

Dypstabilisering med bindemidler

En del av veiledning V221 Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1061



Foto: Eivind Schnell Juvik

Tittel

Dypstabilisering med bindemidler

Undertittel

En del av veiledning V221 Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger

Forfatter

Tonje Eide Helle, Guro Brendbekken, Pernille Wiersholm og Siri Greiff

Avdeling

Vegutforming

Seksjon

Klima og geofag

Prosjektnummer

L10464

Rapportnummer

1061

Prosjektleder

Veslemøy Gardå

Godkjent av

Ragnhild Saarem

Emneord

V221, grunnforsterkning, dypstabilisering, bindemidler, tørrmiksing

Sammendrag

Foreliggende rapport er utarbeidet med hensikt å danne grunnlag for kapittelet "Dypstabilisering med bindemidler" i fremtidig revisjon av Statens vegvesens veiledning V221 Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger. Det er til enhver tid nyeste versjon av V221 som er publisert på Statens vegvesens hjemmesider som er gjeldende. Krav i gjeldende standarder og vegnormal N200 Vegbygging skal følges uavhengig av innholdet i denne rapporten. Krav knyttet til utførelse er beskrevet i retningslinje R761 Prosesskoden.

Title

Dry Deep Soil Mixing

Subtitle

A part of NPRA guideline V221 Soil improvement, embankments and slopes

Author

Tonje Eide Helle, Guro Brendbekken, Pernille Wiersholm og Siri Greiff

Department

Road design

Section

Geotechnics and Climate Adaption

Project number

L10464

Report number

1061

Project manager

Veslemøy Gardå

Approved by

Ragnhild Saarem

Key words

V221, soil improvement, dry deep soil mixing, binders

Summary

This report is written as a draft for the chapter about dry deep soil mixing in the upcoming revision of NPRA guideline V221 Soil improvement, embankments and slopes. The published version of guideline V221 at NPRA's web pages is always considered the official version. Requirements in standards and NPRA specification N200 applies before the content in this report. Requirements regarding execution of deep soil mixing is given in guideline R761 Prosesskoden.

RAPPORT

Grunnlag for revisjon av veiledning V221

OPPDRAKSGIVER

Statens vegvesen

EMNE

Dypstabilisering med bindemidler

DATO / REVISJON: 14.06.2024/ 00

DOKUMENTKODE: 10252072-01-RIG-RAP-001



Multiconsult

Dette dokumentet har blitt utarbeidet av Multiconsult på vegne av Multiconsult Norge AS eller selskapets klient. Klientens rettigheter til dokumentet er gitt for den aktuelle oppdragsavtalen eller ved anmodning. Tredjeparter har ingen rettigheter til bruk av dokumentet (eller deler av det) uten skriftlig forhåndsgodkjenning fra Multiconsult. Enhver bruk av dokumentet (eller deler av det) til andre formål, på andre måter eller av andre personer eller enheter enn de som er godkjent skriftlig av Multiconsult, er forbudt, og Multiconsult påtar seg intet ansvar for slikt bruk. Deler av dokumentet kan være beskyttet av immaterielle rettigheter og/eller eiendomsrettigheter. Kopiering, distribusjon, endring, behandling eller annen bruk av dokumentet er ikke tillatt uten skriftlig forhåndssamtykke fra Multiconsult eller annen innehaver av slike rettigheter.

RAPPORT

OPPDRAG	Grunnlag for revisjon av veiledning V221	DOKUMENTKODE	10252072-01-RIG-RAP-001
EMNE	Dypstabilisering med bindemidler	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAGSGIVER	Statens vegvesen	OPPDRAGSLEDER	Tonje Eide Helle
KONTAKTPERSON	Veslemøy Gardå	UTARBEIDET AV	Tonje Eide Helle, Guro Brendbekken, Pernille Wiersholm og Siri Greiff
KOORDINATER	Sone: - Øst: - Nord: -	ANSVARLIG ENHET	10101080 Geoteknikk Samferdsel
GNR./BNR./SNR.	- / - /		

SAMMENDRAG

Foreliggende rapport er utarbeidet med den hensikt å danne grunnlag for kapittelet «Dypstabilisering med bindemidler» i fremtidig revisjon av Statens vegvesens veiledning V221 «Grunnforsterkning, fyllinger og skjæringer». Det er til enhver tid den nyeste versjonen av V221 som er publisert på Statens vegvesens hjemmesider som er gjeldende. Krav i gjeldende standarder og vegnormal N200 skal følges uavhengig av innholdet i denne rapporten. Krav knyttet til utførelse er beskrevet i R761 Prosesskoden.

00	14.06.2024		Tonje Eide Helle Guro Brendbekken Pernille Wiersholm Siri Greiff	Steffen Giese	Tonje Eide Helle
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Innledning	6
1.1	Hensikt	6
1.2	Geoteknisk dypstabilisering med bindemidler	6
1.2.1	Bindemiddelstabiliserte peler	7
1.2.2	Massestabilisering	8
1.3	Gjeldende regelverk	8
1.4	Vurdering av klima- og miljøhensyn	9
2	Innledende vurderinger	10
2.1	Generelt	10
2.2	Begrensninger knyttet til fremkommelighet og rigg	10
2.3	Toppmasser	10
2.4	Løsmasser	11
2.5	Stabilitet og poretrykk	11
2.6	Miljø/Deponering av overskuddsmasser	11
3	Valg av bindemiddel	13
3.1	Generelt	13
3.2	Bindemiddeltyper og sammensetning	14
3.3	Kjemiske reaksjoner mellom bindemidler og løsmasser	15
3.4	Temperaturutvikling og herdetid	15
3.5	Grunnforhold og bindemiddeltype og -sammensetning	16
3.6	Bindemiddelmengde	17
3.7	Vann/bindemiddeltall	17
4	Grunnlag for valg av materialparametere	19
4.1	Grunnundersøkelser	19
4.2	Laboratorieforsøk	19
4.2.1	Innblandingsforsøk	19
4.2.2	Forsøk	20
4.2.3	Tolkning av materialparametere fra laboratorieforsøk	20
4.3	Forsøksfelt	21
4.4	Korrelasjonsmodeller for utvikling av skjærfasthet over tid	21
4.5	Estimert temperaturutvikling i felt	23
5	Valg av materialparametere	25
5.1	Generelt	25
5.2	Udrenert skjærfasthet	25
5.2.1	Skjærfasthet i løsmassene mellom pelene ($c_{u,k}$)	25
5.2.2	Skjærfasthet i bindemiddelstabilisert materiale ($c_{u,p}$)	26
5.2.3	Styrketak	26
5.2.4	Tøyningskompatibilitet	27
5.3	Elastisitetsmodul	27
5.4	Permeabilitet	28
6	Beregninger	29
6.1	Generelt	29
6.2	Telefarlighetsklasse og bæreevnegruppe	29
6.3	Stabilitet og poretrykk	30
6.4	Installasjonsmønster og dekningsgrad	30
6.5	Vibrasjonsdemping	31
7	Planlegging av utførelse	36
7.1	Generelt	36
7.2	Helse, miljø og sikkerhet (HMS)	36
7.3	Overvåking av poretrykk og deformasjoner	36
7.4	Bindemiddelstabiliserte peler - tørrmiksing	37
7.4.1	Utstyr	37
7.4.2	Installasjonstrykk, cellemater og strømningshastighet	38
7.4.3	Installasjonsdybde	38
7.4.4	Ansett, helning og horisontalavvik	39
7.4.5	Innblandingsarbeid - stige høyde og rotasjons hastighet	40
7.4.6	Dosering av bindemiddel	41

Dypstabilisering med bindemiddel

7.4.7	Styringsparametere for justering av bindemiddelmengde	41
7.4.8	Installasjon inntil spunt	42
8	Kontroll av utførelse	43
8.1	Generelt	43
8.2	Anbefalt kontrollregime.....	43
8.3	Metoder for kontroll av utførelse	44
8.3.1	Forinstallert omvendt pelesondering - FOPS	46
8.3.2	(Forboret) kalkpelsondering - (F)KPS	46
8.3.3	CPT/CPTU	47
8.3.4	Temperatursensorer	48
8.3.5	Krysshullsseismikk.....	48
8.3.6	Prøvetaking	49
9	Symbolliste	50
10	Referanser	51

1 Innledning

1.1 Hensikt

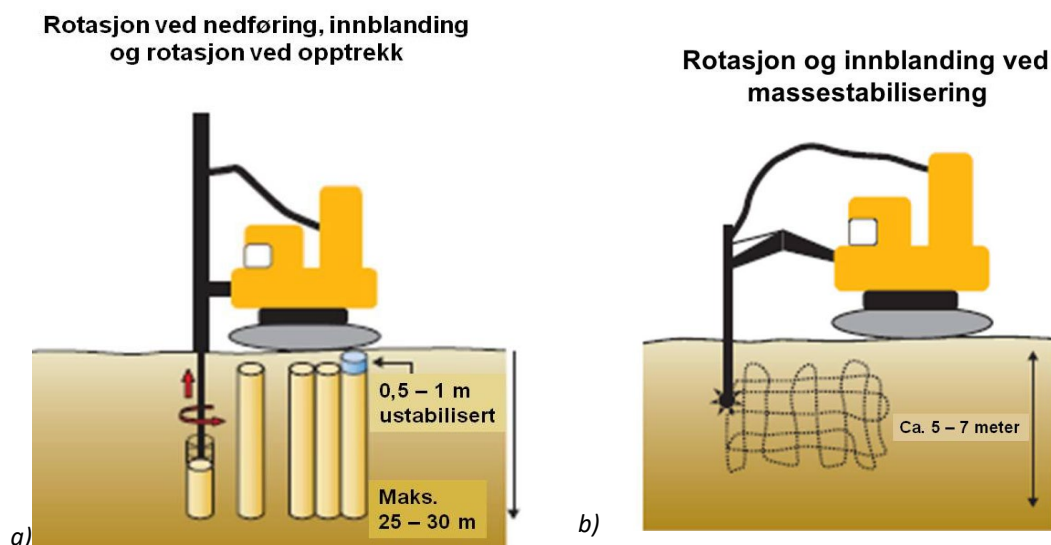
Foreliggende rapport er utarbeidet med den hensikt å danne grunnlag for kapittelet «Dypstabilisering med bindemidler» i fremtidig revisjon av Statens vegvesens Veiledning V221 «Grunnforsterkning, fyllinger og skjæringer». Det er til enhver tid den nyeste versjonen av V221 som er publisert på Statens vegvesens hjemmesider som er gjeldende. Krav i gjeldende standarder og vegnormal N200 skal følges uavhengig av innholdet i denne rapporten. Krav knyttet til utførelse er beskrevet i R761 Prosesskoden.

Rapporten er i hovedsak basert på tidligere versjon av kapittel 1.7 «Kalksementpeler» i Veiledning V221s utgave fra 2014. Innholdet er omstrukturert og supplert med anbefalinger basert på nyere forskning, utvikling og erfaringer. Informasjonen og anbefalingene i denne rapporten er ment som støtte til prosjekterende, og omfatter kun tørrmiksing av bindemidler.

1.2 Geoteknisk dypstabilisering med bindemidler

I geoteknikken omfatter dypstabilisering med bindemidler mekanisk innblanding av bindemidler i stedlige løsmasser for å oppnå økt fasthet og stivhet i løsmassene. Dypstabilisering refererer til både installasjon av bindemiddelstabiliserte peler og massestabilisering (Figur 1-1). Bindemiddelet reagerer med løsmassene, og skjærfastheten og stivheten øker som følge av kjemiske reaksjoner mellom mineralene, porevannet og bindemiddelet. Dypstabilisering ved tilsetning av bindemidler benyttes i middels faste og bløte leirer og siltige leirer, og kan også benyttes i leirig silt, myr, torv og gytje. Metoden er svært godt egnet for å øke fastheten og stivheten i sprøbruddmateriale/kvikkleire.

Dypstabilisering med bindemidler har vært benyttet siden 70-tallet. I starten ble det kun tilsatt kalk i det som ble omtalt som kalkpeler. Etter hvert ble også sement og en blanding av brent (ulesket) kalk og sement tatt i bruk i stor skala som bindemiddel. Dette har medført at bindemiddelstabiliserte peler ofte noe feilaktig omtales som kalksementpeler selv om det benyttes bindemidler som ikke inneholder kalk, som f.eks. filterstøv fra sementproduksjonen blandet med sement (se kapittel 3.2).



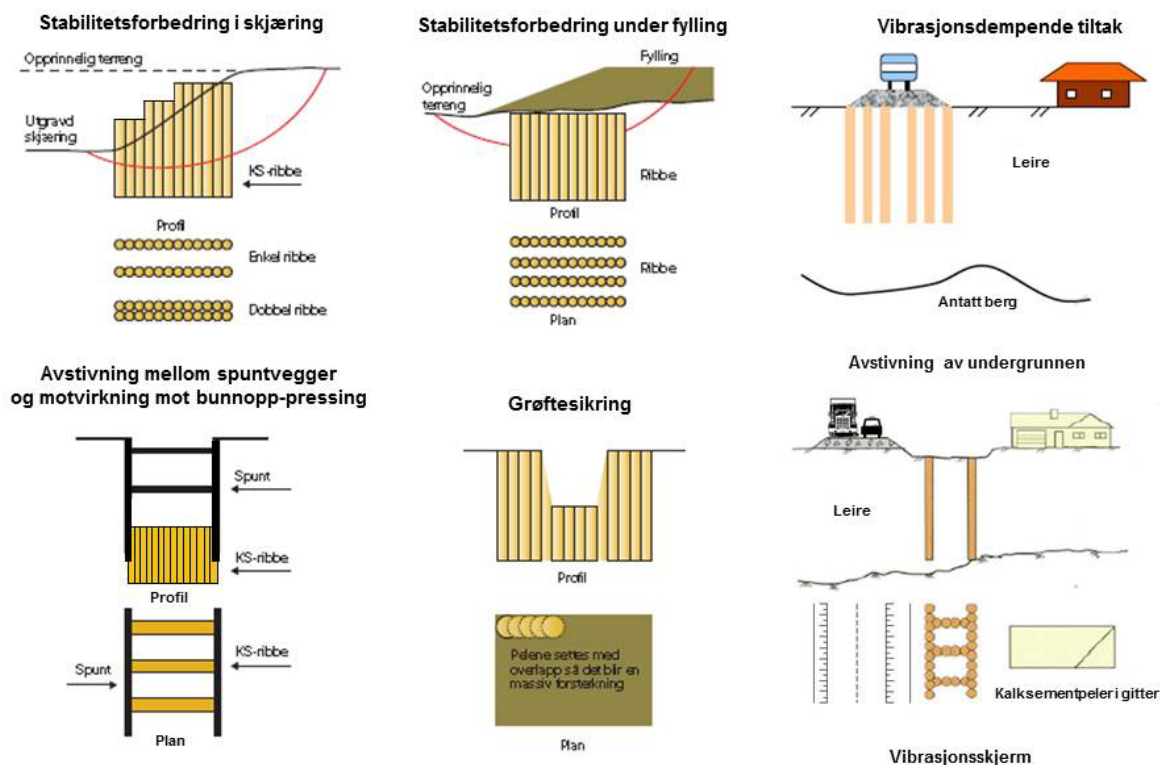
Figur 1-1: Prinsipp ved a) installasjon av bindemiddelstabiliserte peler eller b) massestabilisering med bindemidler (Ref. Norcem 2006).

1.2.1 Bindemiddelstabiliserte peler

Bindemiddelstabiliserte peler (Figur 1-1a) er peler dannet ved at bindemidler blandes med stedlige masser slik at det dannes søyler med fastere egenskaper enn i omkringliggende løsmasser. Bindemiddelstabiliserte peler kan installeres til en dybde på 20-25 m. Bindemiddelstabiliserte peler kan enten installeres ved at tørt bindemiddel blåses inn i løsmassene ved hjelp av trykkluft (tørr innblanding), eller ved at bindemiddel tilsatt vann pumpes inn i løsmassene (våt innblanding). Generelt er trykket som benyttes ved våt innblanding høyere enn for tørr innblanding. I tillegg er det behov for større mengder bindemidler enn ved å benytte tørr innblanding (Karstunen 2014). I Skandinavia benyttes som oftest tørr innblanding da det er tilstrekkelig med vann i løsmassene in-situ til å reagere med bindemiddelet.

Bindemiddelstabiliserte peler kan benyttes (Figur 1-2)

- til å øke jordens bæreevne, f.eks. under fyllinger, anleggsveger o.l.
- til å bedre stabiliteten i skjæringer, utgravninger og naturlige skråninger
- som setningsreducerende tiltak under fylling eller som setningsutjevnenende tiltak under tilløpsfyllinger mot bruer fundamentert til fast grunn
- som avstivning av byggegrøp
- som grøftesikring
- som fundament for bruer og kulverter
- som sidevegs avstivning av fundamenter
- som vibrasjonsdempende tiltak
- til å stabilisere masser før utgraving og transport



Figur 1-2: Anvendelsesområder for bindemiddelstabiliserte peler (Ref. Norcem 2006 og NGF 2012).

1.2.2 Massestabilisering

Ved massestabilisering benyttes utstyr som ligner en beltegående gravemaskin, men istedenfor graveskuffe er en vispetrommel montert på enden av armen (se Figur 1-1b og Figur 1-3). Samtidig med at vispen roteres tilføres bindemiddel som for peler. Bindemiddel kan også blandes inn i toppmassene ved hjelp av en gravemaskinskuff. Man har da ikke like god kontroll på hvor stor bindemiddelmengde som tilsettes.

Bindemiddel blåses ut samtidig som det blandes inn, og dermed stabiliseres hele jordvolumet.

Stabiliseringen kan utføres ned til 5-7 m dybde, og kan være egnet for å lage f.eks. anleggsvei gjennom en skredgrop med bløte og omrørte masser. Dersom kun de øvre 1-2 m av løsmassene trenger stabilisering, kan bindemiddelet blandes inn i massene med konvensjonell gravemaskin. Ved massestabilisering er det mest vanlig å benytte sement som bindemiddel idet metoden gjerne brukes i humusholdige masser eller myr.



Figur 1-3: Eksempel på visp som benyttes ved massestabilisering (Ref. Norcem 2006).

1.3 Gjeldende regelverk

Denne rapporten inneholder supplerende informasjon for prosjekterende, og er ikke ment å skulle erstatte gjeldende standarder, vegnormaler eller veiledninger. Sett deg inn i gjeldende regelverk før du setter i gang med prosjekteringen.

- [Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering – Del 1: Allmenne regler \(NS-EN 1997-1:2004+A1:2013+NA:2020\)](#)
- [Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering – Del 2: Regler basert på grunnundersøkelser og laboratorieprøver \(NS-EN 1997-2:2007+NA:2008\)](#)
- [NS-EN 14679:2005 Utførelse av spesielle geotekniske arbeider - Dypstabilisering - \(innbefattet rettelsesblad AC:2006\)](#)
- [NS 3420-G:2019+AC2 Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del G: Grunnarbeider Del 2](#)
- Kapittel 1.11 i [vegnormal N200:2024 Vegbygging](#)
- [Veiledning N-V220:2025 Geoteknikk i vegbygging](#)
- [Retningslinje R210 Laboratorieundersøkelser \(2024\)](#)
- [Retningslinje R761 Prosesskoden:2025 Standard beskrivelsestekster for veger, tunneler, bruer og kaier](#)
- NVEs [Sikringshåndboka](#)

- NGFs [Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler](#) (2012) (under revisjon)
- [NS 3420-1:2024 Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del 1: Fellesbestemmelser](#) (benyttes ikke i forbindelse med vegprosjekter)

1.4 Vurdering av klima- og miljøhensyn

Vegnormal N200:2024 stiller krav til at klimagassutslipp ved de ulike metodene for grunnforsterkning skal inngå i vurdering ved valg av metode. Det er store klimagassutslipp knyttet til dypstabilisering med bindemidler. Selve produksjonen av bindemidler utgjør de største utslippene, men utslipp knyttes også til transport av bindemidler fra fabrikk til anleggsplassen og selve installasjonsarbeidet. Klimagassutslipp knyttet til produksjonen av de ulike bindemidlene oppgis i bindemiddelleverandørens miljødeklarasjoner (Environmental Product Declaration, EPD). Merk at utslippsfaktorene kan være ulike for samme produkt produsert ved ulike produksjonsanlegg. Utslippsfaktorene kan legges inn i verktøy for klimagassberegninger og livsløpsanalyser (Life Cycle Assessment, LCA) som f.eks. [VegLCA](#).

Risiko for forurensning vurderes i henhold til anbefalinger i kapittel 2.6. Se også krav til vurdering av klima- og miljøpåvirkning i vegnormal N200:2024.

2 Innledende vurderinger

2.1 Generelt

Krav til informasjon som skal innhentes før arbeidene starter er gitt i kapittel 4 i NS-EN 14679:2005 - Utførelse av spesielle geotekniske arbeider - Dypstabilisering.

Det er viktig å være klar over at bindemiddelstabiliserte peler ikke er peler i ordets egentlige betydning, men søyler av forbedrede løsmasser i forhold til omkringliggende masser. Pelene er som oftest inhomogene og det regnes derfor at de tar kun aksiallast og skjærkrefter. Det kan ikke forutsettes at pelene tar strekk- og bøyepåkjenning.

