



RAPPORT

Geoteknisk utredning av kvikkleiresone 486 Korsgården og 2038 Vika i Nedre Eiker kommune

MODELLERING AV UTLØP FRA POTENSIELT
KVIKKLEIRESKRED INNENFOR KVIKKLEIRESONE
2038 VIKA

DOK.NR. 20110297-02-R
REV.NR. 0 / 2020-11-13

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekt

Prosjekttittel: Geoteknisk utredning av kvikkleiresone 486 Korsgården og 2038 Vika i Nedre Eiker kommune
Dokumenttittel: Modellering av utløp fra potensielt kvikkleireskred innenfor kvikkleiresone 2038 Vika
Dokumentnr.: 20110297-02-R
Dato: 2020-11-13
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Region Sør
Kontaktperson: Jan Eirik Hønsi, Ellen Davis Haugen
Kontraktreferanse: Oppdragsbekreftelse 8. juni 2020

for NGI

Prosjektleder: Håkon Heyerdahl
Utarbeidet av: Zhongqiang Liu, Kjetil Sverdrup-Thygeson
Kontrollert av: Håkon Heyerdahl

Sammendrag

På oppdrag fra NVE har NGI modellert utløp av skredmasser fra potensielt kvikkleire-skred som løsner innenfor kvikkleiresonen 2038 Vika ved Mjøndalen i Nedre Eiker kommune.

Beregninger er utført for to antatte skredscenarier, ett "stort", og ett "sannsynlig". Det største scenariet har et skredvolum på ca. 400.000 m³, mens det "sannsynlige" scenariet er ca. 200.000 m³. Løsneområdene er valgt av NVE og NGI ut fra en vurdering av potensiell bruddmekanisme og basert på tilgjengelige grunnundersøkellesdata. For hvert scenario er det gjort beregninger med to forskjellige sett av inngangsparametere, dvs. det er i alt utført fire analyser av skredutløp. Modelleringen er utført med beregningsprogrammet BingClaw, en kvasi-3D-kode basert på visko-plastisk reologi av Herschel-Bulkley-type.

For "stort" scenario vil et betydelig volum av skredmasser nå langt ned i bebyggelsen. Skredstrømmen vil nå en betydelig hastighet (opp mot 12 m i tidlig fase av "stort" scenario), og skredmasser vil avleires i tykkelser på over 5 m. For "stort" scenario er betydningen av skråningen i bakkant (søndre ende) av løsneområdet av stor betydning, da dette området har stor overhøyde og gir en stor effekt på hele skredforløpet. Dersom det påvises at det ikke er kvikkleire i denne delen av nåværende sone, vil dette scenariet trolig endres vesentlig.

For "sannsynlig" skredforløp blir en stor andel av skredmassene ikke mobilisert i skredet, trolig pga. relativt høy initiell skjærfasthet av løsneområdet. For en mer konservativ analyse, kan beregningene gjentas med noe lavere skjærfasthet enn det som er benyttet i analysene så langt. For "sannsynlig" scenario vil konsekvensene nedstrøms være langt mindre enn for "stort" scenario. Maksimal strømningshastighet vil være mindre, om lag 5-6 m/s, men skredmassene vil fortsatt ramme et betydelig antall hus.

Bekkelukkingen for Vrangbekken forverrer situasjonen med hensyn til utløp av skredmasser mot bebyggelsen. Skredmasser vil for begge scenariene strømme ned ravinen langs Vrangbekken, fylle ravinen, og strømme ut av bekkeleiet og inn i bebyggelsen nedstrøms bekkelukkingen. For "stort" scenario vil masser strømme ut fra ravinen også lenger opp langs bekken.

Analysene kan detaljeres videre basert på evt. supplerende grunnundersøkelser (endret løsneområde), og for varierende sett av materialparametere. Dette vil gi økt forståelse for mulige utfall av skred av forskjellig størrelse, som potensielt kan tenkes å løsne innenfor kvikkleiresonen, og det kan settes tall på usikkerhet i beregnet utløpslengde ved bruk av Monte Carlo-analyser, som er innebygget i BingClaw.

Analysene gir ikke et fasitsvar på hvor stort et eventuelt skred som løsner innenfor kvikkleiresonen vil bli, men vil, sammen med geotekniske vurderinger gi et godt grunnlag for risikovurderinger med hensyn til mulige konsekvenser av skredutløp.

Innhold

1	Innledning og bakgrunn	6
2	Beskrivelse av opprinnelig kvikkleiresone Korsgården	6
3	Numerisk modell	7
4	Materialparametere og beregningsforutsetninger	9
4.1	Materialparametere	9
5	Simulering av skredutløp	12
5.1	Scenario 1: "Stort"	13
5.2	Scenario 2: "Sannsynlig"	15
6	Videre arbeid	16
7	Referanser	17

Tabell

Tabell 1. Tolkning av aktiv udrenert skjærfasthet fra CPTU-sondering i borpunkt 1004.	10
---	----

Figur

Figur 1. Opprinnelig kvikkleiresone 486 Korsgården	6
Figur 2. Kvikkleiresonene 486 Korsgården og 2038 Vika i Nedre Eiker. Sort linje viser opprinnelig sone 486 korsgården, grønn heltrukken linje viser ny sone 486 Korsgården, lilla heltrukken linje viser ny sone 2093 Vika. Stiplede linjer viser antatte skredutløp fra de to sonene: Grønn stiplet linje for sone 486 Korsgården og lilla stiplet linje for 2038 Vika (NGI, 2019).	7
Figur 3. Tolkning av aktiv udrenert skjærfasthet fra CPTU-sondering i borpunkt 1004.	9
Figur 4. Borprofil fra prøveserie i borpunkt 1004. (ref. /4/)	10
Figur 5. Omformings hastighet Γ vs likviditetsindeks LI (ref. /3/)	11
Figur 6. Likviditetsindeks fra prøveserie i borpunkt 1004	11
Figur 7. "Stort" scenario (øverst) og "sannsynlig" scenario for modellering av skredutløp.	12
Figur 8. "Stort" scenario ved avslutning av analysen. Venstre: Skjærfasthet 60 kPa. Høyre: Skjærfasthet 40 kPa. Tykkelsen av skredmasser i nedre del av utløpsområdet er 3-5 m.	14
Figur 9. Maksimal hastighet versus tid for "stort" scenario.	14
Figur 10 "Sannsynlig" scenario ved avslutning av analysen ved T=1200 (venstre: 40 kPa, høyre: 60 kPa)	15
Figur 11. Maksimal hastighet versus tid for "sannsynlig" scenario	16

Vedlegg

Vedlegg A	Numerical model – BingClaw
Vedlegg B	Utløpsmodellering – scenario 1: "stort"
Vedlegg C	Utløpsmodellering – scenario 2: "sannsynlig"

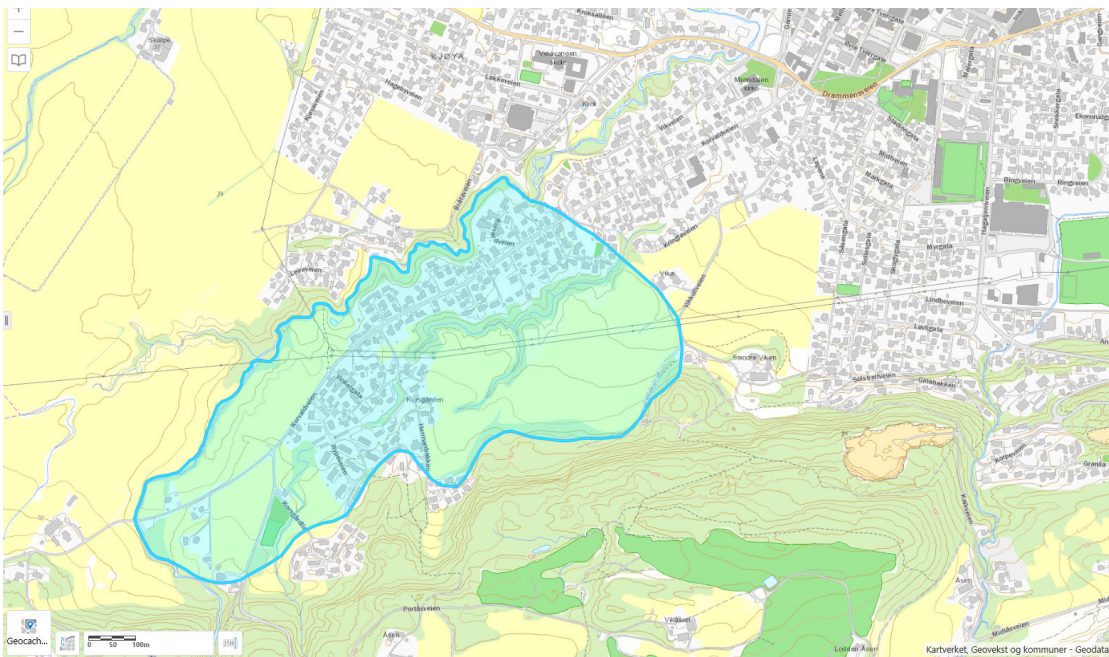
Kontroll- og referanseside

1 Innledning og bakgrunn

På oppdrag fra NVE har NGI utført numeriske beregninger av utløp av skredmasser fra kvikkleireskred som potensielt kan tenkes å løsne innenfor kvikkleiresonen 2093 Vika ved Mjøndalen i Nedre Eiker kommune. Kontaktpersoner hos NVE for oppdraget er Jan Eirik Hønsi og Ellen Davis Haugen.

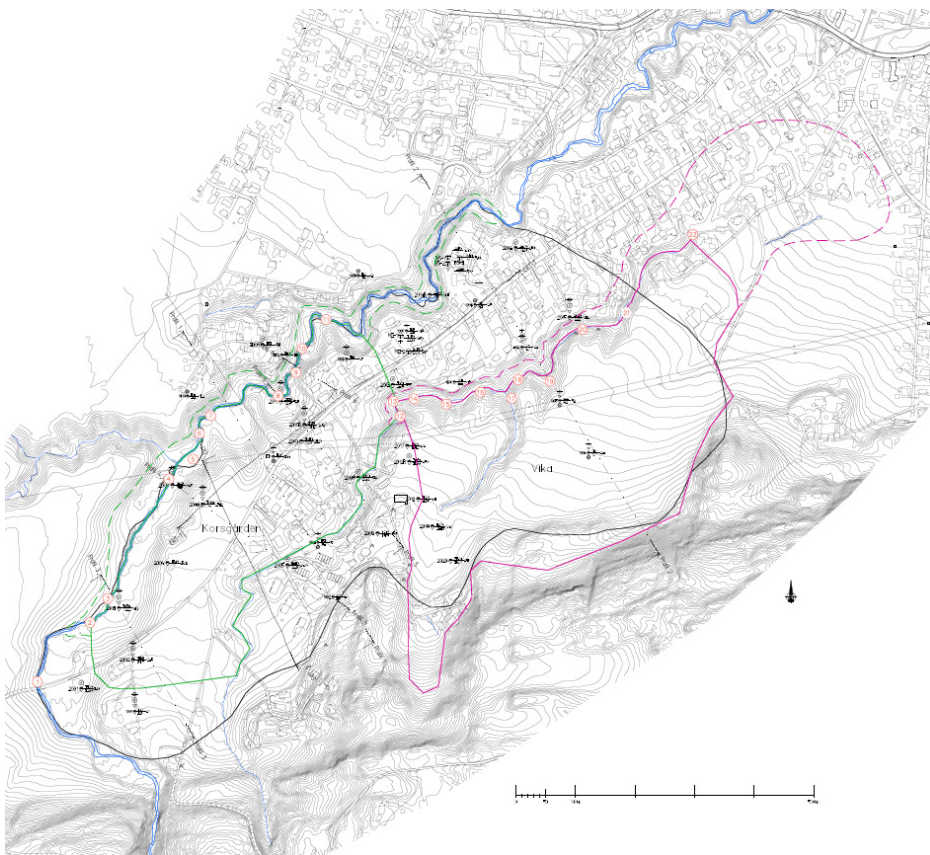
2 Beskrivelse av opprinnelig kvikkleiresone Korsgården

Kvikkleiresone 486 Korsgården ligger sørvest for Mjøndalen sentrum i Nedre Eiker kommune (Figur 1). Sonen ble først kartlagt ved regionalkartleggingen av kartbladet 1814 III Drammen i 1996 (ref. /1/). Den opprinnelige sonen er vist på Figur 1, og målte ca. 800-900 m på langs, fra sørvest til nordøst, og 200-400 m bred (bredest i østre ende). Sonen var avgrenset i vest og nord av bekken Veia, og mot overgang til ikke-marine masser mot åsryggen i sør. Mot øst er sonen trolig avsluttet skjønnsmessig, basert på at skråningshøyden fra ravinene langs Veia og Vrangbekken avtar gradvis nedstrøms.



Figur 1. Opprinnelig kvikkleiresone 486 Korsgården

Som resultat av geoteknisk utredning av sonene (NGI, 2019) er den opprinnelige sone 486 oppdelt i to soner, 486 Korsgården i vest/nord og 2093 Vika i sør/vest, se Figur 2.



Figur 2. Kvikkleiresonene 486 Korsgården og 2038 Vika i Nedre Eiker. Sort linje viser opprinnelig sone 486 korsgården, grønn heltrukket linje viser ny sone 486 Korsgården, lilla heltrukket linje viser ny sone 2093 Vika. Stiplede linjer viser antatte skredutløp fra de to sonene: Grønn stiplet linje for sone 486 Korsgården og lilla stiplet linje for 2038 Vika (NGI, 2019).

3 Numerisk modell

Modelleringen av skredutløp er utført med et programverktøy utviklet ved NGI, *BingClaw*, som tar hensyn til at et materiale mister fasthet og stivhet som følge av skjæretøyning. En beskrivelse av *BingClaw* er gitt i Vedlegg A.

BingClaw er en kvasi-tre-dimensjonal numerisk modell for tyngdedrevne strømninger for en avgrenset mengde av mudder, enten på land eller i vann. Modellen kan benyttes enten med Bingham eller Herschel–Bulkley (HB) rheologi for visko-plastiske væsker.

Det er valgt å benytte Herschel–Bulkley-reologien i denne studien. Det er hensiktsmessig å benytte en Herschel–Bulkley visko-plastisk væske i stedet for en Bingham-væske ved analyse av skred i norske leirer, fordi skjærspenningen ser ut til å vokse sublinjært med skjærhastigheten (ref. /2/).

Et kvikkleireskred vil i BingClaw modelleres ved at det påføres en initiell forstyrrelse (skjærtøyning) i et mindre område av det potensielle skredvolumet. Forstyrrelsen påføres i området der skredet ville forventes å starte, f.eks. i skråning ned mot en ravine. Denne forstyrrelsen forplanter seg så gjennom volumet av modellen som representerer potensielt skredmateriale. Avhengig av materialparametrene og geometrien av problemet vil skredet så utvikle seg, og skredmassene vil begynne å strømme ut ned som følge av tyngdekraften. Programmet gir en god beskrivelse av overgangen fra fast leire ved starten av skredet og fram til materialet er fullstendig omrørt. Strømnings-egenskapene til skredmaterialet vil endres gradvis som følge av skjærtøyningene som oppstår underveis i skredforløpet.

Maksimalt skredvolum må bestemmes på forhånd, men analysen bestemmer hvilket volum som faktisk blir mobilisert i skredet. Dette avhenger blant annet av den initielle skjærfastheten som legges inn i modellen.

Det er viktig å være klar over at BingClaw ikke er et verktøy som kan benyttes til ordinære geotekniske stabilitetsberegninger, selv om materialet gis en skjærfasthet. Materialet modelleres som væske med isotrope egenskaper, ikke som jord, og spenningsforholdene avviker også fra det som er tilfelle i jord. Det er derfor avgjørende at både definisjon av problemet, dvs. inngangsparametere og forutsetninger som løsningsområders størrelse, samt tolkning av resultater, gjøres i samråd med geoteknisk kyndige. Resultater fra analyser med BingClaw vil således, som all modellering, kun være modelleringsresultater, basert på visse forutsetninger.

Resultatene fra analysene vil imidlertid gi nyttig grunnlag for risikovurderinger, selv om beregningsresultatene ikke vil representere noen fasit for hvordan et virkelig skred vil forløpe. Analysene vil heller ikke fortelle hvor stort et potensielt skred innenfor sonen vil kunne bli. Man må derfor også kombinere bruken av BingClaw med geotekniske vurderinger for å gi grunnlag for vurdering av skredmekanismer og potensiell størrelse av skred.

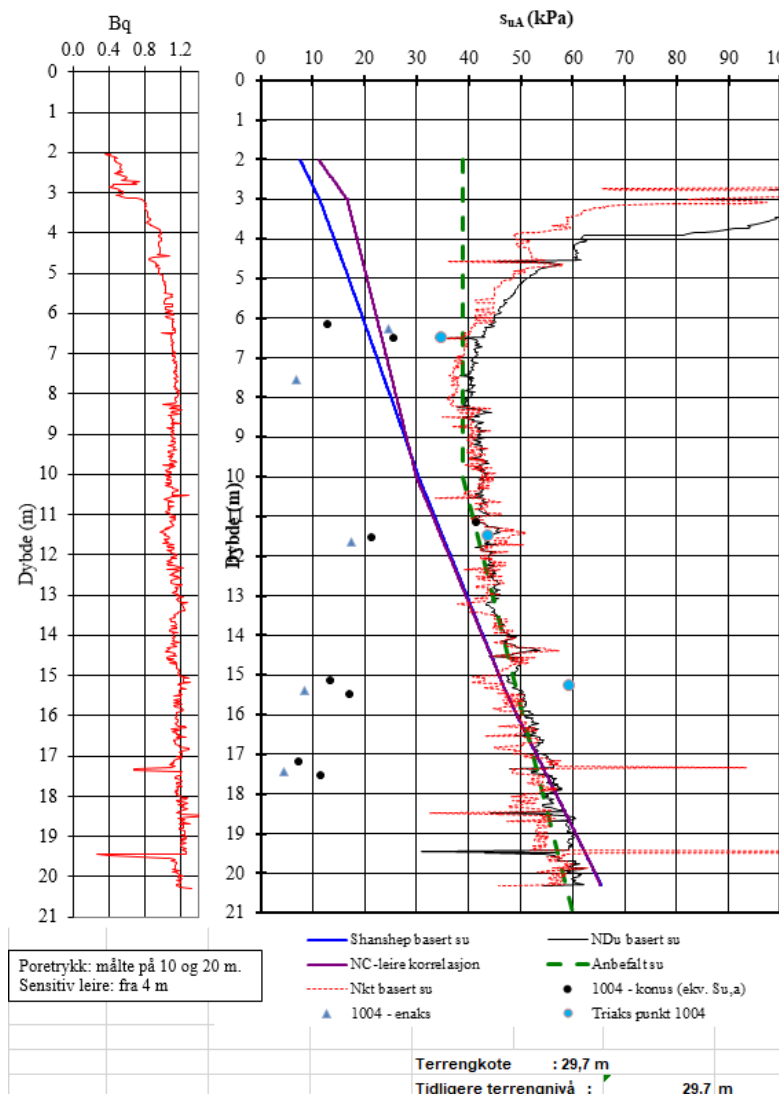
Beregningsprogrammet er benyttet til tilbakeregning av flere historiske skred, og synes å være i stand til å modellere skredstrømmen og utbredelsen på en god måte. For en del historiske skred vil dog grunnforholdene før skred til dels være ukjente, og tilbakeregning (både av skråningstabilitet og utløp) får tilsvarende usikkerhet.

4 Materialparametere og beregningsforutsetninger

4.1 Materialparametere

4.1.1 Udrenert skjærfasthet

Bestemmelse av udrenert skjærfasthet, $\tau_{y,0}$, er i hovedsak basert på CPTU-sondering i borpunkt 1004 (Figur 3 og Tabell 1) og prøveserie i borpunkt 1004 (Figur 4). Tolkning av CPTU-sonderingen er verifisert med tre treaksialforsøk i dette borpunktet (vist i Figur 3), og også underbygget med vurdering av overkonsolideringsforhold.



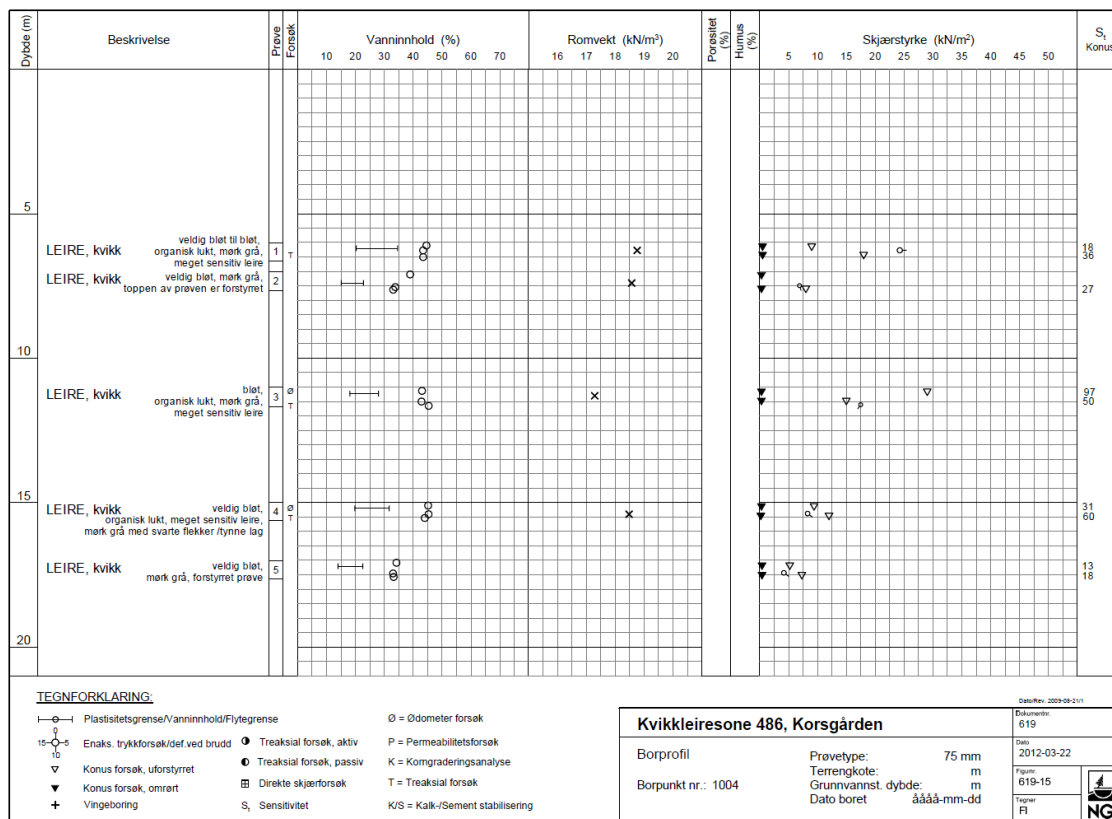
Figur 3. Tolkning av aktiv udrenert skjærfasthet fra CPTU-sondering i borpunkt 1004.

Tabell 1. Tolkning av aktiv udrenert skjærfasthet fra CPTU-sondering i borpunkt 1004.

Borpunkt	Dybde (m)	Udrenert skjærfasthet (kPa)
1004	0-2	100
	2-6	100-40 (lineær reduksjon)
	6-10	40
	10-21	40-60 (lineær økning)

Representativ verdi for udrenert skjærfasthet, $\tau_{y,0}$, er generelt vurdert til 60 kPa. Det er også gjort analyser med en noe lavere skjærfasthet (40 kPa).

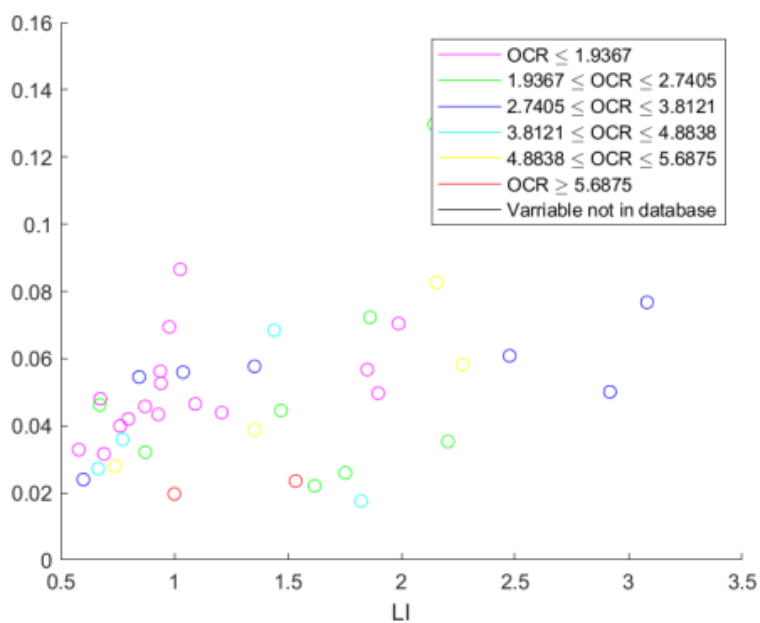
Basert på Figur 4, er omrørt skjærstyrke, $\tau_{y,\infty}$, generelt satt til 0.5 kPa.



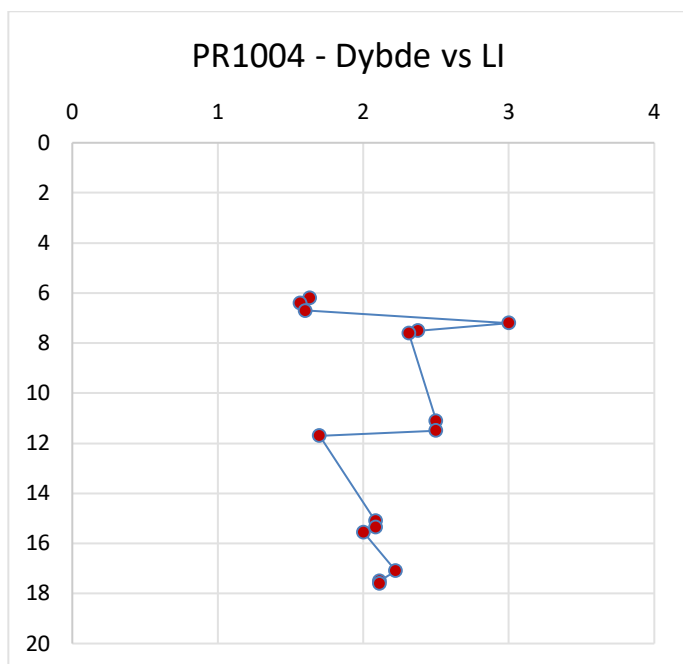
Figur 4. Borprofil fra prøveserie i borpunkt 1004. (ref. /4/)

4.1.2 Omformingshastighet Γ

Omformingshastigheten, Γ , forteller hvor raskt materialet mister fasthet. Bestemmelse av omformingshastigheten er basert på likviditetsindeks (se Figur 5). Som vist i Figur 6, er likviditetsindeks på 1.5 - 3. Omformingshastighet, Γ , er generelt satt til 0.1.



