

09/2025
BERGEN KOMMUNE

RENERE HAVN BERGEN

GEOTEKNISK VURDERINGSRAPPORT – PÅVIRKNING
FRA UTLEGGINGSMASSER PÅ SJØBUNNEN I VÅGEN



09/2025
BERGEN KOMMUNE

RENERE HAVN BERGEN

GEOTEKNISK VURDERINGSRAPPORT – PÅVIRKNING FRA UTLEGGINGSMASSER PÅ SJØBUNNEN I VÅGEN

OPPDRAGSNR.	DOKUMENTNR.
A243166	A243166-2025-06

VERSJON	UTGIVELSESDATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET	KONTROLLERT	GODKJENT
1.0	29.09.25	RIG	SIBS	ALGN	AVSU

INNHOOLD

Sammendrag	8
1 Innledning	9
1.1 Planlagte tiltak	9
1.2 Målsetting	11
1.3 Tilgjengelig geoteknisk informasjon	11
1.4 Begreper og definisjoner	12
2 Grunnlag for vurderinger	13
2.1 Batymetri	13
2.2 Kvartærgeologisk kart	13
2.3 Grunnundersøkelser og grunnforhold	14
3 Geotekniske vurderinger for kulturminner	19
3.1 Materialelegenskaper	19
3.2 Statisk tilleggslast på sjøbunnen	21
3.3 Statisk tilleggslast under sjøbunnen	22
3.4 Setninger / kompresjon	23
3.5 Utleggingsmetode og dynamisk last på sjøbunnen	30
4 Erfaringer fra tildekking i Puddefjorden	32
5 Referanser	33

Sammendrag

Bergen kommune planlegger tiltak mot forurenset sjøbunn i Vågen. Tiltaket innebærer tildekking av sjøbunnen med rene masser i områder hvor det er påvist betydelig potensiale for funn av kulturminner. Som grunnlag for marinarkeologiske vurderinger av tildekkingens mulige påvirkning på kulturminner og kulturlag som befinner seg dypere i sjøbunnen, er det utført geotekniske vurderinger og beregninger av tildekkingens effekt på sjøbunn og løsmasser i Vågen.

Sjøbunnen i Vågen er generelt fast og har hovedbestanddel sand eller grus, og inneholder typisk under 35 % finstoff < 63 μm (silt og leire). Det øverste sedimentlaget i noen partier sentralt i Vågen innenfor terskelen er noe bløtere på grunn av noe høyere innhold av finstoff og organiske materiale.

Egenvekten for de ulike fraksjonene av knust stein som skal benyttes som tildekkingslag og erosjonssikring i inntil 60 cm tykkelse er lik (18-20 kN/m^3), mens betongmadrasser som skal benyttes i 10 cm tykkelse har noe høyere egenvekt (23-25 kN/m^3). I vann får tildekkingsmaterialene oppdrift, noe som reduserer tilleggslasten på sjøbunnen sammenliknet med tilsvarende tildekking på land. Tilleggslasten på sjøbunnen fra de planlagte tiltakene i Vågen er vurdert som svært lav og i intervallet 1,3-6 kN/m^2 . Til sammenlikning vil en person som står på en fot på land utøve ca. 6,5 ganger større tilleggslast (39 kN/m^2) enn det som det tykkeste tildekkingslaget (60 cm) vil utøve på sjøbunnen (6 kN/m^2).

Beregnete setninger er generelt små, og setninger vil i all hovedsak foregå i den øverste delen av sjøbunnen. Forventede setninger som følge av tildekkingens tilleggslast er estimert til 0-11 mm i de store områdene av Vågen der sjøbunnen er relativt fast. Typisk vil over 80 % av setninger i dette området skje i den øverste 0-0,5 meter av sjøbunnen. I enkelte bløtere områder sentralt i Vågen, spesielt i fordypninger innenfor terskelen, kan det forekomme noe større setninger, anslagsvis ca. 60 mm, men i disse bløteste områdene vil 100 % av setningene forekomme i det øverste bløte laget, typisk mellom 0-1,8 m under sjøbunnen.

Tildekkingsmassene i Vågen skal legges på sjøbunnen ved at massene synker gjennom vannsøylen, avgrenset av et nedføringsrør eller et utleggingshode. Tildekkingslaget legges først over et større areal. Deretter skal det legges ut et lag av grovere steinmasser på toppen av tildekkingslaget i erosjonsutsatte områder. Tilleggslasten av tildekkingen er så lav at det vurderes som neglisjerbart om tildekkingslaget legges ut i to omganger á 20 cm eller som et samtidig lag med 40 cm tykkelse.

Den dynamiske tilleggslasten som nedslaget til steinpartikler vil utøve på sjøbunnen i det tildekkingsmassene legges ut er beregnet til å ha innvirkning på de øvre 0-15 cm av sjøbunnen. Nedslaget til større stein som legges som erosjonssikring oppå tildekkingslaget vil bli dempet av tildekkingslaget som legges først, og utlegging av steinlaget vil derfor få minimal påvirkning på den opprinnelige sjøbunnen.

1 Innledning

Prosjektet Renere Havn Bergen, i regi av Bergen kommune, planlegger tiltak mot forurenset sjøbunn i Vågen (Figur 1-1). Det planlagte tiltaket medfører inngrep i sjøbunnen i hele Vågen der det er påvist betydelig potensiale for funn av kulturminner (Nøttveit og Wammer, 2010). Som del av prosjekteringen har prosjektet søkt Vestland fylkeskommune om dispensasjon fra kulturminneloven for sedimenttiltaket (COWI, 2022) (COWI, 2024a). Etter vurdering av søknaden har fylkeskommunen bedt om mer informasjon om hvordan tiltaket vil påvirke kulturminnene i Vågen (Vestland fylkeskommune, 2025).

Denne rapporten vurderer effekt av tildekkingslag på sjøbunn og løsmasser i Vågen. Rapporten danner grunnlag for marinarkeologiske vurderinger av mulig påvirkning på de ulike kulturminnene som befinner seg i sjøsedimentene.

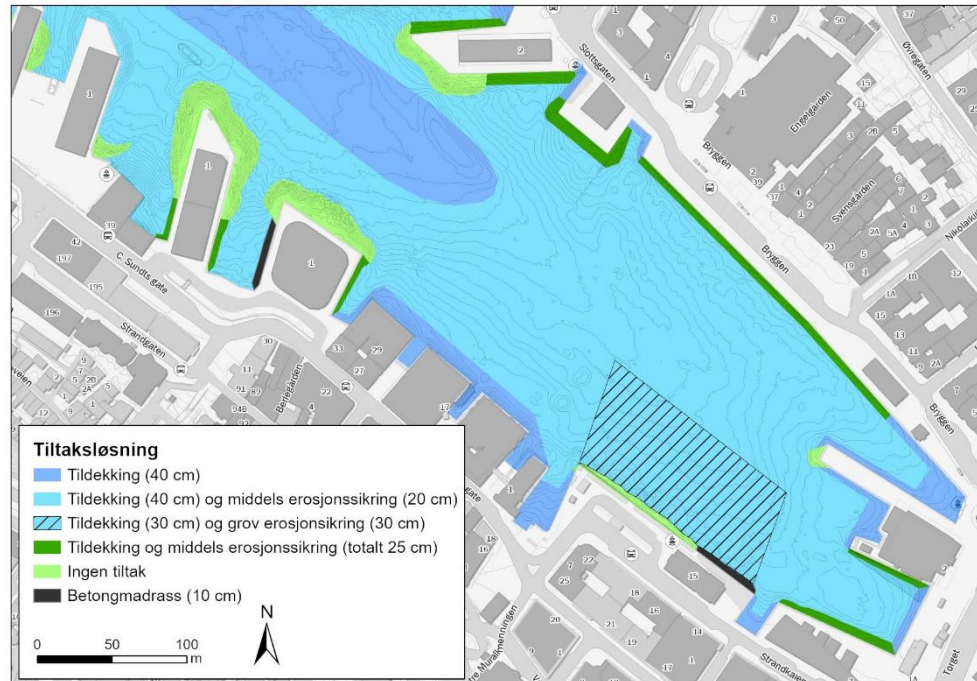


Figur 1-1 Oversiktskart med tiltaket markert med røde stiplede linjer, utklipp fra norgeskart.no (Kartverket)

