

Nyttegjøring og gjenbruk av kalk- /sementstabilisert leire i deponier

Emmi Charlotte Kristensen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, IBM

Medveileder: Gunvor Baardvik, Norges Geotekniske Institutt
Gudny Okkenhaug, Norges Geotekniske Institutt

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



TBA4900 Geoteknikk Masteroppgave, vår 2017

Stud.techn.

Emmi Charlotte Kristensen

Masteroppgavetittel:

Nyttegjøring og gjenbruk av kalk-/sementstabilisert leire i deponier

Utilization and re-use of lime cement stabilized clay in landfills

Bakgrunn

Oppgaven utføres i tilknytning til NGIs interne forskningsprosjekt på nyttegjøring og gjenbruk av masser, GEORECIRC, og er en videreføring av prosjektoppgaven skrevet høsten 2016. GEORECIRC har som hovedmål å utvikle metoder for økt nyttegjøring av restprodukter og overskuddsmasser fra anleggsprosjekter og industri. Denne oppgaven vil fokusere på gjenbruk av kalk-/sementstabilisert leire da disse massene anses som overskuddsmasser, og har ingen bestemte bruksområder etter endt brukstid.

For å sikre en tett og sikker avslutning av deponier, settes det krav til hydraulisk konduktivitet til materialet som skal benyttes i det impermeable tettesjiktet. I tillegg må massen kunne bearbeides for utlegging og komprimering, og dette er derfor viktige parametere å undersøke.

Innhold

Kandidaten skal sette seg inn i nødvendig teori knyttet til kalk-/sementstabilisert leire, anleggsteknikk og grunnleggende prinsipper for oppbygning av deponier.

De geotekniske egenskapene til den oppgravde massen skal undersøkes, og resultatene vil belyse mulige gjenbruksområder etter endt brukstid. I oppgaven er utbyggingen av Nytt Nasjonalmuseum i Oslo benyttet som referanseprosjekt, da oppgravd kalk-/sementstabilisert leire fra byggegropen har blitt lagt ut og komprimert som fundament for topptettingen i deponiet på Langøya utenfor Holmestrand.

For å undersøke de geotekniske egenskapene til oppgravd kalk-/sementstabilisert leire, skal kandidaten utføre laboratorieundersøkelser, tolke resultatene og ut fra dette foreslå mulige, nye bruksområder for massen. Fokus skal ligge på gjenbruk i deponier, men andre bruksområder kan også belyses.

Hovedveileder: Arnfinn Emdal, NTNU

Biveiledere: Gunvor Baardvik og Gudny Okkenhaug, NGI

Arnfinn Emdal
Hovedveileder



Oppgavens tittel: Nyttegjøring og gjenbruk av kalk-/sementstabilisert leire i deponier	Dato: 08.06.2017
	Antall sider (inkl. bilag): 184
	Masteroppgave x
Navn: Emmi Charlotte Kristensen	
Faglærer/veileder: Arnfinn Emdal	
Eksterne faglige veiledere: Gunvor Baardvik og Gudny Okkenhaug	

Ekstrakt:

Kalk-/sementstabilisering er en mye brukt metode for å stabilisere sensitiv leire i dag. Ved innblanding av bindemiddel med leire, vil jorda få økt styrke og stabilitet. Deler av denne massen graves opp igjen ved etablering av kjeller etc., og kjøres til deponi for inerte masser. Ved oppgraving vil pelene være blandet med omkringliggende, ustabilisert masse som ikke har oppnådd samme styrke og stabilitet som pelene. Massene har til nå vært karakterisert som ubrukelige.

I denne oppgaven er det sett på muligheten for å gjenbruke de oppgravde massene for å øke nyttiggjøringen og bruken av dem. Dette vil avhenge av massenes geotekniske egenskaper etter oppgraving i tillegg til det anleggstekniske arbeidet som må utføres på massene for å gjøre dem bearbeidelige.

En rekke laboratorieundersøkelser er utført for å kunne bestemme de geotekniske parameterne til det oppgravde pelematerialet. For å kunne vurdere ulike massetyper, er tre forskjellige materialer blandet for å se hvordan disse utvikler seg over tid. Både bløt og kvikk leire er tatt i betraktning, da det er disse leirmaterialene som gjerne stabiliseres ved hjelp av kalk og sement. Først har det blitt blandet modellpeler med 50% Multicem og 50% Portlandsement blandet med henholdsvis bløt og kvikk leire, og herdet i en måned. Deretter er disse pelene knust til fint materiale og blandet med ren, ubehandlet leire. Bløt leire er blandet inn med en dekningsgrad på 35% av peler, mens kvikkeleire har blitt testet med en dekningsgrad på 35% og 25%. Dette betyr at materialet består av 35% pelemateriale og 65% ren, ubehandlet leire. Dette materialet er så stampet inn på nytt og hatt en herdetid på tre måneder.

Resultatene fra utførte laboratorieforsøk viser at de knuste og uttynnede pelematerialene oppnår gode verdier med tanke på styrke, plastisitet, komprimerbarhet og permeabilitet. I tillegg tolkes mineralogiundersøkelser at en eventuell restreaksjon mellom rent pelemateriale og ubehandlet leire ikke er tilstede etter uttynning og lagring i 12 uker. Det er en mulighet for å benytte massene i mineralske tettesjikt i deponier for farlig avfall, men grunnet ujevne resultater for hydraulisk konduktivitet kan ikke massene benyttes alene her. De kan derimot benyttes som geologisk barriere og tettesjikt i deponier for inerte masser. I og med at de tar komprimering og har høy styrke, viser massene et stort potensiale for gjenbruk i blant annet vegfyllinger, opparbeidelse av tomter og landskapsjustering, forutsatt at de bearbeides og blandes godt.

Ved videre arbeid anbefales det å benytte samme leirmateriale gjennom hele forsøksperioden for å minimere antall feilkilder og variable. De uttynnede kalk-/sementmassene oppnår god kvalitet, men det gjenstår et arbeid med å få jevne resultater, og like god tetthet på alle prøver. I tillegg bør fryse- og svinneegenskapene til materialet undersøkes for å kunne si noe om hvor godt materialet tåler uttørring, samt frost og tele.

Stikkord:

1. Gjenbruk av kalk-/sementstabiliserte masser
2. Deponier
3. Mineralsk tettesjikt
4. Byggemateriale

Emmi C. Kristensen

(sign.)

Forord

Denne oppgaven er et avsluttende arbeid i forbindelse med min mastergrad i geoteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU). Den er skrevet ved faggruppe for geoteknikk, institutt for bygg- og miljøteknikk våren 2017 og er et samarbeid med Norges Geotekniske Institutt (NGI). Oppgaven bygger videre på prosjektoppgave skrevet høsten 2016 med tema nyttegjøring av oppgravd kalk-/sementstabilisert leire med hovedfokus på gjenbruk i tettesjikt i deponier. Oppgaven utføres i tilknytning til NGIs interne forskningsprosjekt på nyttegjøring og gjenbruk av masser, GEOreCIRC.

Jeg vil gjerne takke mine veiledere ved både NTNU og NGI for god veiledning underveis. En spesiell takk må rettes til Arnfinn Emdal for god, faglig oppfølging gjennom oppgaven. I tillegg må Gunvor Baardvik og Gudny Okkenhaug ved NGI takkes for uvurderlig veiledning gjennom hele semesteret.

Oppgaven hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten tilgang på NGIs laboratorier i Oslo. I den forbindelse må laboranter og andre ansatte ved NGI takkes for veiledning og god hjelp underveis i forsøkene.

Til slutt vil jeg også takke venner og familie for korrektur, og all støtte underveis.

E.C.K.

Sammendrag

Kalk-/sementstabilisering er en mye brukt metode for å stabilisere sensitiv leire i dag. Ved innblanding av bindemiddel med leire, vil jorda få økt styrke og stabilitet. Deler av denne massen graves opp igjen ved etablering av kjeller etc., og kjøres til deponi for inerte masser. Ved oppgraving vil pelene være blandet med omkringliggende, ustabilisert masse som ikke har oppnådd samme styrke og stabilitet som pelene. Massene har til nå vært karakterisert som ubrukelige.

I denne oppgaven er det sett på muligheten for å gjenbruke de oppgravde massene for å øke nyttiggjøringen og bruken av dem. Dette vil avhenge av massenes geotekniske egenskaper etter oppgraving i tillegg til det anleggstekniske arbeidet som må utføres på massene for å gjøre dem bearbeidelige.

En rekke laboratorieundersøkelser er utført for å kunne bestemme de geotekniske parametrene til det oppgravde pelematerialet. For å kunne vurdere ulike massetyper, er tre forskjellige materialer blandet for å se hvordan disse utvikler seg over tid. Både bløt og kvikk leire er tatt i betraktning, da det er disse leirmaterialene som gjerne stabiliseres ved hjelp av kalk og sement. Først har det blitt blandet modellpeler med 50% Multicem og 50% Portlandsement blandet med henholdsvis bløt og kvikk leire, og herdet i en måned. Deretter er disse pelene knust til fint materiale og blandet med ren, ubehandlet leire. Bløt leire er blandet inn med en dekningsgrad på 35% av peler, mens kvikkeleire har blitt testet med en dekningsgrad på 35% og 25%. Dette betyr at materialet består av 35% pelemateriale og 65% ren, ubehandlet leire. Dette materialet er så stampet inn på nytt og hatt en herdetid på tre måneder.

Resultatene fra utførte laboratorieforsøk viser at de knuste og uttynnede pelematerialene oppnår gode verdier med tanke på styrke, plastisitet, komprimerbarhet og permeabilitet. I tillegg tolkes mineralogiundersøkelser at en eventuell restreaksjon mellom rent pelemateriale og

ubehandlet leire ikke er tilstede etter uttynning og lagring i 12 uker. Det er en mulighet for å benytte massene i mineralske tettesjikt i deponier for farlig avfall, men grunnet ujevne resultater for hydraulisk konduktivitet kan ikke massene benyttes alene her. De kan derimot benyttes som geologisk barriere og tettesjikt i deponier for inerte masser. I og med at de tar komprimering og har høy styrke, viser massene et stort potensiale for gjenbruk i blant annet vegfyllinger, opparbeidelse av tomter og landskapsjustering, forutsatt at de bearbeides og blandes godt.

Ved videre arbeid anbefales det å benytte samme leirmateriale gjennom hele forsøksperioden for å minimere antall feilkilder og variable. De uttynnede kalk-/sementmassene oppnår god kvalitet, men det gjenstår et arbeid med å få jevne resultater, og like god tetthet på alle prøver. I tillegg bør fryse- og svinnegenskapene til materialet undersøkes for å kunne si noe om hvor godt materialet tåler uttørring, samt frost og tele.

Abstract

Lime cement stabilization is a widely used method for stabilizing sensitive clay today. By mixing binder with clay, the soil will increase its strength and stability. Upon excavation, the lime cement columns will be mixed with the surrounding, unstabilized masses which have not achieved the same strength and stability. Such masses are often taken to landfill of inert waste.

The possibility of re-using this material gives an opportunity to increase the utilization of it. However, this depends on the geotechnical properties of the material, and also the chemical process that occurs when mixing binder with clay. In addition, how the construction work is conducted is of major importance for the final properties of the masses.

A number of laboratory tests have been carried out to determine the geotechnical parameters of the pile material. In order to evaluate different types of masses, three different materials are mixed to see how they develop over time. Both soft and quick clay are taken into account as these clay materials are the most common to stabilize with lime and cement. First, ordinary model piles with Multicem and Portland cement have been mixed with both soft and quick clay, before they have had a curing time of one month. Then, these piles have been crushed into fine material and mixed with pure clay once more. The soft clay was mixed with a coverage of 35% Multicem-cement column and 65% pure clay, and the quick clay had a coverage of both 35% and 25% Multicem-cement column. Finally, this material has been stamped into test cylinders and had a curing time of three months.

The results from the laboratory tests show that the pile materials achieve good values in terms of strength, plasticity, compressibility, and permeability. In addition, the mineralogy tests show that a potential rest reaction between the pile material and the pure clay is not present after mixing with pure clay and storage for 12 weeks. There is also a possibility for using the

masses in the impermeable layer in landfills for hazardous waste, but because of uneven results for hydraulic conductivity the masses can not be used in this layer alone. They can, however, be used as a geological barrier, and in the impermeable layer in landfills for inert masses. As the masses take compression and have high strength, they show a great potential for being reused in among road embankments, land cultivation, and landscaping, provided that they are processed and blended well.

For further work, it is recommended to investigate both the freezing and shrinkage properties. The diluted lime cement material achieve good quality, but work remains to be done to achieve even results and even density on all samples. It is also recommended to use the same clay material throughout the whole trial period to minimize the source of errors and the amount of variables.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Figurliste	x
Tabelliste	xv
Symbolliste	xvii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Hensikt	6
1.3 Begrensninger	6
1.4 Disposisjon	7
2 Bakgrunn	9
2.1 Deponier	9
2.1.1 Praksis i Norge	9
2.1.2 Praksis i utlandet	13
2.1.3 Materialer til bruk i barrierer	16
2.1.4 Kontroll og oppfølging	18
2.2 Mineralogi av leire	18
2.3 Leirmaterialer	20
2.3.1 Tørrskorpeleire	20
2.3.2 Marin leire	20

2.4	Kalk-/sementstabilisering av leire	22
2.4.1	Innblandingsprosess	22
2.4.2	Bindemidler	23
2.4.3	Kjemisk prosess	26
2.4.4	Materialegenskaper til kalk-/sementstabilisert leire	27
2.4.5	Problemer og utfordringer	29
2.4.6	Omkringliggende leire	30
2.5	Gjenbruk av stabiliserte masser	31
2.5.1	Deponier	31
2.5.2	Byggemateriale	31
2.6	Anleggsteknikk	32
2.6.1	Komprimeringsarbeid	32
2.6.2	Utlegging og komprimering av masser	34
2.6.3	Planlegging, kontroll og oppfølging	36
3	Langøya	39
3.1	Historie	39
3.2	Oppbygning	41
3.2.1	Bruk av kalk-/sementstabilisert leire i topptettingen	43
3.3	Anleggsteknisk arbeid for utlegging av stabilisert masse	44
4	Laboratorieundersøkelser og forsøksprosedyre	47
4.1	Forsøksprosedyre	48
4.1.1	Innblandingsprosess	48
4.1.2	Utgangsmateriale	49
4.2	Laboratorieundersøkelser	50
4.2.1	Rutineundersøkelser	51
4.2.2	Enaksielt trykkforsøk	51
4.2.3	Standard Proctor	52
4.2.4	Permeabilitetstest	53

4.2.5	Titreringsforsøk	54
4.2.6	Mineralogi	55
5	Resultater	57
5.1	Vanninnhold	58
5.1.1	Innblanding med kvikkleire	58
5.1.2	Innblanding med bløt leire	59
5.2	Plastisitetsindeks	60
5.2.1	Innblanding med kvikkleire	62
5.2.2	Innblanding med bløt leire	63
5.3	Konusforsøk	64
5.3.1	Innblanding med kvikkleire	65
5.3.2	Innblanding med bløt leire	65
5.4	Hydrometeranalyse	66
5.4.1	Innblanding med kvikkleire	66
5.4.2	Innblanding med bløt leire	68
5.5	Enaksielt trykkforsøk	69
5.5.1	Innblanding med kvikkleire	70
5.5.2	Innblanding med bløt leire	70
5.6	Standard Proctor	71
5.7	Permeabilitetsforsøk	73
5.8	Titreringsforsøk	74
5.9	XRF-analyse	75
5.10	XRD-analyse	77
5.10.1	SEM-foto	78
5.11	Feilkilder	79
6	Konklusjon og anbefalinger for videre arbeid	81
6.1	Diskusjon	81
6.1.1	Rutineundersøkelser	81

6.1.2	Komprimerbarhet	83
6.1.3	Permeabilitet	83
6.1.4	Syrenøytralisering	84
6.1.5	Mineralogi	84
6.2	Konklusjon	85
6.2.1	Gjenbruk av stabiliserte og uttynnede materialer	85
6.2.2	Anleggsteknisk arbeid	87
6.3	Anbefalinger for videre arbeid	88
6.3.1	Fryse- og svinnforsøk	88
6.3.2	Treaksielt trykkforsøk og ødometerforsøk	88
6.3.3	Langtidseffekter av lagring	88
6.3.4	Tilstrekkelig materiale	89
6.3.5	Variasjon av parametere	89
6.3.6	Skala	89
	Bibliografi	90
	A Resultater fra laboratorieundersøkelser	97
A.1	Rutineundersøkelser	97
A.2	Enaksielt trykkforsøk	130
A.3	Standard Proctor	133
A.4	Permeabilitetsforsøk	139
A.5	Titreringsforsøk	143
A.6	SEM-foto	147
	B Utregninger	157
B.1	Innblanding av Multicem og sement	157
B.2	Beregning av dekningsgrad og uttynning	161
B.3	Beregning av teoretisk vanninnhold	165
B.4	Beregning av innhold av Multicem og sement etter uttynning	166

Figurliste

1.1	Utgraving av kalk-/sementpeler ved etablering av skjæring (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)	1
1.2	Utglidning av massedeponi i Hobøl (Askim, 2014)	2
1.3	Etablering av kalk-/sementpeler	2
1.4	Utsnitt av arbeidstegning fra Nytt Nasjonalmuseum (ikke i målestokk). Viser andelen pelen i forhold til ustabilisert, omkringliggende masse. Rutenettet er ca. 4x4 m.	3
2.1	Prinsippskisse for bunntetting i deponier (Miljøverndepartementet, 2003)	10
2.2	Prinsippskisse for topptetting i deponier (Miljøverndepartementet, 2003)	12
2.3	Prinsipp for oppbygning av deponiklasse III i Tyskland. Bunntetting til venstre, topptetting til høyre (Schanz, uå)	14
2.4	Utlekking av leire ved hjelp av doser og vals ved deponi i Tyskland (Scheiber and Schröder, 2014)	15
2.5	Prinsippskisse for oppbygning av deponier for farlig avfall i USA. Modifisert etter (EPA, 1989)	15
2.6	Bestanddelene i sjiktmineraler (Mitchell and Soga, 2005)	18
2.7	Utbredelse av det diffuse dobbeltlaget. Modifisert etter NVE (Helle, 2013)	19
2.8	Forekomster av kartlagt marin leire i Norge (NVE, 2017)	21
2.9	Korthusstruktur i marine leirer (Emdal, 2014)	21
2.10	Prinsipp for kalk-/sementstabilisering (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)	23
2.11	Fasthetsutvikling for sement (Engelsen and Aarstad, 2016)	24

2.12 CO ₂ -utslipp i sementproduksjon i Norge 2010-2015 (Sentralbyrå, 2017)	25
2.13 Fasthetsutvikling for tre ulike bindemidler. Modifisert etter (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)	27
2.14 Prinsipp for FOPS (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)	29
2.15 Ulike pelemønstre (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)	30
2.16 Prinsipp for komprimering med vibrasjon (Aksnes and Fladvad, 2014)	32
2.17 Dybdevirkning som funksjon av statisk linjelast og materiale (Aksnes and Fladvad, 2014)	33
2.18 Prinsipp for statisk komprimering (Aksnes and Fladvad, 2014)	34
2.19 Optimalt vanninnhold w_{opt} og tilhørende tørr densitet $\rho_{d,opt}$ for ulike materialer (Emdal, 2014)	35
2.20 Ulikt komprimeringsutstyr (Intro, uå)	36
2.21 Fire ulike metoder for måling av permeabilitet i felt (Daniel, 1989). Borhullsmetoden oppe til venstre.	37
2.22 Ulike metoder for måling av densitet	38
3.1 Langøya på kart (Utsnitt fra Google Maps)	40
3.2 Oversikt over Langøya (NOAH, 2017)	40
3.3 Avfallsgips på Langøya (Foto: Privat)	40
3.4 Oppbygningen på Langøya. Deponering av farlig avfall opp til kote 0 og overliggende ordinært avfall (Eek et al., 2013)	41
3.5 Alternativ med komprimert tørrskorpeleire som mineralsk tettesjikt fra Langøya (Baardvik et al., 2014)	42
3.6 Bruk av kalk-/sementstabiliserte masser i arronderingslaget. Modifisert etter (Hjellnes Consult AS, 2015)	43
3.7 Cat D11 (venstre) og Cat D8 (høyre) benyttet i utlegging ved Langøya (Foto: Harald Hansen, NOAH)	44
3.8 Testfelt for kalk-/sementstabilisert leire på Langøya. Alle foto av Harald Hansen, NOAH	45

4.1	Innblandings- og innstampingsprosess	48
4.2	Kvikkleireskred i Sørumsøen november 2016	50
4.3	Utskyving av prøvepel	51
4.4	Forberedelse av prøve til enaksielt trykkforsøk	52
4.5	Utførelse av Standard Proctor-test	53
4.6	Forberedelse av prøve til permeabilitetstest	54
4.7	Oppsett for titreringsforsøk	55
4.8	Zeiss EVO 50 EP SEM maskin benyttet for SEM-fotografering (Zeiss, 2017)	56
4.9	X-Max ^N detektor benyttet for SEM EDX-fotografering (Instruments, 2017)	56
5.1	Resultat av vanninnhold	59
5.2	Resultat fra plastisitetstest	60
5.3	Prøvematerialets naturlige vanninnhold w_N vs. plastisitetstestene w_P og w_L	61
5.4	Atterbergs konsistensgrenser (Emdal, 2014)	62
5.5	Resultat fra konusforsøk	64
5.6	Hydrometeranalyse av K-35	67
5.7	Hydrometeranalyse av K-25	67
5.8	Hydrometeranalyse av B-35	68
5.9	Resultat fra enaksiale trykkforsøk	69
5.10	Resultat fra Standard Proctor. Tørr tyngdetetthet for testede vanninnhold	71
5.11	Resultat fra Standard Proctor. Våt tyngdetetthet for testede vanninnhold	72
5.12	Resultat fra permeabilitetsforsøk	73
5.13	Resultat fra titreringsforsøk	74
5.14	XRF-analyse av kvikkleire fra Sørumsøen	75
5.15	XRF-analyse av K-35	76
5.16	XRF-analyse av K-25	76
5.17	XRF-analyse av B-35	77
5.18	SEM-foto av ubehandlet, omrørt kvikkleire fra Sørumsøen. Forstørret 15000x	78
5.19	SEM-foto av K-35 uke 12. Forstørret 15000x	78

Tabelliste

1.1	Utført forsøksprogram	5
2.1	Krav til oppbygning av bunntetting (Miljøverndepartementet, 2003)	11
2.2	Krav til oppbygning av topptetting (Miljøverndepartementet, 2003)	12
2.3	Typiske geotekniske verdier for norske leirer (Bjerrum, 1954) og (Emdal, 2014) . . .	20
2.4	Hydraulisk konduktivitet av ulike materialer (Larsson, 2008)	28
4.1	Utført forsøksprogram	47
4.2	Oversikt over parametere og tilhørende forsøk	50
5.1	Beskrivelse av materialer	57
5.2	Oppsummering av vanninnhold w i pelematerialet	58
5.3	Oppsummering av plastisitetsindeks I_P	60
5.4	Oppsummering av plastisitetsgrensene w_P og w_L	61
5.5	Oppsummering av omrørt konusforsøk	64
5.6	Leirinnhold funnet ved hydrometeranalyser	66
5.7	Oppsummering av enaksiell styrke s_u	69
5.8	Oppsummering av Standard Proctor-forsøk	71
5.9	Oppsummering av SEM-foto	77
6.1	Krav og vurdering av oppfyllelse til mineralsk tettesjikt i deponi for farlig avfall (Baardvik et al., 2014)	86

Symbolliste

s_u	Udrenert skjærstyrke
$s_{u,r}$	Omrørt skjærstyrke
S_t	Sensitivitet
C_u	Graderingstall
k	Permeabilitetskoeffisient eller hydraulisk konduktivitet
w	Vanninnhold
w_N	Naturlig vanninnhold
w_L	Flytegrense
w_P	Rullegrense
w_S	Svinngrense
I_P	Plastisitetsindeks
η	Dekningsgrad
γ	Tyngdetetthet
γ_d	Tørr tyngdetetthet
γ_{wet}	Våt tyngdetetthet
ρ	Densitet

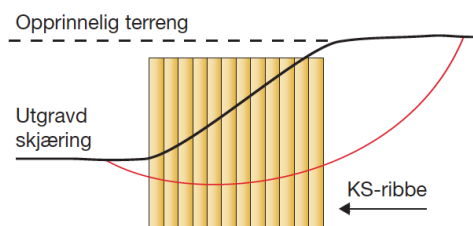
q	Vannføring
a	Aktivitet
i	Gradient
A	Areal av prøve
FOPS	Forinstallert omvendt pelesondering
HDPE	High-Density Polyethylene
NGI	Norges Geotekniske Institutt
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse
SD	Svensk Djupstabilisering
SEM	Scanning Electron Microscope
SEM-EDX	Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray analysis

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn

Mange anleggsprosjekt i Norge støter på store utfordringer i grunnforholdene, da det finnes forekomster av kvikkleire eller bløt leire som kan være svært utfordrende å bygge i. Det må derfor prosjekteres gode løsninger for å sikre at byggegrunnen kan belastes og graves i. En effektiv metode som har blitt benyttet i Norge siden midten av 1970-tallet er kalk-/sementstabilisering av leire. I denne prosessen dannes det peler, og den kjemiske reaksjonen som oppstår mellom leire og bindemiddel fører til en økning i styrken til jorda, som igjen gir en forbedring i stabilitet og bæreevne. Der det senere skal etableres for eksempel kjeller, tunnelpåhugg eller skjæring, graves deler av den stabiliserte massen ut og kjøres til deponi for inerte masser, se figur 1.1.



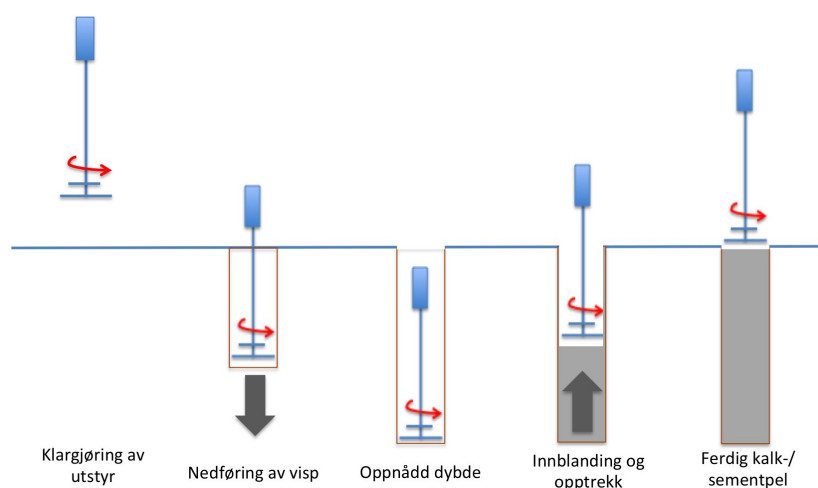
Figur 1.1: Utgraving av kalk-/sementpeler ved etablering av skjæring
(Norsk Geoteknisk Forening, 2012)

Disse massene anses derfor som overskuddsmasser og har ingen bestemte bruksområder etter endt brukstid. Utgravde masser av leire, spesielt kvikkleire, kan være svært vanskelige å frakte siden de er flytende, se figur 1.2, samtidig som pelen av kalk og sement ligger som klumper i massen.



Figur 1.2: Utglidning av massedeponi i Hobøl (Askim, 2014)

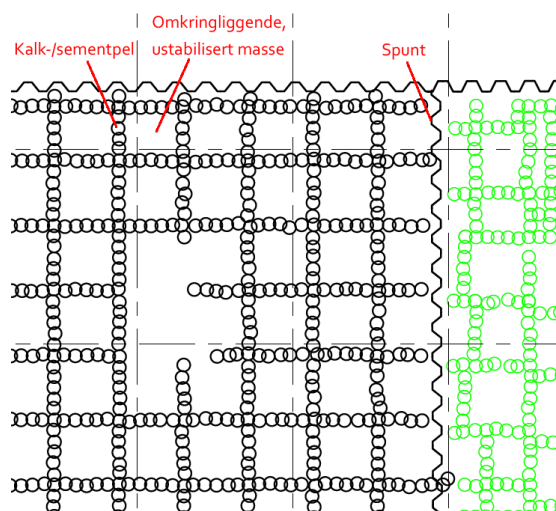
Pelene installeres ved at en innblandingsvisp, festet til en borestang, føres ned i bakken til underkant av pelen. Innblåsing av kalk og sement starter når ønsket dybde er nådd, og vispen roteres og heves samtidig som innblandingen starter, se figur 1.3.



Figur 1.3: Etablering av kalk-/sementpeler

Kostnadene knyttet til en slik stabiliseringsprosess avhenger av omfanget og hvor mye masse som må stabiliseres. Ved utbyggingen av Nytt Nasjonalmuseum i Oslo ble de totale kostnadene for stabiliseringen ca. 2 000 000 NOK med en pris per løpemetre på ca. 90 NOK (NGI, 2016). Ca. 25% av det stabiliserte volumet ble senere gravd opp og anvendt i topptettingen i deponiet på Langøya. Dette betyr at ca. 500 000 NOK ble benyttet videre og belyser muligheten for gjenbruk av massene.

I beregningene fra Nytt Nasjonalmuseum ble en dekningsgrad η på ca. 40% benyttet. Denne prosenten beskriver hvor stor andel av arealet og volumet av massene som består av kalk-/sementpeler i forhold til ren, ubehandlet leire, se figur 1.4. Med en dekningsgrad på 40% består materialet av 40% kalk-/sementstabilisert masse, mens 60% er ren leire. Dette vil si at det som ikke er stabilisert fremdeles er svært bløt eller kvikk leire. Ofte kan η ligge nærmere 20-25%, men en η lik 40% ga rom for en effektiv logistikk og travel byggeprosess. Det faktiske innholdet av rent bindemiddel vil være mye mindre, og utgjøre en svært lav prosent i den utgravde massen. Beregning av dekningsgrad og faktisk innhold av bindemiddel samt en nærmere beskrivelse vises i vedlegg B.2.



Figur 1.4: Utsnitt av arbeidsteigning fra Nytt Nasjonalmuseum (ikke i målestokk). Viser andelen pelen i forhold til ustabilisert, omkringliggende masse. Rutenettet er ca. 4x4 m.

Kalk-/sementstabilisering er ikke bare en kostbar prosess, men det er også høye utslipp forbundet med sementproduksjon. I 2016 kom ca. 8% av det globale CO₂-utslippet fra sementproduksjon (Olivier et al., 2016). I Norge var utslippet på 672 000 tonn CO₂-ekvivalenter i 2015 noe som er en svært liten andel globalt sett (Sentralbyrå, 2017). Dette er med på å understreke viktigheten av å gjenvinne massene og bruke de på nytt ved en senere anledning.

Deler av avfallsdeponiet på Langøya er dekket med komprimert tørrskorpeleire. Dette er et attraktivt materiale å benytte som tettesjikt i deponier fordi det ikke krymper på samme måte som leire fra dypere lag. I 2016 undersøkte NGI muligheten for å benytte kalk-/sementstabilisert masse til dette formålet. Ideen kom fra NOAH AS, hvor det på det tidspunktet var tatt i mot kalk-/sementstabilisert masse på Langøya fra byggegrøpen til Nytt Nasjonalmuseum. Der ble de oppgravde massene fra Oslo benyttet til å lage et underlag for tetting og avslutning av deponiet. Flere omlastinger av massene underveis førte til en homogenisering som gjorde at massene kunne komprimeres og benyttes på nytt.

Problemstilling

Denne masteroppgaven ønsker å belyse hvordan kalk-/sementstabiliserte masser kan brukes på nytt med hovedfokus på gjenbruk i deponier, men også å kartlegge andre mulige bruksområder. Gjenbruk av stabiliserte masser kan gi kostnadsbesparelser i fremtiden, da de kan tilegnes nye bruksområder etter endt brukstid. I tillegg til gevinst i økonomi og miljø, kan det også finnes en gevinst i fremdrift, logistikk og angrepsrekkefølge i senere prosjekt.

Når massene graves opp, anses de som overskuddsmasser uten spesifikke bruksområder. Det har derfor til nå blitt vurdert som umulig å gjøre noe med slike masser annet enn å tippe de som mer eller mindre flytende masse grunnet manglende kunnskap for senere nyttegjøring av massene. Videre kjenner man heller ikke til hvilke geotekniske egenskaper massen har og om disse vil endre seg over tid. Oppgaven skal undersøke om det finnes en restreaksjon mellom de knuste pelene og ren leire som fører til en styrkeøkning over tid, og eventuell fare for uttørring og oppsprekking. Egenskapene til dette materialet skal undersøkes i laboratoriet i tillegg til behandlingen massene bør ha for å kunne nyttegjøre den senere.

Laboratorieundersøkelser

De geotekniske egenskapene til kalk-/sementpelene ble undersøkt gjennom et omfattende forsøksprogram som strakk seg over 5-6 uker totalt. Uke 42 i 2016 ble benyttet til å blande leire med Multicem og sement, og å stampe prøvepeler som herdet i en måned. Disse ble så trykktestet i uke 46 i tillegg til at rutineundersøkelser ble utført. Etter rutineundersøkelsene i uke 46, ble pelematerialet tyttet ut med ren leire for å illustrere massen etter oppgraving. En oppsummering av gjennomførte tester og tid for disse vises i tabell 1.1. Disse testene ble valgt for å raskt kunne si noe om egenskapene til materialet og for å avgjøre om materialet var noe som kunne tas med videre. I tillegg var de relativt rimelige å utføre.

Tabell 1.1: Utført forsøksprogram

Type forsøk	2016		2017	
	Uke 42	Uke 46	Uke 8	Uke 9, 10 og 11
Vanninnhold	x	x	x	-
Plastisitetsindeks	x	x	x	x
Omrørt konusforsøk	x	x	x	-
Kornfordeling	-	x	x	x
Enaksielt trykkforsøk	-	x	x	-
Standard Proctor	-	x	x	-
Permeabilitetsforsøk	-	-	x	-
Titreringsforsøk	-	-	x	-
XRF- og XRD-analyse	-	x	x	-
SEM-foto	-	-	-	x

Testene ble utført ved NGIs laboratorium i Oslo ved alle anledninger, bortsett fra hydrometeranalysene som ble utført på NTNU. Permeabilitetsforsøkene er finansiert av NOAH og ble utført av Pasquale Carotenuto ved NGI i Oslo. For å undersøke en eventuell restreaksjon og hva slags mineraler det blandede materialet har, ble det også utført mineralogitester ved både NOAH og NGU sine laboratorier da dette ikke utføres ved NGI eller NTNU. I tillegg er det utført SEM-fotografering av materialene ved NMBU i Ås.

1.2 Hensikt

Denne masteroppgaven skrives i samarbeid med NGI og deres interne forskningsprosjekt GEO-reCIRC. Formålet med dette prosjektet er å utvikle metoder som danner grunnlag for økt nyttgjøring av:

- Restprodukter og overskuddsmasse som er lettere forurenset og som i dag blir ansett som avfall
- Problemfraksjoner som blir ansett som rene og som har et potensial for nyttiggjøring, som for eksempel ulike typer av industrislagg etc.

Disse punktene gjenspeiler følgelig hensikten med denne oppgaven, da den ønsker å belyse nye bruksområder for kalk-/sementstabilisert leire etter endt brukstid, siden dette i dag er lite utforsket og dokumentert. Dette kan være i impermeable barrierer, som konstruksjonsmateriale, tildekkingsmaterialer etc. Oppgaven ønsker også å vise hvilke undersøkelser og kontroller som bør utføres for å dokumentere at det er mulig å gjenbruke massene. Her er særlig det anleggstekniske arbeidet viktig med følgende momenter i spissen (Okkenhaug and Pabst, 2016):

- Kontroll av vekt på utstyr for å avgjøre antall overfarter.
- Kontroll av lagtykkelser for å sikre at komprimeringseffekten ivaretas.

1.3 Begrensninger

Tid har vært et viktig aspekt i denne oppgaven. Det tar tid å blande materiale til et ambisiøst testprogram som presenteres i denne oppgaven, og i starten var det ikke klart hvor mye materiale som ville være nødvendig. Det ble derfor tatt utgangspunkt i hva som kunne la seg blande på tiden som var tilgjengelig i uke 42 og 46. Den opprinnelige tanken var å utføre forsøk med kvikkleire og bløt leire parallelt med like mange prøver av hvert materiale. Kvikkleire fordi det er mest vanlig å stabilisere med kalk og sement, og bløt leire fordi det er det som er stabilisert ved Nytt Nasjonalmuseum.

Ved å benytte leire fra samme geografiske sted til hver forsøksserie og til videre uttynning, ville antallet variable og feilkilder vært et minimum. Det var det dessverre ikke anledning til i den aktuelle perioden, men det ble benyttet masser med svært like egenskaper for øvrig. Ved uttynning av kvikkleirematerialet ble det hentet leire fra skredet som gikk i Sørum november 2016.

Det ble også satt begrensninger til hvilken skala materialet ble testet i. Standard Proctor ga en indikasjon på komprimerbarheten til massene, men det mest ideelle hadde vært å legge ut massene over et større areal for så å komprimere disse. Dette ble altså ikke gjort grunnet manglende budsjett, areal og tid. Av samme grunner som nevnt ovenfor, ble det heller ikke utført ødometer- og triaksialforsøk, samt fryse- eller svinnforsøk på materialet. Dette ville gitt en god indikasjon på deformasjons- og styrkeparametere, i tillegg til å kunne vite hvor motstandsdyktig materialet er mot frost og kryp.

1.4 Disposisjon

Etter dette innledende kapittelet er oppgaven i grove trekk delt opp i et kapittel med teori og litteratur knyttet til deponier, leirmaterialer og anleggsteknikk. Det tredje kapittelet presenterer Langøya som deponi og de benyttede løsningene der, og videre presenterer kapittel 4 en beskrivelse av de ulike forsøkene som er gjennomført. Resultatene fra forsøkene presenteres i kapittel 5 før en avsluttende del med konklusjoner og anbefalinger for videre arbeid kommer i kapittel 6.

Kapittel 2

Bakgrunn

Teorien i denne oppgaven omhandler i stor grad deponier, ulike leirmaterialer samt anleggsteknikk. I tillegg vil en stor del beskrive kalk-/sementstabilisering av leire og egenskaper knyttet til slik stabilisert masse.

2.1 Deponier

2.1.1 Praksis i Norge

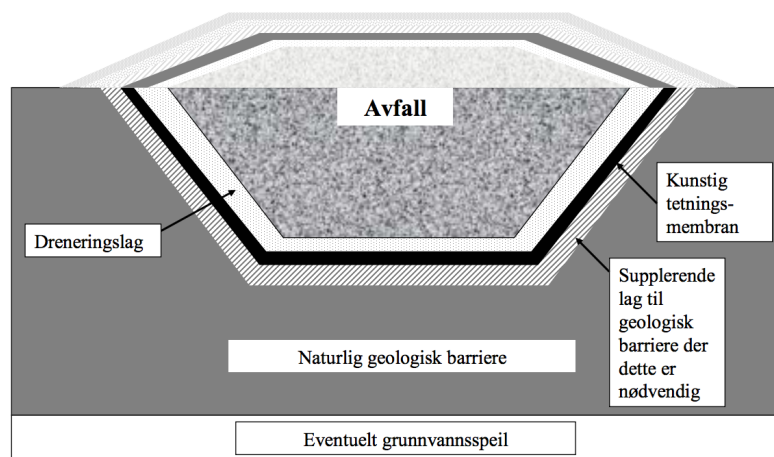
Deponering i Norge reguleres av avfallsforskriften (Klima- og miljøverndepartementet, 2004) som har sin bakgrunn i EUs deponidirektiv fra 2009. Per 2017 finnes det totalt 79 deponier hvorav 62 av disse mottar ordinært avfall i Norge (Miljødirektoratet, 2017). Dette kan være kommunalt avfall og massene kan være lett forurensede som for eksempel jord- og gravemasser, betong etc. (Norsk Gjenvinning, uå). Et deponi for uorganisk, farlig avfall befinner seg på Langøya utenfor Holmestrand. Hit fraktes det farlig avfall som uorganisk og industrielt avfall samt annet miljøfarlig avfall.

I Norge har avfallet i stor grad bestått av søppel fra husholdninger og industri, men de senere årene har avfallet også bestått av slagg og aske i tillegg til annet farlig avfall på grunn av økte volumer med forbrenning av husholdningsavfall og varmekraftverk. Dette har ført til at det er flere avfallstyper som det blir vanskelig å få gjort noe med.

I tillegg til avfall fra husholdninger og industri, har det i løpet av de senere årene også blitt nødvendig å deponere alunskifer. Alunskifer er en bergart som i all hovedsak finnes på Østlandet. Den inneholder mye uran og kan ved reaksjon med luft gi sur avrenning som for eksempel svovelsyre (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015). En eventuell nedbrytingsprosess av farlige stoffer kan utgjøre store skader og utslipp, og det er derfor viktig at dette prioriteres ved prosjektering og utførelse. Klassifisering og behandling av avfall er nedfelt i forskrifter og veiledere.

Bunntetting

Bunntettingen i et deponi skal sikre at jord og vann beskyttes på en forsvarlig måte, og det settes derfor krav til dobbel bunn- og sidetetting i deponier for ordinært og farlig avfall. Dette betyr at bunn og sider skal være bygget opp med både en geologisk barriere og en kunstig tetningsmembran. De ulike avfallstypene krever forskjellig behandling og kravene som settes til oppbygningen av deponiene avhenger av type avfall. Prinsippskisse for design av bunntettingen i deponier vises i figur 2.1.



Figur 2.1: Prinsippskisse for bunntetting i deponier (Miljøverndepartementet, 2003)

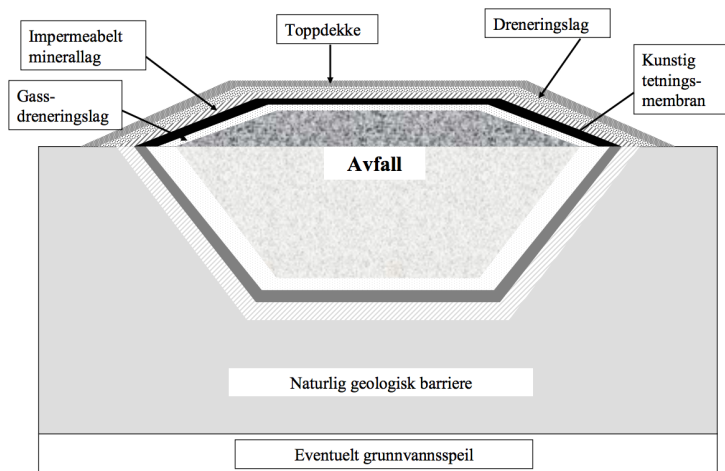
Tabell 2.1: Krav til oppbygning av bunntetting (Miljøverndepartementet, 2003)

Spesifisert krav	Deponikategori		
	Farlig avfall	Ordinært avfall	Inert avfall
Dreneringslag > 0,5m	Krav	Krav	-
Kunstig tetningsmembran	Krav	Krav	-
Geologisk barriere, $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s	Krav	Krav	-
Geologisk barriere, $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s	-	-	Krav
Tykkelse geologisk barriere	> 5 m	> 1 m	> 1 m

Den geologiske barrieren befinner seg nederst i deponiet og har som oppgave å holde tilbake eventuelt sigevann fra den kunstige tetningsmembranen som befinner seg over. Den fungerer dermed som en sikkerhet for de overliggende lagene dersom de skulle miste sin funksjon. Kravene settes til tykkelse på lagene samt den hydrauliske konduktiviteten til den geologiske barrieren. Disse vises i tabell 2.1. Barrieren er gjerne naturlig i form av fjellmasser, men dersom dette ikke er tilgjengelig eller massene ikke tilfredsstillende kravene, må det suppleres med en kunstig barriere for å oppnå tilstrekkelig permeabilitet. Det settes ingen krav eller spesifikasjoner til type eller tykkelse på denne. I Norge har tynne bentonittmembraner omgitt av drenerende materialer blitt benyttet (Miljøverndepartementet, 2003). Dreneringslaget skal ha en anbefalt tykkelse på minimum 0,5 m og lede vekk sigevannet fra membranoverflaten slik at dette renner ut sammen med det resterende sigevannet. Materialet som benyttes skal være bestandig mot frost og ha gode, drenerende egenskaper (Miljøverndepartementet, 2003).

Topptetting

For å sikre gode avrenningsforhold og stabilitet av deponiet, må hvert enkelt tilfelle vurderes og skreddersys, da geologiske forutsetninger og nedbørsmengder vil variere fra sted til sted. Prinsippkisse for design av topptettingen i deponiet vises i figur 2.2 og de ulike lagene som inngår i topptettingen vises i tabell 2.2. Topptettingen består av totalt tre lag og har som hensikt å forhindre vann og frost i å trenge ned i massene. Mektigheten på lagene varierer ut fra hva slags materiale som benyttes, men graderingstallet C_u for disse massene bør ikke være lavere enn 15 da faren for konveksjon og frostinntrengning øker med avtakende C_u . Dette skyldes at porevolumet er lavt og luft enkelt kan trenge inn. Eksempelvis kan det benyttes sand, leire, rene fyllmas-



Figur 2.2: Prinsippskisse for topptetting i deponier (Miljøverndepartementet, 2003)

ser eller andre typer masser avhengig av hva som er tilgjengelig og hva infiltrasjonen tillater. En helning mellom 1:4 og 1:10 vil kunne sikre stabilitet og avrenning av overflatevann samt minke faren for oppsprekking, men dette må igjen tilpasses hvert enkelt tilfelle (Okkenhaug and Pabst, 2016).

Tabell 2.2: Krav til oppbygning av topptetting (Miljøverndepartementet, 2003)

Spesifisert krav	Deponikategori	
	Farlig avfall	Ordinært avfall
Toppedekke > 1m	Anbefalt	Anbefalt
Dreneringslag > 0,5m	Anbefalt	Anbefalt
Impermeabelt minerallag, $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s	Anbefalt	Anbefalt
Kunstig tetningsmembran	Anbefalt	Ikke påkrevd
Gassdreneringslag	Ikke påkrevd	Anbefalt

Under utleggings- og komprimeringsfasen kan vann trenge inn ved perkolasjon og skape utfordringer for utformingen av deponiet. Dreneringslaget skal derfor sikre at eventuelt sigevann fra toppedekket renner vekk og ikke infiltreres videre nedover i tettingen. Grus og sand er godt egnet til bruk i dette sjiktet, og for å sikre drenasje og hindre oppbygging av vanntrykk, bør mektigheten være minimum 0,5 m. Samtidig skal dreneringslaget holde deponiet fuktig nok for å hindre uttørking og oppsprekking (Miljøverndepartementet, 2003).

Under dreneringslaget finner man det impermeable minerallaget. Dets funksjon er å forhindre at eventuelt sigevann trenger inn og vasker ut stoffer fra avfallet, og å lede vekk deponigass slik at dette ikke siver ut i naturen (Miljøverndepartementet, 2003). Det er ikke angitt en minimum tykkelse på laget, men vil avhenge av materialet som benyttes. Uavhengig av materialvalg skal dette laget oppfylle krav til hydraulisk konduktivitet k i tabell 2.2. Dersom materialet ikke oppfyller kravet alene, skal det suppleres med en kunstig tetningsmembran som for eksempel HDPE-membran.

I tilfeller hvor deponiet inneholder eller kan avgi gasser setter forskriften krav til et gassdreneringslag som skal samle opp eventuell gass fra avfallet, og fordele den jevnt utover dekket (Miljøverndepartementet, 2003). Heller ikke i dette sjiktet settes det krav til mektighet og materialer, men C_u bør ikke være for høyt og materialet bør være porøst i likhet med det som benyttes i toppdekket. Eksempelvis kan dette bestå av sand eller grus.

2.1.2 Praksis i utlandet

I Europa er deponidirektivet fra 2009 gjeldende, men hvert enkelt land har egne avfallsforskrifter som regulerer deponeringen i landet. Regelverk i Sverige, Tyskland og USA er tatt med i betraktning for å undersøke eventuelle forskjeller fra avfallsforskriften i Norge.

Sverige

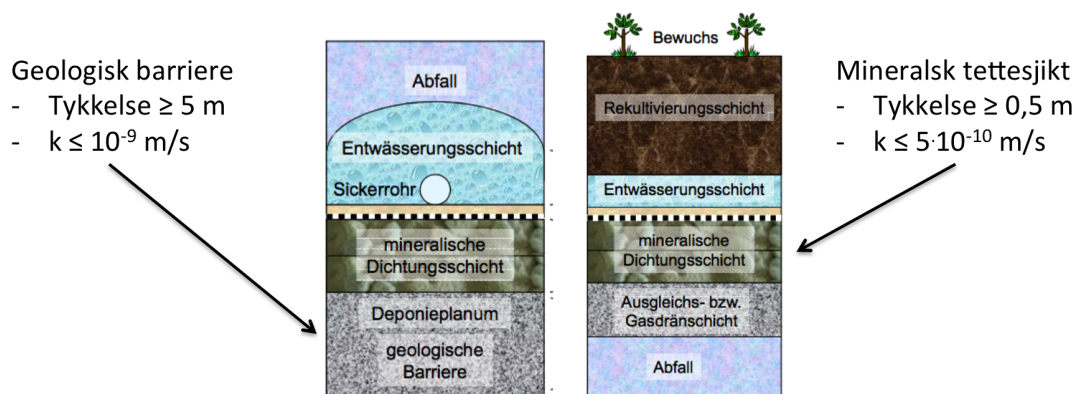
Deponihandboken fra 2012 tilsvarende avfallsforskriften her i Norge, og beskriver avfallsdeponering og oppbygning av deponier. Da Sverige også forholder seg til EUs direktiv på lik linje som Norge, er kravene som settes til bunntetting og geologisk barriere like. Den setter også krav til utlekking av sigevann (Avfall Sverige, 2012):

- Utlekking av sigevann gjennom den geologiske barrieren skal skje over minst 200 år for deponier med farlig avfall, mens kravet er 50 år for ordinære og inerte avfallstyper.
- Dersom kravet ovenfor ikke oppfylles, må det suppleres med en ekstra geologisk barriere som oppfyller kravene til hydraulisk konduktivitet, se tabell 2.1. Denne kan være kunstig med en minimum tykkelse på 0,5 m.

Bunntettingen skal sørge for at sigevannet ikke lekker med mer enn 5 L per m² og år for farlig avfall, og 50 L per m² og år for ikke-farlig avfall. Dette er et funksjonskrav og det settes dermed ikke krav til materialbruk her. Det kan benyttes geomembraner av plast, bentonittleire eller naturlig leire. Dreneringslaget bør bestå av grove masser for å sikre drenering og forhindre frostinntrengning. Det bør suppleres med dreneringsrør som tåler lasten de utsettes for for å sikre avrenning. Sjøttet bør også utformes slik at faren for setninger reduseres til et minimum. Dette setter krav til utførelsen, særlig i oppstartsfasen (Avfall Sverige, 2012).

Tyskland

Også Tyskland er underlagt EUs deponidirektiv, men har fire deponiklasser i stedet for tre som i Norge. Kravene som settes med tanke på oppbygning, avhenger av avfallsklassen. Avfallsklasse III tilsvarer deponi for farlig avfall i Norge, og oppbygning av denne deponitypen må tilfredsstille krav gitt i figur 2.3. Som det vises av figuren, er kravet til hydraulisk konduktivitet k , noe strengere sammenlignet med krav i Norge.



Figur 2.3: Prinsipp for oppbygning av deponiklasse III i Tyskland.
Bunntetting til venstre, topptetting til høyre (Schanz, uå)

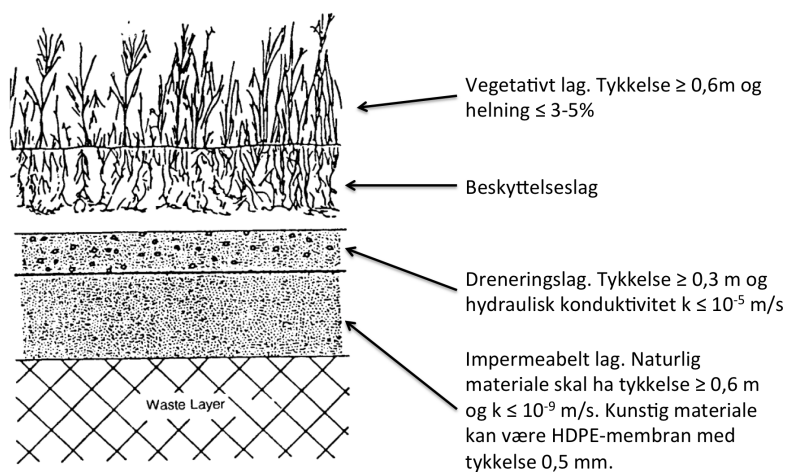
Ved etablering av deponier er det ønskelig å benytte naturlige masser som befinner seg i nærheten, og derfor er leire et ettertraktet materiale til bruk i de mineralske tettesjiktene. Dette graves opp og legges ut ved hjelp av dosere og valser, se figur 2.4.