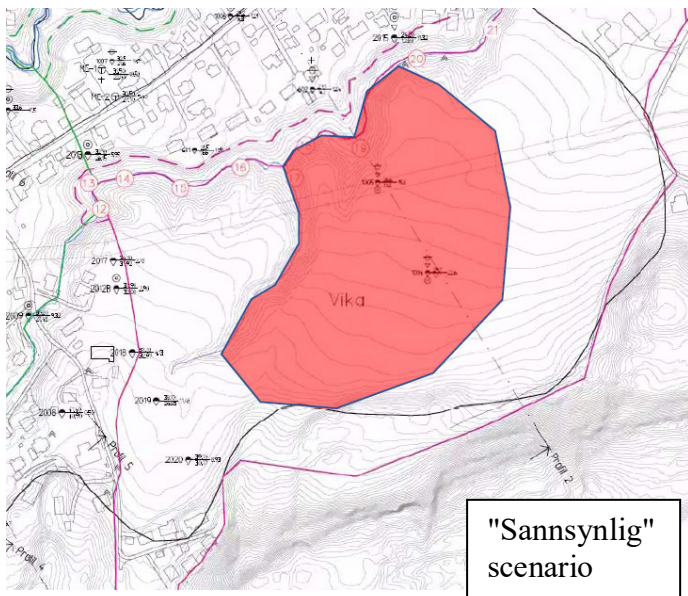
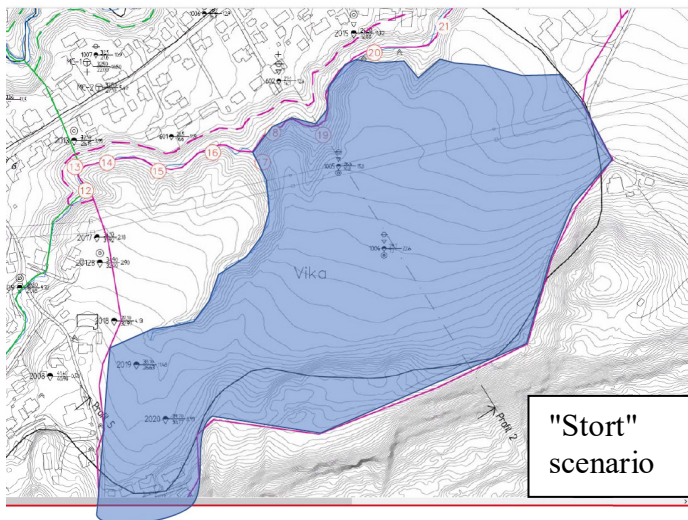
Figur 5. Omformingshastighet Γ vs likviditetsindeks LI (ref. /3/)



Figur 6. Likviditetsindeks fra prøveserie i borpunkt 1004

5 Simulering av skredutløp

I møte mellom NVE v/Ellen Davis Haugen og NGI 21. april 2020 ble det bestemt to scenarier for modellering, ett "stort" og ett "sannsynlig" scenario. Løsneområdene ble vurdert blant annet ut fra observert berg i dagen i ravinen. En skisse som viser omforente løsneområder for de to scenariene er vist i Figur 7..



Figur 7 "Stort" scenario (øverst) og "sannsynlig" scenario for modellering av skredutløp.

Det bemerkes at man ikke på forhånd kan fastslå hvor stort et skred som løsner innenfor en kartlagt kvikkleiresone kan bli. I verste fall kan et skred omfatte hele kvikkleiresonen, selv om dette anses lite sannsynlig. Skredstørrelsen avhenger av en rekke forhold, ikke minst av hvor, og hvordan, skredet starter, lokal topografi, grunnforhold osv. Eksempelvis vil raviner ofte gi en stans for videre utbredelse lateralt for et skred, slik som det er

antatt for både "stort" og "sannsynlig" scenario. Mot øst er videre utbredelse av skredet påvirket (forhindret) av observert berg i dagen i ravinen (punkt 20, se Figur 7).

For å genere inngangsdata til analysen, er det tatt utgangspunkt i en basislinje i bunn av ravinen som samsvarer med det aktuelle scenariet. Bakover i sonen er det lagt inn en stigning på 1:15 som avgrensner potensielle skredmasser i dybden. Det er antatt at masser som ligger innenfor løснеområdene definert for de to scenariene er sensitiv leire, og således potensielt kan mobiliseres i et skred.

5.1 Scenario 1: "Stort"

Skredet er simulert ved hjelp av en Herschel–Bulkley-modell for reologi, med følgende to parametersett:

- $\tau_{y,0} = 60 \text{ kPa}$, $\tau_{y,\infty} = 0.5 \text{ kPa}$, og $\Gamma = 0.1$
- $\tau_{y,0} = 40 \text{ kPa}$, $\tau_{y,\infty} = 0.5 \text{ kPa}$, og $\Gamma = 0.1$

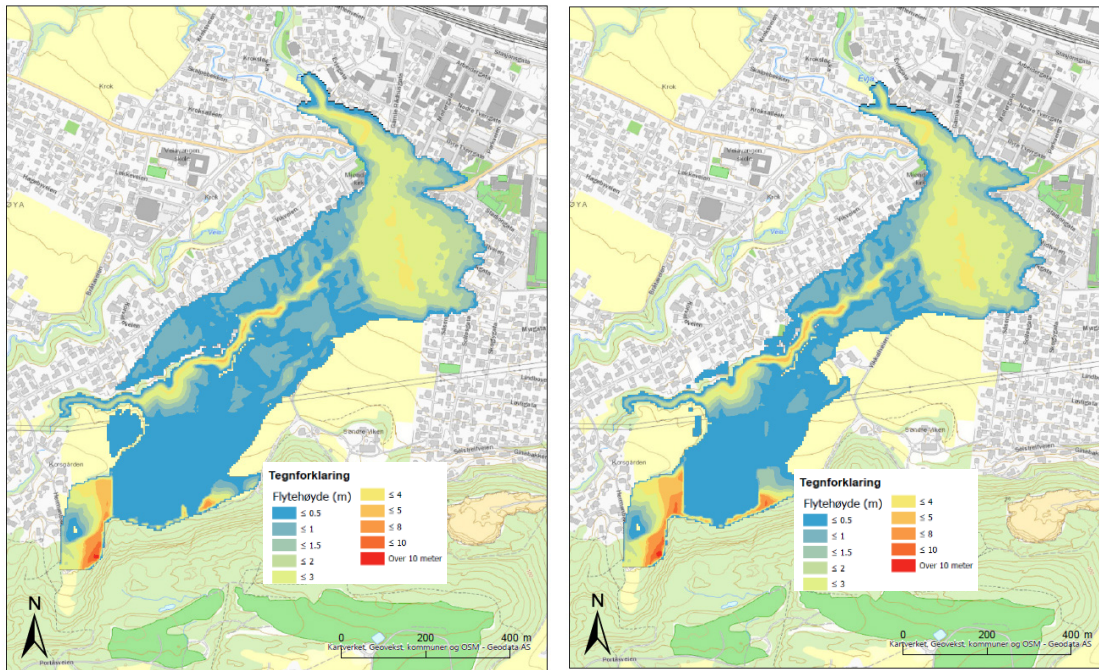
Resultater fra beregningene er vist pr. tidsintervall i vedlegg B. Situasjonen ved avsluttet analyse er vist på Figur 8. Fargene indikerer tykkelse av løsmasser som i prinsippet er tilgjengelige i skredet innenfor det forutbestemte løśnieområdet. I løøgneområdet er flyte-høyde derfor ikke synonymt med skredmasser i bevegelse. Masser vil også delvis bli liggende igjen uten å bli med i skredbevegelsen, dette gjelder for dette scenariet et mindre område i sørvest av løøgneområdet. I utløpsområdet viser fargene faktisk flyte-høyde i skredstrømmen.

Analysen starter ved tidpunkt $T=0$ ved at et mindre område langs ravinen påføres brudd (omrøring, dvs. stor skjærtøyning). Videre bruddutvikling skjer som konsekvens av dette første bruddet. I vedlegg B er vist resultater for utvalgte tidspunkter gjennom analysen, dvs. pr. 10 s fram til $T=60$ s, og videre pr. 30 s inntil skredet stanser ved $T=900$ s (15 minutter).

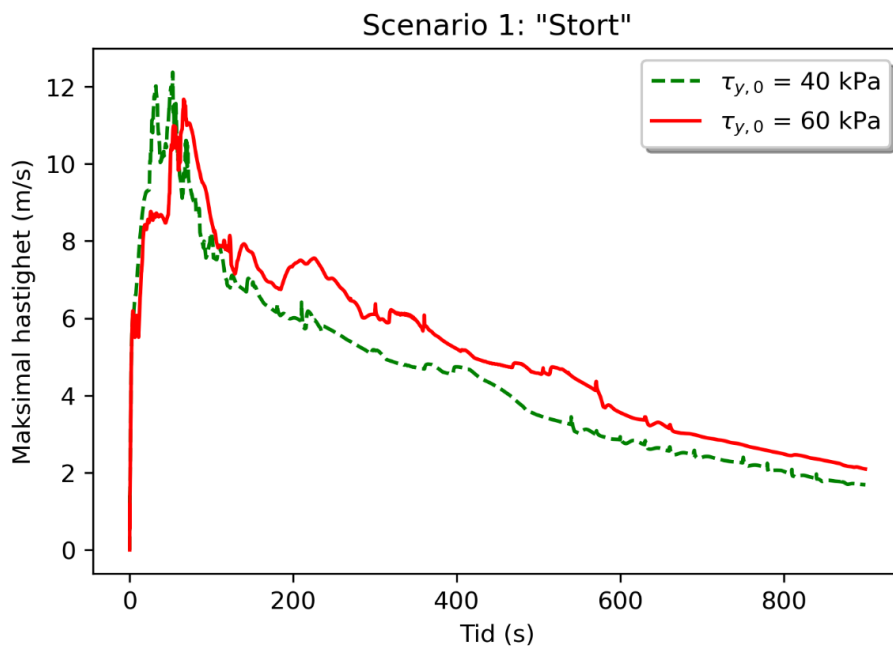
Skredet får et totalt utløp på 6-700 m nedenfor løøgneområdet, og får også et utløp i nordlig retning som går inn i løpet til Veia. Tykkelse av skredmasser i nedre del av utløpsområde er typisk 3-5 m.

Beregnet maksimal hastighet i utløpsområdet er beregnet til: 11.7 m/s etter 66 s for scenario med $\tau_{y,0} = 60 \text{ kPa}$ og 12.4 m/s etter 52 s for scenario med $\tau_{y,0} = 40 \text{ kPa}$, vist på Figur 9

Den høye hastigheten i tidlig fase av skredet skyldes at den høye og bratte skråningen i bakkant av løøgneområdet gir en stor effekt på skredstrømmen. Dette kan sees ved analyser med høy tidsopløsning (1 s), som viser at skredstrømmen fra denne skråningen tar igjen massene fra nedre del av løøgneområdet i løpet av kort tid etter at analysen starter. Hastigheten er imidlertid betydelig også underveis ned ravinen og i området nedenfor bekkelukkingen, der ravinen slutter. En slik skredstrøm (trolig da også med til dels intakte blokker av tørrskorpe, selv om dette ikke modelleres direkte i modellen), vil ha enorm destruktiv kraft for evt. bygninger som treffes av skredstrømmen.



Figur 8. "Stort" scenario ved avslutning av analysen. Venstre: Skjærfasthet 60 kPa. Høyre: Skjærfasthet 40 kPa. Tykkelsen av skredmasser i nedre del av utløpsområdet er 3-5 m.



Figur 9. Maksimal hastighet versus tid for "stort" scenario.

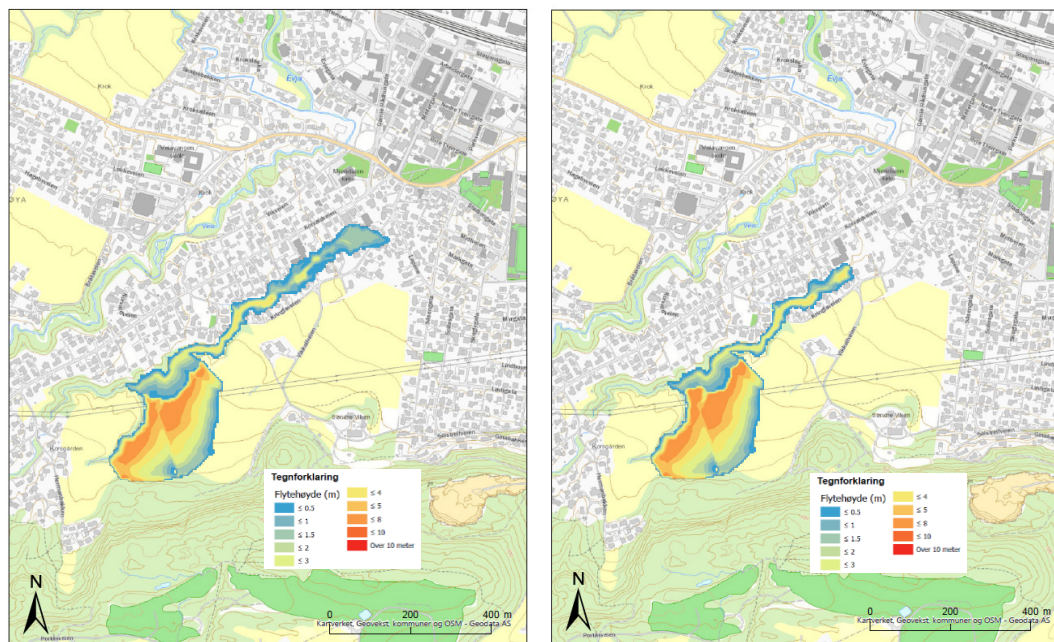
5.2 Scenario 2: "Sannsynlig"

Skredet er simulert ved hjelp av en Herschel–Bulkley-modell for reologi, med følgende to parametersett:

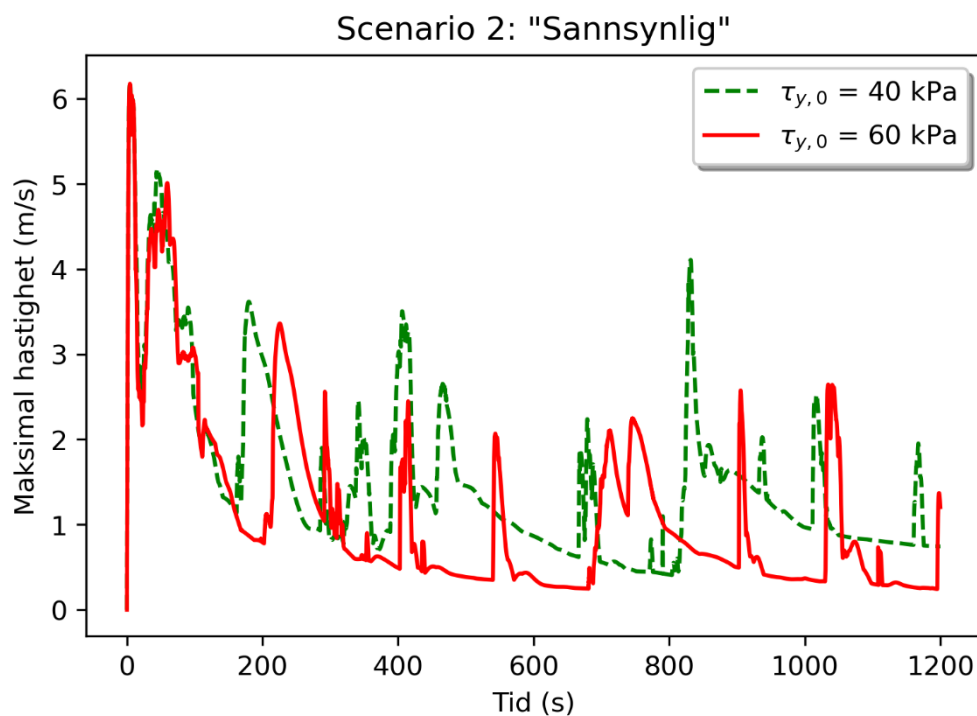
- $\tau_{y,0} = 60 \text{ kPa}$, $\tau_{y,\infty} = 0.5 \text{ kPa}$, og $\Gamma = 0.1$
- $\tau_{y,0} = 40 \text{ kPa}$, $\tau_{y,\infty} = 0.5 \text{ kPa}$, og $\Gamma = 0.1$

Situasjonen ved avsluttet analyse er vist på Figur 10. På samme måte som for scenario 1, er resultatene for scenario 2 også vist for utvalgte tidsintervaller fra start av analysen. Resultatene er vist i vedlegg C for 30 s intervaller fra m til skredet er stanset etter 1200 s (20 minutter). Skredet har et langt mer beskjedent utløp enn det store scenariet, og har et utløp på noe over 400 m fra nedre kant av løснеområdet. Utløpsområdet er mye mindre enn for det store scenariet, med langt mindre mektighet av skredmasser. Det beskjedne skredutløpet skyldes at store deler av de potensielle skredmassene i denne analysen blir liggende igjen i skredgropa (se forskjell mellom vedlegg C01 og C20, hvor flyte høyde i løsnereområdet for en stor del er uforandret). Skredstrømmen følger i hovedsak ravinen, men flyter ut i terrenget nedstrøms bekkelukkingen.

Beregnet maksimal hastighet i utløpsområdet er beregnet til ca. 6 m/s etter 5 s, jfr. Figur 11. Hastighetene er betydelig mindre enn i scenario 1.



Figur 10 "Sannsynlig" scenario ved avslutning av analysen ved $T=1200$ (venstre: 40 kPa, høyre: 60 kPa)



Figur 11 Maksimal hastighet versus tid for "sannsynlig" scenario

6 Videre arbeid

Når modellen med løsneområder og materialparametre er etablert, er det forholdsvis enkelt å utføre flere analyser med endrede parametre for å se på effekter av f.eks. annen omrøringshastighet og annen initiell skjærfasthet. For scenario 2 vil man f.eks. kunne redusere skjærfastheten slik at muligens en større del av det potensielle skredvolumet blir mobilisert i skredet, samtidig som man da heller ikke har effekten av den bratte skråningen i bakkant av løsneområdet for scenario 1.

Ny informasjon om grunnforholdene vil kunne tas inn i nye beregninger, ved at modellen justeres for f.eks. utbredelse og tykkelse av kvikkleire i løsneområdet, dybde til berg osv. Dette vil da kreve endringer av modellens geometri.

BingClaw gir også anledning til å studere resultater i enda større detalj, som for eksempel ved å se på hastigheter av skredstrømmen forbi definerte profiler langs skredbanen. I tillegg er Monte Carlo-simulering implementert i BingClaw og kan benyttes til å utføre sannsynlige runout-analyser for å studere effekt av usikkerhet i inngangsparametere på skredutløp og for å gi estimat på usikkerhet av runout-beregningene.

7 Referanser

- /1/ NGI (1996). Kartlegging av områder med potensiell fare for kvikkleireskred. Kartbladet 1814 III Drammen, M = 1:50 000. Oppdragsgiver: Statens Kartverk. Rapport nr. 920027-1, datert desember 1996.
- /2/ NGI (2013). Characterization of historical quick clay landslides and input parameters for Q-Bing. Rapport nr. 20120753-02-R, datert 17. januar 2013.
- /3/ Sinding-Larsen, E. (2019). Runout modelling: strain softening of landslide debris. NTNU MSc-oppgave.
- /4/ GeoStrøm AS (2014). Grunnundersøkelse kvikkleiresone 486 Korsgården. Rapport nr. 1124/R1, datert 14. november 2014.
- /5/ NGI (2019). Geoteknisk utredning av kvikkleiresone 486 Korsgården og 2038 Vika i Nedre Eiker kommune. Stabilitetsvurderinger og geotekniske vurderinger. Rapport nr. 20110297-01-R, datert 7. juli 2019.

Vedlegg A

NUMERICAL MODEL - BINGCLAW

Innhold

A1	Introduction	2
A2	Visco-plastic Herschel-Bulkley governing equations	2
A3	Remolding	3
A4	Numerical Implementation	4
A5	Referanser	5

A1 Introduction

The objective of this appendix is to briefly describe the numerical debris flow model, BingClaw, formulated in terms of Herschel-Bulkley rheology in two horizontal dimensions (2HD). It contains several unique features that makes it more flexible than most comparable models for tackling practical landslide flow problems both onshore and offshore. As demonstrated in several related papers, it has been thoroughly tested against both controlled laboratory experiments as well as landslide observations in the field (ref. /A1/, /A2/, /A3/).

A2 Visco-plastic Herschel-Bulkley governing equations

For simple shear conditions, the Herschel-Bulkley rheological model can be described as (ref. /A3/):

$$\left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_r} \right|^n = \begin{cases} 0, & \text{for } |\tau| \leq \tau_y, \\ \left(\frac{\tau}{\tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma})} - 1 \right), & \text{for } |\tau| > \tau_y. \end{cases} \quad (1)$$

where $\dot{\gamma}$ is strain rate; $\dot{\gamma}_r$ reference strain rate ($=(\tau_y/\mu)^{1/n}$), with dynamic viscosity μ and exponent n ; τ and τ_y the shear and yield stress. The exponent n is taken between 0 and 1, and $n = 1$ represents the Bingham fluid case.

The mass balance is integrated over the flow depth and two separate momentum balance equations are integrated over the plug (subscript p) and shear layer (subscript s) [ref. /A4/, /A5/]. Figure 1 illustrates the Herschel-Bulkley model with constant velocity profile for the plug and parabolic velocity profile for the shear layer. The model can then be formulated as:

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_p + h_s) + \nabla \cdot (\vec{u}_p (h_p + \alpha_1 h_s)) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h_p \vec{u}_p) + \left((h_p \vec{u}_p \cdot \nabla) \vec{u}_p + \vec{u}_p (\nabla \cdot h_p \vec{u}_p) \right) + g' h_p \nabla (h + b) \\ + \vec{u}_p \left(\frac{\partial}{\partial t} h_s + \nabla \cdot (\alpha_1 h_s \vec{u}_p) \right) = - \frac{\tau_y \operatorname{sgn}(\vec{u}_p)}{\rho_d} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_1 \frac{\partial}{\partial t} (h_s \vec{u}_p) + \left((h_s \alpha_2 \vec{u}_p \cdot \nabla) \vec{u}_p + \alpha_2 \vec{u}_p (\nabla \cdot h_s \vec{u}_p) \right) + g' h_s \nabla (h + b) \\
 & - \vec{u}_p \left(\frac{\partial}{\partial t} h_s + \nabla \cdot (\alpha_1 h_s \vec{u}_p) \right) \\
 & = - \frac{\tau_y \beta}{\rho_d |\gamma_r h_s|^n} (\text{sgn}(u_p) |u_p|^n, \text{sgn}(v_p) |v_p|^n)
 \end{aligned} \tag{4}$$

where h_p and h_s are the height of plug and shear layer and $\vec{u}_p = (u_p, v_p)$ is the velocity of the plug layer. The densities of the ambient and debris flow are denoted as ρ_a and ρ_d , and $g' = (1 - \rho_a/\rho_d)g$ is the reduced gravity. The height of the entire layer is $h = h_p + h_s$, and α_1, α_2 and β are parameters determined by the exponent n .

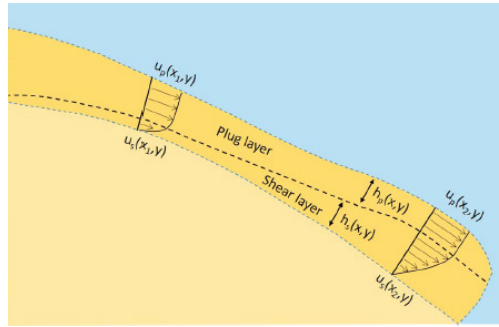


Figure 1. Simplified schematic plot of the velocity profile in a depth-averaged Herschel-Bulkley fluid model as employed in BingClaw. (ref. /A3/)

A3 Remolding

The following equation was proposed to approximate the effect of remolding or softening due to water intake by reducing the yield strength as a function of accumulated shear (ref. /A6/):

$$\tau_y(\gamma) = \tau_{y,\infty} + (\tau_{y,0} - \tau_{y,\infty})e^{-\Gamma\gamma} \tag{4}$$

where $\tau_{y,0}$ and $\tau_{y,\infty}$ are the initial and residual yield stress and Γ (dimensionless) is a coefficient describing the remolding. The total shear strain at the bottom of the debris flow, γ , is obtained from:

$$\gamma = \int_0^t \left| \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \right|_{z=0} dt = \frac{n+1}{n} \int \frac{|\vec{u}_p|}{h_s} dt \tag{5}$$

The change in τ_y due to remolding is directly proportional to $-e^{-\Gamma\gamma}$. Small Γ -values imply that large accumulated shear is needed for remolding. Figure 2 gives an example of the averaged yield stress of the Storegga slide simulations for different Γ -values (ref.

/A3/). Since the remolding process is assumed to be a non-reversible process, the average yield stress then decreases in time.

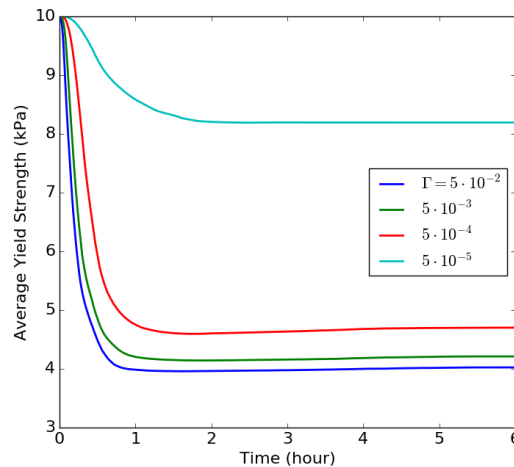


Figure 2. Effect of Γ -value on averaged yield stress (Storegga slide: initial yield = 10 kPa, residual yield = 3.5 kPa (ref. /A3/))

A4 Numerical Implementation

BingClaw combines a finite volume method with a finite difference method for the source terms. It builds on the GeoClaw variant (ref. /A7/) of the Clawpack library for solving conservation law equations. The model calculates runout distance, maximum velocity over the flow domain and the average deposit height over the runout area. The numerical implementation, using the finite volume method, has three steps:

- The earth pressure is compared with the yield stress in each cell. If the yield stress is larger than the earth pressure, no motion is allowed. If two adjacent cells do not deform, there is no displacement at the interface.
- If one of the cells deforms, the equations without friction terms are solved. At each cell interface, a Riemann problem is solved with the wave propagation algorithm of the finite volume method.
- The friction forces are then included using a Godunov fractional step method.

A5 Referanser

- /A1/ Løvholt, F., Bondevik, S., Laberg, J. S., Kim, J. and Boylan, N. (2017). Some giant submarine landslides do not produce large tsunamis. *Geophysical Research Letters*, 44: 8463-8472.
- /A2/ Liu, Z., Lacasse, S., Nadim, F., L'Heureux, J.-S., Kim, J., Thakur, V. (2018). Modelling of landslide runout in sensitive clays. In: *Proceedings of the 7th Canadian Geohazards Conference – Geohazards 7, Canmore, Alberta, June 3–6, 2018, #Geohaz166*. Canadian Geotechnical Society.
- /A3/ Kim, J., Løvholt, F., Issler, D., Forsberg, C. (2019). Landslide material control on tsunami genesis - the Storegga slide and tsunami (8,100Years BP). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6): 3607-3627.
- /A4/ Huang, X., García, M. H. (1998). A Herschel–Bulkley model for mud flow down a slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 374: 305-333.
- /A5/ Imran, J., Parker, G., Locat, J., & Lee, H. (2001). 1-D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 127(11): 959-968.
- /A6/ De Blasio, F., Elverhoi, A., Issler, D., Harbitz, C., Bryn, P., Lien, R. (2005). On the dynamics of subaqueous clay-rich gravity mass flows - the giant Storegga Slide, Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 22(1-2): 179-186.
- /A7/ Berger, M. J., George, D. L., LeVeque, R. J., Mandli, K. M. (2011). The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Advances in Water Resources*, 34: 1195-1206.