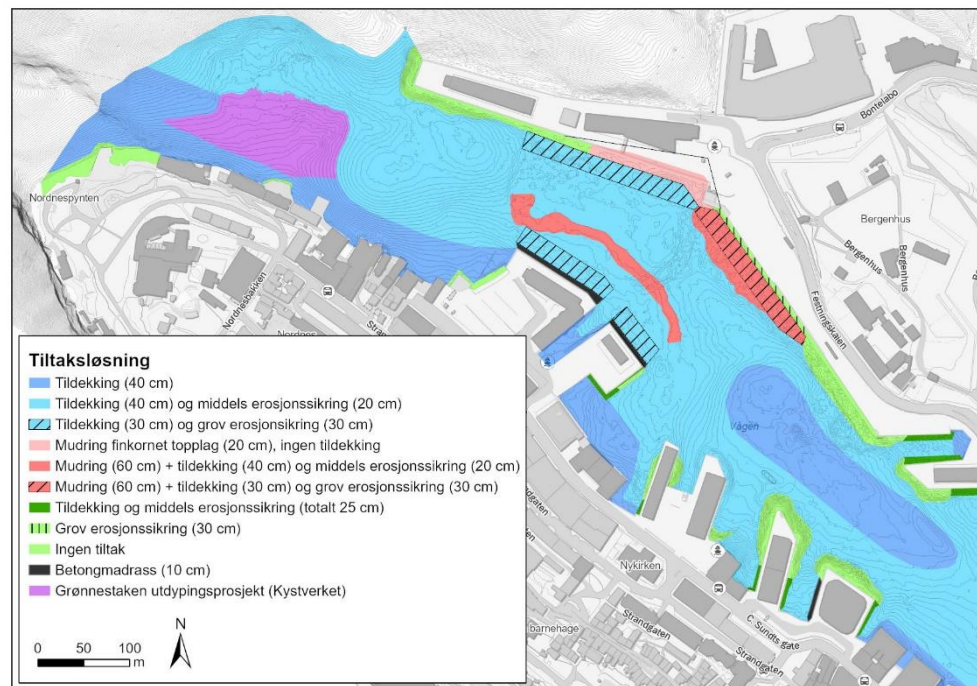
1.1 Planlagte tiltak

Forurensingen i sjøbunnen skal isoleres ved at et lag med rene masser legges over den eksisterende bunnen. Dette laget skal være inntil 40 cm tykt og bestå av knust berg med mye finstoff, sand, grus og mindre stein, med mesteparten av partiklene innenfor intervallet 0-64 mm. Dette vil være masser fra boring av jernbanetunnel gjennom Ulriken (TBM-masser) og/eller knuste masser fra et knuseverk. I områder der strøm fra båtpropeller er sterk, skal et ekstra lag med grovere stein på 20 cm legges oppå for å hindre at massene blir skylt bort. For å beholde tilstrekkelig seilingsdyp, må øvre del av sjøbunnen fjernes (mudres) i mindre områder før tildekking.

I noen få områder nær kaifronter skal det legges betongmadrasser med 10 cm tykkelse som kombinert tildekking og erosjonssikring. Figur 1-2 og Figur 1-3 viser en oversikt over de planlagte tiltakene i Vågen.



Figur 1-2 Kart over indre del av Vågen med planlagt tiltaksløsning. Dybdekoter med 0,5 m ekvidanse.



Figur 1-3 Kart over ytre del av Vågen med planlagt tiltaksløsning. Dybdekoter med 0,5 m ekvidanse.

1.2 Målsetting

Rapporten skal svare ut følgende spørsmål:

- > Last
 - *Hvilken tilleggslast vil tildekkingen medføre på sjøbunnen?*
- > Stabilitet og bæreevne
 - *Kan tilleggslasten fra tildekkingen forårsake ustabilitet og grunnbrudd i sjøbunnen?*
- > Lastfordeling
 - *Hvordan vil spenninger fra tilleggslasten fordele seg nedover i sjøbunnen?*
- > Setninger
 - *Er det forventet setninger i den underliggende sjøbunnen?*
 - *Hvor store setninger kan forventes ved ulike dyp i sjøbunnen?*
- > Utleggingsmetode
 - *Vil utlegging av massene i et eller flere samtidige lag ha betydning for underliggende sjøbunn?*
 - *Hvor stor hastighet vil utleggingsmassene ha når de treffer sjøbunnen og hvilken dynamisk last medfører dette?*

1.3 Tilgjengelig geoteknisk informasjon

Informasjon om geotekniske forhold er hentet fra NGUs geologiske kvartærgeologisk løsmassekart (NGU), høydedata (Kartverket), Nasjonal database for grunnundersøkelser (NADAG) (NGU - Norges geologiske undersøkelser), NGUs berggrunnskart (NGU - Norges geologiske undersøkelser) og tidligere utarbeidede rapporter knyttet til Renere havn Bergen prosjektet.

1.4 Begreper og definisjoner

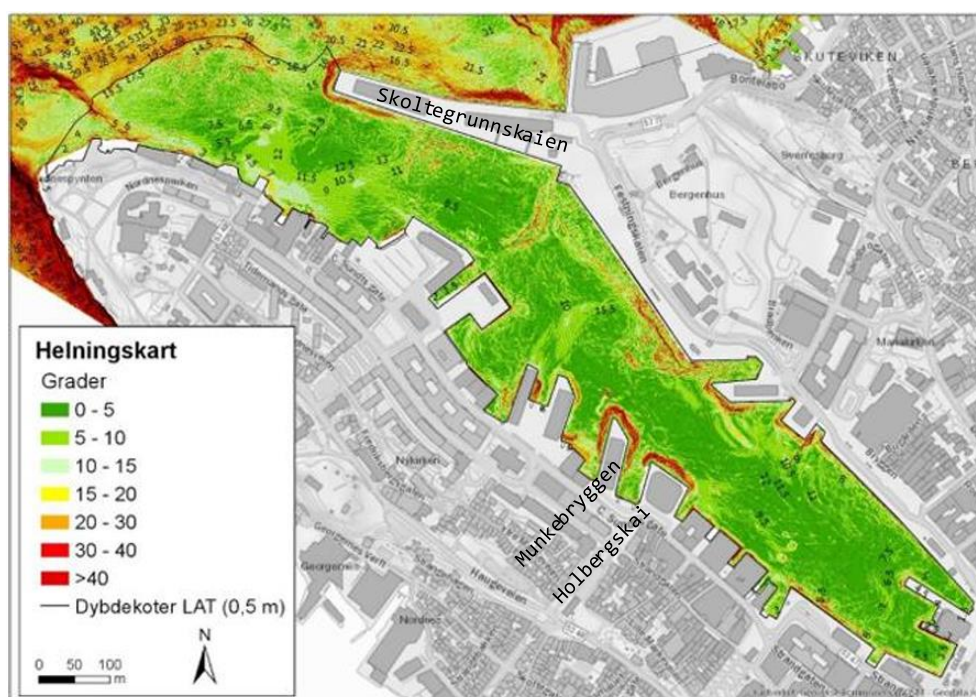
Følgende begreper er brukt i denne rapporten:

Begrep	Beskrivelse
Masse	Masse er et mål på hvor mye stoff et legeme inneholder, med enhet kilogram (kg).
Tyngdeakselerasjonen	Tyngdeakselerasjonen er den akselerasjonen som et legeme får dersom det fritt faller i et gravitasjonsfelt. Jordens gravitasjon har en gjennomsnittlig verdi på $9,81 \text{ m/s}^2$.
Vekt	Vekt er kraften som tyngdekraften utøver på en masse og beregnes som produktet av masse og tyngdeakselerasjonen, med enhet Newton (N). Derimot brukes vekt, i dagligtale, om det samme som masse.
Tilleggslast	Tilleggslast beregnes som vekt per areal og benevnes kN/m^2 .
Setninger	Den vertikale deformasjonen (nedadgående bevegelsen) av grunnen som følge av belastning.
Tyngdetetthet (egenvekt)	Vekt per volumenhet av et materiale, og benevnes kN/m^3 . Tyngdetetthet til vann er 10 kN/m^3 i denne rapporten.
Trykk	Vekt per areal, og benevnes kN/m^2 . Det samme som tilleggslast i denne rapporten.
Oppdrift	Oppdrift er den oppadrettet kraft en væske eller gass utøver på en gjenstand som er nedsenket i den. Oppdriften er lik vekten av væsken/gassen som fortrenses.
Stivhet	Stivhet er et mål på hvor mye motstand et materiale har mot deformasjon når den blir belastet. Altså: hvor mye kraft som trengs for å få en gitt forskyvning eller tøyning. Måles i kN/m^2 .