Bindemiddelstabilisering kan ødelegge kulturminner som ligger i løsmassene enten fysisk eller som følge av at installasjonen kan medføre endret geokjemi i løsmassene. Arkeologiske undersøkelser utføres i områder hvor det finnes kulturminner (se kapittel 2 i veiledning N-V220).

Før det velges en løsning med bruk av dypstabilisering med bindemidler, anbefales det å forsikre seg om at det er tid nok til å utføre de nødvendige laboratorieanalysene og at pelene i byggefasen får herde til ønsket skjærfasthet før belastning. Ved stabiliseringstiltak i naturlige skråninger vurderes og påsees det ved kontrolltiltak at installasjonsfasen ikke fører til ustabilitet og brudd. Se kapittel 6.3 og 7.3.

2.2 Begrensninger knyttet til fremkommelighet og rigg

Området hvor dypstabiliseringen er planlagt utført vurderes med hensyn til:

- mulig framkommelighet for rigg innenfor anleggsområdet (bæreevne, terrenghelning)
- tilgjengelighet for tankbiler med kalk/sement (aksellast, snuplass, «lossepass»/parkering)
- tilgjengelighet for biler som frakter riggene (vegkurvatur, tillatt høyde, aksellast for kjøretøy)

Riggene som benyttes for installasjon er som oftest store (30-55 tonn), og marktrykk og bæreevne dokumenteres (se kapittel 6). Hvilken helningsbegrensning de ulike riggene har avklares med utførende entreprenør. Normalt begrenses riggene til en terrenghelning på under 1:10.

Bindemiddelstabiliserte peler kan installeres til en dybde på 20-25 m. Massestabilisering kan utføres til en dybde på maksimalt 5-7 m.

2.3 Toppmasser

Det anbefales å utarbeide en rigg- og marksikringsplan som ivaretar forhold knyttet til håndtering av toppmasser (se kapittel 1.8 i vegnormal N200:2024 og veiledning V271). I denne sammenhengen defineres toppmasser som det øvre laget med løsmasser hvor det ikke tilsettes bindemiddel (som oftest 0,5-2 m mektighet).

Utover vanlige feltundersøkelser kartlegges forekomst av faste topplag, faste lag i dybden eller andre hindringer i undergrunnen i det området hvor det er aktuelt å dypstabilisere med bindemidler.

Massutskiftning med sand eller leire kan være nødvendig dersom toppmassene er svært faste, består av stein/grus eller dersom toppmassene har forekomster av stein/blokk slik at vispen ikke klarer å trenge gjennom toppmassene. Som oftest klarer vispen å trenge gjennom tørrskorpeleire på inntil 2 m mektighet.

Ved bløte toppmasser kan det være behov for å etablere et bærelag som riggen kan stå på under installasjonsarbeidene. Det anbefales at bærelaget består av ikke-humusholdig løsmasser med partikkelstørrelse 0-63 mm, og gjerne sand eller grus.

2.4 Løsmasser

Tabell 2-1 viser en oversikt over egnetheten for bindemiddelstabilisering ved ulike grunnforhold. Ifølge NGF (2012) så er gevinsten av bindemiddelstabilisering størst for leirer med skjærfasthet lavere enn 30 kPa. I tillegg kreves mindre energi for å få til en god innblanding av bindemidlene i bløtere enn i fastere løsmasser.

Hvor lett det er å blande bindemiddelet inn i løsmassene påvirkes bl.a. av kornfordelingen og plastisiteten (plastisitetsindeksen) til løsmassene. Dess grovere masser eller dess høyere plastisitetsindeks, dess større innblandingsarbeid (se kapittel 7.4.5) er det behov for. Sprøbruddmateriale/kvikkleire krever generelt mindre innblandingsarbeid for å oppnå god kvalitet (homogen innblanding) grunnet rask nedbryting av strukturen i leira.

Forekomster av stein/blokk i dybden kan medføre skade på installasjonsutstyret, horisontalavvik og i verste fall medføre at prosjektert løsning ikke kan utføres. Geologisk vurdering for å avdekke risikoområder anbefales utført. Særlige risikoområder er ved ra eller israndavsetninger (NGF 2012).

Forekomst av permeable lag i grunnen kartlegges da disse kan medføre at installasjonstrykket (se kapittel 7.4.2) som benyttes under installasjon sprer seg og forårsaker forhøyede poretrykk over et større område.

Forekomst av ev. organisk jord, sulfidinnhold og saltinnhold (dersom ikke sprøbruddmateriale/kvikkleire) i grunnen kartlegges, da dette kan påvirke herdeprosessen og valg av bindemiddeltype og -mengde (se kapittel 3.5).

For mer utfyllende informasjon, se NGF (2012).

Tabell 2-1: Oversikt over grunnforhold hvor bindemiddelstabilisering er godt egnet og egnet.

Godt egnede grunnforhold	Egnede grunnforhold
Bløt til middels fast leire og siltig leire Sprøbruddmateriale/kvikkleire	Fast, leire med middels til høy plastisitetsindeks Leirig silt Silt Torv Myr Gytje
Forekomst av stein og blokk vurderes spesielt	

2.5 Stabilitet og poretrykk

Installasjon av bindemiddelstabiliserte peler kan føre til økt poretrykk og dermed midlertidig redusert stabilitet. Det kan ta fra dager til flere måneder å utjevne poreovertrykk som oppstår som følge av installasjonsarbeidene. Vegnormal N200:2024 stiller krav til overvåking av poretrykket og igangsetting av ev. avbøtende tiltak (krav 1.11.6-1 og 1.11.6-2). Se anbefalinger i kapittel 6.3 og 7.3.

For pelene nær skråningstopp anbefales det å utarbeide rekkefølgebestemmelser for å minimere poretrykksoppbygging under installasjon.

Ved installasjon av peler i områder hvor det er, eller er mistanke om artesisk poretrykk, anbefales det å unngå å punktere vannførende lag i dybden.

Bindemiddelstabiliserte peler kan, på grunn av de kjemiske reaksjonene med løsmassene, få en grovere struktur enn omkringliggende løsmasser, og setninger av grunn i tilstøtende arealer kan dermed inntreffe. Se kapittel 5.4.

2.6 Miljø/Deponering av overskuddsmasser

Dypstabilisering med bindemidler genererer overskuddsmasser som håndteres etter gjeldende regelverk. For å få en rasjonell og bærekraftig masseforvaltning, er man helt avhengig av en tidlig, langsiktig og

helhetlig planlegging. Regelverk som gjelder for håndtering av overskuddsmasser (både rene og forurensede masser) er bl.a.:

- Forurensningsloven (<https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1981-03-13-6>)
- Forurensningsforskriften (<https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931>)
- Avfallsforskriften (<https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-930>)
- Plan- og bygningsloven (<https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>)

I prosjekter hvor det er påvist forurensede masser vil det være utarbeidet en tiltaksplan etter Forurensningsforskriften kap. 2 som gir føringer for disponering av både rene og forurensede masser i prosjektet.

I forbindelse med dypstabilisering tilføres grunnen bl.a. sement. Det som håndteres som overskuddsmasser er et blandingsprodukt av løsmasser og sement, og faller ikke inn under Avfallsforskriften kapittel 14a (Betong og tegl fra riveprosjekter) eller Miljødirektoratet sin veileder M-1243 «Disponering av jord og stein som ikke er forurenset». Likevel kan slike overskuddsmasser ikke disponeres fritt uten fare for forurensning, og det er derfor behov for en tillatelse etter Forurensningsloven §11 dersom de ikke leveres til godkjent mottak. Det vil derfor være behov for å gjøre en konkret vurdering for å finne den beste løsningen i hver enkelt sak, blant annet avhengig av mengder og stedlige forhold. Behov for og omfang av undersøkelser, slik som kjemiske analyser og utlekkings tester, er avhengig av disponeringsløsningen.

3 Valg av bindemiddel

3.1 Generelt

Egenskapene i løsmassene påvirker hvilken fasthet som oppnås i de bindemiddelstabiliserte løsmassene. Samtidig vil ulike typer bindemidler reagere ulikt og utvikle ulik fasthet i løsmasser fra samme lag. Generelt ses at:

- Fastheten øker med økt herdetid.
- Fastheten øker med økende bindemiddelmengde opp til en viss mengde. Deretter øker ikke fastheten som følge av økt bindemiddelmengde. Dette kan forklares ved at full hydratisering av Portland sement fås ved et masseforhold vann/sement på 0,4. Lavere masseforhold fører til ufullstendig hydratisering.
- Egenskaper som vanninnhold, kornfordeling, omrørt skjærfasthet, plastisitetsindeks og organisk innhold er avgjørende for hvilken fasthet som oppnås (bl.a. NGF 2012).
 - Dersom alle andre parametere er like, så vil høyere vanninnhold føre til lavere fasthet (Åhnberg et al. 1995). Høyt organisk innhold vil også kunne bidra til høyt vanninnhold, ergo også lavere fasthet.
 - Humus i løsmassene vil kunne forårsake ukontrollert avbinding av sementen, og herdeprosessen kan forsinkes eller stoppe opp.
 - Salt og sulfat i løsmassenes porevann kan forårsake lavere fasthet.

Det foreligger ingen klar anbefaling til hvilken bindemiddelkombinasjon (type, sammensetning og mengde) som er best egnet for ulike typer løsmasser. Ulike kombinasjoner og ulike herdetider testes derfor med innblandingsforsøk på laboratoriet. Bindemiddelkombinasjonen som benyttes i felt skal alltid være testet på laboratoriet (jf. krav 1.11.6-3 i vegnormal N200:2024). Ved større prosjekter skal det prøveteles som grunnlag for dimensjonering og valg av bindemiddel og mengde (jf. krav 1.11.6-4 i vegnormal N200:2024). Man kan med fordel undersøke tilgjengeligheten av bindemiddel i markedet da dette kan variere og begrense hvilke muligheter en har.

Ved valg av bindemiddelkombinasjon anbefales det å vurdere følgende:

- Materialeegenskaper som egner seg til problemstillingen i felt
 - Det anbefales en seigere oppførsel i pelene ved skråningsstabilitet enn i en byggegrop hvor det stilles større krav til høy stivhet for å minimere deformasjoner.
- Bindemiddelmengde
 - Lavest mulig, samtidig som ønskede materialeegenskaper oppnås.
 - Nedre terskelverdi for bindemiddelmengde og samtidig oppnå homogen innblanding i pelens tverrsnitt og dybde avklares med utførende entreprenør.
- Klimagassutslipp og miljøvurderinger
 - Velg bindemiddel med lavest mulig utslippsfaktor forutsatt at materialeegenskaper egner seg til problemstilling, og vurder potensielle ugunstige miljøeffekter i henhold til kapittel 2.6.
- Kostnader
 - Type og mengde bindemiddel
 - Antall peler

3.2 Bindemiddeltyper og sammensetning

De vanligste bindemiddeltypene som benyttes i dypstabilisering er listet opp i Tabell 3-1.

Tabell 3-1: Vanlige bindemiddeltyper og -sammensetninger

Kalkprodukter	Består av
CL 90 ¹	90 % CaO aktiv*
CL 80 ¹	80% CaO aktiv (kan inneholde LKD) ³
CL 70 ¹	70% CaO aktiv (kan inneholde LKD) ³
Lime Kiln Dust (LKD)	Filterstøv fra produksjonen av brent kalk
Sementprodukter	Består av
Portland sement (CEM I 52,5R) ²	100 % klinker
Standardsement FA (CEM II/B-M-42,5R) ²	80 % klinker og 20 % flygeaske
ByPass Dust (BPD) og Cement Kiln Dust (CKD)	Filterstøv fra sementproduksjonen hentet ut fra ulike steder i prosessanlegget for sementproduksjonen ⁴
Vanlige bindemiddelsammensetninger	
25/75 CL#/ CEM I eller CL#/CEM II 25/75 BPD/CEM I eller BPD/CEM II 25/75 CKD/CEM I eller CKD/CEM II	25 % brent kalk, BPD og/eller CKD, og 75 % Portland sement eller Standardsement FA
50/50 CL#/ CEM I eller CL#/CEM II 50/50 BPD/CEM I eller BPD/CEM II 50/50 CKD/CEM I eller CKD/CEM III	50 % brent kalk, BPD og/eller CKD, og 50 % Portland sement eller Standardsement FA
75/25 CL#/ CEM I eller CL#/CEM II 75/25 BPD/CEM I eller BPD/CEM II 75/25 CKD/CEM I eller CKD/CEM III	75 % brent kalk, BPD eller CKD, og 25 % Portland sement eller Standardsement FA
¹ iht. NS-EN 459-1:2015 (Standard Norge 2015) ² iht. NS-EN 197-1:2011 (Standard Norge 2011) ³ Franzefoss Minerals benytter produktnavnene Terraplus 60, 80 og 100 (https://kalk.no/). ⁴ Heidelberg Materials benytter produktnavnet Multicem for bindemidler bestående av BPD og/eller CKD og sement (https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/Multicem_no).	

Ulike typer bindemidler kan kombineres ved å blande sammen en prosentandel av hver bindemiddeltype. En kalksement kan bestå av en prosentandel kalk og en prosentandel sement, f.eks. 50/50 kalk og sement med eller uten en andel flygeaske (FA). De ulike bindemiddeltypene bidrar med ulike materialegenskaper til den stabiliserte massen. Generelt vil innblanding med sement gi høy fasthet, men en sprø oppførsel, mens tilsetning av kalk bidrar til en seigere oppførsel i materialet.

Det benyttes ulike typer brent kalk i forbindelse med dypstabilisering. Det er per i dag mest vanlig å benytte kalk som inneholder 15-20 % filterstøv fra produksjonen av brent kalk (CL 80). Filterstøvet, Lime Kiln Dust (LKD), består i hovedsak av brent kalk (CaO) og kalsiumkarbonat (CaCO₃). Brent kalk med en andel LKD har lavere klimagassutslipp enn ren brent kalk, men fasthetsutviklingen kan imidlertid være noe raskere dersom det i stedet benyttes 100 % kalk (CL 90). Dette skyldes at ren kalk inneholder høyere andel reaktivt innhold (kalsiumoksid, CaO).

Man kan også benytte ulike typer sement i forbindelse med dypstabilisering. I Norge benyttes Portland sement (CEM I) og Standardsement FA (CEM II) som er en komposittsement. Standardsement FA har lavere utslippsfaktor enn Portland sement grunnet innhold av flygeaske.

Det kan også benyttes bindemiddelsammensetninger med restprodukter fra sementproduksjonen. Dette består av en del Portland sement eller en del komposittsement, og en del filterstøv fra sementproduksjonen (se Tabell 3-1). Det anbefales at filterstøvet inneholder ca. 40 % CaO. Variasjoner i den kjemiske sammensetningen kan forekomme, og det anbefales derfor at effekten på fasthetsutviklingen testes.

Sement og bygningskalk sine miljødeklarasjoner oppfyller kravene i EN 15804:2012+A2:2019+AC:2021. Filterstøv er biprodukter og er ikke standardiserte i henhold til NS-EN 197-1:2011 eller NS-EN 459-1:2015. Det finnes og utvikles også flere typer bindemidler, gjerne tilsatt ulike restprodukter og tilsetningsstoffer. Disse nye typene av bindemidler har ofte lavere utslippsfaktorer enn tradisjonelle bindemidler. I tillegg til å dokumentere effekten på fasthetsutviklingen, anbefales det å innhente produktenes miljødeklarasjon for å vurdere risiko for forurensning av løsmasser og resipienter.

3.3 Kjemiske reaksjoner mellom bindemidler og løsmasser

De kjemiske reaksjonene som oppstår når bindemidler blandes i løsmasser er sammensatt av flere prosesser med ulik reaksjonstid. Ulike bindemidler reagerer noe ulikt og det er ulike typer reaksjoner som bidrar til fasthetsutviklingen. Generelt reagerer bindemiddelet med porevannet i løsmassene ved en hydratiseringsprosess som fører til at temperaturen i løsmassene øker. Reaksjonene forbruker vann, slik at vanninnholdet i løsmassene avtar. Deretter vil, avhengig av type bindemiddel, reaksjonsproduktene reagere videre med løsmassene som stabiliseres. Reaksjonshastigheten er temperaturavhengig, hvor økt temperatur vil bidra til økt reaksjonshastighet. På samme måte kan lave temperaturer bidra til at prosessene forsinkes eller stopper opp.

For sementen er det i hovedsak selve hydratiseringsprosessen som bidrar til fasthet, stivhet og bestandighet til materialet, ved at det dannes en hard sementpasta (CSH-fase). Fasthetsutviklingen kan oppstå etter noen timer, men også pågå i flere dager.

For kalk er det sekundære, pozzolane reaksjoner som bidrar til fasthetsutviklingen. Denne prosessen kan pågå over flere måneder. Mengden brent kalk (CaO) som er fritt til å reagere, dvs. mengden aktiv kalk, varierer mellom ulike kalkprodukter.

For en mer detaljert beskrivelse av de kjemiske reaksjonene for ulike bindemidler henvises det til kalk- og sementveiledningen (NGF 2012).

3.4 Temperaturutvikling og herdetid

Temperaturen i løsmassene på dybder større enn 5 m er relativt stabil gjennom året, og kan antas å være lik årlig gjennomsnittlig lufttemperatur (www.nve.no). De kjemiske reaksjonene som følge av tilsatte bindemidler fører til at temperaturen i bindemiddelstabiliserte peler øker i starten av herdeprosessen. Temperaturmålinger i felt viser at temperaturen i bindemiddelstabiliserte peler ofte er høyere enn temperaturen i grunnen, og at forhøyet temperatur kan vedvare i flere måneder etter installasjon (Åhnberg og Holm 1987; Wiersholm 2018). Hvilken temperatur som oppnås i bindemiddelstabiliserte peler i felt påvirkes av flere faktorer som bl.a.:

- Bindemidelmengde
 - Generelt vil en økning i tilsatt mengde bindemiddel gi høyere temperaturutvikling.
- Bindemiddeltype
 - Temperaturutviklingen er høyere i peler med høy andel kalk enn i peler med kun sement (Åhnberg et al. 1995). I bindemidler hvor kalk er erstattet av f.eks. filterstøv fra sementproduksjonen produserer de kjemiske reaksjonene mindre varme.
- Løsmassenes termiske materialparametere
 - Dess høyere spesifikk varmekapasitet løsmassene har, dess saktere oppvarming av omkringliggende løsmasser. Dess høyere varmeledningsevne, dess raskere temperaturutjevning med omgivelsene (Åhnberg og Holm 1987).

- Installasjonsmønster
 - Det oppnås høyere temperatur og mer langvarig forhøyet temperatur ved høy dekningsgrad. Dvs. at i blokker oppnås høyere temperatur og forhøyet temperatur over lengre tid enn i f.eks. enkeltpeeler der temperaturen raskere utjevnes med temperaturen i omkringliggende løsmasser (Åhnberg og Holm 1987; Christensen et al. 1998).
- Innblandingsarbeid
 - Jevn innblanding fører til bedre kontakt mellom bindemiddel og leir-/silt-partikler, og dermed større reaksjonshastighet og hurtigere temperaturutvikling (Kitazume og Terashi 2013).

I forbindelse med framdriftsplanleggingen på anlegget kan nødvendig herdetid for å oppnå tilstrekkelig fasthet estimeres basert på innvirkningen av dekningsgrad og bindemiddelkombinasjon på temperaturutviklingen. Se kapittel 4.5.

3.5 Grunnforhold og bindemiddeltype og -sammensetning

Bindemiddelkombinasjonen sammen med egenskapene i løsmassene er avgjørende for hvilken fasthet som oppnås. Dersom to ulike bindemiddelkombinasjoner testes for samme løsmasseavsetning, så kan den ene kombinasjonen være gunstig ved kort herdetid, mens den andre kombinasjonen gir mest gunstig effekt lengre ut i herdeforløpet. Effekten kan også variere avhengig av grunnforhold, og enkelte steder er det ikke observert noen forskjell i oppnådd fasthet ved å blande inn ulike typer og sammensetninger av de tradisjonelle bindemidlene. Erfaringsdata fra ulike regioner kan benyttes veiledende for å bestemme hvilken bindemiddelkombinasjon som er best egnet for løsmasser med tilsvarende vanninnhold, kornfordeling, omrørt skjærfasthet, plastisitetsindeks og organisk innhold.