Vedlegg B

UTLØPSMODELLERING - SCENARIO 1: "STORT"

Innhold

B1	Metode	2
B2	Resultater	2

Figurer

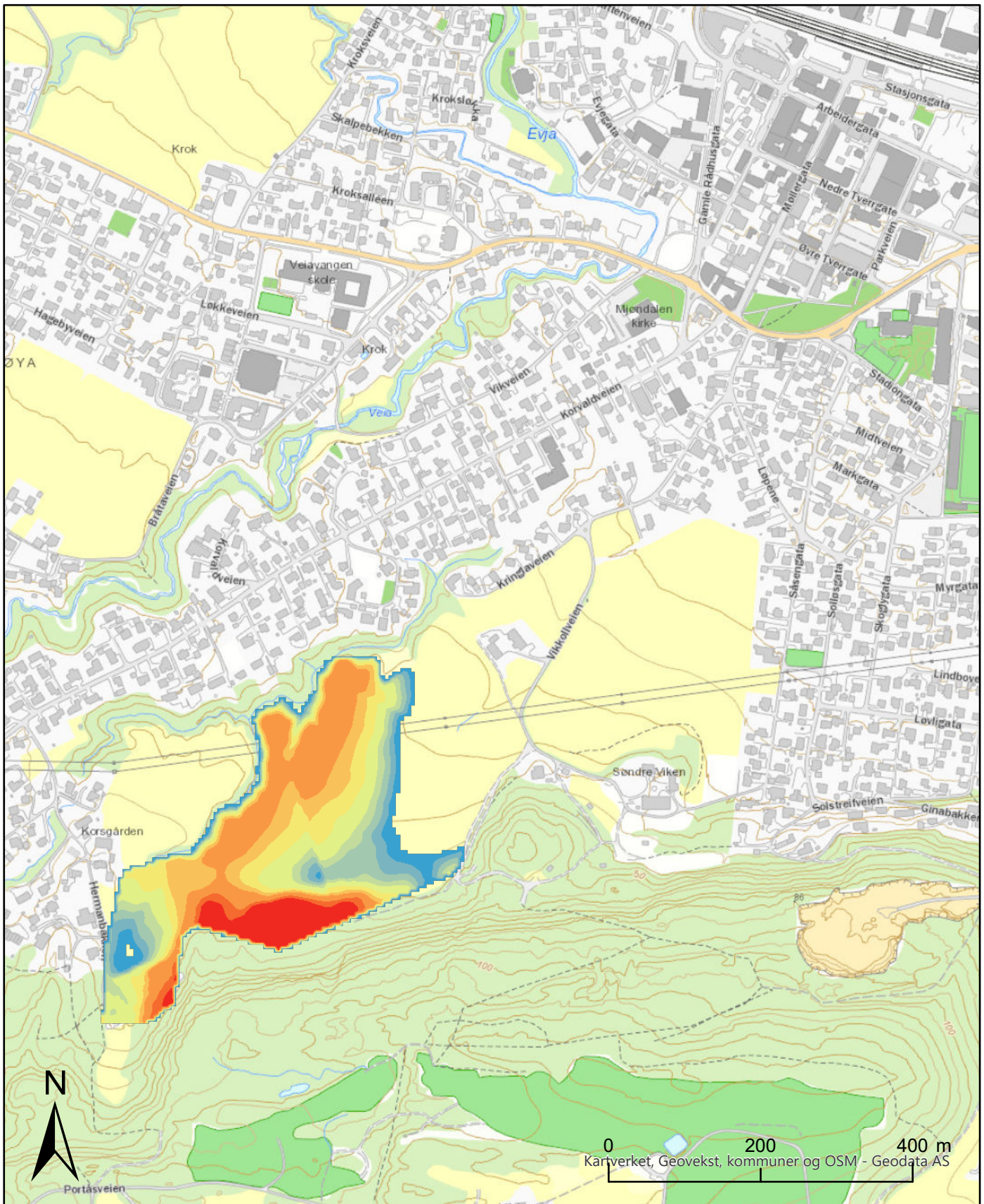
Figur B01 – B21 Utløpsmodellering, Scenario 1: "Stort"

B1 Metode

Utløpsmodellering for to scenarier av løsneområdet ble utført ved hjelp av BingClaw. Dette vedlegget viser simuleringsresultater for Scenario 1: "Stort".

B2 Resultater

Resultater er vist på Figur B01 til Figur B21.



Tegnforklaring

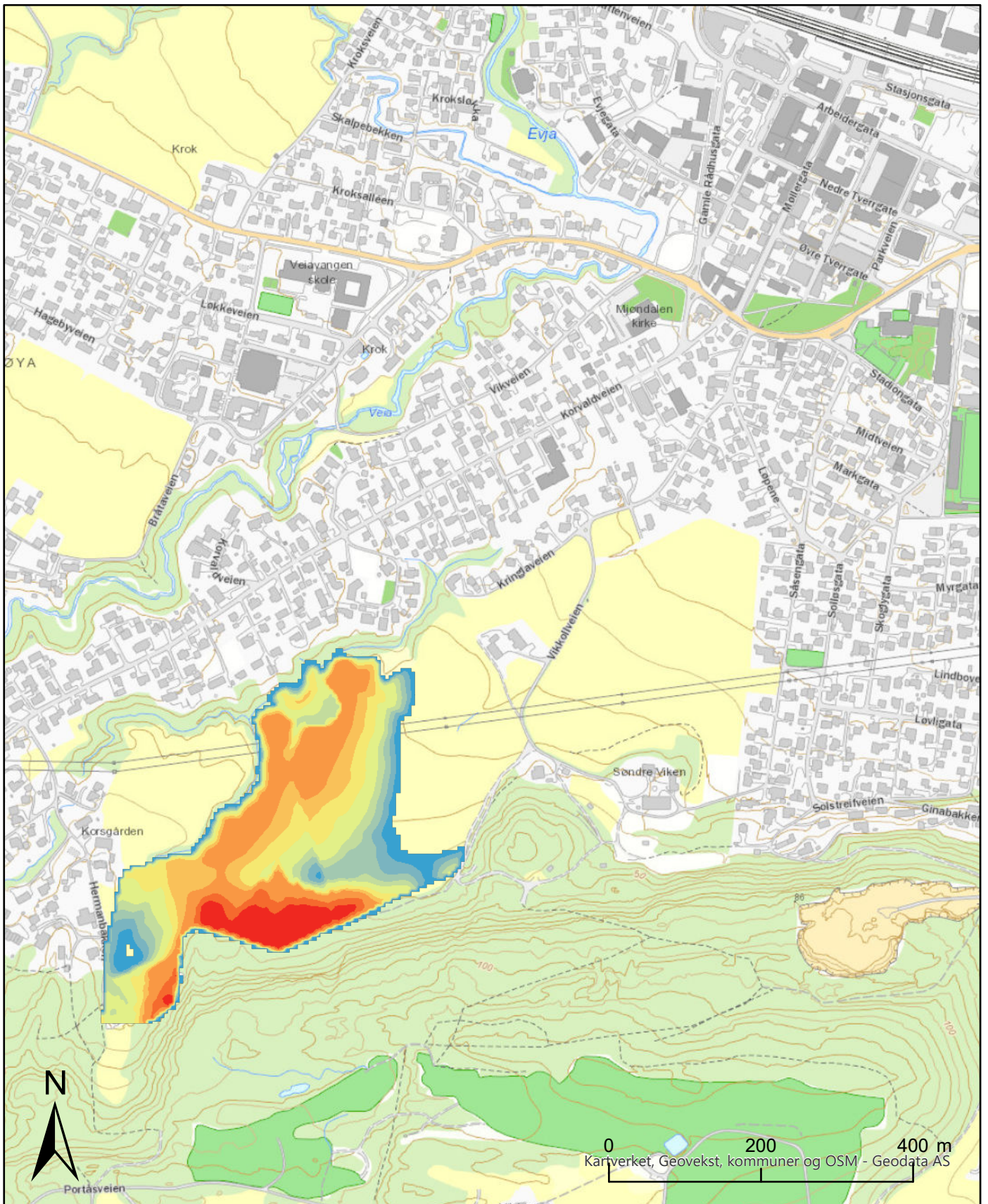
Flytehøyde (m)	Color	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Teal	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Light Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 0 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B01	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

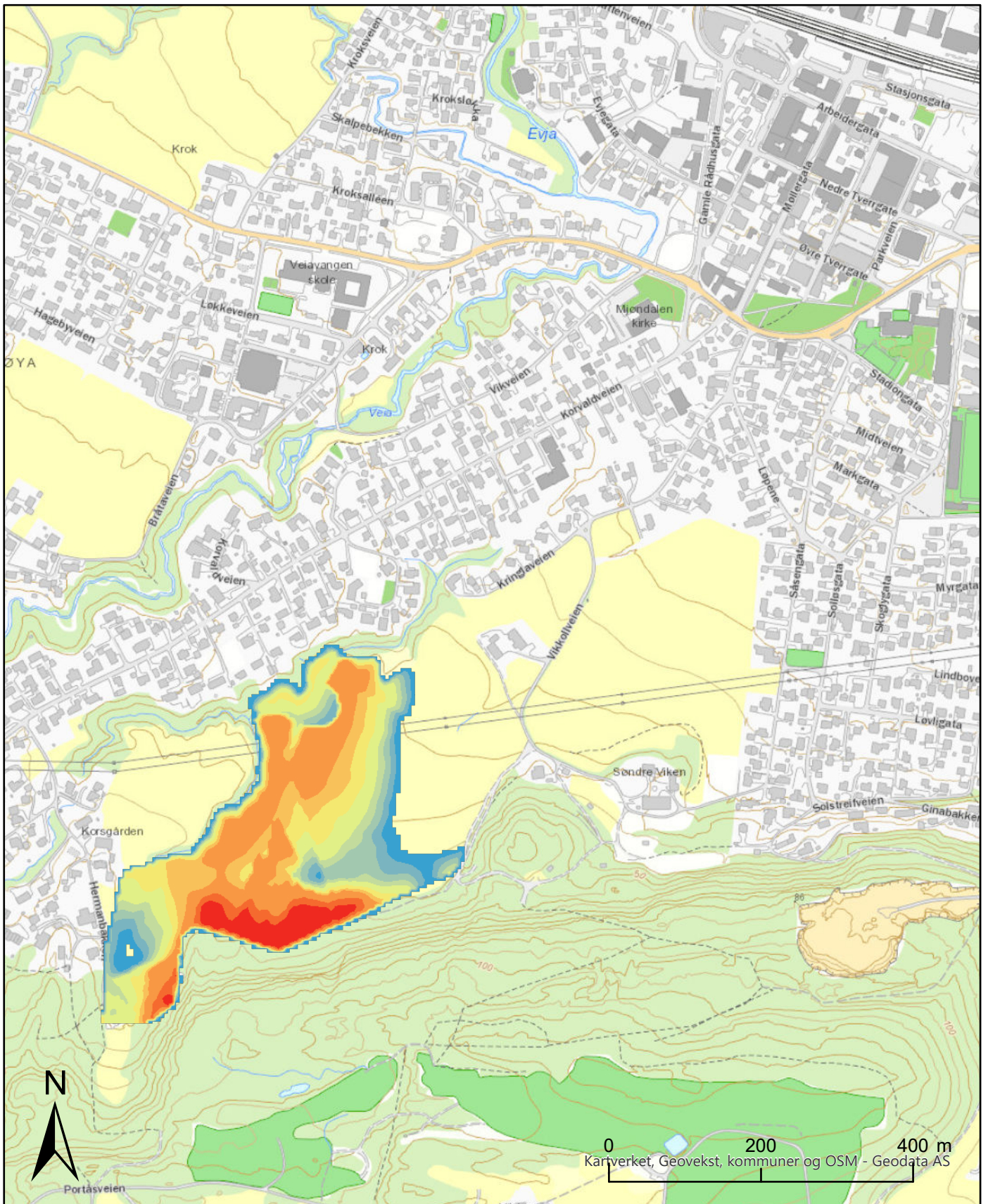
Flyte høyde (m)	Symbol	Max. Høyde (m)
≤ 0.5	Blue	0.5
≤ 1	Light Blue	1
≤ 1.5	Light Green	1.5
≤ 2	Green	2
≤ 3	Light Yellow	3
≤ 4	Yellow	4
≤ 5	Orange	5
≤ 8	Dark Orange	8
≤ 10	Red-Orange	10
Over 10 meter	Red	> 10

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 10 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B02	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

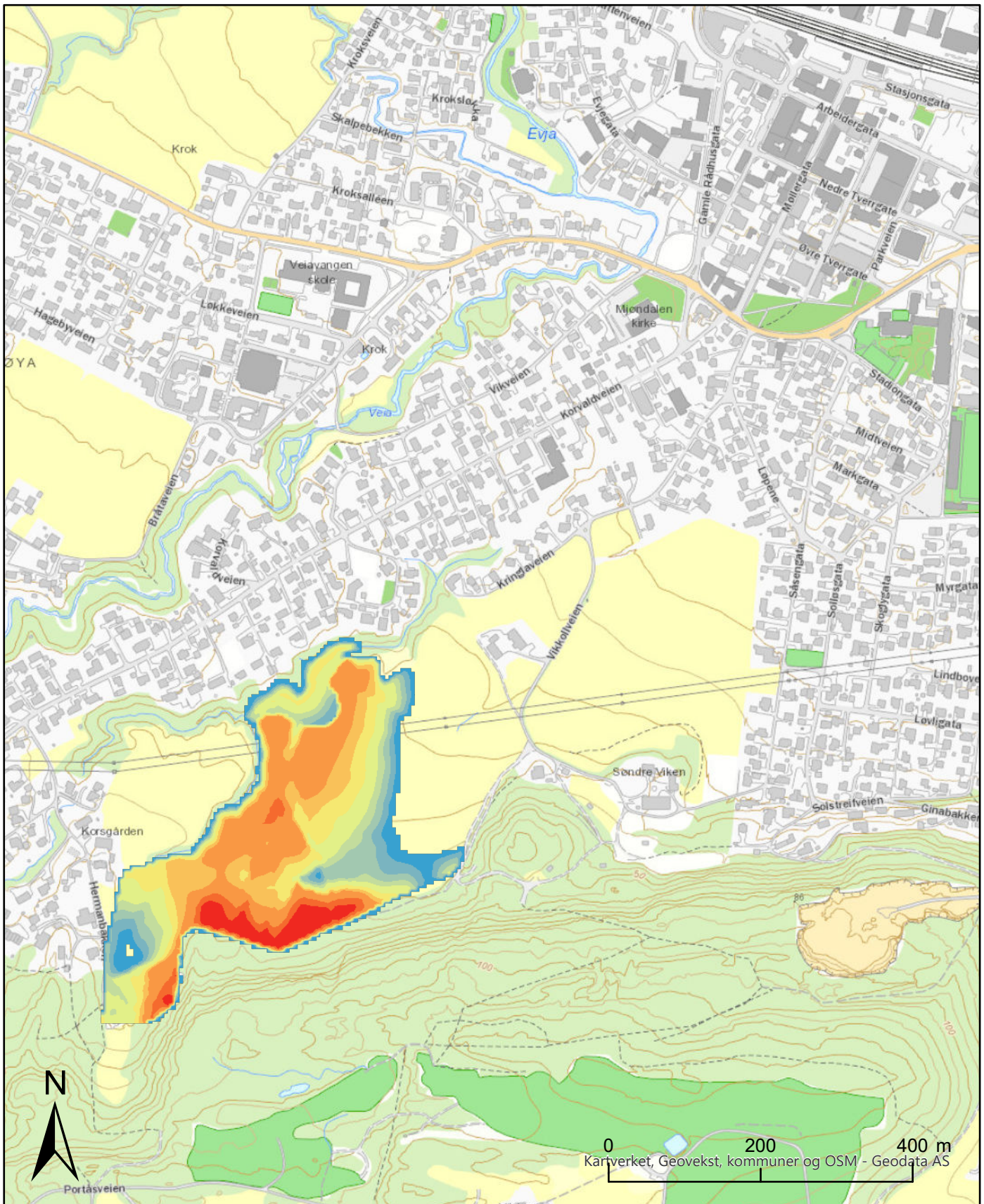
Flyte høyde (m)	Symbol	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 0.5
≤ 1	Light Blue	≤ 1
≤ 1.5	Light Green	≤ 1.5
≤ 2	Green	≤ 2
≤ 3	Light Yellow	≤ 3
≤ 4	Yellow	≤ 4
≤ 5	Orange	≤ 5
≤ 8	Dark Orange	≤ 8
≤ 10	Red-Orange	≤ 10
Over 10 meter	Red	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 20 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B03	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

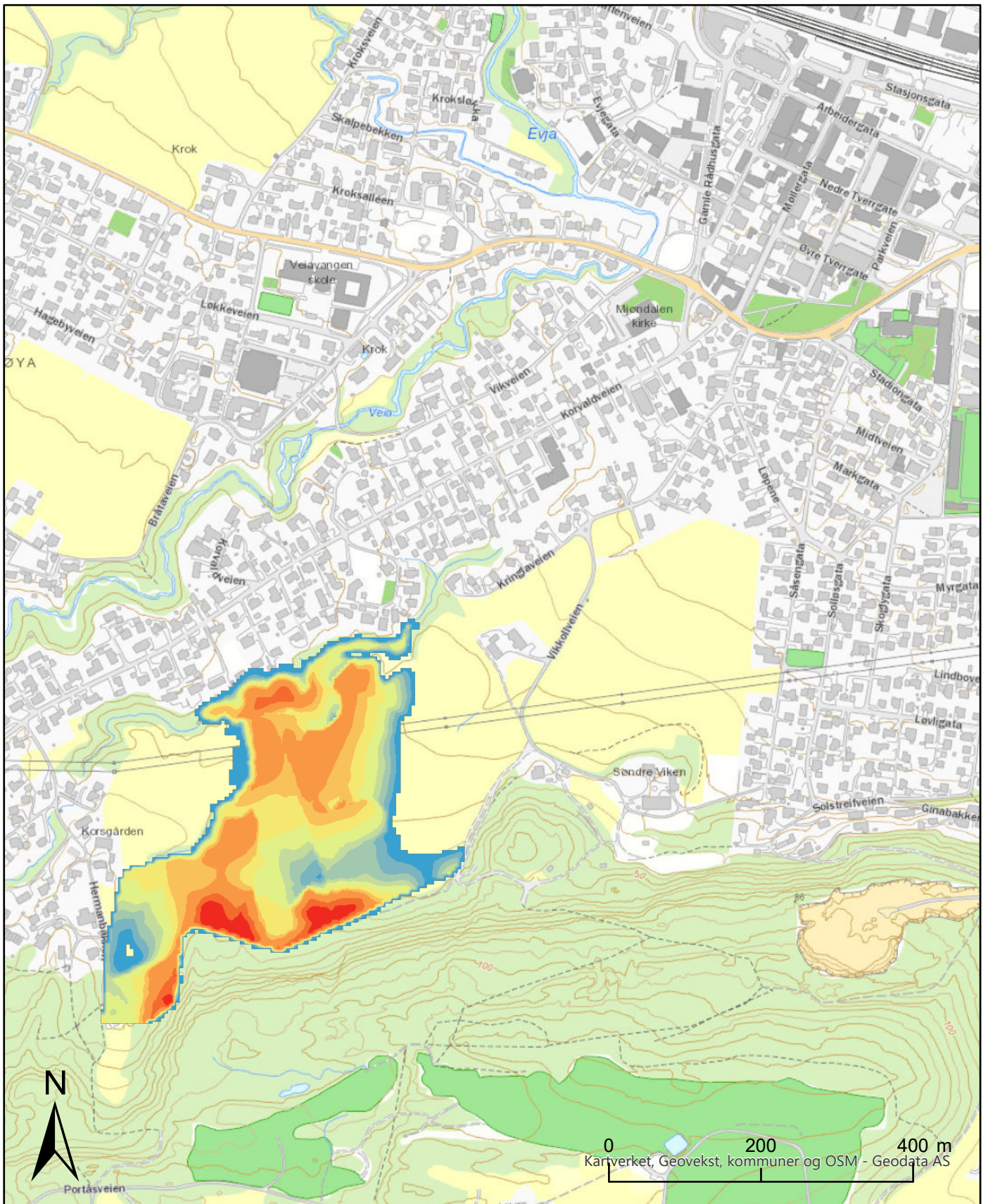
Flyte høyde (m)	Symbol	Value
≤ 0.5	Blue square	≤ 0.5
≤ 1	Teal square	≤ 1
≤ 1.5	Light green square	≤ 1.5
≤ 2	Green square	≤ 2
≤ 3	Light yellow-green square	≤ 3
≤ 4	Yellow square	≤ 4
≤ 5	Orange square	≤ 5
≤ 8	Dark orange square	≤ 8
≤ 10	Red-orange square	≤ 10
Over 10 meter	Red square	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 30 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B04	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

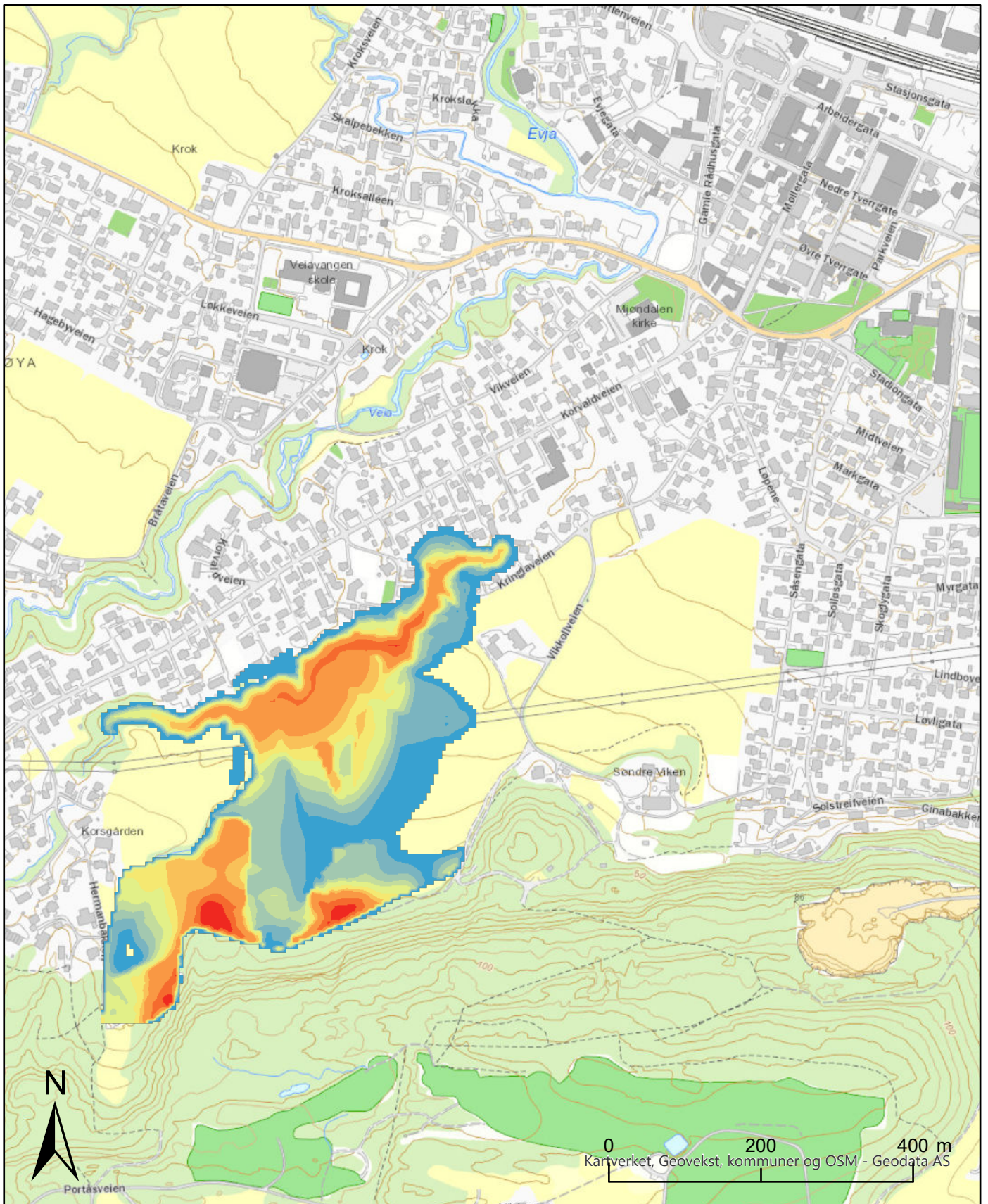
Flyte høyde (m)	Symbol	Verdi
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

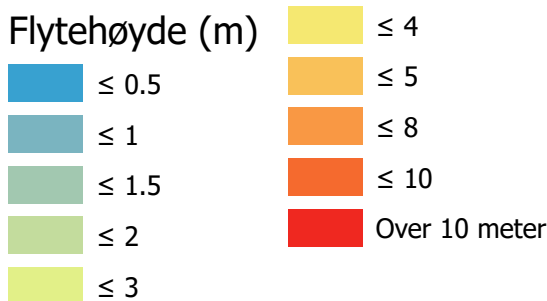
Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 60 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B05	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

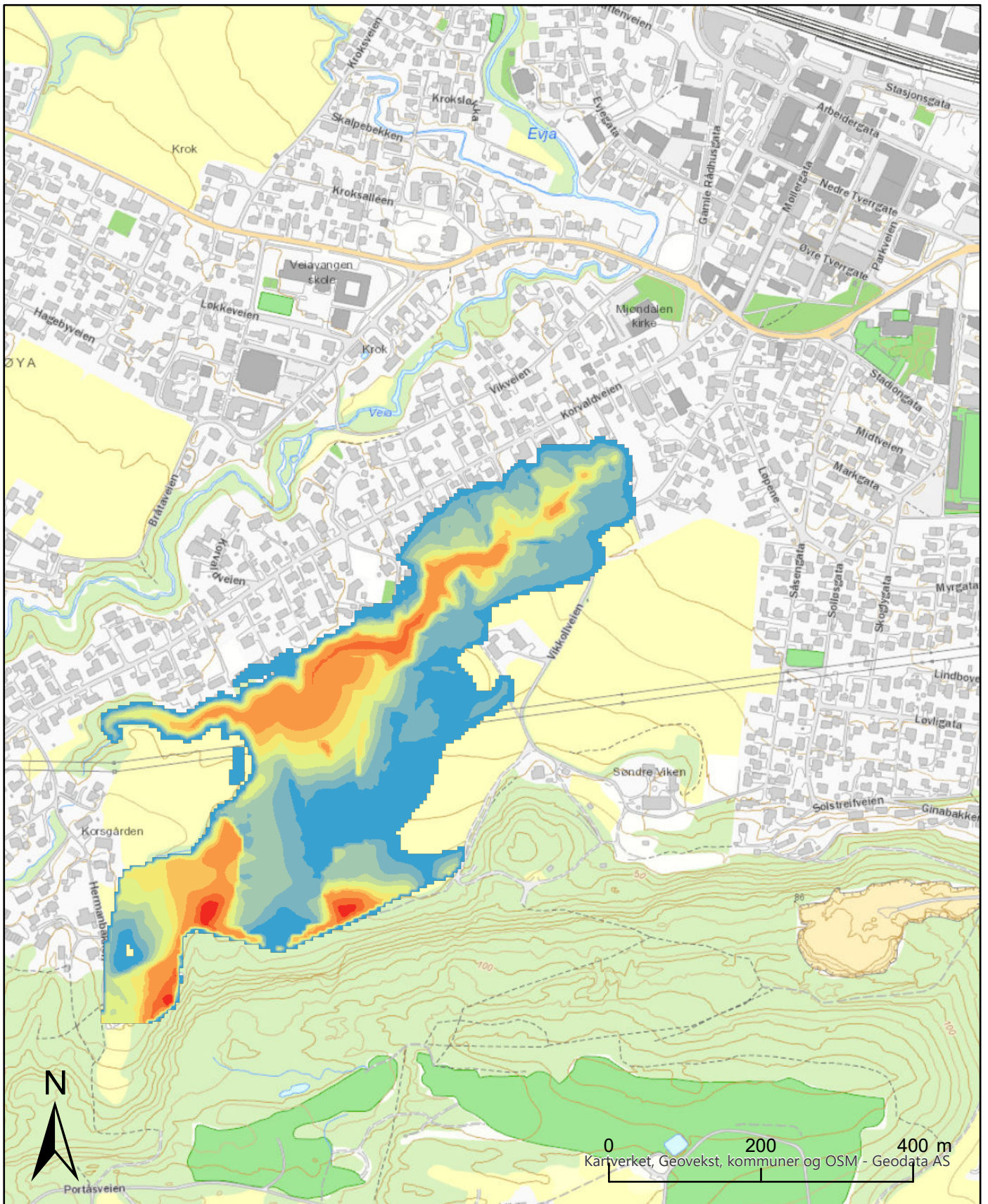


Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 120 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B06	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