2 Grunnlag for vurderinger

2.1 Batymetri

Vågen er en 1,3 km lang terskelfjord, hvor en terskel med ca. 9 m vanndybde skiller det indre fjordbassenget fra de ytre delene av Vågen. Fjordens vanndybde varierer fra ca. 3 m ved de grunneste kaifrontene til ca. 17 meter i det dypeste bassenget rett innenfor terskelen. Størstedelen av sjøbunnen har under 5 grader helning, mens skråningene opp mot terskelen har hovedsakelig en helning mellom 5 og 10 grader, enkelte steder helning opp mot 15 grader, se Figur 2-1. Skråninger brattere enn 15 grader finnes i områdene langs flere kaifronter og særlig utenfor Holbergskaien, Munkebryggen og Skoltegrunnskaien.



Figur 2-1 Helningskart for sjøbunnen i Vågen, basert på dybdedata fra Kystverket innhentet 2016-2018.

2.2 Kvartærgeologisk kart

NGUs løsmassekart, ref. (NGU), indikerer at det øverste laget i jordprofilen rundt Vågen består av fyllmasse. Fyllmasser kan typisk være teglstein, stein, grus, rester av treverk etc. Kartet viser også lysegrønne områder som indikerer tynn morene, se kvartærgeologisk kart i Figur 2-2. For å få kjennskap til grunnens

egenskaper i dybden er det nødvendig med stedspesifikke geotekniske grunnundersøkelser som er beskrevet i påfølgende kapittel.



Figur 2-2 Kvartærgeologisk kart som indikerer fyllmasser som øverste jordlag rundt Vågen.

2.3 Grunnundersøkelser og grunnforhold

En rekke grunnundersøkelser er gjennomført i forbindelse med Renere Havn Bergen prosjektet i Vågen (COWI, 2024b), Puddefjorden (Multiconsult, datert 25.september 2015.) og Store Lungegårdsvann (Cowi, 2023).

COWIs rapport fra 2024 (COWI, 2024b) beskriver grunnundersøkelser og kjerneprøver fra Vågen, tatt opp i flere omganger i perioden fra 1992 til 2023. Figur 2-3 viser hvor det er tatt opp kjerneprøver i Vågen. Uttaket av kjerneprøver i Vågen ble utført av Institutt for geografi ved Universitetet i Bergen i mars 2010. Kjernene ble tatt ved hjelp av stempelkjernetaker fra flåte. Det ble benyttet PVC-rør med diameter 110 mm og sedimentfanger i bunnen. Analyser ble utført ved akkreditert laboratorium. Alle prøvene ble analysert for blant annet innhold av silt (<63 µm) og leire (<2 µm). Mengden silt, og leire er vist i Figur 2-4. En typisk sedimentprøve har leirinnhold under 5 prosent (vekt), mens typisk finstoffinnhold (silt og leire) er under 35 prosent (vekt). Konklusjonen blir at materialet inneholder en god del silt, men hovedbestanddel er sand eller grus.



Figur 2-3 Oversikt over punkter i Vågen hvor det er tatt kjerneprøver (Cowi, 2012).

Prøve	< 63 μm (% (v/v) dv/)	< 2 μm (% (v/v) dv/)
K3	26,80	5,50
K5	8,20	1,90
K10	10,90	3,50
K15	21,50	3,90
K16	27,10	0,50
K18	3,30	1,00
K20	22,70	4,20
K22	28,30	4,90
K23	28,60	3,70
K25	32,90	5,30
K27	29,50	4,30
K28	27,20	5,20
K30	25,20	3,70
K31	25,20	3,50
K33	30,70	4,20
K35	31,50	2,70
K36	33,40	4,20
K38	42,00	11,60
K40	24,00	4,20
K45	38,30	4,90
K46	22,20	2,20
K48	13,90	1,90
K50	31,50	2,40
K51	22,40	4,30

Figur 2-4 Resultater fra kornfordelingsanalyser på kjerneprøver i de øverste 10 cm av Vågen (Cowi, 2012).

I 2024 gjennomførte COWI nye supplerende grunnundersøkelser i Vågen (COWI, 2024c). Grønne punkter i Figur 2-5 viser hvor i Vågen undersøkelsene er gjort. Feltarbeidet omfattet:

- 34 stk. totalsonderinger
- 10 stk. prøveserier

I tillegg til forsøk i felt ble laboratorieundersøkelser gjennomført:

- 5 stk. rutineundersøkelser på sylinderprøver av leire.
Rutineundersøkelser av sylinderprøvene omfatter visuell beskrivelse av prøvemateriale m.m.
- 3 stk. rutineundersøkelser på sylinderprøver av sand.
Rutineundersøkelser av sylinderprøvene omfatter 3 stk. vanninnhold og bestemmelse av densitet.
- 15 stk. rutineundersøkelser på poseprøve. Rutineundersøkelser av poseprøvene omfatter visuell beskrivelse av prøvemateriale.
- 15 stk. vanninnhold på poseprøve.
- 4 stk. kornfordelingsundersøkelse ved kombianalyse
- 10 stk. organisk innhold ved gløding

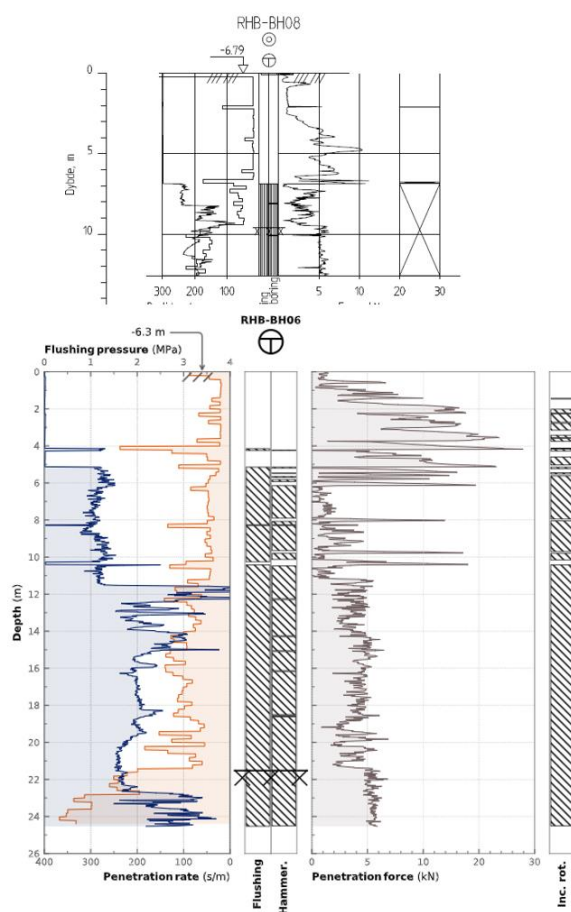
To totalsonderinger som er representative for grunnforhold nærme kaiene er vist i Figur 2-6, mens to totalsonderinger fra fordypninger innenfor terskelen er vist i Figur 2-7. Sonderinger nærme kaiene viser middels til høy boremotstand som tyder på middels til fast grus og sand med noe silt, mens sonderingen i fordypninger innenfor terskelen indikerer mer finstoffinnhold enn det som er målt i kjerneprøvene beskrevet ovenfor.

Konklusjonen er at grunnforholdene generelt er middels til faste nærme kaiene, i skråninger, på terskelen og i den ytre delen av Vågen. Kjerneprøver fra hele Vågen viser at sedimentene inneholder typisk mindre enn 35 % finstoff (silt og leire) og derfor hovedbestanddel sand og grus. Enkelte partier, særlig i fordypningen innenfor terskelen, oppleves sedimentene derimot som myke og mudderaktige, og beskrives best som organisk materiale.



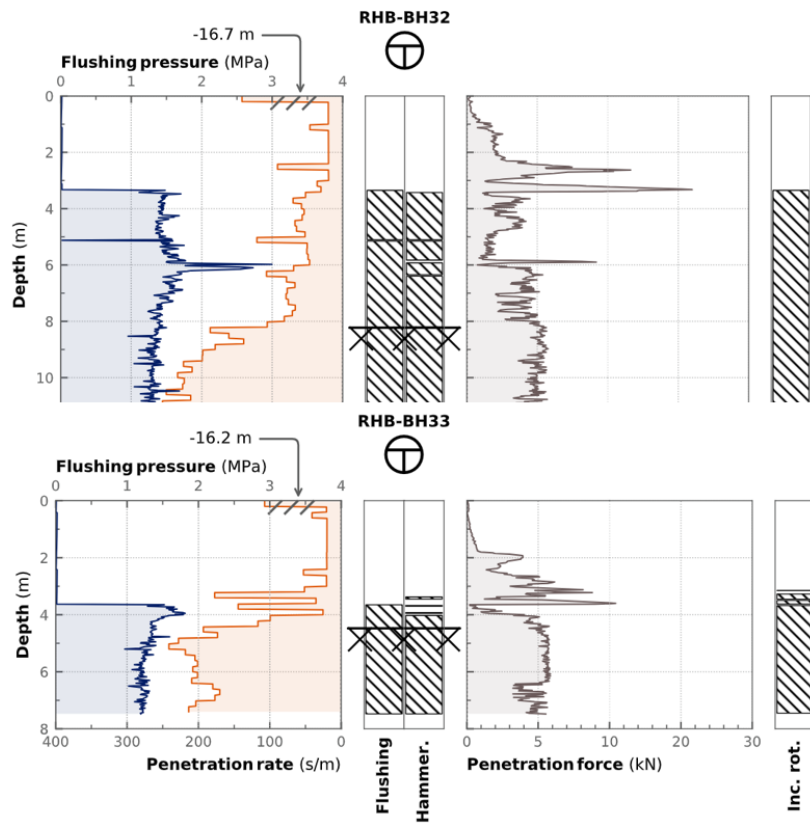
Figur 2-5 Geotekniske grunnundersøkelser gjort av COWI i 2024 (COWI, 2024c).

