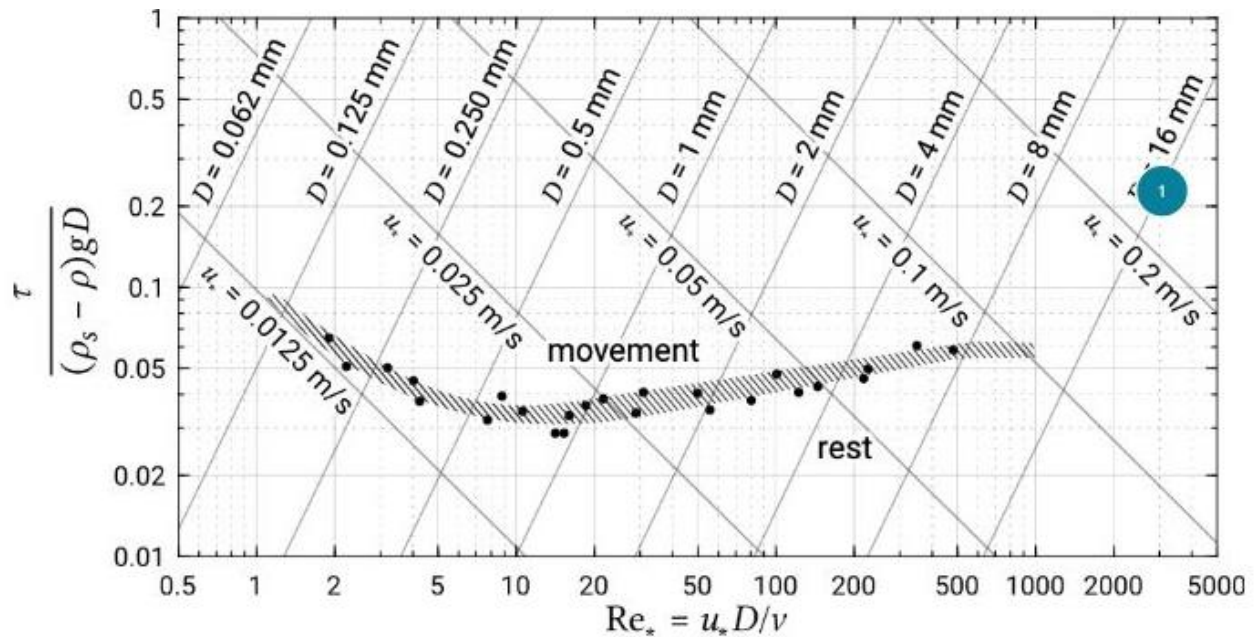
$$\tau_o = \rho g d \sin\theta = 998,2 \times 9,81 \times 5,56 \times 0,001 = 54,445 \text{ Pa}$$

$$V_* = \sqrt{g d \sin\theta} = \sqrt{9,81 \times 5,56 \times 0,001} = 0,234 \text{ m/s}$$

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{\rho(s-1)gd_s} = \frac{54,445}{998,2 \times 1,65 \times 9,81 \times 0,014} = 0,241$$

$$Re_* = \frac{V_* d_s}{\nu} = \frac{0,234 \times 0,014}{1,007 \times 10^{-6}} = 3253$$

$$\tau_* = 0,241 > (\tau_o)_c \approx 0,05$$



Figur 22: Shields diagram resultat 200-års flaum. Utklipp frå ESRI Storymaps©

Reynoldstalet og Shields parameter viser til sedimenttransport i Shields diagram (Figur 22) og Shields parameter er større enn kritisk Shields parameter. Difor kan Meyer-Peter & Müller formelen nyttast for å berekne sedimenttransport i dette tilfellet.



Meyer-Peter & Müller formelen for sedimenttransport for 200-års flaum:

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = \left( \frac{4\tau_o}{p(s-1)gd_s} \right)^{3/2}$$

$$= \left( \frac{4 \times 54,445}{998,2 \times 1,65 \times 9,81 \times 0,014} - 0,188 \right)^{3/2} = 0,775^{3/2} = 0,682$$

$$q_s = 0,682 \times \sqrt{(s-1)gd_s^3}$$

$$= 0,682 \times \sqrt{1,65 \times 9,81 \times 0,014^3} = 0,0045 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\underline{Q_s = 0,0045 \text{ m}^2/\text{s} \times 100\text{m} = 0,45 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Forkalkulasjonar for sedimenttransport for gjennomsnittleg avrenning:

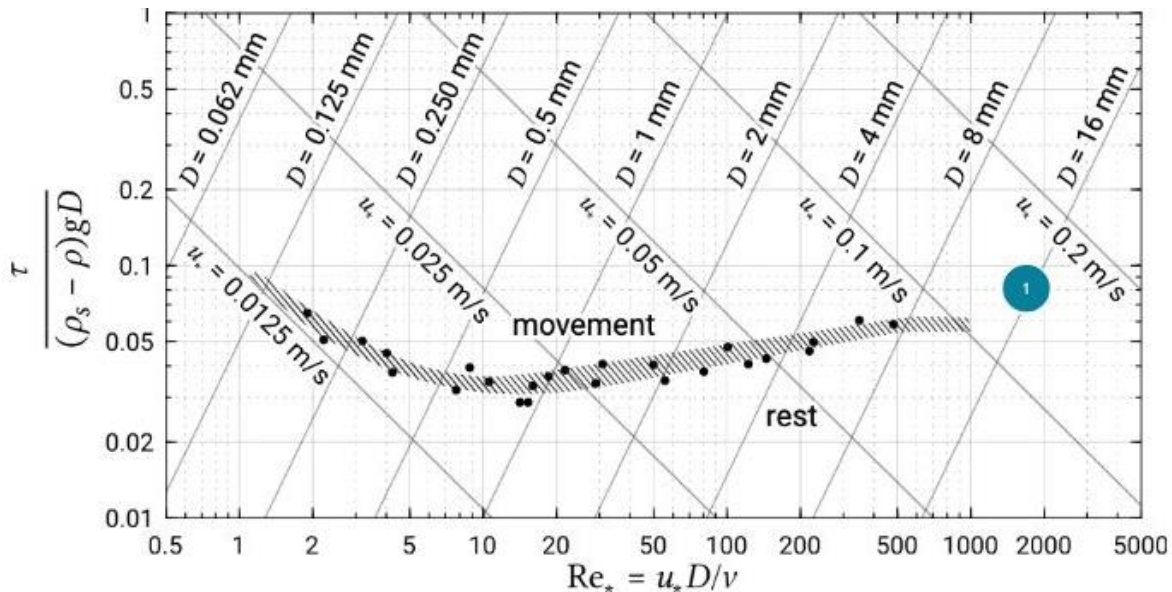
$$\tau_o = pgs\sin\theta = 998,2 \times 9,81 \times 2,0 \times 0,001 = 19,584 \text{ Pa}$$