Tabell 3-1 viser en generell oversikt over bindemiddeltyper og sammensetninger som egner seg for norske grunnforhold. Herunder nevnes noen erfaringer fra ulike publikasjoner som kan være til hjelp ved valg av bindemiddel:

- I leire med vanninnhold mindre enn 80 % oppnås best effekt på oppnådd fasthet ved å benytte en blanding av sement og kalk eller filterstøv.
- Det kan være behov for høyere bindemiddelmengde i løsmasser med høyt vanninnhold.
- I leirer fra Østlandet med likt vanninnhold tilsatt samme bindemiddelkombinasjon, så er det observert at leirer med større andel silt oppnår høyere fasthet enn leirer med høyere andel leir (Helle et al. 2021).
- Ifølge Croft (1967) er det krevende å stabilisere leire med sement dersom leirinnholdet er over 50 %. Ved å benytte kun sement, vil styrken øke med avtakende leirinnhold (Bergado et al. 1996).
- Ren brent kalk kan benyttes i løsmasser der leirinnholdet er over 20 % og summen av silt- og leirfraksjonen er over 35 % (Broms 1991).
- Sementandelen anbefales økt i leirer med høyt innhold av organisk materiale, salt eller svovel (sulfider), og i løsmasser med høy siltandel, da kalk har vist seg å ha liten effekt (Statens vegvesen 2014). I myr, gytje eller torv anbefaler Statens vegvesen (2014) at sementandelen er over 75 %, og ved organisk innhold over 50 % benyttes kun sementprodukter (EuroSoilStab 2002). Vær oppmerksom på at humus kan forsinke og i verste fall stoppe opp herdeprosessen.
- Fasthetsutviklingen er raskere ved å benytte ren Portland sement enn Standard FA (NGF 2012).
- Leirmineralene i norske kvikkleirer er dominert av de ikke-svellende leirmineraltypene illitt og kloritt (Rosenqvist 1955; Mitchell og Soga 2005; Løken 1968; Rosenqvist 1975). Kaolinitiske og illitiske leirer er mer egnet for stabilisering med sement enn leirer som inneholder store mengder

ekspansive leirmineraler. Ekspansive leirmineraler som montmorillonitt reagerer raskere med kalk enn mindre aktive mineraler som kaolinitt og illitt (Croft 1967).

3.6 Bindemiddelmengde

Bindemiddelmengden avgjøres basert på hvilken fasthet som er nødvendig for å oppnå tilstrekkelig sikkerhet og hvor lang tid det tar å oppnå nødvendig fasthet. En enkel måte å redusere klimagassutslippene knyttet til dypstabilisering er å redusere bindemiddelmengden.

Laboratorieforsøk benyttes for å optimalisere bindemiddelmengden. Redusert bindemiddelmengde kan medføre at det tar lengre tid å oppnå tilstrekkelig fasthet. Korrelasjonsmodellene i kapittel 4.4 og 4.5 kan benyttes for å estimere nødvendig herdetid i felt for å oppnå samme modenhet og fasthet som i laboratorieforsøkene. Det anbefales å utføre temperaturmålinger (se kapittel 8.3.4) og krysshullseismikk (se kapittel 8.3.5) for peler installert på et forsøksfelt (se kapittel 4.3), og også i byggefasen, for å optimalisere framdriftsplanleggingen i forbindelse med igangsetting av arbeidene i dypstabilisert område, og også for ytterligere optimalisering av bindemiddelmengden.

Dagens maskinpark er begrensende for hvor lav bindemiddelmengde som kan blandes inn i løsmassene og fortsatt oppnå homogen pel. Bindemiddelmengden anbefales avklart med utførende entreprenør. Det anbefales å legge til grunn at bindemiddelmengden velges slik at løsningen blir robust ved en eventuell underdosering. Se kapittel 7.4 for nærmere beskrivelse av hvordan bindemiddelmengden kan justeres under utførelse.

Man kan også redusere bindemiddelmengden på anlegget ved å:

- variere bindemiddelmengden over pelens dybde
- variere bindemiddelmengden for ulike deler av anlegget
- vurdere bindemiddelmengden opp mot framdriftsplanen slik at mengden reduseres i områdene hvor pelene belastes på et senere tidspunkt, dvs. i områder med lengre herdetid.

Bindemiddelmengder tilsatt løsmassene over graveplanum kan være lavere slik at man unngår at fastheten blir for høy.

Innstillingene på dagens rigger justeres på stedet for å oppnå jevn innblanding av ønsket bindemiddelmengde i hele pelens dybde. Muligheten for å variere bindemiddelmengden over pelens dybde avklares med utførende entreprenør. For mer informasjon om installasjonsutstyr og utførelse se kapittel 7.

3.7 Vann/bindemiddeltall

For Portland sement oppnås full hydratisering av sementen ved et masseforhold mellom vann og sement (w/c-tall) på 0,4. I Skandinavia tilsettes som oftest bindemiddelet tørt, og bindemiddelet forbruker porevannet i løsmassene i de kjemiske reaksjonene. Ved å tilsette lik bindemiddelkombinasjon i løsmasser med ulikt vanninnhold, så vil løsmasser med lavt vanninnhold oppnå høyere fasthet enn løsmasser med høyt vanninnhold, forutsatt at alle andre parametere er like (Åhnberg et al. 1995).

Det har de senere årene blitt publisert flere studier hvor det bl.a. fokuseres på korrelasjoner for forholdet mellom vann og bindemiddel (w/b) og oppnådd fasthet, og også hvor w/b-tallet korrigeres basert på aktivt CaO i bindemidler hvor det benyttes kalk (Paniagua et al. 2022; Bache et al. 2021; Hov et al. 2022). Studiene viser sammenheng mellom økende skjærfasthet og minkende w/b-tall som følge av økende bindemiddelmengde. Det finnes imidlertid ingen entydig sammenheng mellom w/b-tall og hvilken fasthet som oppnås da også andre egenskaper ved løsmassene enn vanninnhold har innvirkning på fasthetsutviklingen (Statens vegvesen 2023). Det gjøres også oppmerksom på at skjærfastheten øker med økt bindemiddelmengde til et visst nivå (se kapittel 3.1).

En korrelasjon mellom w/b -tallet og skjærfasthet kan likevel benyttes for å justere bindemiddelmengden for stedsspesifikke (lokale) grunnforhold slik at tilstrekkelig fasthet oppnås. I så fall anbefales det å kun inkludere resultater fra laboratoriepreparerte prøver med lik herdetid i korrelasjonen, og kun benytte korrelasjonen for å justere bindemiddelmengden for de lokale grunnforholdene. For detaljer vedrørende utregning av w/b -tallet, se bl.a. Hov et al. 2022.

4 Grunnlag for valg av materialparametere

4.1 Grunnundersøkelser

Krav og anbefalinger til omfang av grunnundersøkelser og dokumentasjon av grunnforhold i forbindelse med dypstabilisering er gitt i kapittel 5 i NS-EN 14679:2005. For å undersøke effekten av ulike bindemiddelkombinasjoner ved hjelp av innblandingsforsøk på laboratoriet er det behov for å hente opp flere prøver enn ved et vanlig omfang av grunnundersøkelser. Det utføres innblandingsforsøk for alle representative lag som planlegges stabilisert med bindemidler. Dvs. at det hentes opp tilstrekkelig med løsmasser fra hvert representative lag til å teste alle aktuelle bindemiddelkombinasjoner og herdetider slik at bindemiddelets effekt kan evalueres for hvert lag. Dette medfører et større omfang prøvetaking på anlegg med varierende grunnforhold.

Organisk innhold, forekomst av sulfater og saltinnhold (ikke nødvendig i sprøbruddmateriale/kvikkleire) kan påvirke herdeprosessen og anbefales undersøkt. I tillegg til rutineundersøkelser er det ønskelig å utføre forsøk for å bestemme kornfordeling, korndensitet, flyte- og utrullingsgrense fra minst en prøvesylinder i hvert lag.

I tillegg til å utføre grunnundersøkelser, så anbefales det å innhente erfaring fra prosjekter hvor det er utført dypstabilisering i områder med tilsvarende grunnforhold.

4.2 Laboratorieforsøk

4.2.1 Innblandingsforsøk

Kombinasjonen av bindemiddeltype og -mengde som faktisk blir brukt i felt skal alltid testes på laboratoriet (krav 1.11.6-3 i vegnormal N200:2024).

Innblandingsforsøk prepareres og utføres i henhold til KlimaGrunns prosedyre i Statens vegvesen (2023).

Denne blir på sikt innarbeidet i kapittel 225 i Statens vegvesens retningslinje R210

Laboratorieundersøkelser. Prosedyren er utviklet for leire og siltig leire for å unngå at resultatene er laboratorie- og operatørvhengig, og for å forbedre samsvaret mellom resultater produsert på laboratoriet og i felt (Statens vegvesen 2023). Densiteten på prøvene bestemmes på forhånd, og det benyttes utstyr som sikrer at prøvene beholder konstant volum under herding.

Alle prøvene fra hvert løsmasselag homogeniseres (blandes sammen til en jevn blanding) slik at innblandingsforsøkene som sammenlignes er preparert med løsmasser med like egenskaper. Det trengs ca. 600-700 g løsmasser for hver innstampet prøve. Avhengig av densiteten i løsmassene og antall rutine- og spesialforsøk som forbruker masser fra sylindren, så kan man regne 3-4 innstampede prøver per sylinder. Prøveprepareringen vil gi noen ulikheter mellom prøvene som vil kunne påvirke resultatene. Det anbefales derfor å preparere tre like prøver for hver bindemiddelkombinasjon og herdetid i hvert av de ulike løsmasselagene.

For å finne den optimale bindemiddelkombinasjonen for de lokale grunnforholdene, anbefales det å utføre laboratorieforsøk på aktuell løsmasse med ulike bindemiddeltyper, -sammensetninger og -mengder. Dette kan utføres ved å stampe inn sett med tre like prøver per bindemiddelkombinasjon for utførelse av forsøk etter f.eks. 7 herdedøgn. Vær imidlertid oppmerksom på at i enkelte tilfeller kan effekten av ulike bindemidler endres over tid slik at det bindemiddelet som har best effekt ved herdetid på 7 døgn ikke nødvendigvis er det som gir best effekt ved 28 eller 90 døgn herding (se kapittel 3.5).

Densitet

Grunnet innblåsing av luft under installasjon har bindemiddelstabiliserte peler i leire/silt en tendens til å oppnå noe lavere densitet enn ustabiliserte løsmasser på stedet. Densiteten vil kunne påvirke hvilken

skjærfasthet som oppnås (bl.a. Falle 2021, Baustad 2022, Hov et al. 2022). Det anbefales derfor at prøvene stemples inn med 5 % lavere densitet enn det ustabilisert leire/silt har in situ.

Per nå foreligger ingen dokumentasjon på hvilken densitet som oppnås i bindemiddelstabilisert myr, torv eller gytje. Ofte tilsettes langt høyere bindemiddelmengder i slike masser enn i leire eller silt. Dermed oppnås trolig en høyere densitet som følge av tilsatt tørrstoff (bindemiddel) (Åhnberg et al. 2001). Det anbefales å undersøke og sammenstille erfaringsdata for hvilken densitet som vanligvis oppnås i felt ved stabilisering av denne type masser, og benytte en densitet 5 % lavere enn denne ved innstamping av prøver.

Herding

Prøvene herdes ved 100 % luftfuktighet og 20 ± 2 °C innbygd i sylindrer de stemples inn i. Endeflatene forsegles etter innbygging.

Dersom korrelasjonsmodellen for fasthetsutvikling i Ligning 2 (kapittel 4.4) benyttes, så anbefales det som et minimum å preparere prøver for herding i 28 døgn ved 20 °C. For å utvikle spesialtilpassede korrelasjonskurver for lokale grunnforhold, anbefales det i tillegg å preparere prøver som herder i f.eks. 3, 7 og/eller 90 døgn.

4.2.2 Forsøk

Laboratorieforsøk kan utføres både på laboratoriepreparerte prøver (innblandingsforsøk) og prøver hentet opp fra bindemiddelstabilisert materiale i felt (se kapittel 8.3.6).

Vanninnhold (w) og densitet (ρ) bestemmes for alle prøver etter endt herdetid, og det utføres enaksialforsøk. Enaksialforsøkene kjøres med en tøyingsrate på 1,5 %/min (1,5 mm per minutt dersom prøvehøyden er 100 mm). Kontroll av høyde/diameter (H/D) forholdet utføres for å tilfredsstille krav i ISO (2017) ($1,8 \leq H/D \leq 2,5$).

Treaksialforsøk anbefales kjørt som isotropt konsoliderte, drenerte forsøk uten påføring av baktrykk for å unngå å tilføre prøven vann. Åhnberg (2004) anbefaler å kjøre skjærforsøkene med lav tøyingsrate (0,6-1,2 %/time). Dersom det velges å påføre baktrykk, anbefales sakte påføring av trykk opp til et høyt nivå (> 400 kPa) (Amin 2015).

Benderelementforsøk for å bestemme skjærbølgehastighet kan utføres på samme prøvestykke som benyttes for enaksialforsøk eller treaksialforsøk (se anbefalinger til prosedyre for utførelse og tolking utviklet gjennom innovasjonspartnerskapet KlimaGrunn i Statens vegvesen (2023)).

4.2.3 Tolkning av materialparametere fra laboratorieforsøk

Uavhengig av hvilken prosedyre som benyttes for å stampe inn og herde de laboratoriepreparerte prøvene så vil ikke innblandingsforsøkene fullt ut gjenspeile herdeforholdene in situ. Likevel gir forsøkene en indikasjon på relativ effekt av tilsatt bindemiddelkombinasjon i løsmassene for ulike herdetider. Generelt oppnås bedre samsvar mellom laboratorieresultater og oppnådd skjærfasthet i felt ved å benytte laboratorieprosedyren utviklet gjennom KlimaGrunn (Helle et al. 2022). Det anbefales derfor at denne benyttes for sammenligning av effekten av ulike bindemiddelkombinasjoner i ulike løsmasser, og for utvikling av korrelasjonsmodeller (se kapittel 4.4).

Skjærfastheten (c_u) tolkes som maksimal skjærspenning ved brudd. Elastisitetsmodulen (E_{50}) tolkes fra spennings-tøyingskurven i henhold til anbefalinger i NGF (2012).

Det finnes per nå ingen standard prosedyre i Norge for utførelse og tolking av benderelementforsøk, men det anbefales å følge rådene i Statens vegvesen (2023).

4.3 Forsøksfelt

I tilfeller der erfaringer fra sammenlignbare forhold ikke er tilgjengelig, så skal det i henhold til NS-EN 14679:2005 utføres testpeling for å bekrefte at designkravene kan oppnås. I tillegg, så kan forsøksfelt benyttes til ytterligere optimalisering av bindemiddelmengden, og for å innhente informasjon som kan benyttes i framdriftsplanleggingen. Dette kan utføres ved å kombinere de laboratoriebaserte korrelasjonsmodellene (se kapittel 4.4 og 4.5) med temperaturmålinger (se kapittel 8.3.4) og krysshullsseismikk i felt (se kapittel 8.3.5). Både temperaturmålinger og krysshullsseismikk er ikke-destruktive metoder. I tillegg er testmetodene repeterbare. Dvs. at man kan installere færre testpeler enn dersom man velger å dokumentere fasthetsutviklingen med destruktive metoder som f.eks. FOPS eller (F)KPS (se kapittel 8.3.1 og 8.3.2).

Testpelingen utføres med samme type utstyr, materialer, teknikker og prosedyrer som er planlagt å benytte for produksjon av de prosjekterte pelene. For å oppnå representative resultater på anlegg med varierende grunnforhold, så anbefales det å etablere flere forsøksfelt. Eventuelt å utføre testpeling i områder hvor det forventes å oppnå mest konservative resultater. Dvs. i områder hvor

- det kan være krevende å oppnå homogen innblanding (f.eks. høy plastisitetsindeks)
- løsmassene har høyest vanninnhold
- løsmassene er representative for områdene på anlegget med lavest sikkerhet
- det er hentet opp løsmasser som er benyttet i de innblandingsforsøkene hvor det oppnås lavest fasthet

Oppnådd skjærfasthet og homogenitet i testpelene kan dokumenteres ved hjelp av metodene beskrevet under kapittel 8.3.

4.4 Korrelasjonsmodeller for utvikling av skjærfasthet over tid

I henhold til NS-EN 14679:2005 så skal effekten av tid (herdeprosessen) inkluderes når man vurderer effekten av stabiliseringen. Resultater fra prøver preparert i henhold til KlimaGrunns laboratorieprosedyre i Statens vegvesen (2023), benyttes for å utvikle korrelasjonsmodeller for utvikling av skjærfasthet over tid og/eller ved ulike skjærbølgeløshastigheter for de lokale grunnforholdene. Korrelasjonsmodeller kan benyttes både for prediksjon av herdeforløpet fram i tid (se kapittel 4.5), og som dokumentasjon på hvilken skjærfasthet som oppnås i de bindemiddelstabiliserte pelene ved ulike herdetidspunkt i felt. For dokumentasjon i felt, kombineres de laboratoriebaserte korrelasjonsmodellene med temperaturmålinger (se kapittel 8.3.4) og ved å utføre krysshullsseismikk (se kapittel 8.3.5) i et utvalg peler i felt. Erfaringsdata for stabiliseringsarbeider i områder med tilsvarende grunnforhold kan med fordel inkluderes i utviklingen av korrelasjonsmodellene.

Modenhetsprinsippet benyttes innen betongteknologi for å kunne sammenligne herdeforløp for betong med ulik temperaturhistorie. Sammenhengen mellom modenhetstall og temperatur for kalksementstabilisert leire ble foreslått av Åhnberg og Holm (1987). Laboratoriepreparerte prøver herder ved konstante 20 °C. I felt vil temperaturen variere med tiden. Temperaturen vil være høyest i dagene like etter installasjon, for å så synke og jevne seg ut (se kapittel 3.4). For å kunne relatere herdeforløpet i felt med korrelasjonsmodellen basert på laboratorieresultater, så knyttes verdier med samme temperaturhistorie sammen.

For å koble sammen temperaturhistorien i feltinstallerte peler og i de laboratoriepreparerte prøvene benyttes temperaturmålingene i pelen til å beregne hva herdetiden ville ha vært dersom pelen også hadde herdet ved konstante 20 °C. Til dette benyttes prinsippet om ekvivalent herdetid (t_{eq} i enten timer eller døgn) for en gitt referansetemperatur (T_{ref} som her er lik herdetemperaturen på laboratoriet, 20 °C) (Ligning 1). Ekvivalent herdetid beregnes basert på temperaturmåling i pelen for hvert tidsinkrement etter

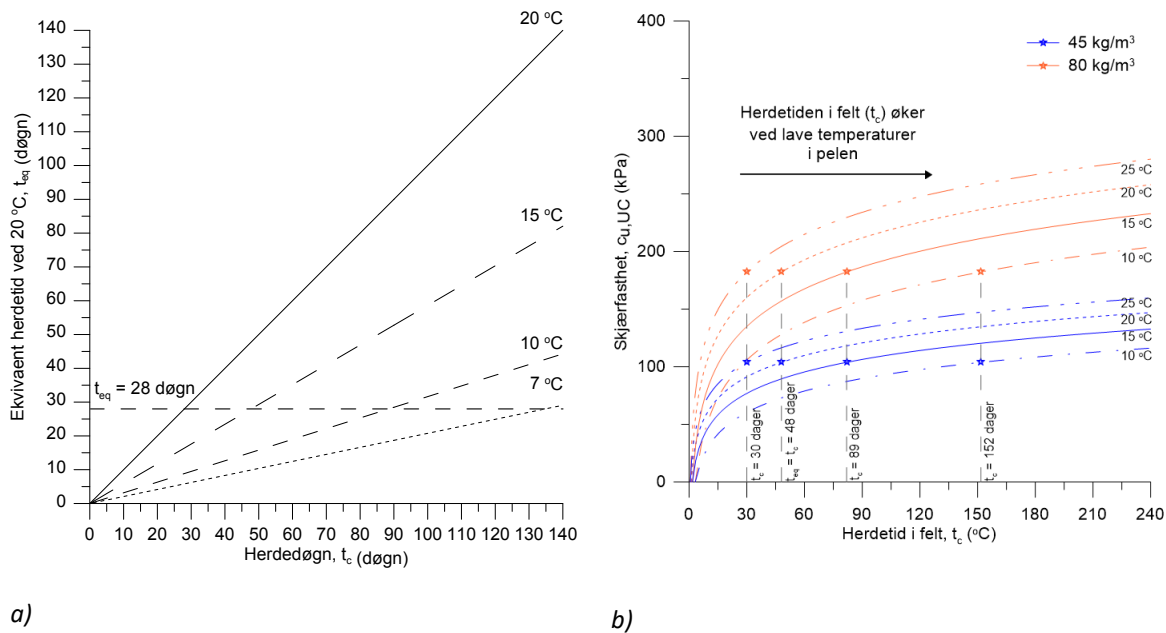
installasjon av pelen i felt (Δt_c) og verdiene summeres for å finne akkumulert t_{eq} . T_c er den faktiske herdetemperaturen i pelen ($^{\circ}\text{C}$) i det aktuelle tidsinkrementet.

$$t_{eq} = \sum \frac{(20 + 0,5 \cdot (T_c - 20))^4}{(20 + 0,5 \cdot (T_{ref} - 20))^4} \cdot \Delta t_c$$

Utleddet fra Åhnberg og Holm
(1987), modifisert etter
Vervoorn og Barros (2020)

Ligning 1

Dersom den gjennomsnittlige temperaturen i pelen er på 15°C , så tar det ca. 50 døgn å oppnå samme modenhetstall, eller temperaturhistorie, i pelen som i en laboratoriepreparert prøve som herder ved 20°C i 28 døgn (Figur 4-1).



a)

b)

Figur 4-1: a) En prøve som herder ved 7°C trenger å herde i ca. 140 døgn for å oppnå samme modenhetstall som en prøve herdet i 28 døgn ved 20°C (t_{eq}). b) Dess lavere temperatur som oppnås i pelen, dess lengre herdetid er det behov for i felt for å oppnå samme fasthet som på laboratoriet. I dette eksempelet er det tatt utgangspunkt i oppnådd skjærfasthet etter 48 døgn ved herdetemperatur 20°C ved tilsatt bindemiddelmengde 45 og 80 kg/m^3 . Herdetiden i felt for ulike temperaturer er beregnet ved å benytte Ligning 1. Åhnbergs korrelasjon i Ligning 2 er benyttet for å beregne fasthetsutviklingen. Modifisert etter Helle et al. (2024).