Nærme kaiene

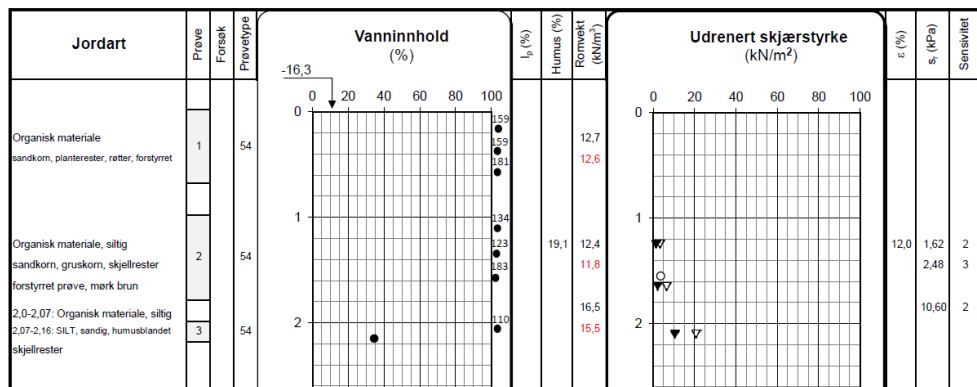


Figur 2-6 Representative totalsonderinger nærme kaiene i Vågen.

Fordypninger innenfor terskelen



Figur 2-7 Totalsonderinger i fordypninger innenfor terskelen, punkt RHB-BH32 øverst og RHB-BH33 nederst.



Figur 2-8 Borehullslogg fra RHB-BH33 som viser organisk materiale.

3 Geotekniske vurderinger for kulturminner

3.1 Materialegenskaper

For å kunne regne på og vurdere problemstillingen er det nødvendig med noen materialegenskaper. Tyngdetetthet og stivhet for noen utvalgte materialer er oppsummert i tabellen under, Tabell 3-1. Disse materialene oppfører seg veldig forskjellig, men for å illustrere forskjell i stivhet er det tatt med typiske stivhetsverdier for de forskjellige materialene. For løsmasser er det ikke en linear sammenheng mellom belastning og forskyvning slik som det typisk er for stål, betong og keramikk.

I tabellen under er det gitt et intervall for tyngdetettheten til tildekkings- og erosjonssikringslag (løsmassene). Dette intervallet er gyldig for alle løsmasser som kan brukes til dette formålet.

I vann opplever alle materialer oppdrift, det vil si at materialer som er lettere enn vann (lavere tyngdetetthet) vil flyte oppover og ikke gi noe tilleggslast på sjøbunnen, de når aldri sjøbunnen. Eksempler på materialer med lavere tyngdetetthet enn vann kan være treverk og plast. Materialer som er tyngre enn vann, som vil gi tilleggslast på sjøbunnen, kan være steiner og metaller. Disse materialene vil også oppleve en oppdrift tilsvarende vannets tyngdetetthet som kommer til fratrekk fra materialenes tyngdetetthet. I denne rapporten er tyngdetettheten til vann satt til 10 kN/m^3 .

Tabell 3-1 Tyngdetetthet og stivhet for noen utvalgte materialer (Statens vegvesen , 2022).

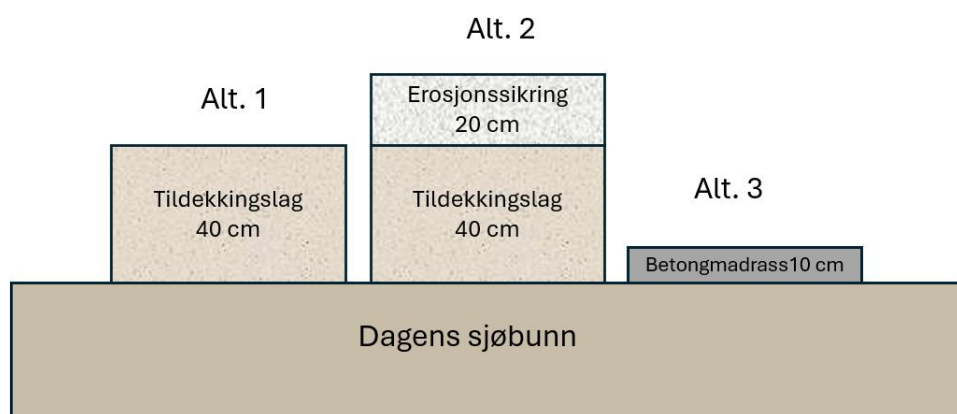
Beskrivelse	Kornstørrelse og fordeling	Egenvekt/ tyngdetetthet	Stivhet
Tildeckingslag	Knust berg med mye finstoff, sand, grus og mindre stein, med mesteparten av kornfraksjonen innenfor intervallet 0-64 mm. Inkluderer både masser produsert av tunnelboremaskin (TBM) og i steinknuseverk.	18-20 kN/m ³	10-60 MN/m ²
Finere erosjonssikring	Grovkornet masse med kornstørrelser 20-120 mm	18-20 kN/m ³	10-60 MN/m ²
Grovere erosjonssikring	Grovkornet masse med kornstørrelser 50-200 mm	18-20 kN/m ³	10-60 MN/m ²
Tildekking/ erosjonssikring	Betongmadrass	23-25 kN/m ³	25-40 GN/m ²
Mulig historisk gjenstand	Keramikk	18-23 kN/m ³	50-400 GN/m ²
Mulig historisk gjenstand	Vannmettet treverk	9-11 kN/m ³	10-20 GN/m ² / 0,3-1 GN/m ² *

**Høye verdier parallelt med fiberretning, lave verdier normalt på fiberretning. Disse verdiene kan benyttes i dimensjonering av trekonstruksjoner og er generelle.*

3.2 Statisk tilleggslast på sjøbunnen

Basert på planene for tiltak i Vågen er følgende tre scenarioer overordnet vurdert, se tiltakskart i Figur 1-2 og Figur 1-3 og illustrasjon av scenarioer i Figur 3-1.

- 1 Det legges 40 cm tildekkingslag.
- 2 Det legges 40 cm tildekkingslag etterfulgt av 20 cm erosjonssikring.
- 3 Det legges betongmadrass med tykkelse 10 cm som kombinert tildekking og erosjonssikring.



Figur 3-1 Oversikt over de tre scenarioene som er vurdert.

For de tre scenarioene er statisk tilleggslast på sjøbunnen beregnet og oppsummert i Tabell 3-2. Ordet statisk betyr at det er en konstant last i denne sammenheng, i motsetning til en dynamisk last som er beskrevet i Kap. 3.5. Beregningsgang er som følger.

$$\text{Materialvekt} = \text{tykkelse} \times \text{tyngdetetthet til utleggingsmassene}$$

Materialvekt er vekten av materialet i luft. Under vann virker oppdriften, det vil si at materialer som er lettere enn vann vil flyte, mens materialer som er tyngre enn vann vil synke. Eller sagt på en annen måte, materiale som er lettere enn vann vil ikke gi tilleggslast på sjøbunnen. Oppdriften beregnes som følger.

$$\text{Oppdrift} = \text{tykkelse} \times \text{tyngdetetthet til vann}$$

Deretter beregnes tilleggslast på sjøbunnen fra materialvekt og oppdrift som følger.

$$\text{Tilleggslast på sjøbunnen} = \text{materialvekt} - \text{oppdrift}$$

Tabell 3-2 Beregning av tilleggslast på sjøbunnen fra tildekking og erosjonssikring.