$$V_* = \sqrt{gds\sin\theta} = \sqrt{9,81 \times 2,0 \times 0,001} = 0,140 \text{ m/s}$$

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{p(s-1)gd_s} = \frac{19,584}{998,2 \times 1,65 \times 9,81 \times 0,014} = 0,087$$

$$Re_* = \frac{V_*d_s}{\nu} = \frac{0,140 \times 0,014}{1,007 \times 10^{-6}} = 1946$$

$$\tau_* = 0,087 > (\tau_o)_c \approx 0,05$$



Figur 23: Shields diagram resultat gjennomsnittleg avrenning. Utklipp frå ESRI Storymaps©

Reynoldstalet og Shields parameter viser til sedimenttransport i Shields diagram (Figur 23), og Shields parameter er større enn kritisk Shields parameter. Difor kan Meyer-Peter & Müller formelen nyttast for å berekne sedimenttransport i dette tilfellet.

*Meyer-Peter & Müller formelen for sedimenttransport for gjennomsnittleg avrenning:*

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} = \left( \frac{4\tau_o}{p(s-1)gd_s} \right)^{3/2}$$

$$= \left( \frac{4 \times 19,584}{998,2 \times 1,65 \times 9,81 \times 0,014} - 0,188 \right)^{3/2} = 0,158^{3/2} = 0,063$$

$$q_s = 0,0629 \times \sqrt{(s-1)gd_s^3}$$

$$= 0,0629 \times \sqrt{1,65 \times 9,81 \times 0,014^3} = 0,00042 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\underline{Q_s = 0,00042 \text{ m}^2/\text{s} \times 100\text{m} = 0,042 \text{ m}^3/\text{s}}$$

*Differanse i sedimentmengd:*

$$Q_{200}: 0,45 \text{ m}^3/\text{s} \times 129\,600 \text{ s} = 58\,320 \text{ m}^3$$

$$Q_{gs}: 0,042 \text{ m}^3/\text{s} \times 129\,600 \text{ s} = 5\,443 \text{ m}^3$$

$$\text{Differanse: } \frac{58\,320 \text{ m}^3}{5\,443 \text{ m}^3} \approx 10,7$$

Sidan det er 129 600 sekund i 36 timar betyr det at ein 200-års flaum ( $Q_{200}$ ) i Nidelva ved mitt flaumscenario potensielt kan føre med seg 58 320  $\text{m}^3$  med sediment frå Bakklandet. Det er omtrent 10,7 gongar meir enn ved gjennomsnittleg avrenning ( $Q_{gs}$ ). Det er viktig å hugse at desse verdiane gjeld berre for transport då erosjon ikkje visast med Meyer-Peter & Müller formelen

## 5. Diskusjon

Denne seksjonen vil på bakgrunn av teorien og resultatene diskutere kor vidt ein flaum i Nidelva og eit kvikkleireskred på Bakklandet er sannsynleg, samt presentere feilkjelder som kan ha påverka resultatet av oppgåva og kome med forslag til vidare arbeid.

### 5.1 – Sannsyn for flaum

Som nemnt i seksjon 2.2.4 anslår Norsk Klimaservicesenter at i tidsrommet fram mot år 2100 vil det bli sjeldan med svært låge vintertemperaturar i tillegg til auke i hyppig og intense nedbørsepisodar. Dette kan bidra til auke i sannsynet for flaum då nedbøren på vinteren vil falle som regn i større grad enn snø. Dette kan føre til at det bli gradvis mindre snøsmelteflaumar, men det vil bli større regnflaumar enn vanleg, noko som kan bidra til auka vasstand i Nidelva særleg på haust og vinter i framtida (Norsk Klimaservicesenter 2016).

Den viktigaste faktoren for flaum er dagleg ekstremnedbør. Difor vil ei auke på ~20% i hyppig og intens nedbør føre til at sannsynet for flaum aukar betydeleg i framtida. På bakgrunn av dette er sannsynet for flaum relativt stort, men storleiken til flaumen er usikker då ein ikkje har mange observerte flaumhendingar i Nidelva. Med tanke på at Nidelva er eit stort og regulert vassdrag er det tenkjeleg at ein flaum vil ha storleiken til ein middel- eller 50- års flaum heller enn 200-års flaum. Samtidig, kan standarden for flaumstorleik endrast ved hyppigare flaumar; det som i dag er ein 50-års flaum kan om 80 år vere på storleik med det som i dag er ein 100-års flaum. På den andre sida spelar faktoren vassdragsregulering stor rolle i flaumregulering. Fordi Nidelva er regulert er elva truleg godt rusta for å ta imot store mengder vatn på kort tid. Spørsmålet ein då må stille seg er om elva er godt *nok* rusta for store vassmengder. Sjølv om det er sannsynleg at den regulerte delen av Nidelva er godt nok rusta for store vassmengder, er det ikkje sikkert at den uregulerte delen er det.