Korrelasjonsmodellen i Ligning 2 kan benyttes for å estimere hvilken skjærfasthet som oppnås ved ulike herdetidspunkt (Figur 4-2a). Ekvivalent herdetid benyttes inn i Ligning 2 hvor $c_{u,UC}(t_{eq})$ er enaksiell udrenert skjærfasthet (kPa) for prøver herdet ved ekvivalent herdetid, t_{eq} , ved referansetemperaturen (her 20°C). $c_{u,UC28}$ er enaksiell udrenert skjærfasthet (kPa) ved $t_{eq} = 28$ døgn.

$$\frac{c_{u,UC}(t_{eq})}{c_{u,UC28}} = 0,3 \cdot \ln(t_{eq})$$

Modifisert Åhnberg (2006)

Ligning 2

Dannewitz et al. (2005) sin korrelasjon i Ligning 3 kan benyttes for å bestemme enaksiell skjærfasthet ($c_{u,UC}$) basert på skjærbølg hastigheten (V_s i m/s) målt enten ved benderelementforsøk (Figur 4-2b) eller seismiske undersøkelser i felt (se kapittel 8.3.5).

$$c_{u,UC} = 0,0424 \cdot V_s^{1,462}$$

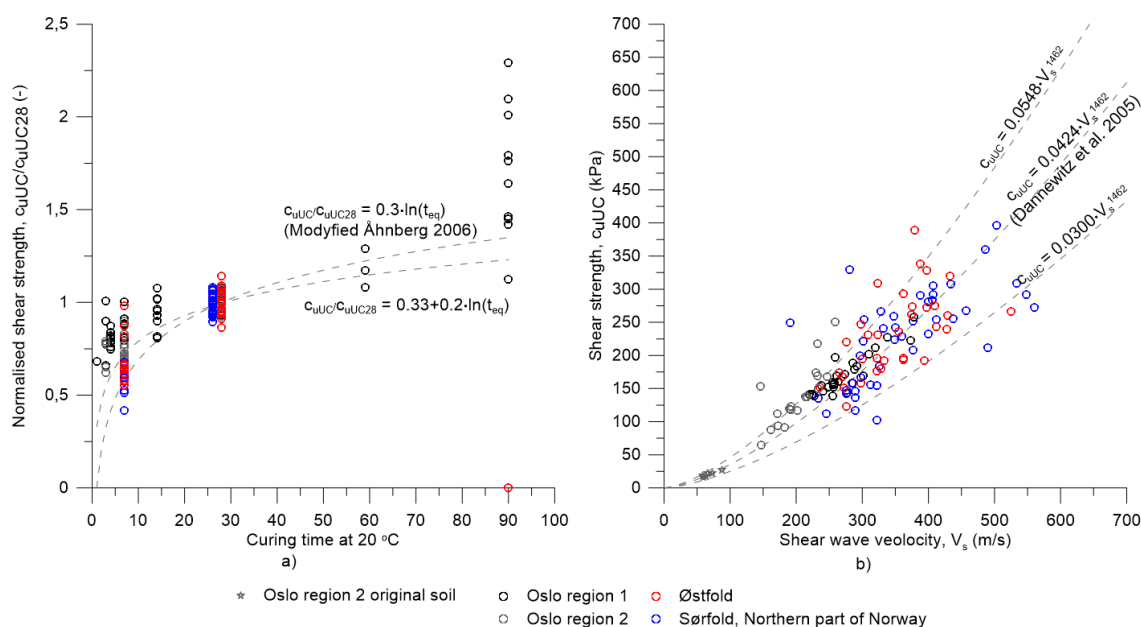
Dannewitz et al. 2005

Ligning 3

Gyldigheten av korrelasjonsmodellene og konstantene vurderes basert på tilgjengelige data fra innblandingsforsøk på laboratoriet og ev. målinger utført i testpeler i forsøksfelt.

Alle laboratoriedata som inngår i utviklingen av korrelasjonsmodellene produseres etter samme prosedyre, kvaliteten evalueres og data filtreres ut etter følgende kriterier:

- høyde/diameterforhold $1,8 \leq H/D \leq 2,1$ (Statens vegvesen 2023)
- > 5 % avvik fra bestilt densitet
- avvik mellom vanninnhold i homogeniserte løsmasser og in-situ vanninnhold
- store interne avvik i vanninnhold i sett med like prøver (bindemiddelkombinasjon og herdetid)
- avvikende spennings-tøyningsstier, og store interne avvik i oppnådd skjærfasthet i sett med like prøver (se også kapittel 5.2.2)
- store synlige horisontale sprekker eller luftlommer i herdet prøve



Figur 4-2: a) Forløp av normalisert skjærfasthet over herdetid ved 20 °C. Den nedre funksjonen viser en alternativ korrelasjonsmodell tilpasset lokale grunnforhold. b) Skjærbølgehastighet målt med benderelementforsøk korrelert til skjærfasthet. Spesialtilpassede korrelasjonsmodeller for øvre og nedre verdier vist sammen med Dannewitz et al. (2005) sin korrelasjon. Fra Helle et al. 2024.

4.5 Estimert temperaturutvikling i felt

Dersom det ikke foreligger temperaturmålinger fra felt, så kan en gjennomsnittlig temperaturutvikling i felt grovt estimeres ved hjelp av Ligning 4. Estimaten kan benyttes under prosjekteringen eller i forbindelse med framdriftsplanleggingen for anlegget for å få en indikasjon på når det er forventet at pelene i felt oppnår samme skjærfasthet som laboratorieforsøkene ved hjelp av omregning til ekvivalent herdetid (Ligning 1).

Erfaringer fra utførte datasimuleringer og temperaturmålinger (Wiersholm 2018) tilsier at man i større ribbesystem vil oppnå en forhøyet, jevn langtidstemperatur i det dypstabiliserte løsmassevolumet som ofte vedvarer over flere måneder. Basert på valgt bindemiddelkombinasjon, dekningsgrad (se kapittel 6.4) og grunnforhold kan man beregne et øvre estimat for langtidstemperaturen i senter av pel ved hjelp av Ligning 4 og Ligning 5. Forenklet kan man anta at varmetapet mot bunn- og topp av pel, samt ved ytterkant av pelesystemet er neglisjerbar, og at temperaturen utjevner seg i hele jordvolumet.

$$\Delta T = \frac{Q_u * C}{C_p * \rho} * a$$

*Bache et al. (2022)**Ligning 4*

$$C_p = (m_s C_p^s + m_w * C_p^w) / m_{tot}$$

*Andersland og Landanyi (2004)**Ligning 5*

Den totale potensielle energien som tilføres leira bidrar til en temperaturøkning i materialet (ΔT). Temperaturen øker med bindemiddelmengden (C i kg/m^3) i hver enkelt pel og den totale dekningsgraden (a), og avtar med økende spesifikk varmekapasitet (C_p i kJ/kgK) og densitet (ρ) i løsmassene. Potensiell varmetilførsel (Q_u i kJ/kg) for noen bindemidler er oppgitt i Statens vegvesen (2023). Den spesifikke varmekapasiteten til materialet vektes basert på massen av fast stoff (m_s) og masse av vann (m_w). For detaljer, se kapittel 3.2.4 i Statens vegvesen (2023).

Temperaturforløpet dokumenteres i felt for hvert prosjekt og tiltak. Temperaturmålingene i felt kan benyttes til å kontrollere estimatet og om nødvendig revurdere prosjektert løsning og/eller framdriftsplan.

5 Valg av materialparametere

5.1 Generelt

Hvilken fasthet som oppnås i bindemiddelstabiliserte peler i felt og hvor raskt fasthetsutviklingen går avhenger av flere faktorer som bl.a.:

- lagdeling og egenskaper i løsmassene
- dekningsgrad
- bindemiddelkombinasjon (type, mengde sammensetning)
- innblandingsutstyr (type visp, antall pinner, installasjonstrykk etc.)
- innblandingsarbeid (stigehøyde, rotasjonshastighet)
- herdeforhold (temperatur, tid, trykk)
- hydrogeologiske forhold (poretrykk, grunnvannsstrømmer)

I prosjekteringen kan det derfor være vanskelig å estimere hvilken fasthet som oppnås i felt. Det anbefales i første omgang å velge konservative parametere som oppdateres etter hvert som det foreligger mer dokumentasjon på de faktiske forhold. Designet modifiseres dersom dokumentasjonen på utført dypstabilisering avviker fra prosjekteringsforutsetningene.

5.2 Udrenert skjærfasthet

Det beregnes en midlere (gjennomsnittlig) direkte skjærfasthet ($c_{u,m}$) i det stabiliserte området på grunnlag av løsmassenes direkte skjærfasthet ($c_{u,k}$) og pelenes direkte skjærfasthet ($c_{u,p}$) (Ligning 6). Forsiktig anslåtte middelerverdier av skjærfastheten benyttes (jf. Kapittel 1.1.4 i V220). I beregninger benyttes den midlere direkte skjærfastheten og en anisotropifaktor på 1, da bindemiddelstabilisert materiale betraktes som isotropt.

$$c_{u,m} = a \cdot c_{u,p} + (1 - a) \cdot c_{u,k}$$

Ligning 6

hvor:

- $c_{u,m}$ = midlere direkte skjærfasthet i stabilisert jordvolum
- $c_{u,p}$ = direkte skjærfasthet i stabilisert materiale (pelen)
- $c_{u,k}$ = direkte skjærfasthet i omkringliggende løsmasser
- a = Dekningsgrad (Tabell 6-2)

I løsmassene kan man benytte enten, som følge av installasjonseffekter, en lavere skjærfasthet enn karakteristisk skjærfasthet (kapittel 5.2.1), eller en karakteristisk skjærfasthet i kombinasjon med betraktning om tøyingskompatibilitet (se kapittel 5.2.4). For valg av karakteristisk skjærfasthet (se kapittel 1.1.4 i veileder V220).

Tidspunktet for belastning av pelene og fasthetsutviklingen i herdeprosessen (se kapittel 3.4, 4.4 og 4.5) tas i betraktning ved valg av $c_{u,p}$ til dimensjoneringen. Temperaturen effekt på herdeprosessen inkluderes i vurdering av hvilken fasthet som legges til grunn i beregningene (se kapittel 4.4).

5.2.1 Skjærfasthet i løsmassene mellom pelene ($c_{u,k}$)

Installasjonsarbeidene kan medføre forstyrrelse av massene mellom pelene. I henhold til NGF (2012) så anbefales det derfor å teste løsmassene (CPTU og/eller prøvetaking) mellom pelene etter installasjon.

Dersom det benyttes maksimal skjærfasthet basert på enaksialforsøk for de bindemiddelstabiliserte pelene, og dersom informasjon om skjærfastheten mellom pelene etter installasjon ikke foreligger, så anbefales det at skjærfastheten i løsmassene mellom pelene settes lik den omrørte skjærfastheten. Dette begrunnes med

at bruddtøyningen i enaksialforsøkene på bindemiddelstabilisert materiale som oftest er langt høyere enn bruddtøyningen i høykvalitetsprøver i løsmassene. Dvs. at i en bruddtilstand så vil løsmassene gå til brudd før pelene, og løsmassene vil dermed ha lavere skjærfasthet etter brudd enn den karakteristiske skjærfastheten. Dersom man likevel velger å benytte karakteristisk, direkte skjærfasthet (jf. kapittel 1.1.4 i veileder V220) for løsmassene mellom pelene så inkluderes betraktningen om tøyningsskompatibilitet (se informasjon i kapittel 5.2.4), og det benyttes et forsiktig anslag av karakteristisk verdi for direkte skjærfasthet i løsmassene og pelen.

Karakteristisk, direkte skjærfasthet i løsmassene mellom pelene kan benyttes dersom disse er dokumentert med grunnundersøkelser etter installasjon av peler i områder med representative grunnforhold som f.eks. i forsøksfeltet (se kapittel 4.3).

5.2.2 Skjærfasthet i bindemiddelstabilisert materiale ($c_{u,p}$).

Skjærfastheten i bindemiddelstabilisert materiale bestemmes fra laboratorieforsøk (se kapittel 4.2.3) eller in-situ tester (se kapittel 8.3) i kombinasjon med en vurdering av styrketak (se Tabell 5-1).

For å bestemme skjærfastheten basert på laboratorieforsøk så prepareres som oftest flere like prøver (2-3 stk.) med lik bindemiddelkombinasjon og lik herdetid. Skjærfastheten for innblandingsforsøk tolkes ofte som gjennomsnittet av den maksimale skjærfastheten som oppnås i enaksialforsøkene på disse «like» prøvene. Resultatene som benyttes til beregning av gjennomsnittsverdi tas fra prøver som har vært preparert til ca. samme densitet.

Ofte har to av tre «like» prøver nokså lik skjærfasthet. Dersom skjærfastheten til den tredje prøven er svært ulik de to andre prøvene, så vil dette resultatet kunne gi en uforholdsmessig stor innvirkning på gjennomsnittsverdien. Det anbefales at dersom det ene resultatet avviker fra de to andre (> 15 % fra median), ses resultatet i sammenheng med eventuelle andre avvik (se kapittel 4.4). Resultatet utelates dersom prøven har langt høyere fasthet enn de to andre (konservativ tolking). Dersom prøven med avvikende resultat er tydelig svakere grunnet prepareringen, så kan dette resultatet utelates selv om dette medfører en mindre konservativ tolking.

Ved beregning av $c_{u,p}$ basert på resultater fra in-situ tester benyttes en midlere direkte skjærfasthet.

5.2.3 Styrketak

Som utgangspunkt for prosjekter i regi av Statens vegvesen benyttes styrketak for skjærfasthet i herdete peler avhengig av installasjonsmønster som vist i Tabell 5-1. Styrketakene er i utgangspunktet basert på skjærfasthet etter 28 døgn, men er ofte konservative sammenlignet med oppnådd skjærfasthet i feltinstallerte peler. Styrketakene kan avvikes (se under), men ved å benytte konservative verdier reduseres noe av usikkerhetene knyttet til utførelsen som f.eks. retningsavvik, inhomogen innblanding osv.

Styrketakene i Tabell 5-1 vurderes opp mot verdier av skjærfasthet fra innblandingsforsøk på laboratoriet. Skjærfastheten som benyttes for pelene reduseres hvis laboratorieresultatene viser lavere verdier enn det som forutsettes ved aktuelt tidspunkt for oppstart av anleggsarbeidene (se Ligning 1). Eventuelt kan man legge opp til at anleggsarbeidene utsettes til tilstrekkelig skjærfasthet oppnås.

Høyere skjærfasthet enn i styrketakene kan anvendes dersom det dokumenteres at det i felt oppnås høyere verdier på det tidspunkt pelene belastes, og at pelene er homogene og sammenhengende over hele dybden for ribber, gitter og blokk.

Vegnormal N200:2024 stiller krav (krav 1.11.6-4) til at det skal testpeles for store prosjekter (se kapittel 4.3), og at dimensjoneringen baseres på fastheten som oppnås i felt (se kapittel 8.3) ved herdetidspunkt tilsvarende tidspunkt for utgraving eller pålasting.

Tabell 5-1: Styrketak for skjærfasthet avhengig av pelekombinasjoner (ref. Statens vegvesen 2014).

Pelekombinasjoner	Styrketak for skjærfasthet, $C_{u,p}$ kPa
Enkeltpel	100
Enkel ribbe	150
Dobbel ribbe	175
Gitter enkle/doble ribber	150/175
Blokk	200

5.2.4 Tøyningskompatibilitet

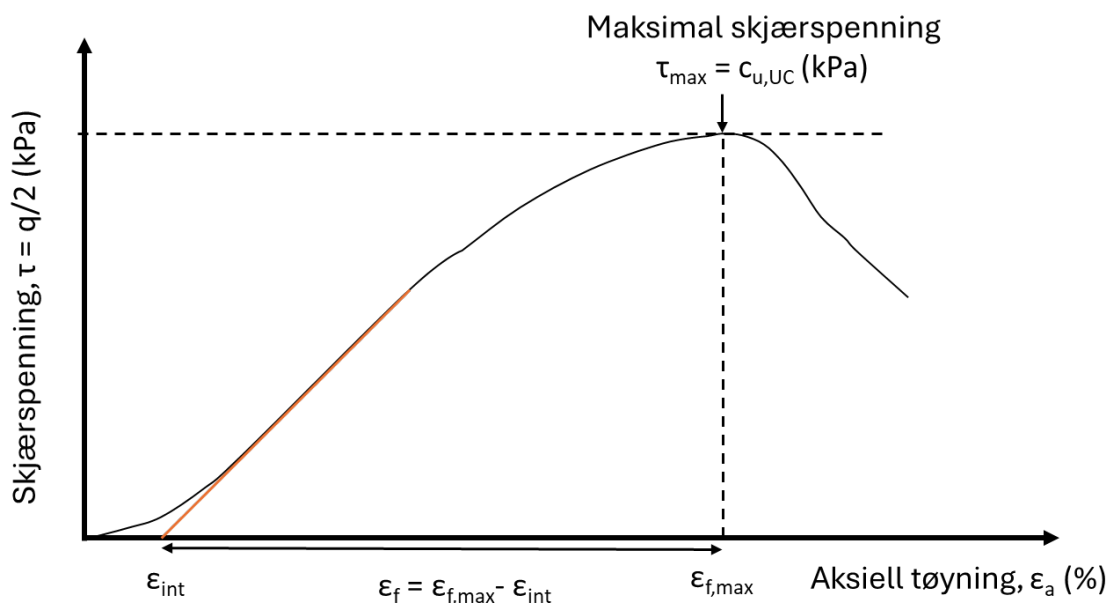
Tøyningskompatibilitet kan tas med i betraktningen ved valg av skjærfasthet i løsmassene og i stabilisert materiale. Treaksialforsøk på høykvalitetsprøver fra leire går som oftest til brudd ved en tøying $< 2\%$. Kvikkleirer har ofte en bruddtøying rundt $0,5\%$. Enaksialforsøkene viser ofte høyere bruddtøying enn i treaksialforsøkene. Enaksialforsøkene på bindemiddelstabiliserte prøver viser ofte at bruddtøyingene er høye i starten av herdeforløpet, og at disse avtar utover i herdeforløpet.

Det anbefales å utføre sensitivitetsstudium der mobilisert skjærspenning tolkes ved ulike tøyninger (f.eks. 1, 2 og 3 %) for de ulike materialene (se også kapittel 5.3). Gjennomsnittlig skjærfasthet regnes deretter ut for jordvolumet for disse ulike tøyningene.

Det kjøres som oftest enaksialforsøk på bindemiddelstabiliserte laboratoriepreparerte prøver. Disse er ikke konsoliderte. Pelene i felt konsolideres som følge av overlagingen. Dermed er det nærliggende å tro at stivheten er større enn det som fremkommer fra spennings-tøyningskurvene fra enaksialforsøkene. Slik sett kan man anta at det mobiliseres høyere skjærspenninger enn det som hentes ut fra enaksialforsøkene ved ulike tøyninger.

5.3 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodulen (E_{50}) bestemmes fra enten enaksial- eller treaksialforsøk. I enaksialforsøk på bindemiddelstabiliserte prøver observeres ofte en svært myk respons i starten av forsøket (Figur 5-1). Bruddtøyingen (ϵ_f) beregnes ved å trekke fra tøyingen som oppstår i starten (ϵ_{int}) fra den aksielle tøyingen ved maksimal skjærspenning ($\epsilon_{f,max}$) (se Figur 5-1 og Figur 3.5.1 i NGF 2012). Ved betraktninger rundt tøyningskompatibilitet forskyves spennings-tøyningskurven tilsvarende den initielle tøyingen før mobilisert skjærspenning tolkes for ulike tøyninger.



Figur 5-1: Bruddtøyningen (ϵ_f) beregnes ved å trekke fra tøyningen som oppstår i starten (ϵ_{int}) fra aksial tøyning ved maksimal skjærspenning ($\epsilon_{f,max}$). I enaksialforsøk beregnes maksimal skjærspenning som halvparten av enaksial trykkfasthet (q_u).

5.4 Permeabilitet

Permeabiliteten i løsmassene og bindemiddelstabilisert materiale påvirker hvor raskt setninger utvikler seg. Permeabiliteten påvirkes av installasjonsarbeidene og tilsatt bindemiddel med påfølgende herdeprosess. I henhold til EuroSoilStab (2002) og Åhnberg (2006) viser tidligere utførte forskningsprosjekter stor variasjon i målt permeabilitet i bindemiddelstabiliserte peler. Mens resultatene fra noen forsøk viser at permeabiliteten øker opptil 100-1000 ganger sammenlignet med permeabiliteten i in-situ leire, viser andre forsøk redusert permeabilitet. Forskjellene antas å skyldes at testene er utført med ulike testmetoder som alle har ulike begrensninger. I felt antas det at permeabiliteten vil bli påvirket av faktorer som ujevn fordeling av bindemiddel og mikrosprekker i pelene. I tillegg kan man anta at det vil oppstå en mer permeabel sone i senter av pelen, der hvor borstangen er blitt dratt opp (Åhnberg 2006).