	Alternativ 1 (tildekkingslag)	Alternativ 2 (tildekking + erosjon)	Alternativ 3 (betongmadrass)
Tykkelse	0,4 m	0,6 m	0,1 m
Tyngdetetthet	18 – 20 kN/m ³	18 – 20 kN/m ³	23 – 25 kN/m ³ *
Materialvekt	7,2 – 8,0 kN/m ²	10,8 – 12,0 kN/m ²	2,3 – 2,5 kN/m ²
Oppdrift	4 kN/m ²	6 kN/m ²	1 kN/m ²
Tilleggslast på sjøbunnen	3,2-4,0 kN/m²	4,8 – 6,0 kN/m²	1,3 – 1,5 kN/m²

*kN/m³ kan gjøres om til tonn/m³ ved å dele på tyngdeakselerasjon (9,81 m/s²)

Resultatene i Tabell 3-2 viser at tilleggslasten fra tildekkings- og erosjonssikringslag er små og estimert til å ligge mellom 1,3 og 6,0 kN/m².

For å sette tallene i tabellen i perspektiv, kan man vurdere følgende scenario. Et menneske som veier 100 kg står på ett ben med fotareal 25 cm * 10 cm, på land. Mennesket vil påføre underlaget tilleggslast på:

$$100 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 / (0,25 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}) = 39 \text{ kN/m}^2.$$

Tilleggslasten fra tildekking i Vågen, som beregnes til å være i intervallet 1,3 til 6 kN/m², vurderes som marginal.

Forskjellen mellom å legge ut 20 cm og 40 cm med masser er beregnet til å være mellom 1,6 og 2,0 kN/m². Dette er små forskjeller og vurderes som neglisjerbare med tanke på å legge ut tildekkingslaget i to omganger á 20 cm eller som et samlet lag med 40 cm tykkelse.

3.3 Statisk tilleggslast under sjøbunnen

Tilleggslast fra tildekkings- og erosjonssikringslag på sjøbunnen i Vågen er vurdert i Kap. 3.2. Dette kapittelet handler om tilleggslast under sjøbunnen, altså hvordan tilleggslasten på sjøbunnen fordeles nedover i massene under.

Hvordan tilleggslasten fordeles nedover i massene under sjøbunnen avhenger i stor grad av hvilket areal massene legges ut over, bredde B og lengde L. Dybdeintervall som påvirkes av tilleggslasten blir større desto større areal massene legges ut over. Ta for eksempel en tilleggslast som fordeles ut over et uendelig stort areal, $B \rightarrow \infty, L \rightarrow \infty$. Da vil tilleggslasten medføre tilleggslast i en uendelig stor dybde. Derimot kan man se for seg at man legger ut masser i en uendelig lang stripe ($L \rightarrow \infty$), da vil dybdeintervall som påvirkes være i størrelsesorden tre ganger bredden til stripen. For å illustrere dette er det tatt

med en figur som viser dybdeintervall som påvirkes av tilleggslast på sjøbunnen, Figur 3-2. Figuren har symboler som følger.

Δp = Tilleggslast under sjøbunnen

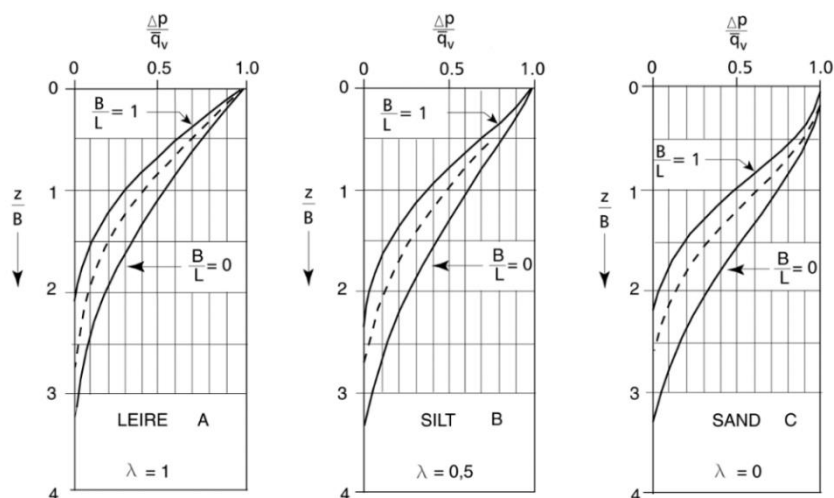
q_v = Tilleggslast på sjøbunnen, se scenarioer fra Kap. 3.2

z = Dybde under sjøbunnen

B = Bredde fylling

L = Lengde fylling

I tillegg til observasjonene beskrevet over viser figuren under at et kvadratisk areal får et typisk dybdeintervall som påvirkes på to ganger bredden på fyllingen.



Figur 3-2 Kurve for spenningsfordeling av ulike materialer fra venstre leire, silt og sand, ref. (Statens vegvesen, 2022).

Hvordan tilleggslast på sjøbunnen i Vågen påvirker underliggende sediment i form av økt last (spenning) er beskrevet i dette kapittel. Det kan konkluderes med at dybdeintervall som påvirkes av tildekking og erosjonssikring bli større og større desto mer av utleggingen som gjennomføres. Konsekvens av tilleggslast på sjøbunnen, som sprer seg i massene under sjøbunnen, er at massene setter seg, massene blir komprimert, på samme måte som et gruslag som komprimeres med vibrovals. Det at det forekommer en tilleggslast, som er lav for Vågen, betyr at konsekvensene av lasten blir lave. Setninger, altså konsekvens av tilleggslast, også kalt kompresjon, behandles i Kap. 3.4 under.

3.4 Setninger / kompresjon

Statisk tilleggslast fra utleggingsmasser på sjøbunnen i Vågen vil føre til at massene under komprimeres, vi sier at massene setter seg. Hvor mye massene setter seg kaller vi setninger. Hvor mye massene setter seg avhenger hovedsakelig av hvor stor tilleggslasten er, og hvor stive massene under sjøbunnen er. Hvor fort massene setter seg avhenger hovedsakelig av hvor fort vann kan strømme gjennom massene og massenes stivhet. Friksjonsmasser som

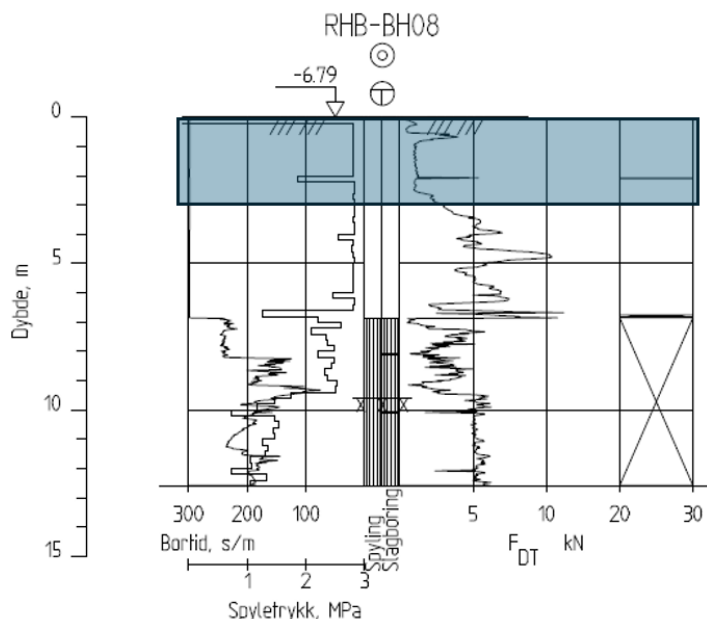
sand, grus og sandig silt setter seg raskt etter at tilleggslasten er påført, mens bløt leire vil sette seg over tid.

3.4.1 Setningsestimat nr. 1 – sand og grus nærme kaiene

For å estimere størrelsen på sjøbunnssetningen der hvor det er middels til fast sand og grus er det tatt utgangspunkt i profil basert på totalsondering RHB-BH08, se geoteknisk datarapport (COWI, 2024c). Totalsonderingens plassering er vist i Figur 3-3 og sonderingsprofil i Figur 3-4, det vil si boremotstand. De øverste 2 til 3 meterne viser lavere boremotstand enn lenger ned i jordprofilet. Basert på lav tilleggslast på 6 kN/m² og generelt faste friksjonsmasser, spesielt under 2-3 m under sjøbunnen må det antas at dybdeintervall hvor setninger forekommer er begrenset til de øverste 3 m under sjøbunnen. Denne sonderingen er tatt med som et ytterpunkt i Vågen og representerer «worst case scenario» for områder nærme kaifrontene.