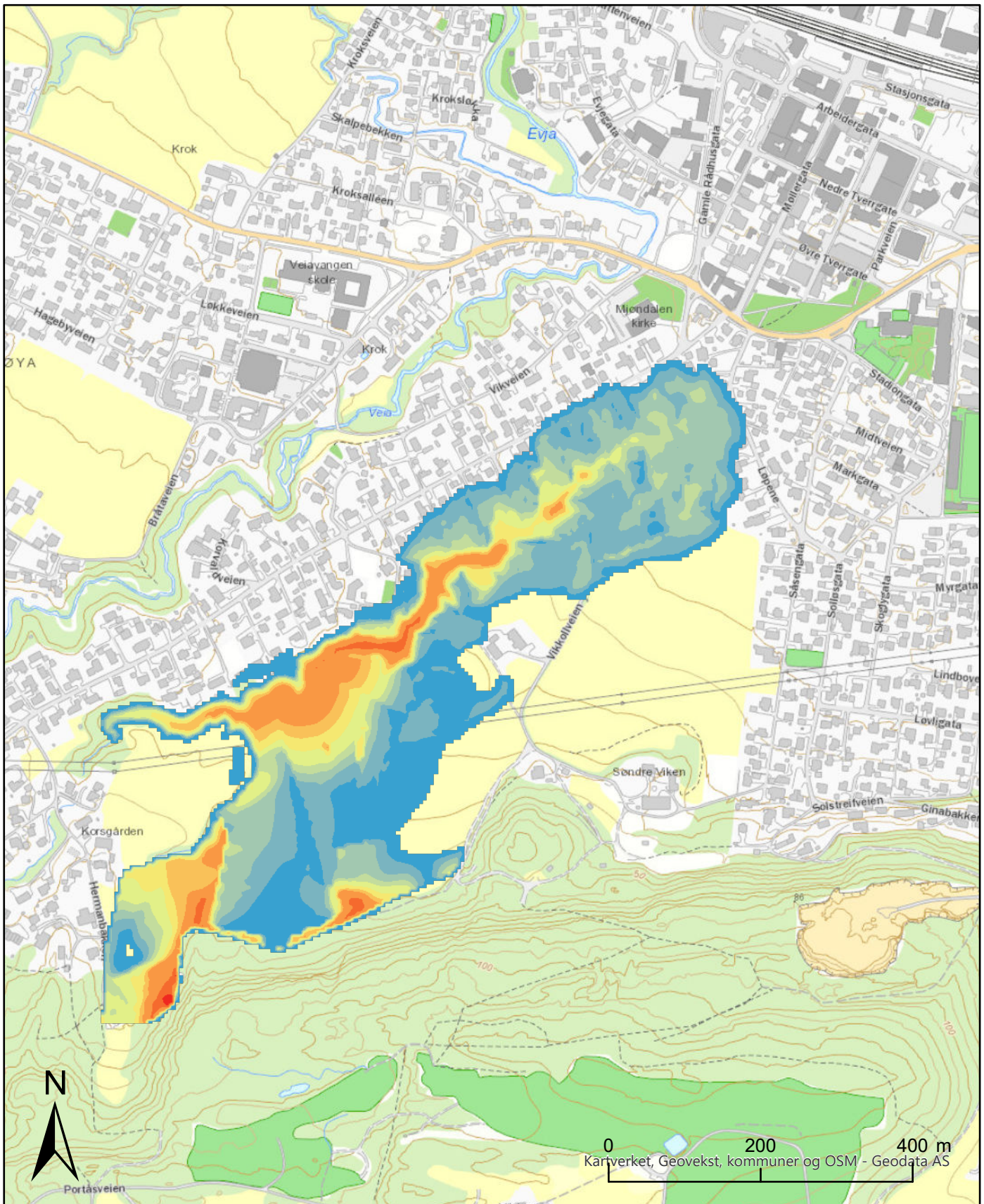
Flytehøyde (m)	Symbol	Max. Høyde (m)
≤ 0.5	Blue	0.5
≤ 1	Light Blue	1
≤ 1.5	Light Green	1.5
≤ 2	Green	2
≤ 3	Light Yellow	3
≤ 4	Yellow	4
≤ 5	Orange	5
≤ 8	Dark Orange	8
≤ 10	Red-Orange	10
Over 10 meter	Red	> 10

Utløpsmodellering

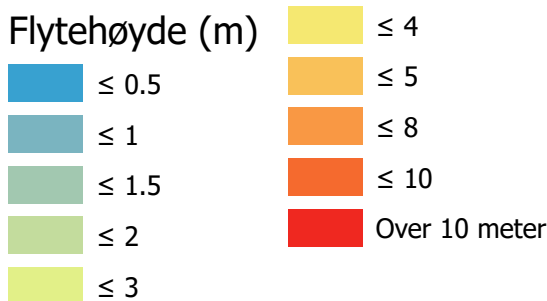
Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 180 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B07	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

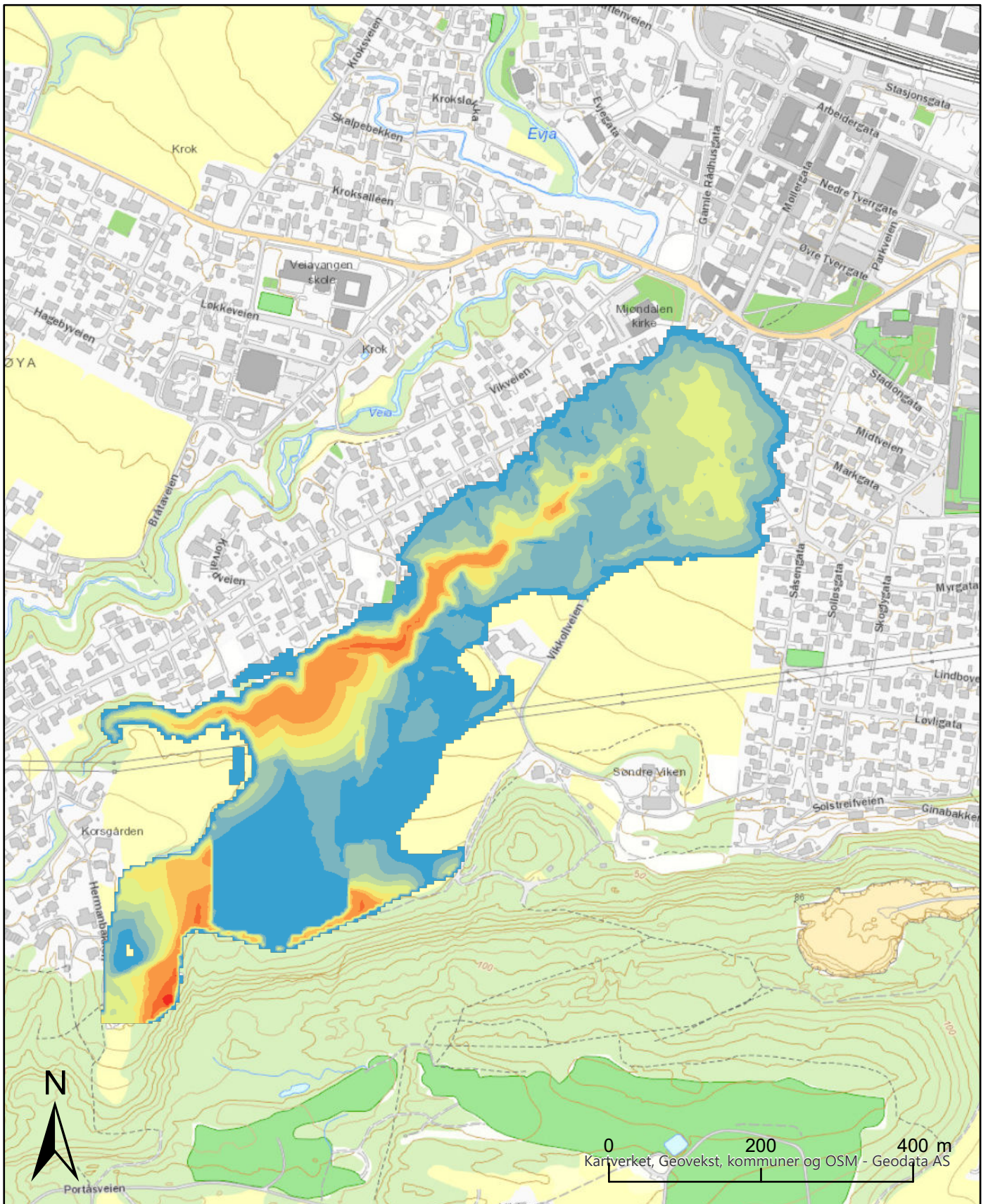


Utløpsmodellering

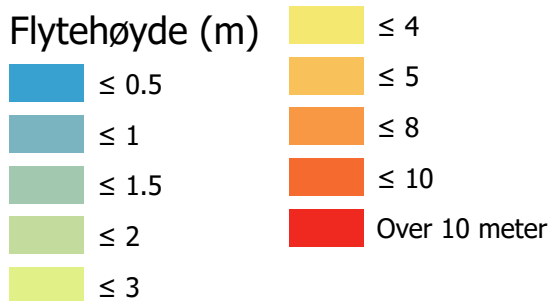
Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 240 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B08	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

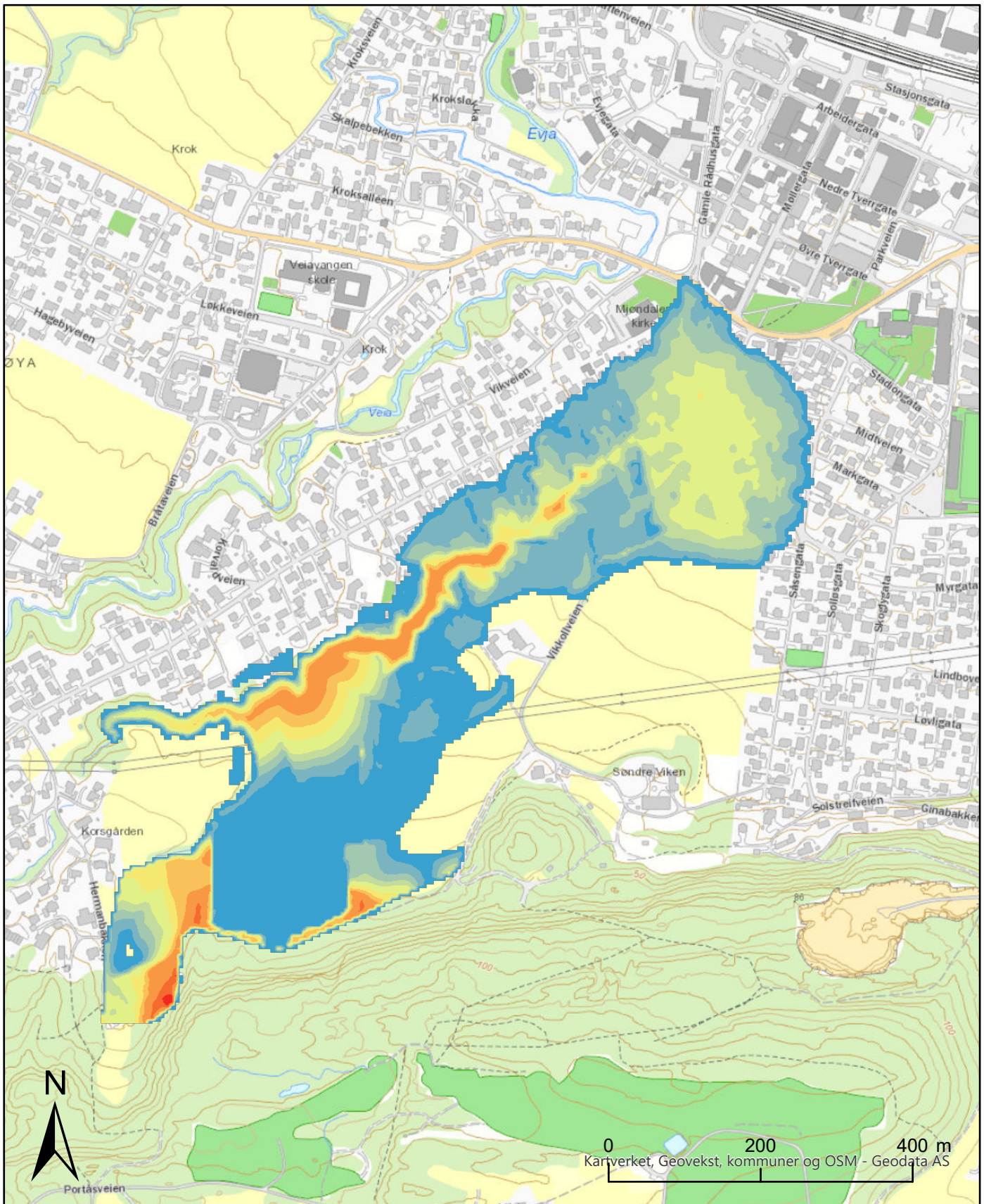


Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 300 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B09	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

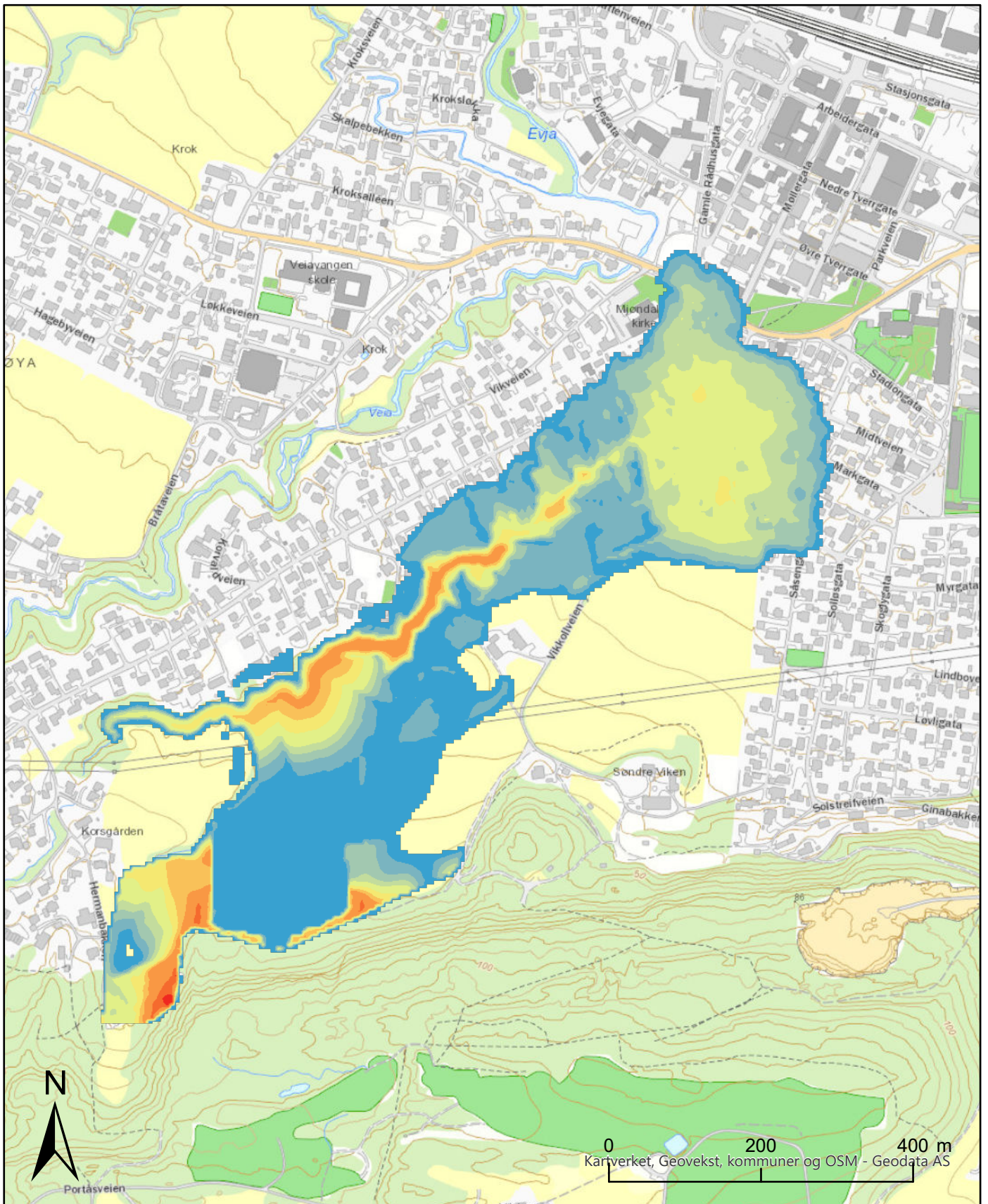
Flytehode (m)	Symbol	Max. Høyde (m)
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter
	Yellow	
	Orange	
	Red	

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 360 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B10	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

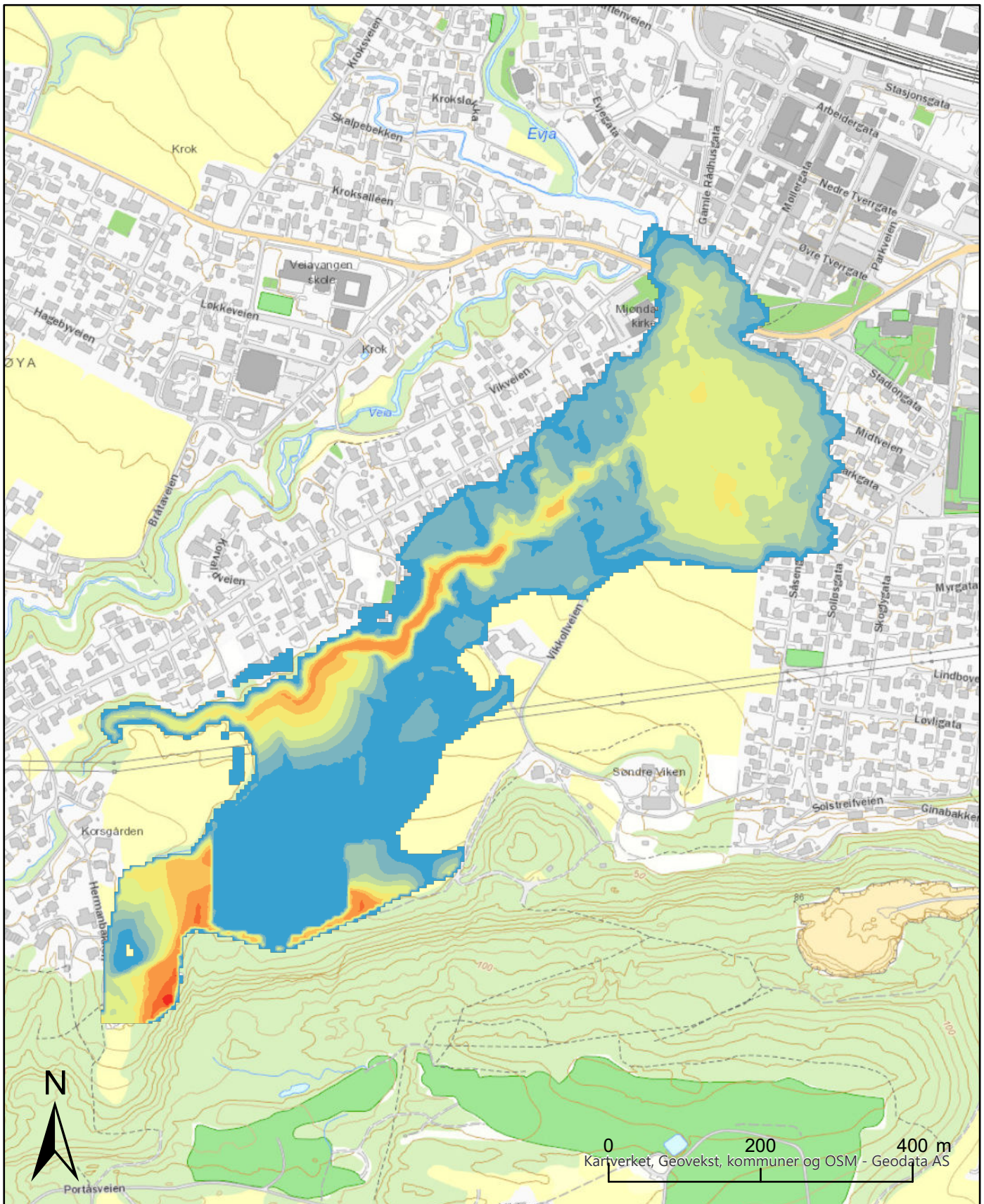
Flyte høyde (m)	Symbol	Max. Høyde (m)
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

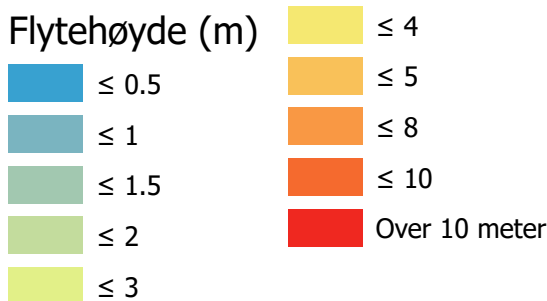
Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 420 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk	Kartprojeksjon		
A4 1:7 000	ETRS 1989 UTM Zone 33N		
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B11	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

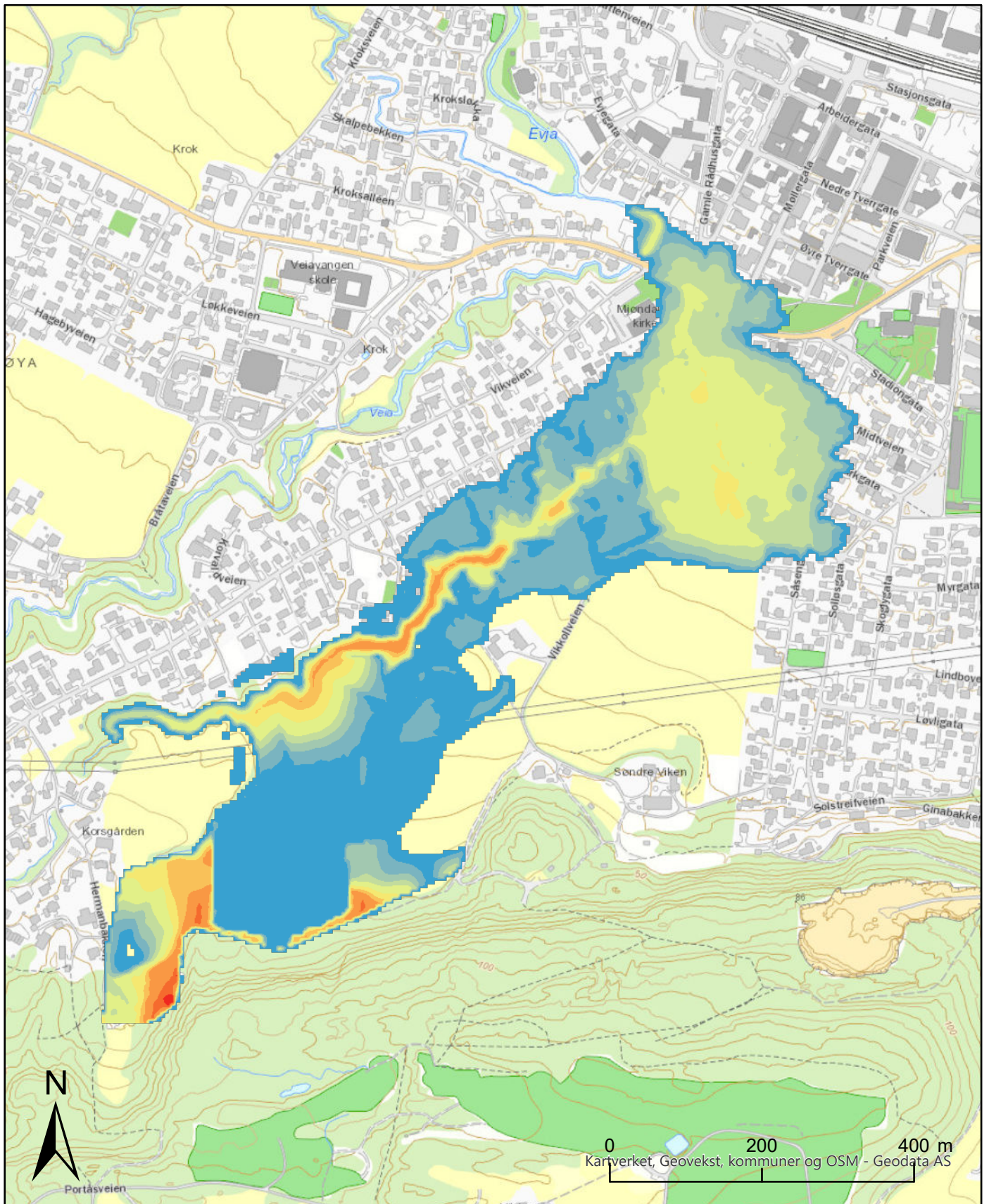


Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 480 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	B12	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

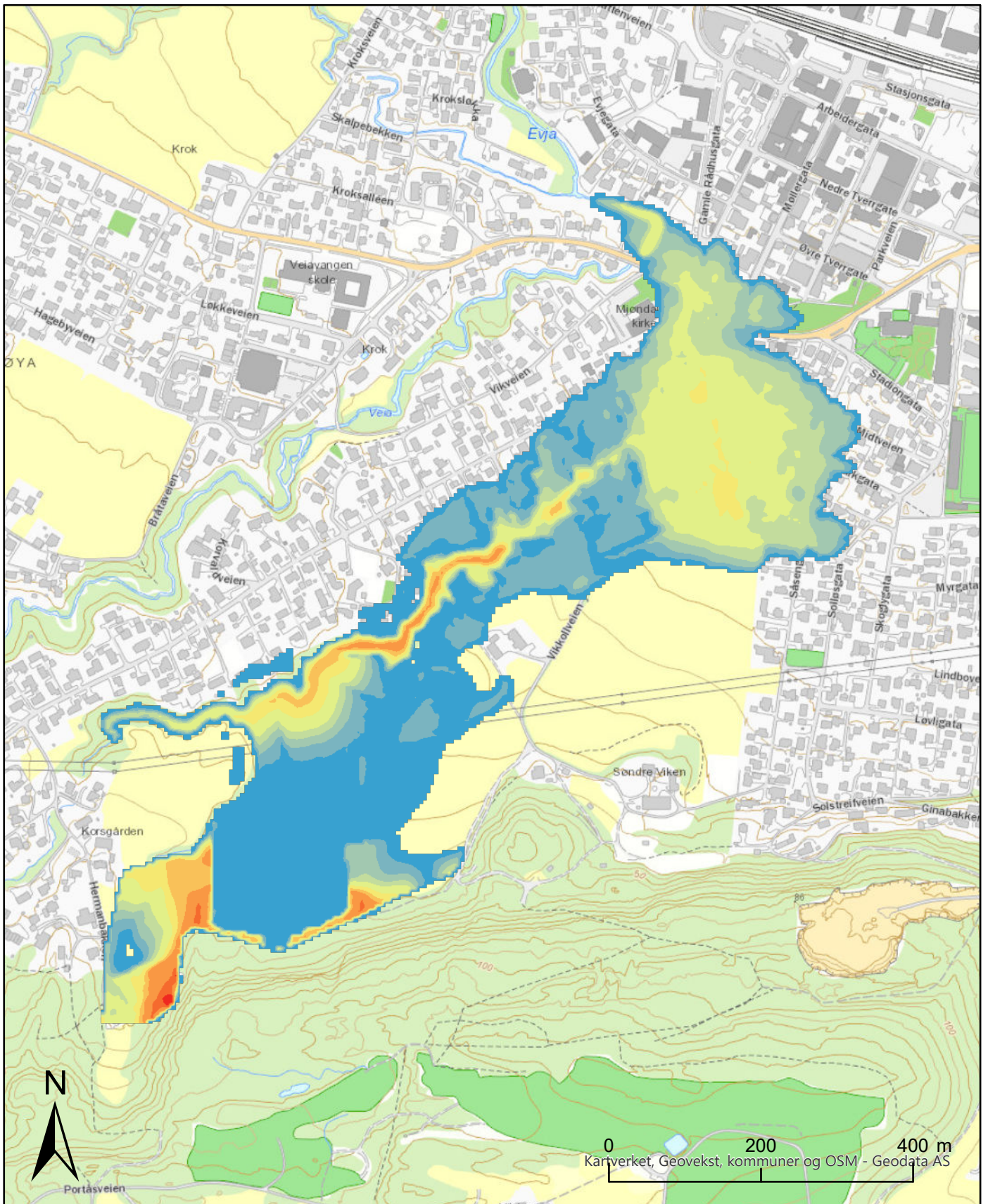
Flyte høyde (m)	Symbol	Verdi
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 540 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B13	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