### 5.2 – Sannsyn for skred

Som nemnt i seksjon 2.3.2 har DSB analysert eit liknande scenario som denne oppgåva sitt flaumscenario. Dei vurderte eit slikt scenario til å vere svært usannsynleg basert på erosjonssikringa i Nidelva og kontroll over byggetiltak og menneskeleg aktivitet. NVE anslår også, som nemnt i seksjon 2.3.3, at tilstanden på erosjonssikringa i Nidelva ved bydel Bakklandet er i

god tilstand men noko slitt. Denne rapporten er 15 år gamal, noko som gjer rapporten noko utdatert. Slik erosjonssikringa er i dag (Figur 6) ser ein at den er noko meir slitt enn den var for 15 år sidan. Difor bør det utførast ei ny vurdering av erosjonssikringa i Nidelva før ein kan avgjere om den er rusta for flaum. Med tanke på den høge sedimenttransportraten utrekna i seksjon 4.2.2 er det tenkjeleg at erosjonssikringa vil oppleve stor påkjenning av den store mengda sediment som er 10 gongar større enn vanleg. I tillegg veit ein ikkje korleis delane av elva som vanlegvis er tørre vil reagere på å bli lagde under vatn. Figur 16 viser at vasshastigheita aukar drastisk etter yttersvingen, noko som gjer området ved og etter Gamle bybru meir utsette for kvikkleireskred enn akkurat i yttersvingen. Dette området er derimot betre erosjonssikra og er difor tryggare enn skråninga ved yttersvingen (Figur 5).

Resultata frå Hjulströms kurve (Figur 21) tilseier at ein 200-års flaum ikkje vil kunne erodere lausmassar mindre enn 0,005mm. I følgje NGU svarar denne storleiken til silt, medan diagrammet syner at hastigheita kan erodere dei største leirpartiklane ved grensa mellom silt og leire. Dette betyr at flaumen potensielt kan erodere alt som ikkje er festa til elveleiet. Dette aukar sannsynet for kvikkleireskred betrakteleg då store delar av massane vil forstyrrast. At det er restriksjonar på gravearbeid og menneskeleg aktivitet i bydelen Bakklandet gjer sannsynet for skred mindre då menneskeleg aktivitet har i aukande grad vore grunnen til fleire kvikkleireskred dei siste åra. Dette såg ein i til dømes Rissaraset i 1978.

Sjølv om ein 200-års flaum kanskje ikkje vil erodere leira direkte, kan auka nedbør føre til problem med overflateavrenning og/eller auke poretrykket i leira i tillegg til at flaumen kan erodere elveleiet gradvis med kvar flaum og destabilisere skråninga. Hyppig og kraftig nedbør kan føre til at overflatevatn grev seg nye vegar, noko som kan forstyrre leiremassane. Som nemnt i seksjon 2.3.1 konkluderer NGU med at kvikkleireskredet som gjekk i Gjerdrum i 2020 var grunna mykje og langvarig nedbør som auka poretrykket i leira i tillegg til at skråninga der skredet starta var ustabil. Den langvarige og kraftige nedbøren hadde òg ført til auka erosjon i Tistilbekken ved skredet. Med tanke på at eit slikt skred skjedde i 2020 er det ikkje usannsynleg at det kan skje igjen.

På den andre sida må ein tenkje på at både skredet i Gjerdrum og i Verdalen skjedde grunna erosjon i mindre, uregulerte bekkar, medan Nidelva er ei større elv som er erosjonssikra over større delar. I tillegg vil overflatevatnet i stor grad førast i byen sitt avlaupssystem slik at mindre vassmengder faktisk når leira i grunnen. Ein kan sjå føre seg at kvikkleireskred grunna elveerosjon i Nidelva er

lite sannsynleg i dei delane av elva som er erosjonssikra og regulerte. I tillegg ser ein i flauanalysen at vasshastigheita aukar i enden av yttersvingen ved Gamle bybru, noko som kan bety auka erosjon i det området. Dette vurderast som svært usannsynleg då området er godt sikra mot erosjon (Figur 5, bilde 2). Det er meir tenkjeleg at eit kvikkleireskred kan gå i ei sideelv eller ein bekk som går ut i Nidelva og dermed kan føre til oppdemming og ei eventuell flodbølge.

Sjølv om DSB bedømmer eit slik scenario til å vere usannsynleg og NVE bedømmer erosjonssikringa til å vere i god stand, seier likevel NVE sitt temakart for kvikkleireområde frå 2018 at på Bakklandet er det både høg faregrad og risikoklasse 5 for kvikkleire\*. Difor er det ikkje utenkjeleg at eit kvikkleireskred på Bakklandet er sannsynleg, samt at det må takast svært alvorleg basert på risikoklassen. Samtidig må ein ta til betraktning at scenarioet i rapporten til DSB er eit heilt spesifikt scenario som er sensitiv for at fleire faktorar ligg til grunne; som at i scenarioet går det eit initialscred som gir tid til evakuering før hovudskredet. Sjølv om eit initialscred skulle gå er det ikkje sikkert at dette blir oppfatta, særleg dersom det går på natta eller langs elvebotnen. Difor er det vanskeleg å bruke dette scenarioet som eit realistisk mål på sannsyn. Generelt sett er det vanskeleg å seie noko om sannsynelegheita, då det er vanskeleg å predikere framtidige hendingar.