Figur 2.4: Utlegging av leire ved hjelp av doser og vals ved deponi i Tyskland (Scheiber and Schröder, 2014)

USA

I 1984 presenterte myndighetene i USA et regelverk for hvordan farlig avfall skulle håndteres og behandles. Dette legger føringer for hvordan deponier bygges opp, og det ses store likheter med kravene i EU-direktivet. Dette gjør at prinsippene for oppbygningen er relativt like, se figur 2.5.



Figur 2.5: Prinsippskisse for oppbygning av deponier for farlig avfall i USA. Modifisert etter (EPA, 1989)

I likhet med beskrivelsen i EUs direktiv, skal topptettingen minske erosjon og fremskynde transpirasjonsprosessen i deponiet. Toppdekket utformes i kombinasjon med beskyttelseslaget som skal beskytte mot frost- og vanninntrengning. Vannet som trenger ned i deponiet skal samles opp til det fordamper eller ledes vekk via rør.

Under topptettingen skal eventuelt sivevann dreneres vekk i et dreneringslag. For å forhindre klumper og stopp i drenasjesystemet kan et syntetisk materiale kombineres med graderte masser som for eksempel sand eller grus (EPA, 1989). Den viktigste oppgaven til dette laget er å styre eventuelle utslipp av vann fra dreneringslaget, og hindre at det blir stående vanntrykk mot det mineralske tettesjiktet (Koerner and Daniel, 1997).

Det neste sjiktet er tilsvarende det impermeable tettesjiktet som beskrives i EU-direktivet. Kravene som settes, se figur 2.5, er i overensstemmelse med kravet i EU om dobbel bunn- og sidetetting i deponier for farlig avfall. Hovedfunksjonen er å minimere perkolasjon av vann ved å stenge det ute i lagene som ligger over. I tillegg forhindres eventuelle gasser fra avfallet i å trenge opp i naturen og skade luften.

2.1.3 Materialer til bruk i barrierer

Hva slags materialer som benyttes i de ulike sjiktene avgjøres til slutt av tilgjengelighet av masser og kostnader. I tillegg vurderes også levetiden og egenskapene til materialet. Her er viktige faktorer erosjon, frostinntrengning, oppsprekking, mekaniske og kjemiske påvirkninger samt aldring.

Naturlige barrierer

Som tidligere nevnt, har komprimert leire lenge vært et ettertraktet materiale til bruk i det mineralske tettesjiktet grunnet dens lave permeabilitet. Selv om leire har få problemer knyttet til forvitring og nedbryting, er den mer sensitiv når det gjelder vanninnhold og organisk innhold. Dersom konsentrasjonen av organisk innhold er høy, kan dette skape problemer ved at det råtnet og etterlater hull og ganger etter for eksempel røtter. I USA har et testområde med leire som mineralsk barriere i tettesjiktet blitt undersøkt over en periode på fire år. Her økte den hydrauliske konduktiviteten med tre størrelsesordener grunnet store sprekkdannelser samt røtter fra

vegetasjonen (Albright et al., 2006) og viser hvor utsatt leire kan være ved høyt innhold av organisk materiale.

Fryse- og tineprosessen virker også inn, men dette kan reduseres til et minimum ved god kartlegging av frostnedtrengningsdybde og vannstrømningsforhold i deponiet, samt riktig tildekkingstykkelse. I tillegg er leire sensitiv ved innblanding av større mineraler, da porøsiteten øker og porestrukturen blir grovere. Det er heller ikke dokumentert langtidsegenskaper som kan endres på grunn av hydratiseringsprosessen.

Dersom geotekniske undersøkelser viser at materialet ikke tilfredsstiller kravene til det lavpermeable laget, må det suppleres med en ekstra membran. Dette kan være bentonittleire som er naturlig leire med vulkansk opprinnelse. Denne har et svært høyt innhold av smektitt og montmorillonitt ($< 2 \mu\text{m}$) noe som gir leira utpregende svelleegenskaper, og gjør at den i kontakt med vann vil svulle opp og fylle porene i leira slik at de blir tette. Tester har vist at en hydraulisk konduktivitet k lik $\leq 1 \cdot 10^{-11}$ m/s kan oppnås ved bruk av bentonittleire (Okkenhaug and Pabst, 2016).

Kunstige barrierer

Dersom tilgangen på naturlige materialer er liten eller hvis kravene til sjiktene ikke oppfylles, må det suppleres med en kunstig membran. I de fleste tilfeller benyttes da HDPE-plast som har lav permeabilitet og lang holdbarhet. Studier utført i USA viser at bruk av disse gir utfordringer med tanke på kondens som oppstår mellom membran og leire. Dette kan løses ved å dekke til membranen så fort den er i kontakt med leira (Carey and Swyka, 2013). Andre alternativer kan være geomembraner, geosyntetisk leirlag eller komposittlag (Koerner and Daniel, 1997).

Ved sammenligning av naturlige og kunstige barrierer har den naturlige barrieren vært den beste, men de senere årene har kunnskap knyttet til de kunstige membranene økt noe som har ført til at dette er å foretrekke blant annet i USA som nevnt i kapittel 2.1.2. Studier utført av Robert M. Koerner har vist at geomembraner er ca. 30% billigere enn tradisjonelle membraner som for eksempel leire. I tillegg er CO₂-avtrykket ca. 20% mindre (Koerner, 2012).

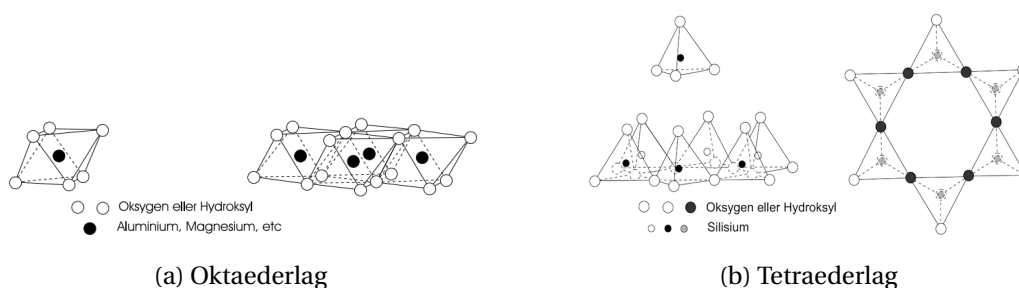
2.1.4 Kontroll og oppfølging

Alle deponier vil ha utfordringer med tanke på design og prosjektering, men studier utført i USA viser at det er noen felles faktorer som går igjen (Daniel, 1993):

- Ved å sette av tilstrekkelig med tid og penger kan uforutsette problemer håndteres raskt. Utførelse og kontroll av komprimeringsarbeidet er derfor viktig slik at eventuelle utfordringer kan avdekkes tidlig, se også kapittel 2.6.3.
- For å kontrollere om planleggingen av komprimeringsarbeidet er tilstrekkelig, kan små teststeder benyttes for å undersøke om ønsket resultat oppnås.
- Topptettingen viser seg å være det mest utfordrende laget med tanke på erosjon og dannelse av røtter fra vegetasjon, og må derfor tas ekstra hensyn til.

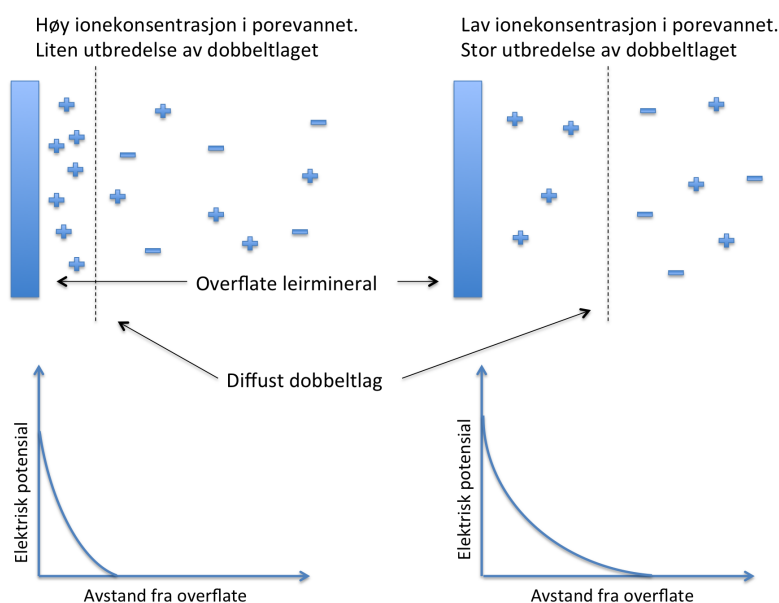
2.2 Mineralogi av leire

Leire består av mineralpartikler kalt sjiktmineraler som er forbundet i nettverk av oktaeder- og tetraederlag, se figur 2.6. Disse kombineres slik at hvert lag deler på oksygenioner ved hjelp av Van der Waalske bindinger.



Figur 2.6: Bestanddeler i sjiktmineraler (Mitchell and Soga, 2005)

Mineralene har gjerne en flakformet struktur med negative ladninger på overflaten og disse må balanseres av positive ladninger, også kalt kationer. Dette kan gjerne være aluminium- (Al^{3+}) og kalsiumioner (Ca^{2+}) som befinner seg rundt mineralet i det diffuse dobbeltlaget (Mitchell and Soga, 2005). Dette laget består av positive ioner fra porevannet som nøytraliserer de negative ladningene på overflaten av leirmineralet, se figur 2.7.



Figur 2.7: Utbredelse av det diffuse dobbeltlaget. Modifisert etter NVE (Helle, 2013)

Når konsentrasjonen av ioner i porevannet er høy, vil konsentrasjonen være størst nærmest overflaten. Det diffuse dobbeltlaget blir da tynnere og den hydrauliske konduktiviteten øker. Tykkelsen på dette dobbeltlaget avhenger altså av ionekonsentrasjonen i porevannet og dermed også ionebyttekapasiteten til mineralene. Det diffuse dobbeltlaget er avgjørende for hvordan de geotekniske egenskapene til et materiale er.

De fleste leirmineraler i Norge består av illitt som består av 2:1 sjikt. Dette vil si at de består av et oktaederlag og to tetraederlag. Slike leirer er gjerne klebrige og plastisiteten er høy. Motsatt tilfelle er det for mineraler som kaolinit som består av et oktaederlag og et tetraederlag. Disse kalles 1:1 sjikt. En del kvikkleirer omtales som lavplastiske grunnet deres innhold av kaolinit som har svake bindinger mellom sjiktene, som igjen fører til lav plastisitet.

2.3 Leirmaterialer

Tabell 2.3: Typiske geotekniske verdier for norske leirer (Bjerrum, 1954) og (Emdal, 2014)

Parameter	Leirmateriale		
	Tørrskorpeleire	Bløt leire	Kvikkleire
Vanninnhold (%)	18-30	25-45	25-45
Omrørt skjærstyrke $s_{u,r}$ (kPa)	≥ 50	$\geq 2,0$	$\leq 0,5$
Plastisitetsindeks I_p (%)	15-20	≤ 20	$\leq 5-10$
Flytegrense w_L (%)	30-40	-	$\leq w$
Sensitivitet S_t (-)	-	≥ 15	≥ 50
Saltinnhold (%)	0,05-0,3	-	$\leq 0,5$

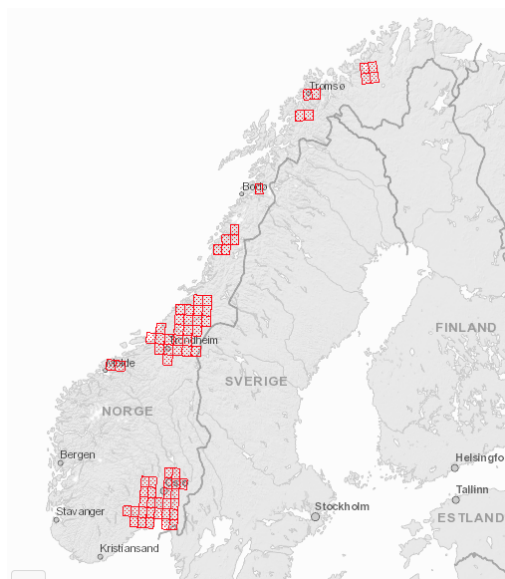
2.3.1 Tørrskorpeleire

Det øverste laget i en leirforekomst har gjerne en brunlig farge og er tørrere enn dypereliggende leire. Denne type leire kalles tørrskorpeleire og karakteriseres ved sin relativt høye skjærstyrke, se tabell 2.3. Den høye fastheten skyldes at fordampingen av kapillærvannet har skjedd sakte som igjen har ført til at både vanninnhold og volum har minket gradvis (Østlid, 1976).

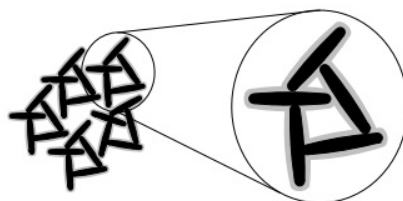
I tillegg til sin høye skjærstyrke har tørrskorpeleira god bæreevne og på grunn av dette er den godt egnet til bruk i vegbygging og jernbanefyllinger. Ved oppgraving og komprimering vil styrken fortsatt være relativt høy og den kan derfor bære høye laster. Komprimert tørrskorpeleire har vist seg å ha lav permeabilitet, forutsatt at vanninnholdet ikke synker under den plastiske grensen w_p (Baardvik, 2014).

2.3.2 Marin leire

I Norge finnes det store forekomster av marin leire som ble avsatt under og etter siste istid, se figur 2.8. Leira ble avsatt i havet i salt vann. Når isen begynte å smelte og trekke seg tilbake, begynte landet å heve seg, og avsatt leire kom over havnivået. Dette førte til en gradvis utvasking av saltet i leira som har gitt den en korthusstruktur hvor mineralene henger sammen i enden med kontakt med flaten ved hjelp av Van Der Waals krefter, se figur 2.9.



Figur 2.8: Forekomster av kartlagt marin leire i Norge (NVE, 2017)



Figur 2.9: Korthusstruktur i marine leirer (Emdal, 2014)

På lik linje som kvikkleire kan bløt leire omtales som marin leire, men det er graden av saltutvasking og dermed tykkelsen på det diffuse dobbeltlaget som skiller de to leirtypene. Dersom saltet vaskes ut, vil tykkelsen på laget avta som igjen fører til en reduksjon i flytegrense og plastisitetsindeks. Det vil også føre til ulike egenskaper i udrenert skjærstyrke og sensitivitet, se tabell 2.3 side 20.

Kvikkleire

Kvikkleire finnes på den nordlige halvkule, og i Norge finnes det forekomster av kvikkleire langs hele kysten der det er løsmasseavsetninger under marin grense. Som vist i figur 2.8, er det kartlagt kvikkleire i Trøndelag, Nord-Norge, Akershus, nedre Buskerud, Vestfold og Østfold.

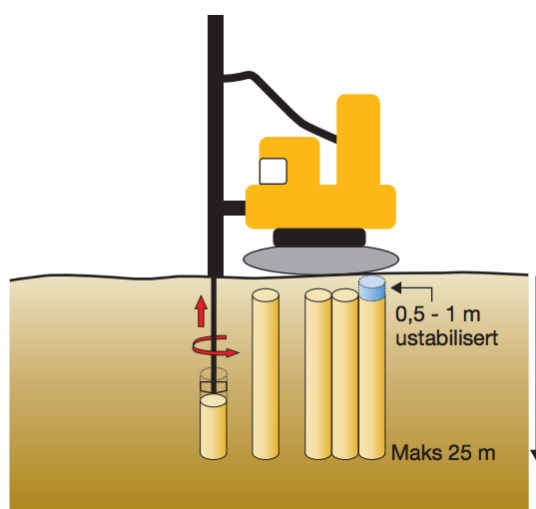
Frem til brudd opptrer, har leira en viss styrke, men utvaskingen av saltet i porene har ført til forstyrrelser i strukturen og vannet har blitt frigjort inne i porene (Løken, 1968). Dette har ført til en reduksjon av Van der Waals-kreftene mellom leirkornene som igjen har ekspandert det diffuse dobbeltlaget. Dette gjør leira svært sensitiv ved omrøring. I de aller fleste tilfeller hvor det skal utføres tiltak i kvikkleire må det derfor iverksettes stabiliseringstiltak, da massene blir omrørt ved anleggsvirksomhet.

2.4 Kalk-/sementstabilisering av leire

Kalk-/sementstabilisering benyttes mest i områder hvor sensitiviteten S_t er høy og hvor skjærfastheten s_u varierer mellom 5-30 kPa. Disse verdiene finner man igjen i marine leirer i Norge (Gylland et al., 2013). Metoden har vært benyttet i Norge siden 1970-tallet og kommer godt ut økonomisk sett sammenlignet med andre stabiliseringsmetoder (Statens Vegvesen, 2014c). Formålet med prosessen er å bedre stabiliteten til byggegrøpa, samt øke motholdet mot spunt som gjerne benyttes i kombinasjon med kalk-/sementstabilisering.

2.4.1 Innblandingsprosess

I figur 2.10 vises prinsippet for kalk-/sementstabilisering ved hjelp av rotasjon ved nedføring, innblanding og rotasjon ved opptrekk (Norsk Geoteknisk Forening, 2012). Denne metoden kan produsere enkeltpeler eller benyttes for massestabilisering. Som nevnt i kapittel 1, så føres en visp ned i jorda til en dybde mellom 15-25 m, se figur 2.10. Gjennom en dyse sprøytes bindemiddel inn, og vispen blander det sammen med jorda samtidig som den trekkes opp. Som det vises i figuren blir de øverste 0,5-1,0 m vanligvis ikke stabilisert. Dette skyldes manglende mottrykk fra overflaten som øker faren for at kalk-/sementstøv spres i lufta. Dette er lite gunstig for arbeidsmiljø, ytre miljø og økonomi. Ulesket kalk og sement er basiske stoffer som kan virke etsende i kontakt med hudoverflaten og øyne.



Figur 2.10: Prinsipp for kalk-/sementstabilisering (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)

2.4.2 Bindemidler

For å stabilisere leira benyttes det bindemidler som kan reagere med vannet i leira. Kalk og sement inneholder store deler kalsium (Ca) som enkelt binder seg til vann, og det er denne kjemiske reaksjonen som fører til den økte styrken i jorda. Blandingsforholdet er gjerne 50% kalk og 50% sement. I de senere årene har det blitt mer vanlig å benytte Multicem i kombinasjon med sement i stedet for kalk. Også her er blandingsforholdet gjerne 50% Multicem og 50% sement.

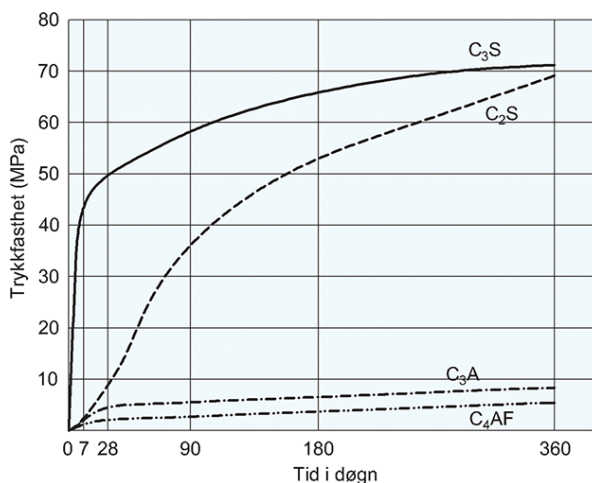
Kalk

Kalk var lenge det materialet som ble benyttet sammen med sement for å stabilisere grunnen. Dette produseres ved brenning av kalkstein hvor sluttproduktet er i all hovedsak kalsiumoksid (CaO). Størrelsen på kalkkornene er av stor betydning for reaksjonshastigheten. Finmalt kalk reagerer raskere enn grovmalt og oppmalingen er derfor viktig for sluttproduktet. I reaksjon med vann vil det dannes hydratkalk samtidig som det frigjøres varme.

Ved innblanding i leire vil kalken reagere med vannet i leira og det dannes kalsiumhydroksid (Ca(OH)_2). Dette gir en rask uttørking av leira som øker fastheten. Deretter reagerer Ca(OH)_2 videre og kalsiumsilikathydrat (sementpasta) dannes.

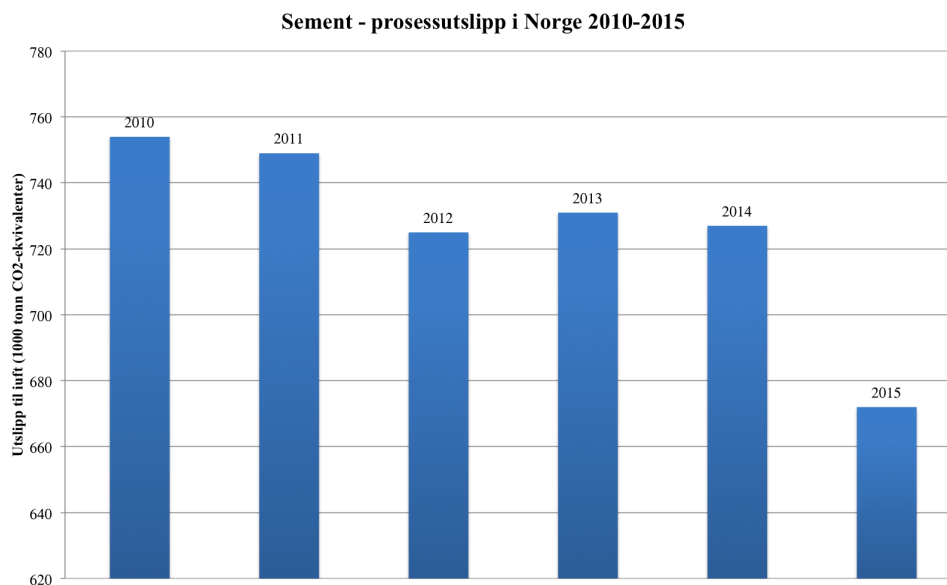
Portlandsement

Den vanligste sementtypen som benyttes er Portlandsement. Det er et hydraulisk bindemiddel som vil si at det reagerer med vann og danner en hard masse etter hydratisering. I Norge tilvirknes produktet ved Norcem sine fabrikker i Brevik og Kjøpsvik. Reaksjonshastigheten avhenger av temperatur, oppmalingsgrad og forholdet mellom klinkermineralene som befinner seg i sementen. Rene kalsiumsilikater reagerer med vann og det dannes sementpasta (CSH) som fører til økt styrke. Disse klinkermineralene forkortes C_3S og C_2S , men er egentlig di- og trikalsiumsilikat ($2 \cdot CaO \cdot SiO_2$ og $3 \cdot CaO \cdot SiO_2$). Dersom det er høyt innhold av C_2S vil sementen reagere saktere og motsatt tilfelle ved høyt innhold av C_3S (Janz and Johansson, 2001). Dette illustreres i figur 2.11.



Figur 2.11: Fasthetsutvikling for sement (Engelsen and Aarstad, 2016)

Tall fra Statistisk Sentralbyrå (SSB) viser at prosessutslippene i forbindelse med produksjon av sement i Norge var på 672 000 tonn i 2015 (Sentralbyrå, 2017). Utslippene har hatt en nedadgående tendens de siste årene, se figur 2.12 side 25, som blant annet skyldes at Norge har en økende andel av blandingssementer som reduserer kalsineringsandelen (Jahren et al., 2008). Disse tallene er i tråd med miljømålene vi er forpliktet til å etterfølge fra myndighetene (Miljødirektoratet, uå).



Figur 2.12: CO₂-utslipp i sementproduksjon i Norge 2010-2015 (Sentralbyrå, 2017)

Multicem

Multicem, også kalt Cement Kiln Dust (CKD), er et restprodukt fra sementproduksjonen og som har blitt mer brukt de siste årene i kombinasjon med Portlandsement. Studier utført i Sverige viser at innblanding med Multicem gir en høyere fasthet sammenlignet med brent kalk og sement, i tillegg til at fasthetsutviklingen er mer jevn (Cementa, 2017). Studiene viser også at det ved produksjon av Multicem produseres ca. 500 kg/tonn mindre CO₂ sammenlignet med kalk- og sementproduksjon, noe som gir den økte miljøfordeler.

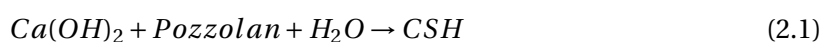
Bestanddelene i Multicem er sement, flyveaske, støv fra sementproduksjonen, kalsium og ren kalkstein. Også produksjon av Multicem skjer i Brevik og Kjøpsvik, og som følge av dette kan det oppstå lokale variasjoner og konsekvenser for det endelige produktet med tanke på stabilitet og fasthet. På produsentenes hjemmesider oppgis det at produktet er omtrent det samme ved begge fabrikkene, og det vil derfor være viktig med undersøkelser i laboratoriet før innblanding for å sikre et optimalt innblandingsforhold mellom leire og bindemiddel.

2.4.3 Kjemisk prosess

Den kjemiske reaksjonen som oppstår mellom vann og bindemiddel kan knyttes til tre reaksjoner (Statens Vegvesen, 2014c):

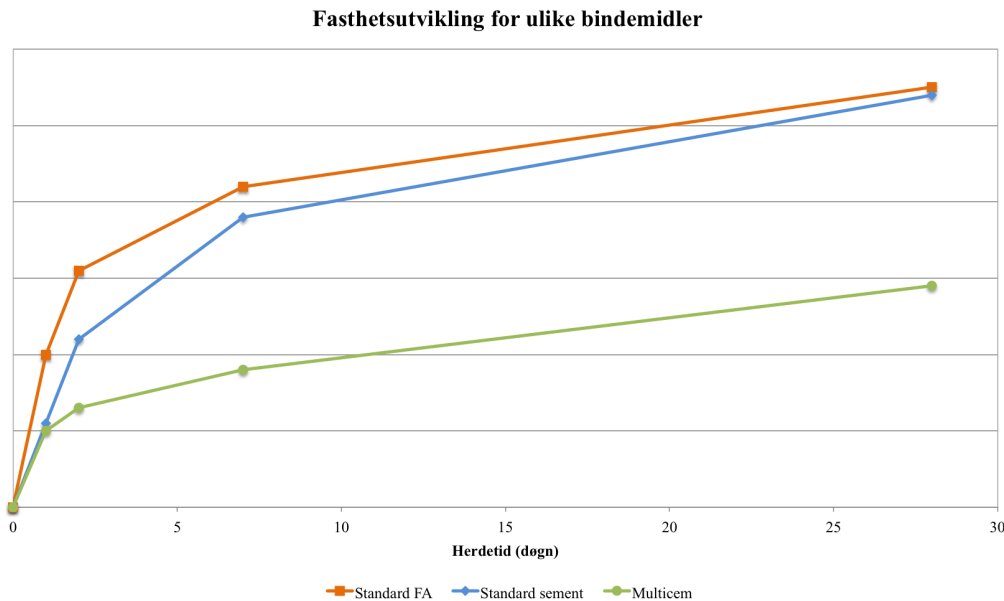
1. En umiddelbar reaksjon mellom CaO og H₂O oppstår som fører til utvikling av varme i jorda.
2. En langvarig prosess starter opp hvor krystallfasen CSH dannes samt at Ca(OH)₂ oppstår mellom leirpartiklene.

Den umiddelbare fasthetsøkningen er altså et resultat av at kalsium (Ca) og oksygen (O) reagerer med hverandre i tillegg til vann (H₂O). Denne reaksjonen fører til at fasthetsforbedringen skjer relativt raskt i løpet av de første døgnene. Flokkuleringen som oppstår er et resultat av ionebyttingen og de tiltrekkende ladningene (Mitchell and Soga, 2005). Leire har et naturlig høyt innhold av Ca- og Na-ioner som har positiv ladning. Når bindemiddelet kommer i kontakt med leira, vil større Ca- og Na-ioner forstyrre strukturen og et ionebytte oppstår. Samtidig øker pH-verdien til over 10 noe som også er nødvendig for at Pozzolan-reaksjonen skal kunne skje (Janz and Johansson, 2001). Resultatet av hydratiseringen er en sementpasta som består av en fast krystallfase, kalsiumsilikathydrat (CSH), og det er dette som fører til økt fasthet og styrke, se ligning 2.1. I tillegg dannes det Ca(OH)₂ som gjør materialet svært basisk.



Herdeteknologi

Ved innblanding av sement ses det en økning i temperatur. Dersom temperaturen er høy, vil reaksjonen skje raskere. For å sikre en god herdeprosess er det viktig å unngå vanntap. Dette er likevel vanskelig dersom temperaturen blir høy da vann vil kunne fordampe. Samtidig kan ikke vanninnholdet i leira være for høyt da dette fører til avtakende fasthet med tiden. Dette skyldes at porøsiteten øker som følge av stor avstand mellom sementkornene (Norsk Geoteknisk Forening, 2012). I figur 2.13 vises fasthetsutviklingen over tid for Multicem, Portland sement og sement FA.



Figur 2.13: Fasthetsutvikling for tre ulike bindemidler.
Modifisert etter (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)

2.4.4 Materialeegenskaper til kalk-/sementstabilisert leire

Som nevnt i kapittel 2.4.3 reagerer bindemiddelet med jorda og fører til økt skjærstyrke og stivhet. For pelematerialet vil skjærstyrken s_u etter stabilisering ligge mellom 100-400 kPa og modultallet M tilsvare $50-150 \times s_u$ (Norsk Geoteknisk Forening, 2012). Dette viser en betydelig forbedring i materialeegenskapene.

Gjennom det svenske prosjektet *Svensk Djupstabilisering (SD)*, har flere viktige faktorer ved dypstabilisering blitt avdekket. I hvilken grad pelene oppnår den ønskede fastheten avhenger av flere parametere hvor type bindemiddel, innblandingsmengde og herdetid trekkes frem som de viktigste (Larsson et al., 2005). I tillegg er også egenskapene til massen som skal stabiliseres av stor betydning. Viktige parametere som bør undersøkes før tilsetning av bindemiddel er derfor jordart, vanninnhold, humusinnhold, sensitivitet og skjærfasthet for å oppnå ønsket resultat. Særlig vanninnholdet er viktig da fastheten ofte vil minke dersom det er for høyt.

Rutineparametere

Studiene utført i Sverige viser også at det ikke finnes en klar sammenheng mellom vanninnhold, densitet, permeabilitet og styrke da disse parameterne avhenger av jordtype og bindemiddel. Likevel ses det gjerne en reduksjon i vanninnhold og økning i densitet. Reduksjonen i vanninnholdet skyldes i all hovedsak at tørre partikler i bindemiddelet reagerer med vannet i leira og skaper et mindre overflateareal for vannet å binde seg til. Flokkuleringen fører også til en økt plastisitetstegrense (Åhnberg, 2006).

Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliske konduktiviteten k , også kalt permeabilitetskoeffisienten, styres i stor grad av mineralogien til jorda. Leire har lav permeabilitet som følge av partikkelstørrelsen ($< 0,002$ mm) samt det diffuse dobbeltlaget, se kapittel 2.3.2. Det diffuse dobbeltlaget holder på vannet noe som fører til en reduksjon av den hydrauliske konduktiviteten (Shanahan, 2004). I tabell 2.4 vises hydraulisk konduktivitet for ulike jordarter. Partikler som ligger nærmere hverandre skaper en mer problematisk vei for vannet slik at det bruker lenger tid på å komme like langt som det det gjør gjennom for eksempel sand.

Tabell 2.4: Hydraulisk konduktivitet av ulike materialer (Larsson, 2008)

Jordart	Hydraulisk konduktivitet k (m/s)
Fin grus	$1 - 10^{-2}$
Grov sand	$10^{-1} - 10^{-3}$
Fin sand	$10^{-3} - 10^{-5}$
Grov silt	$10^{-4} - 10^{-6}$
Fin silt	$10^{-6} - 10^{-8}$
Leire	$\leq 10^{-8}$

Komprimerbarhet og styrke

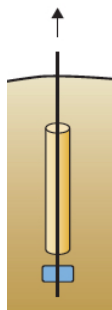
Ved innblanding av kalk og sement ses det en reduksjon i komprimerbarheten og en økning i styrken. Dette skyldes flokkuleringen av materialet som fører til større korn, men også økt stivhet på grunn av dannelsen av sementpasta (Åhnberg, 2006).

2.4.5 Problemer og utfordringer

En av de største utfordringene knyttet til kalk-/sementstabilisering er den totale tiden prosessen bruker. Før installasjonen av pelene kan skje må mengden bindemiddel være bestemt ut fra laboratorieundersøkelser. Dette er en prosess som kan ta opp til 28 dager for å sikre tilstrekkelig herdetid, fasthet og styrke. Tid er også et viktig aspekt etter at pelene har blitt installert i byggegropa. For å sikre tilstrekkelig herdetid, bør ikke pålasting skje for tidlig. Dette utgjør ofte en utfordring da entreprenørene ønsker å utføre arbeidet på kortest mulig tid. Dersom herdetiden blir for kort, vil dette kunne få konsekvenser for stabilitet og deformasjoner senere.

Svensk Djupstabilisering (SD) belyser også ulike faktorer som påvirker stabiliteten etter innblanding av bindemiddel. Blant annet er det funnet ut at selve innblandingsprosessen har stor betydning for den endelige styrken til den stabiliserte massen. Innblandingsraten (stigehastighet og rotasjon) er essensiell for at bindemiddelet skal kunne reagere på en slik måte at pelene oppnår tilstrekkelig fasthet. I tillegg er antall blader på vispen viktig for å sikre en god innblandingsprosess (Larsson et al., 2005). Personell som utfører arbeidet er også viktig for sluttresultatet, da feil håndtering av utstyret vil kunne få store konsekvenser.

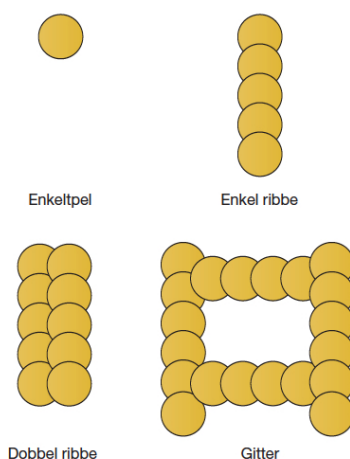
For kontroll av pelene i felt og måling av skjærfasthet kan forinstallert omvendt pelesondering (FOPS) benyttes. Dette gjøres ved at en vinge festes til enden av en wire som installeres samtidig som pelen installeres i jorda. Vingen monteres foran innblandingsvispen og føres ned til underkant av pelen, se figur 2.14. Her kan wiren være i ca. tre dager før den må trekkes ut grunnet herdeprosessen. Fastheten av pelen måles deretter gjennom motstanden i pelen når sonderingsutstyret trekkes opp (Statens Vegvesen, 2014c).



Figur 2.14: Prinsipp for FOPS (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)

2.4.6 Omkringliggende leire

Kalk-/sementpelene settes sammen i ulike mønster avhengig av grunnforholdene, se figur 2.15. Ved etablering av pelene, vil det oppstå et grensesjikt mellom pel og leire hvor materialegenskapene vil være forskjellige. Pelene vil ha en annen struktur med mer åpne porer enn den omkringliggende leira. Dette kan fremskynde setninger, og det er derfor viktig at overlapp og avstand mellom pelene ikke blir for stor slik at bæreevnen opprettholdes. Hvor stor andel av massen som skal stabiliseres avgjøres på forhånd ved hjelp av en dekningsgrad som beskrevet i kapittel 1.



Figur 2.15: Ulike pelemønstre (Norsk Geoteknisk Forening, 2012)

Undersøkelser utført på ustabilisert leire fra Nytt Nasjonalmuseum i Oslo viser at den omkringliggende, bløte leira karakteriseres som middels til svært plastisk. Den uforstyrrede skjærstyrken s_u fra konusforsøk viser at styrken varierer mellom 16-18 kPa og enaksiell styrke er målt til å være 15 kPa. Leira har et høyt vanninnhold w på mellom 44-51% (NGI, 2010). Dette tyder på at de ustabiliserte massene er sensitive og svært lite påvirket av innblanding av bindemiddel i pelene rundt.

2.5 Gjenbruk av stabiliserte masser

Som nevnt i kapittel 1 blir deler av den oppgravde og stabiliserte massen sendt til deponi for inerte masser grunnet manglende gjenbruksområder. Materialelegenskapene til massene vil være forskjellig ved oppgraving fra byggegrop, og vil avhenge av hvor stor andel pelemateriale det er i forhold til ren leire. Ved å legge en dekningsgrad η til grunn, kan de knuste pelene ses på som tilslag på lik linje som betong. Etterherdingen vil også ha stor innvirkning på materialelegenskapene i tillegg til oppmalingen av materialet. For å kunne avgjøre hvilke formål massen er egnet til, må de geotekniske egenskapene undersøkes.

2.5.1 Deponier

Som en del av topptettingen i deponier, inngår det impermeable minerallaget som nevnt i kapittel 2.1.1. Her settes det strenge krav til den hydrauliske konduktiviteten, og dermed også materialbruken. Deponier varierer i størrelse, men behovet for masser vil være stort, grunnet krav til tykkelse og permeabilitet. Dersom kalk-/sementstabiliserte masser kan oppfylle kravene som settes til dette sjiktet, kan de oppgravde massene få et potensielt gjenbruksområde.

I bunntettingen settes det også krav til hydraulisk konduktivitet, men materialet vil være mindre utsatt for frost og tele her. Dersom massene oppfyller kravene til topptettingen, kan de også benyttes i bunntettingen.

2.5.2 Byggemateriale

Et annet mulig gjenbruksområde for massen kan være å benytte den som byggemateriale i for eksempel fyllinger, som fundamenteringslag for lette konstruksjoner eller innenfor landskapsjustering (Arm, 2014). Dersom materialet skal benyttes til dette, vil styrke- og deformasjonsegenskaper være viktig å undersøke.

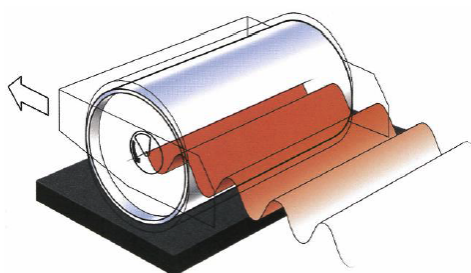
2.6 Anleggsteknikk

2.6.1 Komprimeringsarbeid

Energien som påføres et materiale ved hjelp av komprimeringsutstyr kalles komprimeringsarbeid. Valg av komprimeringsmetode baseres på jordtype, vanninnhold og stivhet i tillegg til tiden som er satt av til arbeidet (Aksnes and Fladvad, 2014). Ved store nedbørsmengder kan massene infiltreres av vann og poretrykket vil øke. Dette fører til en reduksjon i effektivspenningene som kan få store konsekvenser for stabiliteten dersom det ikke tas høyde for (Koerner and Daniel, 1997). Materialelegenskapene vil derfor i stor grad avgjøre hva slags type utstyr som velges, vibrasjonsenergi, hastighet og antall overfarter. God komprimering gir lav porøsitet, som igjen betyr liten tilgang på luft og lavere nedbrytingshastighet.

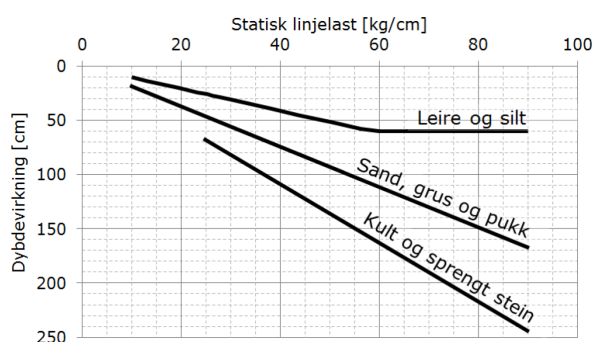
Komprimering med vibrasjon

Komprimering med vibrasjon er en kombinasjon av statisk og dynamisk trykk som sendes ned mot jordoverflaten. Dette fører til økt kontakt mellom partiklene og gir høy densitet. For å oppnå et godt resultat er hastigheten på valsen avgjørende (Aksnes and Fladvad, 2014). Denne bør være jevn for å sikre passende avstand mellom slagene fra trommelen. Dersom valsen har for høy hastighet ($> 3\text{-}5$ km/t), vil avstanden bli for stor og effekten av komprimeringen vil minke (Aksnes and Fladvad, 2014). Figur 2.16 viser prinsippet for komprimering med vibrasjon.



Figur 2.16: Prinsipp for komprimering med vibrasjon (Aksnes and Fladvad, 2014)

Den maksimale dybdevirkningen beskriver hvor langt komprimeringsarbeidet trenger ned i massene. Denne dybden avhenger av type materiale og amplitude på maskinen som benyttes. Figur 2.17 viser dybden som funksjon av statisk linjelast og type materiale. For en valsetrommel er den statiske linjelasten definert som vekt dividert med bredde. Dette betyr at en vals med stor vekt i forhold til bredde, vil ha høy dybdevirkning og komprimeringseffekt. Maksimal dybdevirkning kan oppnås ved komprimering med vibrasjon og høy amplitude (Aksnes and Fladvad, 2014).

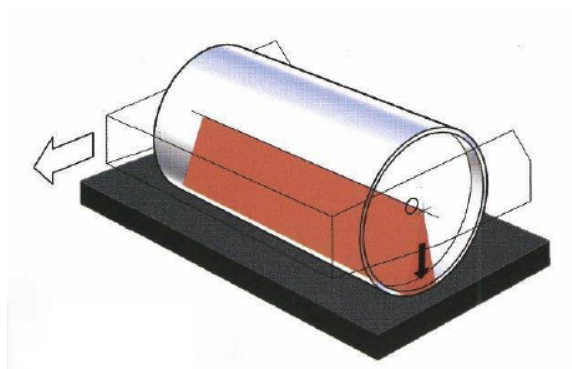


Figur 2.17: Dybdevirkning som funksjon av statisk linjelast og materiale (Aksnes and Fladvad, 2014)

Figuren viser også at leire og silt får en lavere dybdevirkning på ca. 60 cm sammenlignet med de andre materialene. Dette kommer av at leirkornene ligger tettere og mer kompakt enn sand- og gruskorn. Tallene i figuren gjelder for vegbygging og fyllinger under veg. For å oppnå god bæreevne og lav nok permeabilitet, benyttes det gjerne tynnere lagtykkelser på ca. 20 cm (Statens Vegvesen, 2014b).

Statisk komprimering

Ved statisk komprimering er den viktigste faktoren tyngden på valsetrommelen, da trykket som påføres avhenger av vekten på utstyret. For å avgjøre hva slags type vals som skal benyttes, beregnes og sammenlignes den statiske linjelasten. Dersom en stor valsediameter velges vil valsen ha liten nedsynkning i materialet og mindre materiale vil samle seg opp foran trommelen. Dette betyr at den største effekten oppnås dersom materialet legges ut i tynne lag da komprimeringseffekten avtar med dybden. Prinsippet for statisk komprimering vises i figur 2.18 på side 34.



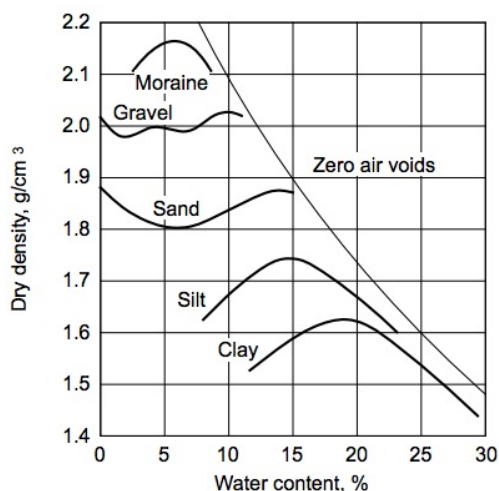
Figur 2.18: Prinsipp for statisk komprimering (Aksnes and Fladvad, 2014)

Valg av utstyr

Ved valg av komprimeringsutstyr er formål, materialtype, tykkelse på lagene og størrelsen på komprimeringsarealet de viktigste og mest avgjørende faktorene. Materialet må være kjent for å kunne avgjøre hvilken maskintype som egner seg best i forhold til vekt og dybdevirkning. For å forhindre nedknusing av materialet, må utstyr og antall passeringer tilpasses formålet. Bløt leire med lav skjærstyrke ($s_u < 25$ kPa) bør ikke påføres for stor dybdevirkning da dette kan skade bæreevnen (Aksnes and Fladvad, 2014). Dersom dette er tilfelle, anbefales det å legge ut materialet i tynne lag ved hjelp av lett valseutstyr.

2.6.2 Utlegging og komprimering av masser

Ved hjelp av laboratorieundersøkelser kan optimalt vanninnhold og densitet bestemmes. I figur 2.19 vises optimalt vanninnhold w_{opt} og tilhørende tørr densitet $\rho_{d,opt}$ for ulike materialer. Dette vil avgjøre tykkelsen på laget, og dermed også antall overkjøringer. For å oppnå lavest mulig permeabilitet, må massene komprimeres ved optimalt vanninnhold og tilhørende optimal densitet. Dersom materialet har et vanninnhold lavere enn det optimale vanninnholdet, bør lagene ikke være tykkere enn 20-30 cm (Aksnes and Fladvad, 2014).



Figur 2.19: Optimalt vanninnhold w_{opt} og tilhørende tørr densitet $\rho_{d,opt}$ for ulike materialer (Emdal, 2014)

Dersom det er et større areal som skal komprimeres bør valser benyttes, mens det i grøfter anbefales vibrerende plater og mindre valser. De mest vanlige maskinene som benyttes til komprimering av leire er store dosere. Disse har ulik vekt og benyttes derfor for ulike materialer. For leire og siltig leire anbefales det å benytte enten beltemaskiner eller hjullastere. Lagtykkelsen bør som nevnt på side 33 ikke overstige 20 cm for å sikre tilstrekkelig komprimering, og antall passeringer er anbefalt å være 2-4 (Statens Vegvesen, 2014b). Materialet som skal komprimeres legges ut i horisontale lag som deretter kompakteres med egnet utstyr. Valsen bør starte på sidene for så å bevege seg innover mot midten av komprimeringsarealet. Det bør alltid være en overlapp mellom valseporene for å sikre at alt blir komprimert (Aksnes and Fladvad, 2014).

De tre mest avgjørende faktorene for ønsket resultat om lav permeabilitet er vanninnhold, komprimeringsmetode og -energi (Koerner and Daniel, 1997). Gjennom studier er det vist at den beste komprimeringen oppnås gjennom elting av massene i kombinasjon med valsing for å rette av og sikre drenasje (Shanahan, 2004). Større steiner må fjernes før bearbeidingen av massene kan starte. Ved hjelp av komprimeringsutstyr som vist i figur 2.20 side 36, blir man kvitt eventuelle klumper som befinner seg i leira, samtidig som massene blir bearbeidet og bedre egnet for utlegging. Etter oppmalingen av materialet kan komprimeringen begynne, og valg av utstyr vil da avhenge av materiale.



(a) Sauefotsvals med fire tromler



(b) Sauefotsvals med en trommel



(c) Vibrerende vals

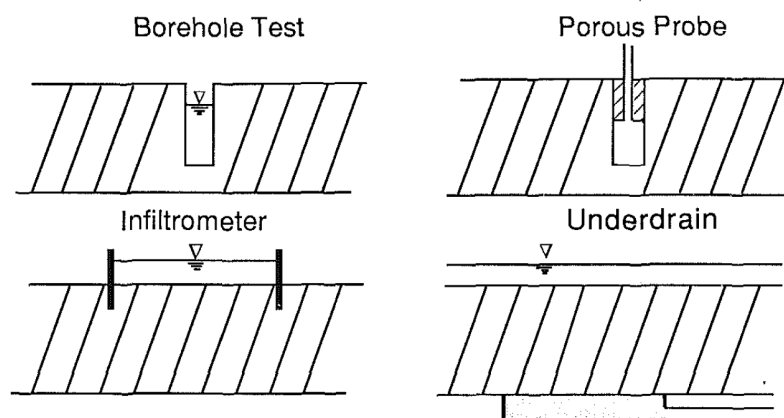
Figur 2.20: Ulikt komprimeringsutstyr (Intro, uå)

2.6.3 Planlegging, kontroll og oppfølging

Det er veldig nyttig og det anbefales å ha et testfelt før oppstart, slik at man kan utarbeide et komprimeringsprogram tilpasset det utstyret som er på anlegget. I tilfeller hvor massene ikke komprimeres godt nok, kan senere etableringer av bygninger eller infrastruktur medføre differensielle setninger som kan utgjøre skade. Ved kontinuerlig kontroll av arbeidet benyttes det en type GPS for å kontrollere antall overfarter. I tillegg har de fleste maskinene som benyttes i dag innebygde stoppmekanismer for å unngå overkomprimering og dobbelthopp. Dette gir en indikasjon på at massene er tilstrekkelig komprimert og at prosessen bør stoppes (Aksnes and Fladvad, 2014).

I likhet med effekten av den kjemiske prosessen mellom leire og bindemiddel, er vanninnholdet av stor betydning også for komprimeringsarbeidet. Av den grunn bør det i planleggingsfasen tas hensyn til eventuelle stopp i arbeidet grunnet vær, da nedbør og frost kan skape utfordringer. Dersom leire utsettes for mange fryse- og tinesykluser kan dette skade holdbarheten av materialet, se kapittel 2.1.3. Derfor er det viktig å kartlegge frostnedtrengningsdybden for å sikre at leira kan beskyttes av overliggende masser. Frostmengder kan finnes ved hjelp av erfaringstall fra for eksempel Statens Vegvesens håndbok N200 eller ved hjelp av kart og datamaskiner (Koerner and Daniel, 1997).

En hydraulisk konduktivitet k lik $1 \cdot 10^{-9}$ m/s tilsvarer forflytningen av en vanddråpe på 3 cm/år noe som er svært lite. Derfor utføres det permeabilitetstester i laboratoriet som indirekte tester, hvor vannmengden som presses ut gjennom prøven anses som et mål på permeabiliteten. Måling av permeabilitet på leire i felt kan utføres på ulike måter, se figur 2.21, men felles for alle metodene er at det er tidkrevende ved at det oppstår problemer med ufullstendig metning av materialet. Den mest benyttede metoden er et Boutwell permeameter som installeres i et borhull i bakken med et fôringsrør over. Deretter blir det hele tettet med fugemasse før vannivået reguleres og permeabiliteten måles (Daniel, 1989).

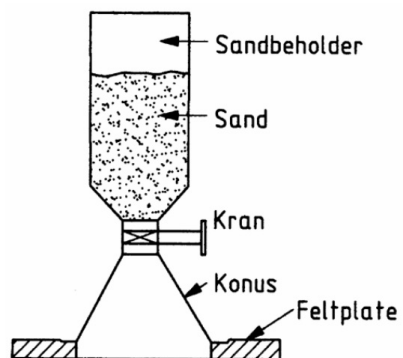


Figur 2.21: Fire ulike metoder for måling av permeabilitet i felt (Daniel, 1989).
Borhullsmetoden oppe til venstre.

Dersom massene er tørre, kan de vannes for å gjøre komprimeringen lettere da vannet vil fungere som smøremiddel. For å kontrollere og måle den oppnådde densiteten i jorda kan et Troxler-apparat som vist i figur 2.22a side 38 benyttes. For å lage hull i bakken, slås en digel i bakken. Apparatet plasseres umiddelbart over for å måle densiteten. En annen måte å måle densiteten på er å benytte et sandvolumeter. Også her graves et hull i bakken som fylles med sand med kjent densitet. Materialet som graves opp blir tørket og på denne måten kan volum og masse, og deretter densitet bestemmes. Prinsippskisse for et sandvolumeter vises i figur 2.22b side 38. En tredje måte er bruk av sylindertester. Denne testen skjer ved at en sylinter bankes ned til flukt med overflaten, og vris opp samtidig som det fylles etter med leire til sylindere er full. Romvekten er da kjent og dermed også hvor mye sylindere minst må veie.