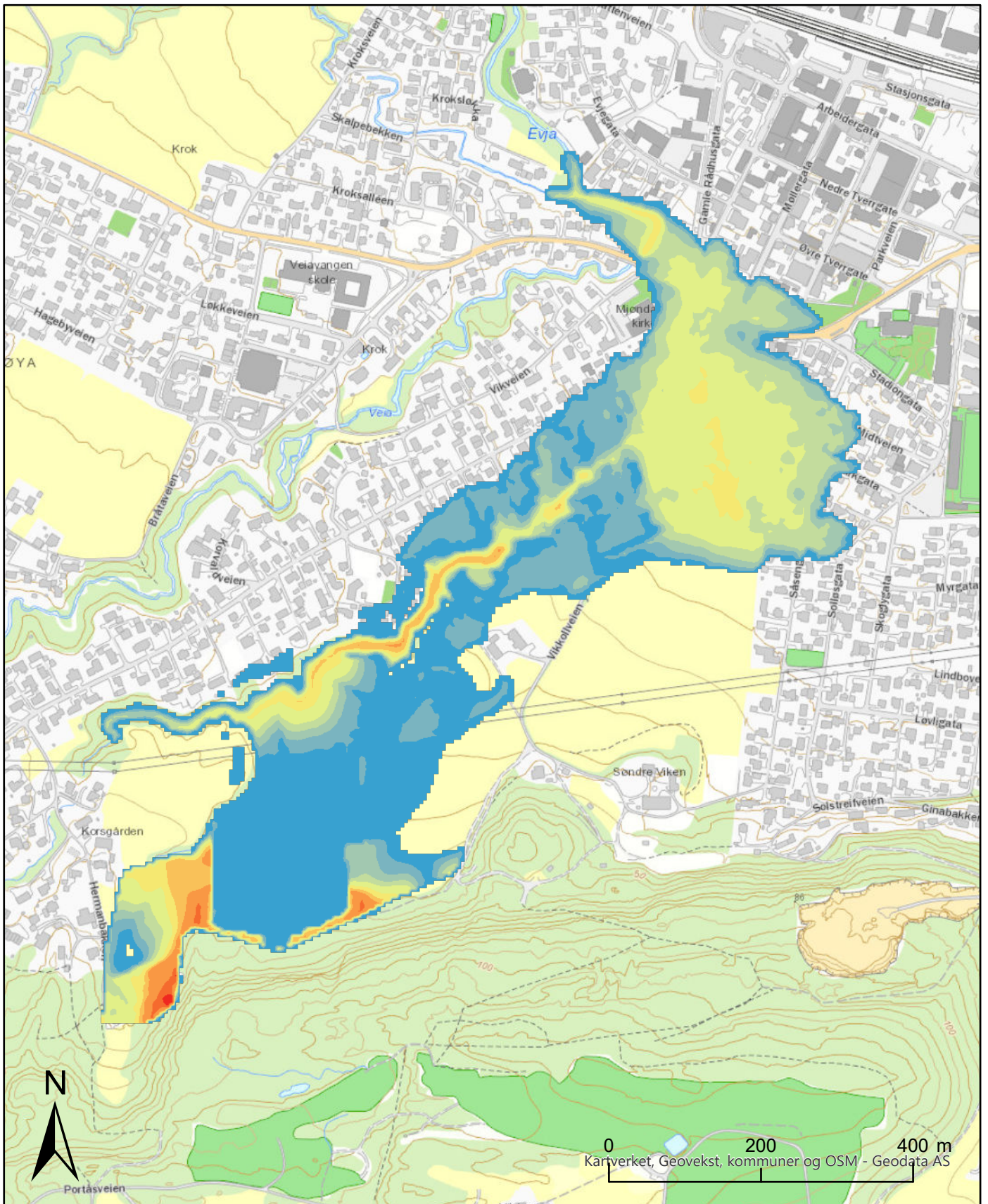
Flytehode (m)	Symbol	Max. Høyde (m)
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 600 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk	Kartprojeksjon		
A4 1:7 000	ETRS 1989 UTM Zone 33N		
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B14	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

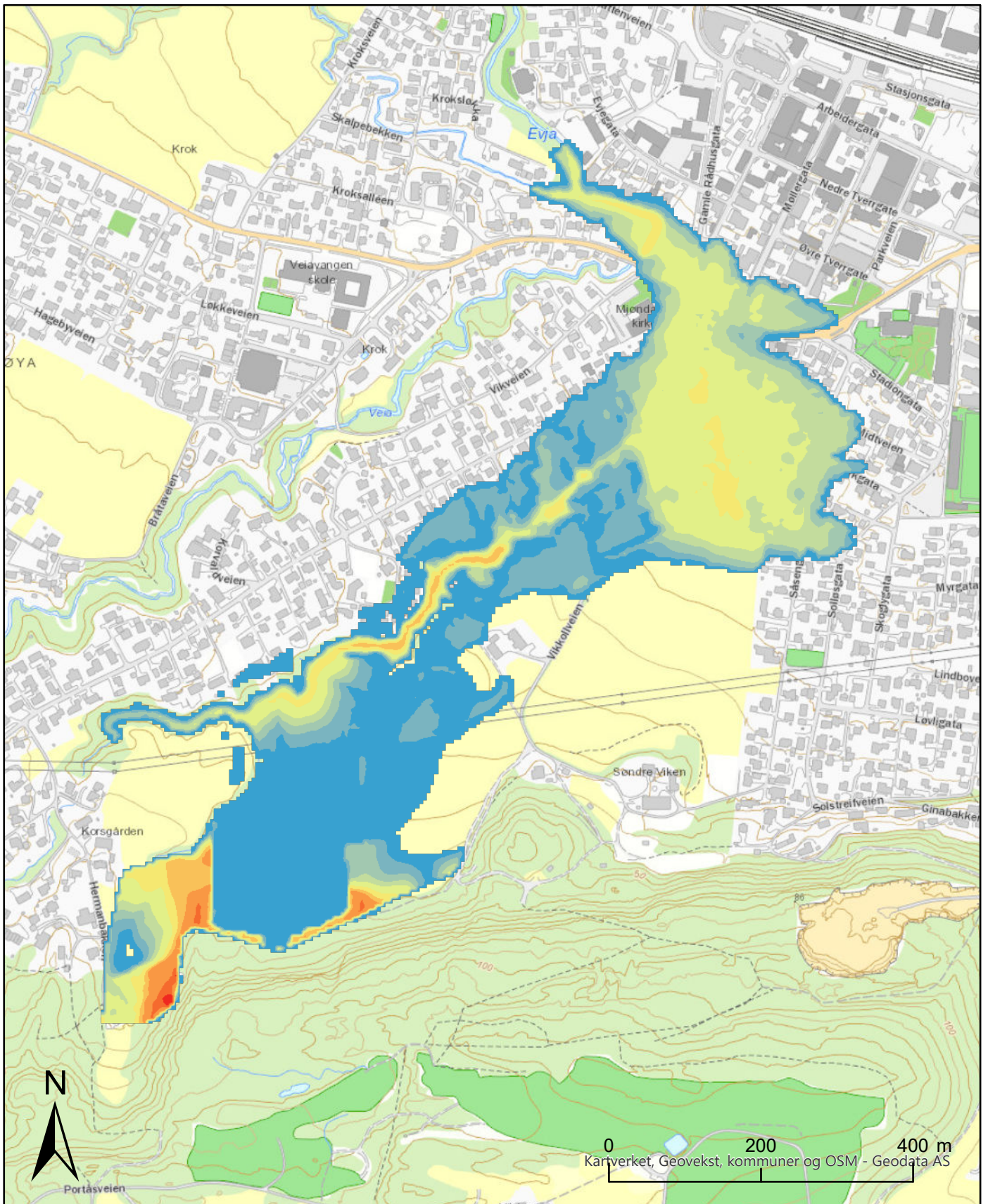
Flyte høyde (m)	Symbol	Verdi
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 750 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B15	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

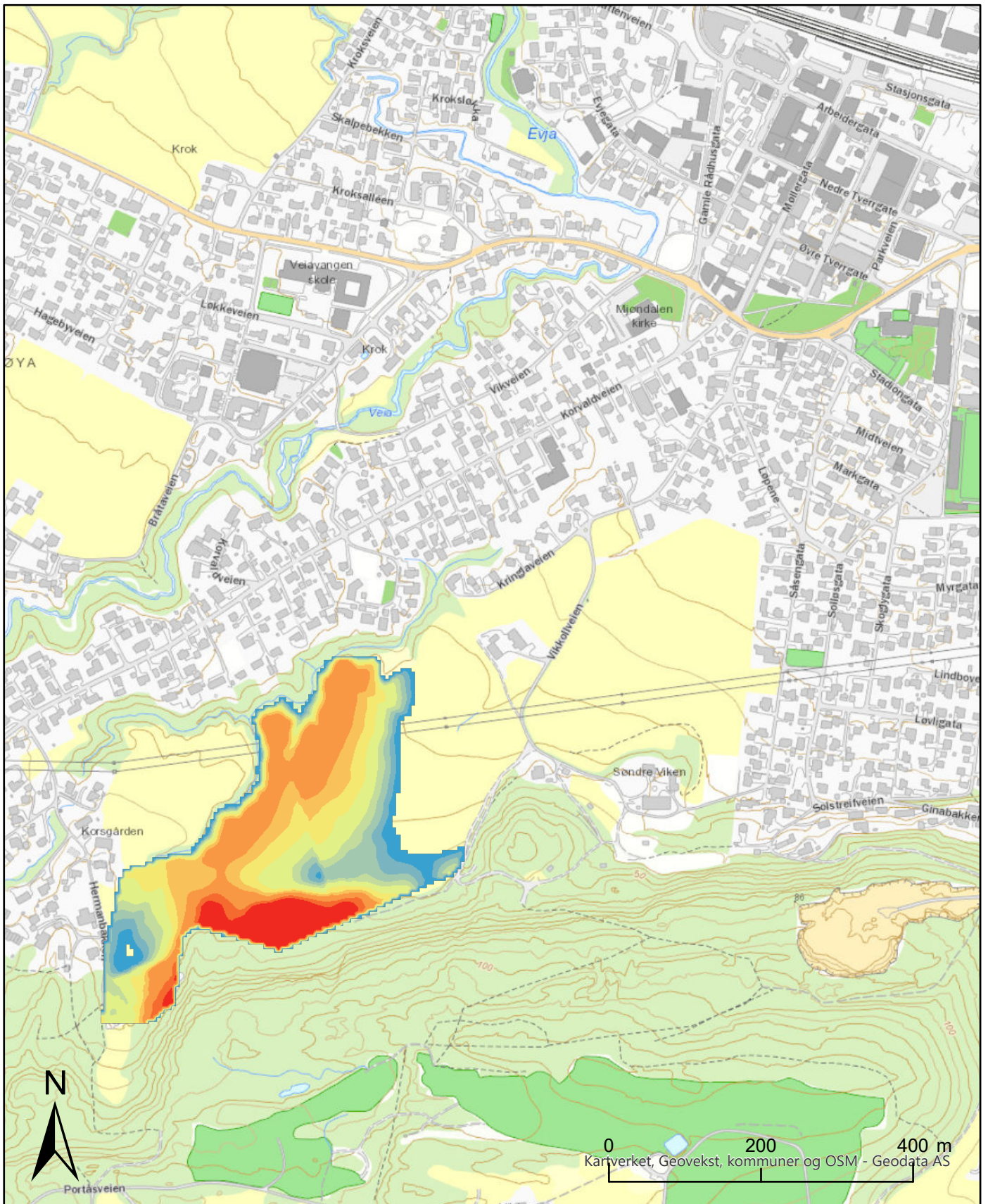
Flyte høyde (m)	Symbol	Max. Høyde (m)
≤ 0.5	Blue	0.5
≤ 1	Light Blue	1
≤ 1.5	Light Green	1.5
≤ 2	Green	2
≤ 3	Yellow-Green	3
≤ 4	Yellow	4
≤ 5	Orange	5
≤ 8	Dark Orange	8
≤ 10	Red-Orange	10
Over 10 meter	Red	> 10

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 900 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	B16	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

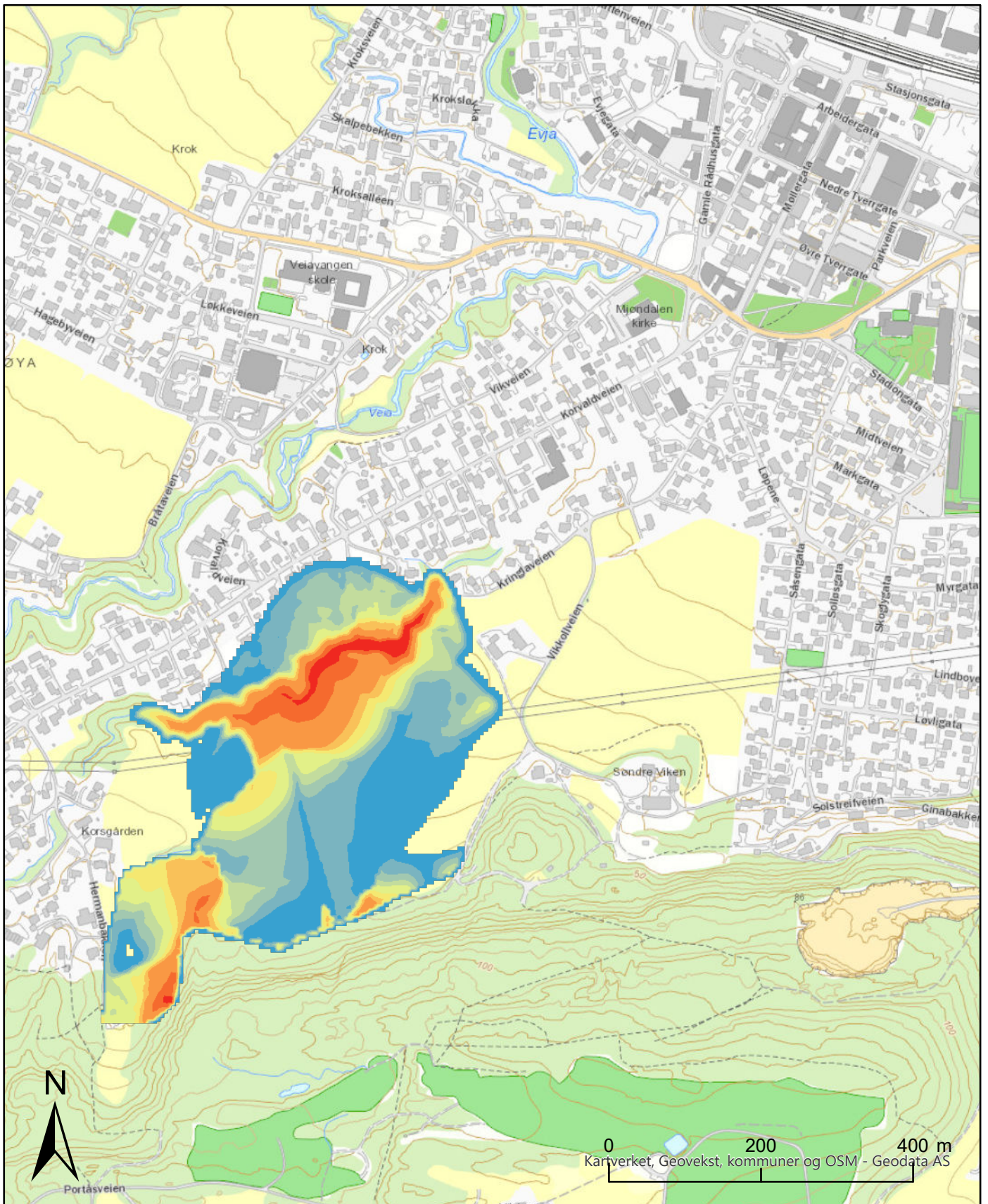
Flyte høyde (m)	Symbol	Verdi
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

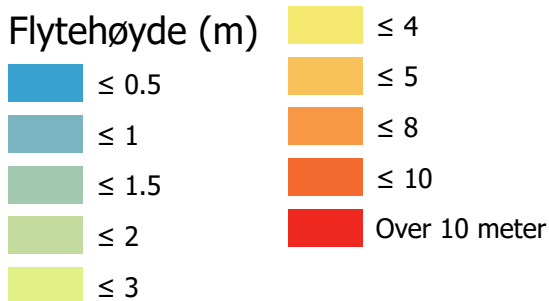
Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 0 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B17	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

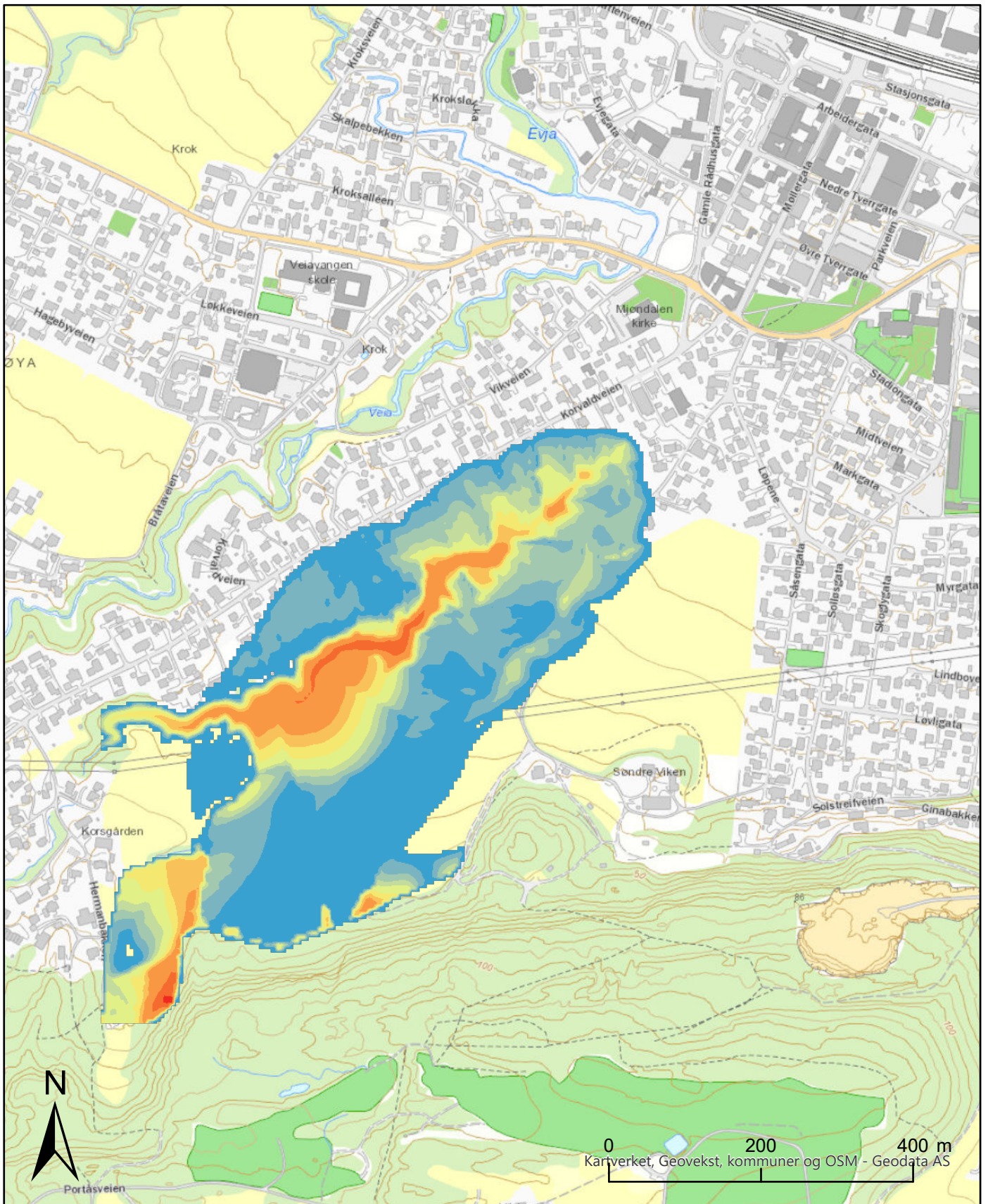


Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 60 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B18	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

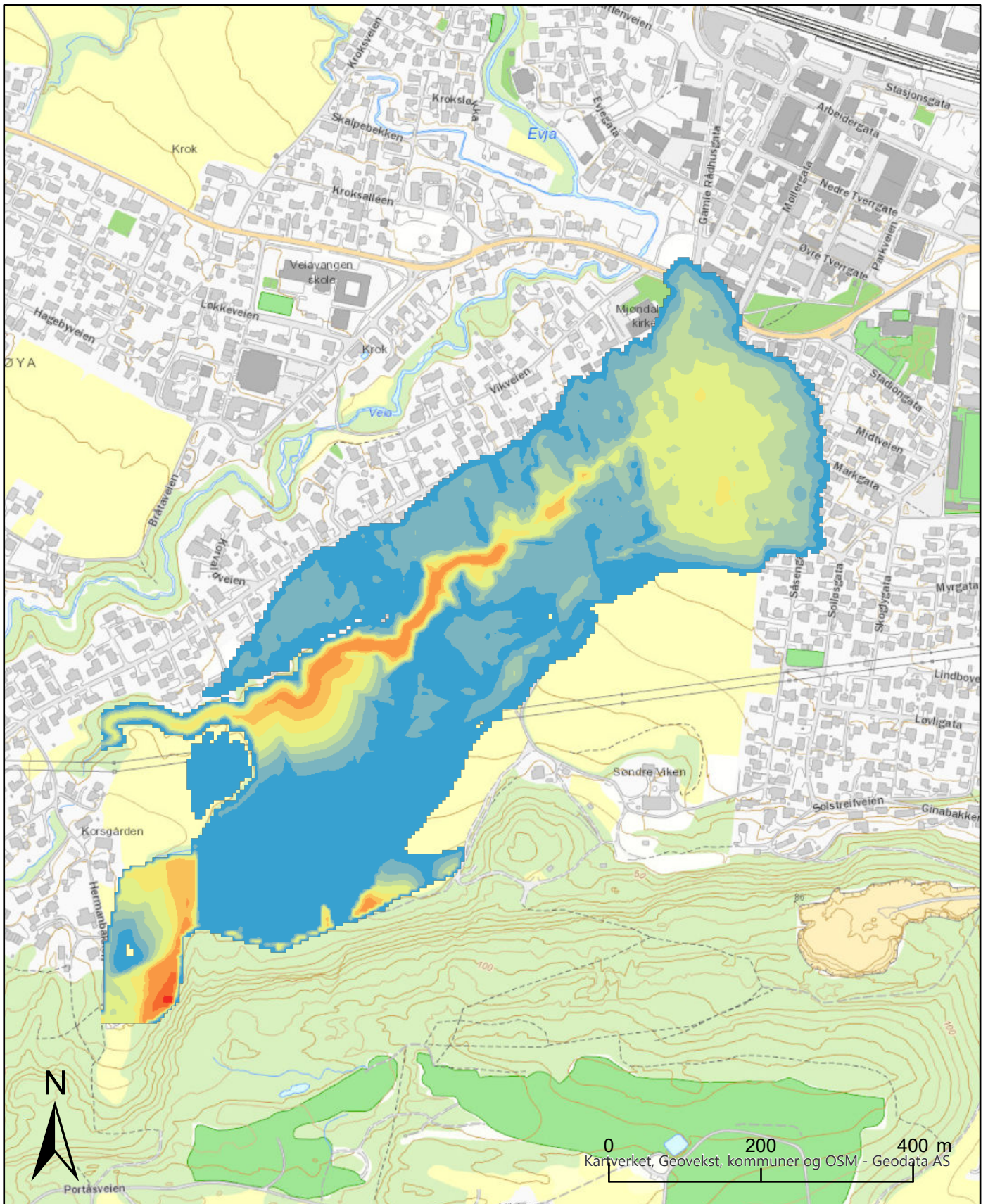
Flytehøyde (m)	Symbol	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 120 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B19	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

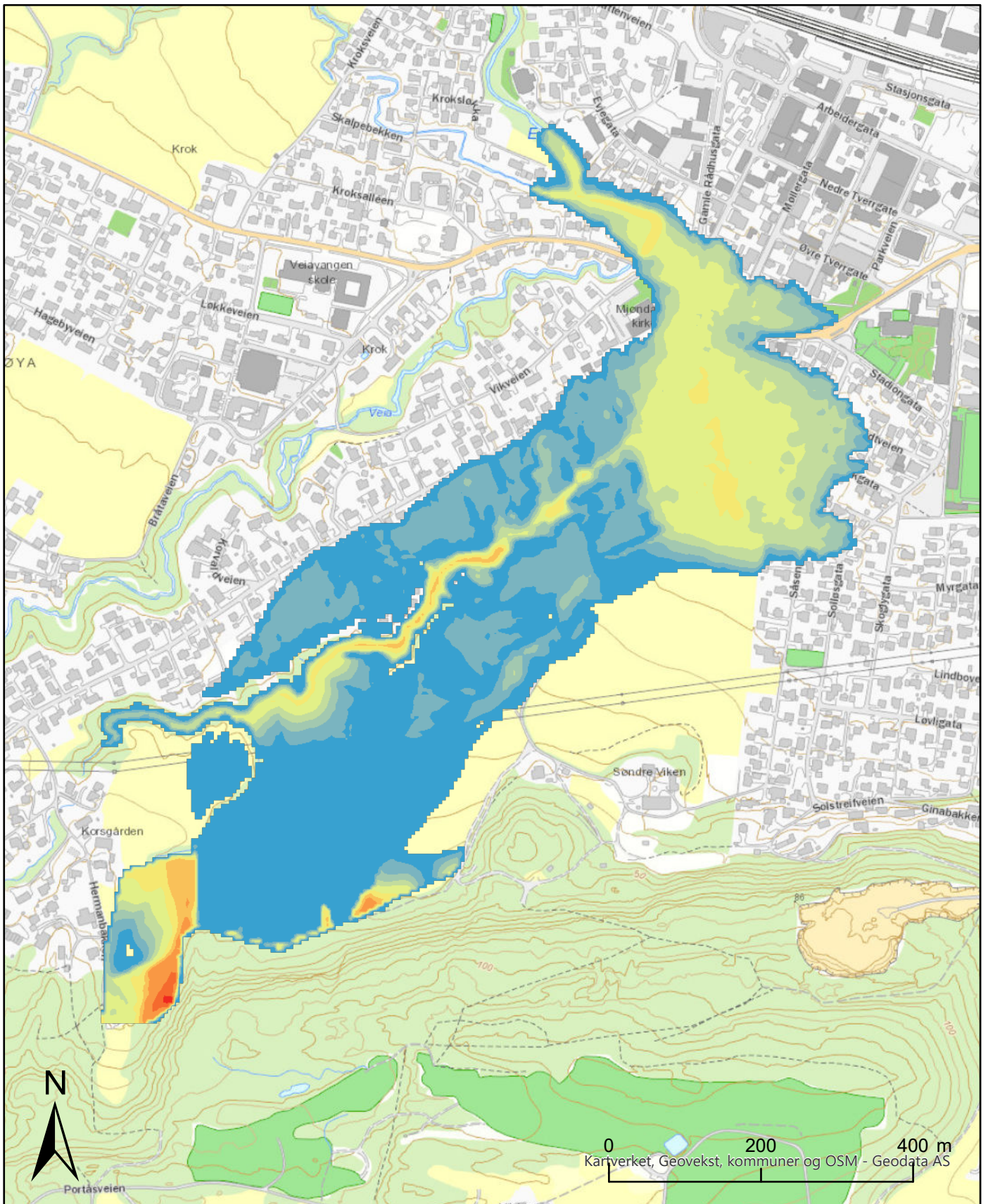
Flytehode (m)	Symbol	Max. Høyde (m)
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 300 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk	Kartprojeksjon		
A4 1:7 000	ETRS 1989 UTM Zone 33N		
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	B20	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

Flytehøyde (m)	Symbol	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Green	≤ 8
≤ 2	Light Green	≤ 10
≤ 3	Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 1: "Stort"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 900 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk	Kartprojeksjon		
A4 1:7 000	ETRS 1989 UTM Zone 33N		
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	B21	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			

Vedlegg C

UTLØPSMODELLERING - SCENARIO 2: " SANNSYNLIG"

Innhold

C1	Metode	2
C2	Resultater	2

Figurer

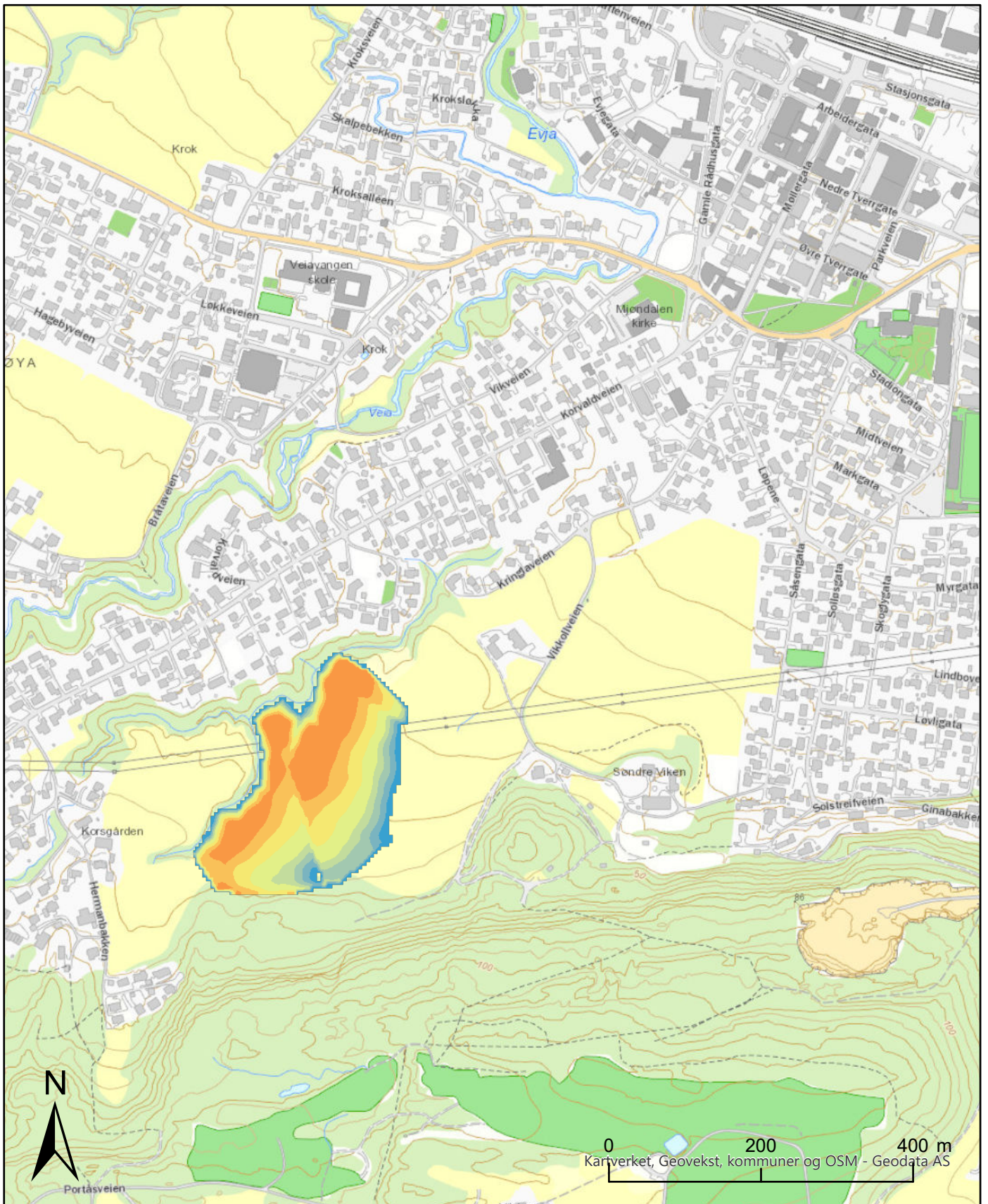
Figur C01 – C20 Utløpsmodellering, Scenario 2: "Sannsynlig"

C1 Metode

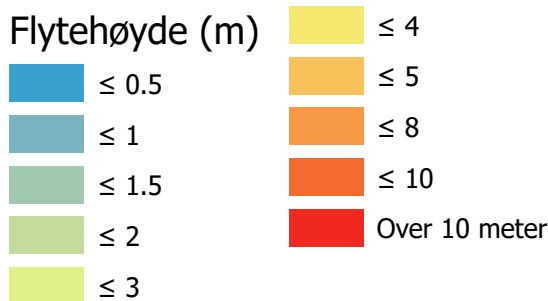
Utløpsmodellering for to scenarier av løsneområdet ble utført ved hjelp av BingClaw. Dette vedlegget viser simuleringsresultater for Scenario 2: "Sannsynlig".