*\*Det er verdt å merke at sidan starten av arbeidet med denne oppgåva er faregraden for kvikkleire endra til låg-middels og risikoklassen er endra til 4-5.*

### 5.3 – Feilkjelder

For det første er det uvisse rundt analyseområdet. For at analysen skulle bli nøyaktig måtte eit stort nok område veljast, samtidig som at området ikkje vart for stort. I tillegg er HEC-RAS© eit program eg aldri har brukt før og måtte lære meg sjølv. Difor gjekk mykje tid til å forstå programmet. Innan analyseområdet er det også lagt inn sju bruer. Det er uvisse rundt bruene sine dimensjonar og om dei er modellert nøyaktig, noko som kan påverke flauanalysen. Sannsynlegvis vil ikkje desse ha mykje påverknad, men det er ein faktor å ta til betraktning. I tillegg manglar analysen kalibrering med kjende flaumverdiar, noko som gjer den til grads uvis. Ved samanlikning ser ein at mi flauanalyse er ganske ulik flaumsonekartet til NVE (Vedlegg 3). Dette gjer også oppgåva meir usikker då NVE er ein statleg etat som har meir kompetanse innan

fagfeltet enn det eg har. På den andre sida er ikkje dette mogleg å samanlikne då NVE sitt flaumsonekart er basert på andre verdiar og metodar enn mi analyse.

For det andre er det uvisse rundt verdiane eg har brukt i analysen. Ei stor uvisse er at analysen ikkje inneheld eit sikkert mål på sedimentstorleiken. Dersom eg hadde kjend sedimentstorleiken i yttersvingen av Nidelva ved Bakklandet kunne denne plottast i Hjulströms diagram og eg kunne kome med ein meir nøyaktig konklusjon. Dette ville òg gitt ein meir nøyaktig berekning i Meyer-Peter & Müller korrelasjonen. Det er også verdt å merke at sjølv om det basert på Hjulströms kurve vil oppstå erosjon ved ein 200-års flaum i Nidelva (Figur 21) er mengda erosjon vanskeleg å berekne ut frå Meyer-Peter & Müller korrelasjonen då denne kunn brukast til å berekne transport. I tillegg er verdiane for vassføring ved 200-års flaum basert på NVE sitt flaumsonekart frå 2001 (Bævre, 2001). Dette er altså 23 år gammalt, noko som gjer verdiane noko utdaterte og dermed noko uvisse. Difor er det nødvendig å utføre ei ny hydrologisk berekning av flaumverdiar for Nidelva. Samtidig er det tenkjeleg at desse verdiane ikkje vil endrast noko særleg over tid då Nidelva er regulert. Verdiane for gjennomsnittleg avrenning og Manning's  $n$  er henta frå Nguyen (2018) sin rapport. I rapporten er det lite opplyst om korleis verdiane er innhenta utanom at NTNU og NVE har bidrege med data brukt i analysen. Med tanke på at NTNU og NVE er sikre kjelder for hydrologiske målingar og at rapporten ikkje er eldre enn seks år vel eg å bedømme desse verdiane som sikre. I tillegg valde eg å definere flaumtida til 36 timar. Dette talet er det stor uvisse rundt då det er basert på ein flaum av same storleik men i eit heilt anna elvelaup. Eg valde denne verdien fordi det er svært vanskeleg å vite kor lang tid ein flaum vil ta når ein ikkje har data frå ein nyleg flaum i same elva, men 36 timar verka rimeleg basert på kjende flaumhendingar.

For det tredje er det svært vanskeleg å analysere tenkte framtidige scenario. Dette baserer seg på at ein må ta avgjerder om verdiar basert på historiske verdiar og synsing, noko som gjer det vanskeleg å bedømme om analysen vil vere riktig for ei framtidig hending. Sjølv om det er vanskeleg å basere ei analyse på eit tenkt scenario, er det likevel ein god mal å ha til bruk i samfunnsplanlegging. HEC-RAS© har ein funksjon for sedimenttransportberekning, men fordi denne oppgåva hadde avgrensa mengde tid og ressursar til rådighet gjekk fokuset til å undersøkje kunn dei hydrologiske funksjonane i programmet. Grunna avgrensa mengde tid og ressursar vart oppgåva noko mindre nøyaktig enn den har potensial til å bli.

### *Vidare arbeid*

Forslag til vidare arbeid for ei meir nøyaktig analyse kan vere eit meir omfattande feltkurs der sedimentstorleik, poretrykk i leira, ekstra erosjonsutsette områder, vasstand, gjennomsnittleg avrenning og erosjonssikring med meir undersøkjast. Alternativt kan ein undersøkje sedimenttransportberekninga som finnast i HEC-RAS©. I tillegg kan det vere nyttig å teste forskjellige formlar for sedimenttransport i staden for berre Meyer-Peter & Müller formelen, til dømes Einstein-, Schoklitsch-, og Nielsenformelen (Chanson, 2004).

Noko oppgåva ikkje diskuterer er at det ikkje nødvendigvis vil bli fleire 200-års flaumar, men sannsynet er stort for at mindre flaumar vil opptre hyppigare, som middel- og 50-års flaumar (Norsk Klimaservicesenter 2016). Eit forslag til vidare forskning kan vere å studere korleis auka hyppigheit av middel- og/eller 50-års flaumar vil påverke sannsynet for kvikkleireskred. I tillegg vil vidare arbeid måtte ta omsyn til det oppdaterte kvikkleirekartet og kva dette har å seie for sannsynet for kvikkleireskred grunna elveerosjon.