Permeabiliteten som måles i laboratoriet er ikke representativ for permeabiliteten som oppnås i felt, hvor man antar at makrostrukturen til pelene har størst betydning for faktisk permeabilitet. Det anbefales å måle permeabiliteten i felt. Det foreligger imidlertid ingen kjente gode testmetoder for å utføre permeabilitetstester i bindemiddelstabiliserte peler i felt.

6 Beregninger

6.1 Generelt

Dette kapittelet gir kun supplerende informasjon til kapittelet om beregninger/dimensjonering i foreliggende Veiledning V221 (Statens vegvesen 2014).

Det er ikke nødvendigvis samsvar mellom materialparameterne som legges til grunn i prosjekteringen og hva som oppnås i felt. Design av dypstabilisering i større prosjekt kan dermed ses på som en iterativ prosess der prosjekterende også involveres under utførelse slik at prosjekteringsforutsetninger og design om nødvendig oppdateres fortløpende.

Viktige elementer ved utførelsen som anbefales vurdert som del av prosjekteringen:

- tillatt marktrykk for rigg
- stabilitet/bæreevne for anleggsvei/adkomstvei
- stabilitet/bæreevne for riggplass
- poretrykksøkning og deformasjoner under installasjon
- rekkefølgebestemmelser for installasjonsarbeidene
- utarbeide plan for kontroll av utførelse

Det anbefales at dimensjoneringen resulterer i en peleplan/modell som inneholder:

- antall peler
- pelediameter
- pelelengder
- installasjonsmønster og detalj for ev. skjøt (se Tabell 6-2)
- bindemiddeltype
- mengde bindemiddel (kg/m^3 og kg/lm)
- tidspunkt for pålasting eller utgraving
- ev. spesielle forutsetninger
 - rekkefølgebestemmelser for installasjon
 - grave-/oppfyllingsrekkefølge
 - forbelastning
 - grenseverdier for maksimalt tillatt poretrykksøkning
 - plan for overvåking av poretrykk og deformasjoner

6.2 Telefarlighetsklasse og bæreevnegruppe

Tabell 3.1.3.1-2 i N200:2024 angir ikke telefarlighetsklasse eller bæreevnegruppe for bindemiddelstabiliserte masser. Det finnes lite tilgjengelig informasjon om permeabiliteten og innvirkning av fryse-/tinesykluser på bindemiddelstabiliserte masser.

I Tabell 3.3.3-1 i vegnormal N200:2024 oppgis telefarlighetsklasser og bæreevnegrupper for ulike løsmassetypene med tilhørende veiledende materialparametere. Bindemiddelstabiliserte masser kan klassifiseres som silt og leire med skjærfasthet høyere enn 50 kPa. Her oppgis telefarlighetsklasse T4 og bæreevnegruppe 6 for silt og leire uavhengig av skjærfasthet.

Ved valg av tykkelse på forsterkningslag i henhold til Tabell 3.3.3-1 i vegnormal N200:2024 benyttes en vekting av stabiliserte og ustabiliserte masser.

6.3 Stabilitet og poretrykk

Som del av prosjekteringen utføres følsomhetsstudier av stabiliteten av skråningen for å bestemme grenseverdier for maksimalt tillatt poretrykksøkning. Grenseverdien bestemmes basert på stabilitetsberegninger ved å inkludere økt poretrykk i beregninger på effektivspenningsbasis og dets negative innvirkning på den udrenerte skjærfastheten som benyttes i beregningene på totalspenningsbasis. Innvirkningen på udrenert skjærfasthet kan f.eks. gjøres ved en SHANSEP (stress history and normalized soil engineering properties) betraktning (Ladd og Foott 1974, Hernandez-Martinez 2013).

Grunnforholdene påvirker influensområdet for økte poretrykk. Permeable lag i grunnen kan medføre at installasjonstrykket (se kapittel 7.4.2) som benyttes under installasjon sprer seg langs disse lagene og potensielt forårsaker forhøyede poretrykk over et større område.

Poreovertrykk og influensområde som følge av installasjon kan med fordel modelleres i programmer basert på Finite Element Method (FEM) (Skoglund 2019). Både lokale og globale bruddsituasjoner betraktes. Grenseverdien benyttes under oppfølging av installasjonsarbeidene (se kapittel 7.3).

Oppbygging av poreovertrykk over store områder kan unngås ved å planlegge hvilken rekkefølge pelene, eller ribbene, installeres i. I rekkefølgebestemmelsene spesifiseres det at riggen etter å ha installert f.eks. en ribbe flyttes og installerer en ny ribbe i stor avstand fra den første, og flyttes tilbake først når poreovertrykket i nærheten av den første ribben har dissipert.

Skjærfastheten i selve pelene øker imidlertid med tiden slik at den midlere skjærfastheten for hele jordvolumet etter hvert vil øke samtidig som at poreovertrykket dissiperer. Grunnforholdene påvirker størrelsen på influensområdet og hvor lang tid det tar å redusere poreovertrykket. I tillegg kan dissipasjonshastigheten variere over dybden. Poretrykksmålere med fjernavlesning og minne installeres derfor spredt over et større område og ved ulike dybder. I skråninger installeres helningsmålere med fjernavlesning for å kunne oppdage begynnende bruddutvikling.

Installasjon av vertikaldren før installasjonsarbeidene starter kan også redusere oppbygging av poreovertrykk. Vertikaldren installeres i områdene mellom planlagte bindemiddelstabiliserte peler. Se f.eks. Statens vegvesen (2007), NGI (2009) og Karlsrud (2015).

6.4 Installasjonsmønster og dekningsgrad

Temperaturutviklingen og fasthetsutviklingen påvirkes bl.a. av hvor stor andel av jordvolumet som er tilsatt bindemiddel. Bindemiddelstabiliserte peler installeres i ulike mønstre tilpasset formålet (Tabell 6-2). For utfyllende informasjon om bruksområder, se NGF (2012).

Vegnormal N200:2024 stiller krav til maksimal senteravstand (c) som er basert på erfaringer (jf. Krav 1.11.6-5). Senteravstand fastsettes slik at brudd i leira mellom pelene unngås og for å sikre framkommelighet av rigg og anleggsmaskiner under installasjonsarbeidene. Dekningsgraden (α = stabilisert jordvolum/totalt jordvolum) bestemmes basert på geometri. Dvs. at det tas hensyn til diameter (se kapittel 7.4.1) og ev. overlapping (Tabell 6-1). Effektiv bredde (b_{eff}), dvs. bredden hvor det er full kontakt mellom pelene, benyttes i prosjektering av ribber og gitter.

Overlapp settes enten etter anbefalinger i Tabell 6-1, eller som minimum 100 mm eller 20 % av pelens diameter. Større overlapp enn 100 mm kan være vanskelig å oppnå dersom innblandingmengden er høy da dette medfører rask fasthetsoppbygging. Horisontalavvik over pelens dybde kan forekomme (se kapittel 7.4.4). Dette er spesielt kritisk for ribber og gitter hvor pelene skal være sammenhengende. Prosjektet løsnings forutsetter at anbefalingene til maksimale avvik fra ansett og horisontalen er oppfylt (se kapittel 7.4.4).

Prosjekterende er ansvarlig for å utarbeide detalj for skjøtemetode som ved behov benyttes av entreprenør. Skjøting er nødvendig dersom installasjonsarbeidene stopper opp som følge av driftsstans eller pause i arbeidene (natt/helg/rekkefølgebestemmelser) slik at fastheten i pelene øker og man derfor ikke klarer å installere pelene med overlapp. Se detalj i Tabell 6-2.

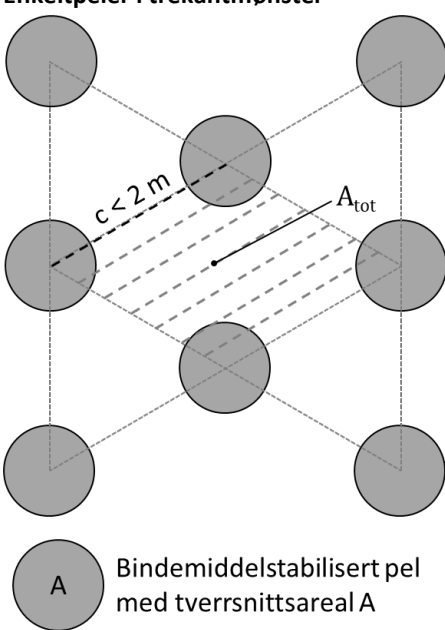
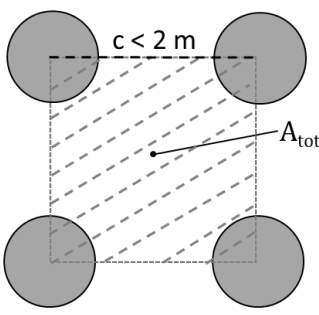
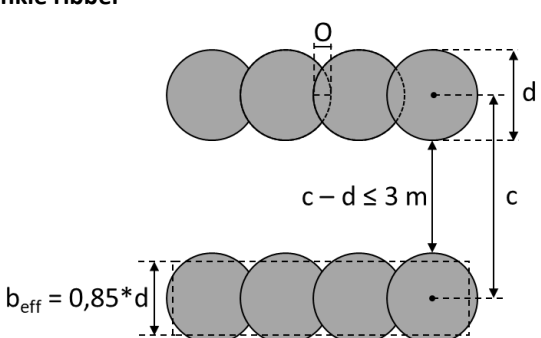
Tabell 6-1: Anbefalt overlapp avhengig av pelediameter (ref. Statens vegvesen 2014).

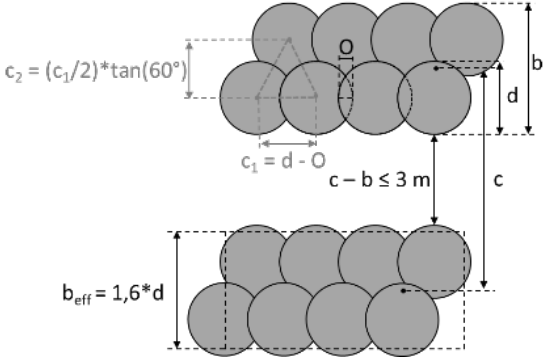
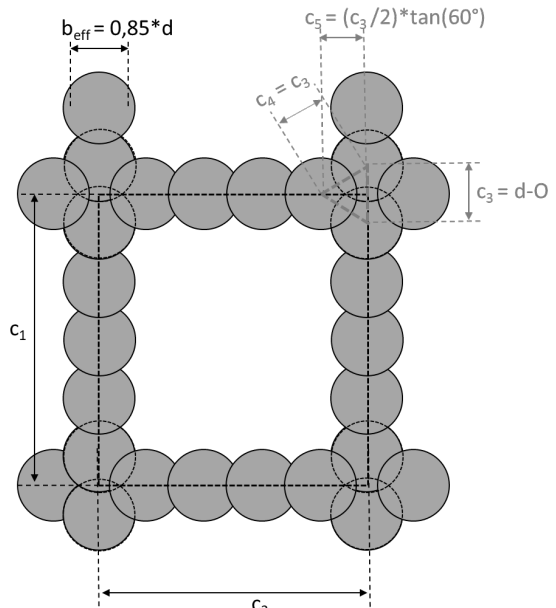
Pelediameter m	Senteravstand peler m	Minimum overlapp m
0,5	0,40	0,10
0,6	0,45	0,15
0,7	0,55	0,15
0,8	0,65	0,15

6.5 Vibrasjonsdemping

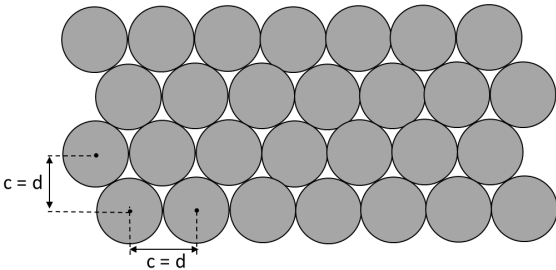
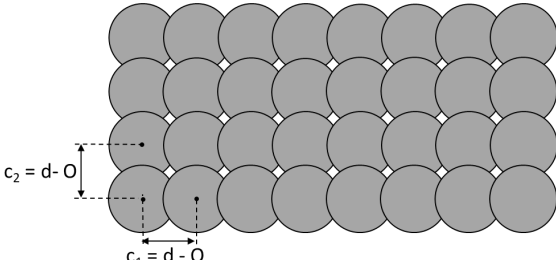
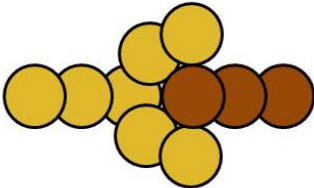
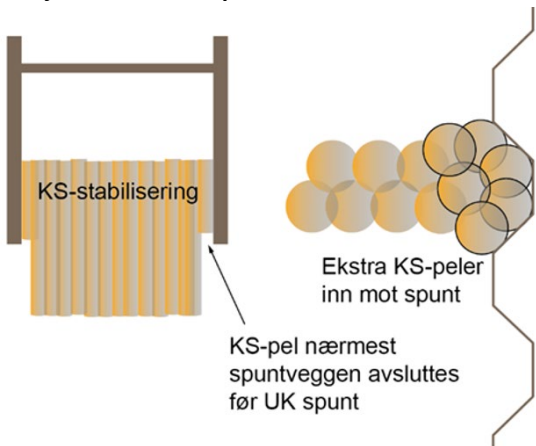
Bindemiddelstabiliserte peler benyttes også for å dempe virkningen av vibrasjoner fra samferdsel (veg, jernbane) enten som en avstivning av grunnen under vegen/banen, eller som en barriere mellom kilden og konstruksjonen som skal skjermes. For utdypende informasjon, se NGF (2012).

Tabell 6-2: Vanlige installasjonsmønstre for bindemiddelstabiliserte peler med anbefalte maksimale senteravstander (c) og bruksområder, og formler for utregning av dekningsgrad (a) og effektiv bredde (b_{eff}) av ribber.

Installasjonsmønstre	Dekningsgrad, anbefalinger og bruksområder
Enkeltpeler i trekantmønstre  A Bindemiddelstabilisert pel med tverrsnittsareal A	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{tot}} = \frac{2 \cdot A}{\sqrt{3} \cdot c^2}$ Anbefalinger Senteravstand mindre enn 2 m Bruksområder Reduksjon av setninger Stabilisering under fylling
Enkeltpeler i firkantmønstre 	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{tot}} = \frac{A}{c^2}$ Anbefalinger Senteravstand mindre enn 2 m Bruksområder Reduksjon av setninger Stabilisering under fylling
Enkle ribber  $b_{eff} = 0,85 \cdot d$	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{tot}} = \frac{0,85 \cdot d}{c}$ Anbefalinger Største åpning mellom ribbene er mindre enn 3 m* og ***. Effektiv bredde av ribben benyttes i prosjekteringen. Bruksområder Stabilisere skjæringer, fyllinger og naturlige skråninger** Avstiving av byggegroper Grøftesikring Sikring av skredgrop Vibrasjonsdemping som barriere

Installasjonsmønster	Dekningsgrad, anbefalinger og bruksområder
Doble ribber  $c_2 = (c_1/2) \cdot \tan(60^\circ)$ $c_1 = d - O$ $c - b \leq 3 \text{ m}$ $b_{\text{eff}} = 1,6 \cdot d$	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{\text{tot}}} = \frac{1,6 \cdot d}{c}$ Anbefalinger Installeres i trekantkonfigurasjon for å unngå svakhetssoner mellom pelene. Største åpning mellom ribbene er mindre enn 3 m* og ***. Effektiv bredde av ribben benyttes i prosjekteringen. Bruksområder Stabilisere skjæringer, fyllinger og naturlige skrånninger** Avstiving av byggegrop Grøftesikring Sikring av skredgrop Vibrasjonsdemping som barriere
Gitter med enkle ribber  $b_{\text{eff}} = 0,85 \cdot d$ $c_3 = (c_2/2) \cdot \tan(60^\circ)$ $c_3 = d - O$ c_1 c_2	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{\text{tot}}} = \frac{0,85 \cdot d \cdot (c_1 + (c_2 - 0,85 \cdot d))}{c_1 \cdot c_2}$ Anbefalinger Største åpning mellom ribbene er mindre enn 3 m* og ***. Effektiv bredde av ribben benyttes i prosjekteringen. Pelene i kontaktpunktene mellom ribbene tilstrebes å settes i trekantkonfigurasjon Bruksområder Avstiving av byggegrop Grøftesikring Vibrasjonsdemping

Installasjonsmønster	Dekningsgrad, anbefalinger og bruksområder
Gitter med doble ribber	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{tot}} = \frac{1,6 \cdot d \cdot (c_1 + (c_2 - 1,6 \cdot d))}{c_1 \cdot c_2}$ Anbefalinger Største åpning mellom ribbene er mindre enn 3 m* og ***. Effektiv bredde av ribben benyttes i prosjekteringen. Pelene i kontaktpunktene mellom ribbene tilstrebes å settes i trekantkonfigurasjon Bruksområder Avstiving av byggegrop Grøftesikring
Gitter med doble og enkle ribber	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{tot}} = \frac{d \cdot (1,6 \cdot c_1 + 0,85 \cdot (c_2 - 1,6 \cdot d))}{c_1 \cdot c_2}$ Anbefalinger Største åpning mellom ribbene er mindre enn 3 m* og ***. Effektiv bredde av ribben benyttes i prosjekteringen. Pelene i kontaktpunktene mellom ribbene tilstrebes å settes i trekantkonfigurasjon Bruksområder Avstiving av byggegrop Grøftesikring

Installasjonsmønster	Dekningsgrad, anbefalinger og bruksområder
Blokk uten overlapp  Blokk med overlapp 	Dekningsgrad $a = \frac{A}{A_{tot}} \approx 1$ Anbefalinger Overlapp er ikke nødvendig dersom pelene installeres i trekantkonfigurasjon. Blokk med overlapp i firkantkonfigurasjon fører til større antall peler og høyere totale bindemiddelmengder. Bruksområder Grøftesikring Byggegropsikring Jordavstivning Direktefundamentering
Detalj: Skjøting av ribbe  Ref. NGF (2012) og Norcem (2006) Detalj: Kontakt mot spunt  Ref. Brendbekken (2023)	Anbefalinger Detaljer utarbeides for hvordan ribber skjøtes ved opphold under installasjon, og for hvordan kontakt mot spunt oppnås. Sennepsgule peler viser hvordan ribben skjøtes. Pelene som er i direkte kontakt med spunt avsluttes før underkanten av spunten for å unngå at vispen hefter seg fast i spunten når den trekkes opp. Bruksområder Grøftesikring Byggegropsikring
* For å sikre framkommelighet for anleggsmaskiner, anbefales enda mindre åpning ** Det anbefales å installere pelene i ribbene til ulike dybder for å unngå et sammenhengende svakt sjikt i bunnen/underkant av ribben *** For å unngå at det blir brudd i leira mellom ribber, så kan man installere gitter med ribber som overholder anbefalt maksimal senteravstand, men tillate større avstand mellom tversgående ribber.	

7 Planlegging av utførelse

7.1 Generelt

Før oppstart gjennomføres det oppstartsmøte hvor prosjekterende, byggeleder og utførende er til stede for å sikre god informasjonsoverføring, belyse ev. rekkefølgekrav for installasjon, overvåking av poretrykk og deformasjoner (se kapittel 7.3), spesielle utfordringer og avbøtende tiltak.

7.2 Helse, miljø og sikkerhet (HMS)

Prosjekterende er ansvarlig for å vurdere risiko for arbeidene og vurdere nødvendige HMS tiltak på anlegget og for ev. influensområder (jf. krav 1-4 i vegnormal N200:2024). Entreprenør er ansvarlig for HMS på anlegget.

Prosjekterende anbefales å undersøke at bæreevnen for riggen er ivaretatt for å unngå velt av rigg under installasjonsarbeidene (kapittel 8.2 i EN 14679:2005).

Produktdatablad for alle bindemidler gjøres tilgjengelig på anlegget.

I tettbygde strøk anbefales skjerming med tette gjerder for å hindre at bindemiddelstøv spres i omgivelsene.

Ulesket kalk og sement er kjemisk etsende materialer. Unngå all kontakt med hud, slimhinner, øyne og innånding. Kabin med overtrykk anbefales i riggene og ev. andre anleggsmaskiner i nærheten. På grunnlag av bindemidlenes etsende evne anbefales det å stille strenge krav for å sikre arbeidstakere, naboer og forbipasserende ved arbeider med dypstabilisering.

Når ulesket kalk kommer i kontakt med vann eller fukt, oppstår en umiddelbar kjemisk reaksjon. Sement og kalk oppbevares tørt i lukkede beholdere som er tydelig merket.

Støv fra bindemidler som kommer i kontakt med fuktighet virker etsende også på materialer. Billakk, vinduer og andre overflater mattes dersom støvlag av kalk fuktes f.eks. av regn og dugg.

For å begrense utblåsing av bindemidler avsluttes pelingen minimum 0,5 m under terreng.

Sterkt basisk overvann fra anleggsområdet sikres og ev. nøytraliseres før det når ut i vassdrag.