C2 Resultater

Resultater er vist på Figur C01 til Figur C20.



Tegnforklaring

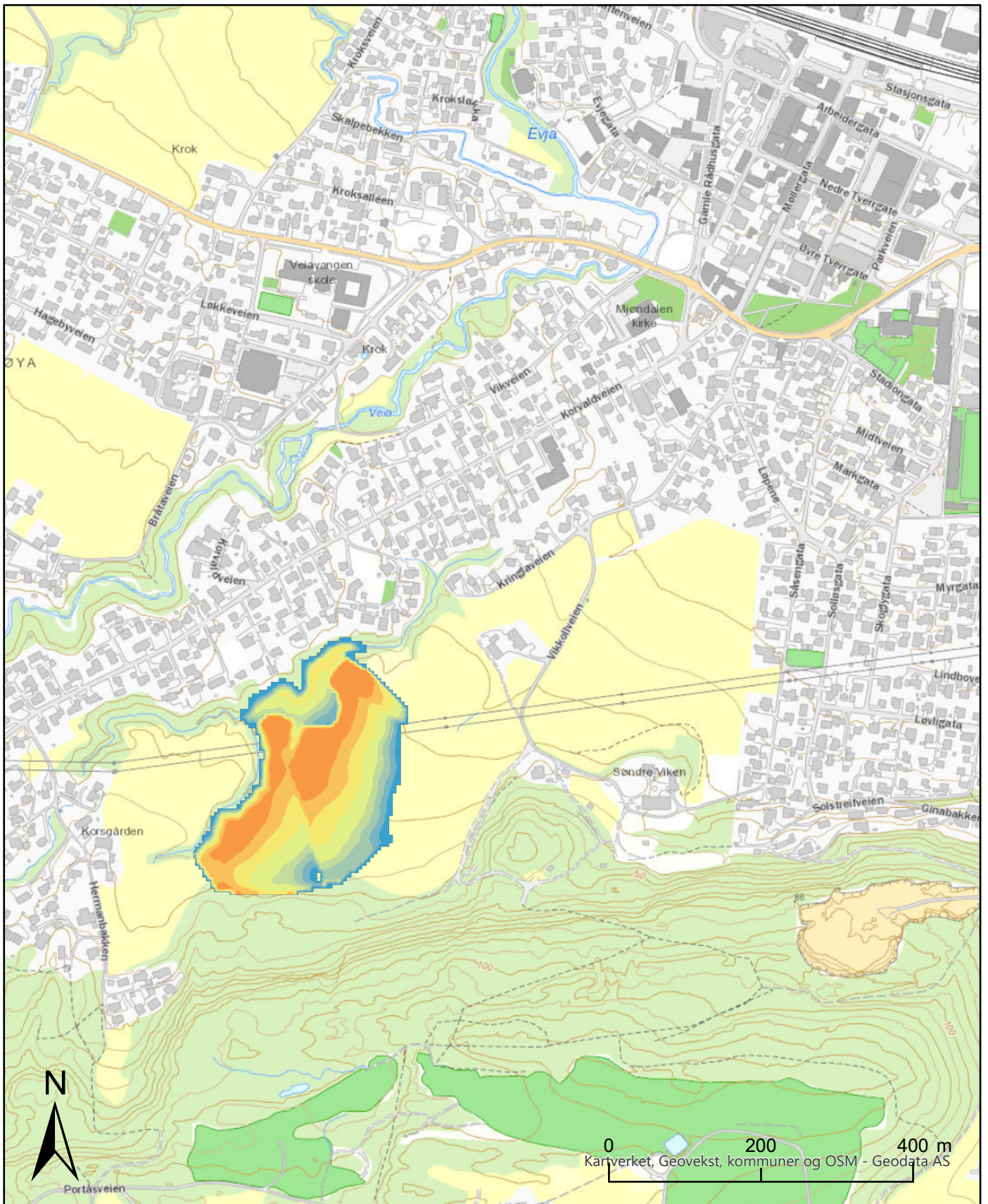


Utløpsmodellering

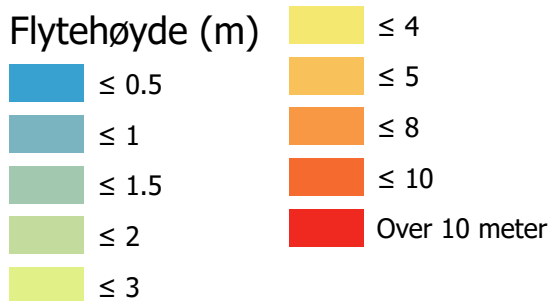
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 0 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartnr.	Rev.
20110297	02	C01	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

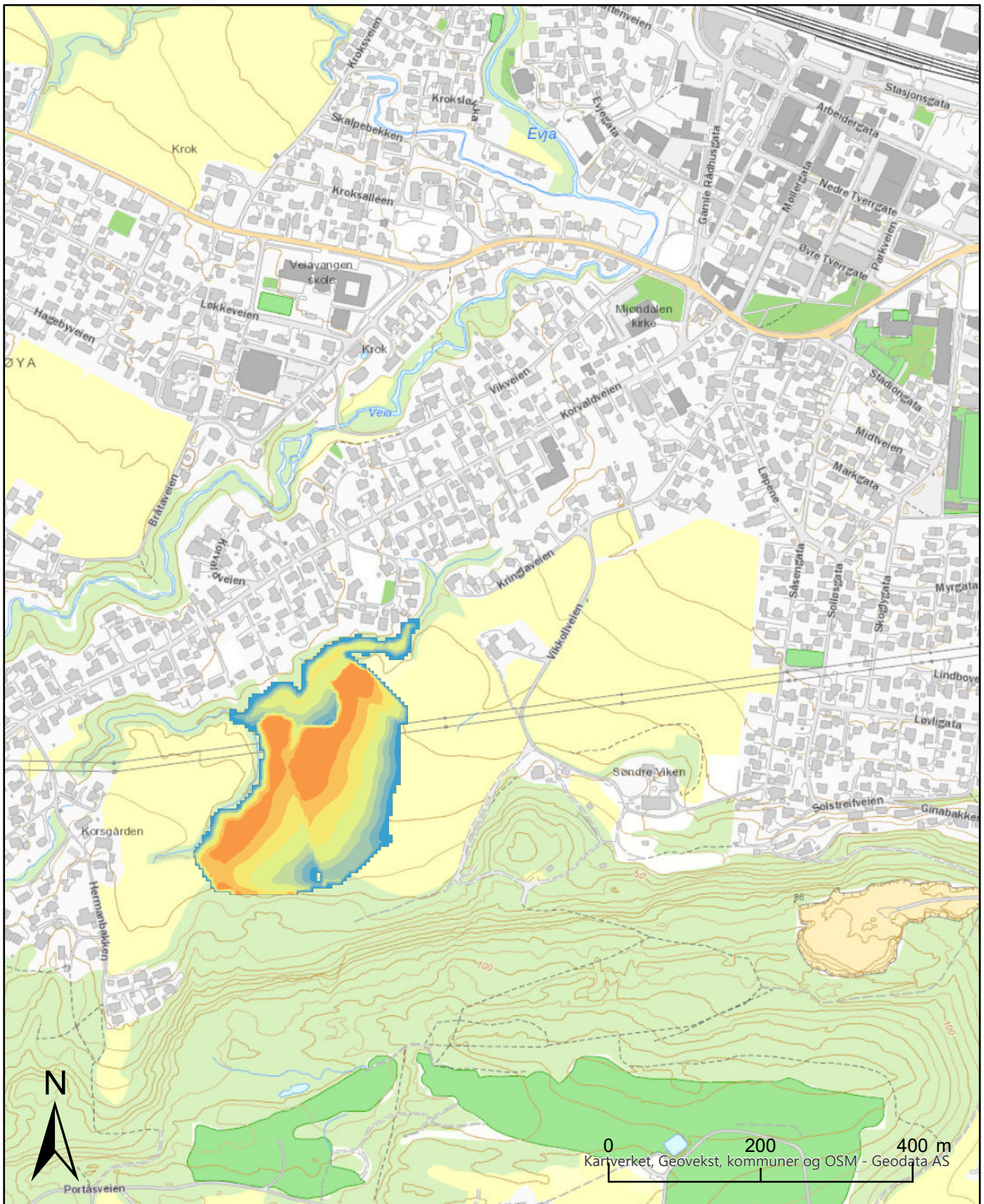


Utløpsmodellering

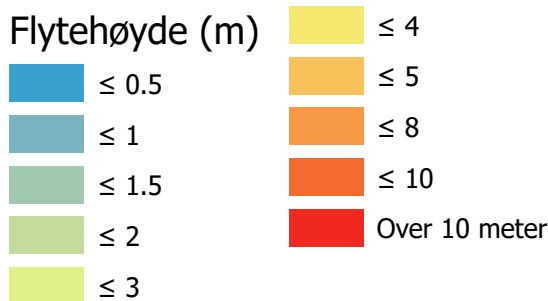
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 30 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C02	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

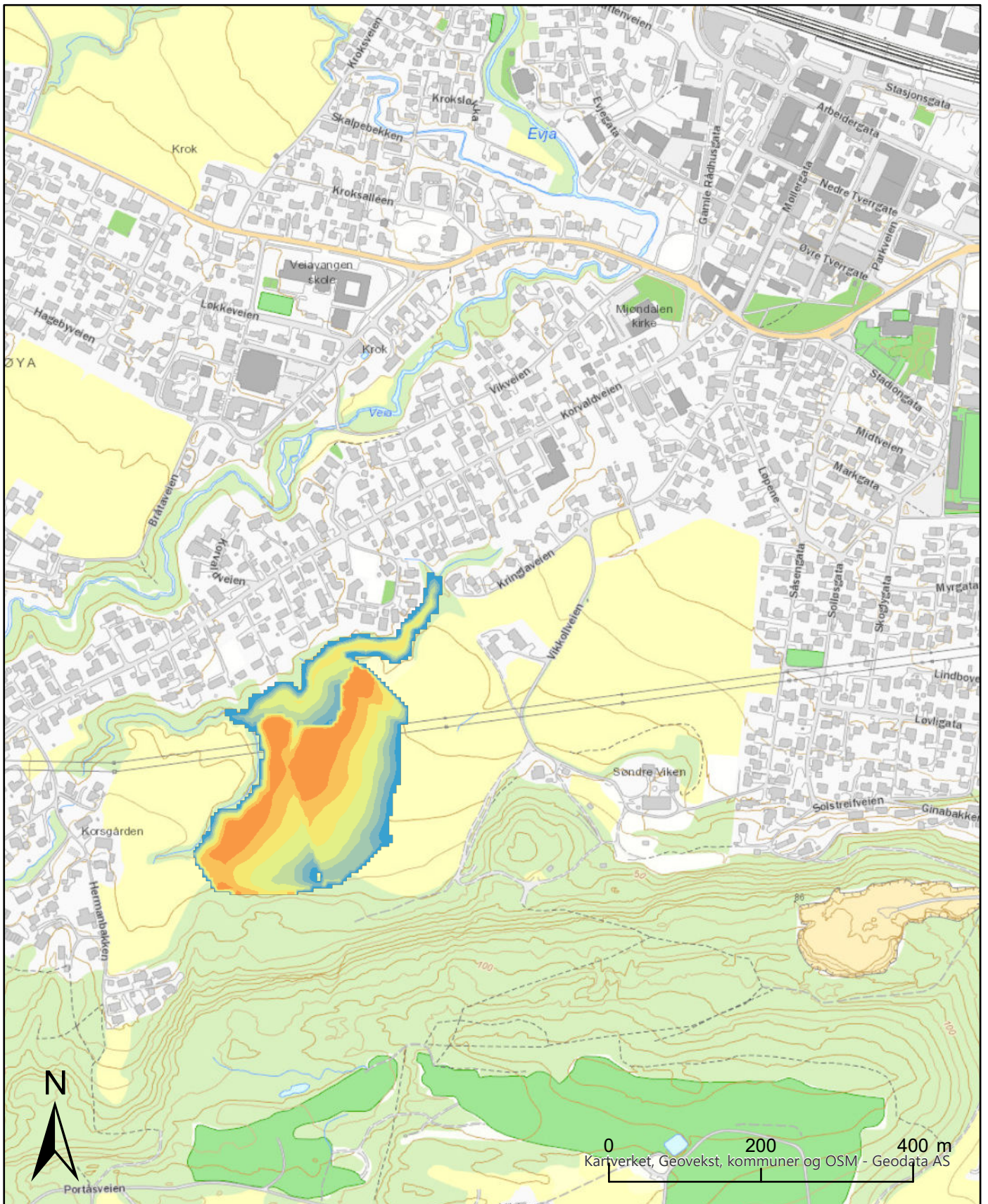


Utløpsmodellering

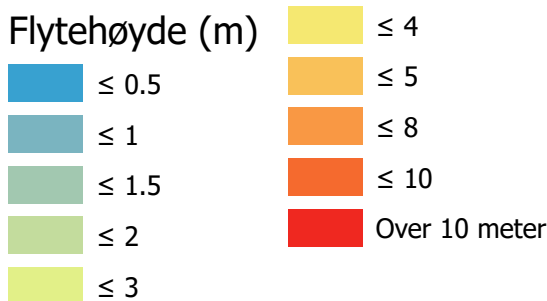
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 60 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C03	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

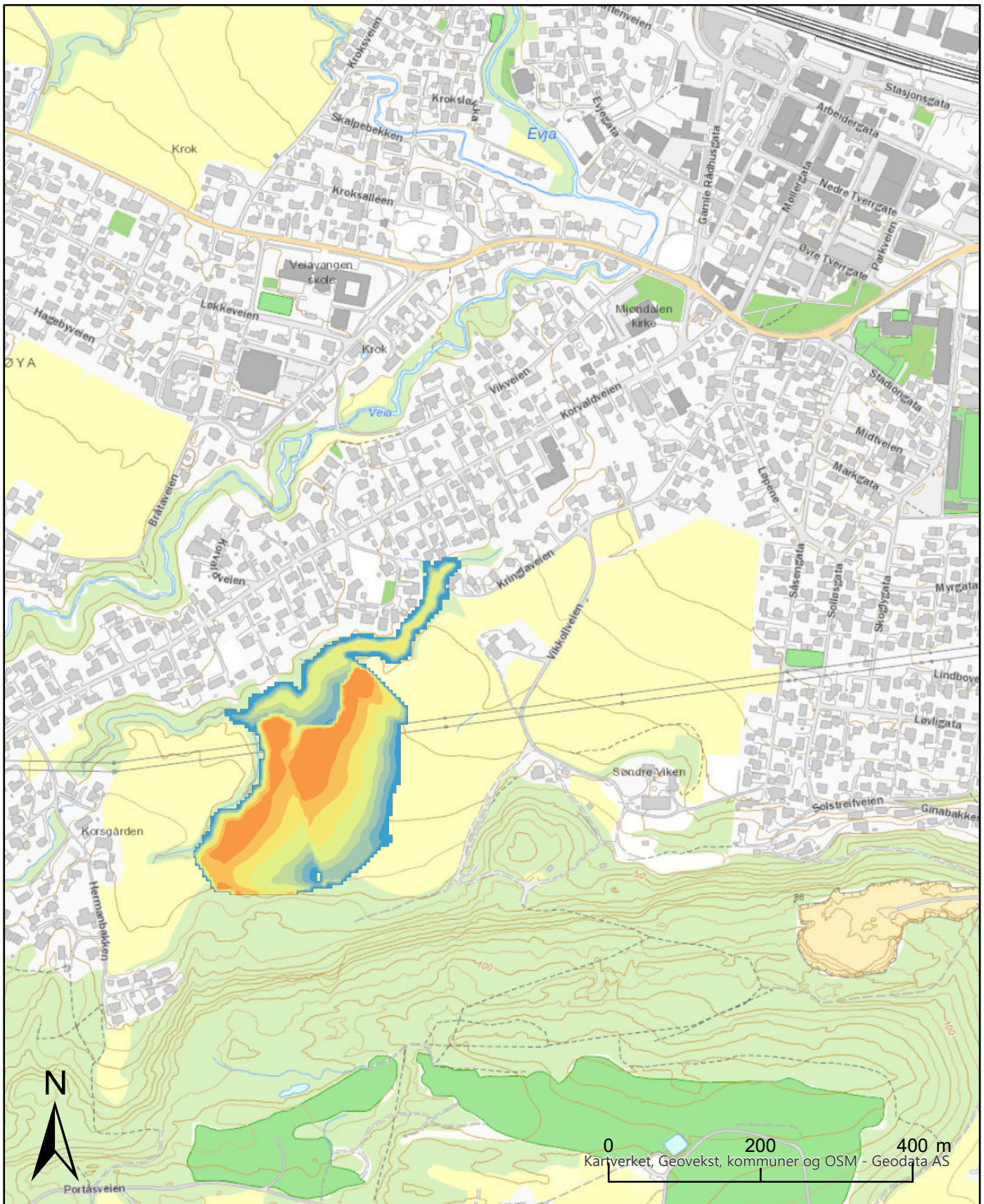


Utløpsmodellering

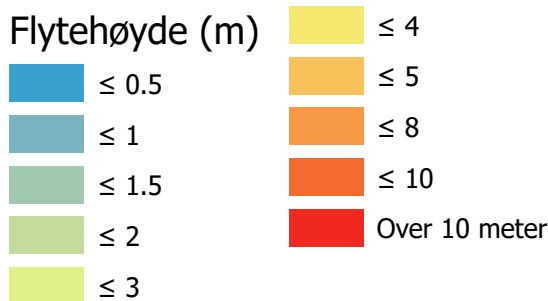
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 120 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C04	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

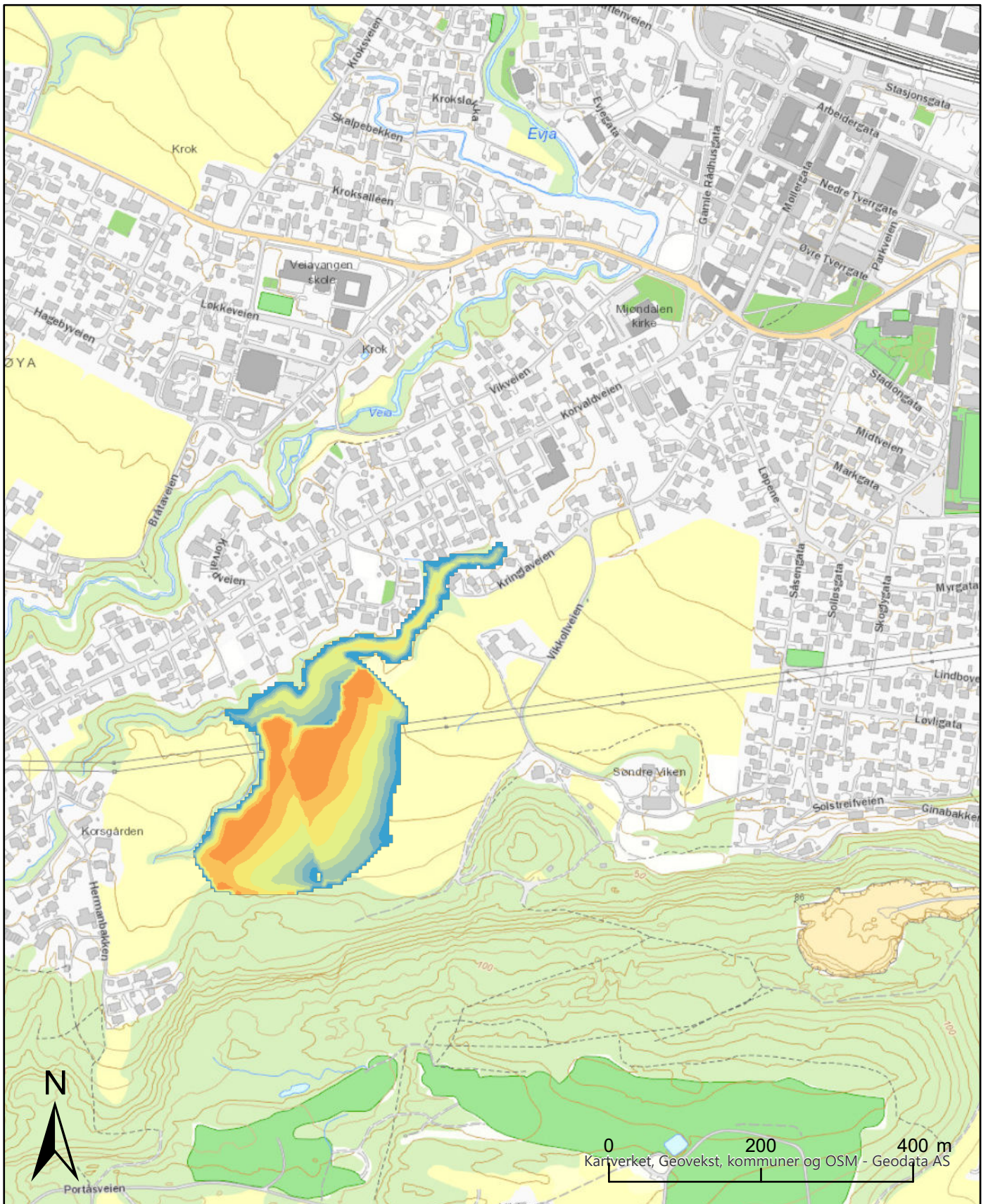


Utløpsmodellering

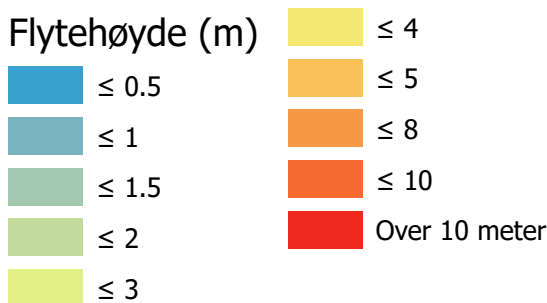
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 180 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C05	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

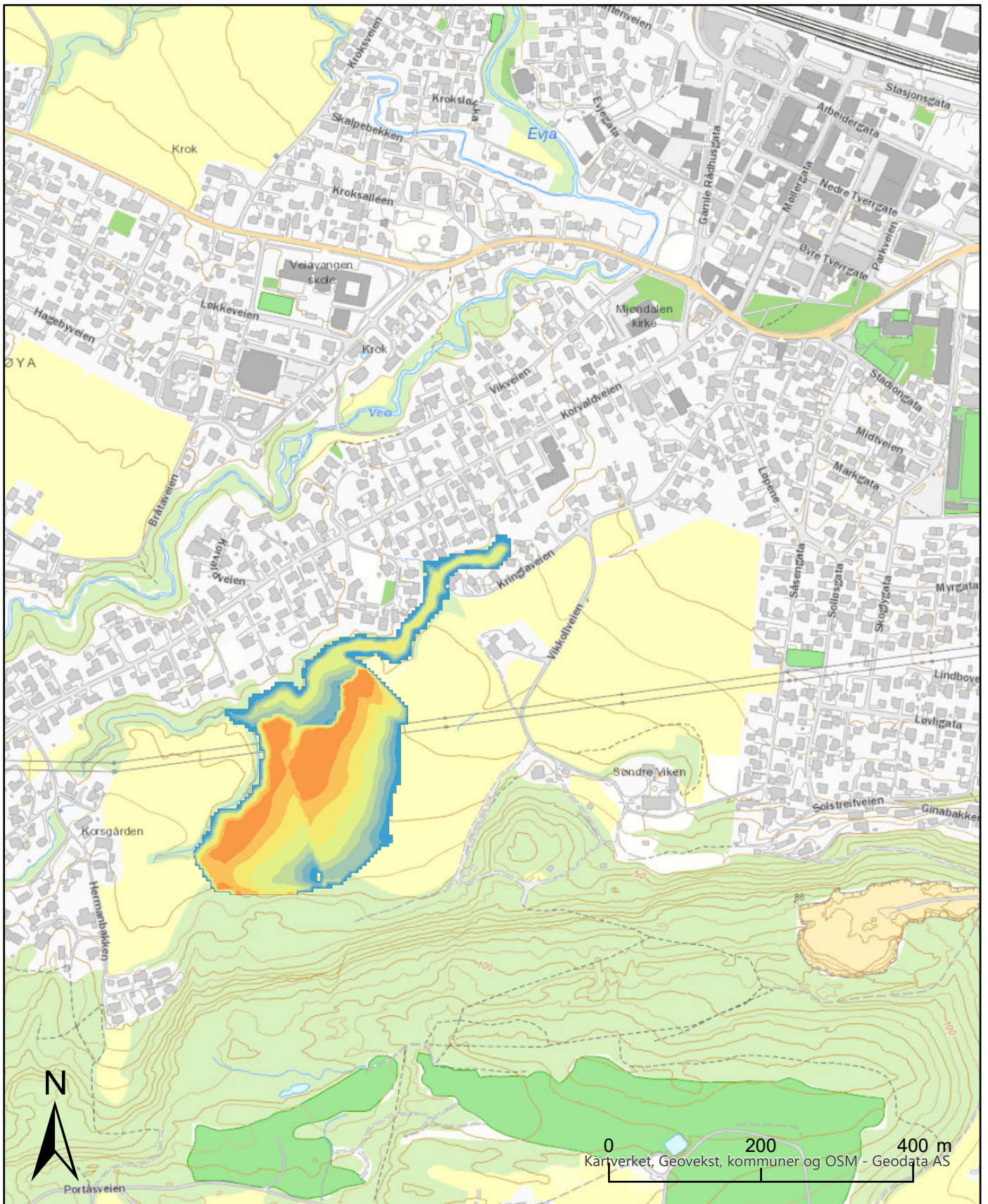


Utløpsmodellering

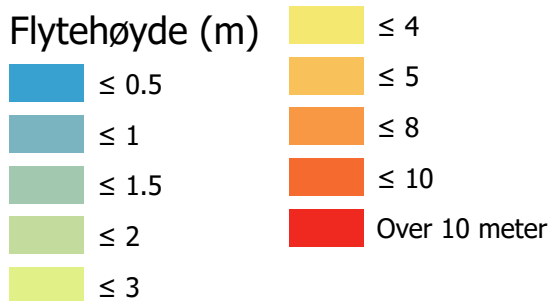
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 240 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C06	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

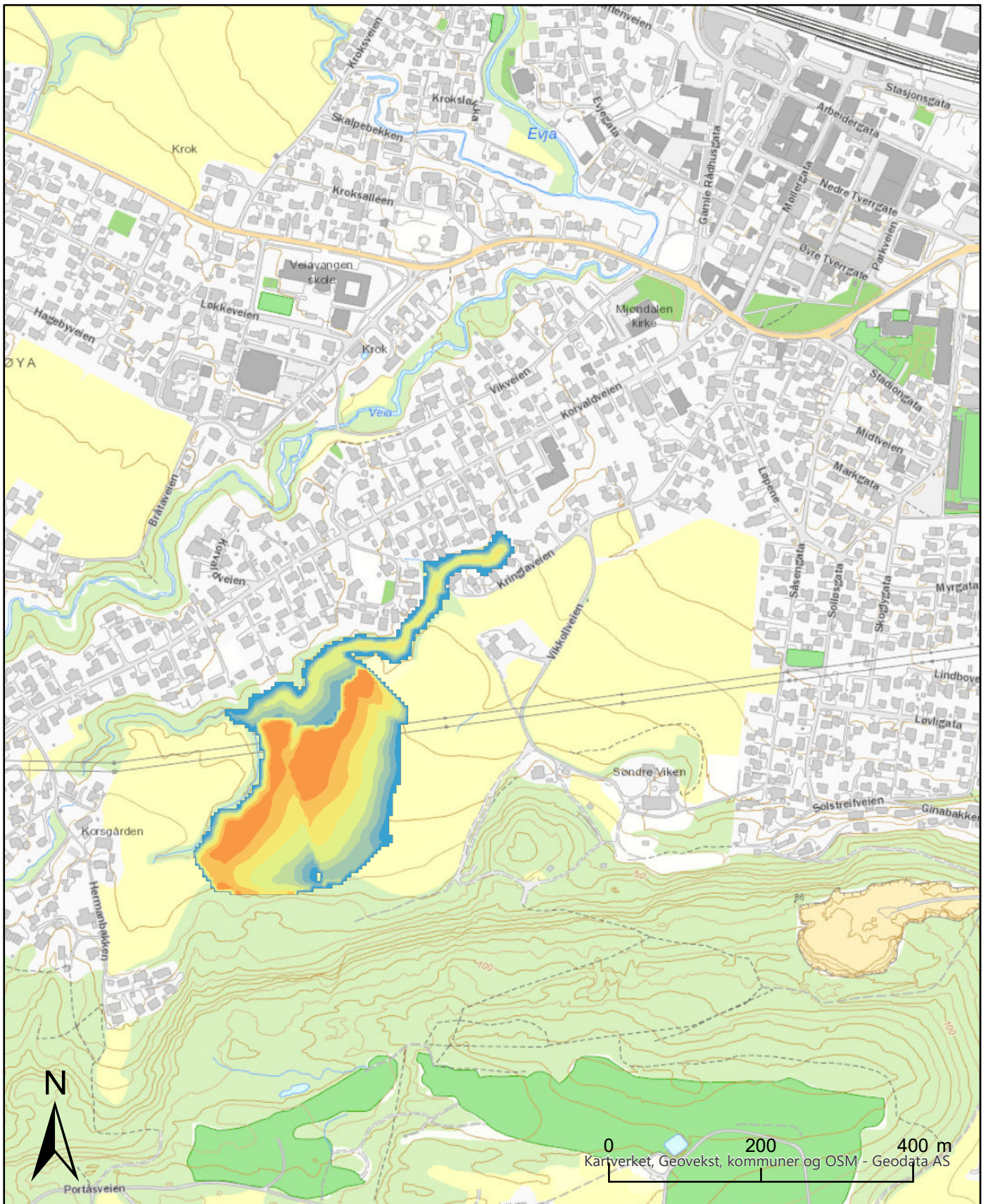


Utløpsmodellering

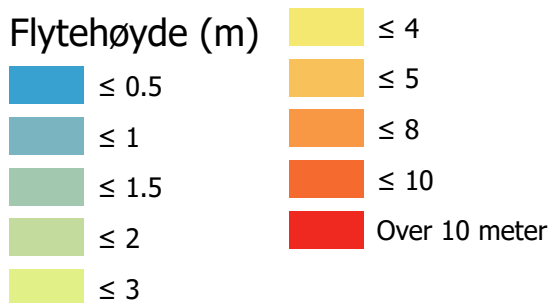
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 300 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C07	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

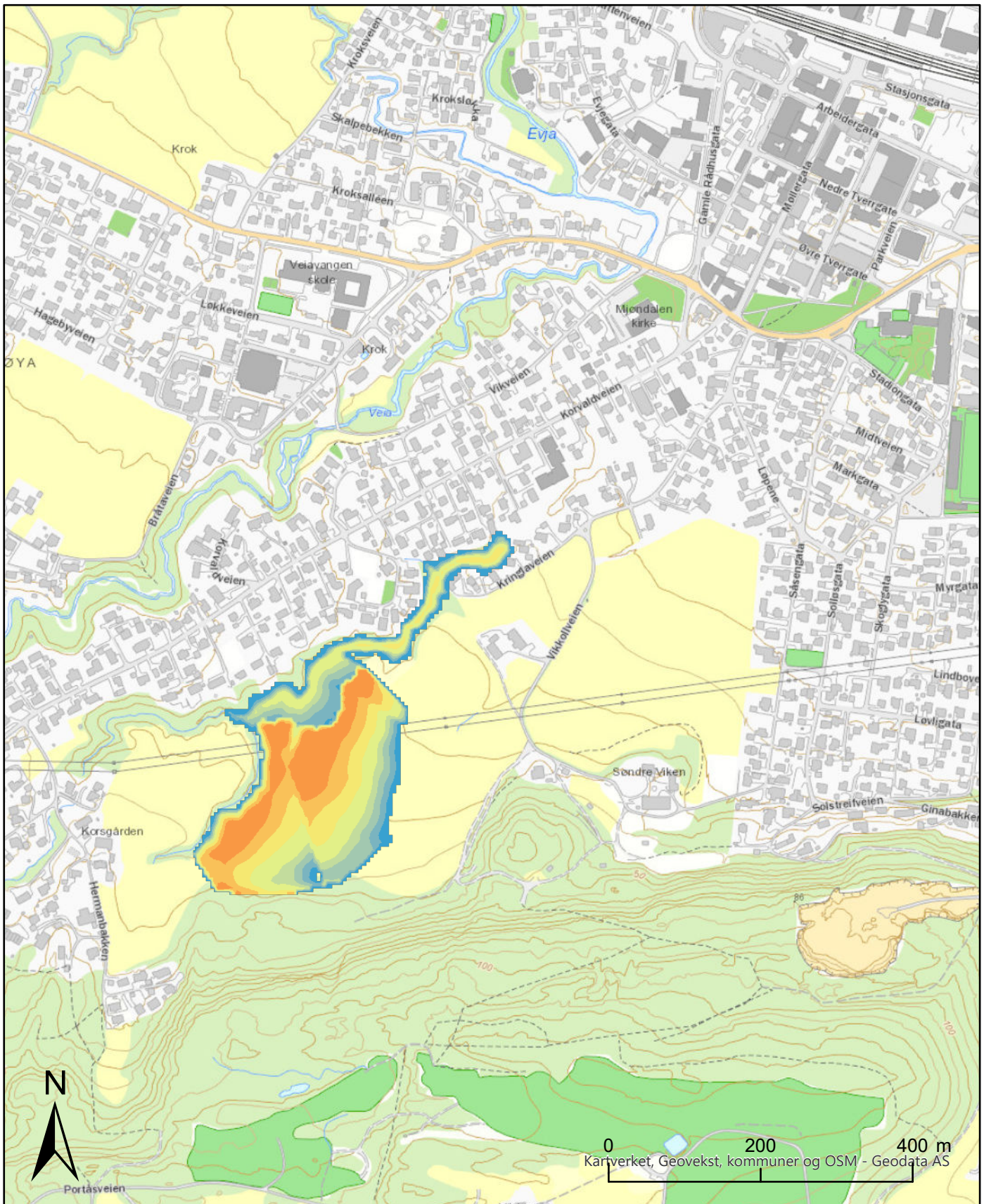


Utløpsmodellering

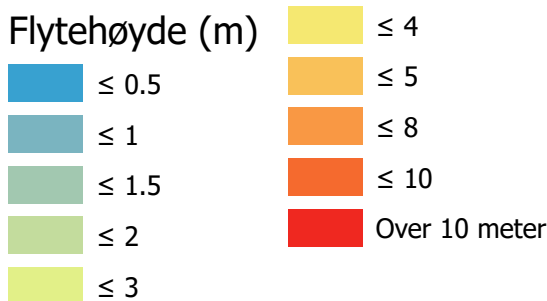
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 360 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk A4 1:7 000		Kartprojeksjon ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C08	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

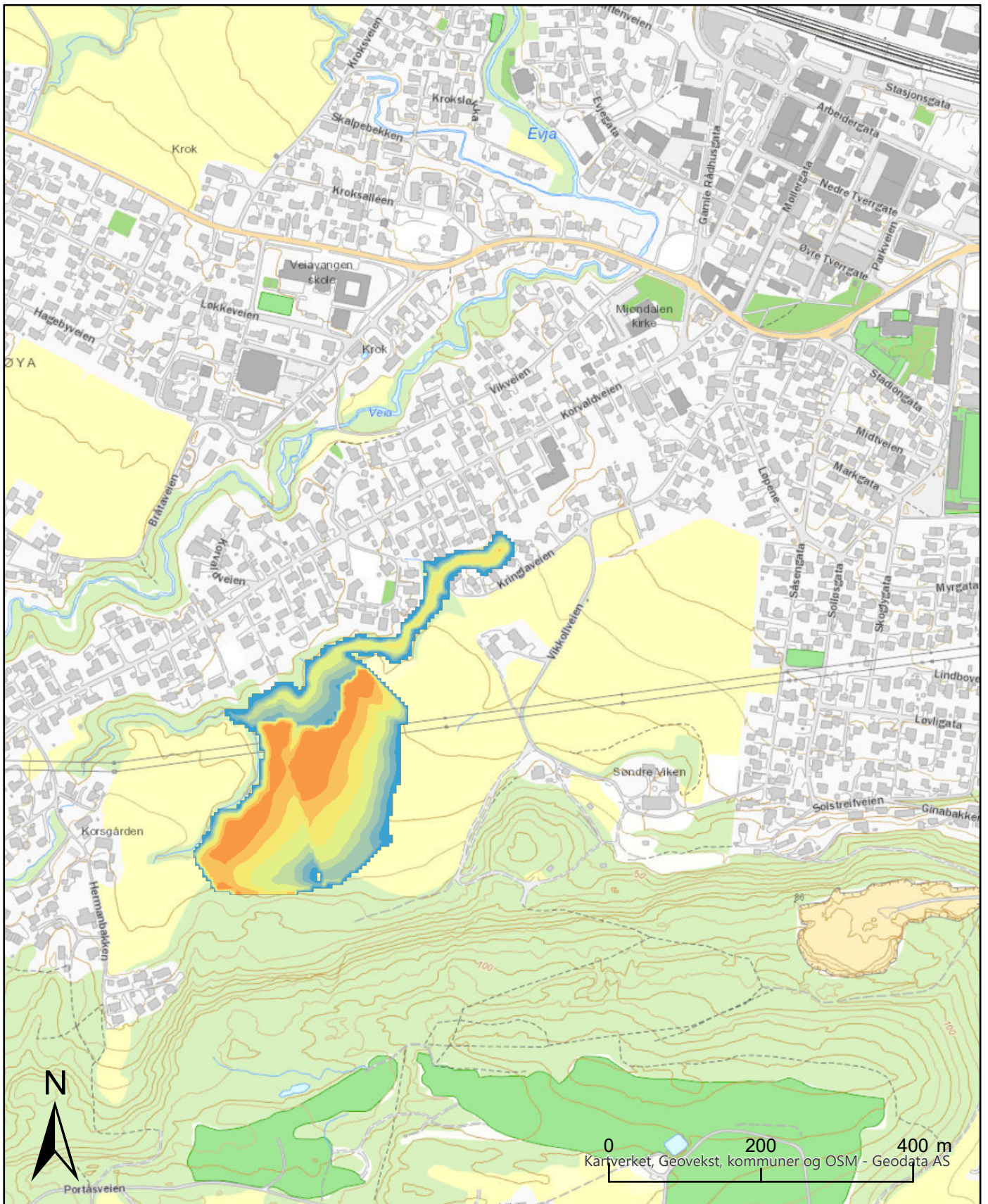


Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 420 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C09	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

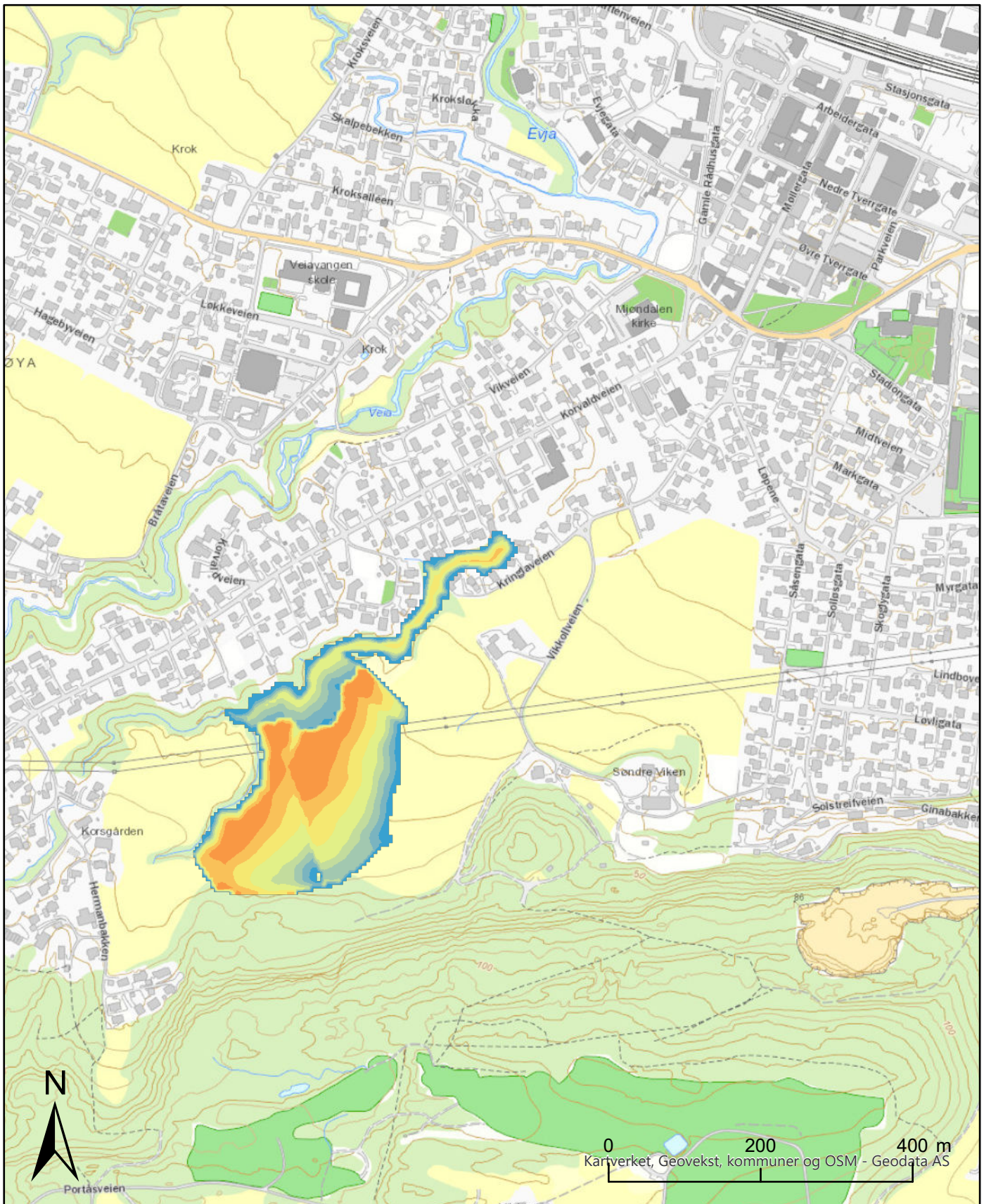
Flytehøyde (m)	Symbol	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 480 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C10	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

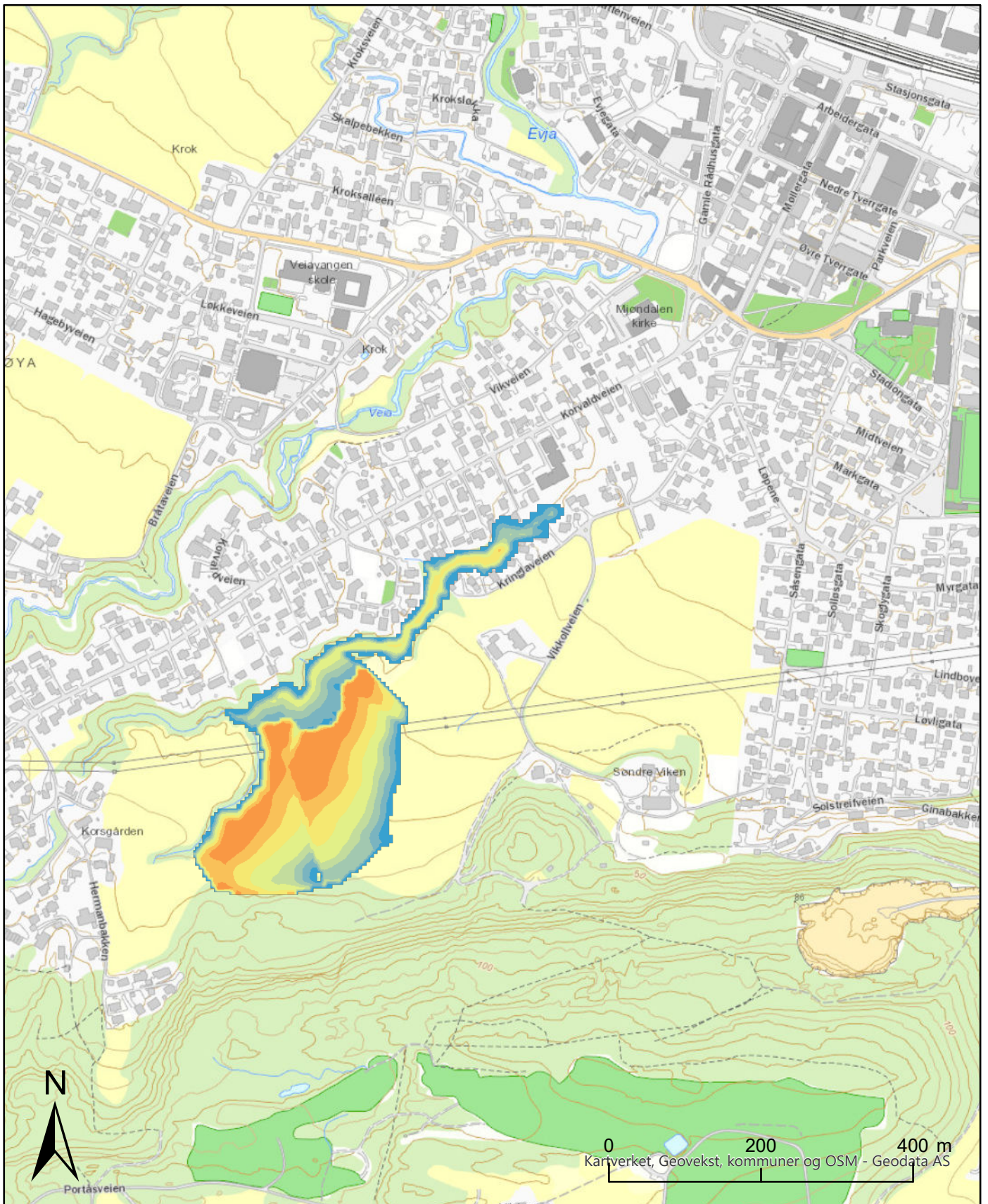
Flyte høyde (m)	Symbol	Verdi
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 600 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C11	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

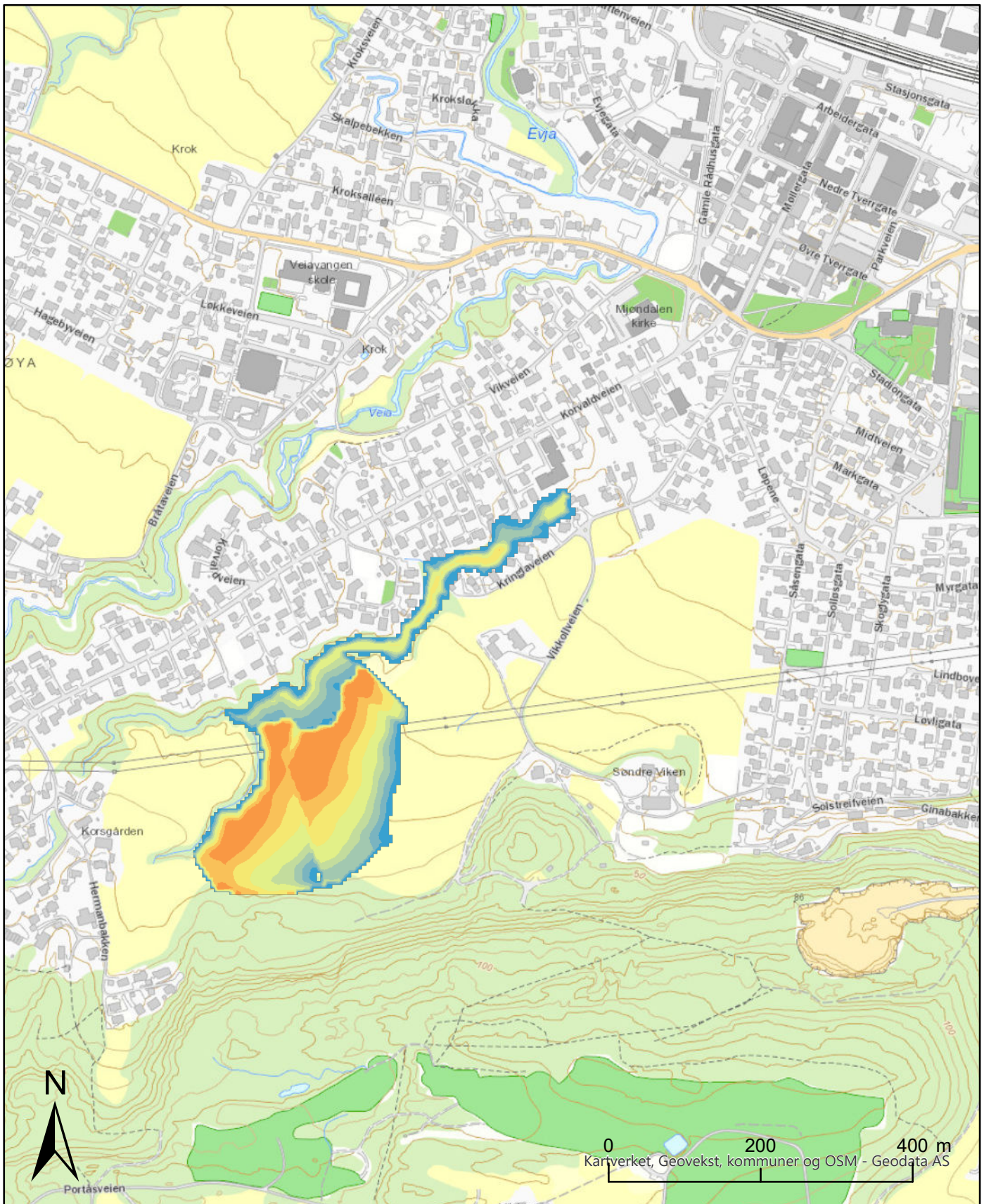
Flyte høyde (m)	Symbol	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Light Blue	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

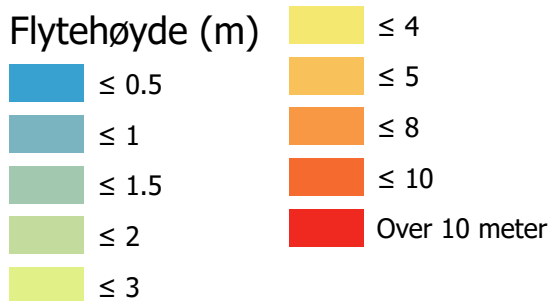
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 750 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C12	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

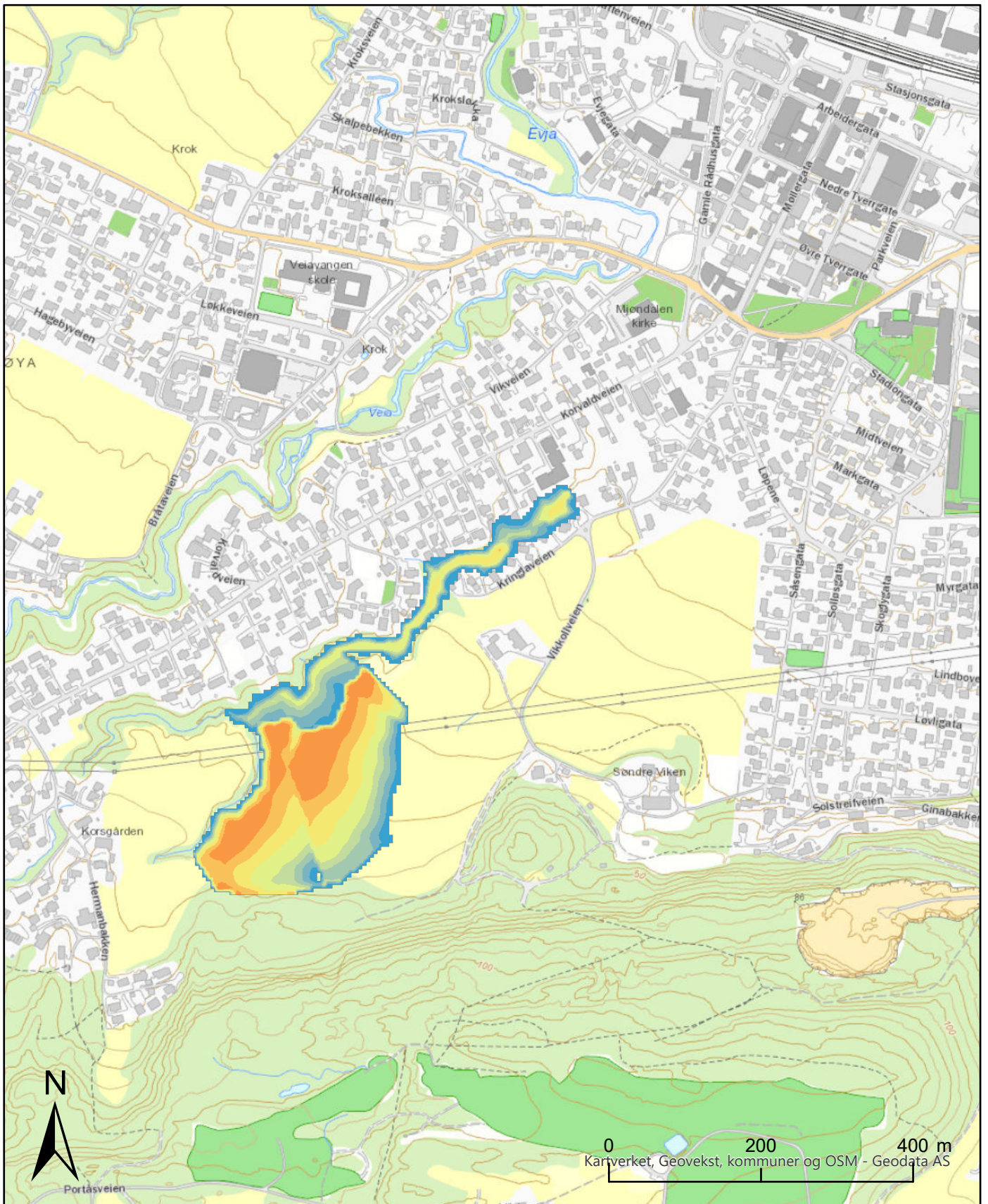


Utløpsmodellering

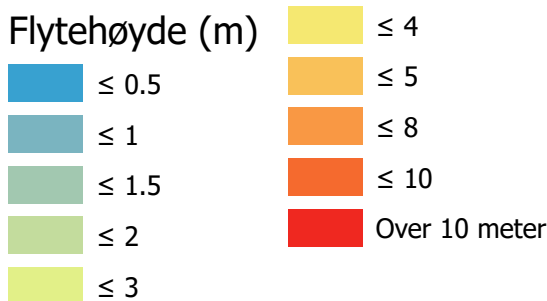
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 900 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C13	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

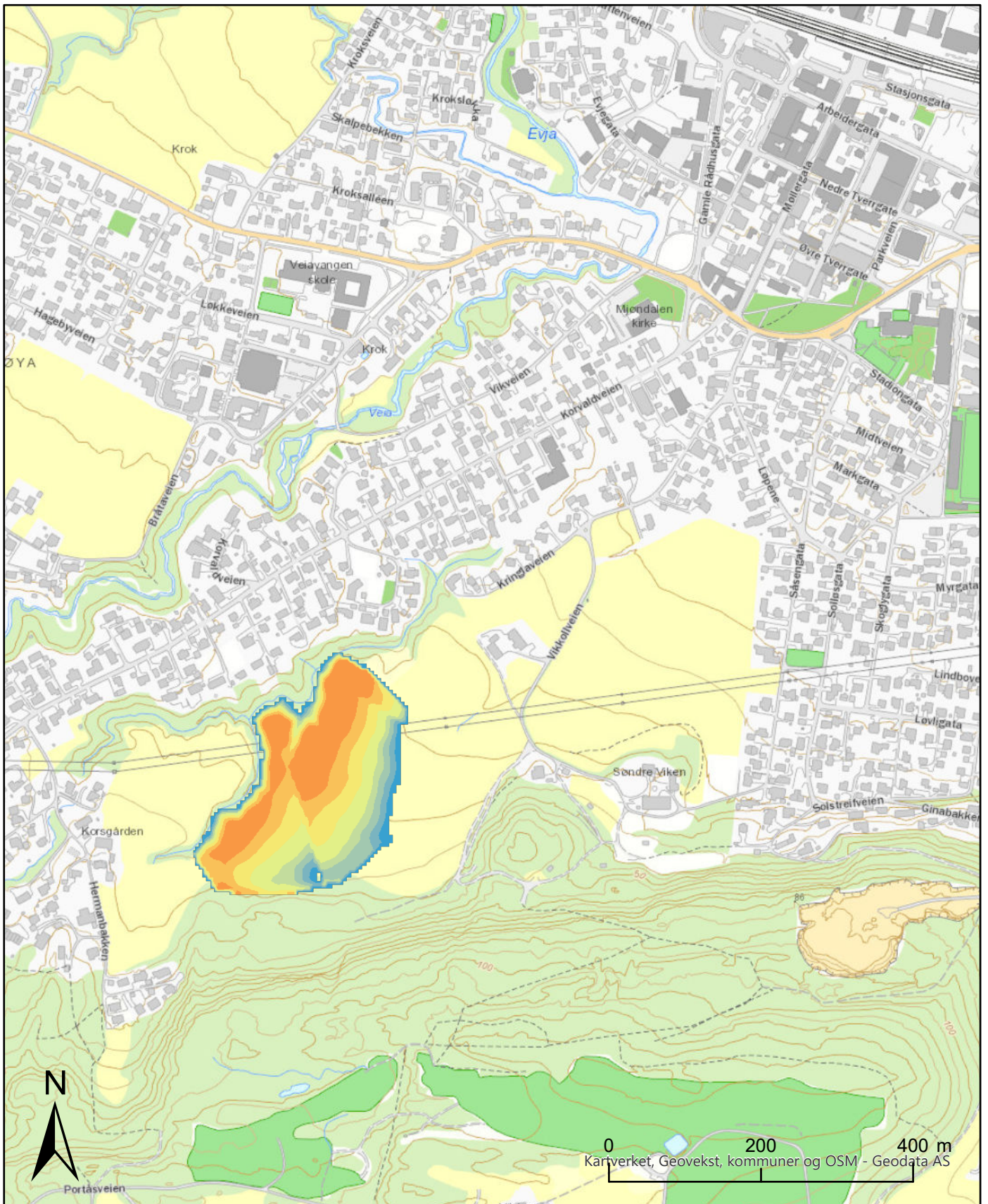


Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 60 \text{ kPa}$, $t = 1200 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C14	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

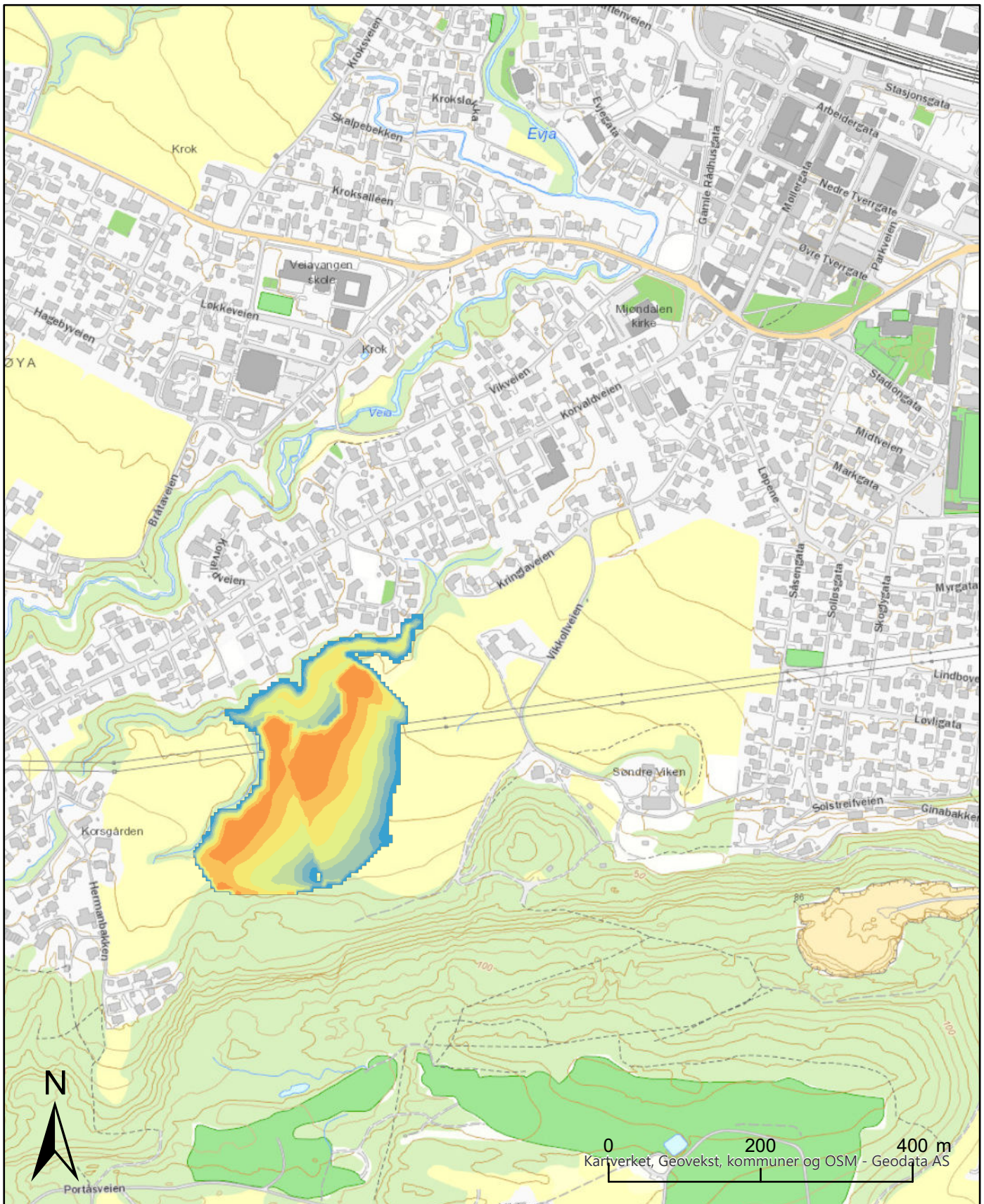
Flytehøyde (m)	Color	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Teal	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Light Yellow	Over 10 meter

Utløpsmodellering

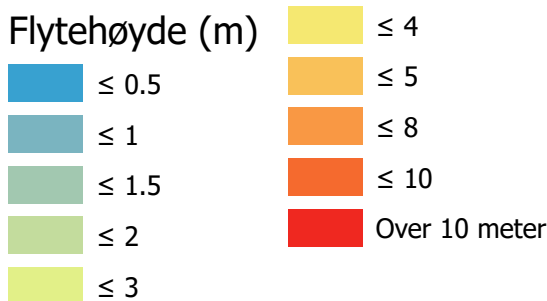
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 0 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C15	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

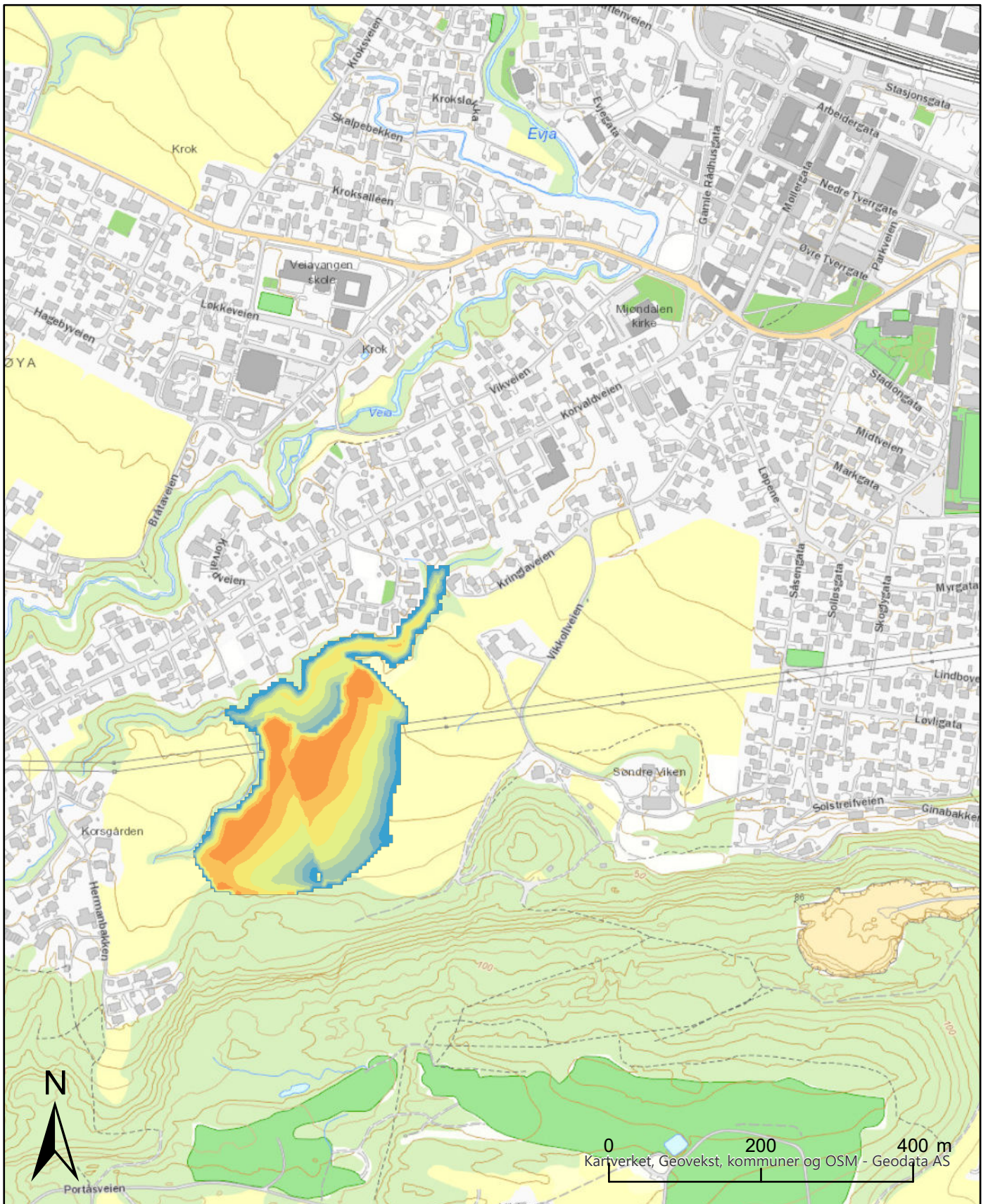


Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 60 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk	Kartprojeksjon		
A4 1:7 000	ETRS 1989 UTM Zone 33N		
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C16	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			



Tegnforklaring

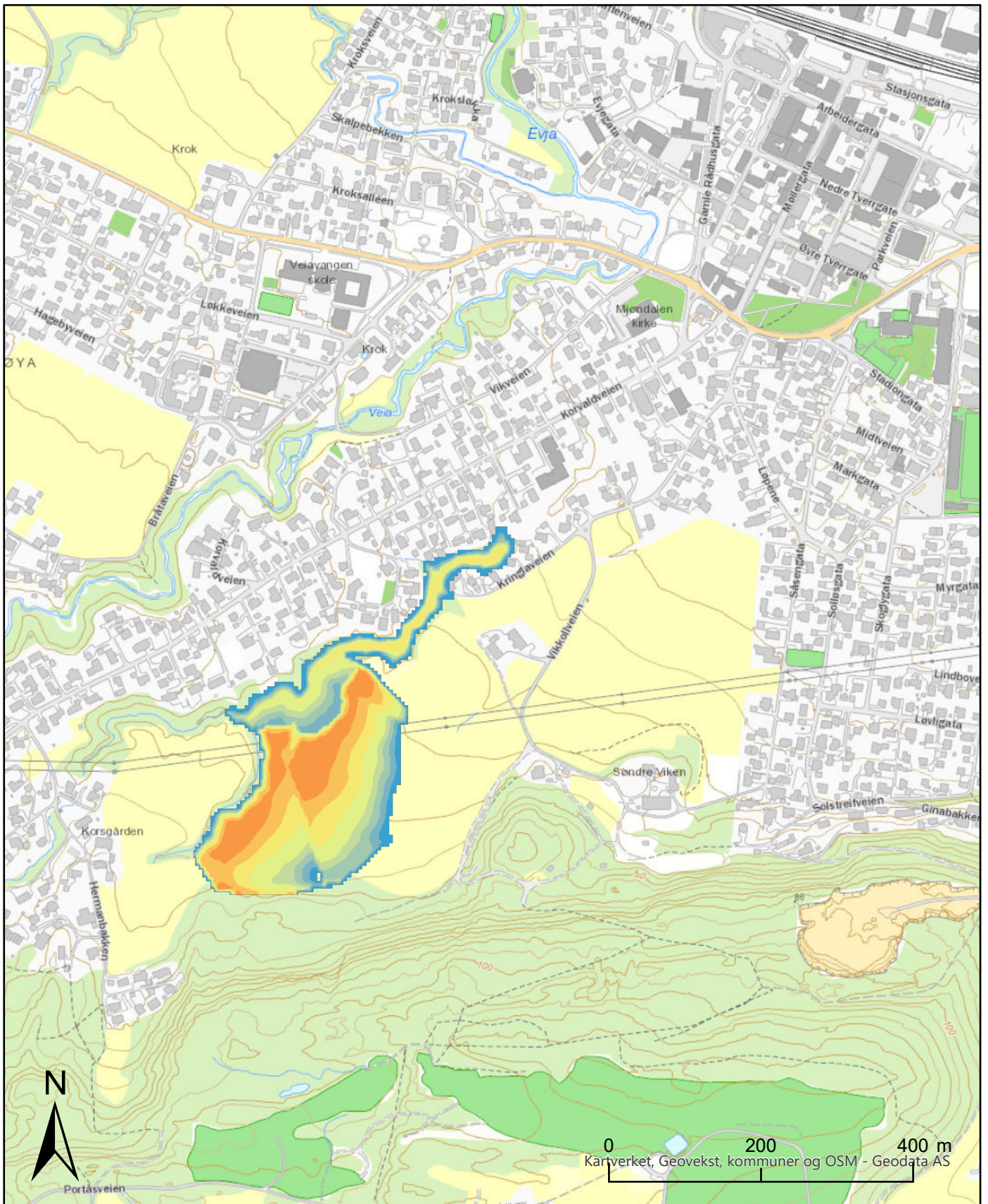
Flyte høyde (m)	Color	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Teal	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 120 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C17	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

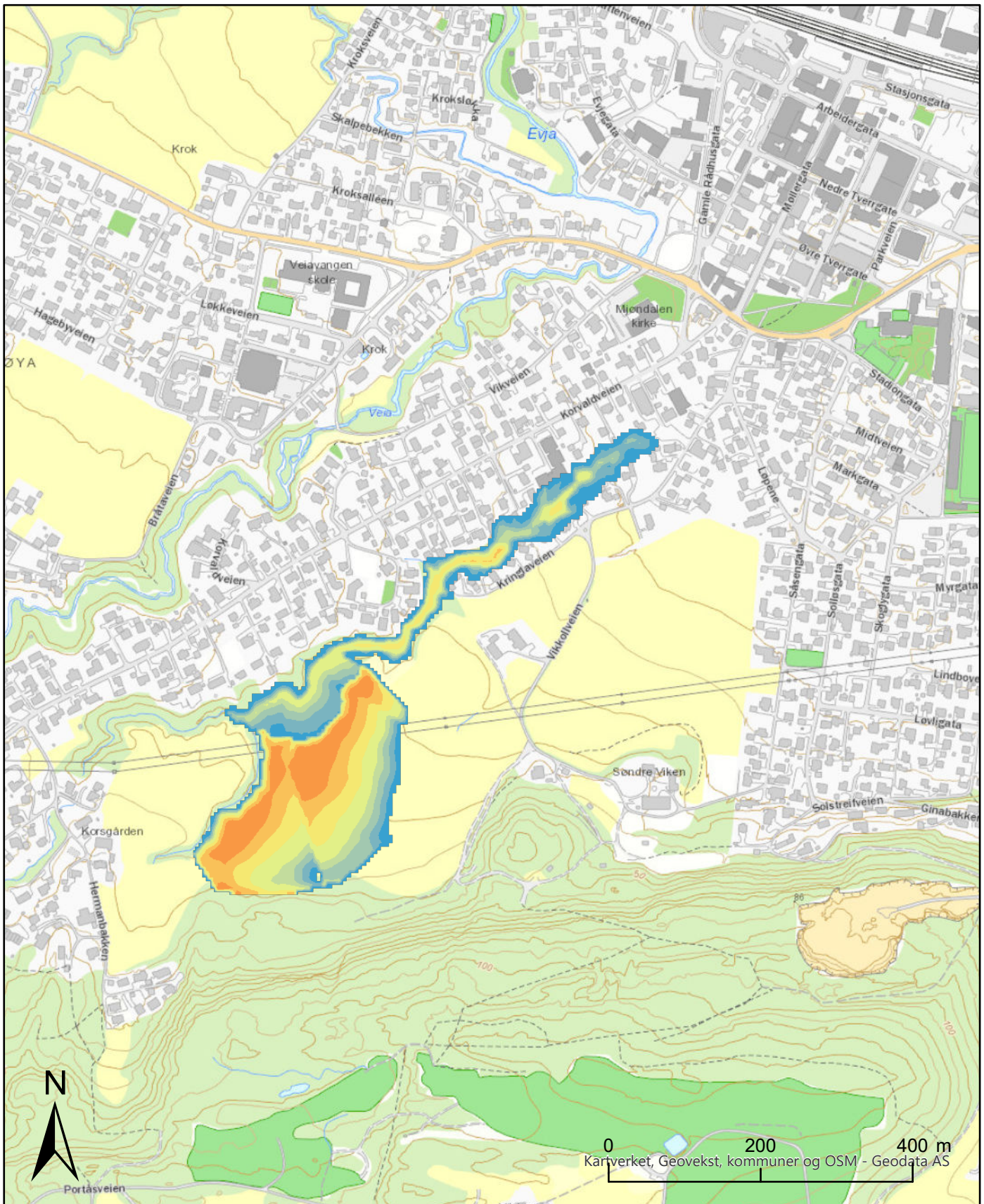
Flytehøyde (m)	Color	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Teal	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

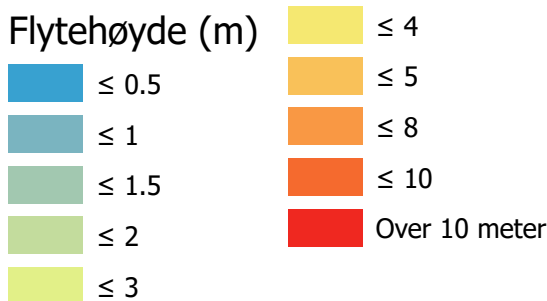
Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 300 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C18	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

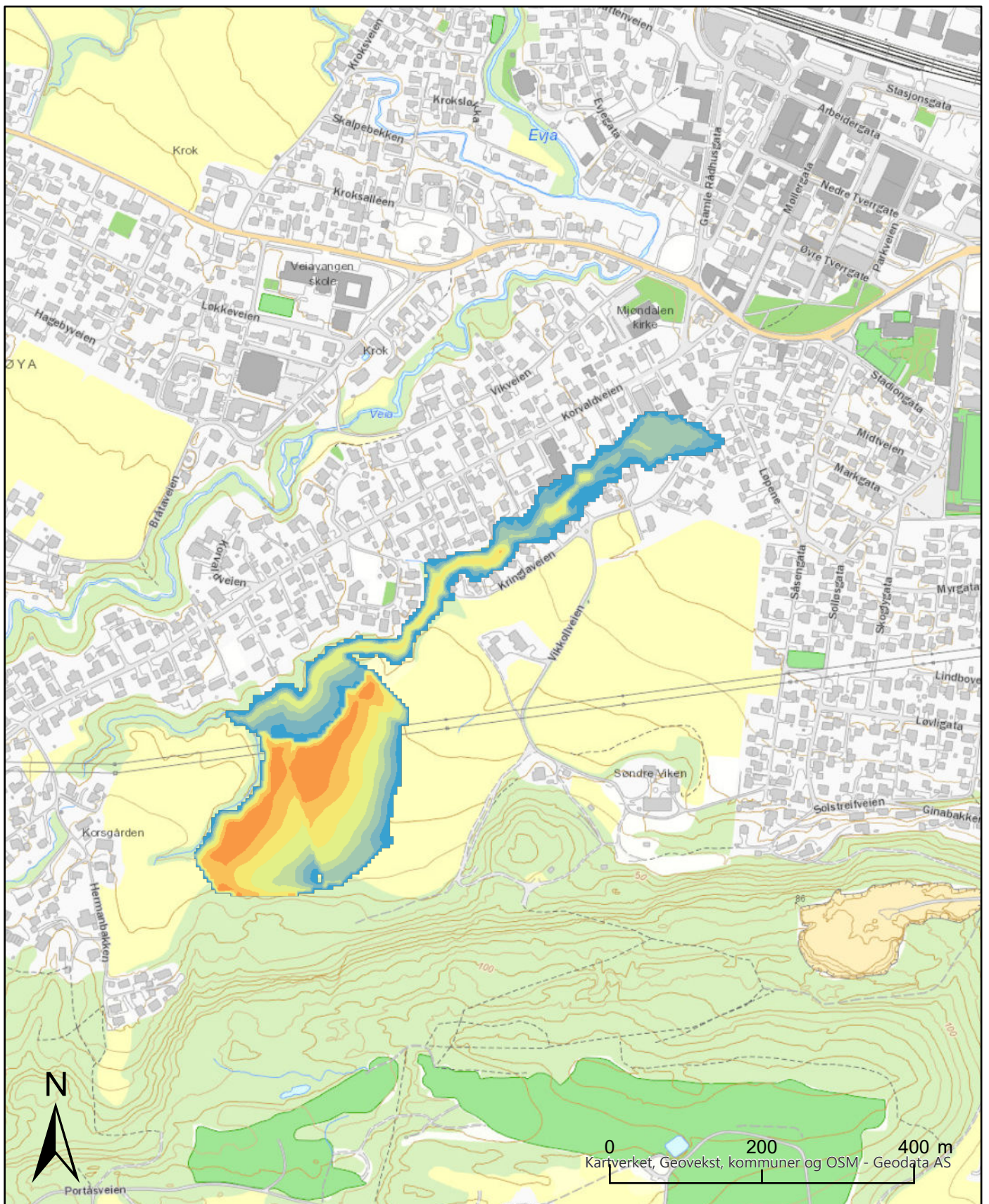


Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 900 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk		Kartprojeksjon	
A4 1:7 000		ETRS 1989 UTM Zone 33N	
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C19	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			



Tegnforklaring

Flyteheight (m)	Color	Value
≤ 0.5	Blue	≤ 4
≤ 1	Teal	≤ 5
≤ 1.5	Light Green	≤ 8
≤ 2	Green	≤ 10
≤ 3	Yellow-Green	Over 10 meter

Utløpsmodellering

Scenario 2: "Sannsynlig"

$T_{(y,0)} = 40 \text{ kPa}$, $t = 1200 \text{ s}$

Dato	Utført	Kontrollert	Godkjent
2020-10-19	ZL	KST	HHe
Original format og målestokk	Kartprojeksjon		
A4 1:7 000	ETRS 1989 UTM Zone 33N		
Prosjektnr.	Dokumentnr.	Kartrnr.	Rev.
20110297	02	C20	00
NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Postboks 3930 Ullevål Stadion, 0806 OSLO Sognsveien 72 Tlf: 22 02 30 00 Faks: 22 23 04 48 www.ngi.no			
			

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Modellering av utløp fra potensielt kvikkleireskred innenfor kvikkleiresone 2038 Vika		Dokumentnr./Document no. 20110297-02-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Region Sør	Dato/Date 2020-11-13
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract Oppdragsgiver / Client		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 0 /
Distribusjon/Distribution BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/Keywords Kvikkleire, naturfare, utløpsanalyser, BingClaw		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country Buskerud	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality Nedre Eiker	Felt navn/Field name
Sted/Location Kvikkleiresone 2038 Vika	Sted/Location
Kartblad/Map 033S	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: 32 Øst: 555928 Nord: 6623136	Koordinater/Coordinates Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns- kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter- disciplinary review by:
0	Originaldokument	2020-11-10 Zhongqiang Liu	2020-11-12 Håkon Heyerdahl		

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 13. november 2020	Prosjektleder/Project Manager Håkon Heyerdahl
--	---------------------------------------	---

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