## 6. Konklusjon

På bakgrunn av diskusjonen kan eg konkludere med at ein 200-års flaum i Nidelva kan erodere nok til å løyse ut eit kvikkleireskred på Bakklandet, men at dette er svært usannsynleg grunna god erosjonssikring og høgt kompetansenivå blant relevante aktørar. Potensialet for kvikkleireskred er derimot stort dersom erosjonssikringa ikkje blir teke vare på og rusta opp jamleg. Dette særleg med tanke på predikeringane for klima fram mot år 2100. I tillegg er det noko usikkert om flaumen i det heile teke vil erodere leirepartiklar eller om den ikkje vil erodere partiklar mindre enn silt. Til trass for at analysen ikkje var fullt så nøyaktig som den kunne ha vore med meir tid og midlar vil eg likevel påstå at dersom erosjonssikringa overlev den potensielle flaumen er det lite grunn til å tru at eit kvikkleireskred vil skje med flaum som utløysande faktor. Dersom erosjonssikringa ikkje blir teke vare på og skulle bli rive vekk i flaumen derimot, vurderast faren for kvikkleireskred grunna flaum til å vere stor. Dersom klima endrar seg i samsvar med klimamodell RCP 4.5 vil tal flaumhendingar auke i framtida. Difor vil det vere viktig å førebu vassdrag og kvikkleireutsette elvelaup på denne endringa.

Ei anna utfordring som kanskje er meir reell er den predikerte auka mengda hyppig og intens nedbør som vil føre til både auka poretrykk i leira og problem knytt til overflateavrenning. Sjølv om det kanskje ikkje er reelt at elveerosjon fører til eit kvikkleireskred på Bakklandet kan det vere svært reelt at auka poretrykk og problem knytt til overflateavrenning grunna mykje nedbør kan løyse ut eit kvikkleireskred. Historisk sett har fleire kvikkleireskred blitt utløyste etter periodar med mykje nedbør, til dømes kvikkleireskredet i Gjerdrum i 2020, som nemnt i seksjon 2.3.1. Difor vurderer eg predikeringane om auka nedbør i åra fram mot 2100 som ein fare for kvikkleireutsette områder.

Denne oppgåva har vore eit nyttig studie for å kaste lys over ein reell potensiell samfunnsfare. Gjennom åra har Noreg fått oppleve dei fatale konsekvensane kvikkleireskred kan ha for eit samfunn. Dersom det skulle gå eit kvikkleireskred i Nidelva vil elva sannsynlegvis demmast opp og føre med seg enda fleire konsekvensar. Dette er noko Noreg må ta på alvor for alle kvikkleireutsette områder, særleg dei med høg ris. Sjølv om Nidelva er eit regulert vassdrag som er godt rusta mot flaum, kan det likevel gå kvikkleireskred i elvelaupet som demmar opp Nidelva og dannar ei flodbølgje. Det kan også gå kvikkleireskred utan at det har noko med flaum å gjere, men som tidlegare nemnt vil auka elveerosjon auke sannsynet for kvikkleireskred.

Sjølv om det ikkje er sannsynleg at ein flaum vil utløyse kvikkleireskred på Bakklandet med den erosjonssikringa som er i dag, er det meir sannsynleg at ein flaum vil kunne utløyse kvikkleireskred i bekkar og uregulerte vassdrag som ikkje er erosjonssikra, noko vi har sett tidlegare. Andre problemstillingar å ta tak i kan vere korleis auka nedbør vil føre til auka poretrykk i leire og skape problem knytt til overflateavrenning. Å simulere flaum i HEC-RAS© har vist seg å vere nyttig for både å analysere og å visualisere flaum med ulike vassføringar og dermed analysere skadeomfang av potensielle flaumhendingar.



## 7. Referansar

- Bakklandet.info. (2011). *Velkommen til Bakklandet*. Retrieved 18.03 from <http://bakklandet.info/#top>
- Bævre, I. (2001). *Flomsonekart Delprosjekt Trondheim*. NVE. [https://publikasjoner.nve.no/flomsonekart/2001/flomsonekart2001\\_06.pdf](https://publikasjoner.nve.no/flomsonekart/2001/flomsonekart2001_06.pdf)
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of Open Channel Flow* (2 ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5978-9.X5000-4>
- Corney, R. K. T., Peakall, J., Pearsons, D. R., Elliott, L., Amos, K. J., Best, J. L., Keevil, G. M., & Ingham, D. B. (2006). The orientation of helical flow in curved channels. *Wiley*, 53(2), 249-257. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00771.x>
- DSB. (2019). *Analysen av krisescenarioer*. D. f. s. o. beredskap. <https://www.dsb.no/rapporter-og-evalueringer/analyser-av-krisescenarioer-2019/>
- Fluid flow: Shields and Hjulstøms diagrams*. (u.d.). Geological Digressions. Retrieved 01.05 from <https://www.geological-digressions.com/fluid-flow-shields-and-hjulstrom-diagrams/>
- Fremstad, E., & Thingstad, P. G. (2007). *Nidelva, Trondheims hjerte. Bli med ut*. [https://www.ntnu.no/c/document\\_library/get\\_file?uuid=53bb4e91-9834-44d2-8c2e-f0e8e0b227e5&groupId=10476](https://www.ntnu.no/c/document_library/get_file?uuid=53bb4e91-9834-44d2-8c2e-f0e8e0b227e5&groupId=10476)
- Geodata. (2024). *Elvenett*. temakart.nve.no, NVE. Retrieved 21.02.2024 from <https://temakart.nve.no/tema/elvenett>
- Geovekst. (2024). *NEVINA*. nevina.nve.no, Geodata. <https://nevina.nve.no/>
- Glad, P. A., Stenius, S., Leine, A.-L. Ø., Væringstad, T., Holmqvist, T., Dahl, M.-P. J., & Trondsen, E. (2022). Veileder for flomberegninger. *Veileder*, 1, 145. [https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022_01.pdf)
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A., & Ådlandsvik, B. (2016). *Klima i Norge 2100*. N. Klimaservicesenter. <https://klimaservicesenter.no/kss/rapporter/kin2100>