7.3 Overvåking av poretrykk og deformasjoner

Som oftest observeres det raskt økende poretrykk i omkringliggende løsmasser som følge av installasjonsarbeidene. Dette kan svekke stabiliteten midlertidig i området. I situasjoner hvor det er risiko for at sikkerheten svekkes grunnet poreovertrykk installeres poretrykksmålere med minne og fjernovervåking over hele området som grunnforsterkes. Poretrykksmålere plasseres tett på installasjonsarbeidene, f.eks. mellom ribber og til ulike dybder. Poretrykksmålingene dokumenteres før, under og etter installasjon og frem til poretrykket har utjevnet seg.

Det anbefales å også installere poretrykksmålere i tilgrensende områder hvor stabiliteten kan påvirkes negativt ved poretrykksøkning. I skråninger installeres helningsmålere med fjernavlesning. For å sikre stabile referanseverdier, installeres instrumentene i god tid før oppstart av installasjonsarbeidene.

Måleverdiene følges opp kontinuerlig, og hele området vurderes basert på alle målingene da stabiliteten kan være tilstrekkelig selv om én måler viser forhøyet poreovertrykk. Arbeidene stanses dersom poretrykket når eller øker raskt opp mot grenseverdiene fastsatt under prosjekteringen (se kapittel 6.3), og/eller det oppstår deformasjoner. Stans i arbeidene kan unngås ved å legge inn rekkefølgebestemmelser for installasjonen av de bindemiddelstabiliserte pelene (se kapittel 6.3).

Setninger og horisontaldeformasjoner av grunn og konstruksjoner i tilstøtende arealer kan inntreffe og områder og konstruksjoner hvor dette kan være av betydning overvåkes. Helnings- og/eller deformasjonsmålere kan installeres for å avdekke begynnende bruddutvikling eller utvikling av setninger.

Poreovertrykk kan minimeres ved at lufttrykket får mulighet til å evakuere opp gjennom borhullet under installasjon. Rigger med borstreng bestående av firkanttrør er å foretrekke, da lufttrykket vil kunne evakuere via hulrommet etter borstrengen. Dette er ikke mulig dersom borstrengen er rund.

7.4 Bindemiddelstabiliserte peler - tørrmiksing

7.4.1 Utstyr

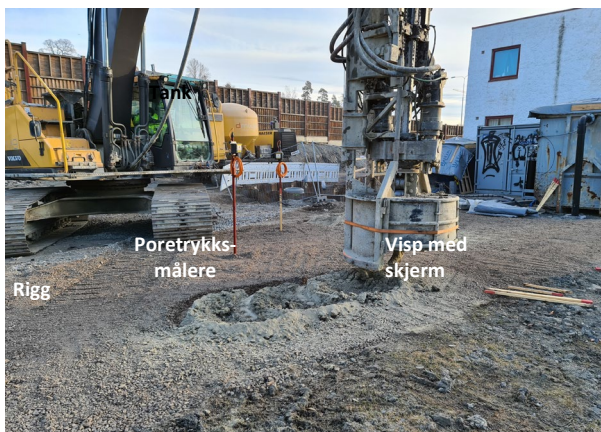
Maskinene som benyttes består av en rigg med bortårn, borstang og visp, og en trykksatt tank med tørt bindemiddel (Figur 7-1). Bortårnets høyde kan være opp til 25 m, og riggenes vekt kan variere i størrelsesorden 30-55 tonn. Hvilket beltetrykk som oppstår avklares med entreprenør. Borstangen er hul for tilføring av bindemiddel som blåses med lufttrykk ut i grunnen gjennom et utblåsningshull i vispen. Bindemiddelet blandes mekanisk inn i løsmassene ved at vispen roteres samtidig som borstangen dras opp av borhullet. Se kapittel 7.3 for effekten som utforming av borstang har på poretrykket.

Det er vispens dimensjon som avgjør diameteren på produsert pel. Det benyttes visper som gir pelediametere fra 0,5-1,0 m, men som oftest benyttes diametere på 0,6 eller 0,8 m. Det er enklere å få bindemiddelet ut i hele pelens diameter ved mindre diametere. Derfor anbefaler enkelte at konstruktive peler, som f.eks. i byggegrop, heller har diameter 0,6 m enn 0,8 m.

Vispene vil som ny ha en diameter litt større enn foreskrevet pelediameter (+ 1-2 cm), men diameteren reduseres ved bruk på grunn av slitasje. Vispen byttes ut når diameteren er mindre enn pelediameteren (- 1-2 cm). De fleste entreprenører har sine egne vispetyper og noen av disse er patenterte, men det finnes ingen standard for visper. Vanlig utforming av pinnevisp er vist på Figur 7-1.



a)

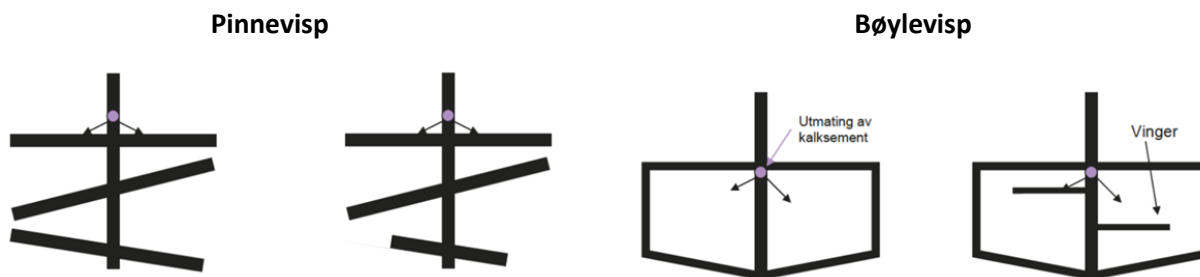


b)

Figur 7-1: a) Eksempel på pinnevisp med 6 pinner i tre nivåer. De øverste pinnene er lengst og plassert i nivå med hullet hvor bindemiddelet blåses ut. Foto: T.E. Helle, Multiconsult. b) Installasjon av bindemiddelstabiliserte peler i ribbe. Poretrykksmålere er plassert nær ribben (stigerørene med ledninger ses mellom bortårn og rigg). Rigger består av en boremaskin med bortårn og trykksatt tank med bindemiddel. Foto: S. Giese, Multiconsult.

De fleste entreprenørene benytter i dag pinnevisp med 6 eller 8 pinner i ulike nivåer (ofte 3-4 nivåer). Hullet for utblåsing av bindemiddel er som oftest plassert i senter av vispen i nivå med de øverste vingene (Figur 7-1 og Figur 7-2). De dypeste vingene kan være noe kortere enn de øvrige pinnene for å redusere motstanden under nedføring av vispen. Ved samme rotasjonshastighet og stighøyde vil en visp med større

antall vinger kunne medføre større omrøring av løsmassene og slik sett en jevnere innblanding av bindemiddelet i hele pelens dybde og tverrsnitt (se kapittel 7.4.5). Det anbefales å benytte visp hvor vingene monteres på skrå på midstangen for å sørge for større omrøring av massene.



Figur 7-2: Eksempler på utforming av visper (Modifisert etter NGF 2012 og Norcem 2006).

7.4.2 Installasjonstrykk, cellemater og strømningshastighet

Tanken med bindemiddel er trykksatt (Figur 7-1). Det tar lang tid å justere og stabilisere trykket på tanken, og dette installasjonstrykket (også kalt matetrykk) holdes derfor konstant under installasjonen. Installasjonstrykket for utblåsing av bindemiddel bestemmes av maskinføreren, og avhenger av hvilket trykk det er i løsmassene i dybden. Dette for å sikre at det er mulig å blåse bindemiddelet ut også ved høyt mottrykk. Dvs. at installasjonstrykket er større i områder med dype peler, enn i områder med grunne peler. Maskinfører begrenser trykknivået mest mulig slik at jordmassene rundt pelen forstyrres i minst mulig grad. Vanlige trykk er:

- 10 m dybde 3-4 bar
- 20 m dybde 6–10 bar

Ved utløpet av tanken sitter en cellemater som roterer og fører bindemiddelet fra tanken og ut i borstrengen. Cellemateren sikrer kontinuerlig strøm av bindemiddel for hastigheter i størrelsesorden 1-3 kg/s. Installasjonstrykket justeres sammen med hastigheten på cellemateren under innkjøringen av riggen. Hastigheten på cellemateren i tillegg til hastigheten på luften som blåses inn i borstrengen avgjør hvor mye bindemiddel som blåses gjennom borstrengen. Strømningen av bindemiddelet tilpasses slik at tilpropping av systemet unngås, og at det tilsettes tilstrekkelig mengde med bindemiddel for å oppnå homogen pel. Se kapittel 7.4.7 for hvordan bindemiddelmengden kan justeres med tilgjengelige styringsparametere.

7.4.3 Installasjonsdybde

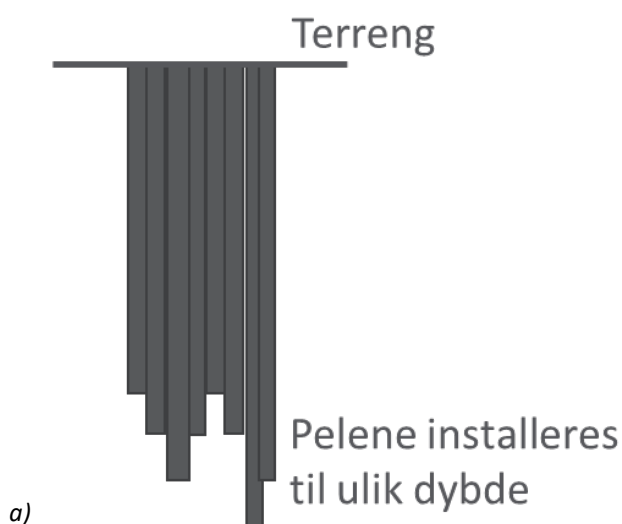
Avhengig av dimensjoneringen settes pelene til berg/fast grunn eller avsluttes i løsmasser ved valgt dybde. Lengden på borstangen begrenser mulig pelelengde (som oftest 20 m og maksimalt 25 m).

Bindemiddelet blåses ut gjennom et utblåsningshull i toppen av vispen (Figur 7-1a og Figur 7-2). Dette medfører at når vispen når ønsket dybde, så blandes ikke bindemiddelet like godt inn i den dypeste delen av pelen og det oppstår dermed et svakt sjikt i bunnen av pelen. Det anbefales derfor å spesifisere at det bores såpass dypt at utblåsningshullet havner i nivå med angitt dybde for bunn av pel. Dersom pelene avsluttes i løsmasser så kan pelene avsluttes ved ulik dybde (fortanning) slik at man unngår at det dannes et kontinuerlig svakere lag under pelene (Figur 7-3a). Ev. kan borstangen føres opp og ned et par ganger med påsatt rotasjon ved pelefoten for å sørge for god innblanding i hele den borede dybden.

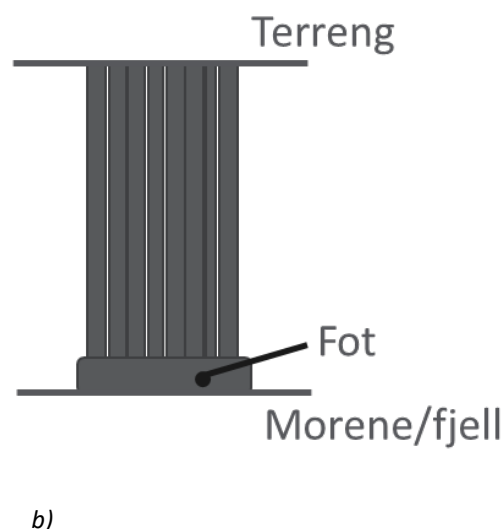
Dersom pelene avsluttes mot fast lag (morene/fjell) så anbefales det at vispen føres opp og ned flere ganger i den dypeste delen, eller ved å la vispen rotere samtidig over et lengre tidsrom i samme nivå, mens det spyles ut bindemiddel slik at det dannes en «fot» i bunnen av pelen (Figur 7-3b). Prosedyre for utforming av en god pelefoot bør avklares med entreprenør.

For å unngå utblåsing av bindemiddel stenges installasjonstrykket når vispen nærmer seg terreng (minst 0,5 m under terreng). Det øvre laget tilføres dermed ikke bindemiddel, noe som kan resultere i en sone med svekket fasthet. Heving av vispen i de øvre jordlag uten tilførsel av bindemiddel betegnes som blindboring eller tomboring. Tilsetning av bindemiddel kan avsluttes ved prosjektert traubunn eller andre avtalte utgravingsnivå. Tomboring utføres da over graveplanum. Eventuelt kan det tilsettes lavere bindemiddelmengder i massene over graveplanum for å gjøre det enklere å grave ut og transportere bort masser, spesielt bløte masser.

Avslutning i løsmasser



Avslutning mot fast lag



Figur 7-3: Anbefalt avslutning i a) løsmasser og b) mot fast lag for å unngå kontinuerlig svakhetssone langs det dypeste nivået i pelene.

7.4.4 Ansett, helning og horisontalavvik

Anbefalte toleranser for ansett og helningsavvik fra normalen er beskrevet i NGF (2012). Det anbefales å sette strenge toleransekrav for ansett innbyrdes i ribber eller gitter for å opprettholde funksjonen og dekningsgrad over hele dybden for sammenhengende peler. Enkeltpeler eller blokk er mindre sårbare for posisjonsavvik. Ansett kan kontrolleres ved å grave av toppmassene slik at topp av pel blir synlig.

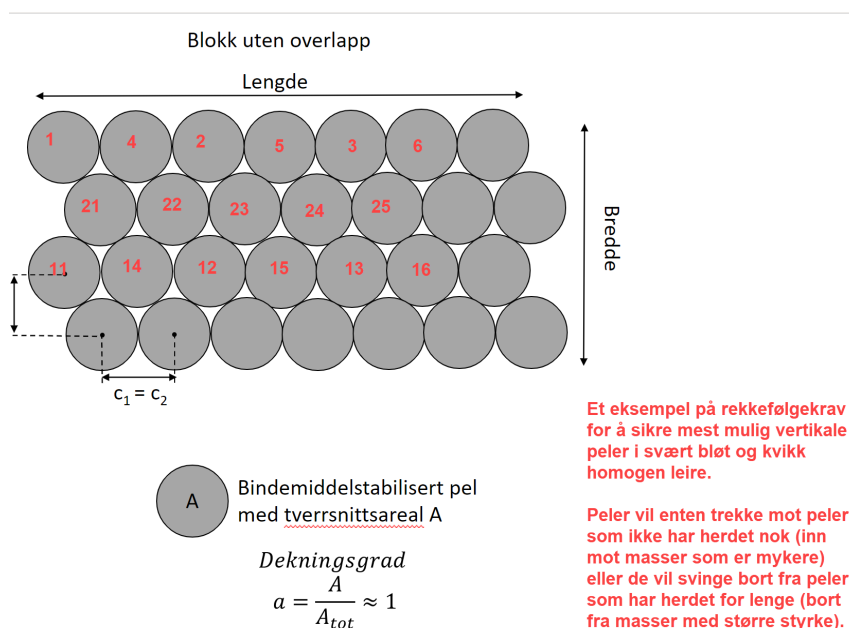
Horisontalavvik i dybden kan forekomme. Dette skyldes at borstangen skifter retning under nedføring som følge av f.eks. stein i løsmassene eller at borstangen går inn i nabopel i stedet for vertikalt fra ansett i løsmassene. Dette kan medføre usammenhengende ribber og gitter, og også redusert effektiv bredde (se kapittel 6.4). I slike tilfeller anbefales det å installere ekstra peler for å tette ev. mellomrom.

Peleprotokollen angir ofte helning på borstangen som et gjennomsnitt for boringen over hele pelens dybde. Helningsavvik anbefales om mulig kontrollert med inklinometer. For å minimere horisontalavvik i dybden anbefales det at vispen presses sakte ned med rotasjon. I henhold til NGF (2012) anbefales det en maksimal hastighet for nedføring av borstangen på 100 mm per omdreining, og at denne nedjusteres dersom løsmassene består av plastiske og faste leirer.

For å unngå at ny pel går inn i nabopel i f.eks. blokk, så kan man installere pelene i rekkefølge som vist i Figur 7-4.

Toleransekrav for maksimalt tillatt avvik fra teoretisk plassering og helning påføres tegninger. Anbefalt toleranse for ansett er normalt 100 mm, og for helning normalt 50/1 (20 mm/m).

Pelene kan også settes skrått, men dette blir sjeldent utført. Med dagens utstyr så innebærer dette manuell kontroll av posisjonen til installert pel.



Figur 7-4: Eksempel på installasjonsrekkefølge for å minimere horisontalavvik i dybden.

7.4.5 Innblandingsarbeid - stighøyde og rotasjonshastighet

Innblandingsarbeidet har stor innvirkning på hvilken kvalitet som oppnås i pelen. Per nå er det ingen omforent praksis og klare anbefalinger til hvordan pelene installeres for å oppnå god og homogen innblanding i hele pelens tverrsnitt og dybde. I det følgende beskrives hvordan innblandingsarbeidet kan tilpasses basert på tilgjengelig informasjon og innsamlede erfaringer.

I skandinavisk praksis føres vispen ned uten større grad av omrøring av løsmassene, det gjøres først på vei opp samtidig med tilføring og innblanding av bindemiddel. Dette for å minimere risiko knyttet til stabilitetsproblemer i omrørte løsmasser uten tilført bindemiddel. Ifølge Larsson (2000) er det usikkert om slik omrøring under nedføring av vispen påvirker resultatet for stabiliseringsarbeidet i positiv grad.

Når vispen når angitt dybde økes rotasjonen og tørt bindemiddel blåses ut samtidig som vispen trekkes opp ved en forhåndsbestemt hastighet (stighøyde). I forkant av installasjon programmeres som oftest styringsparameterne inn på styringssystemet på riggen. Maskinfører kan dermed selv ikke justere på stighøyde, installasjonsdybde og bindemiddelmengde for de ulike pelene som er lagt inn i planen. Maskinfører har selv som oftest kun mulighet til å justere:

- installasjonstrykket (trykket på tanken med bindemiddel) ved oppstart av installasjonsarbeidene. Dette justeres ikke underveis da det tar lang tid å oppnå stabilt trykk.
- Rotasjonshastighet. Reduseres dersom det er fastere lag for å unngå å ødelegge utstyret.

Rotasjonshastighet og stighøyde velges som oftest av entreprenøren basert på erfaring. I noen tilfeller velger prosjekterende å stille krav til utførelsen ved å oppgi minimumsrotasjon og maks stighøyde med målsetning om å sikre god innblanding og mest mulig homogent resultat over hele pelens lengde. For norske forhold benyttes vanligvis en rotasjonshastighet på 150-175 omdr./min, men maskinenes kapasitet kan ligge i området 50-210 omdr./min. Variasjonsområdet for stighøyde vil ligge i området 10-35 mm/omdr., men ut fra erfaringer vil stigningshøyder i området 15-25 mm/omdr. vanligvis gi gode resultater. Enkelte antar at raskere stighøyde reduserer forstyrrelser som oppstår i forbindelse med innblåsing av luft som følge av høyt installasjonstrykk. Utover dette bidrar større stighøyde med å oppnå lav bindemiddelmengde da tekniske muligheter på cellemateren og utstyret generelt setter en begrensning for hvor lite bindemiddel som kan tilføres per minutt.

Kvaliteten på pelen avhenger av innblandingsarbeidet under installasjon, hvor den tilførte energien (innblandingsenergi) påvirkes av rotasjonshastigheten, stighøyden og antall pinner på vispen. Det finnes ingen god måte for kvantifisering av effekten av innblanding for å vurdere kvaliteten på pelen. Per i dag foreligger det en praksis om å vurdere Blade Rotation Number (BRN) (beskrevet i Vedlegg A i EN 14679:2005). BRN defineres som totalt antall pinner som passerer under 1 m opptrekk av borstangen. For tørrmiksing tas ikke rotasjon under nedføring med i beregning av BRN, og BRN er normalt i størrelsesorden 50-500 per m (EN 14679:2005). Dette er trolig basert på bindemiddelmengder på 100-250 kg/m³ (EN 14679:2005). Anbefalt BRN vil også kunne variere for ulike løsmassetyper.

Det understrekes at dersom man velger en lav bindemiddelmengde, så kreves større innblandingsenergi for å oppnå en homogen innblanding. Ved å øke stighøyden reduseres også innblandingsenergien som igjen øker risikoen for inhomogen innblanding. Dette kan kompenseres for ved å øke antall pinner på vispen for større omrøring og dermed mer tilføring av energi under innblanding. Vær i så fall oppmerksom på om pinnenes lengde tilsvarer pelens fulle radius. Innblandingsenergien blir lavere dersom noen av pinnene er av mindre lengde.

7.4.6 Dosering av bindemiddel

Hvilke toleranser som aksepteres avhenger av fremtidig funksjon av dypstabiliseringen. NGF (2012) angir anbefalte toleranser for avvik i dosering av bindemiddel på $\pm 5-10\%$. Ved lave bindemiddelmengder anbefales det å legge til grunn en buffer slik at bindemiddelmengden inkludert negativt avvik er innenfor det som er mulig å installere og fortsatt oppnå homogen pel.