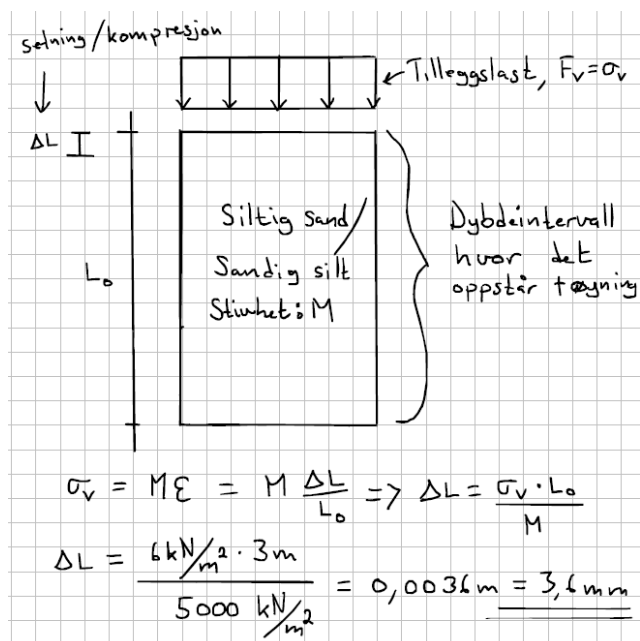


Figur 3-3 Plassering av borpunkt RHB-BH08, utklipp fra borplan i Field Manager



Figur 3-4 Totalsondering som viser tre meter med løst lagret sand/silt.

Figur 3-5 viser beregning for setninger, altså hvor mye materialet komprimeres. Som nevnt over kan det antas at setningene forekommer i de øverste 3 m under sjøbunnen. For siltig sand kan det være rimelig å anta en stivhet (ødometermodul) på 5000 kN/m². Disse parameterne i kombinasjon med tilleggslast på 6 kN/m² fører til en estimert setning på 3,6 mm. Dette må leses som et øvre estimat på setninger nærme kaifrontene.



Figur 3-5 Setningsberegning for myk oppførsel.

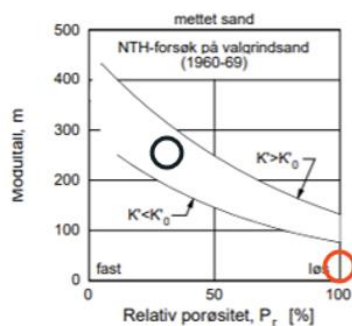
3.4.2 Setningsestimat nr. 2 – kornfordeling og sannsynlighetsberegning

Det er samlet inn et betydelig antall prøver fra sjøbunnen i Vågen, spesielt fra 0 til 1 m under sjøbunnen. Basert på gjennomgang av kornstørrelser i dette dybdeintervallet kan det konkluderes følgende:

- > Mengde leirpartikler er ofte lavere enn 5 % (vekt)
- > Mengde finstoff (silt- og leirpartikler) er ofte lavere enn 35 % (vekt)

Basert på denne informasjonen må det antas at setninger / kompresjon foregår tilnærmet med en gang massene legges ut på sjøbunnen og at hovedbestanddel i materialet er sand og grus.

Basert på dette er det gjort en sannsynlighetsberegning for setningene. Det er tatt utgangspunkt i erfaringstall for stivhet som vist i Figur 3-6. Parametere som er brukt i beregningen er vist i Tabell 3-3.



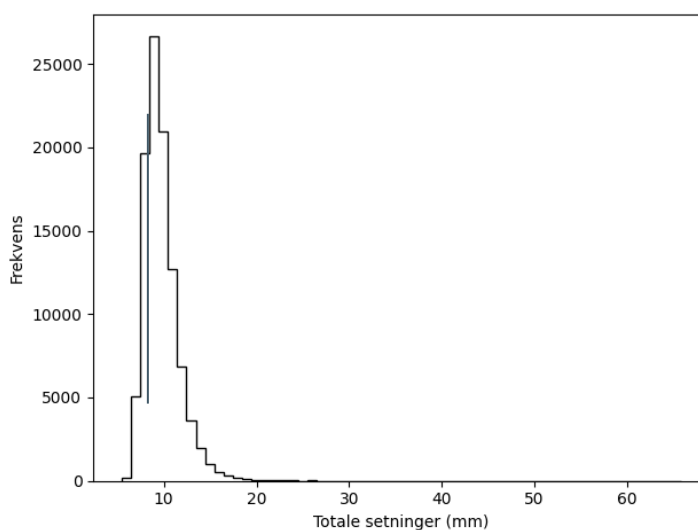
Figur 3-6 Mulige modultall som funksjon av relativ porøsitet. Oransje sirkel representerer løst lagret sand.

Tabell 3-3 Antatte materialparametere for Vågen, for estimat av setninger.

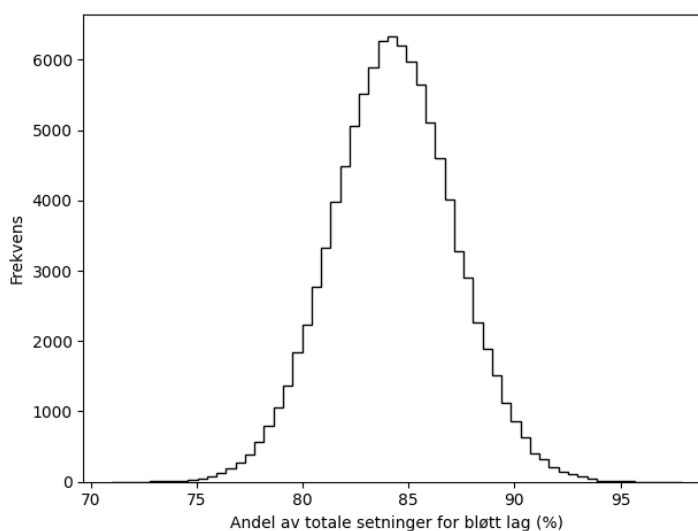
Lag	Tykkelse	Tyngdetetthet	Modultall (gj.snitt)	Modultall (standardavvik)
Løst lagret sand og grus med finstoff	50 cm	15 kN/m ³	20	4
Middels til fast sand og grus uten finstoff	250 cm	19 kN/m ³	250	20

Figur 3-7 og Figur 3-8 viser resultater fra Monte Carlo analyse med 100 000 simuleringer. Figurene er histogram og viser hvor ofte man får et spesifikt resultat (frekvens). Figur 3-7 viser hvor ofte man beregner en spesifikk total setning, for eksempel viser figuren at de fleste av de 100 000 simuleringene gir totalsetning under 11 mm. Samtidig viser figuren at man også kan få høyere setninger, men at sannsynligheten er lav.

Figur 3-8 viser andelen setninger som forekommer i det øverste laget, som prosentandel. Figuren viser at mellom 80 og 90 % av setningen forekommer i det bløtere topplaget med de antatte parameterne i tabell over.



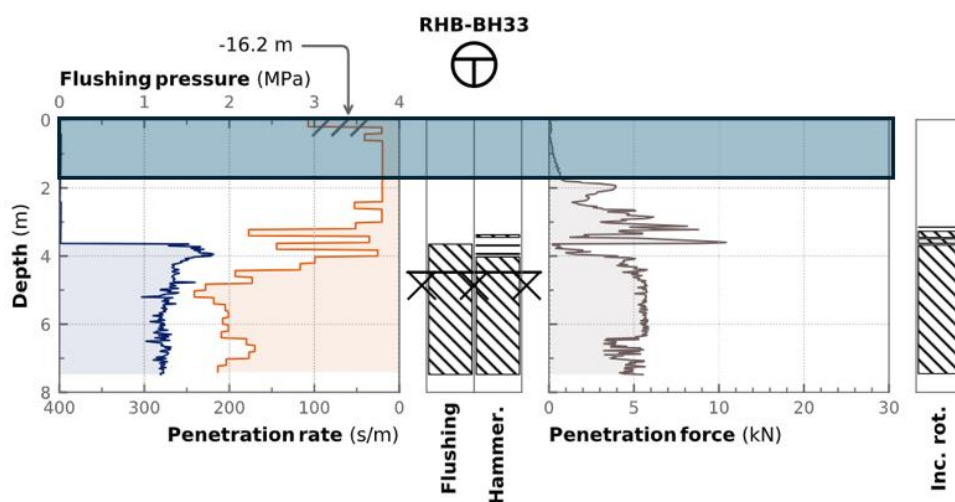
Figur 3-7 Estimerte setninger fra Monte Carlo analyse med 100 000 simuleringer.