- Harby, A., Alfredsen, K., Arnekleiv, J. V., Flodmark, L. E. W., Halleraker, J. H., Johansen, S., & Saltveit, S. J. (2004). *Raske vannstandsendringer i elver*. S. E. AS.  
<https://www.sintef.no/globalassets/project/vannforing/tr-a59321.pdf>
- Hillestad, K. (2015). *Hvordan ta hensyn til klima-endringer i arealplanleggingen*. NVE.  
[https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2015/faktaark2015\\_03.pdf](https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2015/faktaark2015_03.pdf)
- Høydedata. (2024). *Høydedata og djupnedata*. Kartverket. Retrieved 22.03 from  
<https://www.kartverket.no/api-og-data/terrengdata>
- Janbu, N. (1965). *Verdalsraset i 1893 - Hva skjedde egentlig? 63*. D. n. myrselskap.  
[https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/bitstream/handle/11250/2483826/352\\_004\\_Verdalsraset%20i%201893%20-%20Hva%20skjedde%20egentlig.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/bitstream/handle/11250/2483826/352_004_Verdalsraset%20i%201893%20-%20Hva%20skjedde%20egentlig.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Miedema, S. A. (2010). *Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications*. D. U. o. Technology.  
[https://www.researchgate.net/publication/228750218\\_Constructing\\_the\\_Shields\\_curve\\_a\\_new\\_theoretical\\_approach\\_and\\_its\\_applications\\_See\\_also\\_other\\_papers\\_on\\_the\\_Shields\\_curve](https://www.researchgate.net/publication/228750218_Constructing_the_Shields_curve_a_new_theoretical_approach_and_its_applications_See_also_other_papers_on_the_Shields_curve)
- Moholdt, R. (2020). *Oversiktskartlegging og klassifisering av faregrad, konsekvens og risiko for kvikkleireskred*. NVE.  
[https://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2020/eksternrapport2020\\_09.pdf](https://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2020/eksternrapport2020_09.pdf)
- NGU. (2020). *Gjerdrumskredet*. NGU. Retrieved 26.02 from <https://www.ngu.no/geologi-og-risiko/gjerdrumskredet>
- NGU. (2024). *Klassifisering av sedimentene basert på kornstørrelsessammensetning (Folk, 1954, modificert)*. NGU. Retrieved 02.04 from  
<https://www.ngu.no/Mareano/Kornstorrelse.html>
- NGU. (u.d.). *Rissaraset*. NGU. Retrieved 23.02 from <https://www.ngu.no/geologi-og-risiko/rissaraset>
- Norsk Klimaservicesenter (2016). *Klimaprofil Sør-Trøndelag*.  
[https://www.statsforvalteren.no/contentassets/ddc8b6642b7c4e98a59fe9e3644a43ea/klimaprofil-sor\\_trondelag.pdf](https://www.statsforvalteren.no/contentassets/ddc8b6642b7c4e98a59fe9e3644a43ea/klimaprofil-sor_trondelag.pdf)

- NVE. (2020). *Kvikkleireskredet i Gjerdrum*. NVE. Retrieved 26.01 from [https://www.nve.no/naturfare/laer-om-naturfare/om-skred/kva-er-kvikkleire-og-  
kvikkleireskred/kvikkleireskredet-i-gjerdrum/](https://www.nve.no/naturfare/laer-om-naturfare/om-skred/kva-er-kvikkleire-og-kvikkleireskred/kvikkleireskredet-i-gjerdrum/)
- Olsen, E. (1893). Verdalskredet. In (Vol. 18x24 cm). ntnu.tind.io: NTNU Universitetsbibliotek.
- Ordliste for flom. (2024). Varsom. [https://www.varsom.no/flom-og-jordskred/ordliste/ordliste-  
for-flom/](https://www.varsom.no/flom-og-jordskred/ordliste/ordliste-for-flom/)
- Reite, A. J., Sveian, H., & E., E. (1999). Trondheim fra istid til nåtid. *Gråsteinen*(5), 10. [https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Graasteinen/Graasteinen05\\_Trondheim.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Graasteinen/Graasteinen05_Trondheim.pdf)
- Skei, K., Orvedal, K., Johnsen, M., & Osnes, A. (2009). *Nidelva og Gaula* 3). NVE. [https://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2009/oppdragsrapportA2009\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2009/oppdragsrapportA2009_01.pdf)
- Steinus, S., Glad, P. A., & Wilson, D. (2014). Karakterisering av flomregimer. *Rapport*. [https://nve.brage.unit.no/nve-  
xmlui/bitstream/handle/11250/2497325/rapport2014\\_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/bitstream/handle/11250/2497325/rapport2014_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Stranden, I. L. (2020). 42 år siden Norges største kvikkleireskred - først nå tør man bygge ny veg i området. *NRK* [https://www.nrk.no/trondelag/42-ar-siden-det-store-rissaraset-i-  
trondelag- -forst-na-tor-man-bygge-ny-veg-i-området-1.14859499](https://www.nrk.no/trondelag/42-ar-siden-det-store-rissaraset-i-trondelag--forst-na-tor-man-bygge-ny-veg-i-området-1.14859499)
- Sulebak, J. R. (2018). *Landformer og prosesser* (3 ed.). Fagbokforlaget.
- Syversen, M. W. (2016). *Bekkeerosjon og sikringstiltak i områder med marin leire* [Master, NTNU]. banenor.brage.unit.no. [https://banenor.brage.unit.no/banenor-  
xmlui/bitstream/handle/11250/2394215/Masteroppgave%20Marita%20Walheim%20Syv-  
ersen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://banenor.brage.unit.no/banenor-xmlui/bitstream/handle/11250/2394215/Masteroppgave%20Marita%20Walheim%20Syversen.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Tillerbakk, I. (2011). *Kvikkleire og samfunnssikkerhet i Trondheimsregionen* [Masteroppgave, Universitet for miljø- og biovitenskap]. nmbu.brage.unit.no. [https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-  
xmlui/bitstream/handle/11250/188174/Masteroppgave\\_Tillerbakk.pdf?sequence=1&isAll-  
owed=y](https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/188174/Masteroppgave_Tillerbakk.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Trømborg, D. (2006). *Geologi og landformer i norge* (1 ed.). Tun Forleg AS.
- U.S. Army. (2024). *HEC-RAS*. US Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/features.aspx>
- Væringstad, T. (2018). *Flomberegning for Opo*. NVE. [https://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2018/oppdragsrapportA2018\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2018/oppdragsrapportA2018_01.pdf)