7.4.7 Styringsparametere for justering av bindemiddelmengde

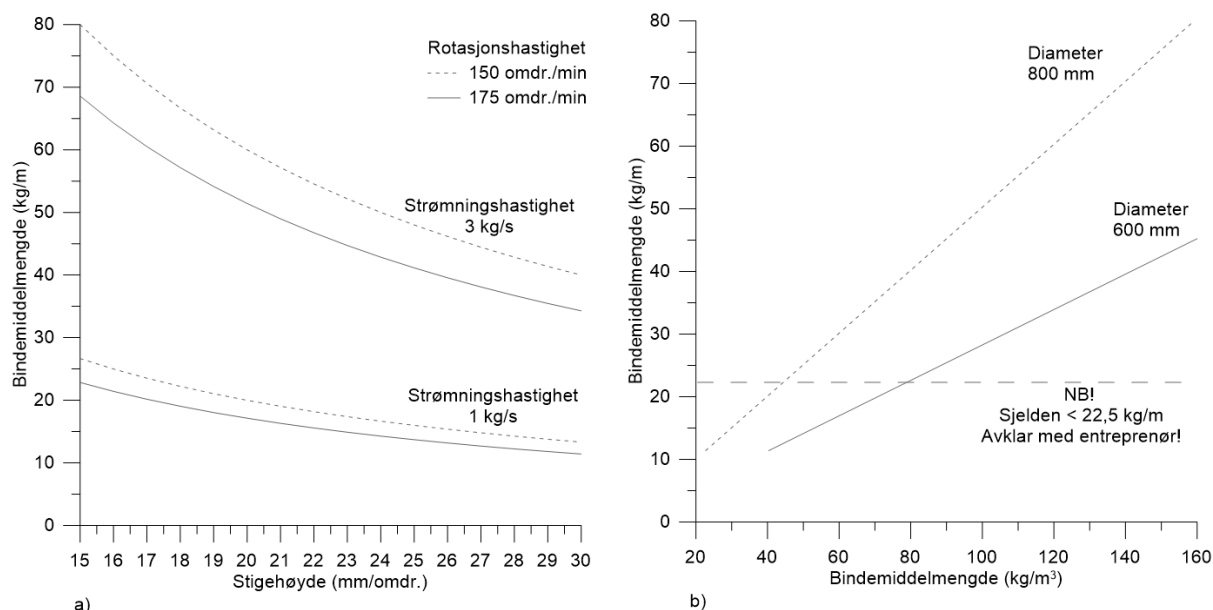
Bindemiddelmengden kan justeres ved:

- strømningshastigheten på bindemiddelet (normalt 1-3 kg/s)
- stighastigheten (mm/min) på vispen (rotasjonshastighet (omdr./min) multiplisert med stighøyde (mm/omdr.))
- diameter på pel (dess større diameter, dess lavere bindemiddelmengde per volum kan man få til)

Laveste bindemiddelmengde den enkelte entreprenør kan installere og fortsatt oppnå god innblanding over hele pelens tverrsnitt og dybde varierer, men ligger i størrelsesorden 15-20 kg/m. Dette avklares med utførende entreprenør. Det er enklere å få til lave innblandingsmengder dersom pelediameteren er stor. Dersom riggen har en nedre begrensning på f.eks. 22,5 kg/m, så vil lavest mulig bindemiddelmengde og samtidig oppnå tilfredsstillende kvalitet med hensyn til homogenitet i hele pelens dybde være 80 kg/m³ for en 0,6 m pel, og 45 kg/m³ for en 0,8 m pel (Figur 7-5b).

Det tilstrebes å ha en jevn strømning av bindemiddel gjennom systemet. For å redusere bindemiddelmengden samtidig som strømningshastigheten opprettholdes, så kan stighøyden økes (Figur

7-5a). Stigehøyde justeres slik at homogen pel oppnås. Homogen innblanding av bindemiddel i pel dokumenteres i peleprotokoll. Enkelte entreprenører har oppnådd homogene peler med bindemiddelmengder ned til 16 kg/m ved å øke stigehøyden til 25 mm/omdr.



Figur 7-5: a) Bindemiddelmengden påvirkes av strømningshastighet og stigehøyde. b) Man kan redusere bindemiddelmengden ved å øke diameteren på pelen. NB! For konstruktive peler anbefaler enkelte at diameteren ikke overstiger 600 mm. Stiplet linje viser eksempel på hvilken bindemiddelmengde i kg/m³ man oppnår for ulike pelediameterer tilsatt 22,5 kg/m.

7.4.8 Installasjon inntil spunt

Riggen har ofte en påmontert skjerm rundt vispen (Figur 7-1b) som står i kontakt med terrengoverflaten under installasjon. Dette kan skape utfordringer ved installasjon av peler som er i kontakt med tilstøtende konstruksjoner, som f.eks. spunt i byggegrop.

For å sikre kontakt mellom ribbe og spunt anbefales det å installere ekstra peler inntil spunt. Bunnen av pelen avsluttes på et høyere nivå enn spuntfoten for å unngå at vispen hefter seg fast i spunten under opptrekking (se detalj i Tabell 6-2). Avklar med entreprenør at det benyttes utstyr slik at det oppnås tett kontakt mellom pel og tilstøtende konstruksjonselementer.

8 Kontroll av utførelse

8.1 Generelt

I henhold til krav 1-3 i vegnormal N200:2024 så skal den prosjekterende angi hvilke kontroller som forutsettes gjennomført ved utførelse, for å verifisere at tilfredsstillende resultat er oppnådd og at nødvendig sikkerhet er ivarettatt. Metoder og omfang bestemmes av prosjekterende i henhold til NS-EN 14679:2005+AC:2006 Utførelse av spesielle geotekniske arbeider - Dypstabilisering. Prosjekterende utarbeider en kontrollplan. Krav til dokumentasjon før igangsettelse av dypstabilisering samt kontroll av og dokumentasjon av utførelse er gitt i kapittel 8, 9 og 10 i NS-EN 14679. Omfang og testemetoder bestemmes bl.a. basert på dypstabiliseringens funksjon, størrelse på anlegget og grunnforholdenes kompleksitet. Tiltak for avvikshåndtering beskrives.

Metoder for installasjon og omfang i forbindelse med vegprosjekter beskrives i henhold til R761 Prosesskoden, og for andre byggeprosjekter i henhold til NS 3420-1:2024 Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del 1: Fellesbestemmelser og NS 3420-G:2019+AC2 Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del G: Grunnarbeider Del 2.

NS-EN 14679 pkt. 6 stiller krav til at materialer og produkter er i henhold til relevante Europeiske Standarder, eller at det benyttes produkter i henhold til nasjonale standarder og/eller retningslinjer, herunder lokale miljøkrav, dersom Europeiske Standarder ikke er tilgjengelig.

8.2 Anbefalt kontrollregime

Funksjon av dypstabiliseringen, størrelse av prosjektet og grunnforholdenes kompleksitet avgjør nødvendig type og omfang av kontroll (se NGF 2012). Det anbefales å ha spesielt fokus på å øke omfanget av undersøkelser

- ved komplekse grunnforhold
- i områder hvor bindemiddelmengden optimaliseres for å redusere klimagassutslipp
- ved bruk av nye typer bindemidler

Registrerte data leveres byggherren for kontroll med jevne mellomrom under arbeidene. Hyppigheten avtales ved kontraktsinngåelsen. Det anbefales at dataene overføres ofte slik at en vurdering av behovet for eventuelle erstatningspeler/supplerende peler kan gjøres mens riggen enda er på anlegget.

Følgende kontrollregime anbefales:

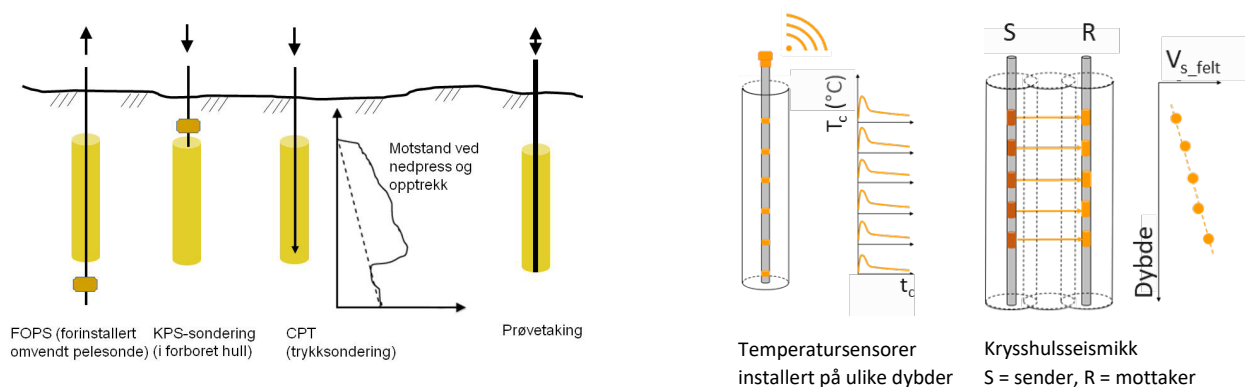
- 1) Gjennomgang av peleprotokoller mottatt fra entreprenør for kontroll/stikkprøvekontroll av at installasjon er utført i henhold til spesifiserte toleranser.
- 2) Kontroll og dokumentasjon av kvaliteten av et utvalg installerte peler (se kapittel 8.3).
- 3) Kontroll av naturlig grunn (materialparametere, poretrykk, deformasjoner, setninger) (se kapittel 6.2 og 7.3).
- 4) Kontroll av at klimaambisjoner for prosjektet er oppfylt og at miljøkrav er overholdt (se kapittel 1.4 og 2.6).

Gjennomgang av peleprotokoller kan identifisere enkeltpeler eller områder hvor det kan være nødvendig å gjennomføre økt omfang av undersøkelser for å kontrollere at materialegenskapene og homogeniteten er i henhold til prosjekteringsforutsetningene. Om nødvendig anbefales det å utføre avbøtende tiltak dersom det blir avdekket avvik under utførelsen.

8.3 Metoder for kontroll av utførelse

Formålet med dypstabilisering avgjør hvilke egenskaper som testes og hvilken metode som benyttes (Figur 8-1 og Tabell 8-1). For setningsreducerende tiltak vil det f.eks. være av interesse å bestemme elastisitetsmodulen, mens det for stabilisering av skråninger og skjæringer vil være av interesse å dokumentere skjærfastheten, homogenitet over pelenes dybde og innbyrdes geometri i ribbene.

I henhold til NS-EN 14679:2005 så skal effekten av tid (herdeprosessen) inkluderes når man vurderer effekten av stabiliseringen. Dette kan gjøres ved å overvåke herdeprosessen kontinuerlig med temperatursensorer installert i et utvalg av peler på anleggsområdet. Ev. så kan det utføres FOPS, (F)KPS eller CPT/CPTU i utvalgte peler med like betingelser på ulike herdetidspunkter. Grunnet begrensninger i sistnevnte metoder (beskrevet i kapittel 8.3.1, 8.3.2 og 8.3.3) utføres disse tidlig i herdeprosessen. Dersom det benyttes temperatursensorer (kapittel 8.3.4) så anbefales det at resultatene kobles sammen med resultater fra innblandingsforsøk i henhold til KlimaGrunns laboratorieprosedyre i Statens vegvesen (2023), og ved å utføre krysshullsseismikk (kapittel 8.3.5) på ulike tidspunkt i herdeprosessen.



Figur 8-1: Metoder for kontroll og dokumentasjon av oppnådd skjærfasthet i bindemiddelstabiliserte peler.

Tabell 8-1: Testmetoder som benyttes for kontroll av utførelse

Testmetode	Benyttes til kontroll av	Kommentar
Forinstallert omvendt pelesondering (FOPS)	Skjærfasthet Homogenitet	Kan ikke repeteres Destruktiv test Utføres ofte tidlig i herdeforløpet Empirisk korrelasjon Hvilke peler som kontrolleres er bestemt ved installasjon
(Forboret) kalkpel sondering ((F)KPS)	Skjærfasthet Homogenitet	Kan ikke repeteres Destruktiv test Utføres ofte tidlig i herdeforløpet Empirisk korrelasjon
Trykksondering (CPT/CPTU)	Skjærfasthet Homogenitet	Kan ikke repeteres Ikke-destruktiv test Utføres ofte tidlig i herdeforløpet Empirisk korrelasjon Representerer en liten del av pelen Begrenses ofte til 8-10 m dybde
Temperatursensorer	Skjærfasthetsutvikling over tid	Kontinuerlig overvåking Ikke-destruktiv test Hvilke peler som kontrolleres er bestemt ved installasjon Empirisk korrelasjon (se kapittel 4.4)
Krysshullsseismikk	Skjærfasthet Homogenitet	Kan repeteres Ikke-destruktiv test Hvilke peler som kontrolleres er bestemt ved installasjon Empirisk korrelasjon (se kapittel 4.4)
Prøvetaking fra fersk pel	Skjærfasthet fra enaksial- og treaksialforsøk Elastisitetsmodul fra enaksial- og treaksialforsøk Friksjonsvinkel fra treaksialforsøk Kontinuerlig prøveserie langs hele pelens dybde for å kontrollere homogenitet.	Kan være vanskelig å få opp prøver av god kvalitet Prøvene får ikke samme herdebetingelser som ved å herde i felt. Ikke-destruktiv test dersom prøvediameter er liten sammenlignet med pelediameter.
Prøvetaking fra herdet pel	Skjærfasthet fra enaksial- og treaksialforsøk Elastisitetsmodul fra enaksial- og treaksialforsøk Densitet Friksjonsvinkel fra treaksialforsøk Kontinuerlig prøveserie langs hele pelens dybde for å kontrollere homogenitet.	Kostbart og kan være vanskelig å få opp prøver av god kvalitet dersom skjærfasthet er lavere enn 200 kPa (NGF 2012) Ikke-destruktiv test dersom prøvediameter er liten sammenlignet med pelediameter Prøvene er herdet i felt Ved liten prøvediameter testes kun en liten del av tverrsnittet.
Grave opp hele eller deler av pel	Skjærfasthet fra enaksial- og treaksialforsøk Elastisitetsmodul fra enaksial- og treaksialforsøk Densitet Friksjonsvinkel fra treaksialforsøk Kontroll av homogenitet	Kostbart Destruktiv test Prøvene er herdet i felt

8.3.1 Forinstallert omvendt pelesondering - FOPS

Forinstallert omvendt pelesondering (FOPS) er en metode for å bestemme udrenert skjærfasthet i bindemiddelstabiliserte peler. FOPS installeres i forbindelse med at pelen etableres. Rent praktisk innebærer kontroll med FOPS at entreprenøren vet hvilke peler som pelen skal kontrolleres før installasjon.

Utstyret består av en vinge festet til enden av en wire. Vingen monteres foran vispen (se Figur 8-2) og føres ned til ca. 0,5 m under underkant pel i forkant av innblandingsprosessen, mens wiren går gjennom pelen helt opp til terreng. Kontroll av pelen utføres ved å trekke sonden gjennom pelen ved hjelp av wiren samtidig som opptrekksmotstanden måles. Det anbefales at FOPS trekkes etter senest 3 døgns herding (avhengig av bindemiddelmengde og oppnådd fasthet) da pelen etter denne tid ofte blir for fast til at trekking kan gjennomføres. For å unngå at wiren gror fast i pelen før trekking, anbefales det å installere vingen dypere under underkant av pelen og trekke wiren 10-20 cm daglig. Rigger som anvendes registrerer trekkraft. Metoden er destruktiv da vingen skjærer gjennom og kløyver pelen.

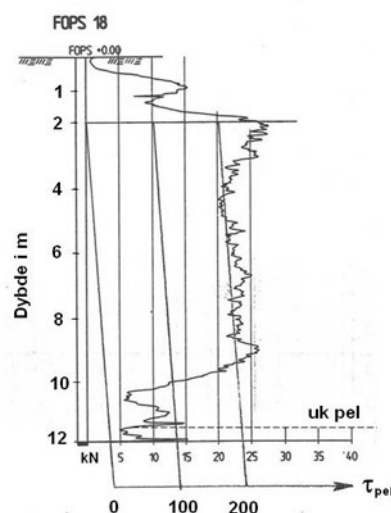
Under testen logges trekkraften. Friksjonsmotstanden langs wiren trekkes fra, og skjærfastheten tolkes ved å multiplisere netto motstand (q_{net}) med en faktor (Ligning 7). Den tolkede skjærfastheten betraktes som et gjennomsnitt over pelens tverrsnitt.

$$c_u = 0,1 \cdot q_{net}$$

Ligning 7



a)



b)

Figur 8-2: a) FOPS-vinge montert under visp for nedpressing (NGF 2012). b) Eksempler på registrert kurve ved FOPS-målinger.

8.3.2 (Forboret) kalkpelsondering - (F)KPS

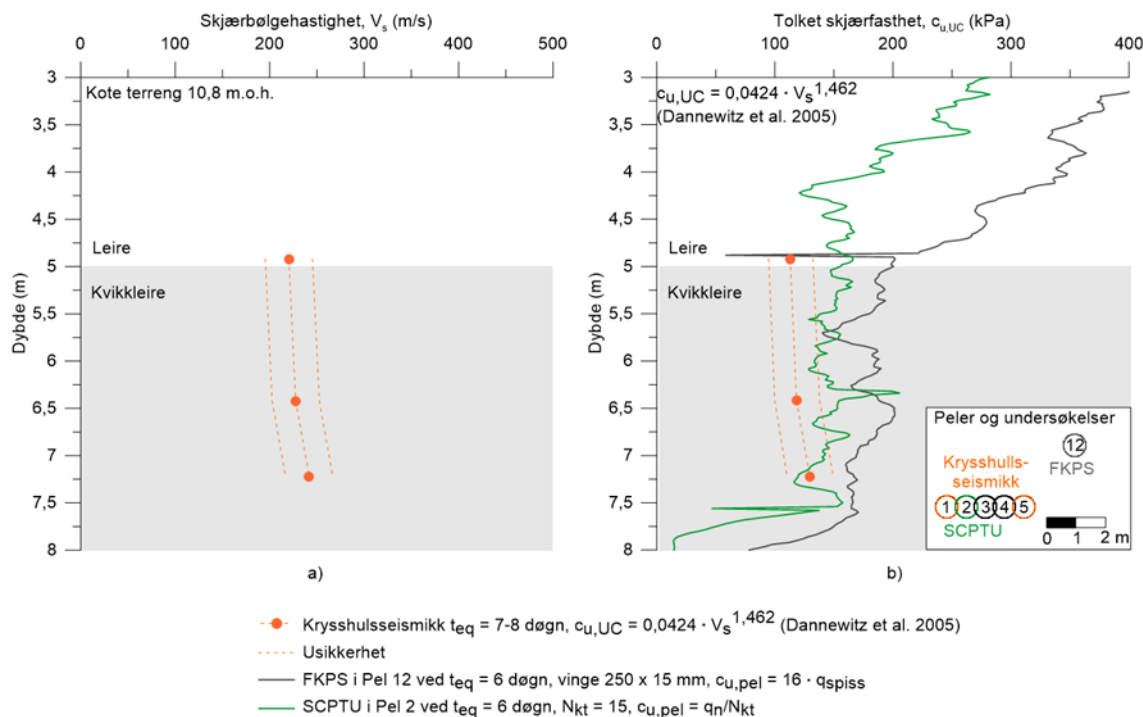
Kalkpelsondering med eller uten forboring ((F)KPS) ligner på FOPS, men her presses sonden enten direkte ned i pelen eller i et forboret hull (pilot) i pelen. Fordelen med (F)KPS er at peler som kontrolleres kan velges i etterkant av installasjon. Registrering av motstand skjer på tilsvarende måte som for FOPS.

Det anbefales å utføre (F)KPS tidlig i herdeforløpet og helst innen syv dager etter installasjon for å unngå at det bygges opp for høy fasthet i pelen slik at det fortsatt er mulig å presse sonden gjennom pelen. Ved høy fasthet øker risikoen for at sonden går ut av pelen ved større dybder enn 8-10 meter. Metoden er destruktiv da vingen skjærer gjennom og kløyver pelen.

Under testen logges motstanden. Skjærfastheten tolkes ved å multiplisere spissmotstanden (q_{spiss}) med en faktor N (Ligning 8) hvor N velges etter hvilken vinge som er benyttet under sonderingen (Figur 8-3b). Den tolkede skjærfastheten betraktes som et gjennomsnitt over pelens tverrsnitt.

$$c_u = N \cdot q_{spiss}$$

Ligning 8



Figur 8-3: a) Skjærbølgehastighetsmålinger utført med krysshullsseismikk ved ekvivalent herdetid (t_{eq}) 7-8 døgn. Stiplede linjer indikerer beregnet usikkerhet i målingene. b) Beregnet skjærfasthet basert på resultater fra FKPS og CPTU utført ved $t_{eq} = 6$ døgn og skjærbølgehastigheter målt med krysshullsseismikk. Stiplede oransje linjer indikerer usikkerheten i resultatene tolket basert på krysshullsseismikken. NB! FKPS er utført i enkeltpel Pel 12. Fra Helle et al. 2022.