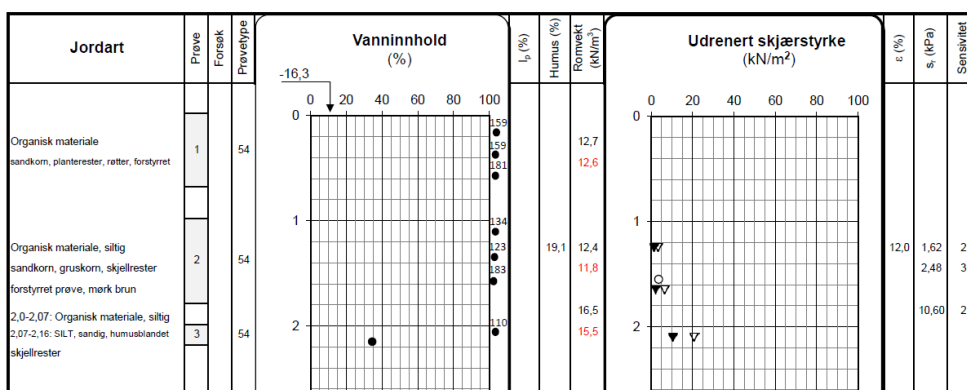
Figur 3-8 Andel av totale setning som forekommer i det bløte topplaget med tykkelse 50 cm.

3.4.3 Setningsestimat nr. 3 – fordypninger innenfor terskelen

I de dypeste områdene av Vågen, det vil si fordypningene innenfor terskelen, viser grunnundersøkelser og erfaring at det finnes materiale som best beskrives som organisk. Dette er et lag som noen beskriver som bløt gytje. I disse fordypningene skal det ikke benyttes erosjonsmasser, derfor blir maksimal tilleggslast på sjøbunnen 4 kN/m². Det er tatt utgangspunkt i grunnforhold som vist gjennom totalsondering i Figur 3-9 og laboratorieforsøk vist i Figur 3-10.

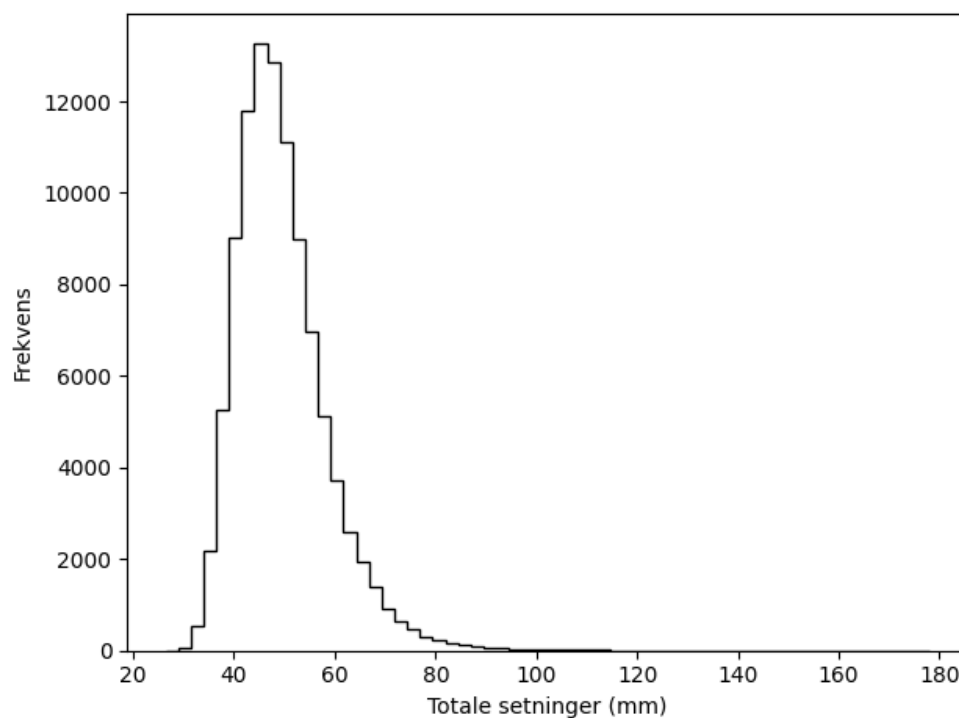


Figur 3-9 Totalsondering i fordypning innenfor terskelen, punkt RHB-BH33.

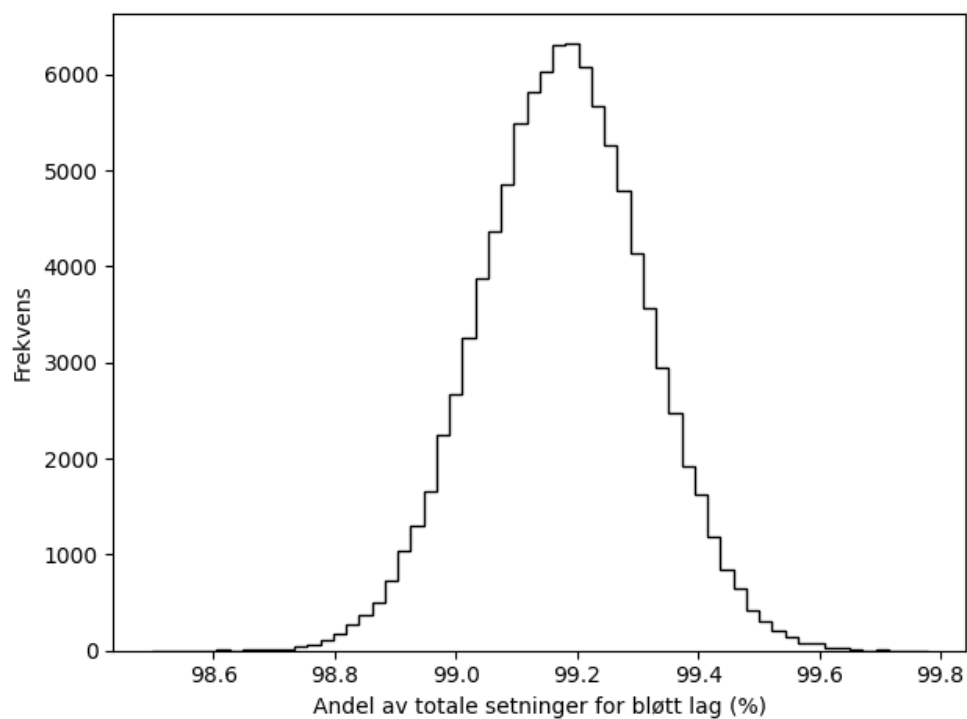


Figur 3-10 Laboratorieforsøk i fordypning innenfor terskelen, punkt RHB-BH33.

For setninger i disse områdene er det antatt modultall for organisk topplag på 6 og variasjonskoeffisient 16 %. For løsmasselag under organisk topplag er det antatt samme parametere som i Tabell 3-3. Figur 3-11 og Figur 3-12 viser resultater fra analysene og viser at sannsynlighet for å få større setninger enn 60 mm er lav. Samtidig viser analysene at all setning vil foregå i det bløte organiske laget.



Figur 3-11 Estimerte setninger fra Monte Carlo analyse med 100 000 simuleringer.



Figur 3-12 Andel av total setning som forekommer i det bløte organiske topplaget med tykkelse 180 cm.

3.4.4 Konklusjoner

Det er gjort en vurdering av setninger, altså hvor mye massene komprimeres som følge av ekstra last fra tildekking- og erosjonssikring i Vågen. For områder nærme kaifrontene er setningene estimert til i størrelsesorden 0-4 mm. For sentrale deler av Vågen utenom fordypninger innenfor terskelen forventes det, basert på beregningene at setningene blir i størrelsesorden 11 mm. Analysene avviser ikke at man kan oppleve høyere setninger, men at det er lav sannsynlighet for setninger større enn 11 mm. Fordypningene innenfor terskelen er også vurdert med tanke på setninger og her kan det konkluderes med at sannsynlighet for å få setninger over 60 mm er lav.

Alle setningsestimater viser at setningene i all hovedsak foregår i et bløtere topplag der hvor det finnes. Basert på gjennomgang av grunnundersøkelsene kan det generelt antas at setningene vil fordele seg fra sjøbunnen og ned til 3 m under sjøbunnen. Størrelse på setningene 3 m under sjøbunnen er 0. Det forventes at over 50 prosent av setning skjer mellom sjøbunnen og 1 m under sjøbunnen.

3.5 Utleggingsmetode og dynamisk last på sjøbunnen

Det finnes flere metoder for utlegging av løsmasser på sjøbunnen. Plassering av tildekkingsmasser på sjøbunnen kan gjøres ved hjelp av forskjellige type utstyr, og tildekkingslaget kan legges ut i et tykt eller flere tynne lag.