Wiig, T., Strand, S.-A., & Haugen, E. D. (2019). Sikkerhet mot kvikkleireskred. *NVE Veileder*, 1, 86. [https://publikasjoner.nve.no/veileder/2019/veileder2019\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/veileder/2019/veileder2019_01.pdf)

## 8. Kjelder for romleg data

Geonorge (2024). *FKB-AR5*.

<https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/arealressurskart-fkb-ar5-arealtyper/280bbd7a-5ce9-4c83-9e15-ac162cabd8a6>

Høydedata. (2024). *Høydedata*.

<https://hoydedata.no/LaserInnsyn2/>

NVE (2024). *Karttjenester*.

<https://www.nve.no/karttjenester/>

NVE (2024). *NEVINA*.

<https://nevina.nve.no/>



## 9. Vedlegg

### 9.1 Spesifikke verdier for Manning's $n$ i Nidelva

	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	7780.727	n	0.037	0.037	0.037
2	7527.504	n	0.037	0.037	0.037
3	7282.508	n	0.037	0.037	0.037
4	7003.064	n	0.0303	0.0303	0.0303
5	6735.69	n	0.0315	0.0315	0.0315
6	6235.858	n	0.0303	0.0303	0.0303
7	6006.047	n	0.0303	0.0303	0.0303
8	5837.81	n	0.0303	0.0303	0.0303
9	5603.116	n	0.0238	0.0238	0.0238
10	5361.917	n	0.0238	0.0238	0.0238
11	5150.524	n	0.0238	0.0238	0.0238
12	4916.598	n	0.0257	0.0257	0.0257
13	4721.334	n	0.0588	0.0588	0.0588
14	4504.879	n	0.0246	0.0246	0.0246
15	3957.328	n	0.0246	0.0246	0.0246
16	3884.048	n	0.0246	0.0246	0.0246
17	3725.373	n	0.0246	0.0246	0.0246
18	3598.078	n	0.0246	0.0246	0.0246
19	3351.142	n	0.0314	0.0314	0.0314
20	3271.093	n	0.0314	0.0314	0.0314
21	3173.824	n	0.0324	0.0324	0.0324
22	2966.22	n	0.0324	0.0324	0.0324
23	2765.339	n	0.0281	0.0281	0.0281
24	2544.777	n	0.0281	0.0281	0.0281
25	2343.476	n	0.0281	0.0281	0.0281
26	2223.258	n	0.0281	0.0281	0.0281
27	2076.534	n	0.0332	0.0332	0.0332
28	1949.921	n	0.0332	0.0332	0.0332
29	1883.047	n	0.0286	0.0286	0.0286
30	1682.236	n	0.0286	0.0286	0.0286
31	1641.35*	n	0.0286	0.0286	0.0286
32	1600.47*	n	0.0286	0.0286	0.0286
33	1559.582	n	0.0286	0.0286	0.0286
34	1449.102	n	0.0286	0.0286	0.0286
35	1409.818	n	0.0222	0.0222	0.0222
36	1366.38	n	0.03267	0.03267	0.03267
37	1096.673	n	0.03267	0.03267	0.03267
38	842.5486	n	0.028908	0.028908	0.028908
39	706.7225	n	0.028908	0.028908	0.028908
40	1	n	0.028908	0.028908	0.028908

Vedlegg 1: Spesifikke verdier for Manning's  $n$  i Nidelva. Nguyen (2018)