(a) Troxlerapparat (Vtech, uå)



(b) Prinsippskisse sandvolumeter
(Statens Vegvesen, 2014a)

Figur 2.22: Ulike metoder for måling av densitet

Kapittel 3

Langøya

3.1 Historie

Utenfor Holmestrand i Vestfold finnes Norges største deponi for uorganisk, farlig avfall, nemlig Langøya, se figur 3.1 side 40. Dette var tidligere et kalksteinsbrudd og stein herfra var med i sementproduksjonen på Slemmestad. Frem til 1985 ble det tatt ut ca. 45 millioner tonn stein og siden har den ca. 3 km lange øya mottatt både ordinært og farlig avfall fra ulike steder i Norge (NOAH, 2017). Fra midten av 90-tallet har også Sverige og Danmark sendt sitt avfall hit for deponering i Nord- og Sydbruddet, se figur 3.2 side 40.



Figur 3.1: Langøya på kart
(Utsnitt fra Google Maps)



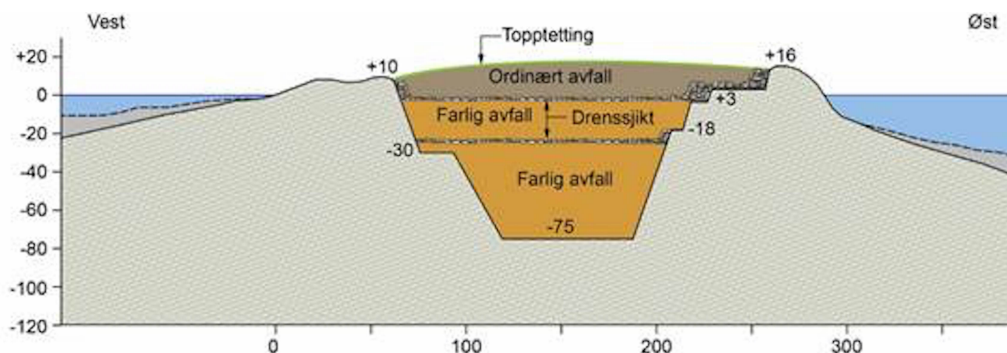
Figur 3.2: Oversikt over Langøya
(NOAH, 2017)

I gjennomsnitt ankommer ca. 30 lastebiler øya daglig med avfall som skal deponeres (Hansen, 2017b). Omtrent halvparten av dette avfallet er flyveaske som produseres ved forbrenningsanlegg for avfall fra husholdninger og industri. Asken er svært basisk og benyttes derfor til å nøytralisere svovelsyreavfall som også tas i mot på anlegget. Resultatet av nøytraliseringen er en avfallsgips hvor tungmetallene blir stabilisert gjennom utfelling og sorpsjon, se figur 3.3.



Figur 3.3: Avfallsgips på Langøya (Foto: Privat)

3.2 Oppbygning



Figur 3.4: Oppbygningen på Langøya. Deponering av farlig avfall opp til kote 0 og overliggende ordinært avfall (Eek et al., 2013)

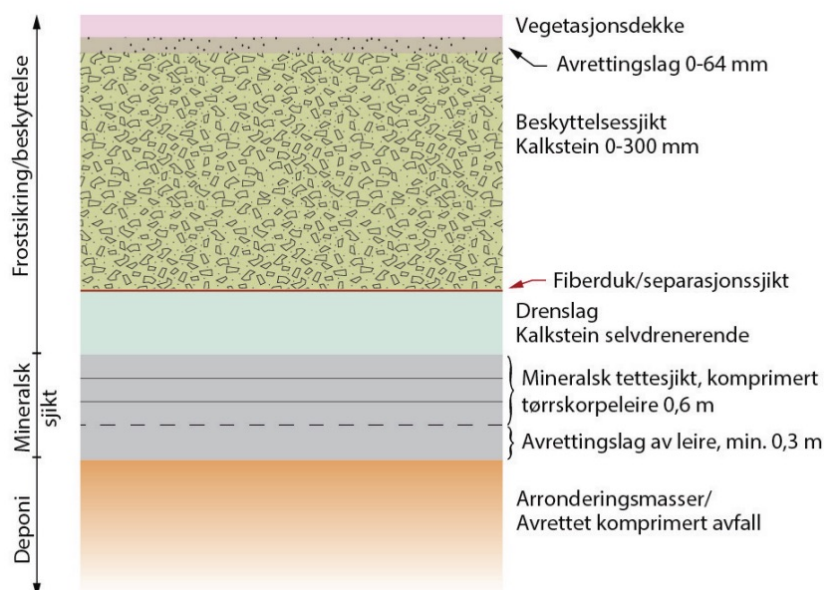
Bunntetting

På Langøya utgjør den naturlige berggrunnen bunn- og sidetettingen i deponiet, se figur 3.4. Deponeringen ble påbegynt lenge før direktivet trådte i kraft og fulgte datidens regelverk. Oppbygningen er derfor ikke som beskrevet i kapittel 2.1.1, men den svært tette kalksteinen utgjør en gunstig geologisk barriere som tilfredsstillende kravene til dobbel bunntetting i avfallsforskriften.

Topptetting

Beregninger fra 2016 viser at deponiarealeet på ca. 600 000 m² trenger ca. 1,2 millioner tonn med tørrskorpeleire for bruk i topptettingen (NOAH, 2016). Dette tilsvarer ca. 600 000 m³ og sier derfor mye om hvor store mengder som er nødvendig for avslutning av deponiet, og for å sikre tilstrekkelig tykkelse og permeabilitet i topptettingen.

NGI har gjennom flere år vært med i prosjekteringsfasen av oppbygningen av deponiet. I 2014 ble det foreslått fire ulike alternativer å utforme topptettingen på. Rapporten foreslo bruk av tørrskorpeleire og råbentonittleire i det mineralske tettesjiktet, se figur 3.5, da dette er benyttet i tidligere prosjekt med gode resultater.



Figur 3.5: Alternativ med komprimert tørrskorpeleire som mineralsk tettesjikt fra Langøya (Baardvik et al., 2014)

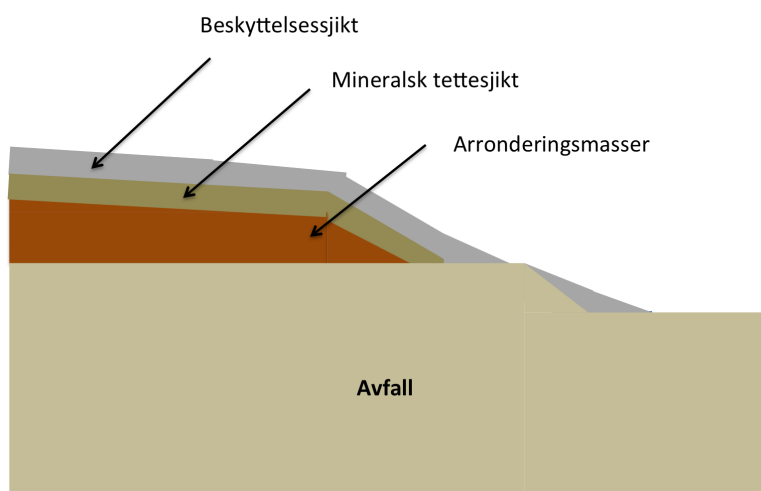
Tørrskorpeleira som benyttes i det mineralske tettesjiktet ankommer Langøya på natten og må ofte mellomlagres før de kan legges ut. For å holde vanninnholdet mest mulig intakt under mellomlagringen bygges massene opp i store hauger, som igjen gattes ut på overflaten slik at nedbør kan renne av (Hansen, 2017b). Straks massene legges ut og komprimeres, plasseres en fiberduk over som holder på vanninnholdet og beskytter mot uttørring.

I dag er det kun en mindre del av Nordbruddet som er dekket til, da det fortsatt foregår deponering i Sydbruddet. Tettelaget er ca. 90 cm tykt og har blitt komprimert ut i tre ulike lag på henholdsvis 50, 20 og 20 cm. Uttak av prøver som er testet i laboratoriet viser at den hydrauliske konduktiviteten er lavere enn $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, se kapittel 5.7. Dette er et resultat av godt komprimeringsarbeid og homogenisering av leirmaterialet. Frostbeskyttelseslaget er mellom 1,8 og 1,9 m tykt og består av graderte masser som pukk for å forhindre tele og frost i å trenge ned i avfallsmassene.

3.2.1 Bruk av kalk-/sementstabilisert leire i topptettingen

For å kunne spare på mengden tørrskorpeleire, har egenskapene til kalk-/sementstabilisert leire blitt undersøkt for å se om disse kan benyttes i tettesjiktet. NGI har utført tester på det oppgravde materialet fra Nytt Nasjonalmuseum i Oslo som viser at leira tilfredsstillende kravene til vanninnhold, omrørt skjærstyrke og plastisitet. Det som imidlertid utgjør en utfordring er at materialet ikke lenger har tilstrekkelig leirinnhold og viser tydelige tendenser til silt (Okkenhaug and Pabst, 2016).

Da silt har høyere permeabilitet enn leire, kan dette få konsekvenser for tettingen og den tilhørende permeabiliteten. Massene har foreløpig ikke blitt benyttet i tettesjikt alene, men i et testfelt som arronderingslag for tetting og avslutning av deponiet med gode resultater, se figur 3.6.



Figur 3.6: Bruk av kalk-/sementstabiliserte masser i arronderingslaget.
Modifisert etter (Hjellnes Consult AS, 2015)

3.3 Anleggsteknisk arbeid for utlegging av stabilisert masse

Frem til februar 2017 har det blitt fraktet ca. 120 000 tonn kalk-/sementstabilisert leire til Langøya fra Nytt Nasjonalmuseum (Hansen, 2017a). Som følge av utgravingen har en god del stein og pukk fulgt med. Disse har blitt sortert ut for å sikre at komprimeringsarbeidet har kunnet skje mest mulig optimalt.



Figur 3.7: Cat D11 (venstre) og Cat D8 (høyre) benyttet i utlegging ved Langøya
(Foto: Harald Hansen, NOAH)

Transporten av massene har foregått ved hjelp av lastebiler, båt og dumpere. Dette har ført til flere omrøringer av massene som har gjort den enkel å jobbe med (Hansen, 2017a). Den endelige oppmalingen og utleggingen av leira har skjedd ved hjelp av store dosere Cat D11 og D8, se figur 3.7. For å sikre avrenning av nedbør, har massene blitt komprimert med vertikale beltespor slik at vannet ledes nedover langs overflaten, se figur 3.8.

Som nevnt i kapittel 2.6.3 utgjør været en av de mest kritiske faktorene i et slikt tildekkingsprosjekt, og også på Langøya har dette vært den største utfordringen. På dager med gode værforhold har det, i følge anleggsleder Harald Hansen, blitt lagt ut 2000-3000 m² tørrskorpeleire hver dag. Dersom det har vært mye nedbør har utleggingen blitt satt på vent til forholdene har tilsagt at utleggingen kunne gjenopptas. Kontroll av vanninnhold og densitet har blitt utført ved hjelp av Troxler-instrument og sylindertester som beskrevet i kapittel 2.6.3. For testfeltet med stabilisert masse fra Langøya har samme prosedyre vært gjeldende.



(a) Testfelt for bruk av kalk-/sementleire

(b) Orientering av beltespor for avrenning.
Bildet lyver om terrenghelningen.

Figur 3.8: Testfelt for kalk-/sementstabilisert leire på Langøya.
Alle foto av Harald Hansen, NOAH

Dersom det oppstår setninger i deponiet kan dette føre til sprekker i toppdekket og nedbør vil kunne trekke ned i massene. Setningene kan oppstå i driftsfasen når avfallet legges ut og før topptettingen kommer på plass, ved at nye avfallsmasser trykker de underliggende massene nedover slik at porevannet presses ut. Dette gir en konsolidering av massene som igjen gir primærsetninger (Løken et al., 2004). Som følge av kryptsetninger over tid, også kalt sekundærsetninger, vil det fremdeles kunne presses ut porevann, men dette vil etterhvert gå mot null som følge av sekundærkonsolideringen. I etterdriftsfasen kan sigevann oppstå dersom avrenningen fra overflaten ikke er sikret og topptettingen ikke er på plass. Dersom dette er tilfelle, må det fanges opp av rør som leder vannet vekk (Løken et al., 2004).

Kapittel 4

Laboratorieundersøkelser og forsøksprosedyre

Et omfattende laboratoriearbeid ble utført gjennom høsten 2016 og våren 2017 for å undersøke egenskapene til den stabiliserte massen samt utgangsmaterialet, se tabell 4.1. Testene ble utført ved laboratorier ved NTNU, NGI, NGU og NOAH. I dette kapittelet vil forsøksprogrammet presenteres samt en beskrivelse av de ulike forsøkene som er gjennomført.

Tabell 4.1: Utført forsøksprogram

Type forsøk	2016		2017	
	Uke 42	Uke 46	Uke 8	Uke 9, 10 og 11
Vanninnhold	x	x	x	-
Plastisitetsindeks	x	x	x	x
Omrørt konusforsøk	x	x	x	-
Kornfordeling	-	x	x	x
Enaksielt trykkforsøk	-	x	x	-
Standard Proctor	-	x	x	-
Permeabilitetsforsøk	-	-	x	-
Titreringsforsøk	-	-	x	-
XRF- og XRD-analyse	-	x	x	-
SEM-foto	-	-	-	x

4.1 Forsøksprosedyre

Som nevnt i kapittel 1 vil det ved etablering av for eksempel kjeller, bli gravet opp deler av de stabiliserte massene. Massen som da består av pelekumper og omkringliggende, ustabilisert leire, ble forsøkt gjenskapt i laboratoriet. I oktober 2016 (uke 0) ble ordinære prøvepeler med Multicem og sement blandet med bløt og kvikk leire. Etter en måneds herdetid ble disse knust til et finmalt stoff som ble blandet inn med ren, ubehandlet leire. Dette ble også utført for å undersøke en eventuell restreaksjon fra herdeprosessen.

4.1.1 Innblandingsprosess

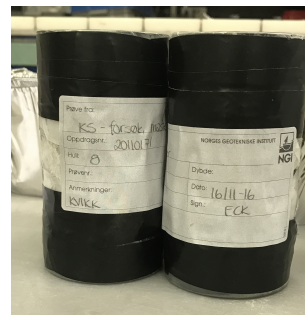
Med bakgrunn i NGF sin veileder (Norsk Geoteknisk Forening, 2012) ble innblandingsforholdet mellom leire og bindemiddel bestemt. Den rene leira var restmateriale fra NGI, mens bindemiddelet bestod av 50% Multicem og 50% sement. Ved utregning av mengde bindemiddel i forhold til leire ble det antatt en tyngdetetthet på leire γ_{leire} lik 18 kN/m^3 og kalksement per m^3 leire lik 115 kg/m^3 , se vedlegg B.1. I prosessen ble en Kenwood kjøkkenmaskin benyttet, og innblandingen foregikk i 2-3 minutter med et høyt antall omdreininger på maskinen.



(a) Kenwood kjøkkenmaskin med K-visp benyttet i innblandingen



(b) Plastsylindere og messingsylinder



(c) Ferdig innstampet og forseglede prøvepeler

Figur 4.1: Innblandings- og innstampingsprosess

Det stabiliserte materialet ble stampet inn i prøvesylindere av plast med høyde 110 mm og diameter 54 mm. Før innstampingen begynte, ble bunnen av sylindere tett med laboratoriefilm for å sikre og holde vanninnholdet uendret samt hindre uttørking. Massen ble så stampet inn lagvis ca. 8-10 ganger i sylindere ved hjelp av en messingsylinder med diameter 20 mm. Etter innstamping ble prøvene forseglest i topp med samme laboratoriefilm som i bunn, og lagt på kjølerom med temperatur 6-8 °C. Benyttet utstyr vises i figur 4.1.

Pelene hadde en herdetid på 28 dager før de ble skjøvet ut av sylindere. Deretter ble de testet som nevnt i tabell 4.1 side 47 før de ble knust til finmalt stoff ved hjelp av en hammer. Ved uttynning med kvikkleire foregikk utblandingen med η lik 35% og 25%, mens bløt leire hadde η lik 35%, se vedlegg B.2. Deretter ble massen på nytt stampet inn som beskrevet over, og lagt på kjølerom i tre måneder.

I tillegg til veilederen fra NGF, finnes det en innblandingsprosedyre fra Statens Vegvesen. Den eneste forskjellen mellom disse to er at en enaksial presse benyttes ved innstamping i stedet for en messingsylinder som ble benyttet i denne oppgaven. Dette vil lette det fysiske arbeidet og føre til mer nøyaktighet med tanke på mindre luftporer og ujevnheter i pelene.

4.1.2 Utgangsmateriale

I forsøkene ble det benyttet kvikkleire og bløt leire fra tidligere prosjekter hos NGI. Disse er ikke hentet fra samme geografiske sted, men data fra tilhørende laboratorieundersøkelser er tatt med i betraktning. Grunnet mangel på materiale ved uttynning i uke 4, ble det hentet kvikkleire fra skredet som gikk i Sørumsund november 2016, se figur 4.2 side 50. Dette materialet ble testet både i dette forsøksprogrammet og av NGI.



(a) Lokalisering av skredet
(Utsnitt fra Google Maps)



(b) Bilde fra skredområdet (Wangberg, 2016)

Figur 4.2: Kvikkleireskred i Sørumsnes november 2016

4.2 Laboratorieundersøkelser

For å raskt kunne si noe om egenskapene til materialet og for å avgjøre om det var noe som kunne tas med videre, ble testene i tabell 4.2 valgt. I tillegg til rutineundersøkelsene, ble det også utført Standard Proctor, permeabilitetstester og titreringsforsøk. For undersøkelse av mineralogi, ble det utført XRF- og XRD-analyser. I utgangspunktet skulle også humus- og steininnhold undersøkes, men dette ble ikke utført i denne omgang grunnet tidsbegrensing.

Tabell 4.2: Oversikt over parametere og tilhørende forsøk

Parameter	Forsøk
Vanninnhold w	Tørring ved 105°C
Plastisitetsindeks I_p	Flyte- og rullegrense
Skjærfasthet s_u , uforstyrret	Konusforsøk eller enaksialt trykkforsøk
Skjærfasthet $s_{u,r}$, omrørt	Konusforsøk
Kornfordeling	Hydrometeranalyse
Optimal tyngdetetthet γ_{opt}	Standard Proctor-test
Hydraulisk konduktivitet k	Permeabilitetstest
Bufferkapasitet	Titreringsforsøk
Mineralogi	XRF- og XRD-analyser

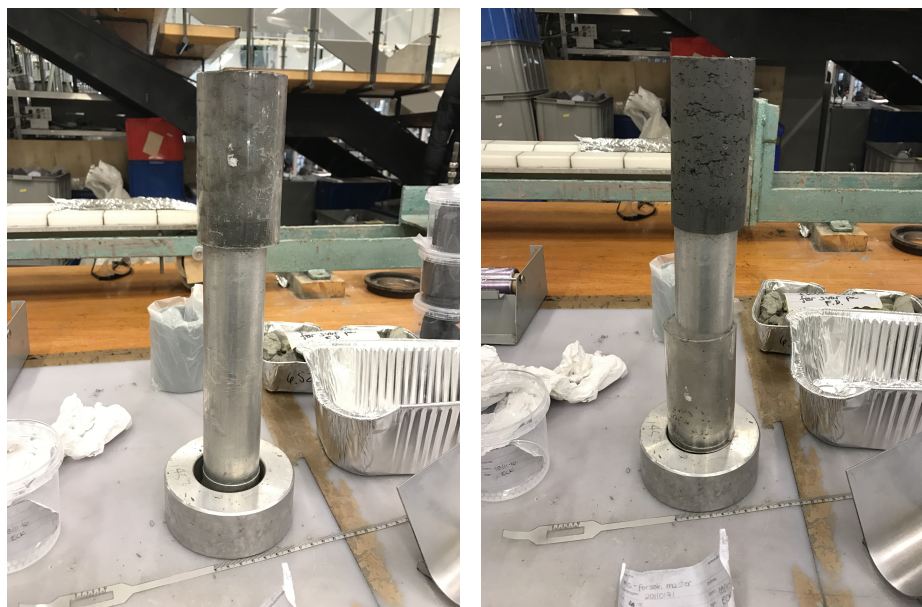
4.2.1 Rutineundersøkelser

Rutineundersøkelser utføres for å identifisere og klassifisere jordarten. Disse er relativt enkle å utføre, i tillegg til at de er billige. De ble utført i henhold til følgende standarder:

- Bestemmelse av vanninnhold w etter NS-EN ISO 17892-1:2014 (Standard, 2014)
- Omrørt skjærstyrke $s_{u,r}$ med konusforsøk etter NS 8015:1988 (Standard, 1988)
- Bestemmelse av plastisitetsindeks I_p etter NS 8002:1982 og NS 8003 (Standard, 1982a) og (Standard, 1982b)
- Kornfordeling ved hydrometeranalyse etter ASTM D7928:17 (Standard, 2017)

4.2.2 Enaksielt trykkforsøk

For å bestemme udrenert enaksiell skjærstyrke ble enaksielle trykkforsøk gjennomført. Dette ble gjort ved å skyve ut prøvepelene vertikalt ut fra sylindrerne ved hjelp av håndkraft og en stålsylinder, se figur 4.3a og figur 4.3b.

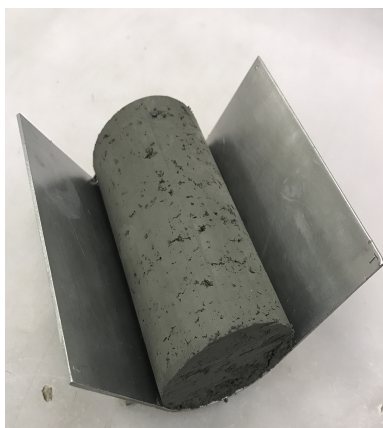


(a) Pel før utskyving

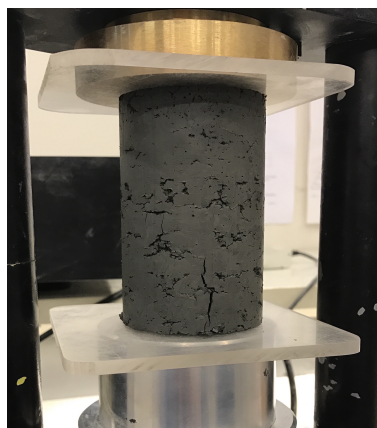
(b) Pel etter utskyving

Figur 4.3: Utskyving av prøvepel

Pelen ble så trimmet i en vugge til den målte 10 cm, se figur 4.4a. Den ble deretter plassert i trykkapparatet, se figur 4.4b, som påførte konstant kraft i topp og bunn med en tøyning på 4 mm/min til brudd oppstod. Skjærstyrken ble så funnet ved hjelp av opptegnede grafer i dataprogram. Etter endt forsøk ble deler av materialet benyttet til vanninnhold og omrørt konusforsøk, mens det resterende materialet ble lagret.



(a) Trimmet prøve



(b) Prøve i trykkapparat

Figur 4.4: Forberedelse av prøve til enaksielt trykkforsøk

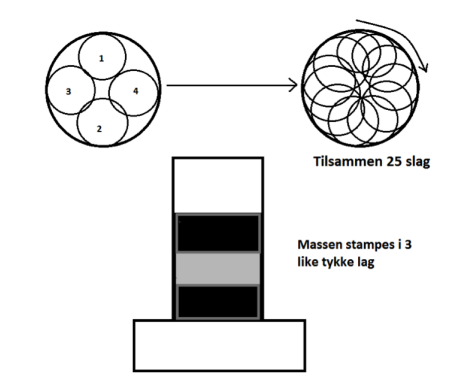
4.2.3 Standard Proctor

For å bestemme optimalt vanninnhold w_{opt} og tilhørende optimal tørr tyngdetetthet $\gamma_{d,opt}$, ble det utført Standard Proctor-forsøk i henhold til standard ASTM D698. I forsøket ble en beholder med volum 956,04 mm³ benyttet. Først ble $\frac{1}{3}$ av massen lagt i beholderen og stampet sammen ved hjelp av en stamper med 7,74 Nm kraft og fallhøyde 300 mm. Dette ble først gjort i kryssformasjon med fire slag etterfulgt av 21 slag i sirkelformasjoner, se figur 4.5a.

Prosedyren ble gjentatt tre ganger til sylindere hadde tre like tykke lag. Eventuell overflødig masse ble så fjernet og beholderen veid. Figur 4.5b viser beholder og utstyr. Vanninnhold og tilhørende tørr tyngdetetthet ble deretter bestemt gjennom følgende formler:

$$w = \frac{m_{v\hat{a}t}}{V_{pr\hat{o}ve}} \cdot 100\%(%)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{v\hat{a}t}}{1 + \frac{w}{100}} (kg/m^3)$$



(a) Innstampingsprosedyre



(b) Benyttet utstyr til Standard Proctor test

Figur 4.5: Utførelse av Standard Proctor-test

Forsøket utføres i utgangspunktet på ulike vanninnhold og det lages en kurve som vist i figur 2.19. Ved første forsøk i uke 4 ble kvikkleire-materialet testet ved naturlig vanninnhold og deretter tørket i romtemperatur i 24 timer for ny test. I uke 12 ble det kun utført forsøk ved naturlig vanninnhold på det samme materialet grunnet lite tilgjengelig bløt leire. Materialet ble benyttet bare en gang da nedknusing av materialet vil føre til misvisende og feil resultater.

4.2.4 Permeabilitetstest

For å bestemme den hydrauliske konduktiviteten til materialet, ble det utført permeabilitetstester på materialet. På samme måte som for det enaksiale trykkforsøket, ble prøvepelene skjøvet ut av sylindrerne og trimmet til en lengde på 10 cm. Deretter ble prøven pakket inn i en plaststrømpe og plassert i prøveapparatet, se figur 4.6a og figur 4.6b side 54.

Forsøket ble utført ved hjelp av et treaksielt trykkapparat og det ble benyttet et konstant vannivå gjennom hele testen med en gradient på ca. 2. Prøvene ble så utsatt for en vertikal spenning på 48,1 kPa som tilsvarer spenningstilstanden materialet utsettes for dersom det antas en dybde på ca. 2,5 m og tyngdetetthet γ lik 19,5 kN/m³. Permeabiliteten k ble målt etter at konsolideringsprosessen var ferdig og beregnet ved hjelp av Darcys lov vist i ligning 4.1. Alle inngangsparametere er vedlagt i vedlegg A.4.

$$k = \frac{q}{A \cdot i} (\text{cm}^3/\text{s}) \quad (4.1)$$



(a) Innpakking av prøve i plaststrømpe



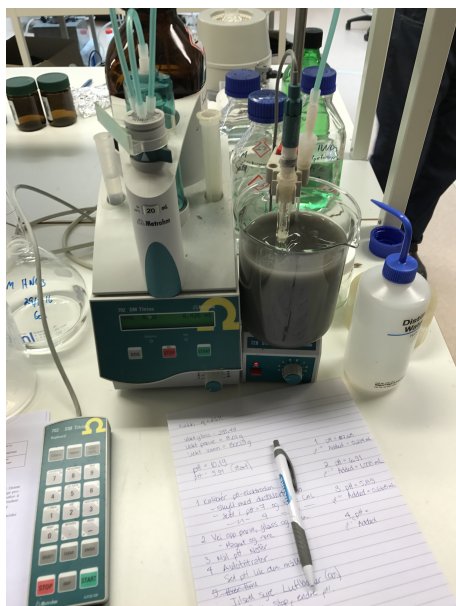
(b) Ferdig installert prøve

Figur 4.6: Forberedelse av prøve til permeabilitetstest

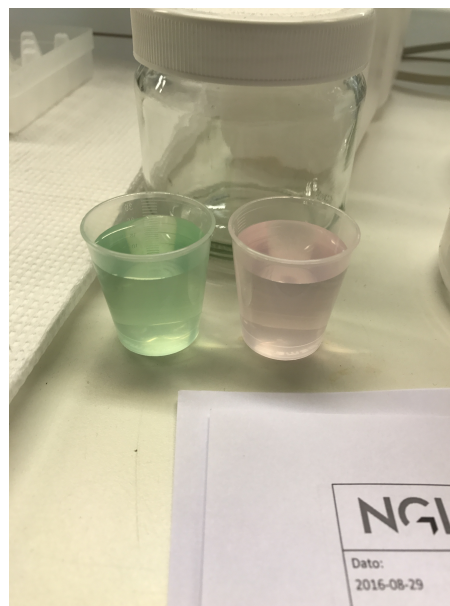
4.2.5 Titreringsforsøk

Bufferkapasiteten til materialene ble bestemt gjennom titreringsforsøk. Dette er svært nyttig for å undersøke hvorvidt masser med ulik pH kan nøytralisere hverandre og hvor mye materiale som eventuelt trengs til en slik nøytralisering. Noen avfallstyper, som for eksempel alunskifer, har lav pH og det kan derfor være velegnet å blande inn materiale med en høyere pH og god bufferkapasitet.

Forsøket ble utført ved hjelp av en titrator vist i figur 4.7a. En pH-elektrode fra Metrohm ble først kalibrert i buffer med pH 7 før den ble kalibrert i buffer med pH 4, se figur 4.7b. Elektroden ble skylt med destillert vann mellom hver kalibrering. Deretter ble 8 g materiale veid opp i et 1000 mL begerglass før 800 g destillert vann ble tilsatt. En magnet ble sluppet i blandingen før begerglasset ble plassert over en magnetrører for omrøring. Etter ca. 10 minutter var prøven oppløst i vannet og pH var stabilisert. Da pH var avlest og notert, ble salpetersyre (HNO_3) med konsentrasjon 1M klargjort ved at luftbobler i tilførselsslangen ble fjernet. Deretter ble syre tilsatt og blandingen titrert ned til nærmeste, avrundede pH. Ny avlesning av pH skjedde etter en time frem til blandingen var titrert ned til pH lik 5.



(a) Metrohm apparat benyttet i forsøket



(b) Buffer med pH 7 (grønn) og pH 4 (rosa)

Figur 4.7: Oppsett for titreringsforsøk

4.2.6 Mineralogi

Da det ikke er mulig å utføre mineralogitester på laboratoriet til NTNU eller NGI, ble prøvene sendt til NGU og NOAH på Langøya for analyse. Her ble pelematerialene testet ved ulike tidspunkt for å se om mineralogien endret seg som følge av herdeprosessen og uttynningen, og om det var potensiale for å herde mer. I tillegg ble leire fra skredet i Sørum analysert.

XRF-analyse

XRF (Røntgenfluorescensspektrometri) benyttes for å bestemme den geokjemiske sammensetningen til ulike bergarter. Før forsøket begynte, ble 4 gram prøve pakket inn til små tabletter som ble utsatt for et trykk som tilsvarte 15 tonn i 15 sekunder. En bestemt mengde energi ble deretter sendt inn mot prøvematerialet, og det ble registrert hvor mye som kom tilbake. Resultatet ble deretter sammenlignet med kjente spektrere for mineraler og identifiseringen av elementet var utført.

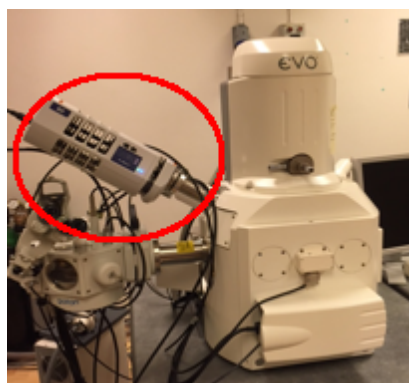
XRD-analyse

XRD (Røntgendiffraksjon) benyttes for å identifisere mineralene i et materiale ved at en monokromatisk røntgenstråle sendes inn på en krystallflate. Strålen avhenger av gitterstrukturen til krystallen og i ble sendt inn med ulik innfallsvinkel og reflekser ble registrert som igjen ble sammenstilt i et diffraktogram (NGU, 2016). Hvert mineral har sitt opphav til et helt unikt mønster, akkurat som et DNA. Identifiseringen av materialet skjedde derved ved sammenligning av ulike spektre til kjente mineraler på samme måte som for XRF-analysen.

Det ble også tatt SEM-foto (Scanning electron microscope) på et behandlet og et ubehandlet materiale for å undersøke topografi og kjemisk sammensetning. Ved undersøkelse av den kjemiske sammensetningen ble det benyttet SEM EDX-skanning (Energy dispersive X-Ray analysis), se figur 4.8, hvor materialet fikk en overflatebehandling før det ble testet. Ved hjelp av en detektor ble grunnstoffene i prøven identifisert. For disse bildene ble en Zeiss EVO-50-EP detektor benyttet for SEM-EDX skanningen, se figur 4.9. Vanlig SEM-foto benyttes for å vurdere topografien til materialet.



Figur 4.8: Zeiss EVO 50 EP SEM maskin benyttet for SEM-fotografering (Zeiss, 2017)



Figur 4.9: X-Max^N detektor benyttet for SEM EDX-fotografering (Instruments, 2017)

Kapittel 5

Resultater

Dette kapitlet presenterer resultatene fra de utførte laboratorieundersøkelsene. Fullstendige resultater vises i vedlegg A. I denne oppgaven ble totalt tre ulike materialer testet i tillegg til utgangsmaterialene¹. Disse beskrives i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Beskrivelse av materialer

Forkortelse	Beskrivelse av materialer		
	Uke 0	Uke 4	Uke 12
K-35	Innblanding av Multicem og sement med kvikkleire til prøvepeler.	Prøvepel fra uke 0 med kvikkleire. Herdetid 1 måned.	Uttynnet prøvepel fra uke 4 med kvikkleire. Herdetid 3 måneder. Dekningsgrad 35%
K-25	Innblanding av Multicem og sement med kvikkleire til prøvepeler.	Prøvepel fra uke 0 med kvikkleire. Herdetid 1 måned.	Uttynnet prøvepel fra uke 4 med kvikkleire. Herdetid 3 måneder. Dekningsgrad 25%
B-35	Innblanding av Multicem og sement med bløt leire til prøvepeler.	Prøvepel fra uke 0 med bløt leire. Herdetid 1 måned.	Uttynnet prøvepel fra uke 4 med bløt leire. Herdetid 3 måneder. Dekningsgrad 35%

¹Disse materialene er som nevnt i kapittel 4.1.2 ikke hentet fra samme geografiske sted.

5.1 Vanninnhold

Dersom vanninnholdet nærmer seg flytegrensen w_L , mister materialet bæreevne og det vil bli vanskelig å komprimere massene. Dette vil igjen føre til at det blir sporete ved utlegging, spesielt dersom lagene er for tynne. Figur 5.1 viser utviklingen i vanninnhold for de tre pelematerialene over tid, samt en teoretisk utregnet verdi. Denne er tatt med for å undersøke om en eventuell hydratiseringsprosess finner sted etter uttynning. Denne er gjennomsnittlig og mengdefordelt ut fra vanninnhold i ren pel og uttynnet pel. Utregninger for teoretisk verdi vises i vedlegg B.3.

Tabell 5.2: Oppsummering av vanninnhold w i pelematerialet

Vanninnhold w (%)	Resultat				
	Uke 0	Uke 4 (pel)	Uke 4 (utblandet pel)	Uke 12	Teoretisk verdi
K-35	34,2	32,2	28,8	31,2	34,7
K-25	34,2	32,2	31,3	31,0	38,1
B-35	37,9	34,0	33,9	32,5	35,4
	Uke 0 ^a	Uke 2	> 1 år ^b		
Nytt Nasjonalmuseum	46,0	34,3	29,7		
	51,0		26,1		
	44,3		26,1		

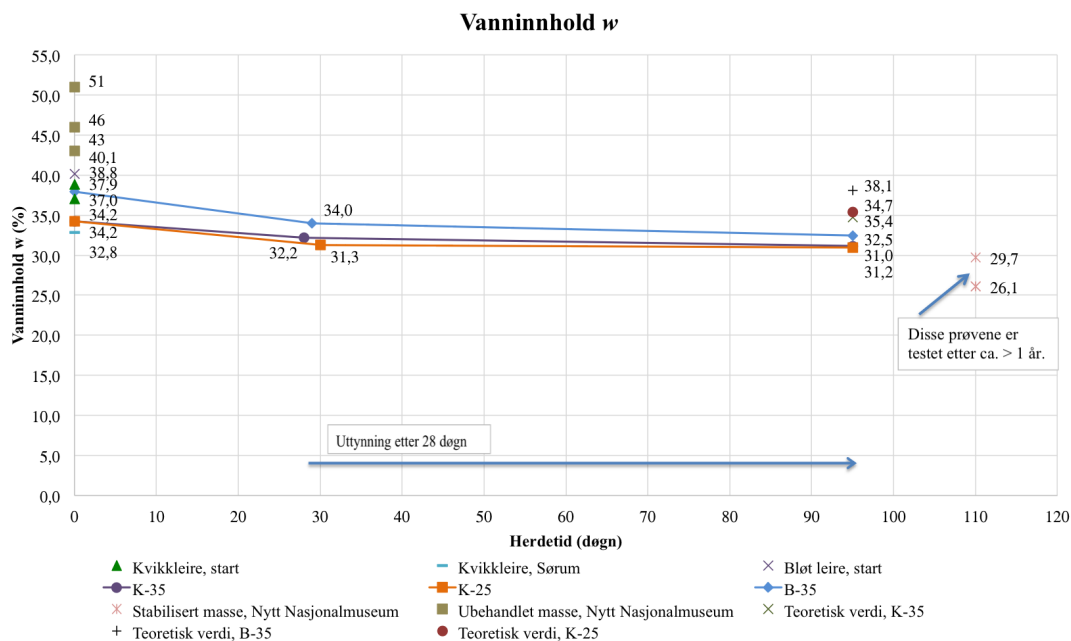
^aPrøver ved kalk-/sementforøk, under prosjektering

^bPrøver tatt under utlegging (120kg/m³)

5.1.1 Innblanding med kvikkleire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

Som det vises av tabell 5.2 synker vanninnholdet etter innblanding av Multicem og sement, og har en nedadgående tendens også etter uttynning med ren leire. Ved sammenligning med teoretisk verdi, er de faktiske verdiene etter tre måneders herdetid noe lavere.



Figur 5.1: Resultat av vanninnhold

Dekningsgrad $\eta=25\%$

På grunn av at uttytningen med ren leire ble utført i uke 4, vil K-25-0 tilsvare det rene pelematerialet K-35. For K-25 ses samme utvikling som for K-35, men vanninnholdet holder seg mer konstant etter uttytning noe som kan skyldes at mengden leire er større ved uttytning i denne blandingen.

5.1.2 Innblanding med bløt leire**Dekningsgrad $\eta=35\%$**

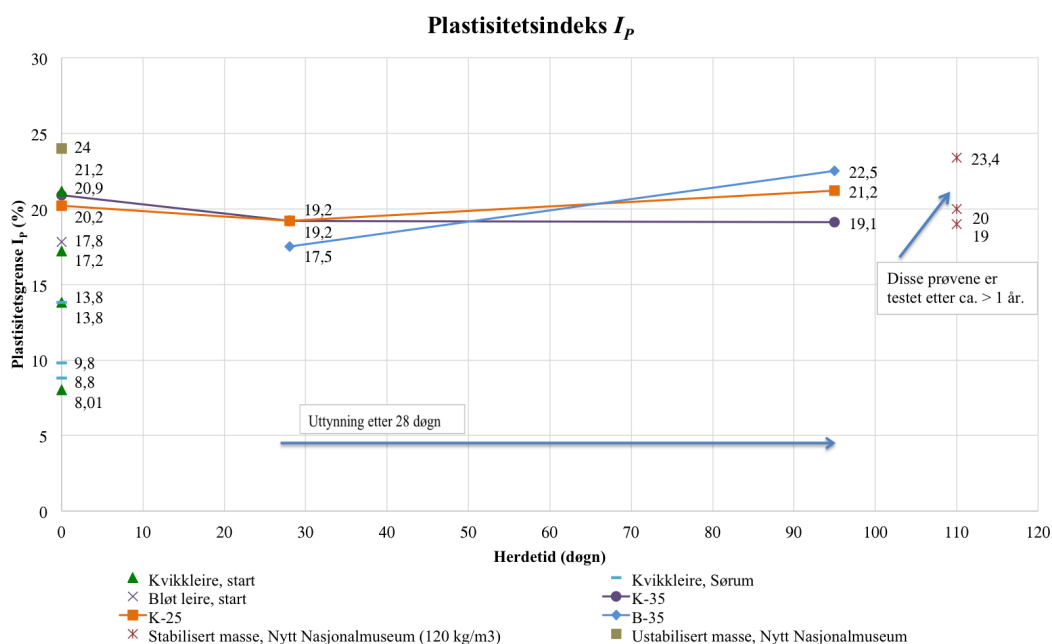
For B-35 observeres det en liten nedgang for w gjennom hele forsøksperioden. I tabell 5.2 er verdier for ustabilisert masse fra Nytt Nasjonalmuseum tatt med for sammenligning. Dette er som tidligere nevnt bløt, omkringliggende leire, og her observeres det noe forskjell ved at den omkringliggende leira har et høyere vanninnhold. Den stabiliserte massen ved Nytt Nasjonalmuseum har et vanninnhold på 34,3% etter 14 dagers herdetid som er omtrentlig samme verdi som B-35.

5.2 Plastisitetsindeks

I tabell 5.3 oppsummeres resultatene fra plastisitetsforsøkene, og disse viser at alle materialene karakteriseres som middels plastiske. I figur 5.2 er også tall fra Nytt Nasjonalmuseum plottet for sammenligning, og det ses en god overensstemmelse mellom verdiene. Merk likevel her at innblandingsmengden er forskjellig fra prøvepelene, i tillegg til at materialet er testet etter 0 døgn og ca. 1 års herdetid.

Tabell 5.3: Oppsummering av plastisitetsindeks I_P

Plastisitetsindeks I_P (%)	Resultat		
	Uke 0	Uke 4	Uke 12
K-35	20,9	19,2	19,1
K-25	20,2	19,2	21,2
B-35	-	17,5	22,5
	Uke 0	> 1 år	
Nytt Nasjonalmuseum	24,0	19,0	
	-	23,4	
	-	20,0	

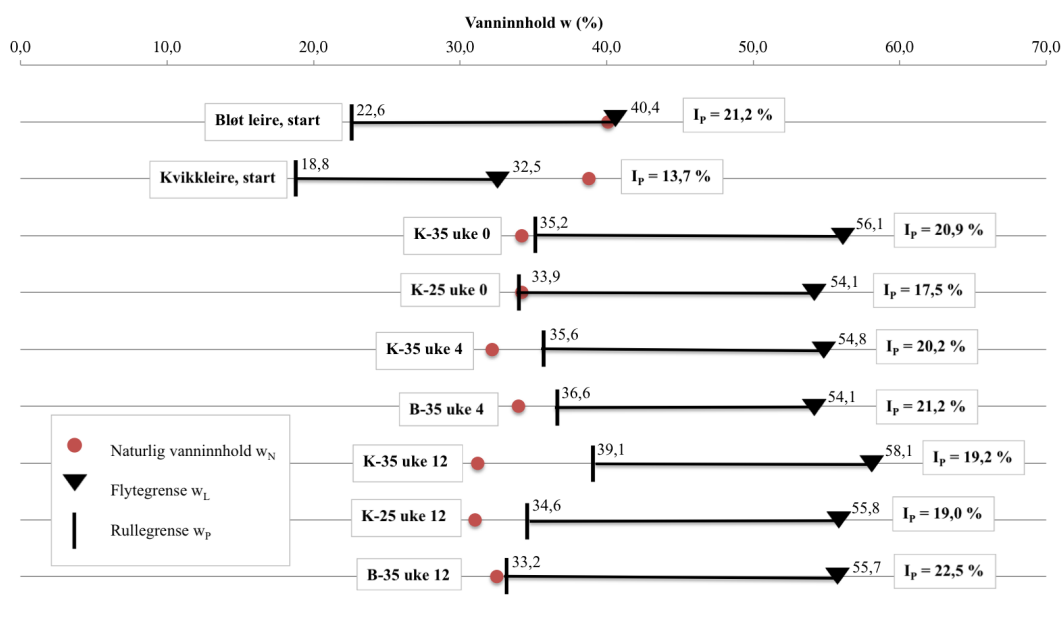


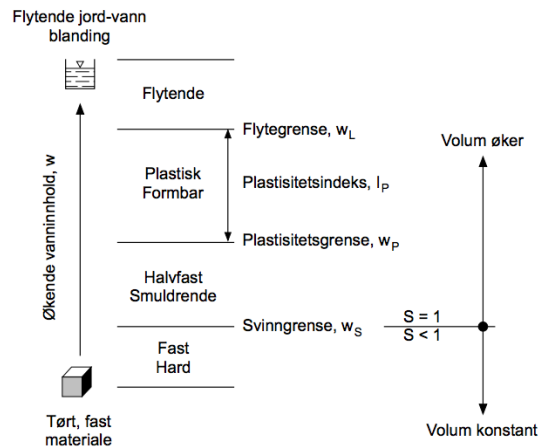
Figur 5.2: Resultat fra plastisitetsforsøk

I tabell 5.4 og figur 5.3 vises plastisitetstegrensene for de ulike materialene. Dette viser at det skjer en betydelig strukturendring i materialet da grensene flyttes oppover, og særlig for w_L . I naturlig tilstand ligger I_P på 17,8 for bløt leire og 14,7 for den kvikke leira. Vanninnholdet i kvikkeleira lå over w_L , mens den bløte leira lå helt opp mot w_L . Umiddelbart etter at bindemiddelet er blandet i ren leire, endres både rullegrensen w_P og flytegrensen w_L , og I_P . Samtidig synker vanninnholdet i prøvematerialet til w_P eller lavere. Anleggsteknisk er dette gunstig. Når både w_P øker og w synker, øker massenes evne til å ta komprimering og massen tåler også svingninger i vanninnhold bedre. Når materialet nærmer seg svinggrensen w_S , vil volumet endre seg, se figur 5.4 side 62.

Tabell 5.4: Oppsummering av plastisitetstegrensene w_P og w_L

Plastisitetstegrens	w_P (%)			w_L (%)		
	Uke 0	Uke 4	Uke 12	Uke 0	Uke 4	Uke 12
K-35	35,2	35,6	39,1	56,1	54,8	58,1
K-25	33,9	35,6	34,6	54,1	54,8	55,8
B-35	-	36,6	33,2	-	54,1	55,7

Figur 5.3: Prøvematerialets naturlige vanninnhold w_N vs. plastisitetstegrensene w_P og w_L



Figur 5.4: Atterbergs konsistensgrenser (Emdal, 2014)

5.2.1 Innblanding med kvikkleire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

For K-35 er tendensen for plastisitetsindeksen I_p den samme som for vanninnholdet w . Det ses en reduksjon etter innblanding av bindemiddel, mens utviklingen holder seg konstant etter uttynning.

Dekningsgrad $\eta=25\%$

Ved innblanding av Multicem og sement i uke 0 var ingen dekningsgrad lagt til grunn, og materialet som er testet etter en måneds herdetid vil derfor tilsvare K-35. Materialet som ble testet i uke 0 tilsvarer K-25 rett etter innblanding. Dermed observeres det en økning i plastisitet etter uttynning.

5.2.2 Innblanding med bløt leire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

Dette materialet ble ikke testet ved innblanding, men tendensen er likevel den samme som for de to andre materialene da det viser en økning i I_p etter uttynning. Her ses det også en større endring over tid på 5% enn for K-35 og K-25. Sammenlignet med den ustabiliserte massen fra Nytt Nasjonalmuseum, observeres det noe lavere verdier for det bløte pelematerialet etter en måneds herdetid.

5.3 Konusforsøk

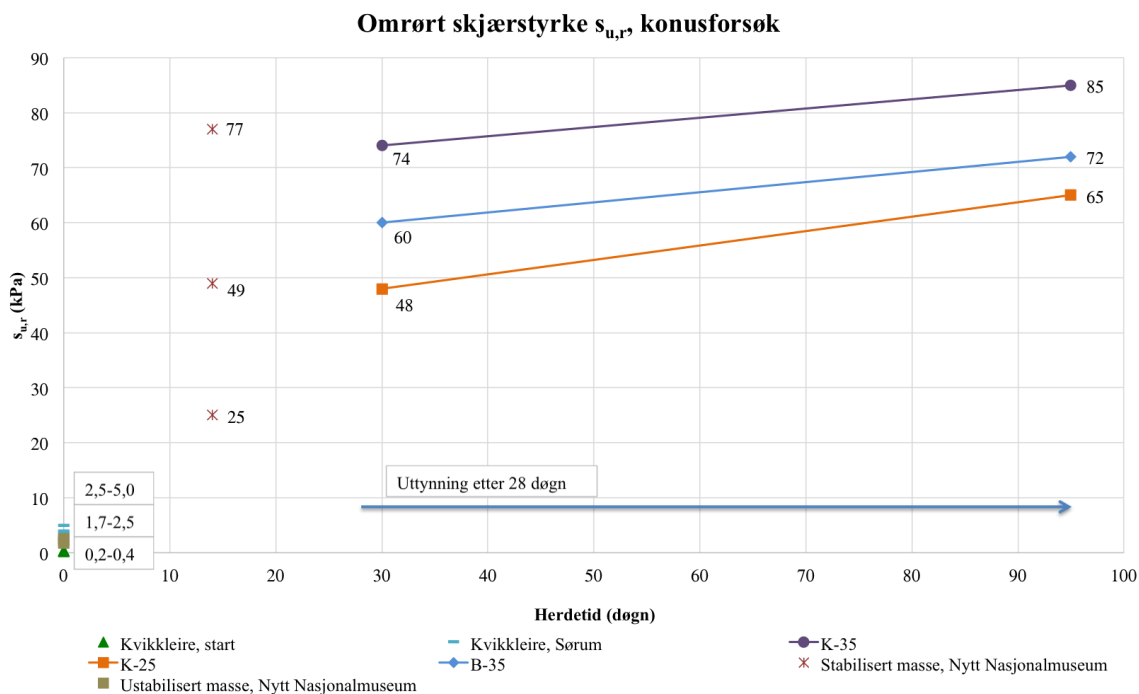
I tabell 5.5 vises resultatene fra konusforsøkene på omrørt materiale, og felles for alle materiale-
ne er en økning i styrken med herdetiden, også etter at Multicem-/sementmaterialet er tynnet
ut med ren leire.

Tabell 5.5: Oppsummering av omrørt konusforsøk

Omrørt skjærstyrke $s_{u,r}$ (kPa)	Resultat			
	Uke 0	Uke 4	Uke 12	$\Delta s_{u,r}$
K-35	-	74	85	11
K-25	-	48 ^a	65	17
B-35	-	60	72	12

	Uke 0
Nytt Nasjonalmuseum	25
	77
	49
	49

^aDenne verdien er målt rett etter uttynning, og er dermed uten herdetid.



Figur 5.5: Resultat fra konusforsøk

5.3.1 Innblanding med kvikkleire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

Som det vises av figur 5.5 er K-35 det materialet som oppnår størst omrørt styrke av de tre materialene, samtidig som det har den laveste endringen på 11 kPa.

Dekningsgrad $\eta=25\%$

I motsetning til K-35, oppnår K-25 lavest omrørt styrke, men likevel størst økning på 17 kPa over tid.

5.3.2 Innblanding med bløt leire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

Utviklingen for B-35 er relativt lik som for K-35 da den totale økningen er på 12 kPa. Pelematerialet oppnår noe høyere verdi etter en måned sammenlignet med den stabiliserte massen fra Nytt Nasjonalmuseum, men igjen må det bemerkes at herdetiden er kortere for disse massene og innblandingsforholdet er høyere (120 kg/m^3).

5.4 Hydrometeranalyse

Hydrometeranalysene viser en grovere jordart etter innblanding av Multicem og sement for alle de tre materialene. Etterhvert som materialene tynnes ut med ren leire minker andelen av Multicem-/sementpel og det ses en økning i leirinnholdet, se tabell 5.6.

Tabell 5.6: Leirinnhold funnet ved hydrometeranalyser

Leirinnhold (%)	Resultat		
	Uke 0	Uke 4	Uke 12
K-35	25	5	5
K-25	43	-	45
B-35	-	7	32
	Uke 0		
Nytt Nasjonalmuseum	51		

5.4.1 Innblanding med kvikkleire

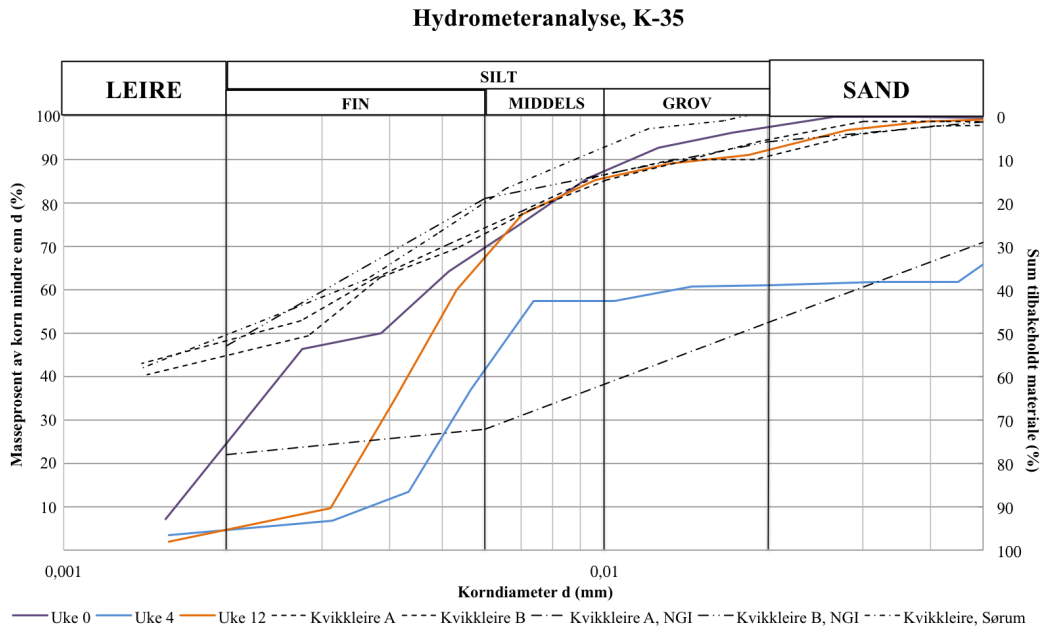
Dekningsgrad $\eta=35\%$

Figur 5.6 viser kornstørrelsesfordelingen for K-35. Sammenlignet med ren leire, har pelene et lavere leirinnhold på ca. 5% etter innblanding av bindemiddel, og karakteriseres derfor som en silt. Etter uttynning med ren leire, holder leirandelen seg konstant.

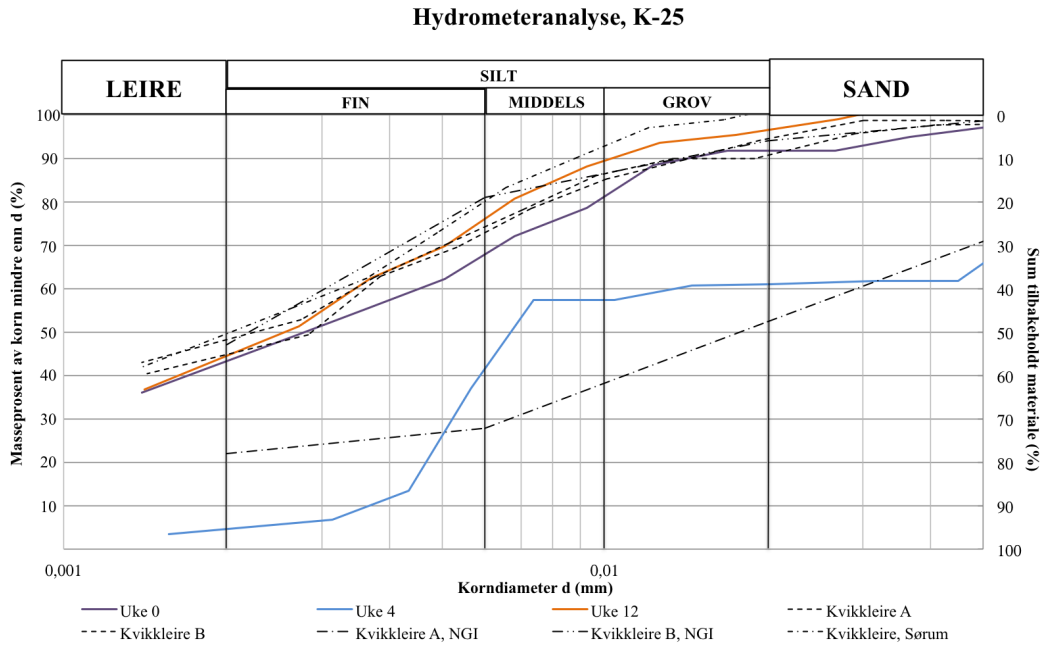
Dekningsgrad $\eta=25\%$

Resultatet for K-25 viser at blandingen har relativt likt leirinnhold som den rene leira etter tre måneders herdetid, se figur 5.7. Leirinnholdet er på ca. 43% etter uttynning.

Aktiviteten a til et materiale defineres som plastisitetsindeksen I_P delt på % leirinnhold, og sier noe om materialets evne til å binde til seg vann. Overslagsmessige beregninger for dette viser at aktiviteten øker, noe som illustrerer at materialet har brukt vann gjennom herdeprosessen. Eksempelvis har denne økt fra ca. 0,8 til 3,8 for K-35 fra uke 0 til uke 4.



Figur 5.6: Hydrometeranalyse av K-35

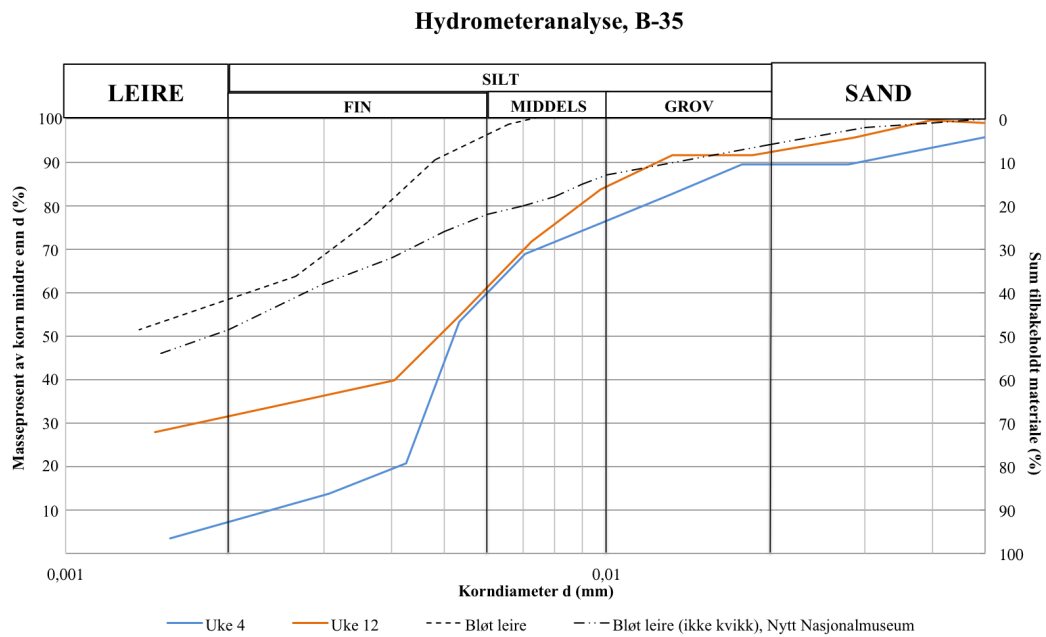


Figur 5.7: Hydrometeranalyse av K-25

5.4.2 Innblanding med bløt leire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

I likhet med K-35 observeres det stor spredning i leirinnholdet ved de ulike tidspunktene. Også dette materialet har et lavt leirinnhold på ca. 7% etter innblanding av Multicem og sement. Figur 5.8 viser at det er store endringer med herdetiden og at leirandelen ved slutt er ca. 32%.



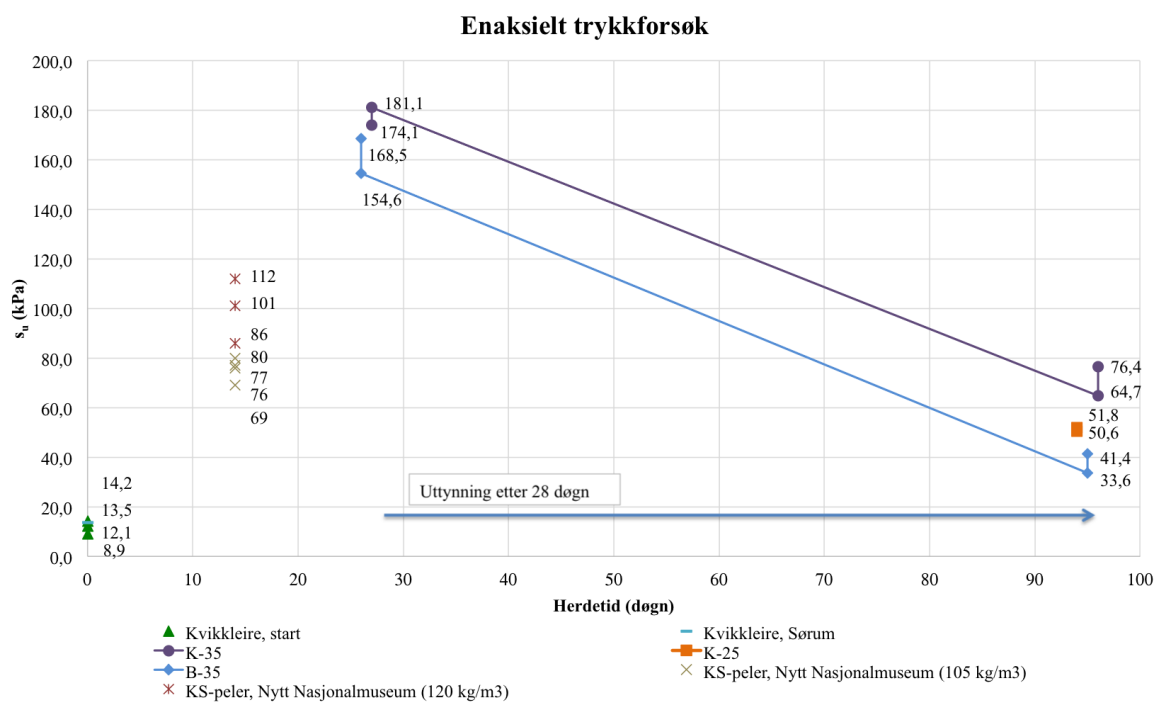
Figur 5.8: Hydrometeranalyse av B-35

5.5 Enaksielt trykkforsøk

Etter innblanding med Multicem og sement har styrken økt betraktelig. I motsetning til konusforsøkene, minker verdiene for s_u etter uttynning, se figur 5.9. Også her er tall fra Nytt Nasjonalmuseum tatt med for sammenligning. Merk at disse pelene har en annen innblandingsmengde og kortere herdetid enn prøvepelene fra laboratoriet. Merk også at det ikke er kjørt tradisjonelle enakstester på disse pelene, men prøvene er kjørt i treakscelle uten sidetrykk. Det er også testet etter kun to ukers herdetid, og verdiene er derfor ikke direkte sammenlignbare.

Tabell 5.7: Oppsummering av enaksial styrke s_u

Enaksial styrke (kPa)	Uke 4		Uke 12	
	Test A	Test B	Test A	Test B
K-35	174,1	181,1	64,7	76,4
K-25	-	-	51,8	50,6
B-35	168,5	154,6	33,6	41,4



Figur 5.9: Resultat fra enaksiale trykkforsøk

5.5.1 Innblanding med kvikkleire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

I likhet med konusforsøket viser K-35 størst enaksiell styrke av de tre materialene både før og etter uttynning med ren leire. Sammenlignet med B-35 har forskjellen i styrke omtrent doblet seg i favør K-35 etter tre måneders herdetid.

Dekningsgrad $\eta=25\%$

Etter uttynning viser K-25 en større s_u enn B-35, men samtidig lavere verdi enn K-35. Pelene ble her kjørt til en maks tøyning på 15%.

5.5.2 Innblanding med bløt leire

Dekningsgrad $\eta=35\%$

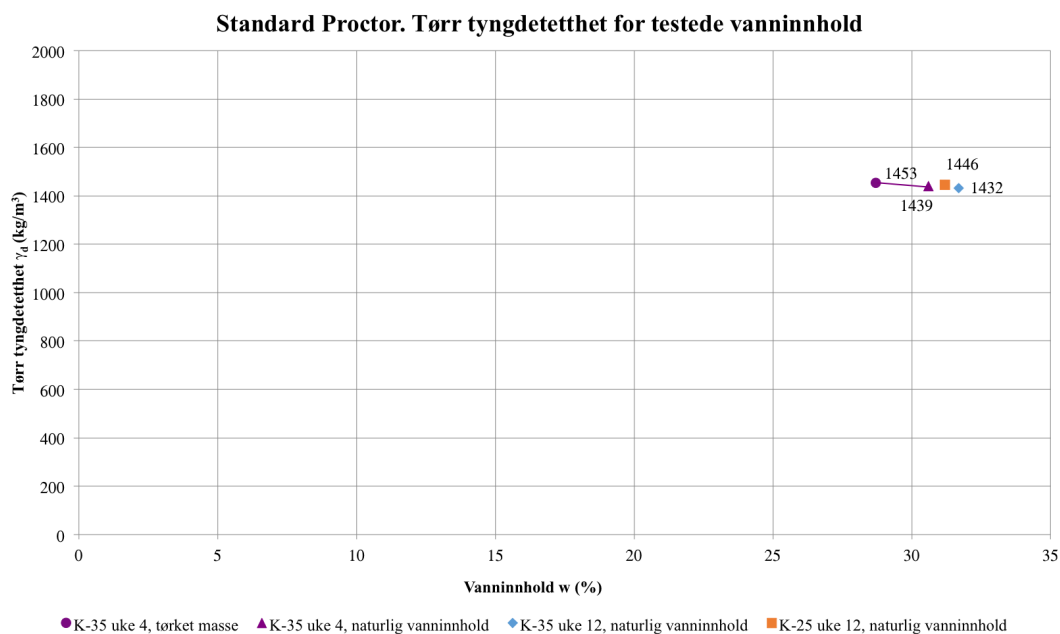
B-35 viser den laveste, enaksielle styrken av de tre materialene. Ved innblanding av Multicem og sement er verdiene relativt like som K-35, men likevel noe lavere.

5.6 Standard Proctor

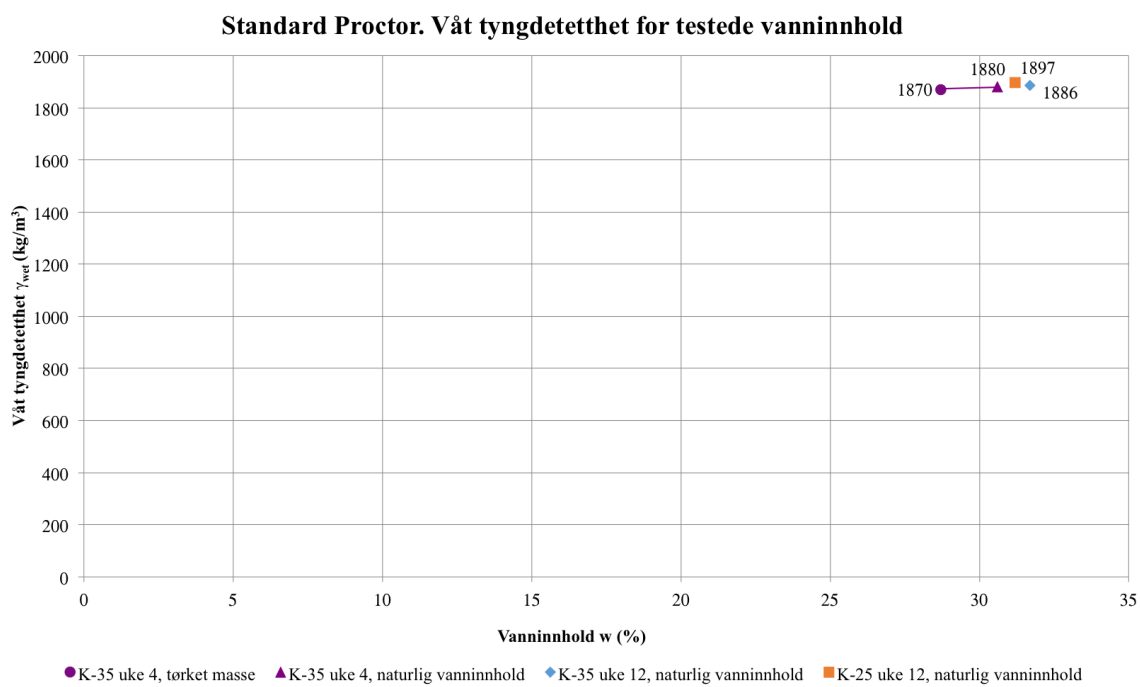
Vanligvis utføres Standard Proctor ved ulike vanninnhold og det lages en kurve som vist i figur 2.19, men dette ble ikke gjort grunnet manglende materiale. Grafene fra forsøkene viser derfor bare et punkt for hvert materiale da massene ble testet kun én gang ved sine naturlige vanninnhold. K-35 er testet ved både naturlig vanninnhold og ved masse tørket ca. et døgn i romtemperatur. Figur 5.10 viser verdiene for tørr tyngdetetthet, mens figur 5.11 presenterer den våte tyngdetettheten for de testede prøvene. En oppsummering av resultatene fra Standard Proctor-forsøkene vises i tabell 5.8.

Tabell 5.8: Oppsummering av Standard Proctor-forsøk

Materiale	Resultat		
	w_N (%)	γ_d (kg/m ³)	γ_{wet} (kg/m ³)
K-35 uke 4, masse tørket i romtemperatur	28,7	1453	1870
K-35 uke 4, naturlig vanninnhold	30,6	1439	1880
K-35 uke 12, naturlig vanninnhold	31,7	1432	1886
K-25 uke 12, naturlig vanninnhold	31,2	1446	1897



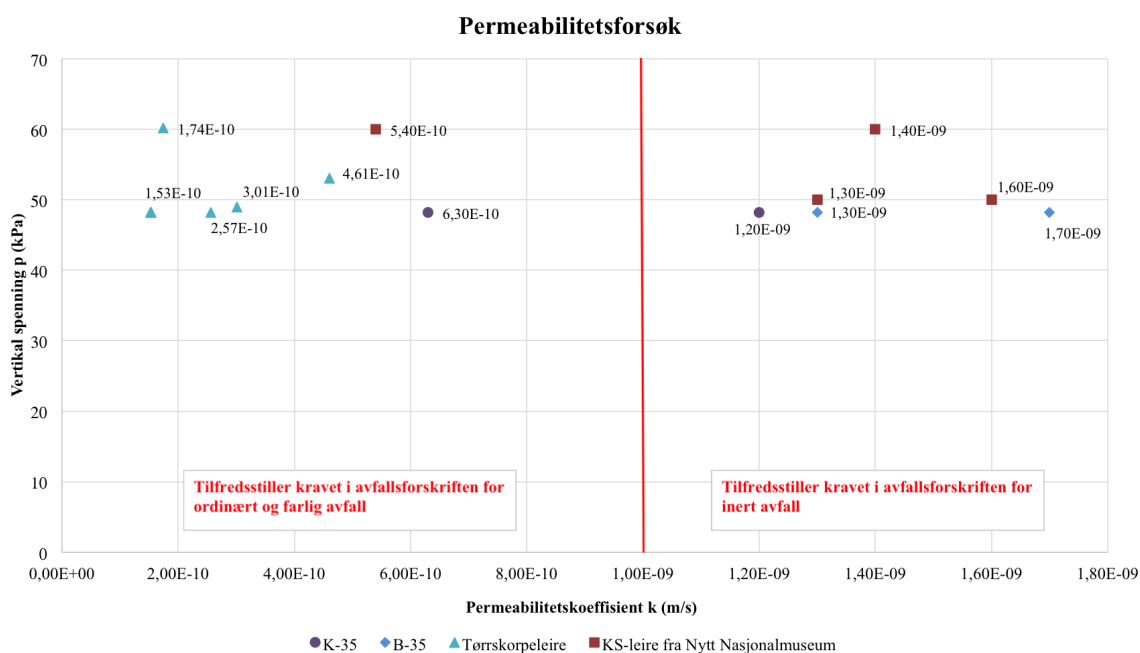
Figur 5.10: Resultat fra Standard Proctor. Tørr tyngdetetthet for testede vanninnhold



Figur 5.11: Resultat fra Standard Proctor. Våt tyngdetetthet for testede vanninnhold

5.7 Permeabilitetsforsøk

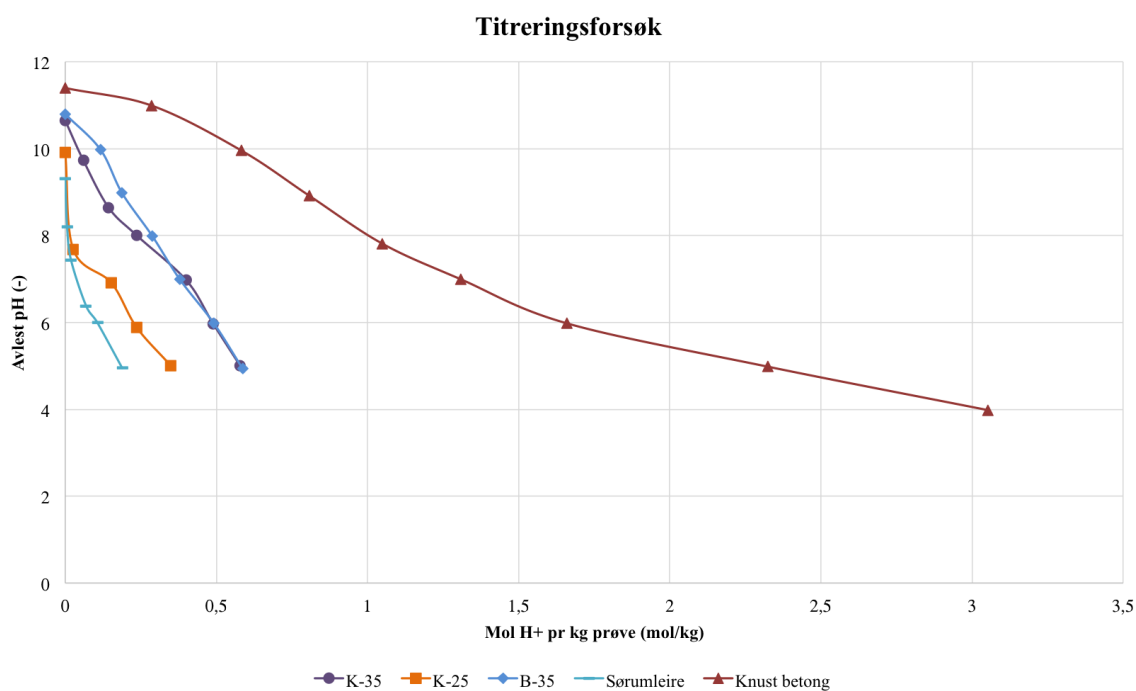
Som det vises i figur 5.12 er det K-35 og B-35 som er testet. I tillegg til prøvepelene er det også plottet verdier fra Nytt Nasjonalmuseum samt tørrskorpeleire for sammenligning. Som det vises av resultatene har det uttynnede pelematerialet blitt utsatt for en vertikal spenning på 48,1 kPa, som tilsvarer spenningstilstanden det utsettes for etter endt utlegging og komprimering. Resultatene viser høyere verdier for permeabilitet enn tørrskorpeleire, men er i størrelsesorden 10^{-9} m/s. Pelene fra Nytt Nasjonalmuseum har omtrent samme verdier. Test A for K-35 er tilfredsstillende og viser en lavere verdi enn de tre øvrige testene som er utført i denne omgang. Permeabilitetstestene er som nevnt utført for lave spenninger, som er representative for mineralske tettesjikt i topptettingen. Det er normalt å oppnå lavere permeabilitet ved større trykk, noe som vil være mer representativt for bunn- og sidetetting.



Figur 5.12: Resultat fra permeabilitetsforsøk

5.8 Titreringsforsøk

Titreringsforsøkene ble utført etter tre måneders herdetid på pelene i tillegg til at kvikkleira fra Sørumsleira ble undersøkt. Figur 5.13 presenterer resultatene, og viser også samme forsøk for knust betongmateriale for sammenligning, da dette benyttes i deponier til å bufre mot syredannende materialer, som for eksempel alunskifer.

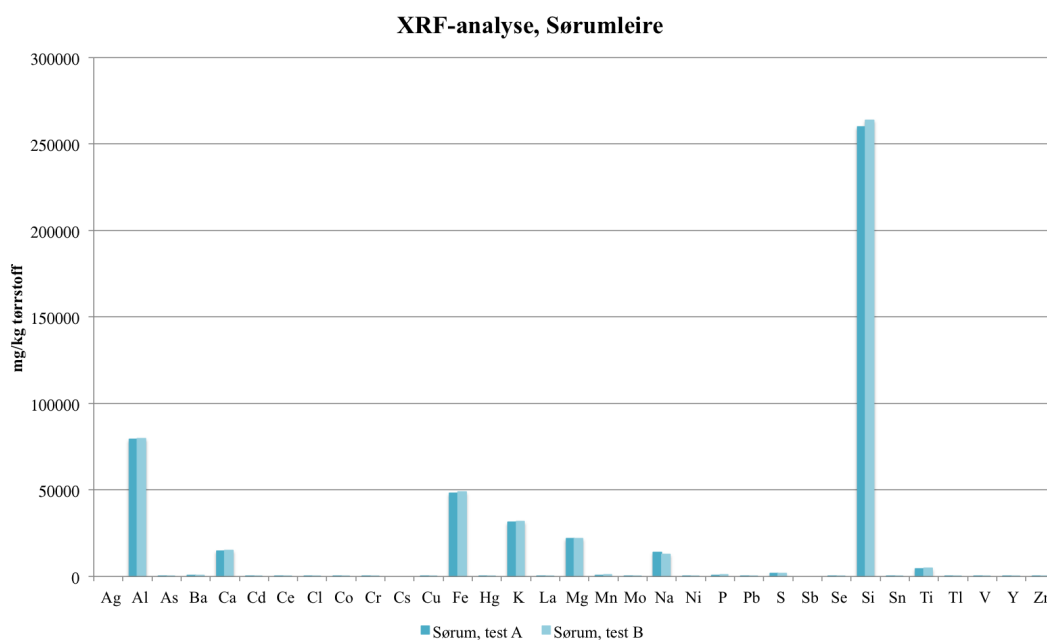


Figur 5.13: Resultat fra titreringsforsøk

Ved sammenligning av kurvene er det tydelig at det kreves lite syre for å oppnå en lavere pH i pelematerialene sammenlignet med den knuste betongen. Dette skyldes at ren betong har et høyere innhold av Ca, som er et basisk mineral. Samtidig ses det små sprang i mengden syre som tilsettes mellom hver pH-reduksjon.

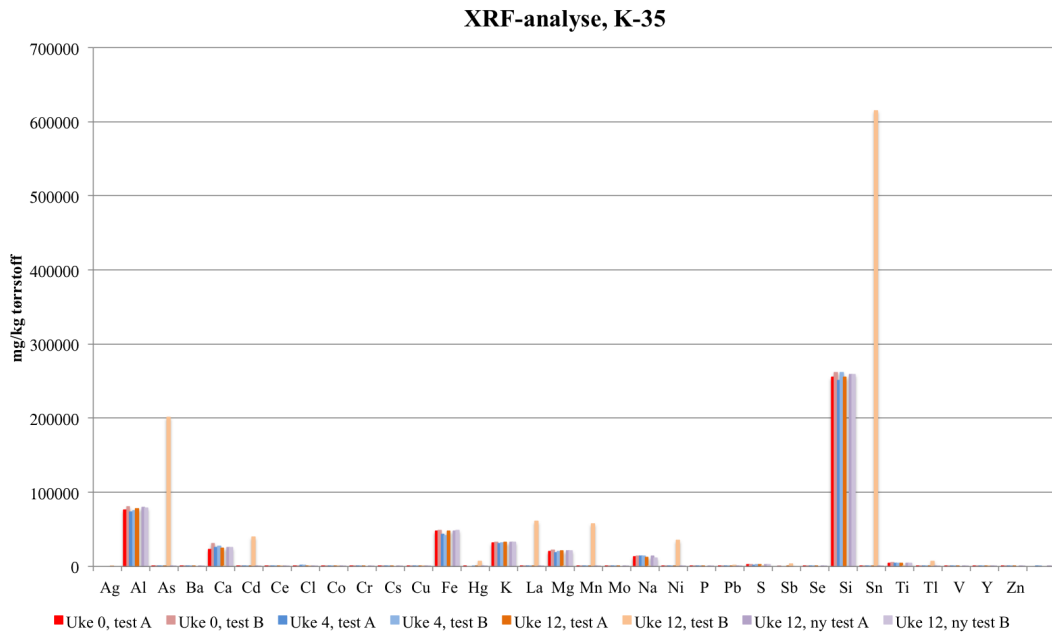
5.9 XRF-analyse

Alle analysene viser relativt like resultater med et høyt innhold av silisium (Si) etterfulgt av aluminium (Al) og jern (Fe). Under herdetiden holder nivåene seg konstant og det er lite endringer i mineralogien. XRF-analysen utført på ren kvikkleire fra Sørumsund viser i likhet med de uttynnede materialene et høyt innhold av Si og Al, se figur 5.14.

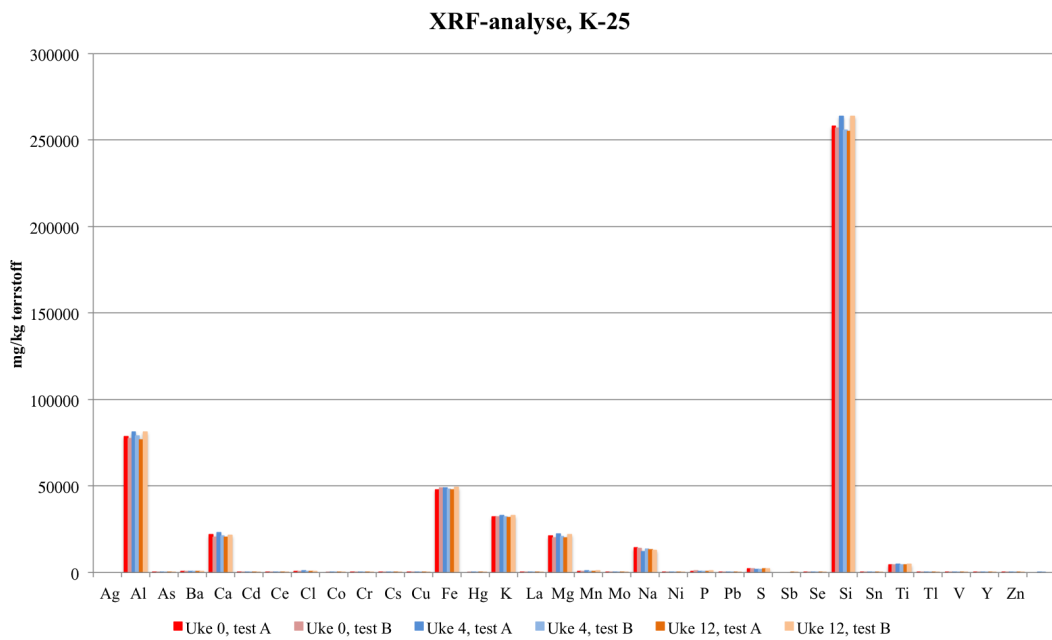


Figur 5.14: XRF-analyse av kvikkleire fra Sørumsund

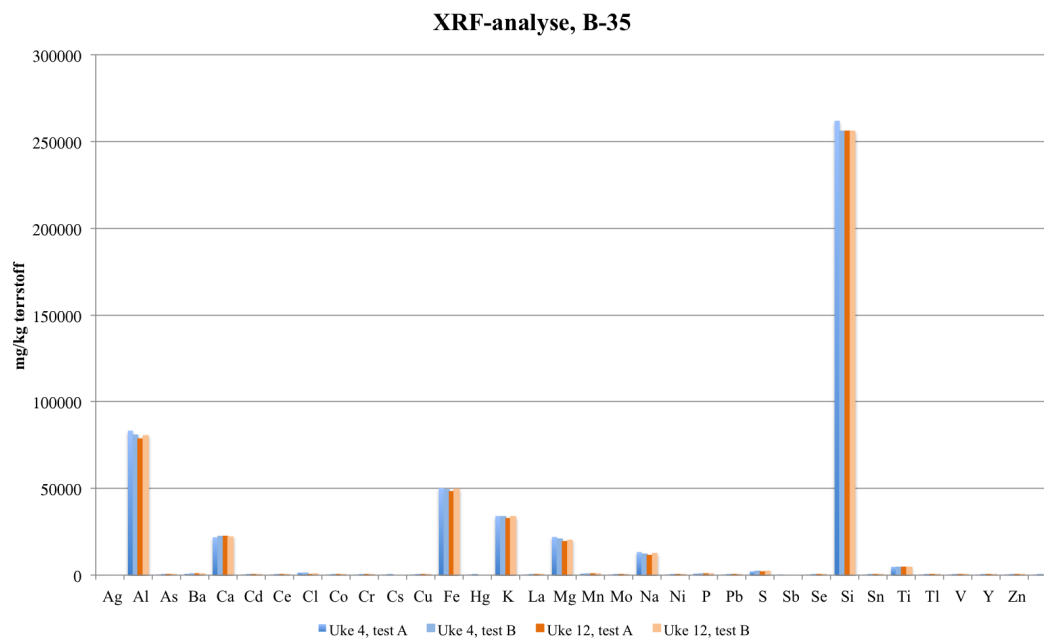
Som det vises av figur 5.15 er det svært høye utslag for K-35 uke 12, test B. Dette kan ha skyldtes forstyrrelser under forsøket, og det ble derfor utført en ekstra test på det resterende materialet. Denne viser at verdiene er relativt like sammenlignet med de øvrige tallene.



Figur 5.15: XRF-analyse av K-35



Figur 5.16: XRF-analyse av K-25



Figur 5.17: XRF-analyse av B-35

5.10 XRD-analyse

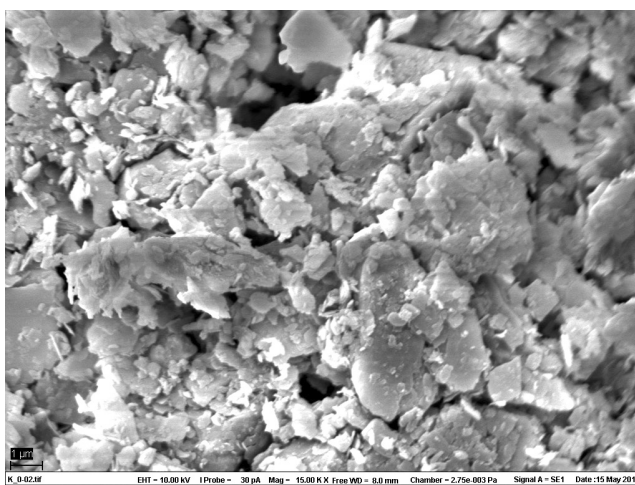
I prøvene fra NGU er det kun to prøver som viser utslag på typiske sementbindinger. Som vist i vedlegg B.4 er selve innholdet av Multicem og sement etter uttynning svært lite, og dette får konsekvenser for resultatene av denne testen. Da analysen har en nedre grense på hva den dektekerer på ca. 2%, blir resultatene usikre.

Tabell 5.9: Oppsummering av SEM-foto

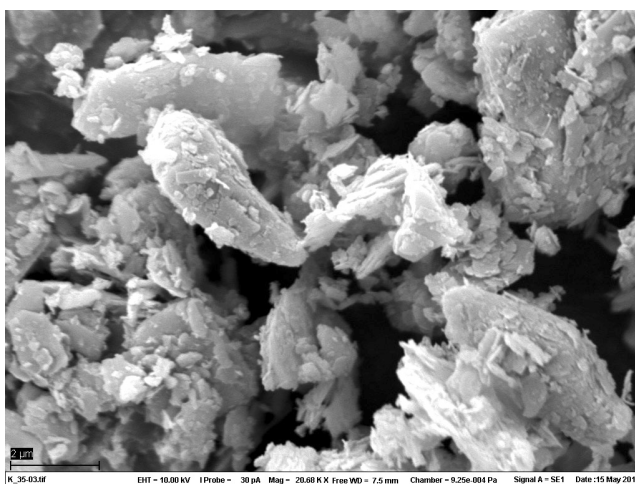
Materiale	Resultat						
	Mg (g/kg)	Al (g/kg)	Si (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Ti (g/kg)	Fe (g/kg)
Kvikkleire fra Sørumsund	14	44	120	17	11	4,1	43
K-35 uke 12	14	43	68	13	25	4,3	42

5.10.1 SEM-foto

Fra SEM-fotoene observeres det svært liten forskjell mellom ubehandlet og behandlet prøve, bortsett fra at den behandlede prøven har noe høyere utslag for kalsium, se tabell 5.9 side 77. Ellers vises de samme utslagene som for XRF-analysene. For fullstendige resultater vises det til vedlegg A.6. I figur 5.18 og figur 5.19 vises SEM-foto av de to materialene. Flakstrukturen kan være leirmineraler, mens klumpene indikerer silt. Figur 5.18 og figur 5.19 indikerer en grovere struktur for K-35.



Figur 5.18: SEM-foto av ubehandlet, omrørt kvikkleire fra Sørumsund. Forstørret 15000x



Figur 5.19: SEM-foto av K-35 uke 12. Forstørret 15000x

5.11 Feilkilder

Ved sammenstilling av XRF-analysene ble det oppdaget unormalt høye verdier for K-35 sammenlignet med de øvrige materialene. Det ble derfor utført et nytt forsøk og resultatene fra dette forsøket viste samme utslag som de øvrige testene. I både XRF- og XRD-analysene er det kun noen få gram av materialet som tas ut og testes, noe som kan gi ulike resultater. Ved å teste flere områder av prøven, vil det gi trygghet til resultatene og understreker viktigheten med duplikat-tester. I prøvene fra NOAH Langøya, kan det være ujevnheter i innblandingen som kan bety at de ikke er blandet likt. Dette kan ha betydning for hva som faktisk detekteres i XRD-analysene.

Da det var lite tilgjengelig materiale i uke 4, ble det bestemt at det skulle blandes to nye batcher med K-35 og K-25 da det var kvikkleire fra Sørum tilgjengelig. Både innblanding av Multicem og sement samt uttynning med leire ble utført i samme prosedyre. Dette ble gjort for at NGU kunne utføre testene av nytt og gammelt pelemateriale samtidig.

Som nevnt i kapittel 5.7, ble permeabilitetsforsøkene kjørt med en lav spenning, og kravet til hydraulisk konduktivitet k ble oppfylt i kun en av testene. Her bør det undersøkes om de kan kjøres med en høyere spenning.

De enaksielle prøvene for peler fra Nytt Nasjonalmuseum ble testet i treakscelle uten side-trykk, i tillegg til at de er testet etter kun to ukers herdetid. Verdiene er derfor ikke sammenlignbare.

Kapittel 6

Konklusjon og anbefalinger for videre arbeid

6.1 Diskusjon

6.1.1 Rutineundersøkelser

Vanninnhold

Ved innblanding av Multicem og sement ses det en reduksjon i vanninnholdet etter en måneds herdetid på pelene. Dette skyldes hydratiseringsprosessen mellom tørrstoffet i bindemidlene og vannet i leira. Når prøvepelene tynnes ut med ren leire, overskygges denne effekten og vanninnholdet holder seg konstant fra en til tre måneders lagring. Ved sammenligning med den teoretisk utregnede verdien for vanninnhold (summen av vanninnhold proporsjonalt fra prøvepeler og fra innblandet ren leire, delt på det totale volumet), ligger de målte verdiene i blandingsmaterialet lavere. Dette kan forklares med at andelen leire øker etter uttynning, og skaper et større overflateareal som vannet kan binde seg til. Dette bekreftes av aktiviteten som beregningsmessig øker, se kapittel 5.4. Avviket mellom teoretisk og faktisk verdi, kan også skyldes at det ikke er benyttet samme leirmateriale gjennom hele forsøksperioden, og at de ikke har samme vanninnhold. Det kan også skyldes at selve blandeprosessen bidrar til noe avdamping og økt tilgang til oksygen. Ved utblanding og bearbeiding i sol og vind, slik det ble gjort på Langøya, kan denne

effekten være større enn det som måles i laboratoriet. Store avvik mellom teoretisk og faktisk verdi kan ikke utelukke at det er mer å hente i en eventuell restreaksjon.

Som det vises av figur 5.3 side 61, er vanninnholdet nå lavere enn rullegrensen w_P i den opprinnelige leira. Dette er en viktig faktor for det anleggstekniske arbeidet, og en viktig forutsetning for å kunne få bearbeidet og lagt ut massen. I tilfellet hvor vanninnholdet er høyere enn w_P , er det overskudd av vann og massen flyter. Vannforbruket gjennom summen av hydratisering og blanding av materialene har bidratt til denne gunstige effekten.

Plastisitet

Plastisitetsindeksen øker etter uttynning for alle materialene og skjer som følge av flokkuleringen som oppstår som beskrevet av Åhnberg i kapittel 2.4.4. I tillegg har andelen leire økt, noe som fører til et mer bearbeidelig materiale som vil være positivt for komprimerbarhet og senere utlegging. Blandeprosessen bidrar dermed til å øke plastisitetsgrensene som vist i figur 5.3 side 61. Ved innblanding av en lavplastisk leire fra Sørumsdal vil det være sannsynlig at materialet også viser mer lavplastisk oppførsel, men dette er ikke tilfelle da I_P øker. Resultatene er i tråd med Åhnbergs funn (Åhnberg, 2006), også etter uttynning. Dette tyder på at uttynningen med et svakere materiale ikke bidrar negativt, og at resultatet er bedre enn hva man kunne forvente. Som nevnt i kapittel 5.2, endrer volumet til materialet seg når vanninnholdet nærmer seg svingngrensen w_S . I tillegg er vanninnholdet lavere enn rullegrensen w_P noe som viser at svingngrensen bør undersøkes da dette kan påvirke den hydrauliske konduktiviteten over tid.

Styrkeparametere

Både den kvikke og bløte leira oppnår en betydelig økning i både omrørt og enaksial styrke etter innblanding av Multicem og sement. Konusforsøkene viser at den omrørte styrken øker etter uttynning med ren leire, mens de enaksiale forsøkene viser motsatt tendens. Dette må antas å være rimelig, i og med at det tynnes ut med et svakere materiale. Styrken s_u oppnår en verdi på 50 kPa, noe som viser at materialene oppnår god styrke også etter uttynning. K-35 viser den største styrken av de tre materialene som kan skyldes at den har mest bindemiddel og samtidig lavest vanninnhold i den ubehandlede leira i forhold til den bløte leira.

Kornfordeling

Hydrometeranalysene viser at materialene testet etter 4 og 12 uker må karakteriseres som silt og ikke lenger leire etter innblanding av bindemiddel. Dette skyldes flokkuleringen som oppstår mellom mineralkornene når hydratiseringen begynner. Kornene kitter seg sammen slik at porefordelingen endres og materialet får en grovere struktur.

Uttynningen, som gjøres med ren leire, bidrar til at innholdet av leirpartikler i materialet øker igjen. Dette gjelder særlig for K-25 som til slutt har nesten samme leirinhold som utgangsmaterialet. Da det er mer vanlig å benytte en dekningsgrad mellom 20-30% i anleggsprosjekter, kan resultatene konkluderes med å være gode, også for masser som ikke er like kraftig stabilisert som masser fra Nytt Nasjonalmuseum.

6.1.2 Komprimerbarhet

Ved innblanding av Multicem og sement vil tyngdetettheten øke som følge av flokkuleringen og en tettere lagring av kornene. For tilfellet hvor det faktiske vanninnholdet er større enn w_{opt} , vil materialet miste bæreevne og det vil bli vanskelig å komprimere ut massene. Dette vil igjen føre til at det blir sporete ved utlegging, spesielt dersom lagene er for tynne. Som nevnt i kapittel 5.6 ble forsøkene utført ved prøvematerialets naturlige vanninnhold, og det optimale vanninnholdet ble derfor ikke funnet. Likevel indikerer resultatene, i likhet med plastisiteten, at materialene vil kunne la seg komprimere uten store problemer. Massen kan legges ut i tynne lag uten at det klitrer seg til anleggsmaskinen som komprimerer materialet da w er lavere enn w_p .

6.1.3 Permeabilitet

Etter uttynningen viser resultatene at pelene oppnår en hydraulisk konduktivitet i størrelsesorden 10^{-9} m/s noe som er svært bra. Det ses ingen klar forskjell mellom de to uttynnede materialene annet enn at K-35-A viser en lavere k enn de tre resterende permeabilitetsforsøkene. Et forsøk oppfyller kravet og to forsøk ligger like under kravet til hydraulisk konduktivitet. Dette bekrefter at uttynnede kalk-/sementmasser oppnår god kvalitet, men det gjenstår et arbeid med å få jevne resultater, og like god tetthet på alle prøver. Dette tyder derfor på at effekten

av bindemiddelet overskygges av uttynningen, og at den omkringliggende massen har mye å si for den endelige permeabiliteten til materialet. Permeabilitetstestene er som nevnt utført for lave spenninger, som er representative for mineralske tettesjikt i topptettingen. Det er normalt å oppnå lavere permeabilitet ved større trykk, noe som vil være mer representativt for bunn- og sidetetting.

Testene viser altså at det skal være mulig å oppnå kravene til avfallsforskriften til et materiale med $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Avvikene kan komme av ujevnheter i innstampingen, klumper eller feil under gjennomføring av forsøk. Tørrskorpeleire oppnår fremdeles de laveste verdiene for hydraulisk konduktivitet. Stabilisert masse fra Nytt Nasjonalmuseum er her tatt med for sammenligning, da det er denne massen som ble gravet opp og komprimert på Langøya. Resultatene viser at verdiene er svært like.

6.1.4 Syrenøytralisering

Ved sammenligning av de ulike pelematerialene og knust betong, ses det en stor forskjell i hvor mye syre som tilsettes per kg prøve. Knust betong har et høyt innhold av CaO og Ca(OH)₂ enn kalk-/sementleire, noe som gir den svært gode bufringsegenskaper. Multicem-/sementpelene har en bufringseffekt, selv om den må sies å være betydelig mindre i en nøytraliseringssprosess enn knust betong. Resultatene viser at det vil være gunstig å kunne benytte Multicem-/sementmateriale i tilknytning til deponering av alunskifer og andre syredannende bergarter.

6.1.5 Mineralogi

XRF-analyse

XRF-analysene viser at pelematerialene har svært liten endring i mineralogien både før og etter uttynning. Dette gjelder også for kvikkleira fra Sørums. Testene gir store utslag for silisium (Si) og aluminium (Al) som finnes i norske leirer. Lite endringer i mineralogien viser at det ikke skjer en kjemisk endring, og at en eventuell restreaksjon av hydratisering mellom knust pel og ren leire ikke er tilstede. Dette bekrefter at materialene har fått økt bruksverdi.

XRD-analyse

Som vist i vedlegg B.4, er det faktiske innholdet av Multicem og sement etter uttynning svært lite, og dette kan forklare hvorfor SEM-fotoene får svært lite utslag for kalsium (Ca). Bildene indikerer at materialet inneholder siltklumper som også bekreftes gjennom hydrometeranalyserne. I likhet med XRF-analysene, viser SEM-fotoene tydelige utslag for Si og Al, og flakstrukturen i bildene kan dermed indikere at det finnes leirpartikler i materialene. Bildene tolkes til å vise liten forskjell mellom prøvene, noe som indikerer at det ikke skjer endringer i mineralogien underveis. På bakgrunn av dette, kan det tolkes at en eventuell restreaksjon av hydratisering kan neglisjeres.

6.2 Konklusjon

Med grunnlag i oppnådde resultater fra forsøkene, kan det konkluderes med at materialene viser et tydelig potensial for gjenbruk og nyttegjøring etter endt brukstid. De geotekniske egenskapene til pelematerialene etter blanding og uttynning med ren, ubehandlet leire viser gode styrkeparametere, bearbeidelighet og lav permeabilitet. Det er dermed dannet et grunnlag for å kunne dra nytte av disse massene, og behovet for å deponere de som inerte masser kan sies å ha sunket. Forutsetningen er at massene tilføres energi i form av knusing og blanding.

6.2.1 Gjenbruk av stabiliserte og uttynnede materialer

Deponier

Tabell 6.1 side 86 viser en oversikt over hvilke krav et materiale må oppfylle for å kunne benyttes i det mineralske tettesjiktet i deponi for farlig avfall, og hvorvidt materialene fra denne oppgaven oppfyller disse. Kriteriene er basert på tidligere rapporter fra Statens Vegvesen samt erfaringer NGI har opparbeidet seg knyttet til hva som gir en praktisk, bearbeidelig masse, men som likevel er tett. Det observeres store likheter med kravene gitt i USA, se kapittel 2.1.2.

Tabell 6.1: Krav og vurdering av oppfyllelse til mineralsk tettesjikt i deponi for farlig avfall (Baardvik et al., 2014)

Parameter	Kriterie	Materiale		
		K-35	B-35	K-25
Vanninnhold w	> 30%	Ja	Ja	Ja
Plastisitetsgrense I_p	15-70%	Ja	Ja	Ja
Skjærfasthet s_u , uforstyrret ^a	> 50 kPa	Ja	Nei	Ja
Skjærfasthet s_u , omrørt	> 10 kPa	Ja	Ja	Ja
Leirinnhold ^b	> 30% leirinnhold	Nei	Nei	Ja
Tyngdetetthet γ^c	> 2000 kg/m ³	Nei	Ikke testet	Nei
Hydraulisk konduktivitet k	$\leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s	Ja	Nei	Ikke testet

^aB-35 materialet oppnår ikke dette kravet, men det er bløt leire blandet med kalk-/sementpel som er benyttet i topptettingen på Langøya. Denne massen har vist gode resultater, og kan skyldes komprimeringsarbeidet og gode værforhold.

^bDette overstyrer av kravet til permeabilitet. Ved utarbeidelse av de anbefalte verdiene i tabell 6.1, var det ikke utført permeabilitetsforsøk grunnet tid og økonomi. Da avfallsforskriften kun setter krav til k , er det fortsatt mulighet for bruk i tettesjikt.

^cI likhet med kravet om leirinnhold, overstyrer også dette av kravet til hydraulisk konduktivitet.

Tabell 6.1 viser at de uttynnede pelematerialene oppfyller de fleste kravene for deponering av ordinært og farlig avfall. I likhet med undersøkelsene fra 2016 (Okkenhaug and Pabst, 2016) viser også resultatene i denne oppgaven at leirinnholdet er lavt, og at den hydrauliske konduktiviteten ligger både over og under kravet i avfallsforskriften på $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Dermed settes det begrensninger for bruken av materialet i det mineralske tettesjiktet i topptettingen. Det bekreftes samtidig at massene kan benyttes i avrettingssjikt og arronderingslag på lik linje som materialet fra Nytt Nasjonalmuseum.

Selv om massene ikke tilfredsstiller kravene til det mineralske tettesjiktet i topptettingen for farlig avfall, kan massene trolig benyttes i bunntettingen i deponier for ordinært og inert avfall, da resultatene viser god bearbeidelighet, lav hydraulisk konduktivitet og komprimerbarhet. Materialet vil ligge mer beskyttet mot uttørking, frost og tele, og faren for krymping er mindre. Tilgjengelig materiale til bruk her er i tillegg mangelvare.

Det observeres også at materialene vil ha en bufringseffekt som kan føre til en nøytralisering av avfall med lav pH som befinner seg i deponiet, som for eksempel alunskifer. Det uttynnede pelematerialet har også en fordel ved at den ligger mer kompakt inntil avfallet sammenlignet med knust betong som er mer åpent og porøst. I tillegg tyder forsøkene på at mineralogien endrer seg lite eller ingenting etter uttynning noe som øker massenes nytteverdi.

Byggemateriale

Styrkeparameterne fra forsøkene viser en forbedring i materialet også etter uttynning fra å være ubrukbart ($s_u < 20\text{-}25$ kPa) til å være byggbart ($s_u > 40\text{-}50$ kPa). Dette øker muligheten for å benytte massene i for eksempel vegfyllinger, tomtfyllinger og støyvoller. Også komprimerbarheten har vist seg å være god, men dette vil avhenge av oppmalingen materialet gjennomgår før utlegging og komprimering. Hvorvidt massene kan benyttes som byggemateriale, må også avveies mot miljø og kostnader, men det er nå skaffet geotekniske data på pelematerialet som kan tas med videre.

6.2.2 Anleggsteknisk arbeid

For å kunne oppnå tilstrekkelig permeabilitet og komprimering av massene, er valg av utstyr, lagtykkelser og antall overfarer viktige faktorer. I tillegg vil formålet ved gjenbruk være av stor betydning for oppmalingsgrad av materialet. Uavhengig av hva slags materiale som skal komprimeres og legges ut, er oppmalingen av massen viktig for at den skal bli bearbeidelig og jevn. I denne oppgaven har prøvepelene blitt knust til et finmalt materiale ved hjelp av en hammer, men situasjonen ved utgraving fra byggegrøp vil representere utfordringer i en større skala. Som nevnt i kapittel 3.3 har de oppgravde massene fra Nytt Nasjonalmuseum gjennomgått flere omrøringer ved frakt og transport som har ført til at massene har oppnådd gode resultater ute i felt etter komprimering med tanke på permeabilitet.

6.3 Anbefalinger for videre arbeid

Da forsøksprogrammet ble definert tidlig høst 2016 var det usikkerhet knyttet til hvilke geotekniske egenskaper massene kunne oppnå, og forsøkene ble derfor bestemt ut fra økonomi, tilgjengelig tid og utstyr. I etterkant har det vist seg at massene oppnådde bedre resultater enn først forventet, og for å bygge opp under resultatene fra denne oppgaven bør det utføres supplerende forsøk i tillegg til å undersøke flere parametere.

6.3.1 Fryse- og svinnforsøk

I det opprinnelige forsøksprogrammet var det satt opp fryse- og svinnforsøk, men dette ble ikke gjennomført grunnet tid og økonomi. For å kunne trekke en konklusjon om hvordan massene påvirkes av uttørking samt fryse- og tinesykluser i jorda, bør dette undersøkes.

6.3.2 Treksielt trykkforsøk og ødometerforsøk

Det ble heller ikke utført treksielt trykkforsøk eller ødometerforsøk i denne oppgaven. Dette skyldes i hovedsak tid og økonomi, men også at massene oppnådde bedre resultater enn først antatt. Disse testene bør utføres for å undersøke styrkeparameterne ytterligere, og for å si noe om deformasjonsparameterne til materialet. Deformasjonsparametere er viktige for å kunne estimere eventuelle setninger i fyllinger lagt ut av dette materialet. Styrkeparametere er viktig for å vurdere bæreevnen. I tillegg må man kjenne styrken for å kunne si noe om helning på en stabil side- og topptetting.

6.3.3 Langtidseffekter av lagring

Selv om resultatene for permeabilitet var gode, ble ikke blandingen med η lik 25% undersøkt. Dette skyldtes blant annet økonomi, og det ble derfor konkludert at det var enklest å sammenligne to ulike leirtyper med samme dekningsgrad. Disse to materialene oppnådde gode resultater, men det er ønskelig å undersøke en dekningsgrad lik 25% da η ofte ligger nærmere dette. I tillegg bør pelene ha en herdetid på 1 år, 3 år og 5 år for å undersøke langtidseffektene av herdeprosessen.

6.3.4 Tilstrekkelig materiale

Som nevnt i kapittel 4.1.2 var det mangel på leirmateriale i uke 4 noe som førte til at det ble benyttet ulik leire i uttynningen. Dette har ført til et større antall variable og feilkilder enn ønsket.

6.3.5 Variasjon av parametere

I de utførte testene ble det satt begrensninger til hvilke parametere som skulle varieres. I ettertid ses det at dette burde vært variert i større grad for å finne den mest optimale uttynningen slik at massene eventuelt oppnår enda bedre egenskaper.

6.3.6 Skala

Et større testfelt bør testes ut på samme måte som på Langøya for å undersøke hvordan massene oppfører seg ved utlegging og komprimering. Da kan man også måle hvor mye komprimeringsarbeid som skal til i felt, og hvordan vær og temperatur virker inn på resultatene. Da Standard Proctor-testene ga noe lav tyngdetetthetsverdi i forhold til hva som kan oppnås med en tørrskorpeleire, vil det være av stor interesse å undersøke om massene må behandles før de legges ut eller bare komprimeres tyngre. Deretter kan det tas opp større prøver som kan testes for vanninnhold, densitet, permeabilitet etc. I store anleggsprosjekt er de stabiliserte pelene mye større og av en annen hardhet enn prøvepelene i denne oppgaven, og oppmalingsprosessen av materialet bør også undersøkes.

Bibliografi

- Aksnes, J. and Fladvad, M. (2014). Planlegging og utførelse av komprimeringsarbeid for ubundne materialer. Technical Report 284, Vegdirektoratet.
- Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., McDonald, E. V., Tyler, S. W., and Rock, S. A. (2006). Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11):1393–1403.
- Arm, M. (2014). Schaktmassor - Material- og funksjonskrav for ulike anvendingsområden. Optimass PM. Technical Report 1, Optimass.
- Askim, N. M. (2014). Massen er vanskelig å grave i. https://www.nrk.no/ostfold/_-massen-er-vanskelig-a-grave-i-1.11593268. Hentet: 27.02.2017.
- Avfall Sverige (2012). *Avfall Sveriges deponihandbok. Reviderad handbok för deponering som en del av modern avfallshantering*. Avfall Sverige, 1 edition.
- Baardvik, G. (2014). Permeabilitet i komprimert tørrskorpeleire 20 år etter utlegging. Technical Report 20100104-01-R, NGI - Norges Geotekniske Institutt.
- Baardvik, G., Okkenhaug, G., and Pabst, T. (2014). Deponiene på Langøya - Design av topptettingen. Technical Report 20110171-02-R, NGI - Norges Geotekniske Institutt.
- Bjerrum, L. (1954). Rapport over tørrskorpeleirens fysikalske egenskaper. Laboratorieundersøkelse. Technical Report F36-098, NGI - Norges Geotekniske Institutt.
- Carey, P. J. and Swyka, M. A. (2013). Design and placement considerations for clay and composite

- clay/geomembrane landfill final covers. *Landfill Closures: Geosynthetics, Interface Friction and New Developments*, 10:133–140.
- Cementa (2017). Informationsblad Multicem. <http://www.cementa.se/sv/Multicem>. Hentet: 17.03.2017.
- Daniel, D. E. (1989). In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(9):1205–1226.
- Daniel, D. E. (1993). Case histories of compacted clay liners and covers for waste disposal facilities. In *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, pages 1047–1425. University of Missouri–Rolla.
- Eek, E., Aarset, A., Valstad, T., Kalsnes, B., and Okkenhaug, G. (2013). Avslutning av Sydbruddet - sammenligning av våt og tørr løsning. Technical Report 20120689-01-TN, NGI - Norges Geotekniske Institutt.
- Emdal, A. (2014). *Introduksjon til geoteknikk*. Faggruppe for geoteknikk. NTNU.
- Engelsen, C. and Aarstad, K. (2016). *572.204 Sement. Typer, egenskaper og bruksområder*. SINTEF Byggforsk, 1 edition.
- EPA, U. E. P. A. (1989). Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure. <http://infohouse.p2ric.org/ref/17/16909.pdf>. Hentet: 16.03.2017.
- Gylland, A., Long, M., Emdal, A., and Sandven, R. (2013). Characterisation and engineering properties of Tiller clay. *Engineering Geology*, 164:86–100.
- Hansen, H. (2017a). Telefonsamtale om anleggstekniske utfordringer på Langøya. Muntlig samtale med anleggsleder Harald Hansen på Langøya, NOAH.
- Hansen, H. (2017b). Utlekking og komprimering av leirmasser på Langøya. Muntlig samtale med anleggsleder Harald Hansen på Langøya, NOAH.
- Helle, T. E. (2013). Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire. Technical Report 33, NVE.

- Hjellnes Consult AS (2015). Anbudstegning LA-204. Detaljsnitt 5. Nøytraldeponiet. Technical Report LA-204, NOAH AS.
- Instruments, O. (2017). Silicon Drift Detector (SDD) - X-Max. <https://www.oxford-instruments.com/products/microanalysis/energy-dispersive-x-ray-systems-eds-edx/eds-for-sem/sdd>. Hentet: 22.05.2017.
- Intro, E. (u.å.). Rollers. <http://www.engineeringintro.com/all-about-construction-equipments/rollers-types-of-roller-characteristics/>. Hentet: 28.03.2017.
- Jahren, P., Kjellsen, K., Jacobsen, S., Magerøy, H., Petkovic, G., Myren, S., and Reiersen, J. (2008). CO₂-utslipp - sement og betong. Utfordringer og perspektiver. Technical Report 1, Norsk betongforening.
- Janz, M. and Johansson, S.-E. (2001). Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering. Technical Report 9, Statens Geotekniska Institut.
- Klima- og miljøverndepartementet (2004). *Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (Avfallsforskriften)*. Lovdata, 1 edition.
- Koerner, R. M. (2012). Traditional vs. exposed geomembrane landfill covers. *Geosynthetics Magazine*, 30(5):34–41.
- Koerner, R. M. and Daniel, D. E. (1997). *Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps*. Thomas Telford.
- Larsson, R. (2008). Jords egenskaper. Technical Report 1, Statens Geotekniska Institut.
- Larsson, S., Dahlstrom, M., and Nilsson, B. (2005). Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study. *Ground Improvement*, 9(1):1–16.
- Løken, T. (1968). Kvikkleiredannelse og kjemisk forvitring i norske leirer. *Norwegian Geotechnical Institute, Oslo. Publication*, 75:19–26.

- Løken, T., Sørli, J., and Rudolph-Lund, K. (2004). Miljøriskovurdering av deponiene på Langøya. Technical Report 20031461-1, NGI - Norges Geotekniske Institutt.
- Miljøverndepartementet (2003). *Veileder til deponiforskriften*. Statens forurensningstilsyn, 2 edition.
- Miljødirektoratet (u.å.). Noregs miljømål. <http://www.miljostatus.no/nasjonale-mal/>. Hentet: 29.04.2017.
- Miljødirektoratet (2017). Spørsmål ang. antall deponier i Norge. Epost fra Rita Vigdis Hansen, Miljødirektoratet.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil Behavior*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- NGI (2010). PNN. Datarapport - Grunnundersøkelser. Technical Report 20100525-00-16-R, NGI - Norges Geotekniske Institutt.
- NGI (2016). Gjennomsnittlige kostnader for KS-peler fra alle tilbydere ved Nytt Nasjonalmuseum. Epost fra Gunvor Baardvik.
- NGU (2016). XRD-analyser. <https://www.ngu.no/fagomrade/xrd-analyser>. Hentet: 16.03.2017.
- NOAH (2016). Etterlyst: Tørrskorpeleire til Langøya. <http://www.noah.no/etterlyst-torrskorpeleire-langoya/>. Hentet: 25.05.2017.
- NOAH (2017). Behandlingssted Langøya. <http://www.noah.no/for-kunder/behandlingssted/langoya/>. Hentet: 28.02.2017.
- Norges Geologiske Undersøkelse (2015). Alunskifer og radonfare. <https://www.ngu.no/emne/alunskifer-og-radonfare>. Hentet: 28.02.2017.
- Norsk Geoteknisk Forening (2012). *Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler*. Norsk Geoteknisk Forening, 1 edition.

- Norsk Gjenvinning (u.å.). Hva kan deponeres på de ulike deponiene? <https://www.norskgjenvinning.no/tjenester/mottak-av-masser/viktig-aa-vite-om-masser/hva-kan-deponeres-paa-de-ulike-deponiene/>. Hentet: 06.03.2017.
- NVE (2017). NVE Atlas. <http://atlas.nve.no>. Hentet: 02.03.2017.
- Okkenhaug, G. and Pabst, T. (2016). Vurderinger av alternative tettematerialer til avrettingssjikt - KS leire. Technical Report 20110171-40-TN, NGI - Norges Geotekniske Institutt.
- Olivier, J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., and Peters, J. (2016). Trends in global CO₂ emissions: 2016 Report. Technical Report 2315, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Schanz, T. (u.å.). Grundlagen der Umweltgeotechnik: Deponietechnik - Deponientwurf. http://www.gbf.ruhr-uni-bochum.de/lehre/Vorlesung_Deponieentwurf.pdf. Hentet: 01.05.2017.
- Scheiber, M. and Schröder, H. (2014). Errichtung und Inbetriebnahme der Bauschuttdeponie Pfraundorf. <http://www.schotterwerk-h-geiger.de/docs/pfraundorfer-infotage-14-Bauschuttdeponie.pdf>. Hentet: 01.05.2017.
- Sentralbyrå, S. S. (2017). Sement - prosessutslipp. <https://www.ssb.no/statistikbanken/>. Hentet: 21.03.2017.
- Shanahan, P. (2004). 1.34 Waste Containment and Remediation Technology. Lecture 21 - Compacted soil liners. <https://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-34-waste-containment-and-remediation-technology-spring-2004/lecture-notes/lecture21.pdf>. Hentet: 07.03.2017.
- Standard, N. (1982a). *Geoteknisk prøving. Laboratoriemetoder. Konusflytegrensen*. Norsk Standard, 2 edition.
- Standard, N. (1982b). *Geoteknisk prøving. Laboratoriemetoder. Plastisitetsgrensen*. Norsk Standard, 2 edition.

- Standard, N. (1988). *Geoteknisk prøving. Laboriemetoder. Bestemmelse av udrenert skjærstyrke ved konusprøving*. Norsk Standard, 2 edition.
- Standard, N. (2014). *Geotekniske felt- og laboratorieundersøkelser. Laboratorieprøving av jord. Del 1: Bestemmelse av vanninnhold*. Norsk Standard, 2 edition.
- Standard, N. (2017). *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. Norsk Standard, 2 edition.
- Statens Vegvesen (2014a). *Feltundersøkelser. Håndbok R211*. Vegdirektoratet, 2 edition.
- Statens Vegvesen (2014b). *Håndbok N200. Vegbygging*. Vegdirektoratet, 2 edition.
- Statens Vegvesen (2014c). *Håndbok V221. Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger*. Vegdirektoratet, 2 edition.
- Vtech (u.å.). Gallery: Troxler, geocomp and HMP Magdeburger. <http://www.vtech-mte.com.au/gallery-1>. Hentet: 30.03.2017.
- Wangberg, C. (2016). Kvikkleireskred i Sørums kommunen fortsetter å bistå. <https://www.sorum.kommune.no/kvikkleireskred-i-soerum-kommunen-fortsetter-aa-bistaa.5926629-334220.html>. Hentet: 03.04.2017.
- Zeiss (2017). EVO MA with SmartSEM touch. <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/scanning-electron-microscopes/evo-materials.html>. Hentet: 22.05.2017.
- Åhnberg, H. (2006). Strength of Stabilised Soils. A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilised with Different Types of Binder. Technical Report 16, Statens Geotekniska Institut.
- Østlid, H. (1976). Geotekniske forhold ved bruk av tørrskorpeleire i vegfylling. Technical Report 683, Vegdirektoratet.

Vedlegg A

Resultater fra laboratorieundersøkelser

A.1 Rutineundersøkelser

Uke 0

Kvikkleire, start (før innblanding av bindemiddel)

Glass nr.	Total vekt, våt (g)	Total vekt, tørr (g)	Vekt glass (g)	Vanninnhold w (%)	Testdato	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
K1-0	95,48	69,29	2,14	39,0	17.okt	0	38,8
K2-0	126,26	91,33	2,16	39,1			
K3-0	95,95	69,94	2,15	38,3			

Utgangsmateriale (kvikleire) til utblanding etter fire uker

Fra NGI	Dybde (m)	Vanninnhold w (%)	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
Rv 23	4,7	36,3	0	37,0
	5,15	30,0		
	5,54	33,0		
Ingeborgrud P5	4,69	48,9	0	32,8
Kvikkleireskred, Sørums (K-0-0-C)		32,6 33,0		

Bløt leire, start (før innblanding av bindemiddel, og til uttynning uke 4 og 12)

Glass nr.	Total vekt, våt (g)	Total vekt, tørr (g)	Vekt glass (g)	Vanninnhold w (%)	Testdato	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
B1-0	125,92	90,55	2,14	40,0	17.okt	0	40,1
B2-0	115,73	82,78	2,15	40,8			
B3-0	100,72	72,78	2,16	39,5			

KVIKLEIRE + BINDEMIDDEL (like etter innblanding)

Glass nr.	Total vekt, våt (g)	Total vekt, tørr (g)	Vekt glass (g)	Vanninnhold w (%)	Testdato	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
K1	60,86	45,83	2,14	34,4	19.okt	0	34,2
K2	43,63	33,01	2,15	34,4			
K3	48,34	36,61	2,16	34,0			
K4	44,65	33,82	2,17	34,2			
K5	39,91	30,33	2,16	34,0			
K6	45,37	34,37	2,14	34,1			
K7	48,87	36,94	2,15	34,3			
K8	47,99	36,25	2,17	34,4			

BLØT LEIRE + BINDEMIDDEL (like etter innblanding)

Glass nr.	Total vekt, våt (g)	Total vekt, tørr (g)	Vekt glass (g)	Vanninnhold w (%)	Testdato	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
B1	23,78	18,01	2,16	36,4	20.okt	0	37,9
B2	20,17	15,38	2,17	36,3			
B3	38,31	26,68	2,14	47,4			
B4	35,00	26,26	2,15	36,3			
B5	48,52	36,33	2,14	35,7			
B6	55,18	41,29	2,15	35,5			

Figur A.1: Vanninnhold uke 0

MÅLINGER PÅ LEIRE FRA NYTT NASJONALMUSEUM					
Nytt nasjonalmuseum		Dybde (m)	Vanninnhold (%)	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
27B (fra rapport)	Vanninnhold før innblanding av bindemiddel	5,15	43,0	0	43
27 (fra rapport)		5,1	46,0	0	48,5
		5,55	51,0		
27B (fra oppsummering)	Vanninnhold i pelar, 2 uker herdetid		34,3	0	34,3
			34,3		
KS-leire 1 fra Langøya			29,7		
KS-leire 2 fra Langøya	Vanninnhold i utlagt materiale		26,1	> 1 år	27,3
KS-leire 3 fra Langøya			26,1		

Figur A.2: Målinger av vanninnhold gjort på materiale fra Nytt Nasjonalmuseum

Uke 4

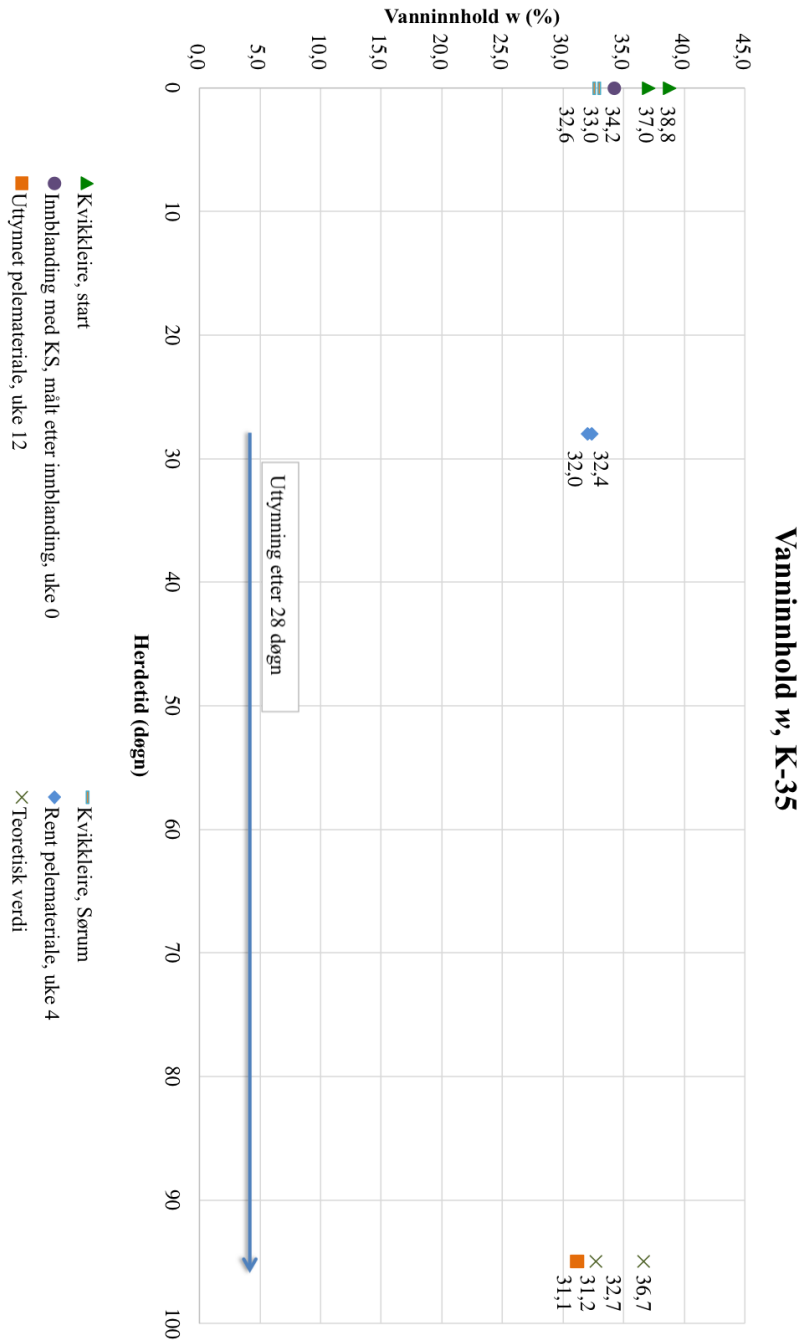
Blanding	Total vekt, våt (g)	Total vekt, tørr (g)	Vekt glass (g)	Vanninnhold w (%)	Testdato	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
PELER, ENAKS BLØT	32,91	25,06	2,14	34,2	15.nov	27	34,0
	43,04	32,73	2,16	33,7			
PELER, ENAKS KVIKK	32,86	25,34	2,16	32,4	15.nov		32,2
	48,72	37,43	2,16	32,0			
K-35-1	43,30	34,89	2,17	25,7	16.nov	28	28,8
	35,47	28,64	2,14	25,8			
	54,62	41,96	2,16	31,8			
	49,42	38,00	2,14	31,8			
B-35-1	79,84	59,30	2,18	36,0	17.nov	29	35,8
	68,61	51,16	2,15	35,6			
B-35-1	80,67	61,67	2,17	31,9	18.nov	30	31,9
	68,33	52,33	2,18	31,9			
K-25-1	66,98	51,43	2,14	31,5	18.nov	29	31,3
	78,97	60,59	2,16	31,5			
	76,32	58,83	2,15	30,9			

Figur A.3: Vanninnhold uke 4

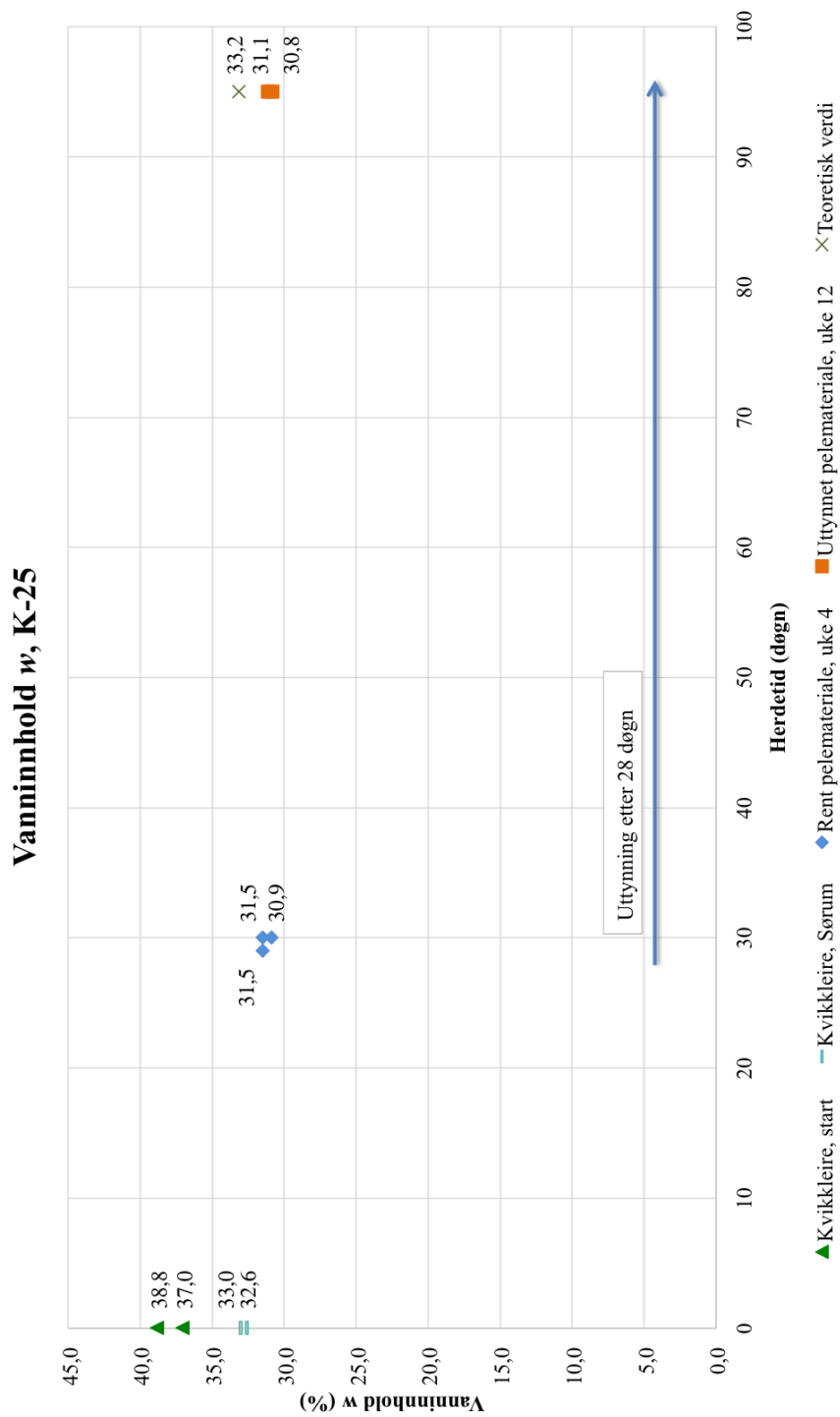
Uke 12

Blanding	Total vekt, våt (g)	Total vekt, tørr (g)	Vekt glass (g)	Vanninnhold w (%)	Testdato	Herdetid (døgn)	Gjennomsnittlig verdi (%)
B-35-4	71,25	53,78	2,13	33,8			32,5
	84,49	64,98	2,16	31,1			
K-35-4	81,52	62,71	2,14	31,1	20.feb	95	31,2
	80,88	62,14	2,12	31,2			
K-25-4	81,52	62,71	2,14	31,1			31,0
	85,09	65,57	2,16	30,8			
Sørumleire (K-0-0-C)	99,00	75,18	2,15	32,6	21.feb	0	32,8
	113,31	85,74	2,13	33,0			
Ny batch (K-35-0 og K-25-0)	68,20	52,11	2,13	32,2	22.feb		32,2
	93,40	72,92	2,15	28,9	22.feb		28,9

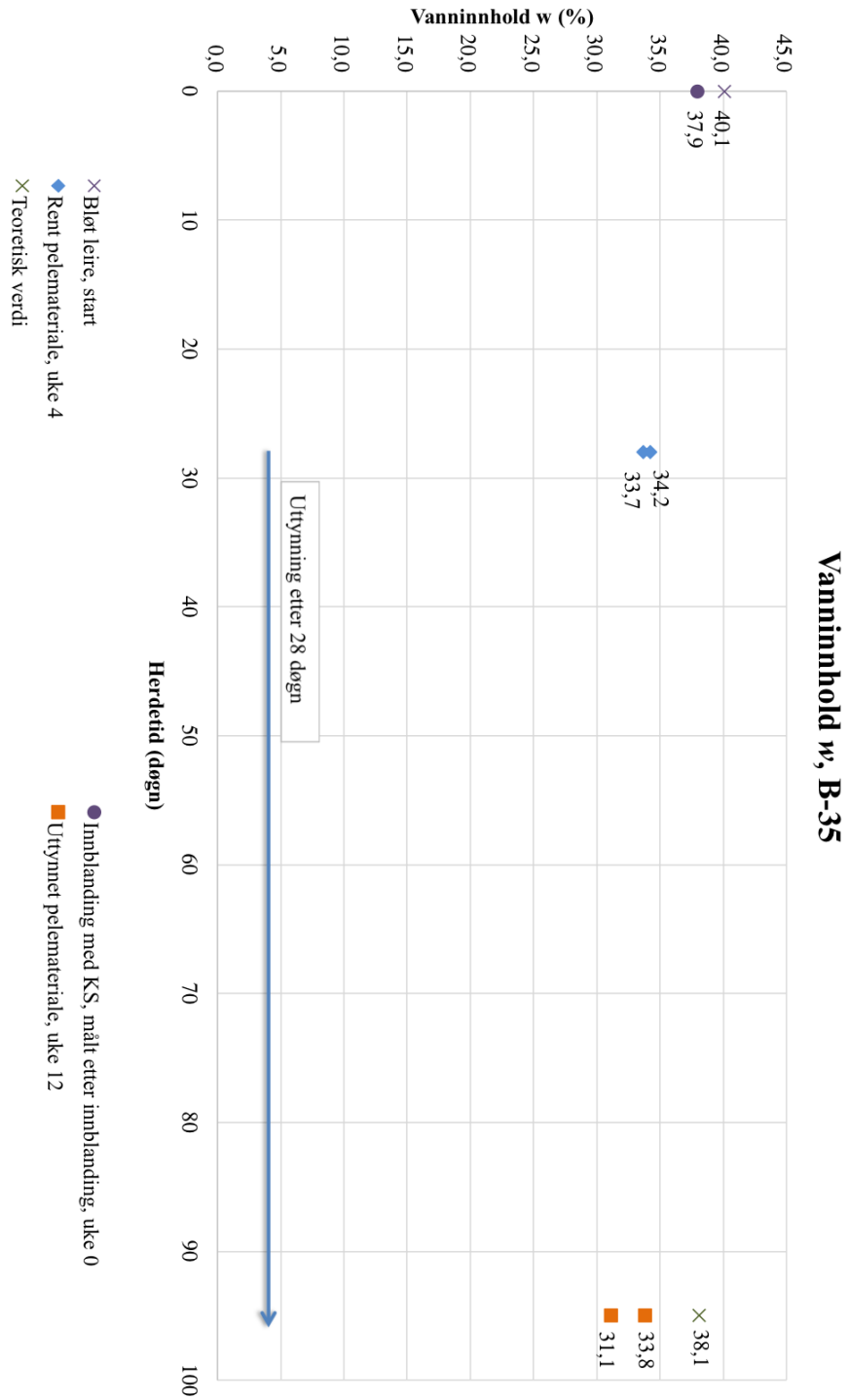
Figur A.4: Vanninnhold uke 12



Figur A.5: Vanninnhold for K-35



Figur A.6: Vanninnhold for K-25



Figur A.7: Vanninnhold for B-35

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT																
Journal for bestemmelse av w_p - w_L - LJ002																
etter NS 8002 og NS 8003																
Machostri, HD Users emmicharistekrisensen, D:\Droptbox\Klasteroppgave 1.pdf						Brukeren fyljer ut de grå feltene, resultatet kommer fram som røde felt. De hvite feltene. Verdier for konsistensikk skal ligge mellom 7 mm og 14,9 mm. Vekt (GI)0250 eller vekt med høykvalitet luede emn 0,1% av prøvens masse, skal benyttes. Krav til resultater: Forskjellen mellom vanninnholdsprosent skal være: <= 2 når middelveien <= 40%, eller <= 0,05 middelveien når denne er > 40%.										
Mail: H:\Regneark\Indek\wpw\klix						Ansvarlig: MAS										
Date/Rev.nr.: 2016-09-13\35						Kontrollert: GS										
Dato	Flytegrense (w_L)	Utrullgrense (w_p)	Flytegrense (w_L)	Utrullgrense (w_p)	Flytegrense (w_L)	Utrullgrense (w_p)	Flytegrense (w_L)	Utrullgrense (w_p)	Flytegrense (w_L)	Utrullgrense (w_p)						
Jobb nr.	23.02.17	20110171	24.02.17	20110171	24.02.17	20110171	24.02.17	20110171	24.02.17	20110171						
Boring	K-25-0	K-25-0	K-35-0	K-35-0	K-35-4	K-35-4	K-35-4	K-35-4	K-35-4	K-35-4						
Tube	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl	Kvikkl						
Part	Ny batch	Ny batch	Ny batch	Ny batch	Restler, enaks	Restler, enaks	Restler, enaks	Restler, enaks	Restler, enaks	Restler, enaks						
Test																
Dybde																
Siktet vekk > 0,4 mm?	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei						
På grensen til å sikte vekk?	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei						
Uforst konsus > 100 kPa	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja						
Kvikkleire?	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei						
Fakturert forsøker?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
Sign. til operatør	EOK	EOK	EOK	EOK	EOK	EOK	EOK	EOK	EOK	EOK						
Glass nr.	35	37	38	39	64	65	66	67	19	21	22	23	56	57	58	59
Total vekt, våt (g)	89,33	90,67	68,70	67,84	85,09	85,42	65,52	70,24	80,91	81,51	68,16	67,17	79,88	82,63	68,52	66,69
Total vekt, tørr (g)	77,87	79,30	66,15	65,20	74,42	74,54	62,00	66,80	72,57	72,31	64,65	63,35	71,24	71,60	64,09	62,11
vekt vann	11,462	11,366	2,557	2,639	10,671	10,874	3,517	3,439	8,342	9,203	3,51	3,82	8,638	11,029	4,432	4,575
vekt glass	55,163	56,524	56,671	56,382	54,843	54,75	51,487	57,321	57,782	55,503	54,327	52,491	54,859	50,761	52,827	50,316
Vekt tørr pr.	22,705	22,781	9,476	8,818	19,576	19,794	10,513	9,479	14,788	16,805	10,326	10,858	16,383	20,838	11,261	11,794
Vanninnhold (%)	50,5	49,9	27,0	29,9	54,5	54,9	33,5	36,3	56,4	54,8	34,0	35,2	52,7	52,9	39,4	38,8
Konuss innt. (mm)	8,0	8,0			9,3	9,4			9,8	10,0			7,5	7,7		
Korrigert vanninnhold (%)	54,44	53,78			56,09	56,08			56,77	54,76			58,46	57,84		
Flytegrense, w_L	54,11				56,09				55,77				58,15			
Utrullgrense, w_p	8,0	8,0	28,46		9,3	9,4	34,87		9,8	10,0	34,59		7,5	7,7		39,07
Kontroll av resultater:	Oppfyller krav	Ny test må utføres	Oppfyller krav	Ny test må utføres	Oppfyller krav	Ny test må utføres	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav

Figur A.9: w_p - w_L forsøk uke 8. Resultat for K-35-4 og K-25-4, og nye batcher for K-35-0 og K-25-0. Disse forsøkene ble utført på nytt da kravet til forskjell i vanninnhold skal være mindre eller lik 2.

NORGES GEOTEKNIKSKE INSTITUTT Journal for bestemmelse av $W_L + W_P$ etter NS 8002 og NS 8003		Brukeren fyller ut de grå felter. Resultater kommer fram som røde felle tall i de hvite felter. Verdier for konsimptikk skal ligge mellom 7 mm og 14,9 mm. Vekt NCI 0280 eller vekt med nøyaktighet bedre enn 0,1% av prøvens masse, skal benyttes. Krav til resultater: Forskjellen mellom to vanninnholdsprosent skal være <= 2 når middelveiden <= 40%, eller <= 0,05 middelveiden når denne er > 40%.										Mail: H:\Regneark\index\wpwi.xlsx Ansvarlig: MAS Dato/Rev.nr.: 2016-09-13/35 Kontrollert: GS	
Dato	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_P)	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_P)	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_P)	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_P)	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_P)	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_P)	
	08.03.17		08.03.17										
Job. nr.	20110171		20110171									20110171	
Boring	K-35-0		K-35-0										
Tube	Kvikk		Kvikk										
Part	Ny batch		Ny batch										
Test	Nytt forsøk		Nytt forsøk										
Dybde													
Siktet vekt > 0.4 mm?	Nei		Nei									nei	
På grensen til å sikte vekk?	Nei		Nei									nei	
Uforst. konsus > 100 kPa	Ja		Ja									nei	
Kvikkleire?	Nei		Nei									ja/nei	
Fakturerert forsøket?	-		-									-	
Sign. til operatør	ECK		ECK									ECK	
Glass nr.	35	37	64	65	66	67							
Total vekt, våt (g)	89,33	90,67	69,27	85,42	64,12	70,02							
Total vekt, tørr (g)	77,87	79,30	66,36	66,02	74,42	66,73							
vekt vann	11,462	11,366	3,31	3,25	10,671	3,3	3,29						
Vekt glass	55,163	56,521	56,671	56,382	54,843	51,487	57,321						
Vekt tørr pr.	22,705	22,781	9,69	9,64	19,576	9,33	9,41						
Vanninnhold (%)	50,5	49,9	34,2	33,7	54,5	54,9	35,4	35,0					
Konus inntr. (mm)	8,0	8,0		9,3	9,4								
Korrigert vanninnhold (%)	54,44	53,78		56,09	56,08								
Flytegrense, W_L	54,11			56,09									
Utrull_grense, W_P	8,0	8,0	33,94	9,3	9,4	35,17							
Kontroll av resultater:	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav							
												Feil verdi	
												Feil verdi	

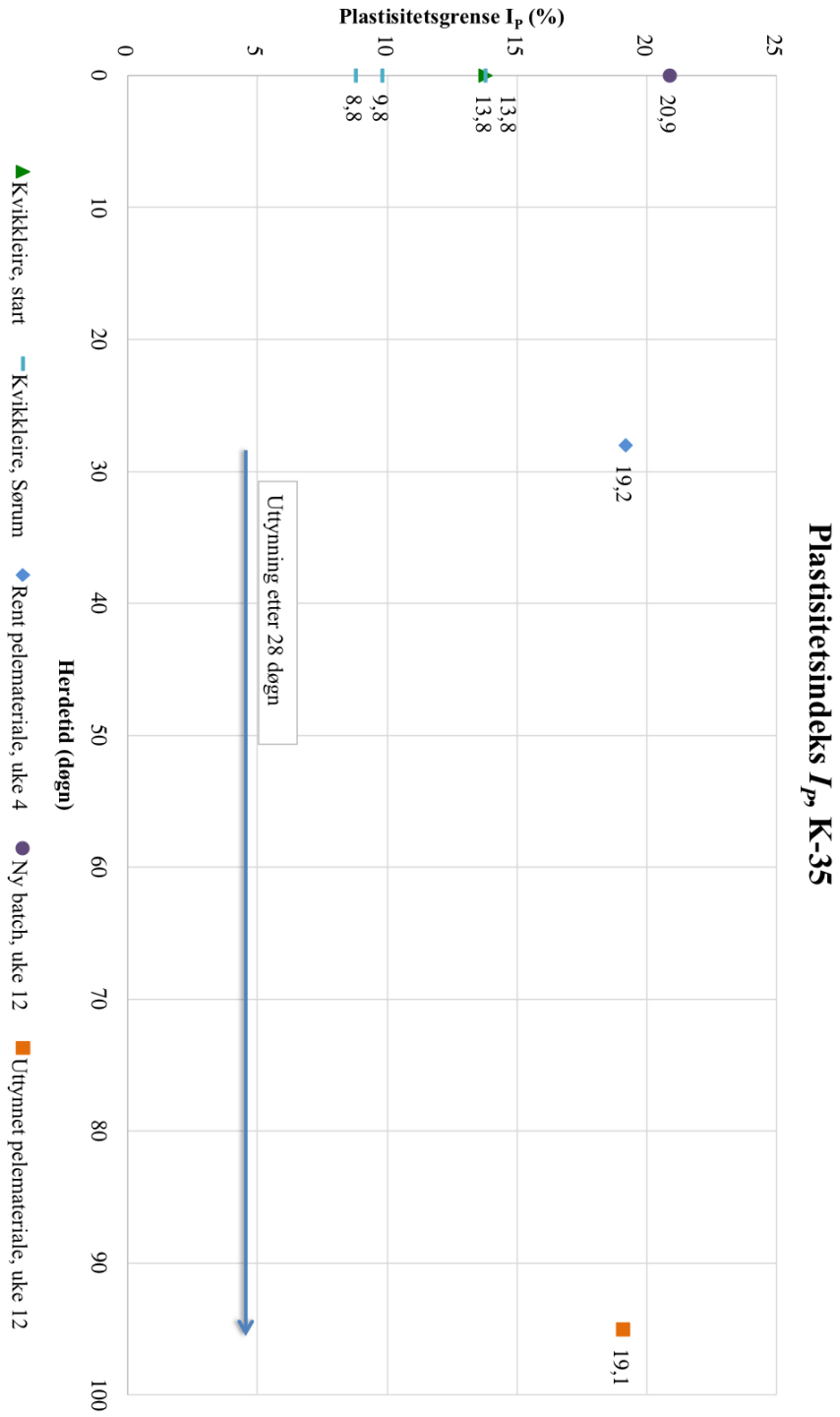
Figur A.10: $w_P - w_L$ forsøk uke 8. Resultat for K-35-0 og K-25-0, nye forsøk. Disse forsøkene ble utført på nytt da kravet til forskjell i vanninnhold skal være mindre eller lik 2.

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT											
Journal for bestemmelse av W_L + W_p											
etter NS 8002 og NS 8003											
Brukeren fyller ut de grå feltene, resultater kommer fram som røde felt. I de hvite feltene verdier for konsistensikk skal ligge mellom 7 mm og 14,9 mm. Vekt (N/G) (250 eller vekt med høyaktigst bette enn 0,1% av prøvens masse, skal benyttes. Krav til resultater: Føskjellen mellom to vanninnholdsprosent skal være: <= 2 når middelveien <= 40%, eller <= 0,05 middelveien når denne er > 40%.											
Machintosh HD:Users\emmanh\dat\eksrsen\Diagnose\Klasteroppgave 1.pdf											
Dato	Flyegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)	Flyegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)	Flyegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)	Flyegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)	Flyegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)	Kontrollert:
	08.03.17		08.03.17		08.03.17		08.03.17		08.03.17		GS
Job. nr.	20110171		20110171		20110171		20110171		20110171		
Borring	K-35-1		B-35-1		B-35-1		B-35-1		B-35-1		
Tilbe	Kvikkl		Bløt		Bløt		Bløt		Bløt		
Part	Restler: enaks		Restler: enaks		Restler: enaks		Restler: enaks		Restler: enaks		
Test											
Dybde											
Siktet vekk > 0,4 mm?	Nei		Nei		Nei		Nei		Nei		
På grensen til å sikte vekk?	Nei		Nei		Nei		Nei		Nei		
Uforst: konsus > 100 kPa	Ja		Ja		Ja		Ja		Ja		
Kvikkleire?	Nei		Nei		Nei		Nei		Nei		
Fakturert forsøket?	-		-		-		-		-		
Sign. til operatør	ECK		ECK		ECK		ECK		ECK		
Glass nr.	19	21	22	23	35	37	38	39			
Total vekt, våt (g)	83,31	79,43	65,95	64,77	85,55	81,75	68,69	68,90			
Total vekt, tørr (g)	74,04	70,86	62,89	61,55	75,41	73,35	65,45	65,57			
vekt vann	9,27	8,57	3,06	3,22	10,14	8,4	3,24	3,33			
Vekt glass	57,782	55,503	54,327	52,491	55,163	56,521	56,671	56,382			
Vekt tørr pr.	16,26	15,36	8,56	9,06	20,25	16,83	8,78	9,19			
Vanninnhold (%)	57,0	55,8	35,7	35,5	50,1	49,9	36,9	36,2			
Konsus innt. (mm)	11,2	10,7			8,0	7,9					
Korrigert vanninnhold (%)	55,06	54,62			53,98	54,20					
Flyegrense, W_L	54,84				54,09						
Utrull. grense, W_p	11,2	10,7	35,64		8,0	7,9	36,57		Feil verdi	Feil verdi	
Kontroll av resultater:	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	

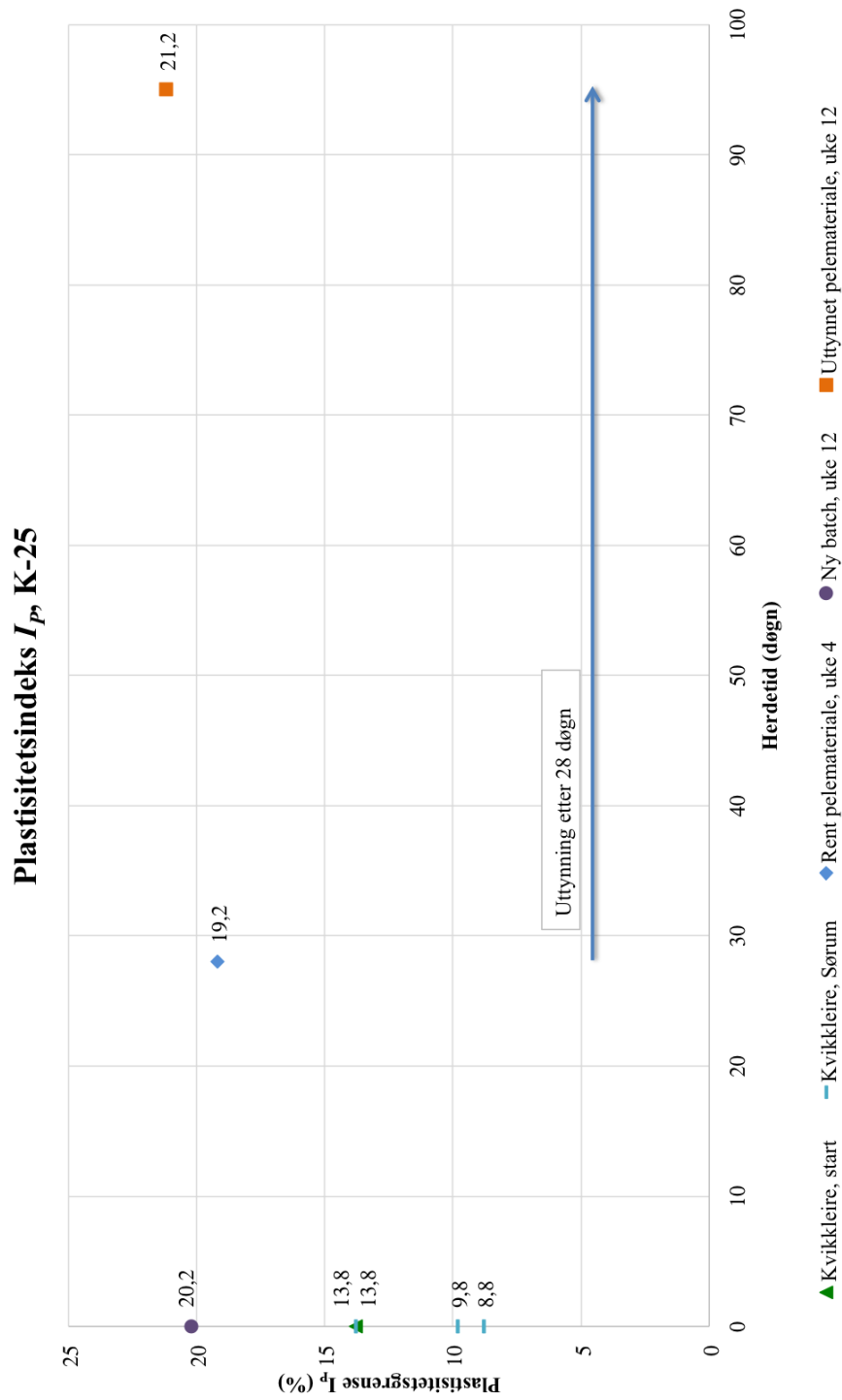
Figur A.11: W_p - W_L forsøk uke 8. Resultat for K-35-4 og B-35-4.

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT Journal for bestemmelse av W_L + W_p etter NS 8002 og NS 8003		Brukeren fyller ut de grå feltene, resultater kommer fram som røde felt tall i de hvite feltene. Verdier for konsusitrykk skal ligge mellom 7 mm og 14,9 mm. Vekt NGI 0280 eller vekt med nøyaktighet bedre enn 0,1% av prøvens masse, skal benyttes. Krav til resultater: Forskjellen mellom to vanninnholdsprosent skal være: <= 2, når middeverdien <= 40%, eller <= 0,05 middeverdien når denne er > 40%.		Mail: H:\Regneark\Index\wpw\l.xls Ansvarlig: MAS Dato/Rev.nr.: 2016-09-13/35 Kontrollert: GS		
Dato	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)	Flytegrense (W_L)	Utrull-grense (W_p)
06.03.17	20110171	20110171	20110171	20110171	20110171	20110171
Job. nr.	B-35-4	Bløt	Restler, enaks			
Boring						
Tube						
Part						
Test						
Dybde						
Siktet vekt > 0.4 mm?	Nei	nei	nei	nei	nei	nei
På grensen til å sikte vekt?	Nei	nei	nei	nei	nei	nei
Uforst. konus > 100 kPa	Ja	nei	nei	nei	nei	nei
Kvikkleire?	Nei	ja/nei	ja/nei	ja/nei	ja/nei	ja/nei
Fakturert forsøket?	-					
Sign. til operatør	ECK					
Glass nr.	160	163	164	168		
Total vekt, våt (g)	78,08	76,86	65,61	64,55		
Total vekt, tørr (g)	66,85	65,79	62,61	61,53		
vekt vann	11,23	11,07	3	3,02		
Vekt glass	45,591	44,555	53,628	52,351		
Vekt tørr pr.	21,259	21,235	8,98	9,18		
Vanninnhold (%)	52,8	52,1	33,4	32,9		
Konus innt. (mm)	8,6	8,3				
Korrigert vanninnhold (%)	55,75	55,64				
Flytegrense, W_L	55,70					
Utrull. grense, W_p	8,6	8,3	33,15		Feil verdi	Feil verdi
Kontroll av resultater:	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav	Oppfyller krav

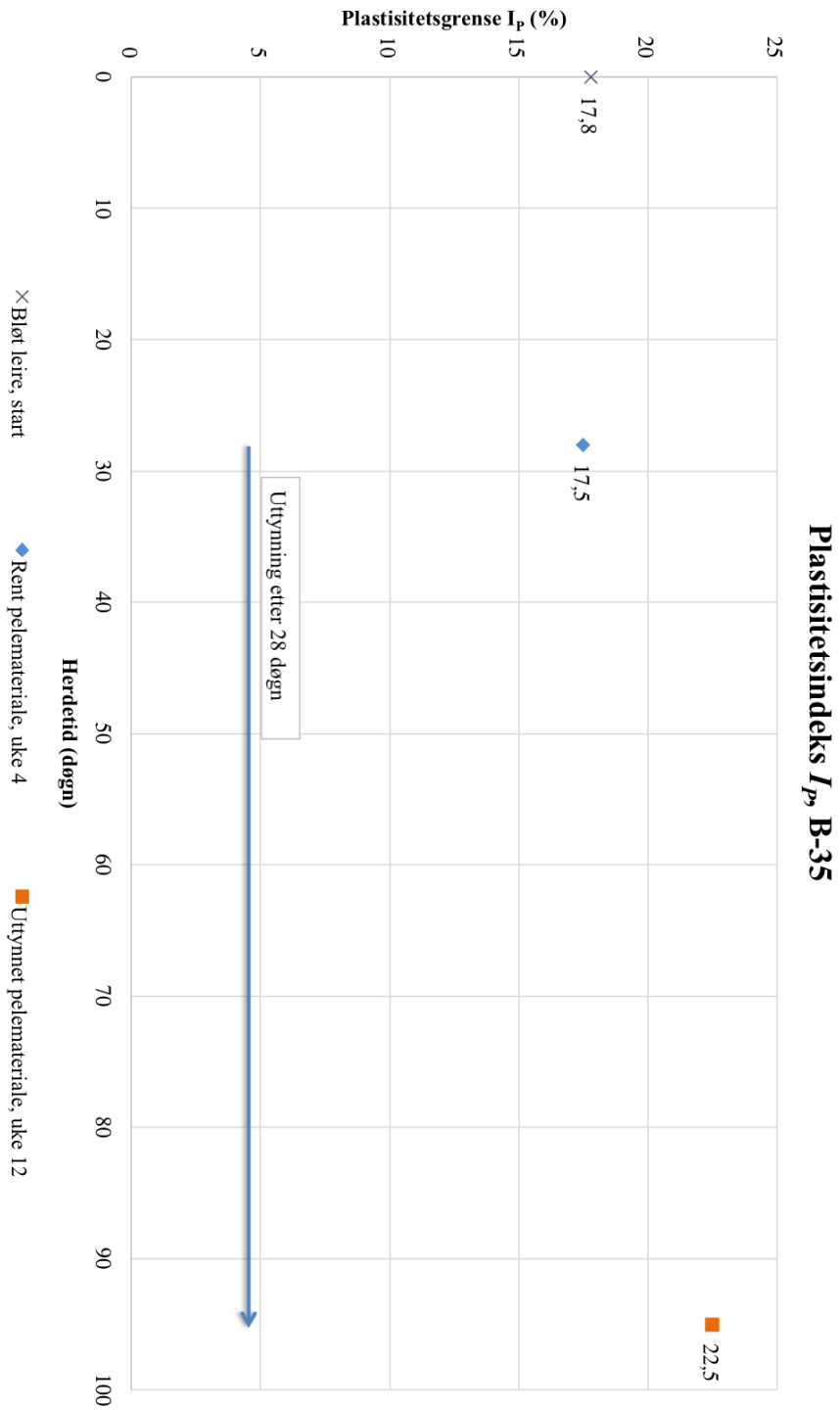
Figur A.12: w_p - w_L forsøk uke 8. Resultat for B-35 uke 12



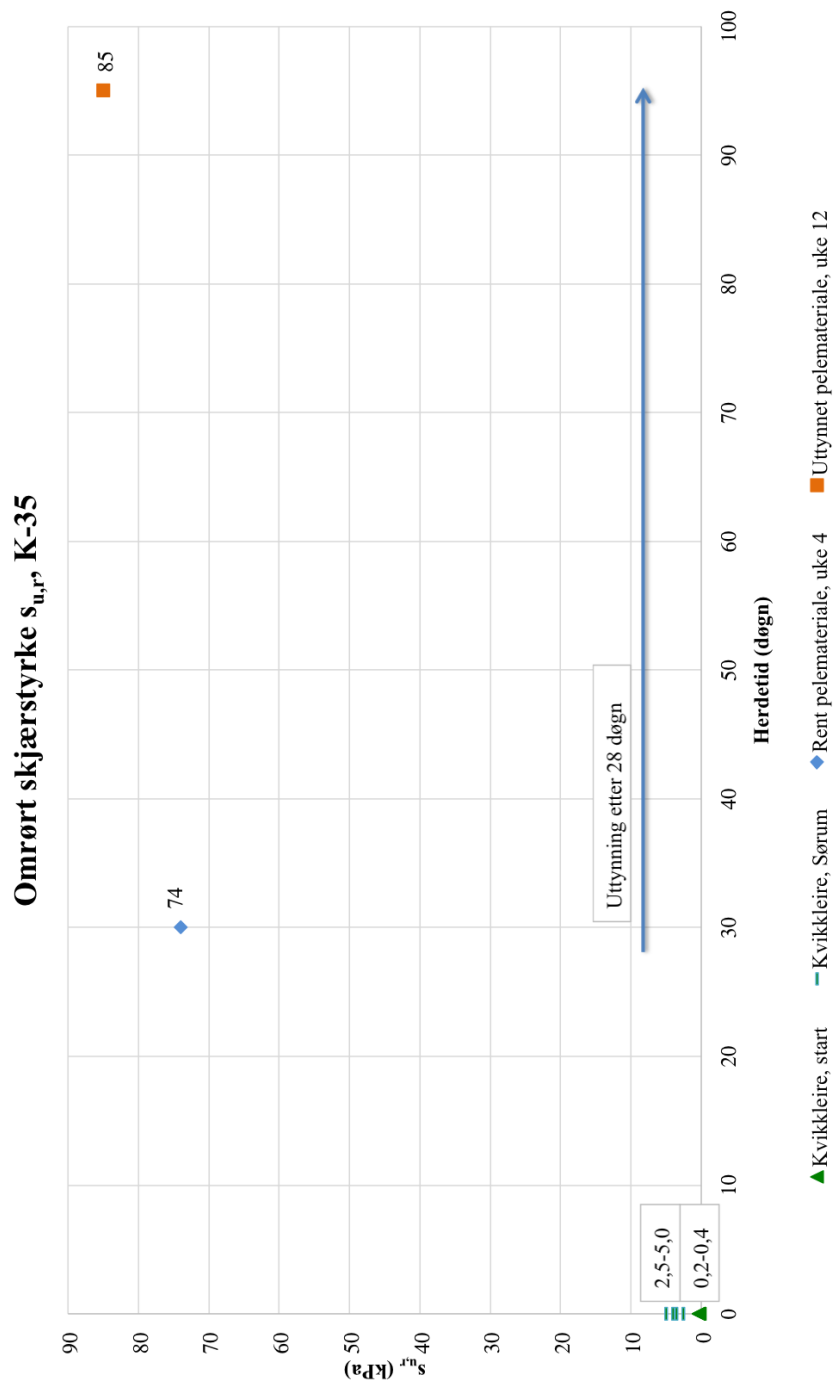
Figur A.13: Resultat fra plastisitetforsøk, K-35 samlet



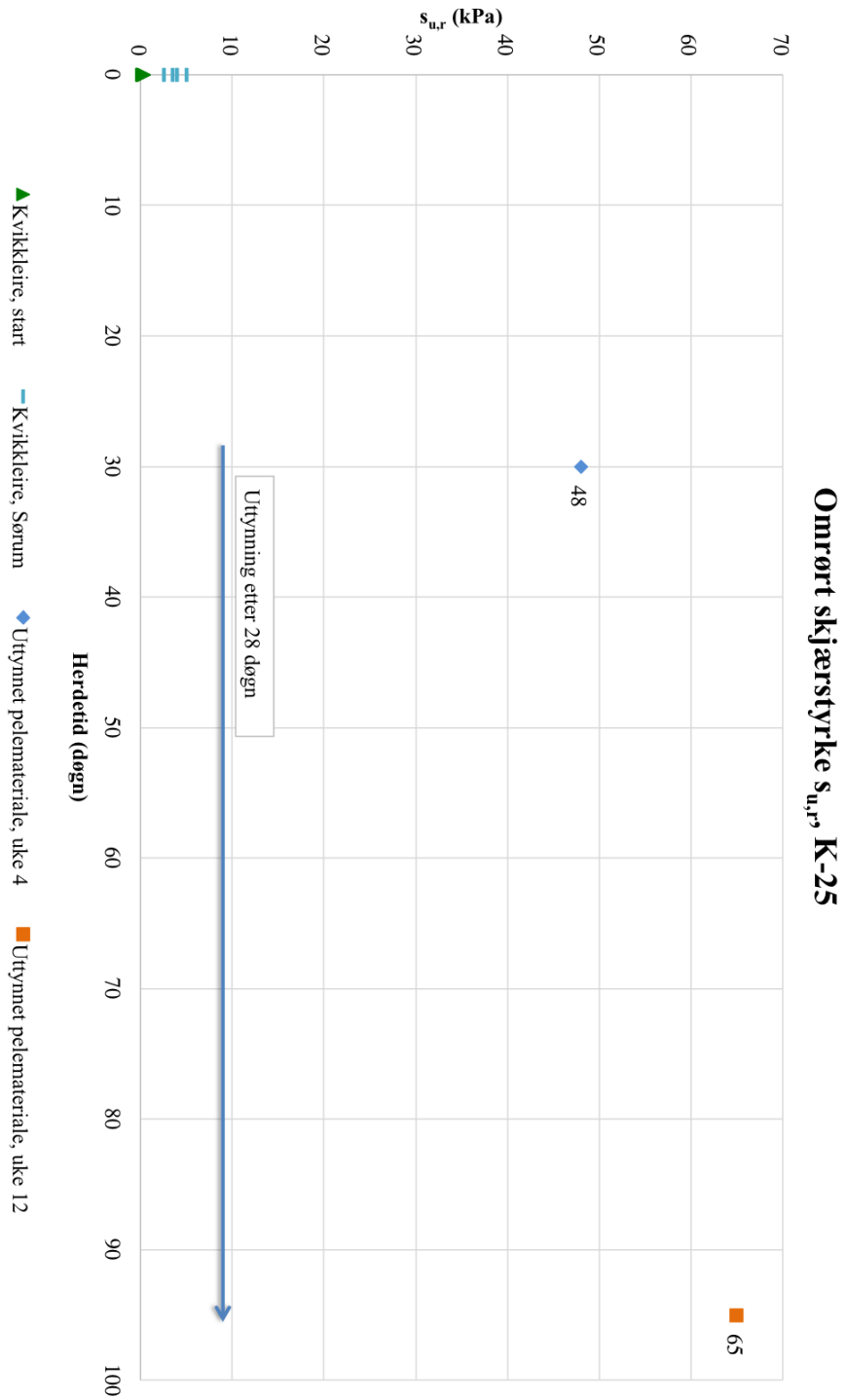
Figur A.14: Resultat fra plastisitetforsøk, K-25 samlet



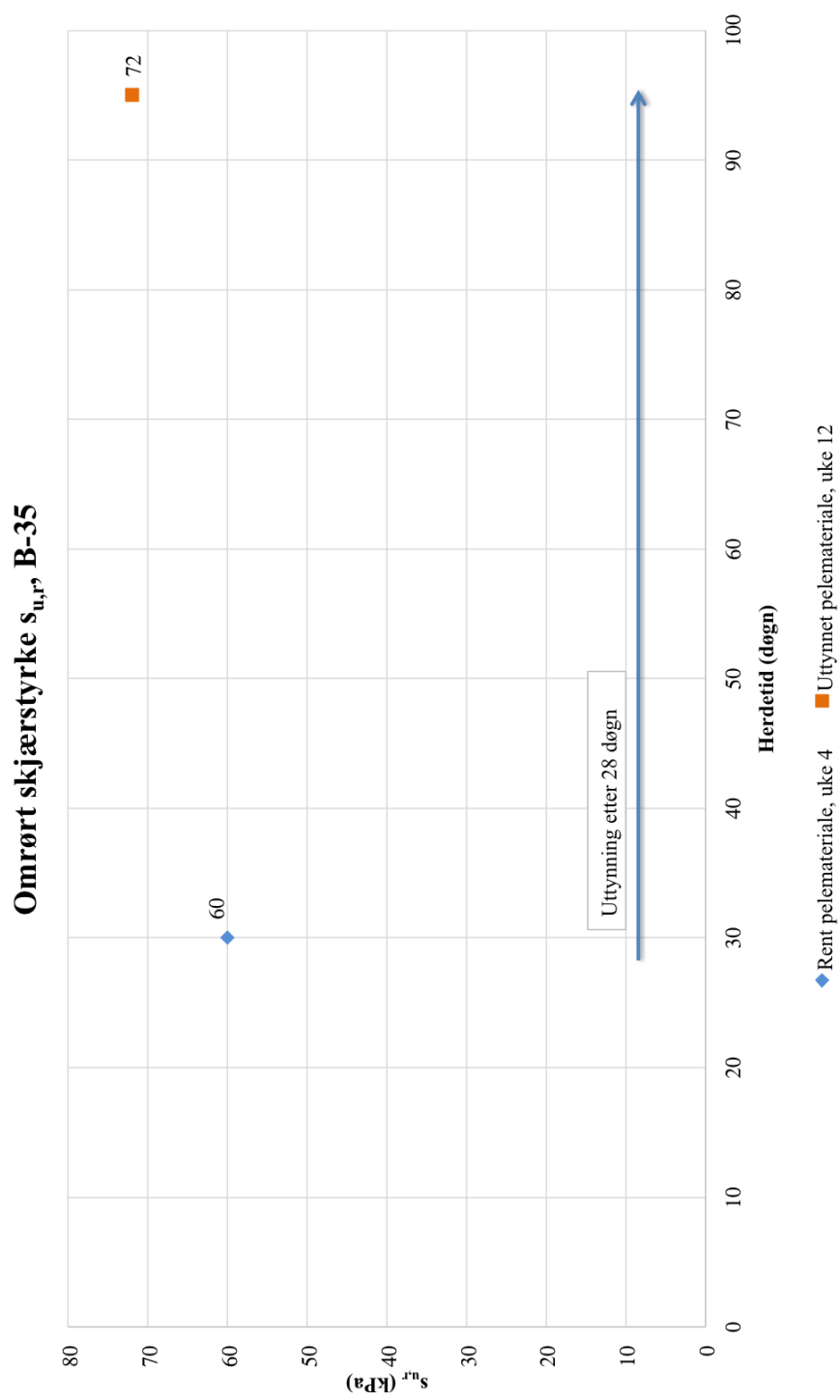
Figur A.15: Resultat fra plastisitetstforsøk, B-35 samlet



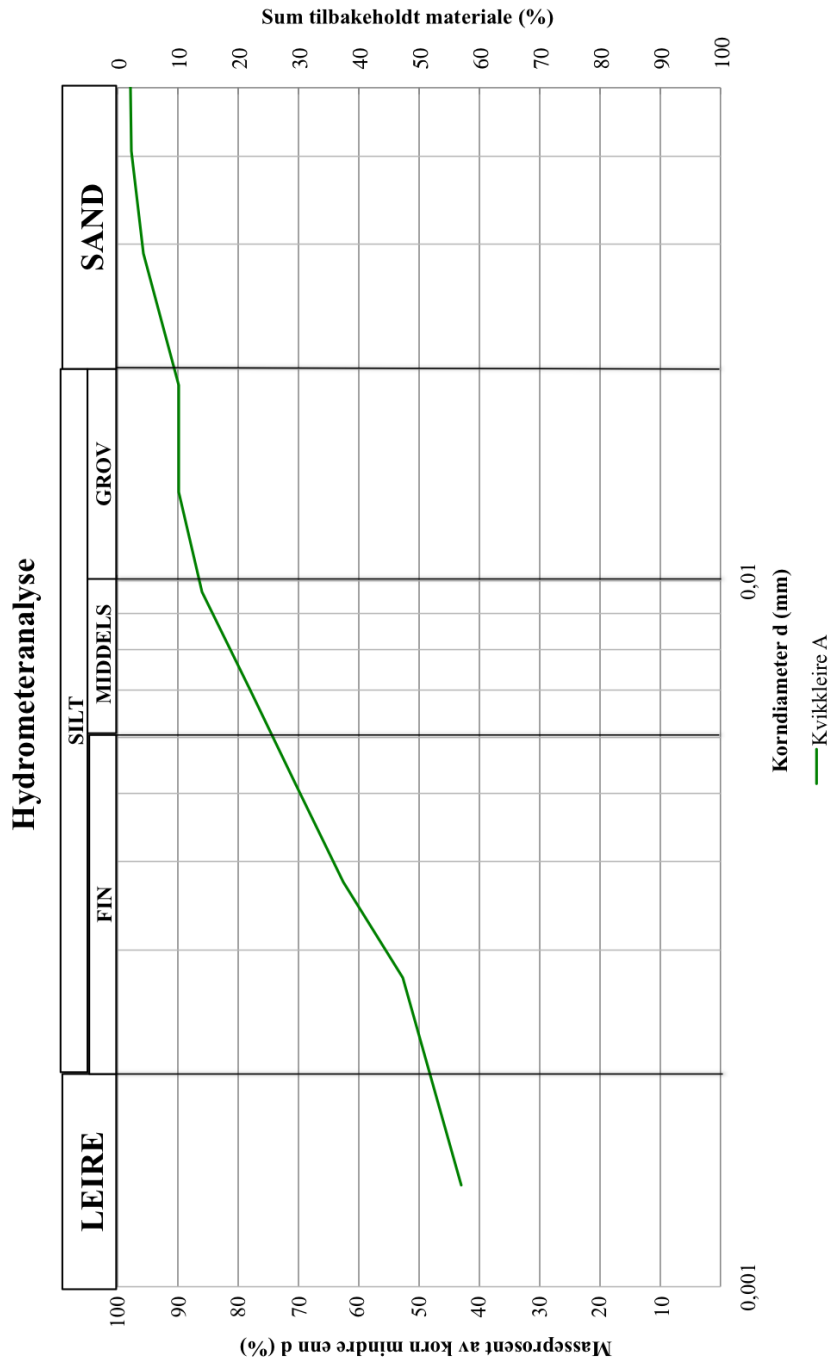
Figur A.16: Omrørt skjærstyrke, konusforsøk. Plott for K-35



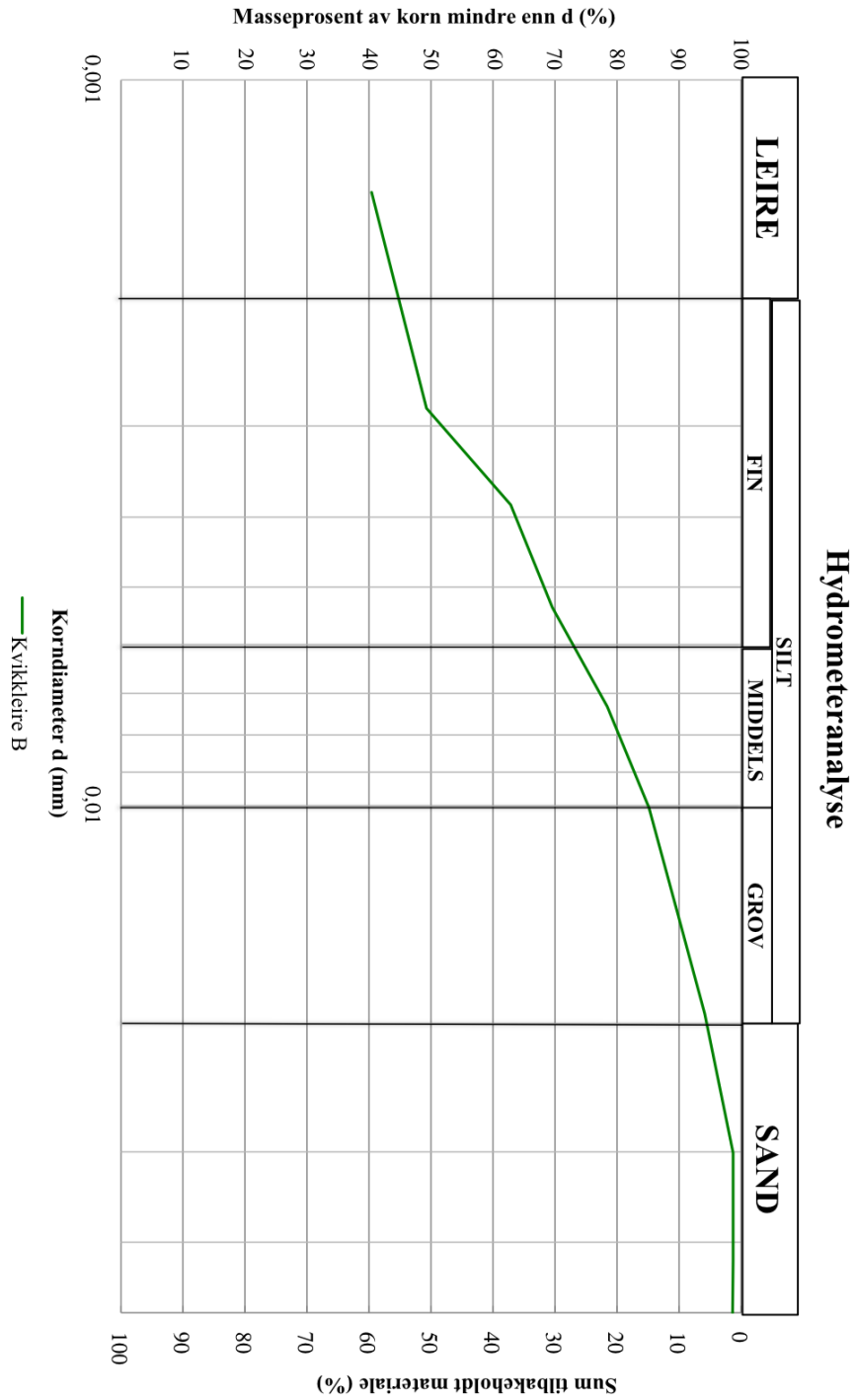
Figur A.17: Omrørt skjærstyrke, konusforsøk. Plott for K-25



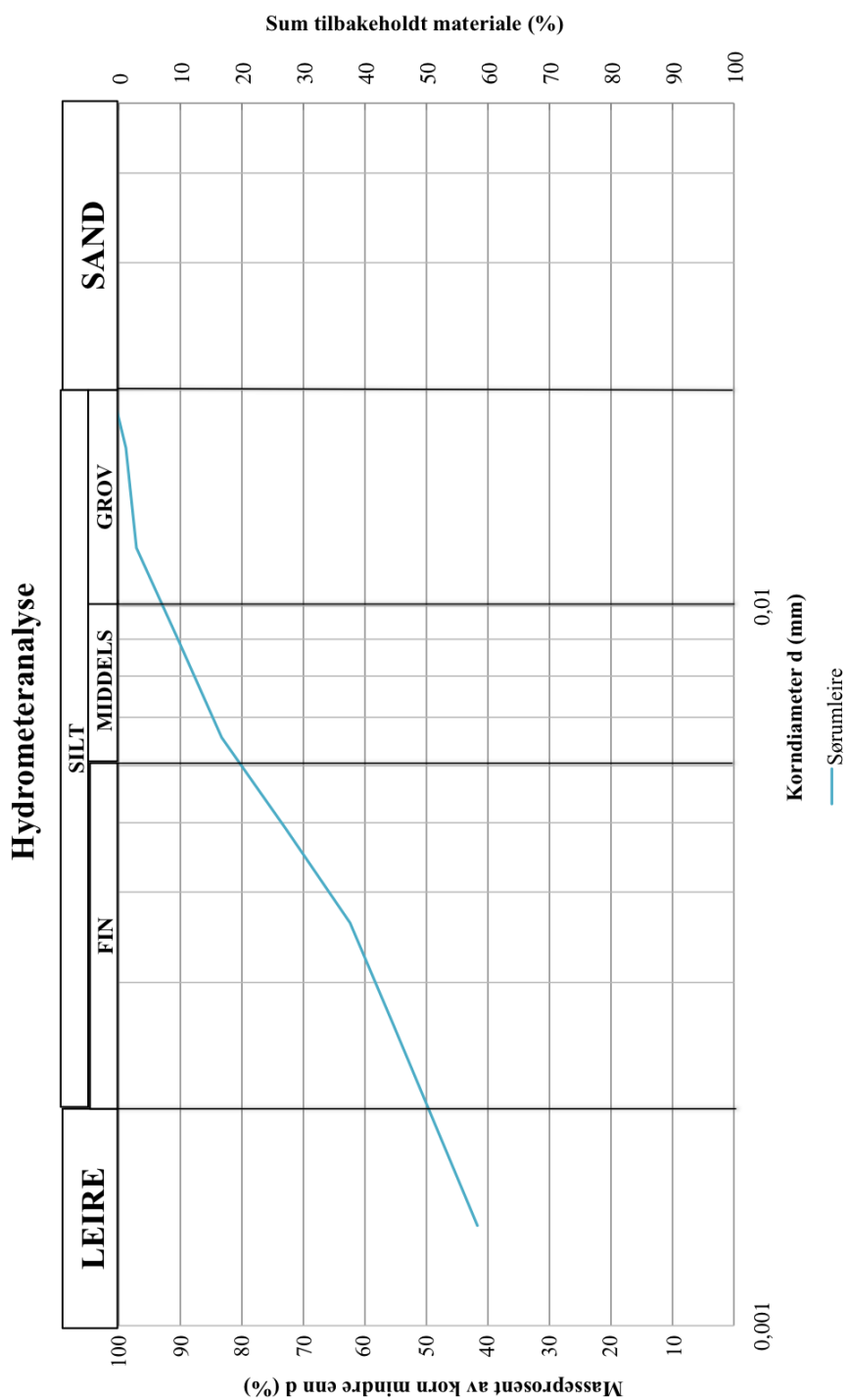
Figur A.18: Omrørt skjærstyrke, konusforsøk. Plott for B-35



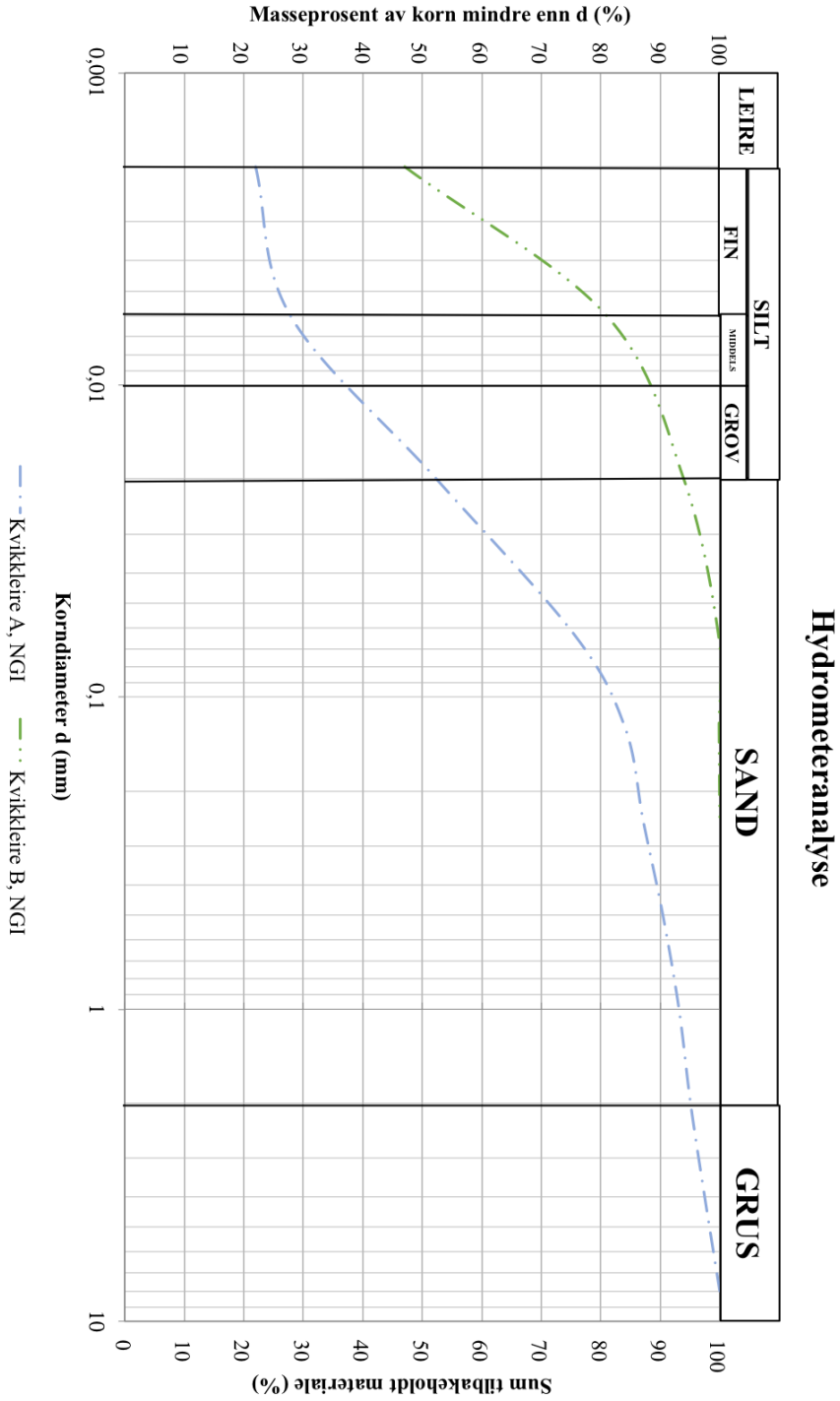
Figur A.19: Hydrometeranalyse. Plott for ren kvikkleire, K-0-0-A



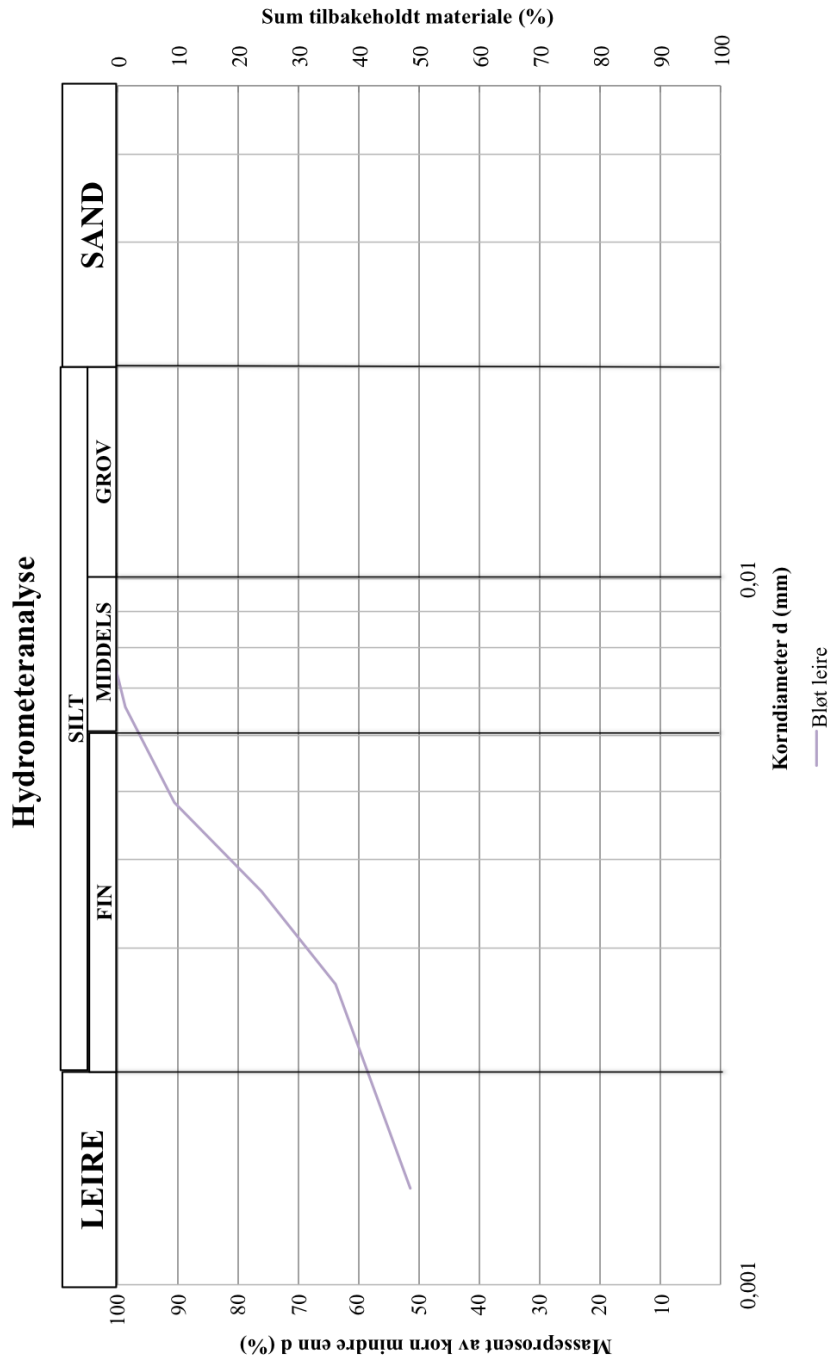
Figur A.20: Hydrometeranalyse. Plott for ren kvikkleire, K-0-0-B



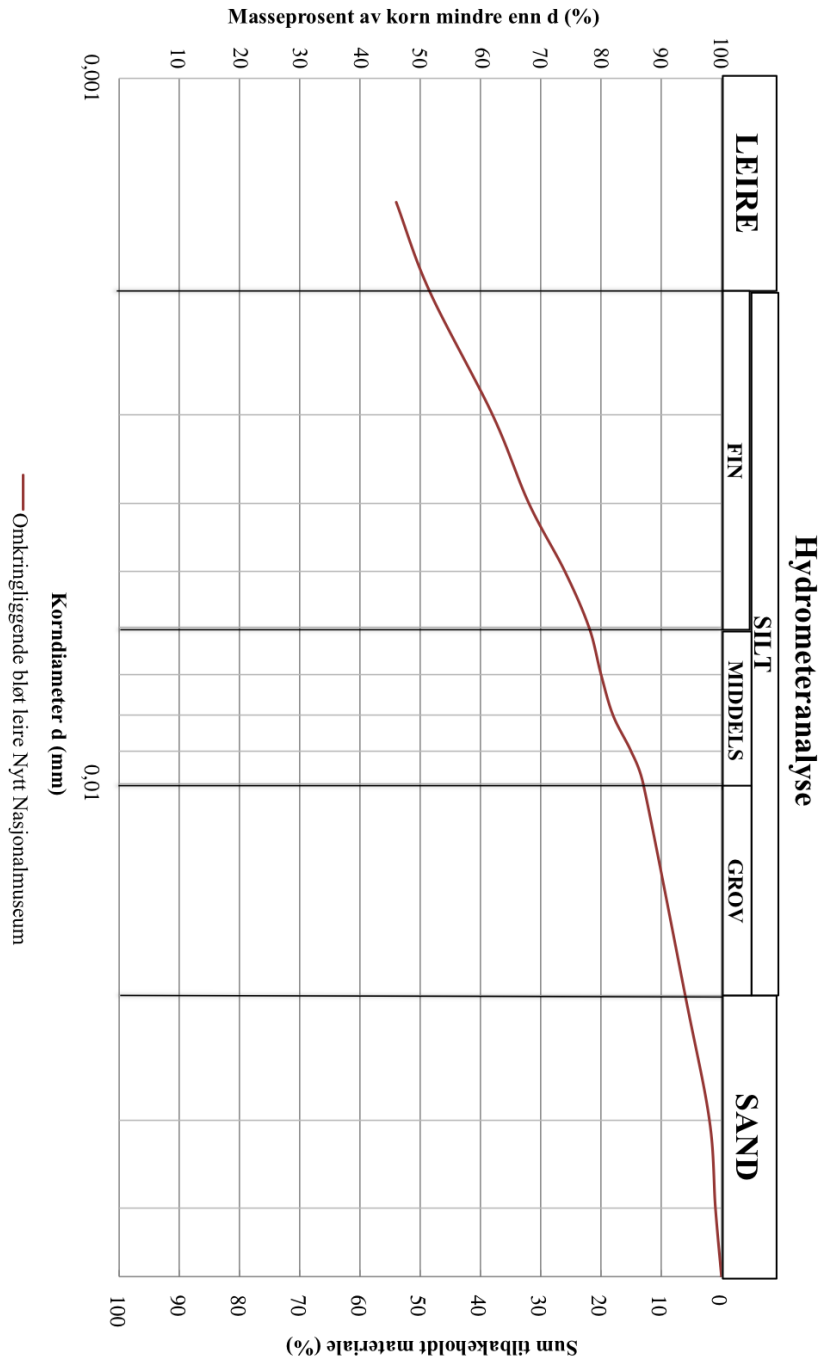
Figur A.21: Hydrometeranalyse. Plott for kvikkleire hentet fra Sørum, K-0-0-C



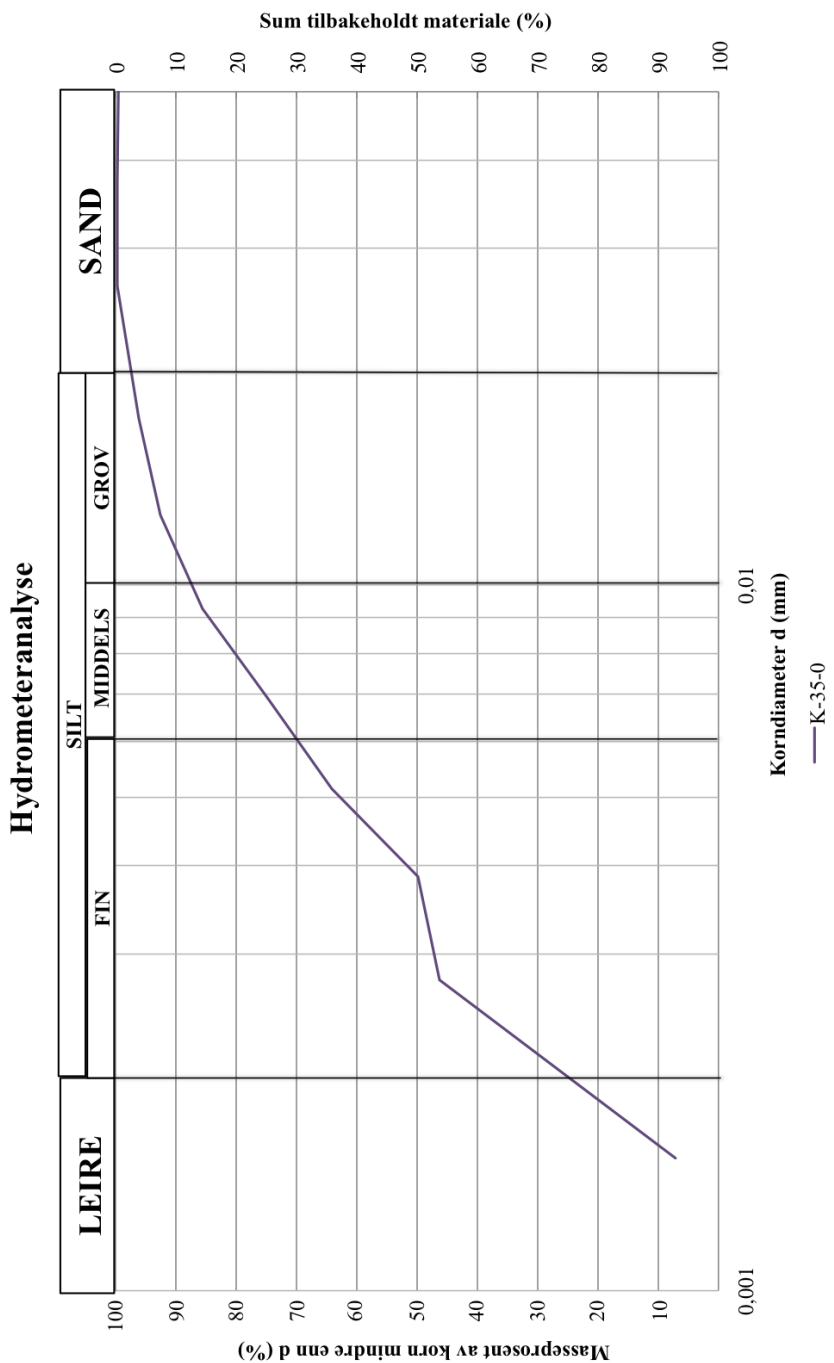
Figur A.22: Hydrometeranalyse utført av NGI på kvikkleire K-0-0-A og K-0-0-B



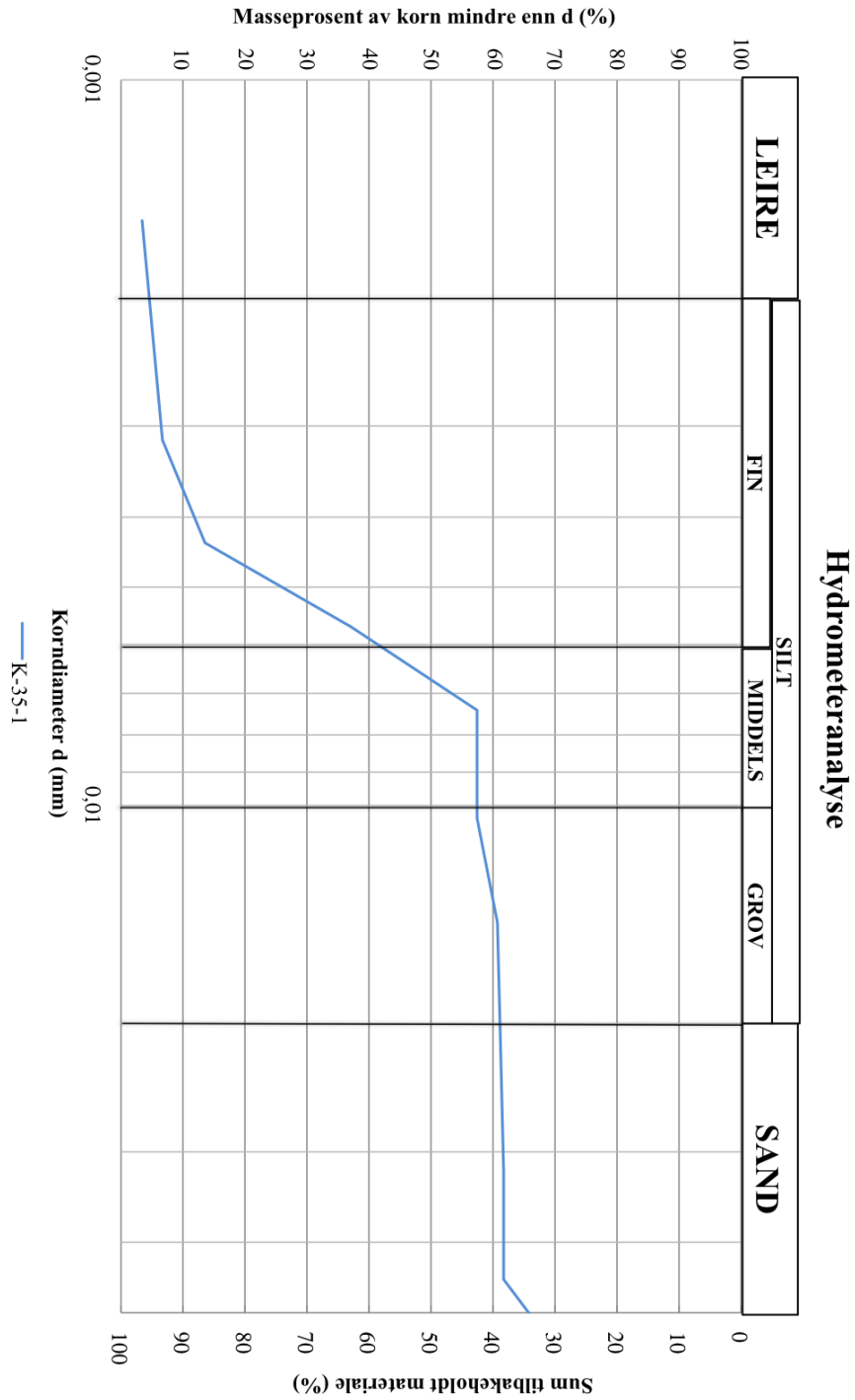
Figur A.23: Hydrometeranalyse. Plott for bløt leire B-0-0



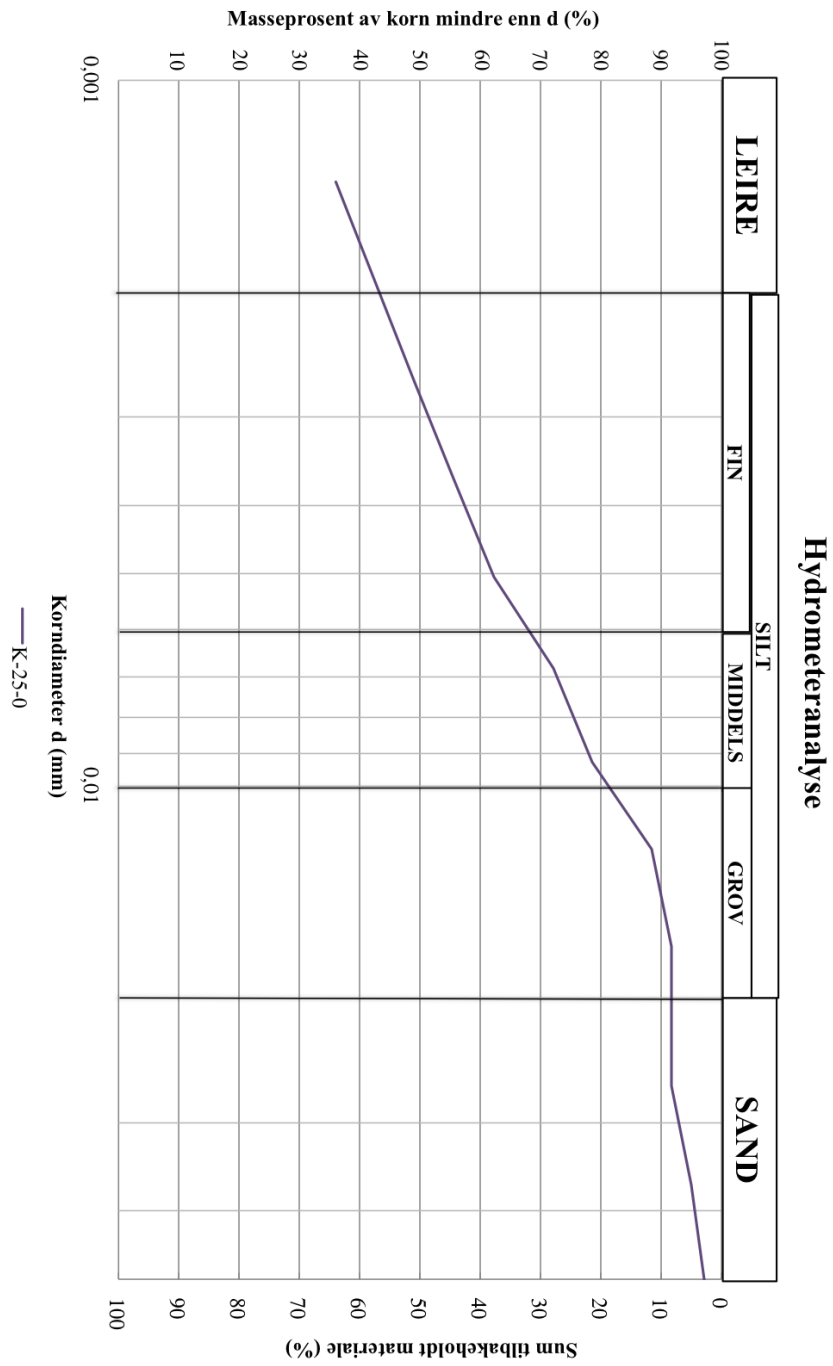
Figur A.24: Hydrometeranalyse for omkringliggende bløt leire fra Nytt Nasjonalmuseum (NGI, 2010)



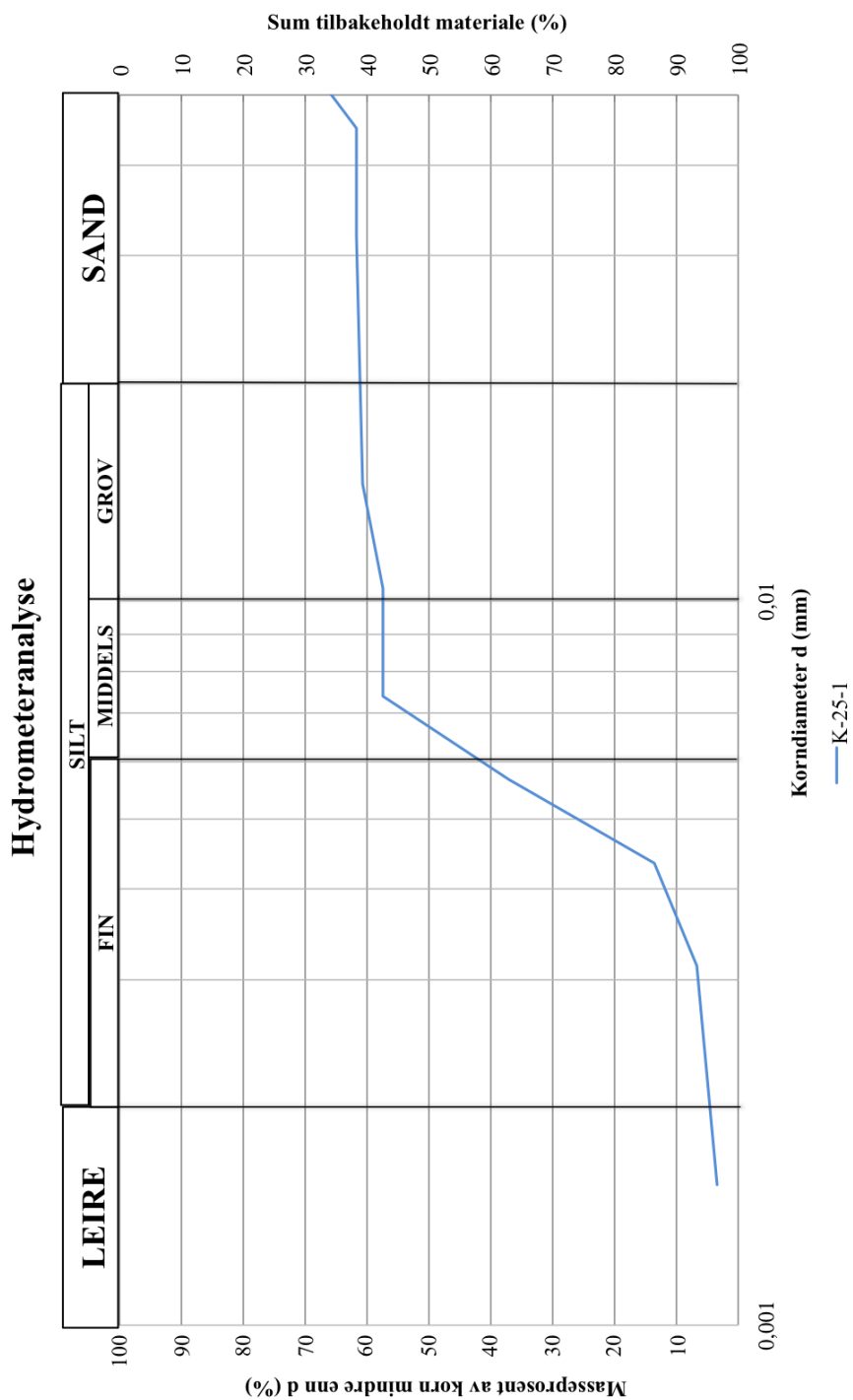
Figur A.25: Hydrometeranalyse. Plott for K-35 uke 0



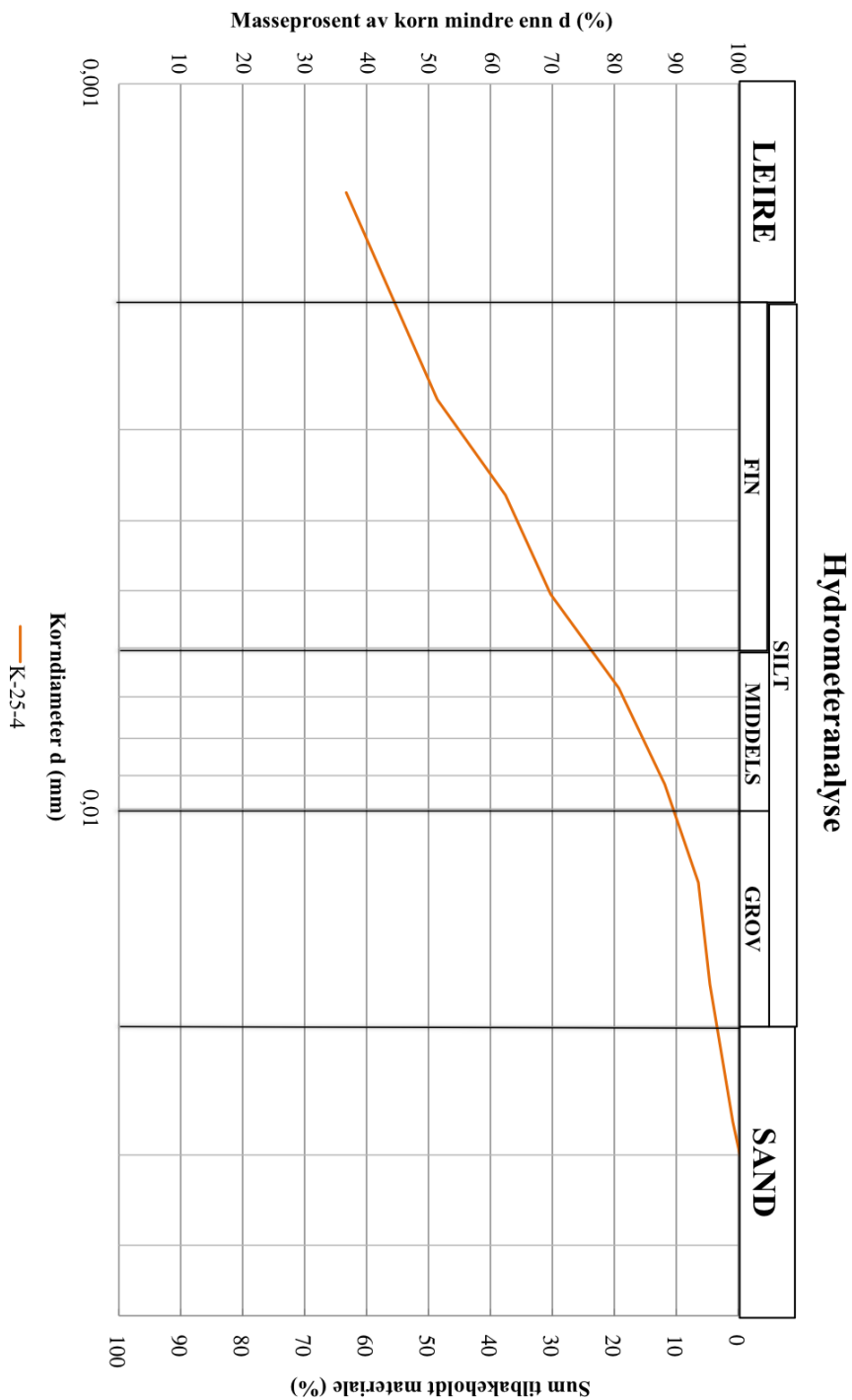
Figur A.26: Hydrometeranalyse. Plott for K-35 uke 4



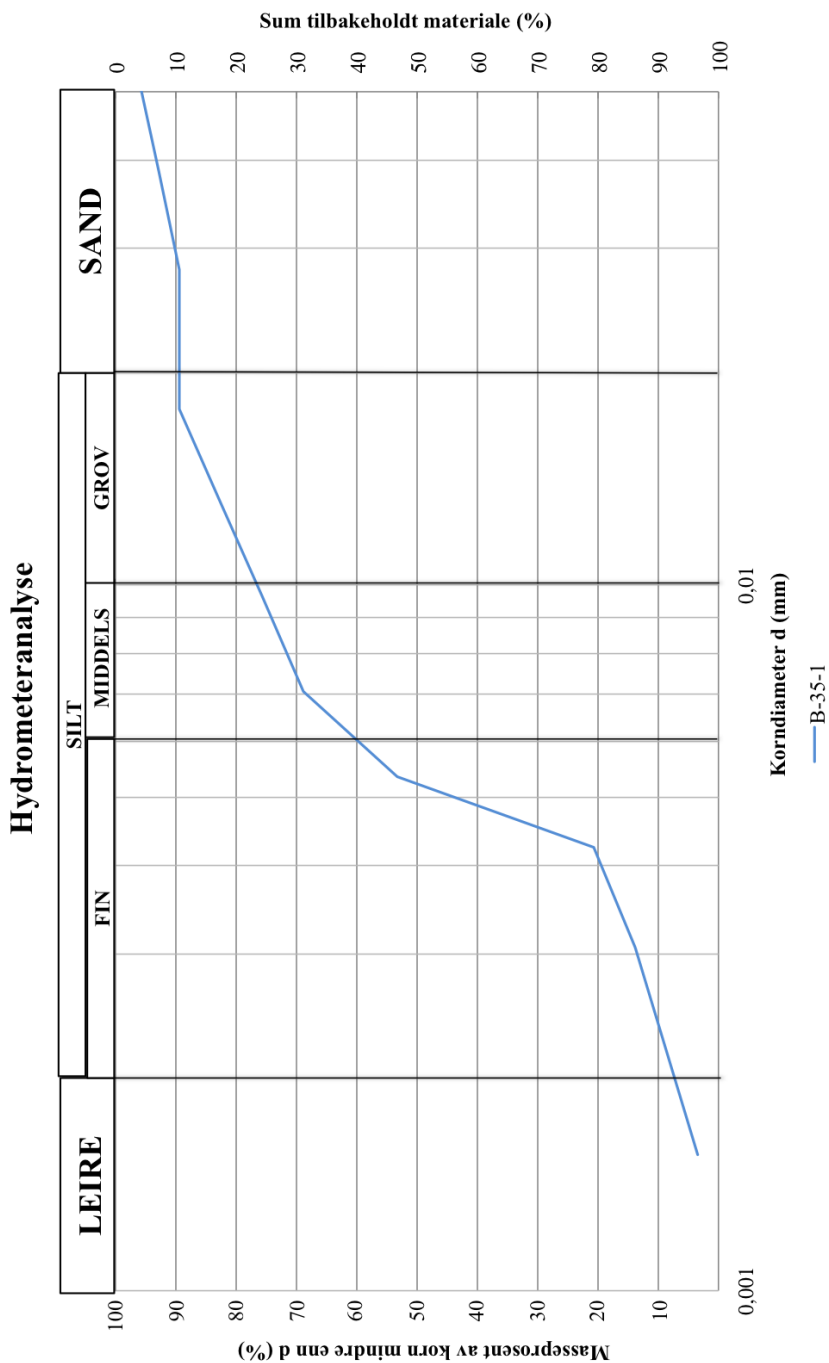
Figur A.28: Hydrometeranalyse. Plott for K-25 uke 0



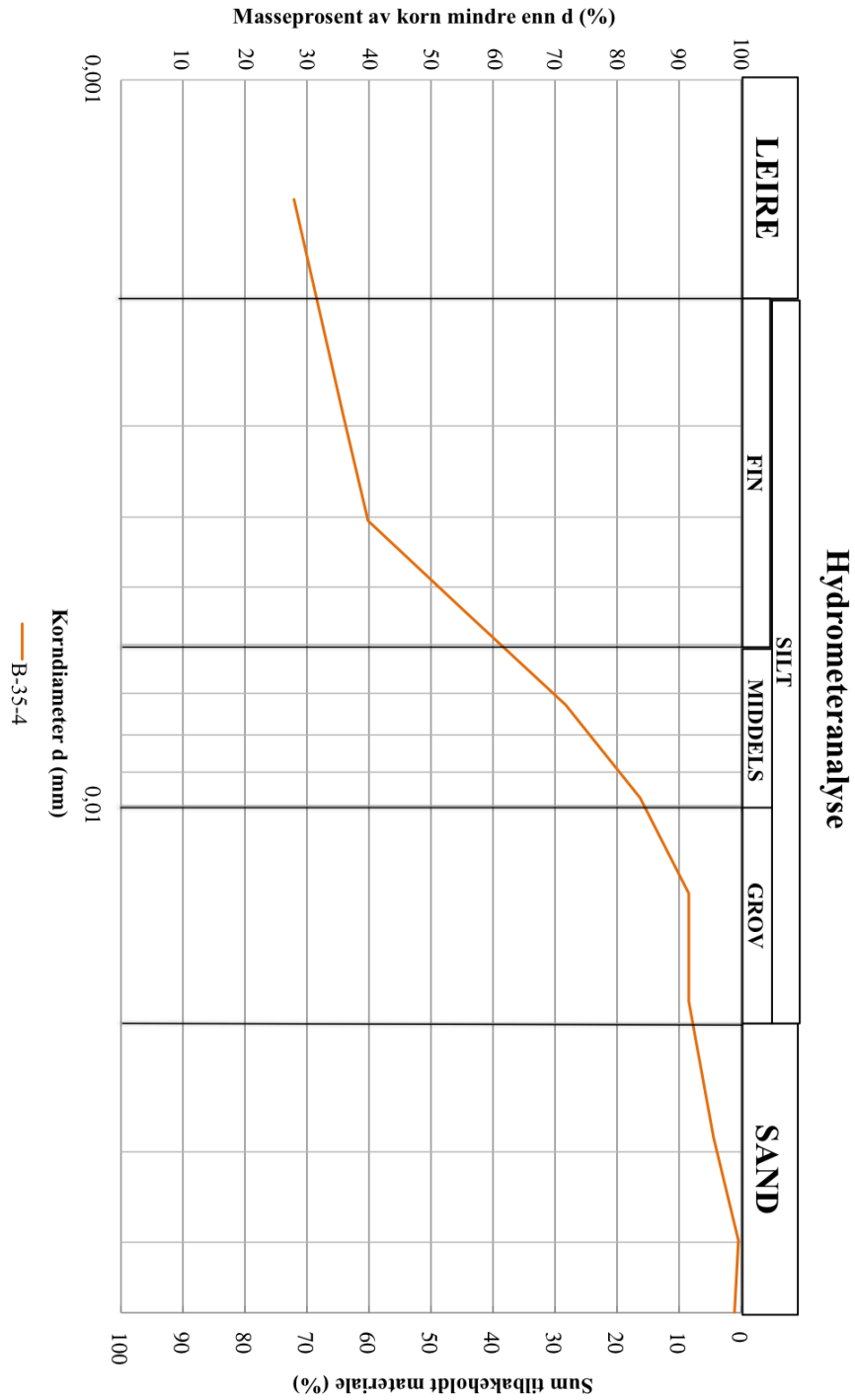
Figur A.29: Hydrometeranalyse. Plott for K-25 uke 4



Figur A.30: Hydrometeranalyse. Plott for K-25 uke 12

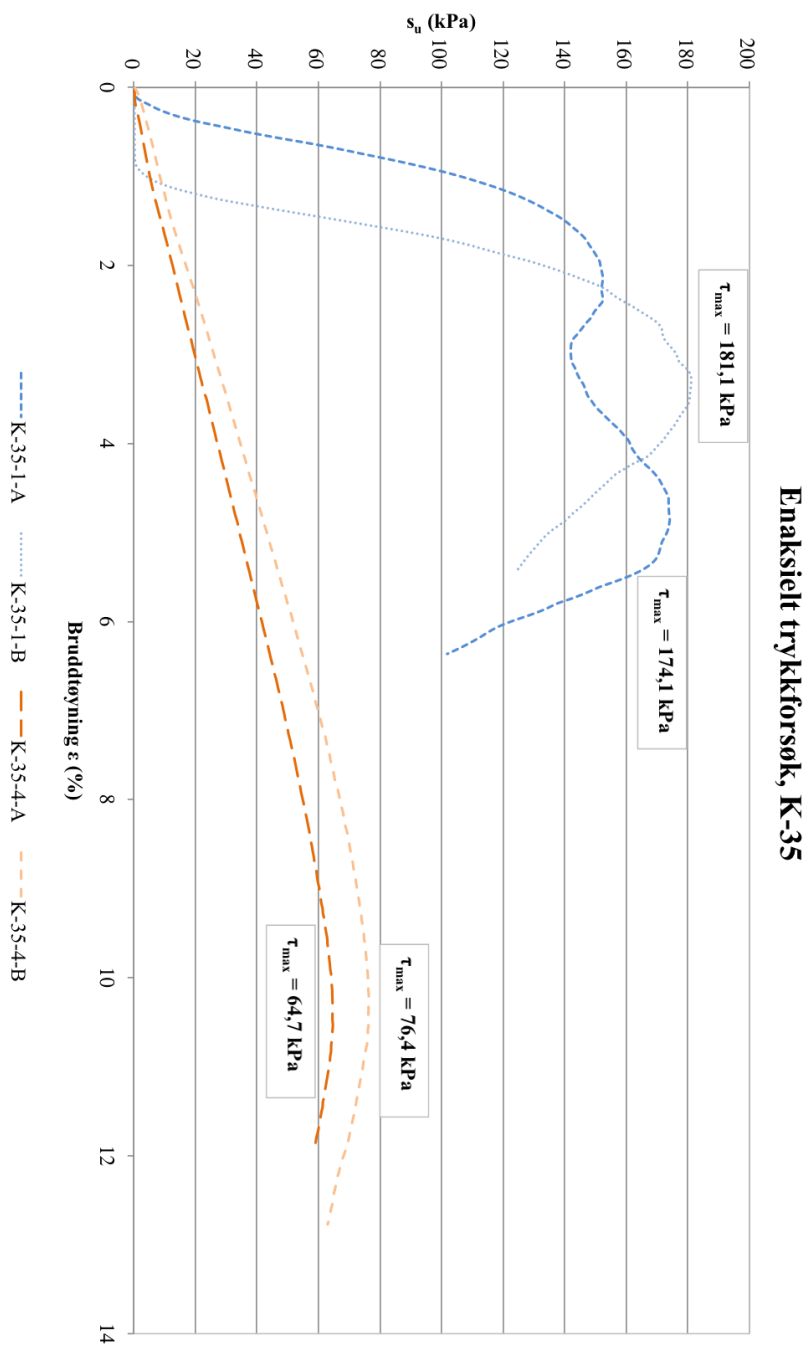


Figur A.31: Hydrometeranalyse. Plott for B-35 uke 4

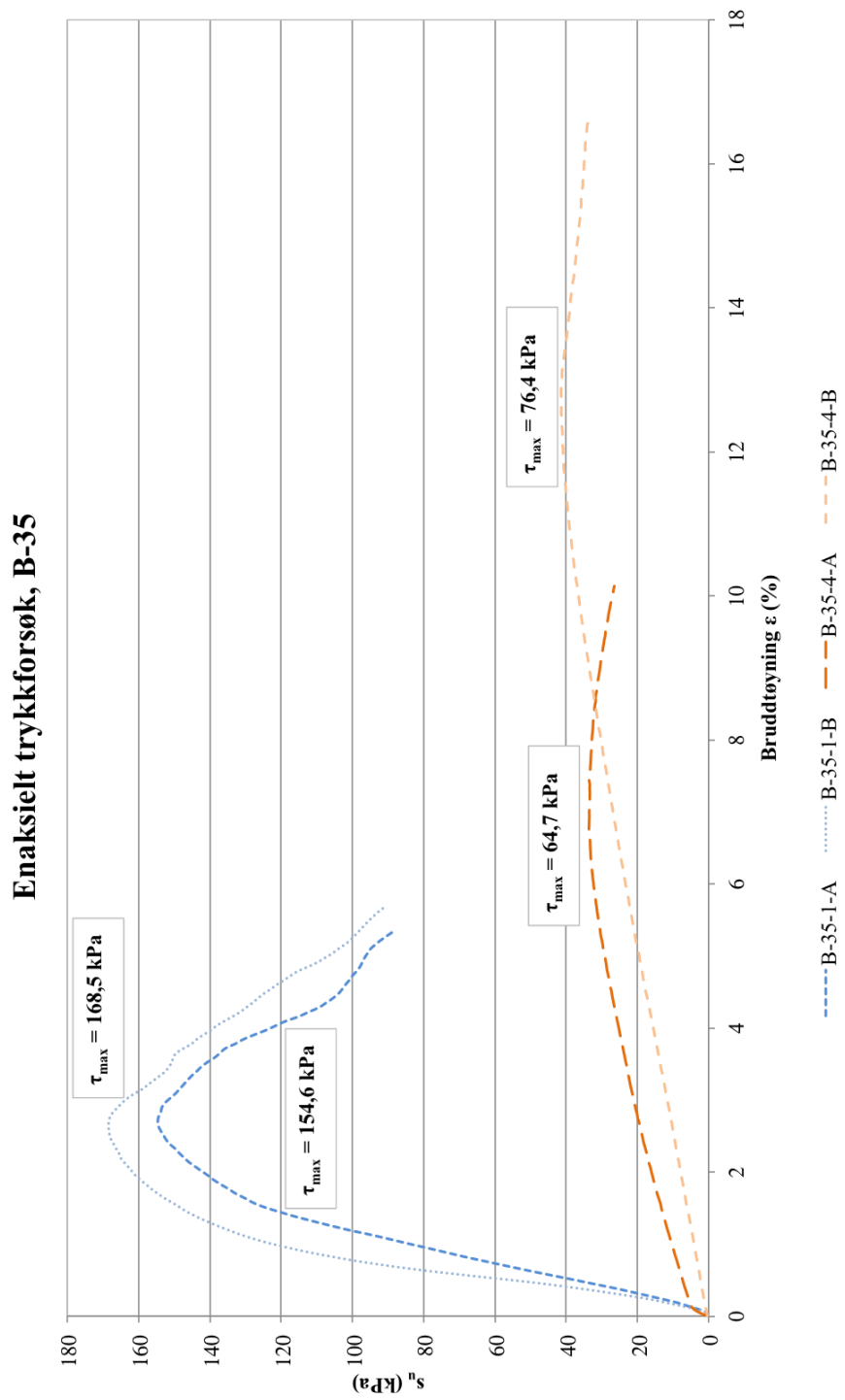


Figur A.32: Hydrometeranalyse. Plott for B-35 uke 12

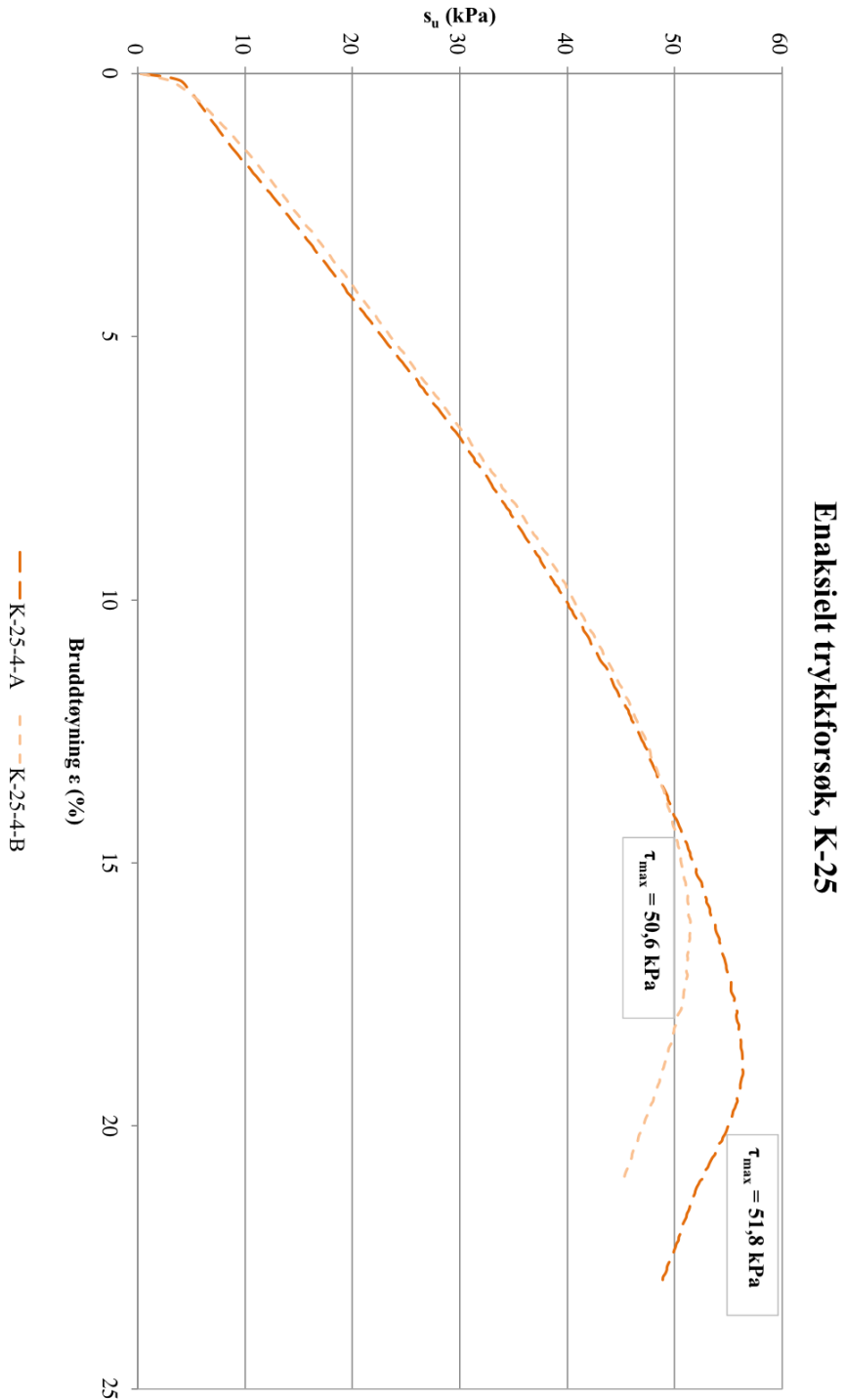
A.2 Enaksielt trykkforsøk



Figur A.33: Enaksielt trykkforsøk. Plott for K-35, samlet



Figur A.34: Enaksielt trykkforsøk. Plott for B-35, samlet

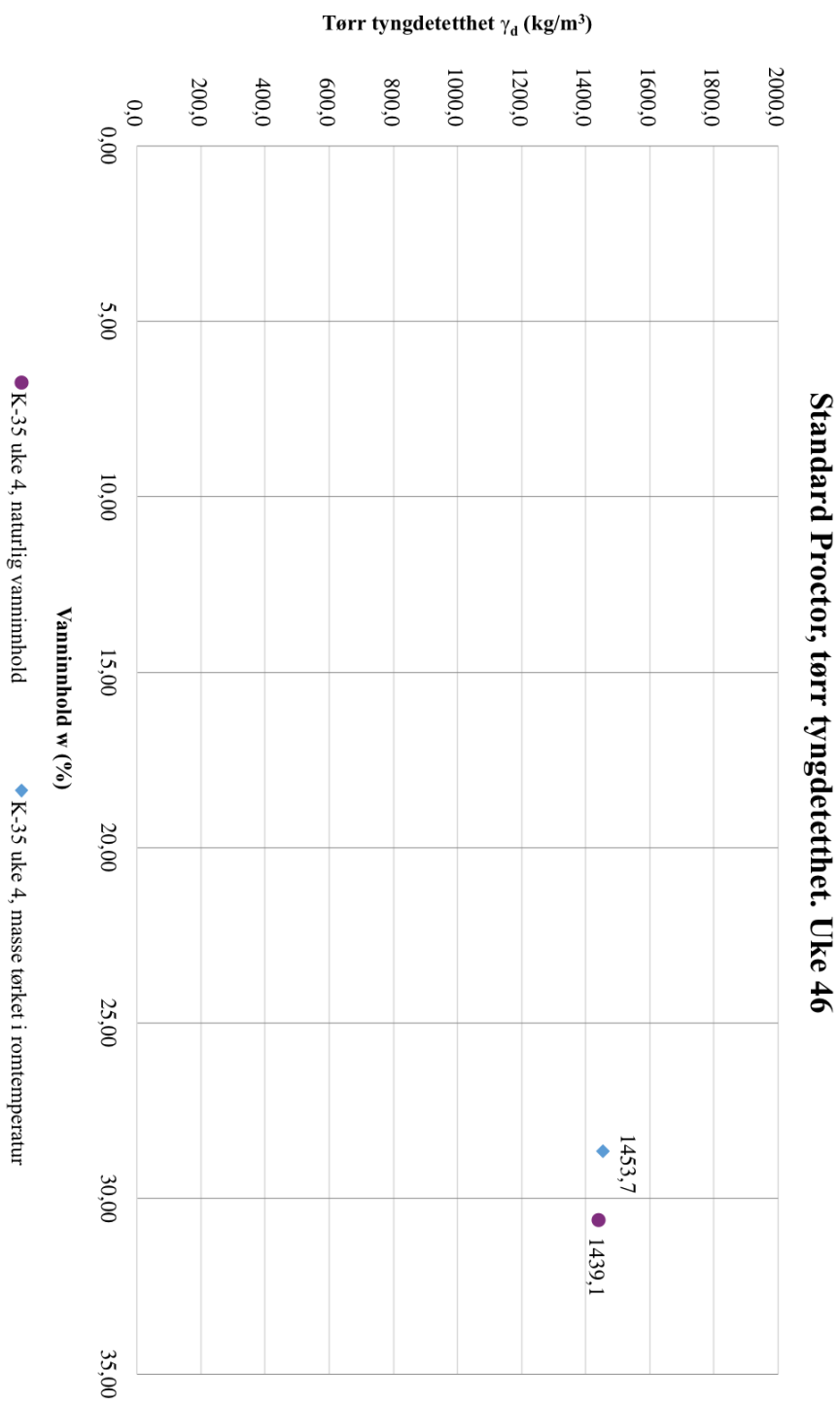


Figur A.35: Enaksielt trykkforsøk. Plott for K-25, samlet

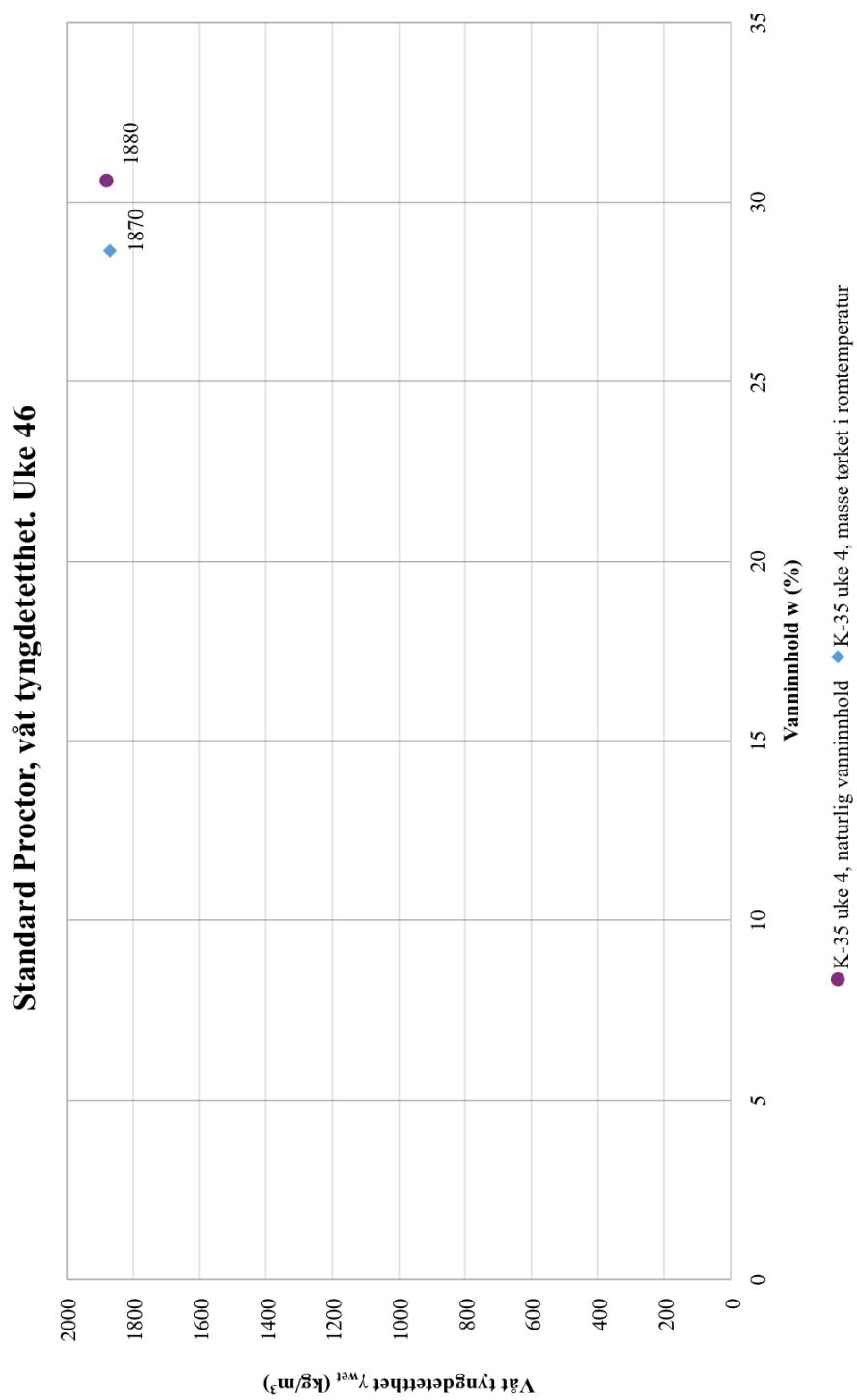
A.3 Standard Proctor

Mål proctorsylinder:		Prøve:			
Diameter (mm):	102,00				
Høyde (mm):	117,00				
Volum (mm ³):	956,04				
Volum (m ³):	0,000956				
vekt stamper (kg):	2,63				
fallhøyde (mm):	300,00				
Arbeid fra stamper (Nm):	7,74				
Diameter lodd (mm):	51,00				
tverrsnitt lodd (mm ²):	2042,82				
Trykk på prøven (kPa):	3,79				
Materialets densitet, ρ_s :	2,72				
materiale som er siktet vekk: (%)					
Bestemmelse nr:		1	2	3	4
Vekt av sylinder: (g)		4794	4788		
Vekt av sylinder med innstampet materiale: (g)		6591	6576		
masse av materiale, våt: (g)		1797	1788	0	0
våt densitet ρ_{wet} : (kg/m ³)		1880	1870	0	0
Tørr densitet: $\rho_d = \rho_{wet} / (1 + w / 100)$ (kg/m ³)		1439,1	1453,7	#DIV/0!	#DIV/0!
Korrigert tørr densitet for stein:		1439,1	1453,7	#DIV/0!	#DIV/0!
Skål nummer: (g)		1	2	3	4
masse skål: (g)		2,19	2,15		
masse skål m/ våt prøve: (g)		79	74		
masse skål m/ tørr prøve: (g)		61	58		
vanninnhold: (g)		0,31	0,29	#DIV/0!	#DIV/0!
vanninnhold w: (%)		30,61	28,65	#DIV/0!	#DIV/0!
Sr: (%)		93,5	89,5	#DIV/0!	#DIV/0!
Void ratio: e		0,89	0,87	#DIV/0!	#DIV/0!
Porøsitet: n		0,47	0,47	#DIV/0!	#DIV/0!
Standard proctor					
Materiale fra:	Dato:	17.11.16			
	Prosjektnr:				
	Prosjektnavn:				
	Prosjektleder:				

Figur A.36: Standard Proctor for K-35 uke 4.



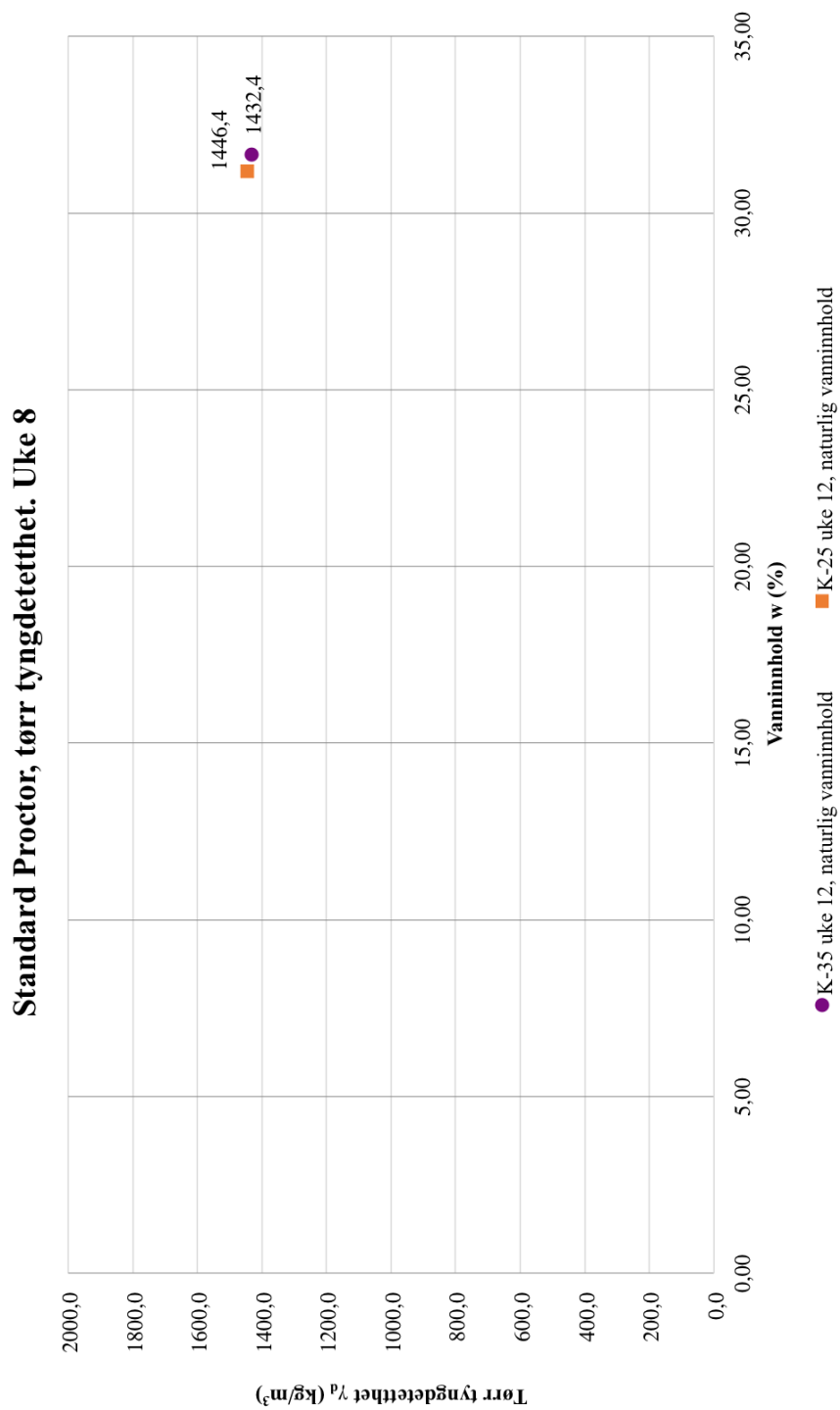
Figur A.37: Standard Proctor for K-35 uke 4. Tørr tyngdetetthet.



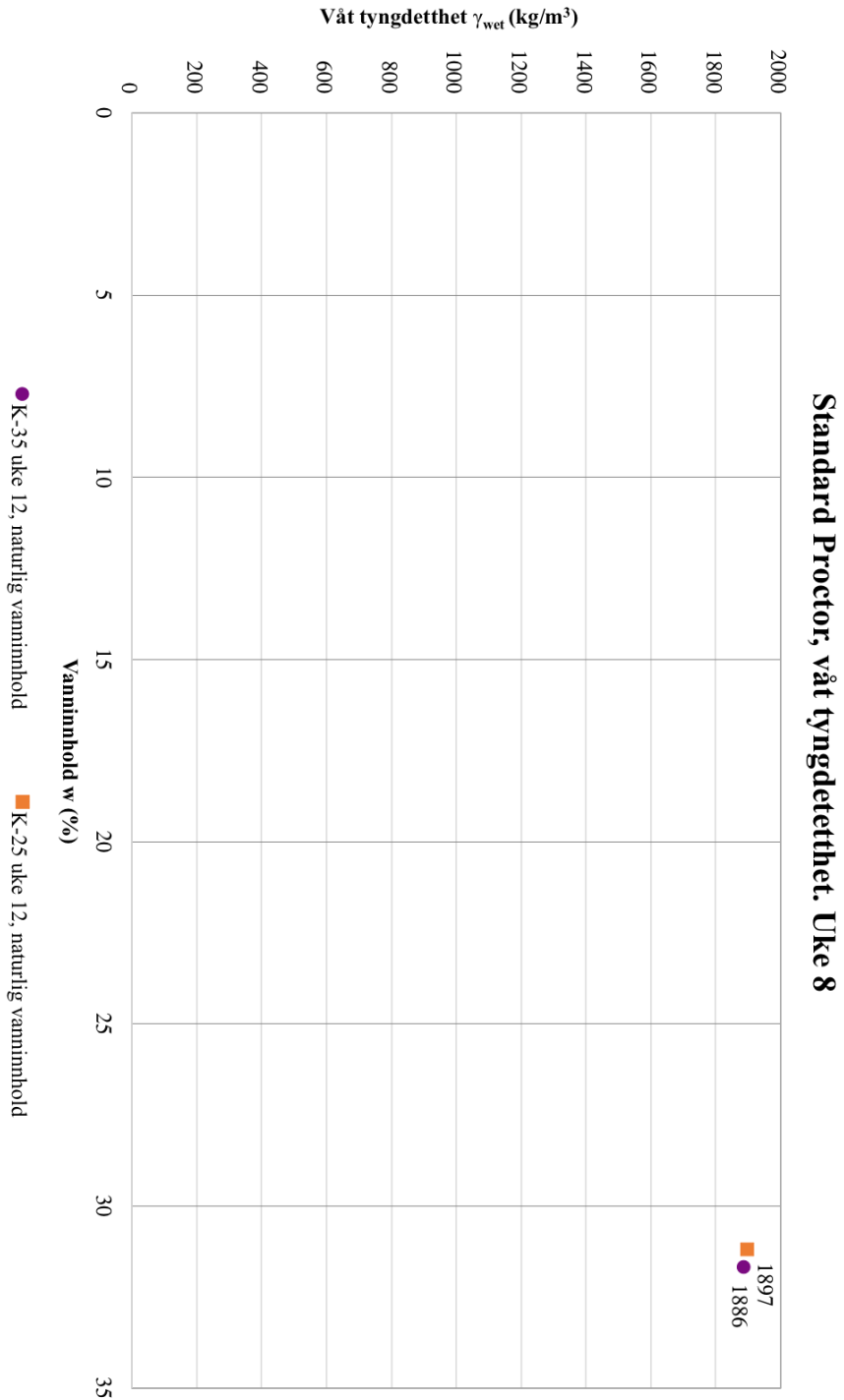
Figur A.38: Standard Proctor for K-35 uke 4. Våt tyngdetetthet.

Mål proctorsylinder:		Prøve:			
Diameter (mm):	102,00				
Høyde (mm):	117,00				
Volum (mm ³):	956,04				
Volum (m ³):	0,000956				
vekt stamper (kg):	2,63				
fallhøyde (mm):	300,00				
Arbeid fra stamper (Nm):	7,74				
Diameter lodd (mm):	51,00				
tverrsnitt lodd (mm ²):	2042,82				
Trykk på prøven (kPa):	3,79				
Materialets densitet, ρ_s :	2,72				
materiale som er siktet vekkt: (%)					
Bestemmelse nr:		1	2	3	4
Vekt av sylinder: (g)		4799	4791		
Vekt av sylinder med innstampet materiale: (g)		6602	6605		
masse av materiale, våt: (g)		1803	1814	0	0
våt tyngdetetthet γ_{wet} : (kg/m ³)		1886	1897	0	0
Tørr tyngdetetthet $\gamma_d = \gamma_{wet} / (1 + w / 100)$ (kg/m ³)		1432,4	1446,4	#DIV/0!	#DIV/0!
Korrigert tørr densitet for stein:		1432,4	1446,4	#DIV/0!	#DIV/0!
Skål nummer: (g)		K24-35-P	K-25-25-P	3	4
masse skål: (g)		2,15	2,16		
masse skål m/ våt prøve: (g)		86,23	72,12		
masse skål m/ tørr prøve: (g)		66,01	55,49		
vanninnhold: (%)		0,32	0,31	#DIV/0!	#DIV/0!
vanninnhold w: (%)		31,66	31,18	#DIV/0!	#DIV/0!
Sr: (%)		95,8	96,3	#DIV/0!	#DIV/0!
Void ratio: e		0,90	0,88	#DIV/0!	#DIV/0!
Porøsitet: n		0,47	0,47	#DIV/0!	#DIV/0!
Standard proctor					
Materiale fra:	Dato:	22.02.17			
	Prosjektnr:				
	Prosjekt navn:				
	Prosjektleder:				

Figur A.39: Standard Proctor for K-35 og K-25, begge uke 12.



Figur A.40: Standard Proctor for K-35 og K-25, begge uke 12. Tørr tyngdetetthet.



Figur A.41: Standard Proctor for K-35 og K-25, begge uke 12. Våt tyngdetetthet.

A.4 Permeabilitetsforsøk

Triaxial test summary		Template: H:\Regneark\triaks\triaxspect13.xlt	
		Responsible: Morten A. Sjurssen	
		Date/Rev.no.: 2012-04-23\13	
Project name	NOAH Langøya - Topptetting		
Project number	20110171		
Report number	2		
Sample and test identification			
Boring	Test		
Tube	A1		
Part	35%		
Test	kvikk		
Material	KS- leire		
Trimming method	Standard		
Laboratory procedure	LLP014		
Depth	2.1 [m]	Salt content	0 [g/l]
Effective overburden pressure, P_o'	48.2 [kPa]	Unit weight of solids	27 [kN/m ³]
Specimen height	10.934 [cm]	Maximum dry unit weight	0 [kN/m ³]
Specimen volume	251.61 [cm ³]	Minimum dry unit weight	0 [kN/m ³]
Initial index data			
Water content w_i	25.44 [%]	Void ratio e_i	0.762
Initial unit weight γ_{fi}	19.23 [kN/m ³]	Initial saturation S_{ri}	91.9 [%]
Dry unit weight γ_{di}	15.33 [kN/m ³]	Relative density D_{ri}	
Consolidation data			
	Final		Maximum Minimum Final
Water content w_c	24.76 [%]	σ_{ac}'	83.6 [kPa]
Unit weight γ_{tc}	19.33 [kN/m ³]	σ_{rc}'	50.0 [kPa]
Dry unit weight γ_{dc}	15.49 [kN/m ³]	τ_c	16.8 [kPa]
Void ratio e_c	0.743	K_o	0.60
Saturation S_{rc}	91.7 [%]	ε_{ac}	0.969 [%]
Relative density D_{rc}		ε_{vc}	1.073 [%]
Backpressure U	980.7 [kPa]	ε_{rc}	0.052 [%]
B-value B			
Preshearing data			
ε_{ac}	0.000 [%]	Nominal τ_{cy}	0 [kPa]
ε_{vc}	0.000 [%]	Number of cycles	0
Only permeability K=6,3E-10 m/s			
Calculation done by:	Date:	Control done by:	Date:
Project no.: 20110171	Boring: Test	Tube: A1	Part: 35% Test: kvikk

Figur A.42: Permeabilitetsforsøk uke 12. Inngangsparametere for K-35-4, test A


Triaxial test summary		Template: H:\Regneark\triax\triaxspec13.xlt	
		Responsible: Morten A. Sjørusen	
		Date/Rev.no.: 2012-04-23\13	
Project name	NOAH Langøya - Topptetting		
Project number	20110171		
Report number	2		
Sample and test identification			
Boring	Test		
Tube	A2		
Part	35%		
Test	kvikk		
Material	KS- leire		
Trimming method	Standard		
Laboratory procedure	LLP014		
Depth	2.1 [m]	Salt content	0 [g/l]
Effective overburden pressure, P_o'	48.2 [kPa]	Unit weight of solids	27 [kN/m ³]
Specimen height	10.986 [cm]	Maximum dry unit weight	0 [kN/m ³]
Specimen volume	251.17 [cm ³]	Minimum dry unit weight	0 [kN/m ³]
Initial index data			
Water content w_i	30.54 [%]	Void ratio e_i	0.878
Initial unit weight γ_{ti}	18.77 [kN/m ³]	Initial saturation S_{ri}	95.8 [%]
Dry unit weight γ_{di}	14.38 [kN/m ³]	Relative density D_{ri}	
Consolidation data			
	Final		Maximum Minimum Final
Water content w_c	30.08 [%]	σ_{ac}'	83.4 [kPa]
Unit weight γ_{tc}	18.83 [kN/m ³]	σ_{rc}'	50.0 [kPa]
Dry unit weight γ_{dc}	14.48 [kN/m ³]	τ_c	16.7 [kPa]
Void ratio e_c	0.865	K_o	0.60
Saturation S_{rc}	95.7 [%]	ε_{ac}	0.689 [%]
Relative density D_{rc}		ε_{vc}	0.677 [%]
Backpressure U	980.7 [kPa]	ε_{ic}	-0.006 [%]
B-value B			
Preshearing data			
ε_{ac}	0.000 [%]	Nominal τ_{cy}	0 [kPa]
ε_{vc}	0.000 [%]	Number of cycles	0
Only permeability, $K = 1.2E-09$ m/s			
Calculation done by:	Date:	Control done by:	Date:
Project no.: 20110171	Boring: Test	Tube: A2	Part: 35% Test: kvikk



Figur A.43: Permeabilitetsforsøk uke 12. Inngangsparametere for K-35-4, test B

Triaxial test summary		Template: H:\Regneark\triax\triaxspec13.xlt	
		Responsible: Morten A. Sjurseth	
		Date/Rev.no.: 2012-04-23/13	
Project name	NOAH Langøya - Topptetting		
Project number	20110171		
Report number	2		
Sample and test identification			
Boring	Test		
Tube	B1		
Part	35%		
Test	Bløt		
Material	KS- leire		
Trimming method	Standard		
Laboratory procedure	LLP014		
Depth	2.1 [m]	Salt content	0 [g/l]
Effective overburden pressure, P_o'	48.2 [kPa]	Unit weight of solids	27 [kN/m ³]
Specimen height	10.875 [cm]	Maximum dry unit weight	0 [kN/m ³]
Specimen volume	247.17 [cm ³]	Minimum dry unit weight	0 [kN/m ³]
Initial index data			
Water content w_i	34.97 [%]	Void ratio e_i	0.997
Initial unit weight γ_{fi}	18.25 [kN/m ³]	Initial saturation S_{ri}	96.6 [%]
Dry unit weight γ_{di}	13.52 [kN/m ³]	Relative density D_{ri}	
Consolidation data			
	Final	Maximum	Minimum
Water content w_c	33.56 [%]	σ_{ac}'	83.4 [kPa]
Unit weight γ_{tc}	18.42 [kN/m ³]	σ_{rc}'	50.1 [kPa]
Dry unit weight γ_{dc}	13.79 [kN/m ³]	τ_c	16.7 [kPa]
Void ratio e_c	0.958	K_o	0.60
Saturation S_{rc}	96.4 [%]	ϵ_{ac}	1.043 [%]
Relative density D_{rc}		ϵ_{vc}	1.942 [%]
Backpressure U	980.7 [kPa]	ϵ_{rc}	0.455 [%]
B-value B			
Preshearing data			
ϵ_{ac}	0.000 [%]	Nominal τ_{cy}	0 [kPa]
ϵ_{vc}	0.000 [%]	Number of cycles	0
Only permeability K=1,7E-09 m/s			
Calculation done by:	Date:	Control done by:	Date:
Project no.: 20110171	Boring: Test	Tube: B1	Part: 35%
			Test: Bløt

Figur A.44: Permeabilitetsforsøk uke 12. Inngangsparametere for B-35-4, test A

Triaxial test summary		Template: H:\Regneark\triax\triaxspec13.xlt				
		Responsible: Morten A. Sjurson				
		Date/Rev.no.: 2012-04-23\13				
Project name	NOAH Langøya - Topptetting					
Project number	20110171					
Report number	2					
Sample and test identification						
Boring	Test					
Tube	B2					
Part	35%					
Test	Bløt					
Material	KS- leire					
Trimming method	Standard					
Laboratory procedure	LLP014					
Depth	2.1 [m]	Salt content	0 [g/l]			
Effective overburden pressure, P_o'	48.2 [kPa]	Unit weight of solids	27 [kN/m ³]			
Specimen height	10.915 [cm]	Maximum dry unit weight	0 [kN/m ³]			
Specimen volume	249.55 [cm ³]	Minimum dry unit weight	0 [kN/m ³]			
Initial index data						
Water content	W_i	34.47 [%]	Void ratio	e_i	0.981	
Initial unit weight	γ_{fi}	18.32 [kN/m ³]	Initial saturation	S_{ri}	96.7 [%]	
Dry unit weight	γ_{di}	13.63 [kN/m ³]	Relative density	D_{ri}		
Consolidation data						
		Final		Maximum	Minimum	Final
Water content	W_c	33.60 [%]	σ_{ac}'			83.4 [kPa]
Unit weight	γ_{tc}	18.43 [kN/m ³]	σ_{rc}'			50.0 [kPa]
Dry unit weight	γ_{dc}	13.79 [kN/m ³]	τ_c			16.7 [kPa]
Void ratio	e_c	0.958	K_o			0.60
Saturation	S_{rc}	96.6 [%]	ε_{ac}			1.263 [%]
Relative density	D_{rc}		ε_{vc}			1.202 [%]
Backpressure	U	980.7 [kPa]	ε_{rc}			-0.031 [%]
B-value	B					
Preshearing data						
	ε_{ac}	0.000 [%]	Nominal τ_{cy}	0 [kPa]		
	ε_{vc}	0.000 [%]	Number of cycles	0		
Only permeability, $K = 1.3E-09$ m/s						
Calculation done by:		Date:	Control done by:		Date:	
Project no.:	Boring:	Tube:	Part:	Test:		
20110171	Test	B2	35%	Bløt		

Figur A.45: Permeabilitetsforsøk uke 12. Inngangsparametere for B-35-4, test B

A.5 Titreringsforsøk

TITRERINGSFORSØK

Konsentrasjon HNO₃ (M) 1

Kvikk, 35% K-35-4

Vekt begerglass (g) 293,38

Vekt prøve (g) 8,03

Vekt tilsatt vann (g) 802,3

Slope 0,979

Målt pH ved start 10,65

SET pH (-)	Avlest pH (-)	Tilsatt syre (ml)	Mol syre	Mol H+/kg materiale	Totalt tilsatt H+ pr gram prøve
-	10,65	0	0	0	0
	10	9,73	0,482	0,00048	0,060024907
	9	8,64	0,674	0,00067	0,083935243
	8	8	0,748	0,00075	0,093150685
	7	6,97	1,312	0,00131	0,163387298
	6	5,97	0,714	0,00071	0,088916563
	5	5	0,718	0,00072	0,089414695

Figur A.46: Titreringsforsøk uke 12. Resultat for K-35-4

TITRERINGSFORSØK

Konsentrasjon HNO₃ 1

Kvikk, 25% K-25-4

Vekt begerglass (g) 293,49

Vekt prøve (g) 8,01

Vekt tilsatt vann (g) 800,9

Slope -

Målt pH ved start 9,91

SET pH (-)	Avlest pH (-)	Tilsatt syre (ml)	Mol syre	Mol H+/kg materiale	Totalt tilsatt H+ pr gram prøve
-	9,91	0	0	0	0
	9	7,68	0,214	0,000214	0,026716604
	7	6,91	1,008	0,001008	0,125842697
	6	5,89	0,668	0,000668	0,083395755
	5	5,00	0,912	0,000912	0,113857678

Figur A.47: Titreringsforsøk uke 12. Resultat for K-25-4

TITRERINGSFORSØKKonsentrasjon HNO₃ (M) 1**Bløt, 35%** B-35-4

Vekt begerglass (g) 293,39

Vekt prøve (g) 8,08

Vekt tilsatt vann (g) 808,6

Slope 0,953

Målt pH ved start 10,8

SET pH (-)	Avlest pH (-)	Tilsatt syre (ml)	Mol syre	Mol H+/kg materiale	Totalt tilsatt H+ pr gram prøve	
-	10,8	0	0	0	0	
	10	9,98	0,94	0,000940	0,116336634	0,116336634
	9	8,98	0,578	0,000578	0,071534653	0,187871287
	8	7,99	0,808	0,000808	0,1	0,287871287
	7	6,99	0,738	0,000738	0,091336634	0,379207921
	6	5,98	0,908	0,000908	0,112376238	0,491584158
	5	4,93	0,774	0,000774	0,095792079	0,587376238

Figur A.48: Titreringsforsøk uke 12. Resultat for B-35-4

TITRERINGSFORSØKKonsentrasjon HNO₃ (M) 1**Sørumleire**

Vekt begerglass (g) 293,4

Vekt prøve (g) 8,04

Vekt tilsatt vann (g) 804,6

Slope 0,962

Målt pH ved start 9,31

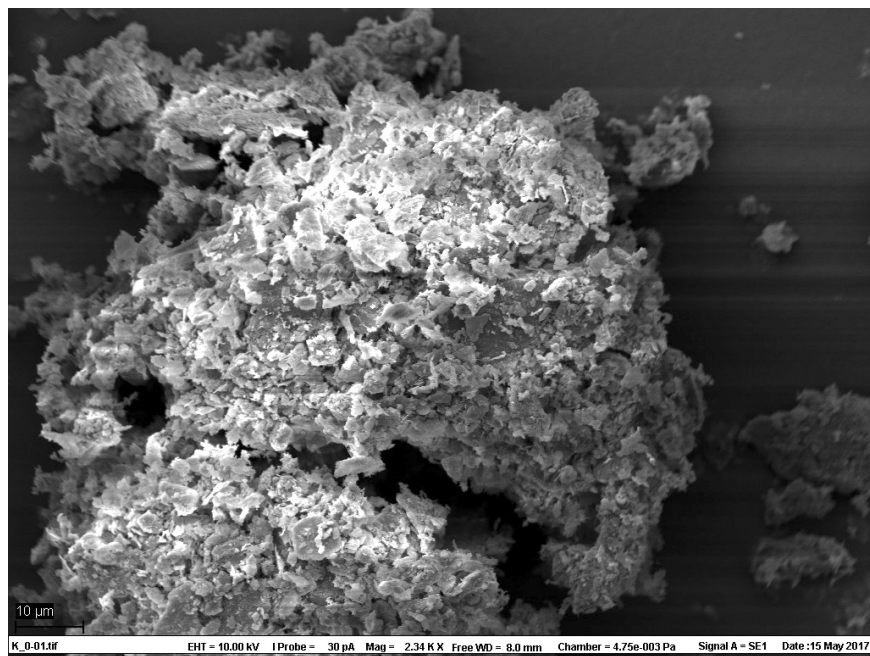
SET pH (-)	Avlest pH (-)	Tilsatt syre (ml)	Mol syre	Mol H+/kg materiale	Totalt tilsatt H+ pr gram prøve	
-	9,31	0	0	0	0	
	9	8,2	0,05	0,00005	0,006218905	0,006218905
	8	7,43	0,106	0,000106	0,01318408	0,019402985
	7	6,38	0,4	0,0004	0,049751244	0,069154229
	6	5,99	0,302	0,000302	0,037562189	0,106716418
	5	4,95	0,658	0,000658	0,081840796	0,188557214

Figur A.49: Titreringsforsøk uke 12. Resultat for kvikkleire fra Sørum K-0-0-C

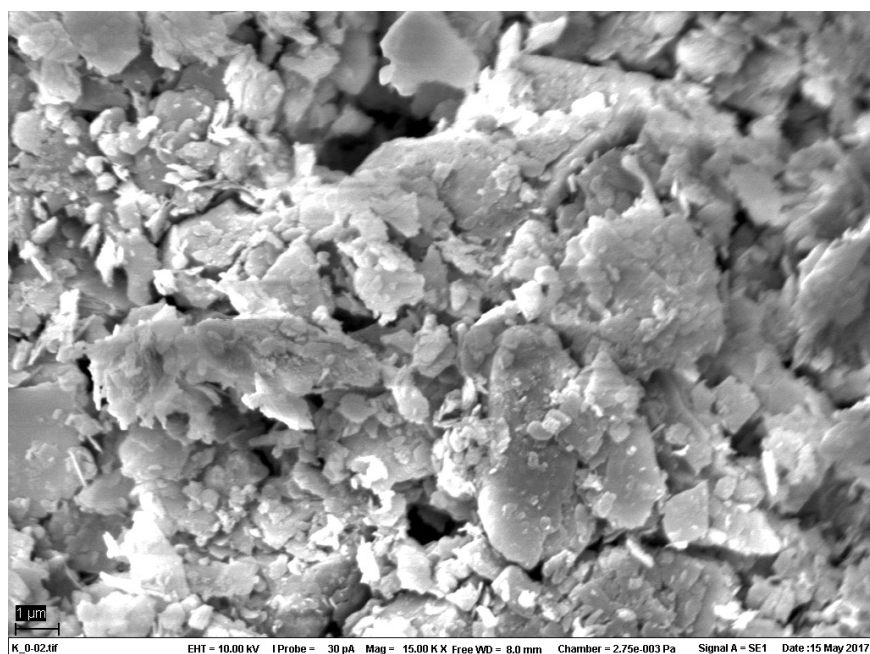
TITRERINGSFORSØK, BETONG

Avlest pH (-)	Mol H+/kg materiale
11,39	0
10,99	0,286448894
9,96	0,581934031
8,91	0,808743723
7,81	1,049710196
6,99	1,309652778
5,98	1,658752955
4,98	2,325025251
3,98	3,052743998

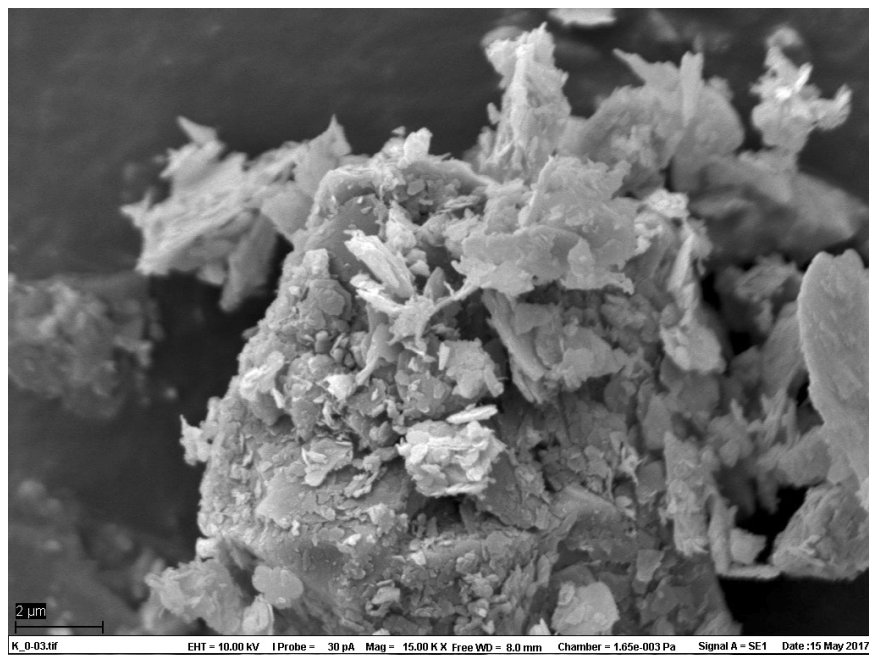
Figur A.50: Titreringsforsøk. Resultat for betong

A.6 SEM-foto

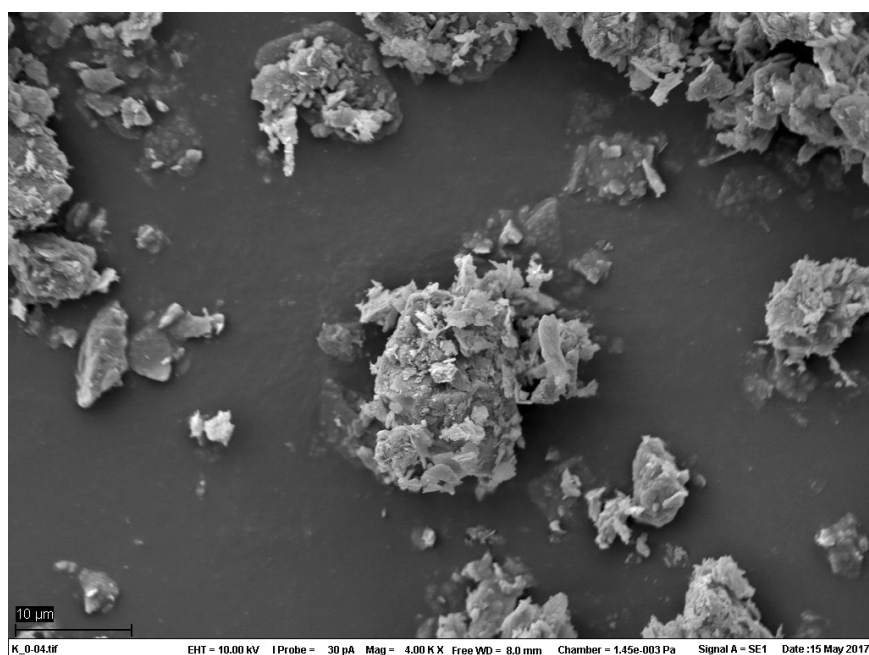
Figur A.51: SEM-foto av kvikkleire fra Sørum. Forstørret 2340x, målestokk 10 μm .



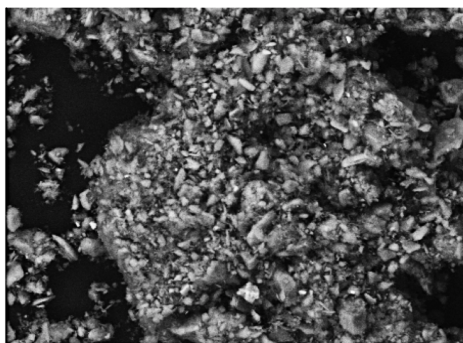
Figur A.52: SEM-foto av kvikkleire fra Sørum. Forstørret 15000x, målestokk 1 μm .



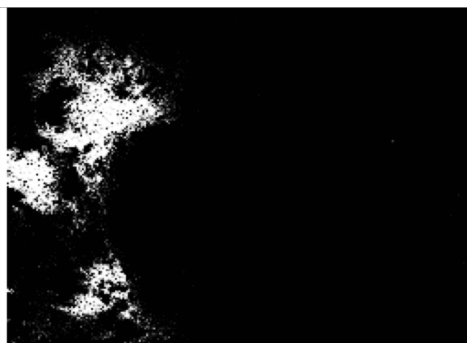
Figur A.53: SEM-foto av kvikleire fra Sørumsjøen. Forstørret 15000x, målestokk 2 µm.



Figur A.54: SEM-foto av kvikleire fra Sørumsjøen. Forstørret 4000x, målestokk 10 µm.



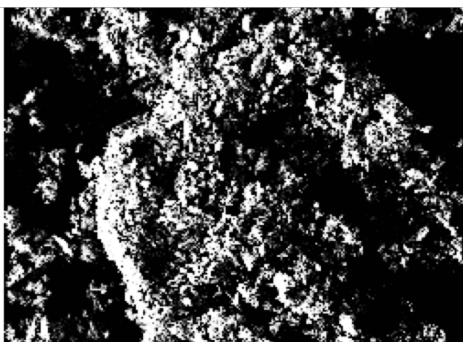
Electron Image 1



C Ka1_2

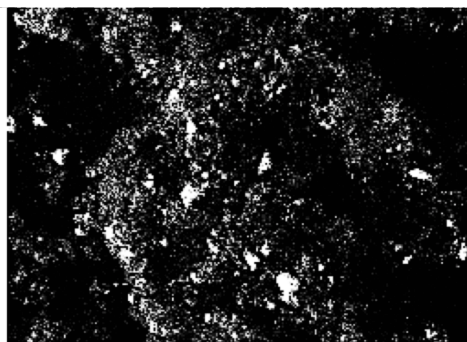
(a) Electron image av kvikkleire fra Sørumsund

(b) Karbon (C) indikert med hvit farge



O Ka1

(c) Oksygen (O) indikert med hvit farge



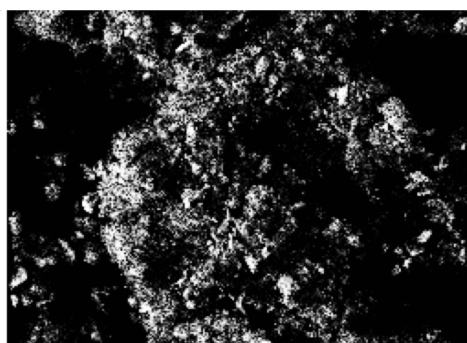
Na Ka1_2

(d) Natrium (Na) indikert med hvit farge



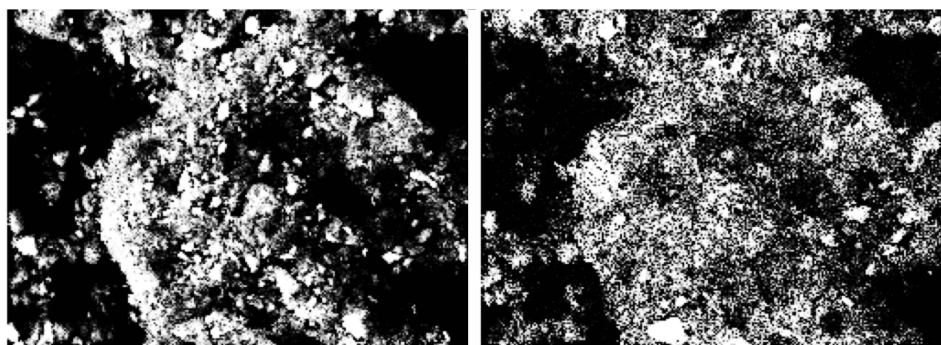
Mg Ka1_2

(e) Magnesium (Mg) indikert med hvit farge



Al Ka1

(f) Aluminium (Al) indikert med hvit farge

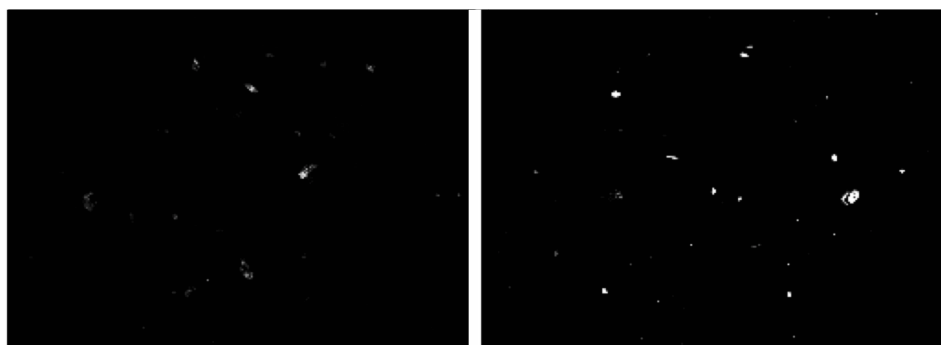


Si Ka1

(g) Silisium (Si) indikert med hvit farge

K Ka1

(h) Kalium (K) indikert med hvit farge

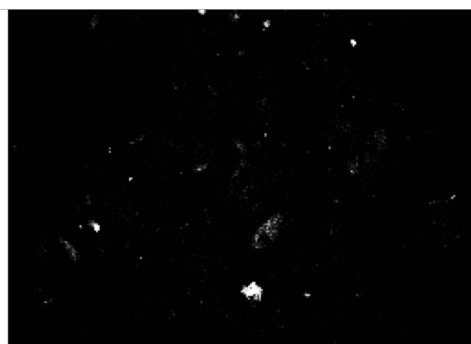


Ca Ka1

(i) Kalsium (Ca) indikert med hvit farge

Ti Ka1

(j) Titan (Ti) indikert med hvit farge

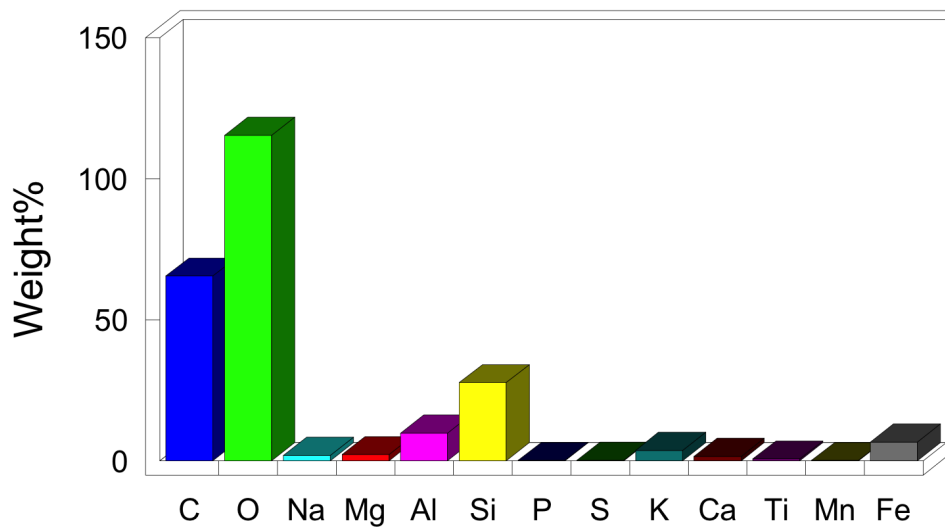


Fe Ka1

(k) Jern (Fe) indikert med hvit farge

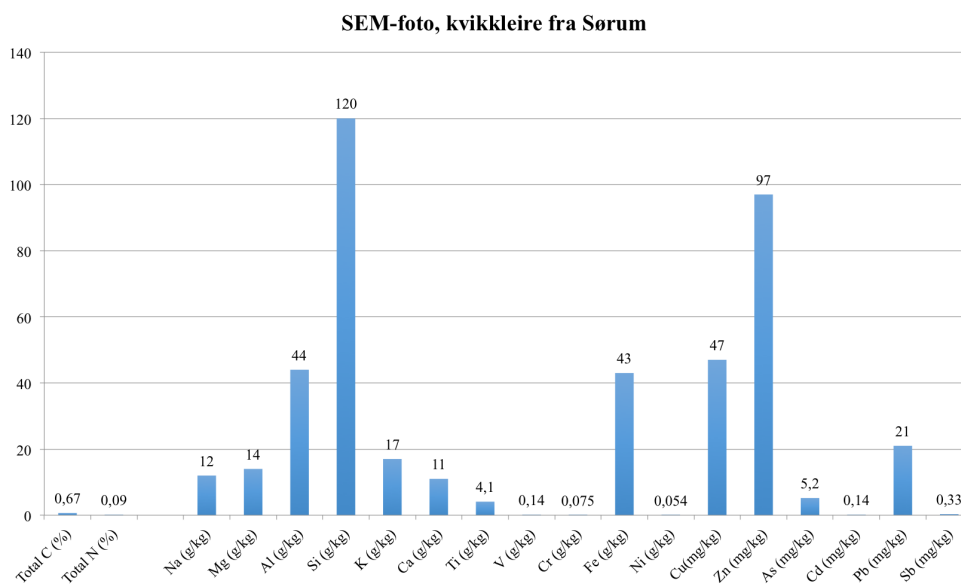
Figur A.55: SEM-foto av kvikkleire fra Sørumsund

Quantitative results

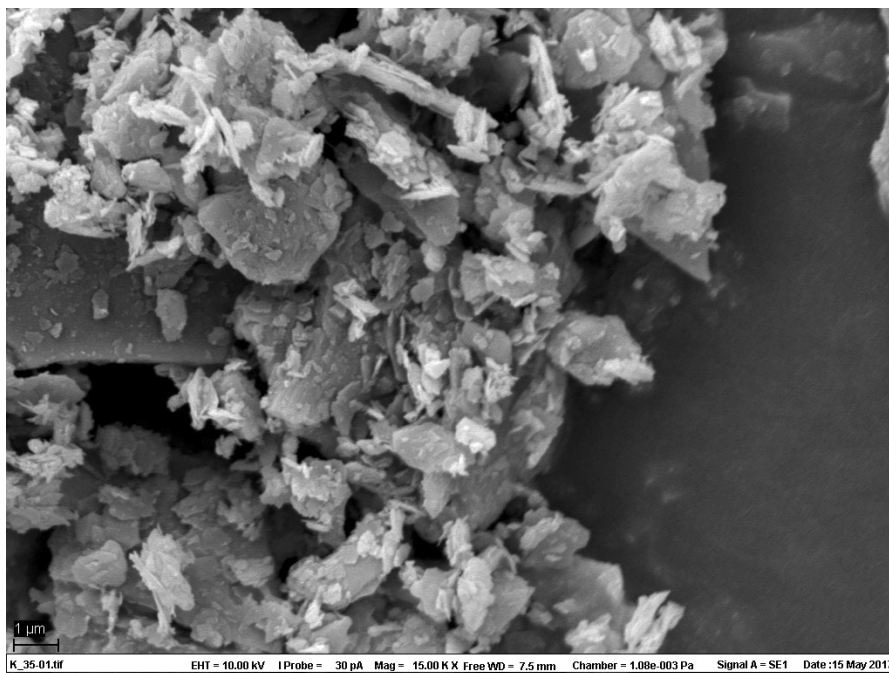


Figur A.56: Innhold i vektprosent av mineraler i kvikkleire fra Sørumsund, fra SEM-foto^a

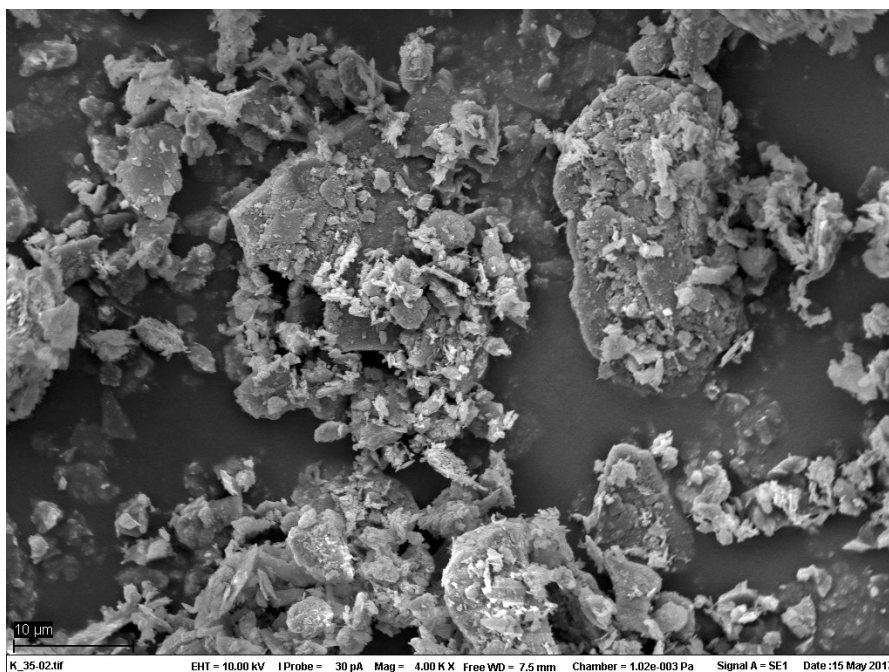
^aFotoet indikerer her 0% Mg selv om testen får utslag.



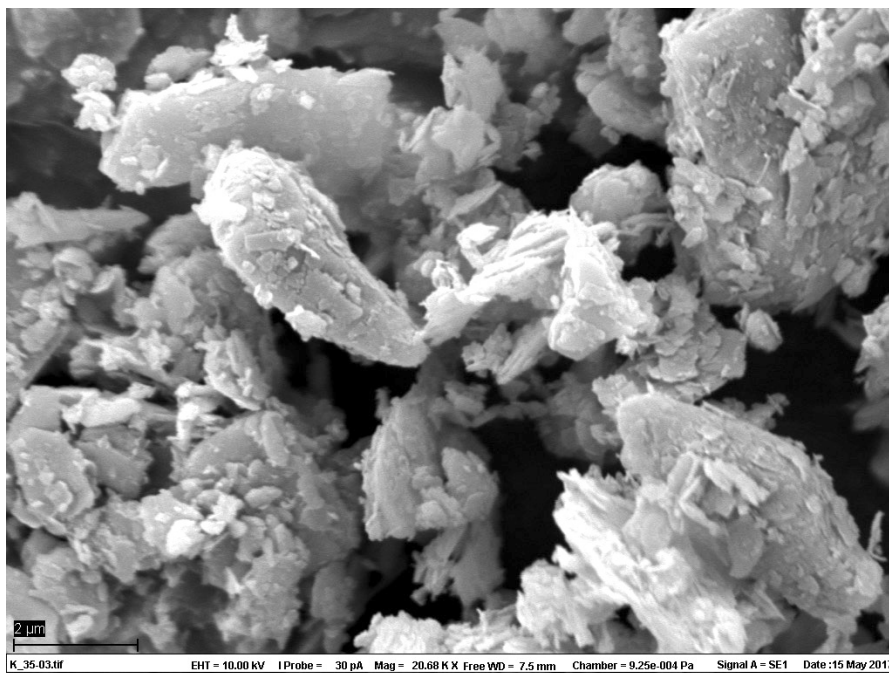
Figur A.57: Totalanalyse fra SEM av kvikkleire fra Sørumsund, K-0-0-C



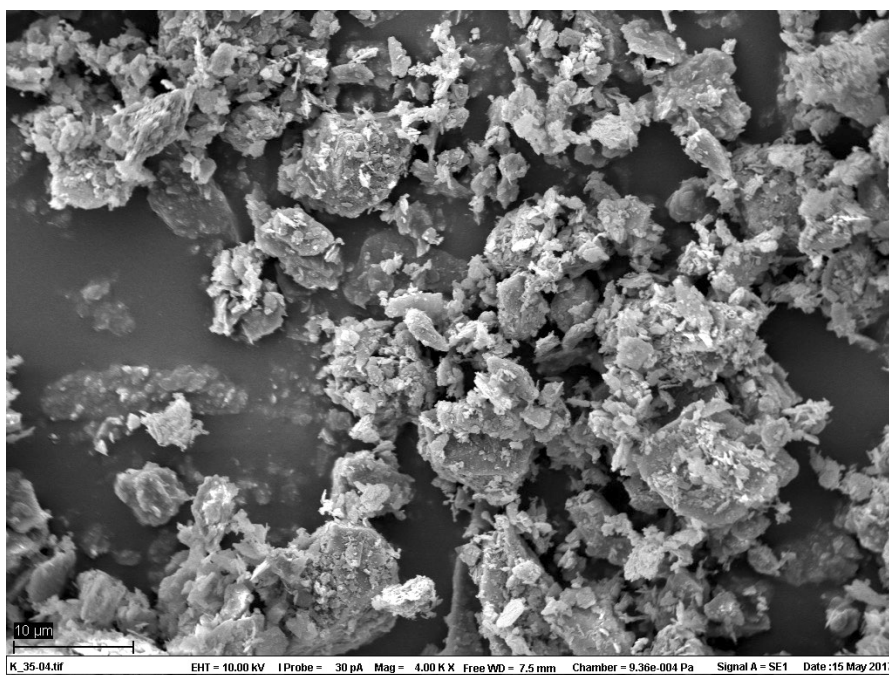
Figur A.58: SEM-foto av K-35 uke 12. Forstørret 15000x, målestokk 1 μm.



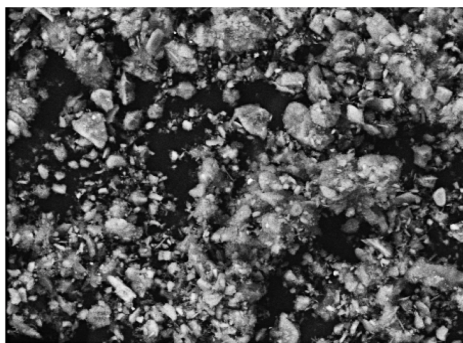
Figur A.59: SEM-foto av K-35 uke 12. Forstørret 4000x, målestokk 10 μm.



Figur A.60: SEM-foto av K-35 uke 12. Forstørret 15000x, målestokk 2 µm.

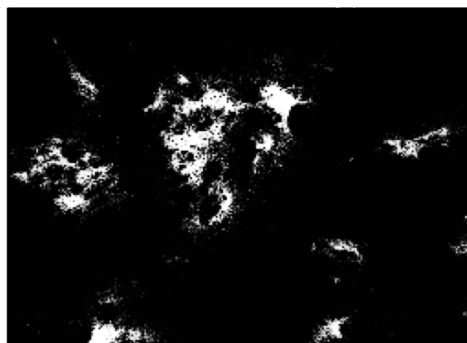


Figur A.61: SEM-foto av K-35 uke 12. Forstørret 4000x, målestokk 10 µm.



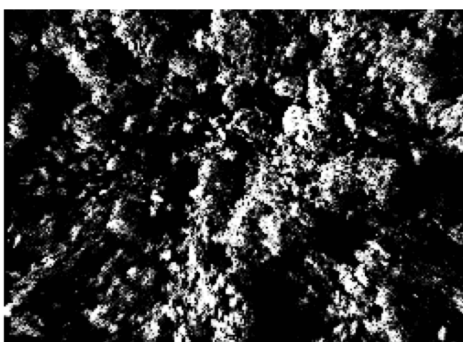
Electron Image 1

(a) Electron image av K-35 uke 12



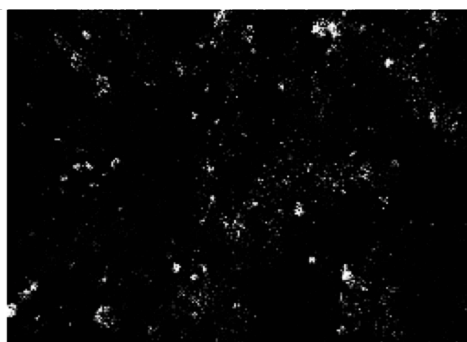
C Ka1_2

(b) Karbon (C) indikert med hvit farge



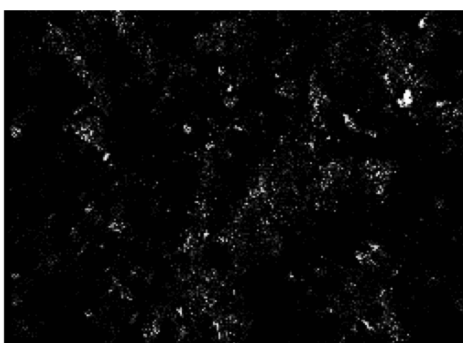
O Ka1

(c) Oksygen (O) indikert med hvit farge



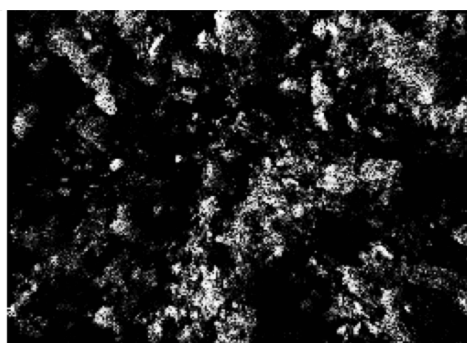
Na Ka1_2

(d) Natrium (Na) indikert med hvit farge



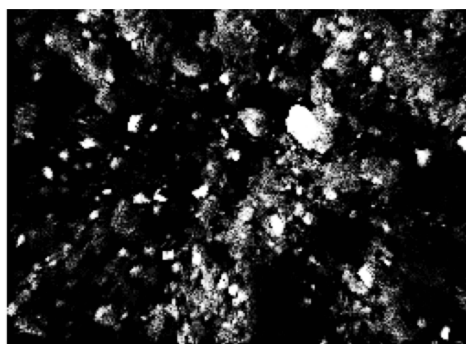
Mg Ka1_2

(e) Magnesium (Mg) indikert med hvit farge



Al Ka1

(f) Aluminium (Al) indikert med hvit farge



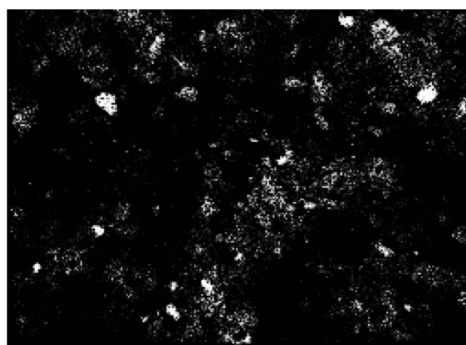
Si Ka1

(g) Silisium (Si) indikert med hvit farge



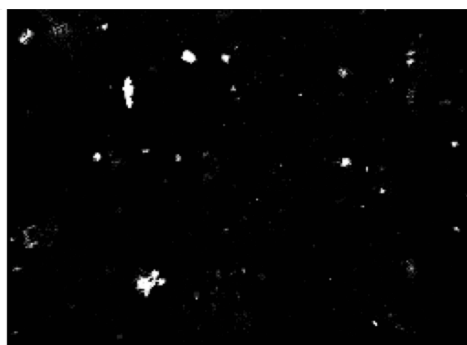
S Ka1

(h) Svovel (S) indikert med hvit farge



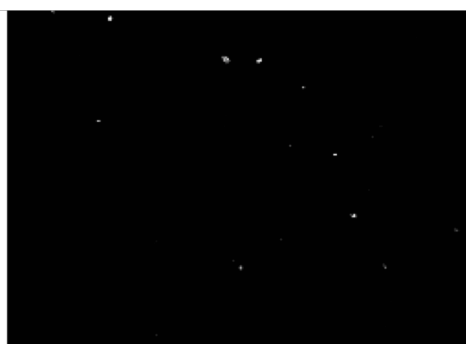
K Ka1

(i) Kalium (K) indikert med hvit farge



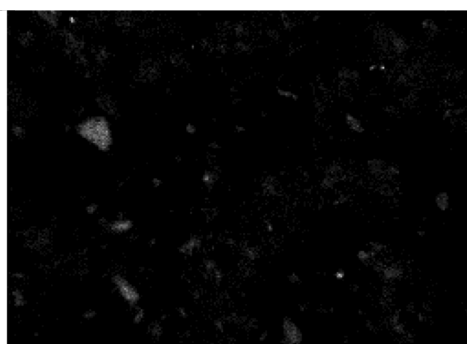
Ca Ka1

(j) Kalsium (Ca) indikert med hvit farge



Ti Ka1

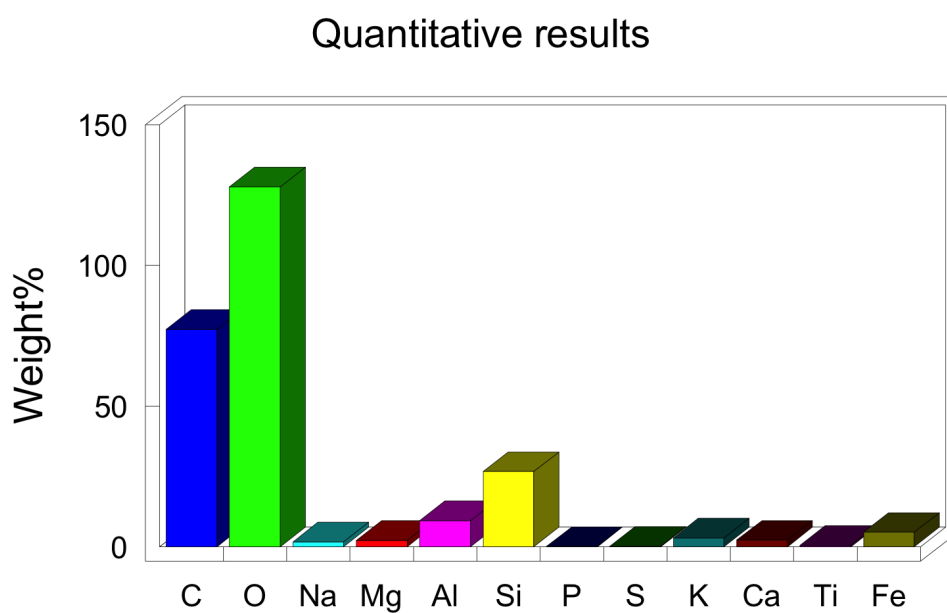
(k) Titan (Ti) indikert med hvit farge



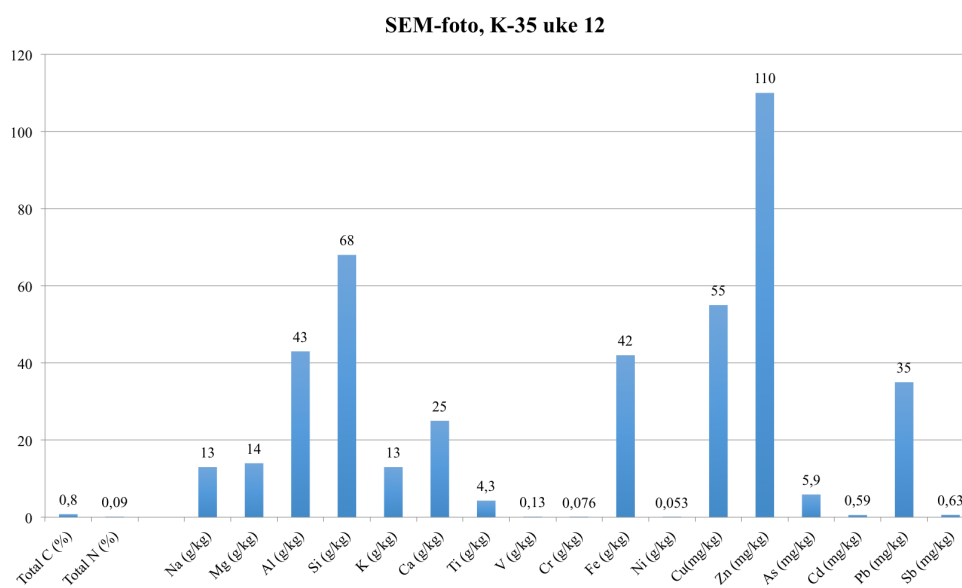
Fe Ka1

(l) Jern (Fe) indikert med hvit farge

Figur A.62: SEM-EDX foto av K-35 uke 12



Figur A.63: Innhold i vektprosent av mineraler i K-35 uke 12, fra SEM-foto



Figur A.64: Totalanalyse fra SEM uke 12. K-35-4

Vedlegg B

Utregninger


B.1 Innblanding av Multicem og sement

Det ble blandet Multicem og sement med ren leire i to omganger grunnet manglende rutineundersøkelser i uke 0. Ved utregning av mengde bindemiddel i blandingen, ble verdier fra Nytt Nasjonalmuseum tatt i betraktning med mengde bindemiddel i kg/m^3 lik 115 og γ_{leire} lik $18 \text{ kN}/\text{m}^3$. Formler i veilederen til NGF ble benyttet:


$$\text{Mengde KS} = \frac{\text{Mengde Multicem/ sement i kg pr } m^3 \text{ leire}}{\frac{\gamma_{leire}}{9,81 \text{ m/s}^2}}$$

Innblandingsmengde var 50% Multicem og 50% sement.

Uke 0

Beregning av kalk sement innh.		Mal: H:\Regneark\luft\beregning av kalk sement innh1.xlt	
		Laget av :	MAS
		Dato/Rev.nr.:	11.02.2003/00
		Kontrollert av:	GS
Generelt:			
Dette regnearket beregner innhold av kalk sement. For alle ark gjelder det at grå felt fylles ut av brukeren, beregnede resultater fremkommer som røde og "fete" tall. Det er to forskjellige innblandingsforhold i bruk arket gir formler for begge.			
Prosjekt nummer		20110171	
Borhulls nummer			
Sylinder eller pose nummer			
Del av sylinder			
Dybde (m)			
Antall tester på blandingen			
Antall dager fra blanding til test/tester skal utføres		3,7,14,21,28	
1 Mengde innblandingsmiddel i forhold til volum leire.			
Mengde kalksement i kg pr m ³ leire		115	kg/m ³
γ leire		18	kN/m ³
% innblanding av sement		50	Σ skal være 100%
% innblanding av kalk		50	
Mengde i g kalk/sement (m _{ks1}) pr kg leire		62,68	g/kg
Mengde leire det skal blandes Kalk/sement i		5697,00	g
Mengde sement i blandingen		178,53	g
Mengde kalk i blandingen		178,53	g
Kontroll		riktig	
2 Mengde innblandingsmiddel i prosent i forhold til leiras tørrvekt.			
% mengde av kalk/sement i forhold til tørrvekt			%
Mengde leire det skal blandes Kalk/sement i			g
Leiras vanninnhold			%
Leiras tørre masse		*	g
% innblanding av sement			Σ skal være 100%
% innblanding av kalk			
Mengde kalk/sement (m _{ks2}) i blandingen		*	g
Mengde sement i blandingen		*	g
Mengde kalk i blandingen		*	g
Kontroll		#VERDI!	
Blanding utført av:	Dato:		Dato: 19.10.16
Prosjekt nr.: 20110171	Borhull:	Sylinder:	Del: Test:
			

Figur B.1: Innblandingsforhold for kvikkleire, Multicem og sement uke 0

Beregning av kalk sement innh.		Mal: H:\Regnearkluct\beregning av kalk sement innh1.xls	
		Laget av :	MAS
		Dato\Rev.nr.:	11.02.2003/00
		Kontrollert av:	GS
Generelt:			
Dette regnearket beregner innhold av kalk sement. For alle ark gjelder det at grå felt fylles ut av brukeren, beregnede resultater fremkommer som røde og "fete" tall. Det er to forskjellige innblandingsforhold i bruk arket gir formler for begge.			
Prosjekt nummer		20110771	
Borhulls nummer			
Sylinder eller pose nummer			
Del av sylinder			
Dybde (m)			
Antall tester på blandingen			
Antall dager fra blanding til test/tester skal utføres		3,7,14,21,28	
1 Mengde innblandingsmiddel i forhold til volum leire.			
Mengde kalksement i kg pr m ³ leire		115	kg/m ³
γ leire		18	kN/m ³
% innblanding av sement		50	Σ skal være 100%
% innblanding av kalk		50	
Mengde i g kalk/sement (m _{ks1}) pr kg leire		62,68	g/kg
Mengde leire det skal blandes Kalk/sement i		4819,47	g
Mengde sement i blandingen		151,03	g
Mengde kalk i blandingen		151,03	g
Kontroll		riktig	
2 Mengde innblandingsmiddel i prosent i forhold til leiras tørrvekt.			
% mengde av kalk/sement i forhold til tørrvekt			%
Mengde leire det skal blandes Kalk/sement i			g
Leiras vanninnhold			%
Leiras tørre masse		*	g
% innblanding av sement			Σ skal være 100%
% innblanding av kalk			
Mengde kalk/sement (m _{ks2}) i blandingen		*	g
Mengde sement i blandingen		*	g
Mengde kalk i blandingen		*	g
Kontroll		#VERDI!	
Blanding utført av:	Dato:		Dato: 19.10.16
Prosjekt nr.: 20110771	Borhull:	Sylinder:	Del: Test:
			

Figur B.2: Innblandingsforhold for bløt leire, Multicem og sement uke 0

Uke 12

Beregning av kalk sement innh.		Mal: H:\Regneark\luft\beregning av kalk sement innh1.xlt	
Laget av :		MAS	
Dato/Rev.nr.:		11.02.2003/00	
Kontrollert av:		GS	
Generelt:			
Dette regnearket beregner innhold av kalk sement. For alle ark gjelder det at grå felt fylles ut av brukeren, beregnede resultater fremkommer som røde og "fete" tall. Det er to forskjellige innblandingsforhold i bruk arket gir formler for begge.			
Prosjekt nummer		20110171	
Borhulls nummer			
Sylinder eller pose nummer			
Del av sylinder			
Dybde (m)			
Antall tester på blandingen			
Antall dager fra blanding til test/tester skal utføres		3,7,14,21,28	
1 Mengde innblandingsmiddel i forhold til volum leire.			
Mengde kalksement i kg pr m ³ leire		115	kg/m ³
γ leire		18	kN/m ³
% innblanding av sement		50	Σ skal være 100%
% innblanding av kalk		50	
Mengde i g kalk/sement (m _{ks1}) pr kg leire		62,68	g/kg
Mengde leire det skal blandes Kalk/sement i		1000,00	g
Mengde sement i blandingen		31,34	g
Mengde kalk i blandingen		31,34	g
Kontroll		riktig	
2 Mengde innblandingsmiddel i prosent i forhold til leiras tørrvekt.			
% mengde av kalk/sement i forhold til tørrvekt			%
Mengde leire det skal blandes Kalk/sement i			g
Leiras vanninnhold			%
Leiras tørre masse		*	g
% innblanding av sement			Σ skal være 100%
% innblanding av kalk			
Mengde kalk/sement (m _{ks2}) i blandingen		*	g
Mengde sement i blandingen		*	g
Mengde kalk i blandingen		*	g
Kontroll		#VERDI!	
Blanding utført av:	Dato:		Dato: 21.02.17
Prosjekt nr.: 20110171	Borhull:	Sylinder:	Del: Test:



Figur B.3: Innblandingsforhold for kvikkleire, Multicem og sement uke 12

B.2 Beregning av dekningsgrad og uttynning

Dekningsgrad η

En dekningsgrad beskriver i prosent hvor stor andel av et areal og volum som består av ubehandlet leire, og hvor stor del som består av stabilisert masse i form av peler.

Ved beregning av dekningsgrad i denne oppgaven, ble tegninger for Nytt Nasjonalmuseum benyttet som grunnlag. Ut fra dette ble fire ulike snitt tatt i betraktning, og antall peler innenfor dette området ble talt opp. Pelene hadde en diameter på 600 mm. Deretter ble dekningsgraden beregnet ut fra følgende formel:

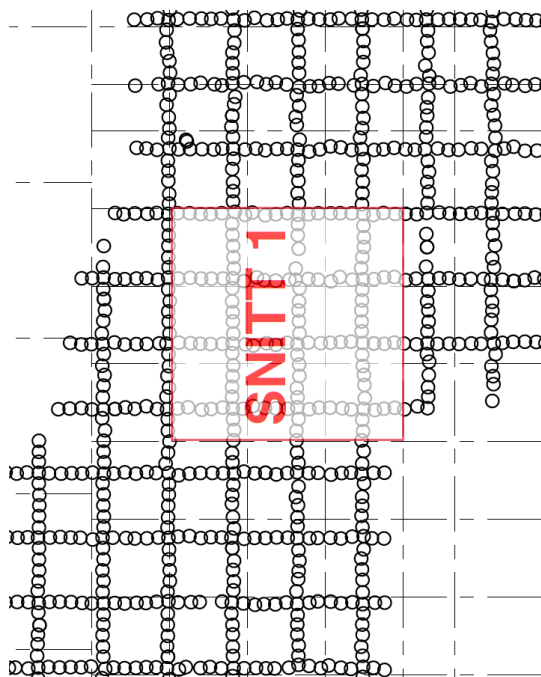
$$\text{Dekningsgrad} = \frac{\text{Areal peler (m}^2\text{)}}{\text{Areal snitt (m}^2\text{)}} \cdot 100\%$$

Oppsummering av utregningene vises i tabell B.1. Hele plantegningen vises i figur B.4, mens utsnitt av hvert snitt presenteres i figur B.5-B.8.

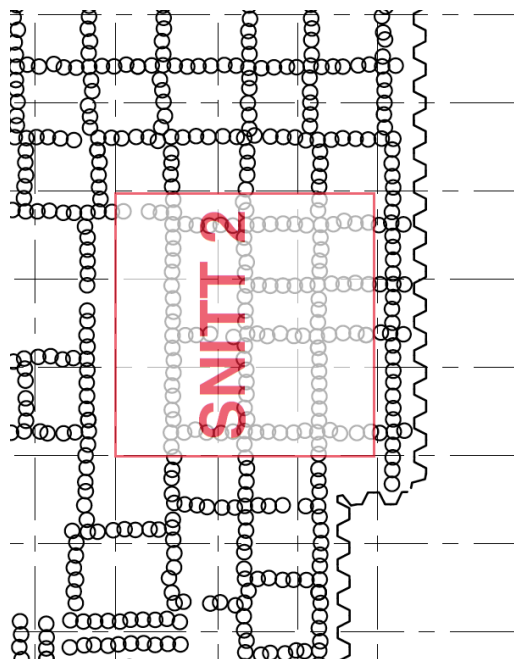
Tabell B.1: Benyttede verdier for utregning av dekningsgrad

Snitt	Parameter					
	Bredde (m)	Lengde (m)	Areal (m ²)	Antall peler	Areal peler (m ²)	Dekningsgrad (%)
Snitt 1	10,8	11,6	125,3	151	42,7	34,1
Snitt 2	11,6	11,4	132,2	119	33,6	25,4
Snitt 3	14,3	9,0	128,7	159,5	45,1	35,0
Snitt 4	10,8	9,8	105,8	177	50,0	47,3

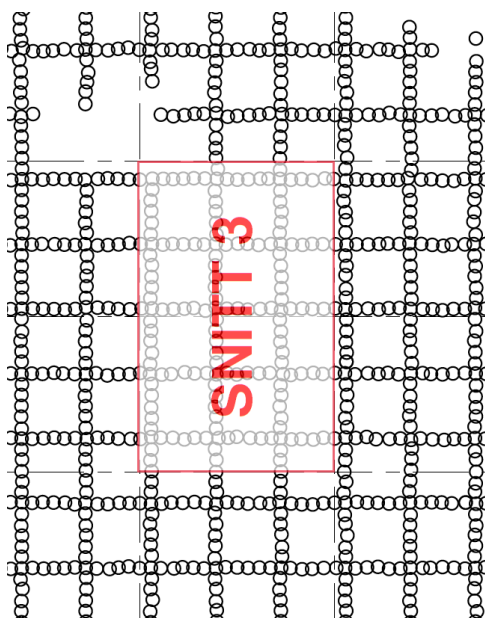
Av dette ses en gjennomsnittlig dekningsgrad på 35%.



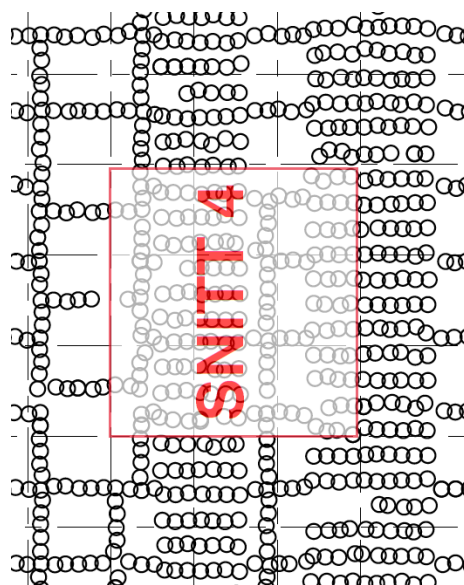
Figur B.5: Snitt 1 benyttet til utregning av dekningsgrad η



Figur B.6: Snitt 2 benyttet til utregning av dekningsgrad η



Figur B.7: Snitt 3 benyttet til utregning av dekningsgrad η



Figur B.8: Snitt 4 benyttet til utregning av dekningsgrad η

Uttynning med ren leire, uke 4

Ved uttynning av Multicem-/sementpeler med ren leire måtte mengdeforholdet mellom pel og ren leire bestemmes. Ved å anta at en sylinder Multicem-/sementpel veier 0,45 kg og at denne igjen utgjør 35% eller 25% av den totale blandingen, ble følgende relasjoner benyttet:

$$\text{Mengde leire (kg)} = \frac{\text{KS-pel (kg)}}{35\%} \cdot 65\% \qquad \text{Mengde leire (kg)} = \frac{\text{KS-pel (kg)}}{25\%} \cdot 75\%$$

Dette gav følgende resultat:

Tabell B.2: Beregning for uttynning av Multicem-/sementpeler med ren leire

Dekningsgrad	Parameter			
	w_{Pel} (%)	Pelemateriale (kg)	w_{Leire} (%)	Nødvendig leirmateriale (kg)
35%	32,2	1,0	32,8	1,87
25%	32,2	1,063	32,8	3,0

B.3 Beregning av teoretisk vanninnhold

Det teoretiske vanninnholdet etter uttynning ble beregnet for å kunne sammenligne verdiene med de faktiske funnet gjennom laboratorieundersøkelser. Følgende formler ble benyttet:

$$\text{Vanninnhold etter uttynning, } \eta \text{ lik 35\%} = \frac{x \text{ kg KS-pel} \cdot w_{Pel} + y \text{ kg leire} \cdot w_{Leire}}{\frac{1}{35\%}}$$

$$\text{Vanninnhold etter uttynning, } \eta \text{ lik 25\%} = \frac{x \text{ kg KS-pel} \cdot w_{Pel} + y \text{ kg leire} \cdot w_{Leire}}{\frac{1}{25\%}}$$

Tabell B.3: Benyttede verdier i utregning for $w_{Uttynnet}$

Parameter	K-35		B-35	K-25	
	NGI-leire	Sørumleire	NGI-leire	NGI-leire	Sørumleire
w_{Pel} (%)	32,2	32,2	34,0	32,2	32,2
Pelemateriale (kg)	1,0	1,0	0,74	1,06	1,06
w_{Leire} (%)	32,8	35,8	40,1	32,8	35,8
Leirmateriale (kg)	1,87	1,87	1,38	3,0	3,0
$w_{Uttynnet, teoretisk}$ (%)	36,7	32,7	38,1	33,2	37,7

B.4 Beregning av innhold av Multicem og sement etter uttynning

For å beregne hvor mye bindemiddel som teoretisk befant seg i det uttynnede pelematerialet, ble følgende relasjoner benyttet:

$$\text{Prosentvis mengde bindemiddel (\%)} = \frac{\text{Mengde bindemiddel (g)}}{\text{Total mengde materiale (g)}} \cdot 100\%$$

$$\text{Andel bindemiddel (g/kg)} = \frac{\text{Prosentvis mengde bindemiddel} \cdot \text{Total mengde materiale}}{\frac{1}{\text{Dekningsgrad}\eta}}$$

Tabell B.4: Beregning av innhold av Multicem og sement etter uttynning

Dekningsgrad	Parameter			
	Mengde bindemiddel (g)	Total mengde materiale (g)	Prosentvis mengde bindemiddel (%)	Andel bindemiddel (g/kg)
35%	62,68	2922,68	2,14	21,9
25%	62,68	4062,68	1,54	15,6