Valg av metode må tilpasses lokale forhold og ta hensyn til type sjøbunn, helningsforhold, type tildekkingsmasser som skal benyttes, vanddyp, tilkomst, kapasitet, risiko for utslipp av mikroplast eller kjemikalier og tilpasning til annen aktivitet i området.

Ofte er det opp til entreprenør å tilby utstyr som tilfredsstillende en funksjonsbeskrivelse for tiltaket som skal gjennomføres. Ved tildekking av forurenset sjøbunn er det alltid et krav i funksjonsbeskrivelsen at massene skal plasseres kontrollert på sjøbunnen for å hindre oppvirvling og spredning av forurensning i anleggsfasen og av hensyn til eventuelle objekter på sjøbunnen som for eksempel VA-ledninger eller kulturminner. Funksjonsbeskrivelsen angir også krav til nøyaktighet for å sikre at tildekkingslaget får riktig utbredelse i areal og tykkelse. Entreprenøren må videre dokumentere at nøyaktighetskravet overholdes.

Tildekkingsmassene i Vågen skal legges på sjøbunnen ved at massene synker gjennom vannsøylen, avgrenset av et nedføringsrør eller et utleggingshode. Bruk av nedføringsrør og utleggingshode gir kontrollert plassering av masser på sjøbunnen. Tildekkingslaget legges først over et større areal. I erosjonsutsatte områder skal det deretter legges ut et erosjonssikringslaget av grovere masser på toppen av tildekkingslaget, se illustrasjon i Figur 3-1. Tildekkingslaget vil beskytte den underliggende sjøbunnen ved utlegging av de grovere erosjonssikringsmassene. Større stein vil derfor ikke berøre den opprinnelige sjøbunnen eller treffe objekter på den opprinnelige sjøbunns-overflaten.

Sjøbunnen i Vågen vil oppleve en dynamisk last som et resultat av etablering av tildekkings- og erosjonssikringslag. Den dynamiske lasten avhenger av størrelsen på objektet som faller ned på sjøbunnen, hvor høyt over sjøbunnen objektet faller fra og hvor myk eller hard sjøbunnen er. Når en stein eller annen partikkel slippes ned i vann, vil den først akselerere på grunn av tyngdekraften. Etter hvert som hastigheten øker, øker også motstanden fra vannet (hydrodynamisk motstand). Når motstanden blir like stor som tyngdekraften, opphører akselerasjonen, og objektet faller videre med konstant hastighet – dette er terminalhastigheten. Når en stein med terminalhastighet treffer sjøbunnen, vil den overføre en dynamisk last til sedimentene.

For å vurdere dynamisk last fra utleggingsmasser, er det tatt utgangspunkt i en stein med ekvivalent diameter 64 mm som når terminalhastighet (maks fart) 1,15 m/s. For så små partikler som steiner på 64 mm oppnås terminalhastigheten/terminal velocity fort, som betyr at partikkelen ikke kan oppnå høyere hastighet ved fritt fall i vann. Denne partikkelen vil få en meget beskjeden «impact energy» på 0,287 Joule som igjen gir en maksimal tilleggslast på sjøbunnen på 7 kN/m². Denne lasten vil ha innvirkning på dybde fra sjøbunnen til 15 cm under sjøbunnen uavhengig av sjøbunnens hardhet. Dette vil være en forbigående last og vil konvergere mot den statiske lasten og setningen beskrevet i Kap. 3.3 og 3.4.

For en partikkel med 150 mm diameter er den dynamiske makslasten på medium fast sjøbunn beregnet til 40 kN/m², dvs. tilsvarende tilleggslasten fra et menneske som står på en fot. Dybdeintervall som påvirkes av denne lasten er den øverste halvmeteren av sjøbunnen.

Det planlagte tiltaket innebærer erosjonssikringslag oppå tildekkingslag, hvor erosjonssikringslag vil ha større partikler, men påvirke opprinnelig sjøbunn minimalt fordi tildekkingslaget vil oppføre seg som en pute og arrestere bevegelsen.

Med de planlagte massene i tildekkingslaget, med primært små kornstørrelser (hovedsakelig under 64 mm) så vil den dynamiske lasten være liten og påvirkning på original sjøbunn begrenses til 15 cm under sjøbunnen. Den dynamiske lasten er forbigående, innsynkning liten og situasjonen på sjøbunnen vil raskt konvergere til situasjon beskrevet av statisk tilleggslast og resulterende setninger i Kap. 3.2-3.4.

4 Erfaringer fra tildekking i Puddefjorden

I 2017 ble det gjennomført tiltak mot forurenset sjøbunn i Puddefjorden. Tiltaket har mange likheter med det planlagte tiltaket i Vågen. Størstedelen av tiltaksområdet i Puddefjorden ble tildekket med et 45 cm tykt lag av TBM-masser (tunnelboremasser med hovedfraksjon 0-64 mm). I de mest erosjonsutsatte områdene ble tildekkingslaget erosjonssikret med mer grovkornet masser med kornstørrelser i intervallet 20-120 mm.

I forbindelse med prosjektering av tiltaket i Puddefjorden, ble det gjennomført geotekniske beregninger (Multiconsult, 2015). To setningsestimater ble gitt, ett med og ett uten det som tolkes av Multiconsult som meget bløtt gytjelag. Setningsestimat med og uten gytjelag var på henholdsvis 253 mm og 4,5 mm. Beregninger viste at dersom det finnes et meget bløtt gytjelag, vil 94 % av setningene skje i dette laget.

Det er gjennomført både 1-års og 4-årskontroll av tiltaket i Puddefjorden med fokus på miljøtilstand, tildekkingslagets tykkelse og tilstand, samt rekolonisering av sjøbunnen. Det var ikke utfordringer med kulturminner i Puddefjorden, og som del av overvåkingen er det derfor ikke gjennomført målinger av faktiske setninger som følge av tildekkingen i Puddefjorden. Overvåkingen viser imidlertid at tildekkingslaget generelt ligger stabilt som prosjektert.

Generelt er det vurdert at grunnforholdene i Vågen er noe fastere enn både Puddefjorden og Store Lungegårdsvann. Dette er basert på grunnundersøkelser i områdene. Samtidig viser setningsestimat uten gytjelag i Puddefjorden samme setningsnivå som forventes for Vågen, nærme kaifrontene.

5 Referanser

- Cowi. 2012.** *Analyse av sedimentkjerner fra Vågen.* 2012.
- Cowi. 2022.** *Søknad om dispensasjon fra kulturminneloven, Vågen, Bergen kommune.* A243166-2022-01. 2022.
- Cowi. 2023.** *Store Lungegårdsvann – revidert geoteknisk vurdering av skrånninger ved tildekking av sjøbunn.* 2023.
- COWI. 2024a.** *Supplering til søknad om dispensasjon fra kulturminnelover for sedimenttiltak i Vågen, Bergen.* A243166-2024-13. 2024.
- COWI. 2024b.** *Tiltaksplan for forurensset sjøbunn i Vågen, Bergen. Versjon rev02.* A243166-2024-16.
- COWI. 2024c.** *Grunnundersøkelser for kaiteknisk utredning. Geoteknisk datarapport.* 2024c.
- Google.** Google maps. [Internett] <https://www.google.no/maps/>.
- Kartverket.** Høydedata. [Internett] www.hoydedata.no.
- Kartverket.** Norgeskart. [Internett] Kartverket. www.norgeskart.no.
- Multiconsult. 2015.** *Grunnforhold Puddefjorden.* 2015.
- Multiconsult. datert 25.september 2015.** *Grunnforhold Puddefjorden - Arkivundersøkelse, setninger, stabilitet. Dokumentkode 616075-RIG-RAP-001.* datert 25. september 2015.
- NGU - Norges geologiske undersøkelser.** Bergrunn - Nasjonal bergrunnsdatabase. [Internett] https://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/.
- NGU.** NADAG - Nasjonal database for grunnundersøkelser Geotekniske undersøkelser. [Internett] <https://geo.ngu.no/kart/nadag-avansert/>.
- NGU, Norges geologiske undersøkelser.** Nasjonal løsmassedatabase . [Internett] https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/.
- Nøttveit og Wammer. 2010.** *Rapport fra marinarkeologisk forundersøkelse i Vågen, Bergen. Bergen Sjøfartsmuseum.* 2010.
- Statens vegvesen . 2022 .** *Håndbok V220 Geoteknikk i vegbygging .* 2022 .
- Vestland fylkeskommune. 2025.** *Ber om tilleggsinformasjon - Dispensasjon frå kulturminnelova - Vågen - Bergen kommune.* 2025.