## 9.2 Generelle verdier for Manning's n fra Vassdragshåndboka

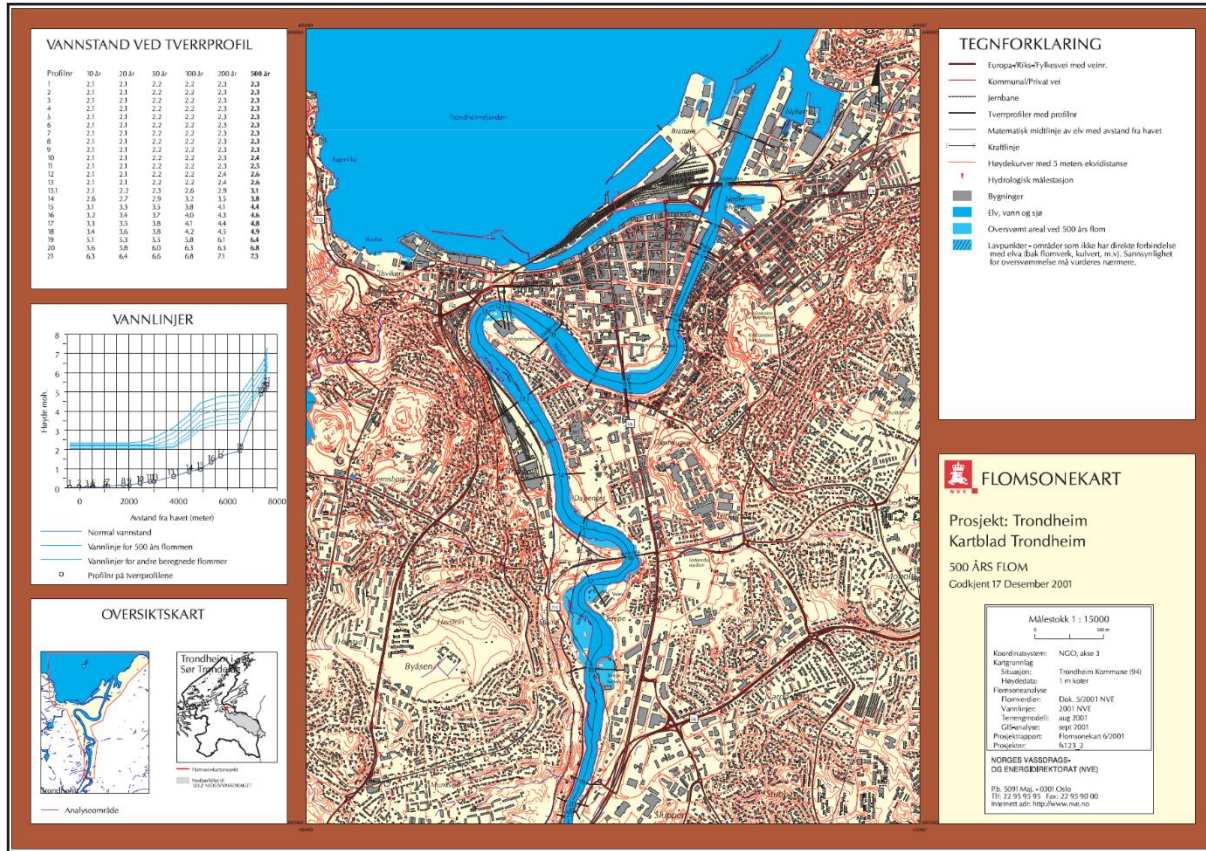
\* Verdiane vist i vedlegget er Strickler K verdier. Ved bruk i denne oppgåva konverterast verdiane til Manning's n ved formelen  $n = 1/K$

Tabell 4.1. Verdier av Mannings ruhetstall M for kanaler og vassdrag.

Kanaler med sider og bunn av:		Vanlige M-verdier	Naturlige vassdrag Små bekker, bredde <30 m	Vanlige M-verdier
Metall	malt korrugert	60-77-83 33-40-48	Rette, rene, uten kulper, med full vannføring	30-33-40
Tre	høvlet, umalt uhøvlet planker	70-83-90 66-77-90 55-67-83	Samme, men mer stein og planter Rene, svinget, noen kulper Samme, men noe planter og stein	25-29-33 22-25-30 20-22-29
Betong	glatt puss på grus delvis sprøytet samme på råfjell	63-70-90 50-59-66 40-50-60 37-45-58	Samme, men mer stein Samme, lav vannstand, delvis tørrlagt Uryddige, kulpet plantebevokst Svært tilvokst, kulpet. Flomløp	17-20-22 18-21-25 12-14-20 7-10-13
Støpt bunn med sider av:	glatt steinmur stein i mørtel betongblokker steinplastring	50-59-66 40-50-60 33-40-50 28-33-50	Fjellbekker uten vegetasjon i løpet, men bevokst på sidene: Bunn av grus, stein og blokker Bunn av store steiner og blokker	20-25-33 14-20-25
Grusbunn med sider av:	betong stein i mørtel steinplastring	40-50-59 38-43-50 28-30-43	Flom over åpent landskap	Vanlige M-verdier
Murstein	glasert vanlig i mørtel	66-77-90 55-67-83	Flomsletter, eng Kort gras Langt gras	29-33-40 20-29-33
Steinmur	i mørtel tørrmur	33-40-59 28-31-43	Flomsletter, åkerland Uten vekster Radvekster Moden grøde	25-33-50 22-29-40 20-25-33
Asfalt	glatt ru	75-80 60-65	Busklandskap, lett med planter Busker og trær, sommer Busker og trær, vinter	14-20-29 6-13-25 9-16-29
Vegetasjon	planerte sider beskyttet med grasvekst	20-33	Skog, tett lauvskog, sommer Nyhogd land med stubber Tømmerskog, flom under greiner Samme, men greiner under flomnivå	5-7-9 20-25-29 8-10-12 6-8-10
Maskingravde og mudrede kanaler		Vanlige M-verdier	Naturlige vassdrag Større elver, bredde > 30 m M større for tilsv. småelver	Vanlige M-verdier
Rette og jevne jordkanaler	ren, nygravd ren, erodert grus, jevn, ren med kort gras	50-56-63 40-45-56 33-40-45 30-37-45	Regulær strekning uten store steiner eller kantvegetasjon Ujevne løp og grove bunn- og sideforhold	17-40 10-29

Vedlegg 2: Generelle verdier for Manning's n i Nidelva. Vassdragshåndboka, Fergus et al. (2010)

### 9.3 Flaumsonekart 200-års flaum NVE



Vedlegg 3: Flaumsonekart 200-års flaum i Nidelva. Bævre (2001)