8.3.3 CPT/CPTU

Trykksondering (CPT/CPTU) utføres ved at det sonderes vertikalt, men kan også utføres på skrå i ribber for kontroll av kontinuitet. Ved trykksondering oppnås en indikasjon på homogeniteten over dybden og skjærfastheten over en liten del av pelens tverrsnitt. Fordelen med CPT/CPTU er at peler som kontrolleres kan velges i etterkant av installasjon.

I og med at peler kan stå noe ut av lodd og at sonderingene har en tendens til å trekke mot områder med mindre motstand i pelen, kan dette føre til helning på sonderingsstangen og at sonderingen går ut av pelen og inn i omkringliggende leire i en viss dybde. Ved høy fasthet i pelen øker risikoen for at sonden går ut av pelen ved større dybder enn 8-10 meter. Utstyret inkludert borerigg tilpasses ellers tiden pelene har herdet slik at det er egnet og har kapasitet til å trenge ned i pelene.

Tolkning av skjærfasthet fra CPT/CPTU-målinger gjøres på samme måte som for sondering i vanlige løsmasser (Ligning 9) ved at netto spissmotstand (q_n) divideres med bæreevnefaktoren for netto spissmotstand (N_{kt}) (Figur 8-3b). Det er i tolkningen her benyttet $N_{kt} = 15$ i henhold til anbefalinger i NGF (2012).

$$c_u = \frac{q_n}{N_{kt}}$$

Ligning 9

8.3.4 *Temperatursensorer*

Temperatursensorer installeres på ulike nivåer i senter av installert bindemiddelstabilisert pel. Sensorene installeres umiddelbart etter installasjon av pel for å sikre tett omslutning av bindemiddelstabiliserte masser rundt temperatursensorene. Det anbefales å installere minimum fire sensorer fordelt over en lengde av 10 m pel. Se detaljert beskrivelse av KlimaGrunns måleteknologi i Statens vegvesen (2023).

Det anbefales å instrumentere minimum tre peler per område med like betingelser (installasjonsmønster, grunnforhold og bindemiddelkombinasjon). Bindemiddelkombinasjon, grunnforhold og dekningsgrad påvirker temperaturen (se kapittel 3.4). Omfanget økes dersom det benyttes ulike installasjonsmønster, bindemiddelkombinasjoner og ved variasjoner i grunnforholdene som stabiliseres.

En konservativ korrelasjonsmodell basert på innblandingsforsøk for lokale forhold benyttes for indirekte bestemmelse av oppnådd skjærfasthet basert på temperaturmålingene i felt (se kapittel 4.4).

Korrelasjonsmodellen er basert på innblandingsforsøk i henhold til KlimaGrunns laboratorieprosedyre i Statens vegvesen (2023).

For å verifisere oppnådd skjærfasthet og for å dokumentere homogenitet i pel, så anbefales det å i tillegg utføre seismikk for å måle skjærbølgehastigheten over hele pelens dybde (se kapittel 8.3.5). Dette anbefales utført enten i et forsøksfelt, eller i produksjonsspelene før oppstart av anleggsarbeidene på det aktuelle stedet.

8.3.5 *Krysshullsseismikk*

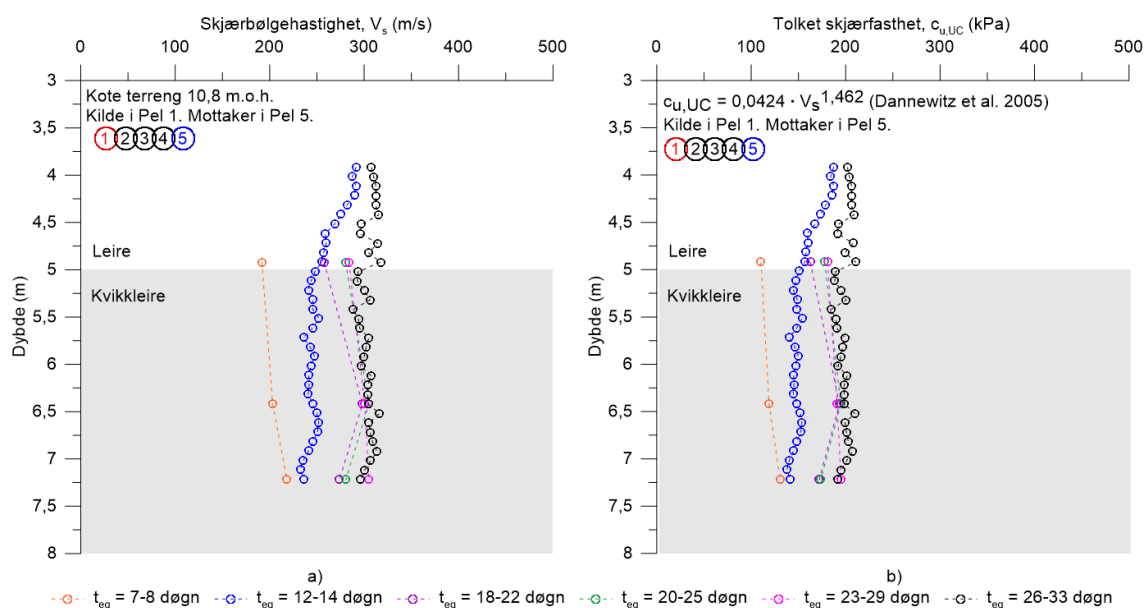
Krysshullsseismikk utføres i foringsrør som er installert i bindemiddelstabiliserte peler i ribber, gitter eller blokk. Metoden benyttes ikke for enkeltpeler. Foringsrørene installeres med en senteravstand på minimum to meter i senter av peler i samme ribbe umiddelbart etter installasjon for å sikre tett omslutning av bindemiddelstabiliserte masser rundt foringsrørene.

Målingene utføres ved at kilde og mottaker senkes til samme dybde i hvert sitt foringsrør. For å dokumentere homogeniteten anbefales det å utføre målinger for hver tiende centimeter (Figur 8-3 og Figur 8-4a). Tolket skjærbølgehastighet benyttes for å bestemme skjærfasthet (Figur 8-4b).

Skjærbølgehastigheten korreleres mot skjærfastheten ved å knytte skjærbølgehastighet tolket fra benderelementforsøk til skjærfasthet fra enaksialforsøk på samme prøve (kapittel 4.4).

Krysshullsseismikken kan repeteres på ulike tidspunkt i herdeprosessen. Som et minimum anbefales det å utføre en måling tidlig i herdeforløpet og en måling ved herdetidspunkt i felt tilsvarende ekvivalent herdetid på 28 døgn ved 20 °C. Se Statens vegvesen (2023) for detaljert beskrivelse.

Dypstabilisering med bindemiddel



Figur 8-4: a) Skjærbølgehastighetsmålinger med dybden for kilde i Pel 1 og mottaker i Pel 5. b) Tolket skjærfasthet med kilde i Pel 1 og mottaker i Pel 5. Fra Helle et al. (2022).

8.3.6 Prøvetaking

For kontroll av pelenes fasthet, stivhet og andre parametere (densitet, vanninnhold etc.) samt homogenitet kan det også tas opp prøver av installerte peler. Dette kan gjøres ved å

- ta opp uforstyrrede sylindrerprøver fra fersk pel
- ta kjerneprøver av bindemiddelstabiliserte peler som har herdet i felt
- grave opp hele eller deler av peler som har herdet i felt

Den enkleste måten er å benytte en vanlig 54 mm prøvetaker for å ta opp prøver av fersk pel like etter at denne er installert. Ved å benytte gjennomsiktig plasticsylinder for opptak av prøvematerialet kan homogeniteten i prøven også studeres visuelt. Vær imidlertid oppmerksom på at prøvetakingen kan forstyrre materialet i prøvesylinderne. Prøvesylinderne forsegles og fraktes til laboratoriet for oppkapping til 10 cm lengder, forsegles og herdes i rom med temperatur rundt 20 °C og 100 % luftfuktighet. Etter ønsket herdetid skyves prøvene ut av cylinderen og undersøkes på vanlig måte. Det er viktig i denne sammenheng å huske på at resultater som oppnås på denne måten ikke er identiske med forhold for peler som har herdet i bakken. Tidspunkt for oppkapping av cylinderen vurderes da dette også kan forstyrre prøven dersom materialet i prøven fortsatt er veldig bløtt.

Det er også mulig å ta kjerneprøver av herdete peler med fasthet > 200 kPa (NGF 2012). Det er da viktig at det benyttes kjerneborutstyr som ikke endrer pelematerialet under boreprosessen. Det anbefales at minimum kjernediameter være 76 mm.

Et annet alternativ er å sage ut prøvestykker fra en oppgravd pel. Prøvestykkene forsegles i plast og sendes til laboratoriet for prøvetillaging og testing. Denne metoden gir begrenset dybdemulighet, men det har vært hentet opp prøvestykker ned til 10 m under terreng. Nok et alternativ er å trekke opp hele pelen ved å føre et stålrør med lukkemekanisme i bunnen over pelen og deretter trekke stålrør og pel opp.

9 Symbolliste

A	pelens tverrsnittsareal
a	dekningsgrad (stabilisert volum/ totalt volum) (-)
b	peleribbenes bredde
BPD	Bypass dust
BRN	Blade Rotation Number
b_{eff}	effektiv bredde av peleribben
C	mengde bindemiddel (kg/m^3)
c	pelens og peleribbenens senteravstand
CKD	Cement Kiln Dust
CPTU	trykksondering med poretrykksmåling
C_p	spesifikk varmekapasitet (J/kgK)
C_p^s	spesifikk varmekapasitet fast stoff (J/kgK)
C_p^w	spesifikk varmekapasitet vann (J/kgK)
C_u	udrenert skjærfasthet (kPa)
$C_{u,k}$	direkte skjærfasthet i omkringliggende løsmasser
$C_{u,m}$	midlere direkte skjærfasthet i stabilisert jordvolum
$C_{u,p}$	direkte skjærfasthet i stabilisert materiale (pelen)
$C_{u,UC}$	udrenert skjærfasthet bestemt fra enaksialforsøk (kPa)
$C_{u,UC28}$	udrenert skjærfasthet bestemt fra enaksialforsøk (kPa) etter herding i 28 døgner
$C_{uUC,felt}$	estimert udrenert skjærfasthet i felt (kPa)
d	pelens diameter
EPD	miljødeklarasjon (Environmental Product Declaration)
E_{50}	elastisitetsmodul, sekantstivhet hentet ut ved 50% bruddspenning (MPa)
FOPS	forinstallert omvendt pelsonde
FKPS	forboret kalkpelsonde
H	høyde (cm)
H/D	Høyde over diameter forholdet
LCA	livsløpsanalyse (Life Cycle Assessment)
LKD	Lime Kiln Dust
M	modningstallet (-)
m_s	masse fast stoff (g)
m_w	masse vann (g)
Q_u	total potensiell varmetilførsel fra bindemiddelet (kJ/kg)
q_u	enaksiell trykkfasthet (kPa)
T	temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
T_c	faktisk herdetemperatur i pel installert i felt ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ref}	referansetemperatur ($^{\circ}\text{C}$), ofte lik herdetemperatur på laboratoriet (20°C)
t_c	herdetid beregnet per tidsinkrement (døgn)
t_{eq}	ekvivalent herdetid ved 20°C (døgn)
V_s	skjærbølgehastighet (m/s)
w	vanninnhold (%)
w/b-tall	forholdet mellom vann og bindemiddel (-)
ϵ_a	aksiell tøyning (%)
ϵ_f	bruddtøyning (%)
$\epsilon_{f,max}$	bruddtøyning ved maksimal skjærspenning (%)
ϵ_{int}	initiell tøyning (%) som oppstår i starten av forsøk før påsatt last oppnår full kontakt
ρ	densitet (g/cm^3)
τ	skjærspenning (kPa)
τ_{max}	maksimal skjærspenning (kPa)

10 Referanser

- Amin D (2015). Triaxial testing of lime/cement stabilized clay - A comparison with unconfined compression tests (Master thesis). KTH Royal Institute of Technology.
- Andersland OB og Landanyi B (2004). Frozen ground engineering. John Wiley & Sons, inc, New Jersey.
- Bache BKF, Hov S og Mengede M (2021). Erfaringer med ulike kalksementvariasjoner – Laboratorieforsøk med ulike typer kalkbaserte bindemidler med hensikt å optimalisere bindemiddeltipe, innblandingsmengde og påvirkning på klima og miljø. Geoteknikkdagen 2021.
- Bache BKF, Wiersholm P, Paniagua P og Emdal A (2021). Effect of temperature on the strength of lime-cement stabilized Norwegian clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE) 148(3).
- Baustad P (2022). En laboratoriestudie av styrke og stivhet i kalksementstabilisert leire. Masteroppgave ved NTNU.
- Broms BB (1991). Stabilization of soil with lime columns. Foundation Engineering Handbook.
- Bergado DT, Anderson LR, Miura N og Balasubramaniam AS (1996). Soft ground improvement in lowland and other environments. ASCE, New York.
- Brendbekken G (2023). Byggegrøpsikring og støttekonstruksjoner – Andre avstivningsmetoder. NGF seminar Byggegrøpveilederen 2023.
- Christensen S, Watn A, Nordal S og Emdal A (1998). Grunnforsterkning med kalksementpæler. SINTEF Bygg og Miljøteknikk, Trondheim.
- Croft JB (1967). The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. Geotechnique 17(2), s. 119-135. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.2.119>
- Dannewitz N, Eriksson H, Mattsson H, Larsson R og Holm G (2005). Seismisk kontrollmetod för KC-pelare. Svensk Dypstabilisering Arbetsrapport No. 35, 2005.
- EuroSoilStab (2002). [Design guide soft soil stabilization](#). BREPress.
- Falle FÅ (2021). Comparing laboratory and field stabilised clay. Masteroppgave ved NTNU
- Helle TE, Juvik ES, O'Rawe S, Dahl M, Brendbekken G, Hegseth I, Wiersholm P, Gerhardsen A, Rekdal T, Syvertsen K og Nouri EH (2021). Ny laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk av bindemiddelstabilisert leire. Geoteknikkdagen 2021.
- Helle TE, Gerhardsen A, Rekdal T, Eriksson S, Juvik ES, Giese S, Wiersholm P, Hegseth I, O'Rawe S, Dahl M, Brendbekken G og Nouri EH (2022). KlimaGrunns arbeidsmetodikk for dokumentasjon og prediksjon av skjærfasthet og stivhet i bindemiddelstabiliserte peler. Geoteknikkdagen 2022.
- Helle TE, Gerhardsen A, Rekdal T, Eriksson S, Juvik ES, Giese S, Wiersholm P, Hegseth I, O'Rawe S, Dahl M, Brendbekken G, Nouri EH og Wåle M (2024). A novel technology for determining strength and reduce climate-gas emissions in deep soil mixed piles. 19th Nordic Geotechnical Meeting, Göteborg.
- Hov S, Falle F og Paniagua P (2022). Optimization of Laboratory Molding Techniques for Nordic Dry Deep Mixing. Geotechnical Testing Journal 45(4), <https://doi.org/10.1520/GTJ20210245>
- ISO (2017) Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 7: Unconfined compression test. ISO 17892-7:2017.

- Karlsrud K, Eggen A, Nerland Ø og Haugen T (2015). Some Norwegian experiences related to the use of dry-mixing methods to improve stability of excavations and natural slopes in soft clays, Proceedings of the Deep Mixing 2015 Conference, San Francisco, Deep Foundation Institute, pp.87-100.
- Karlsrud K og Hernandez-Martinez FG (2013). Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples. Canadian Geotechnical Journal 50(12): 1273-1293.
- Karstunen M (2014). Pre-study: Ground improvement for marginally stable slopes. NIFS-rapport nr. 92/2014. Publisert av Norges Vassdrags- og Energidirektorat. <https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/handle/11250/2498039>
- Kitazume M og Terashi M (2013). The deep mixing method. CRC Press.
- Ladd CC og Foott R (1974). New design procedure for stability of soft clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE 100(7): 763-786.
- Larsson S (2000). Blandingsmekanismer och blandingsprosesser – med tillämpning på pelarstabilisering. Svensk Dypstabilisering, rapport nr. 6.
- Løken T (1968). Kvikkleiredannelse og kjemisk forvitring i norske leirer. NGI Publication no. 75, Oslo, Norway: Norwegian Geotechnical Institute, 1–9.
- Mitchell JK og Soga K (2005). Fundamentals of soil behaviour, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Multiconsult (2022). Prosedyre for utførelse og tolking av benderelementforsøk. Teknisk notat nr. 1022597-RIG-NOT-010, datert 31.08.2023.
- Norcem (2006). Grunnforsterkning med kalksement. Brosjyre 2006.
- Norges Geotekniske Institutt (NGI) (2009). Vurdering av stabilitetsforhold og sikringstiltak i Kattmarka. Rapport nr. 20091257-00-4-R, datert 26.05.2009.
- Norsk Geoteknisk Forening (NGF) 2012. Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler. Utgitt av Norsk Geoteknisk Forening, Oslo 2012.
- Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE). Sikringshåndboka. <https://veiledere.nve.no/sikringshandboka/moduler/modul-k2-303-kalk-sementstabilisering-prosjektering/>, sist besøkt 30.04.2024.
- Paniagua P, Bache BK, Karlsrud K og Lund AK (2022). Strength and stiffness of laboratory-mixed specimens of stabilised Norwegian clays. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement 175(2): 150-163. <https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00051>
- Rosenqvist IT (1955) Investigations in the clay-electrolyte-water system. NGI Publication no. 9, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway.
- Rosenqvist IT (1975) Origin and mineralogy glacial and interglacial clays of Southern Norway. Clays and Clay Minerals 23: 153–159.
- Skoglund MR (2019). Poretrykksrespons ved kalk-/sementstabilisering. Masteroppgave ved NTNU.
- Standard Norge (2004). NS-EN 1997-1:2004+A1:2013+NA:2020 Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering – Del 1: Allmenne regler.
- Standard Norge (2005). NS-EN 14679:2005 Utførelse av spesielle geotekniske arbeider – Dypstabilisering – (innbefattet rettelsesblad AC:2006).

Dypstabilisering med bindemiddel

- Standard Norge (2007). NS-EN 1997-2:2007+NA:2008 Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering – Del 2: Regler basert på grunnundersøkelser og laboratorieprøver.
- Standard Norge (2011). NS-EN 197-1:2011 Sement – Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper.
- Standard Norge (2012). NS-EN 15804:2012+A2:2019+AC:2021 Bærekraftige byggverk – Miljødeklarasjoner – Grunnleggende produktkategorier for byggevarer.
- Standard Norge (2015). NS-EN 459-1:2015 Bygningskalk – Del 1: Definisjoner, krav og samsvarskriterier.
- Standard Norge (2019). NS 3420-G:2019+AC2:2022 Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del G: Grunnarbeider Del 2. Publisert 01.11.2022.
- Standard Norge (2024). NS 3420-1:2024 Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del 1: Fellesbestemmelser. Publisert 01.11.2024.
- Statens vegvesen (2007). E18 Kopstad – Gulli: Erfaringer med bruk av vertikale dren. [Teknologirapport nr. 2496](#).
- Statens vegvesen (2014). Veiledning V221 Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger. Datert juni 2014.
- Statens vegvesen (2016). Veiledning V271 Vegetasjon i veg- og gatemiljø. Datert desember 2016.
- Statens vegvesen (2024). Retningslinje R210 Laboratorieundersøkelser. Datert juni 2024.
- Statens vegvesen (2024). Vegnormal N200 Vegbygging. Datert desember 2024.
- Statens vegvesen (2023). KlimaGrunns arbeidsmetodikk for grunnforsterkning. Statens vegvesens rapporter nr. 915, datert 31.05.2023. <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/3069881>
- Statens vegvesen (2025). Retningslinje R761 Prosesskode. Standard beskrivelse for veger, tunneler, bruer og kaier. Datert februar 2025.
- Statens vegvesen (2025). Veiledning N-V220 Geoteknikk i vegbygging.
- Vervoorn RRE og Barros AAS (2021). Deep soil mixing for stabilising deep excavations. NGM, 2021.
- Wiersholm P (2018). Temperatureffekter I kalksementstabilisert leire. Masteroppgave ved NTNU.
- NVE (2024). Grunnvann. <https://www.nve.no/vann-og-vassdrag/vannets-kretsloep/vannet-under-bakken-markvann-og-grunnvann/grunnvann/>, sist besøkt 10.06.2024.
- Åhnberg H (2004). Effects of back pressure and strain rate used in triaxial testing of stabilized organic soils and clays. Geotechnical Testing Journal 27(3), s. 250-259. <https://doi.org/10.1520/GTJ11453>
- Åhnberg H (2006). Strength of stabilised soils – A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder. Doktoravhandling, Svensk Djupstabilisering rapport nr. 16.
- Åhnberg H, Bengtsson P-E og Holm G (2001). Effect on initial loading on the strength of stabilised peat. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement 5(1), s. 35-40. <https://doi.org/10.1680/grim.2001.5.1.35>
- Åhnberg H og Holm G (1987). Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk og cementstabiliserad jord. SGI rapport nr. 30. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

Åhnberg H, Johansson S-E, Retelius A, Ljungkrantz C, Holmqvist L og Holm G (1995). Cement och kalk för djupstabilisering av jord. SGI rapport no. 48. Statens Geotekniska Institut, Linköping.



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag