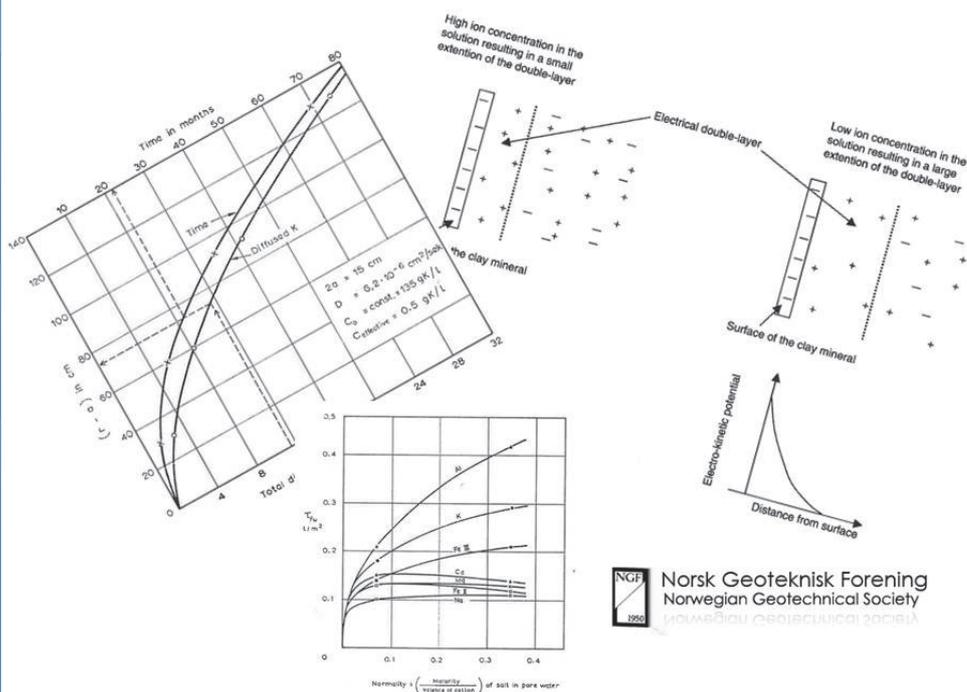




Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire

Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire

33
2013



R
A
P
P
O
R
T

Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire

Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire

Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og
Jernbaneverket

2013

Rapport nr. 33/2013

Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med NGI, Statens vegvesen og Jernbaneverket

Utarbeidet av: Tonje Eide Helle

Dato: 21.12.2012

Opplag: P.O.D.

ISBN: 978-82-410-0901-3

Sammendrag: Etatene Statens vegvesen (SVV), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Jernbaneverket (JBV) har, gjennom etatsatsningsprosjektet Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS), et delprosjekt (DP6) som omhandler kvikkleire. Norsk geoteknisk forening (NGF) og NIFS har sammen finansiert et forprosjekt med tittelen «Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire».

Emneord: Kvikkleire, Saltdiffusjon, Grunnforsterkning

NIFS-prosjektet er et felles satsningsområde mellom Jernbaneverket, Norges vassdrags- og energidirektorat og Statens vegvesen.

Prosjektperioden er definert som 2012 – 2015. Planlagt budsjett på 42 millioner i perioden.

Stort fokus på intern kompetanse og faglig utvikling bidrar i tillegg med anslagsvis 30 årsverk fra etatene i samme periode. Prosjektet er allerede i leveransefasen, 7 delprosjekter er etablert, og opp i mot 100 medarbeidere i de tre etatene er involvert i større eller mindre grad.

FORORD

Denne rapporten omhandlar forprosjektet “Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire”. Forprosjektet omfattar eit litteraturstudium, berekningar og kostnadsvurdering av installasjon av saltbrønnar. Tonje Eide Helle sitt arbeid er finansiert via stipend frå Norsk Geoteknisk Forening, og NGI sitt arbeid er finansiert av Norges Vassdrags- og Energidirektorat.

Takk til Øyvind Høydal og Tor Løken ved NGI, Eirik Traae ved NVE Region Sør og Elisabeth Gundersen, Frode Oset og Vikas Thakur ved Vegdirektoratet for gode diskusjonar.

Trondheim, 21. desember 2012

Tonje Eide Helle
Vegdirektoratet, seksjon for geoteknikk og skred

INNHALDSLISTE

FORORD.....	3
1 Innleiing	5
2 Geokjemi i marine leirer og innverknad på geotekniske parameterar	5
2.1 Saltinnhald i kvikkleire.....	5
2.2 Ionesamansetjinga i porevatnet	7
2.3 Geokjemien sin innverknad på geotekniske eigenskapar	8
2.4 Feltforsøk – installasjon av saltbrønner	11
3 Molekylær diffusjon i leire.....	14
3.1 Diffusjonskoeffisientar i leire	14
3.2 Teoretisk grunnlag for utrekning av diffusjon.....	16
3.3 Tilbakerekning av Moum et al. (1968).....	17
4 Installasjonsmetode	18
5 Berekningseksempel Bøle	20
5.1 Auke i skjærstyrke for å oppnå tilfredsstillande sikkerheit	20
5.2 Kostnadsoverslag	22
5.2.1 c/c-avstand 2,5 m, to installasjonsrundar	22
5.2.2 c/c-avstand 3,0 m, to installasjonsrundar	23
5.2.3 c/c-avstand 2,5 m, ein installasjonsrunde.....	23
6 Oppsummering og konklusjonar	24
7 Vidare arbeid	25
8 Referansar.....	26

1 Innleiing

Det kan vere ei utfordring å drive anleggsverksemd i områder med sensitive, marint avsette leirer. Kalksementpeling medfører auka poretrykk, og store fyllingar kan vere vanskeleg å gjennomføre grunna dårleg sikkerheit i anleggsfasen. I tillegg kan det vere problematisk å utføre sikringstiltak med store dimensjonar i tett utbygde områder, og der det er verneverdige verdier til stades.

I kvikkleireområde med låg berekningsmessig stabilitet kan grunnforsterking ved tilsetjing av salt vere eit godt alternativ. Norges Geotekniske Institutt utførte fleire studier på 60-,70-og 80-talet for å finne porevasskjemien og effekten ulike salttilsetjingar hadde på eigenskapane til marint avsette leirer. Installasjon av saltbrønner blei utført i felt med gode resultat. Innvasking av salt i leire er ein tidkrevjande prosess, og leira vil ikkje oppnå full styrke før etter fleire år avhengig av materialeigenskapane til leira og strøymingsforholda. Det har i fleire år vore hevda at metoden er for kostbar og tidkrevjande utan grundigare analysar av dette.

Målsetjinga med prosjektet er å studere effekten saltdiffusjon har på styrkeparameterane, aktualisere metoden og å lage retningslinjer for bruk av metoden til stabiliserande tiltak i kvikkleirskrånningar. Forprosjektet er utført i samarbeid mellom Statens Vegvesen, NVE og NGI, og vil bli vidareført gjennom etatsprogrammet Naturfare – infrastruktur, flom og skred.

Denne rapporten gir ein gjennomgang av geokjemien i norske marint, avsette leirer og effekten tilsett salt har på desse. I tillegg er det gjort ei tilbakerekning av resultatata i Moum et al. (1968) for å danne grunnlag for modellering av saltbrønner i felt. Rapporten omtalar også aktuelle installasjonsmetodar, og estimerar kostnader for installasjon av saltbrønner som sikringstiltak i kvikkleiresona Bøle i Skien kommune.

2 Geokjemi i marine leirer og innverknad på geotekniske parameterar

2.1 Saltinnhald i kvikkleire

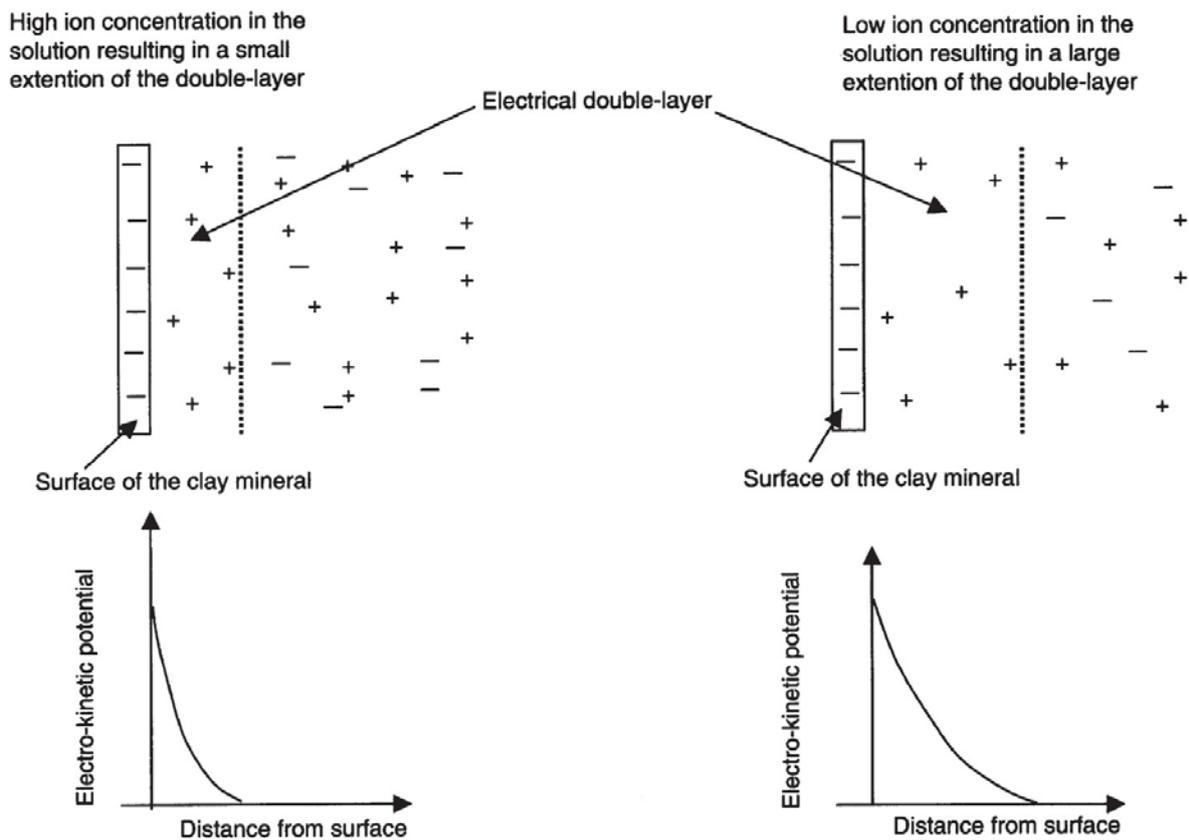
Under istida blei bergartane slipt ned av iskappa. Det nedknuste finstoffet blei transportert med elvane under breane og avsatt under havnivå. Det salte havvatnet førte til at leirpartiklane flokkulerte og danna ein open kornstruktur med porar fylte med saltvatn. Ionane i saltvatnet førte til sterke bindingar mellom leirminerala.

Etter kvart som iskappa trakk seg tilbake, starta landhevinga. Havet trakk seg tilbake og meir og meir av fastlands Noreg blei tørt land. Det før så salte porevatnet i leira blei gradvis utvaska som følgje av infiltrasjon av ferskvatn via overflata (nedbør), grunnvasstraumar og diffusjon. Dette har vore ein tidkrevjande prosess då dei hydrauliske gradientane blir små som følgje av den låge permeabiliteten i norske leirer.

Saltinnhaldet i avsetjingsmiljøet og ionesamansetjinga har innverknad på eigenskapane til leira. Talme (1968) skildrar korleis det opprinnelege saltinnhaldet kan ha vore i avsetjingsmiljøet til den marine leira i det Baltiske hav. Avsetjingsmiljøet har veksla mellom fersk- og brakkvatn til sjøvatn gjennom Kattegatt. Truleg var saltinnhaldet i vatnet høgare enn dagens nivå. Det er uvisst kva saltinnhald sjøvatnet langs norskekysten hadde under istida, og følgjeleg kva saltinnhold dei norske marine leirene hadde opprinneleg. Truleg har saltinnhaldet vore høgare

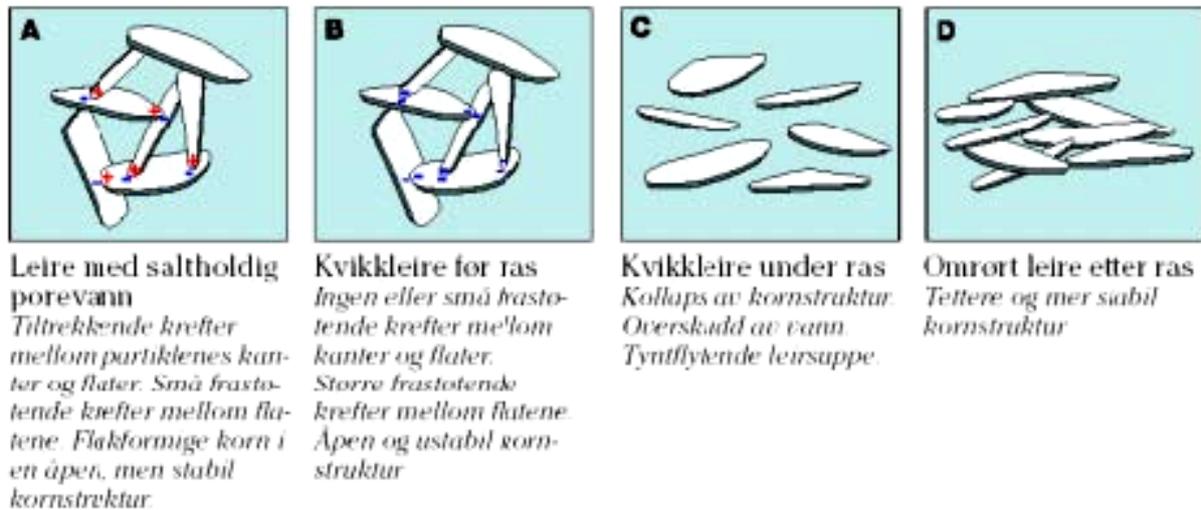
langs kysten på Vestlandet, medan den har vore lågare, kanskje liknande brakkvatn, i Osloområdet.

Leirminerala er tynne og plateforma og vanlegvis negativt ladde. I metta leiravsetjingar vil positive ion i porevatnet danne ein sfære rundt dei negativt ladde leirminerala for å nøytralisere ladningen. Denne sfæren kallast det diffuse laget. Dette laget saman med partikkelladinga kallast det diffuse elektriske dobbeltlaget. Dei adsorberte iona på mineraloverflata vil alltid prøve å vere i likevekt med tilgjengelege ion i porevatnet. Difor vil det innanfor det diffuse dobbeltlaget vere kation som både er løyst frå sine posisjonar på mineraloverflata og kation frå porevatnet som er tiltrukne det negativt ladde ionet. Ved høge ionekonsentrasjonar i porevatnet vil det vere høg konsentrasjon av ion nærmast mineraloverflata, og følgjeleg vil utbreiinga av det diffuse laget vere liten. Konsentrasjonen av kationane avtek med avstanden frå leirpartikkelen heilt til det er likevekt mellom kation og anion (Figur 1).



Figur 1 Utbreiing av det diffuse dobbeltlaget. Frå Rankka et al. 2004.

I suspendert tilstand vil leirpartiklane tiltrekkje og fråstøytte kvarandre avhengig av ladningen på partiklane. Dei fråstøytande kreftene avheng av tjuknaden på det diffuse dobbeltlaget. Ved høge ionekonsentrasjonar, og følgjeleg tynt dobbeltlag, vil leirpartiklane bevege seg tett inntil kvarandre og flokkulere. I kvikkleire der dei tiltrekkande kreftene er langt mindre enn i salt leire, vil leirminerala få ein tettare struktur etter omrøring sidan evna til å flokkulere er blitt mindre (Figur 2).



Figur 2 Illustrasjon av strukturen til flokkulerte leirpartiklar. Frå Sveian et al. 2002.

Det har vore gjort fleire forsøk på å definere ei nedre grense for saltinnhald der leire går over til å vere kvikk. Tidlege definisjonar av Rosenqvist (1954) og Bjerrum (1954b) hevda at saltinnhald lågare enn 10 g/l ville kunne medføre kvikkleiredanning. Metodane for måling av saltinnhaldet har endra seg sidan den gong. På 70-talet utførte Moum et al. (1971) og Torrance (1974, 1979) forsøk der dei fann at saltinnhald så lågt som 1 g/l og 2 g/l var tilstrekkeleg for å utvikle kvikkleire som blir flytande ved omrøring. Det er gjort funn både i Noreg og Sverige der saltinnhaldet er høgare enn dette og likevel fell inn under definisjonen av kvikkleire. Helle et al. (2009) fann 4,1 g/l, medan Andersson-Sköld et al. (2005) fann verdiar heilt opp i 5,6 g/l.

I følgje Torrance (1983) er det fleire faktorar som avgjer om kvikkleire kan dannast eller ikkje. I tillegg til utvasking av salt frå den marine leira, må mineral med låg aktivitet dominere sedimentet (illitt og kloritt), og konsolidering etter avsetjing må vere så liten at det naturlege vassinnhaldet fortsatt er høgt. Ein kan dermed ikkje fastsetje ei nedre grense for saltinnhaldet i kvikkleira. Ionesamansetjinga i porevatnet har vist seg å ha vel så stor innverknad på om leira blir kvikk eller ikkje i tillegg til faktorane som Torrance (1983) påpeikar.

2.2 Ionesamansetjinga i porevatnet

I følgje Mitchell (1976) er dei mest vanlege kationa i porevatnet i leire Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} og K^{+} , medan dei mest vanlege aniona er SO_4^{2-} , Cl^{-} , PO_4^{3-} og NO_3^{-} . Rosenqvist (1954) hevdar at dei vanlegaste aniona i norske marine leirer er klorid (Cl^{-}), sulfat (SO_4^{2-}), karbonat (CO_3^{2-}), hydrogenkarbonat (HCO_3^{-}) og hydroksidion (OH^{-}).

Fleire forfattarar har påpeikt ionane sin innverknad på kvikkleiredanning. Talme et al. (1966) fann at konsentrasjonen av Mg^{2+} og Ca^{2+} i porevatnet var lågare i kvikk enn i ikkje-kvikk leire. Dette er også stadfesta i studia til Moum et al. (1971), Andersson-Sköld et al. (2005) og Helle et al. (2009). Moum et al. (1971) fann at sensitiviteten var påverka av summen av K^{+} , Mg^{2+} og Ca^{2+} i porevatnet.

Ei leire kan ha saltinnhald tilsvarande det ein kan forvente å finne i kvikkleire, og likevel ikkje vere kvikk. Dette kan skuldast at leira tidlegare har vore kvikk, men grunna forvitring og innvasking av ion har leira gått over frå kvikk til ikkje-kvikk tilstand. Løken (1968) skriv at ei gradvis senking av pH ved utvasking av salt vil bryte ned kalk, kloritt, feltspat og glimmer.

Som følge av dette vil kation komme i løysning og kunne adsorberast på mineraloverflata og endre styrkeegenskapane i leira. I følge Rankka et al. (2004) vil også hardheiten til grunnvatnet ha innverknad på utviklinga. Utvasking av leira med "hardt vatn" med høgt innhald av Ca^{2+} og Mg^{2+} vil forhindre kvikkleiredanning, medan utvasking med "blautt vatn" med større mengde Na^+ vil kunne medføre danning av kvikkleire.

Leirmineral har stor ionebyttekapasitet. Det er likevekt mellom ionane i dobbeltlaget (Figur 1) og i porevatnet. Det vil seie at det føregår ei kontinuerleg utskifting av kation avhengig av konsentrasjonen av ionar og ionesamansetjinga i porevatnet. Ion frå porevatnet kan erstatte ion som er svakt bunde til leirpartikkelen. Ionebyttet avheng i stor grad av valensen til ionet, tilgang til ulike ion og storleiken til ionet i porevatnet. Normalt vil små kation erstatte ion med større radius på mineraloverflata, men det motsatte kan og finne stad.

Kationa har ulik evne til å bli adsorbent. Løken (1968) gjengir kationa si evne til å bli adsorbent til overflata av leirminerala i stigande rekkefølge:
 $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Fe}^{2+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Al}^{3+}$

Torrance (1999) sitt arbeid viser at natrium er det dominerande kationet i porevatnet i uforvittra marine sediment. På den andre sida er natriumet det kationet med minst evne til å bli adsorbent til leirminerala. Dei adsorbente kationa er i hovudsak magnesium og kalsium. Dette grunna at fleirvalente kation har større evne til å binde seg enn einverdige kation.

2.3 Geokjemien sin innverknad på geotekniske eigenskapar

Som skildra ovanfor vil porevasskjemien vere ein av dei avgjerande faktorane for danning av kvikkleire. Porevasskjemien vil dermed ha stor innverknad på dei geotekniske eigenskapane i marine leirer.

Ved tilsetjing av salt i utvaska marine leirer vil ionekonsentrasjonen i porevatnet auke, og ionebyttreaksjonar vil inntre. Dersom det tilsatte saltet har større ionebyttekapasitet enn det adsorbente ionet som fins på leirminerala, vil desse skifte plass. Konsentrasjonen av dei tidlegare adsorbente iona vil auke i porevatnet, medan konsentrasjonen av kation frå det tilsatte saltet vil avta i porevatnet.

Kjemiske analysar av porevatnet har vist at konsentrasjonen av oppløyst kalium og natrium er høgare i dei øvre delane av leirprofilet enn i dei djupare seksjonane. I område der leira har lågt innhald av elektrolyttar (lågt saltinnhald) og relativt låg sensitivitet, er kaliuminnhaldet høgt i forhold til natrium (Rosenqvist 1954). Dette er i følge Løken (1968) grunna lausrevne ion frå forvittra leirmineral.

Bjerrum (1954a) fann at Skempton aktiviteten (plasisitetsindeks/leirinnhald) auka med aukande saltinnhald opp til 10-15 g/l for deretter å bli tilnærma konstant. Løken (1970) hevdar at leirer tilsatt NaCl har lågast aktivitet, etterfølgt av leirer behandla med divalente kation. Høgast aktivitet er funne i leirer behandla med Fe^{3+} og K^+ .

Løken et al. (1967) utførte ein forsøksserie der ulike salt blei tilsatt ei omrørt normalkonsolidert kvikkleire med enkelte siltlag. NaCl, KCl, MgCl_2 , CaCl_2 , FeCl_2 , FeCl_3 og AlCl_3 blei løyst opp i destillert vatn og tilsatt leira.

Na^+ , Fe^{2+} , Mg^{2+} og Ca^{2+} gav ingen auka effekt på omrørt skjærstyrke ved å tilsetje høgare konsentrasjonar. Leira blei ”metta” allerede ved ”lågsalt” konsentrasjon. Fe^{3+} , Al^{3+} og K^+ derimot viste aukande effekt ved aukande konsentrasjon. Dvs. at fleire kation blir adsorbent til leirminerala ved høgare konsentrasjonar.

Det blei konkludert med at flytegrensa auka frå 30 % til 40-50 %. Utrullingsgrensa blei påverka i mindre grad; auke frå 22 % til 24-28 %. Dei ulike tilsetjingane hadde ulik effekt på Atterbergs grenser, og følgjeleg Skempton aktivitet. Resultata blei publisert i Løken (1970). Effekten av kationa aukar frå venstre til høgre i samanstillinga under:

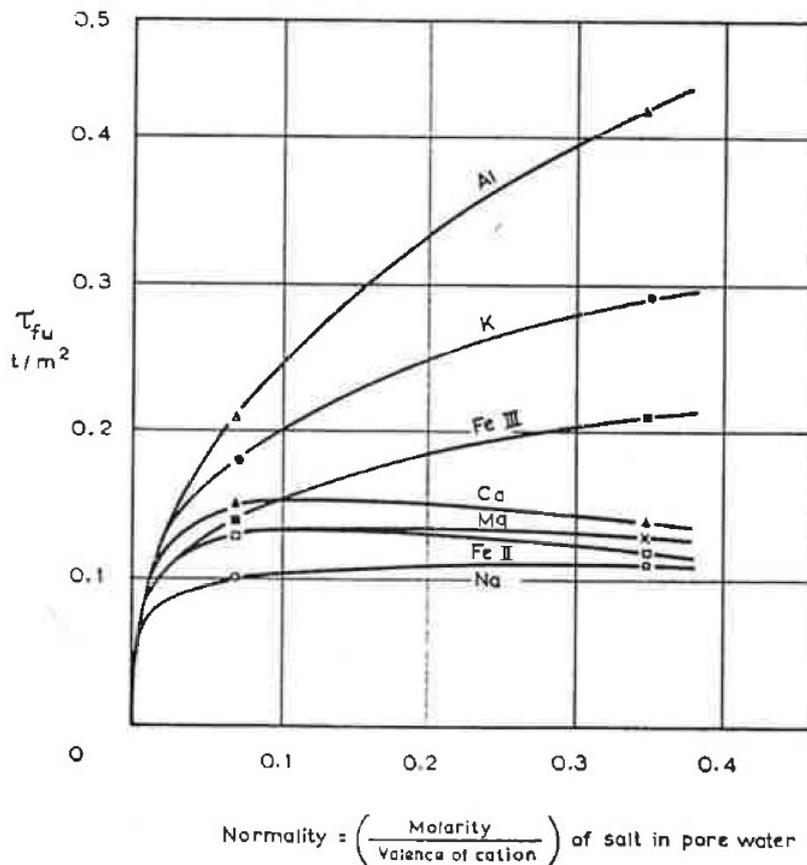


I følgje Løken (1968) er evna kationa har til å auka skjærstyrkengitt av følgjande rekkefølge:



KCl er i følgje Moum et al. (1968) lett løyseleg i vassfasen og har dobbelt så stor effekt på den omrørte skjærstyrken som NaCl. Ved å tilsetje KCl vil ionekonsentrasjonen i porevatnet auke, det elektriske dobbeltlaget reduserast og følgjeleg dei fråstøytande kreftene mellom leirpartiklane avta. Figur 3 viser resultat frå forsøk der ulike salt blei rørt inn i omrørt kvikkleire. Aluminiumsalt har den største effekten på å auke den udrenerte skjærstyrken. Deretter salt med kalium og treverdig jern. Sjølv om AlCl_3 har større effekt enn KCl på omrørt skjærstyrke, så er Al berre delvis løyseleg i vassfasen ved pH-verdiar som normalt opptrer i norske marine leirer (pH \approx 8). Dermed vil AlCl_3 bli utfelt som hydroksid og auke skjærstyrken ved sementering i tillegg til å redusere det elektriske dobbeltlaget. I motsetjing til aluminium og jern, er kalium lettoppløyseleg i vassfasen, og reduserar dei fråstøytande kreftene mellom leirminerala ved å redusere det elektriske dobbeltlaget.

Talme (1968) tilsette salt (CaCl_2 , MgCl_2 , KCl, NaCl) i ulike konsentrasjonar i leirer frå tre ulike lokalitetar i Sverige. Ved å tilsetje salt i små mengder (0,5 meq og 1 meq) i kvikkleire gav CaCl_2 og MgCl_2 størst effekt på den omrørte skjærstyrken. Ved høgare konsentrasjonar (2 meq og 4 meq) gav KCl om lag like stor styrkeauking. NaCl hadde til samanlikning svært liten effekt. Den same trenden var synleg i ikkje-kvikke leirer. Tilsetjing av høge konsentrasjonar gav ikkje nokon større effekt i styrkeauken i ikkje-kvikke leirer. Det var også tydeleg at effekten varierte mellom dei ulike lokalitetane grunna ulik porevasskjemi.



Figur 3 Effekten ulike salt som klorid har på den omrørt udrenerte skjærstyrken i korittisk-illitisk kvikkleire. Frå Moum et al. 1968.

Bryhn (1981) utførte tilsvarende forsøk på laboratoriet til NGI der ein såg på korleis tilsetjing av kaliumklorid og kalk påverka dei geotekniske eigenskapane. Bryhn tilsatte tørt KCl, KCl løyst opp i metanol, KCl og kalk (CaO) og kalk aleine til omrørt kvikkleire. Den omrørte kvikkleira med tilsatt salt og/eller kalk blei lagt tilbake i prøvesylindern saman med uforstyrre leire. Dermed blei både effekten tilsetjingsstoffet hadde på omrørt materiale og diffusjon og effekten av dette i uforstyrre leira undersøkt. Prøvane blei lagra i 7, 30 og 100 dagar.

Det blei konkludert med at etter sju dagar hadde KCl aleine liten effekt på omrørt skjærstyrke, og KCl+metanol enda mindre. KCl hadde noko betre effekt på uomrørt skjærstyrke enn KCl+metanol. Etter 30 dagar hadde resultat frå KCl og KCl+metanol utjamna seg, og hadde same effekt på skjærstyrken. Etter 100 dagar var det tydeleg at begge kaliumtilsetjingane hadde auka både den omrørte og uomrørte skjærstyrken (Bryhn 1981).

Kalk hadde størst effekt i omrørt sone medan KCl hadde best effekt i utforstyrre leire der stabiliseringa skjer ved hjelp av diffusjon. Ein klar fordel med kalk kontra KCl er at ein får ein nesten umiddelbar auke av skjærstyrken, medan med KCl tek dette tid. Fordelen med KCl kontra kalk er at det blir ein gradvis overgang frå stabilisert til ikkje stabilisert leire, medan med kalk vil det bli eit skarpt skilje mellom behandla og ubehandla leire. I tillegg vil diffusjonen medføre at stabiliseringa brer seg lenger ut i leirmassivet. Blanding av KCl og kalk medførte at ingen av tilsetjingane fullt ut oppnådde den stabiliserande effekten dei hadde kvar for seg (Bryhn 1981).

Bryhn (1981) meinte at kaliumiona bytta plass med dei adsorberte Ca^{2+} og Mg^{2+} . Ca^{2+} og Mg^{2+} tilslutta seg dermed porevatnet saman med overskotet av K^+ -ion. Dette resulterte i ein reduksjon av det elektriske dobbeltaget slik at dei van der Waalske bindingane mellom leirpartiklane auka. Auka saltkonsentrasjon over ein grenseverdi vil medføre fortsatt redusert dobbeltag, men vil ikkje ha innverknad på skjerstyrken. Bryhn (1981) fastsatte denne verdien til 200-800 ppm K^+ i porevatnet. Over denne verdien blei det ikkje sett nokon signifikant endring av skjerstyrken. Til tross for dette vil høgare konsentrasjonar medføre at diffusjonen går fortare og trenger djupare inn i leira.

Bjerrum (1967) let KCl strøyme gjennom ein prøve av uforstyrta klorittisk-illittisk leire. Dette medførte tilsynelatande auking av prekonsolideringstrykket frå 360 kPa til 560 kPa i ødometerforsøk. Leira blir dermed mindre ømfintleg for setningar ved å endre geokjemien i porevatnet.

Clausen og Moum (1968) utførte konsolideringstestar på prøvar av kvikkleire frå Alna, og prøvar som hadde blitt utsatt for diffusjon. Prøvane som skulle behandlast vha diffusjon fekk erstatta dei øvre 12 cm med kjemikalier (KCl, FeCl_3 , FeCl_2 , AlCl_3 , H_2SO_4 og $\text{Ca}(\text{OH})_2$), og lagra i 202 dagar ved 7 °C. Etter opning blei den midtre delen av prøven brukt i konsolideringstesten med unntak av prøven tilsatt $\text{Ca}(\text{OH})_2$ der diffusjonslengden var liten.

Den originale kvikkleira blei tolka til å ha ein overkonsolidering på om lag 30 kPa. Tilsetjingsstoffa auka prekonsolideringstrykket med 100-150 kPa. Lågast for H_2SO_4 , høgast for tilsetjingsstoffa som inneholdt jern. Porevasskjemien blei ikkje analysert, og ein kunne dermed ikkje lage nokon skala for effekten av dei ulike iona, men ut frå ødometerkurvene var det tydeleg at hadde ein betydeleg effekt på prekonsolideringa (Clausen og Moum 1968).

I følgje Larsson (2010) vil ei normalkonsolidert leire som over tid bli utvaska etter kvart kunne miste styrken sin i så stor grad at den ikkje klarer lasta frå den overliggande leira. Truleg vil utvaskinga og styrkedegraderinga skje over såpass lang tid at leira rekk å konsolidere slik at leira ikkje kollapsar undervegs i prosessen. Dette medfører at leira fortsatt er normalkonsolidert, men med lågare flytegrense som følgje av utvaskinga og lågare vassinnhald, samt tettare struktur som følgje av konsolideringa. I overkonsolidert leire vil imidlertid saltutvaskinga svekke strukturen og forkonsolideringstrykket synke.

2.4 Feltforsøk – installasjon av saltbrønner

Talme (1968) installerte saltbrønner i felt for å sjå kor stor effekt saltdiffusjon ville ha i kvikkleire. Han installerte brønner med CaCl_2 . Etter 23 måndar hadde saltet auka styrken i leira i ein avstand på 60 cm ut frå brønnen. Etter ytterlegare 22 måndar hadde den uomrørte skjerstyrken auka med 7-10 %, medan den omrørte skjerstyrken hadde auka med 330-360 % i ein avstand på 1 meter frå brønnen.

Eggestad og Sem (1976) brukte saltdiffusjon som grunnforsterking av kvikkleira før utgraving. Utgravinga skulle gjerast i samband med eit vegprosjekt der det skulle gravast 3-4 m for å senke eksisterande hovudveg. I tillegg skulle det leggst ut store fyllingar for nye påkøyringsramper i samband med ei ny bru. Dette forårsaka stabilitetsproblem sidan det var svært sensitiv, blaut marin leire i grunnen. 2630 brønner blei installert over eit område på 6000 m². Det blei brukt ca. 640 tonn KCl. Dvs ca. 240 kg KCl per brønn. Brønnane hadde ein diameter på 15 cm og senteravstand ca. 1,5 m.

Etter 10 månadar hadde diffusjonen gått ca. 50 cm ut frå brønnen. Fire månadar seinare hadde saltet spreidd seg til 60 cm. Etter 18 månadar begynte anleggsarbeidet i området, og etter 21 månadar blei dei djupaste utgravingane utført. Skjerstyrken ca. 15 cm frå brønnen hadde då auka med ein faktor på ca. 2,3, medan 80 cm frå brønnen hadde den auka med ein faktor på ca. 1,4 (sjå Figur 4).

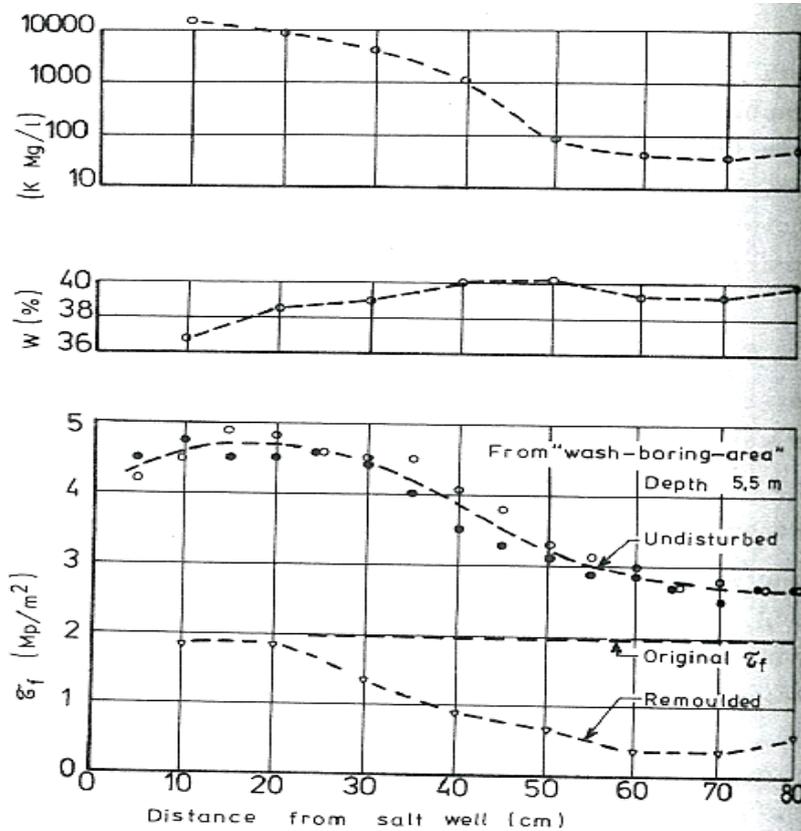


Fig. 5 Test results within the "wash-boring-area" 21 months after installation of wells.

Figur 4 Resultat 21 månadar etter installasjon (spyleboring). Målingane er utført i overgangen mellom leire og kvikkleire Eggstad og Sem (1976).

Etter 24 månadar blei det utført målingar mellom to brønnar med senteravstand 110 cm. I tillegg blei det utført målingar i ein retning der leira ikkje blei påverka av diffusjon frå nabobrønnar. Ut frå dette ser ein at diffusjonen har spreidd seg 80 cm på 24 månadar. I tillegg er det tydeleg at effekten blir større mellom brønnane.

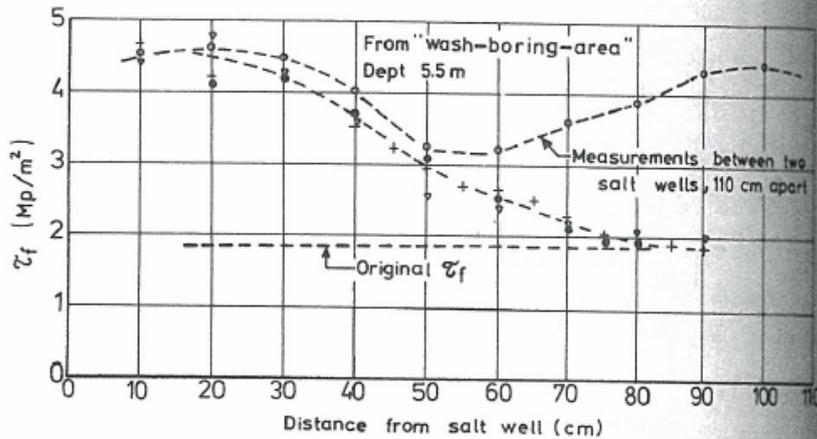


Fig.6 Test results within the "wash-boring-area" 24 months after installation.

Figur 5 Resultat 24 månadar etter installasjon (spyleboring). Målingane er utført i overgangen mellom leire og kvikkleire. Eggstad og Sem (1976).

Uforstyrta prøvar tatt opp i området med stabilisert leire etter 22 månadar viste ei klar endring av dei geotekniske eigenskapane (Figur 6). Flytegrensa har auka til godt over det naturlege vassinnhaldet. Det naturlege vassinnhaldet har også auka litt. Den uomrørte skjærstyrken har auka med ein faktor på 3 gjennom kvikkleira, 4 i dei djupaste prøvane. Eggstad og Sem (1976) konkluderte med at etter 3 år har den gjennomsnittlege skjærstyrken auka med 200 % (Figur 7).

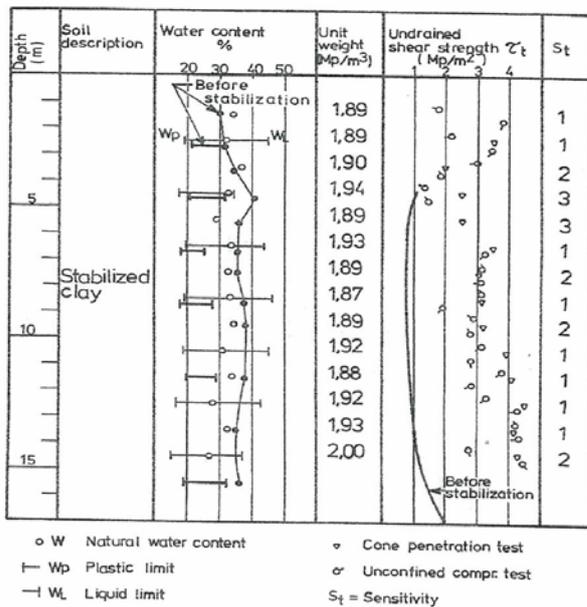


Fig.7 Bore profile from the "mandrel-area" 22 months after installation.

Figur 6 Resultat frå uforstyrta prøvar etter 22 månadar. Eggstad og Sem (1976).

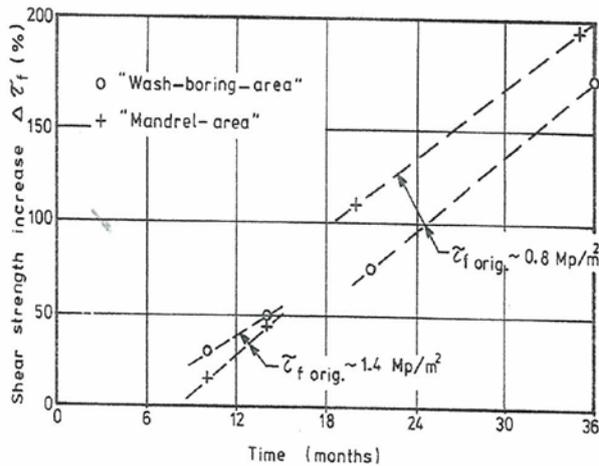


Fig.9 Average shear strength increase against time.

Figur 7 Auke i skjærstyrken over tid. Eggestad og Sem (1976).

3 Molekylær diffusjon i leire

Saltet i porevatnet til marint avsette leirer er blitt vaska ut av grunnvasstraumar og molekylær diffusjon. Den advektive transporten vil vere minimal i forhold til diffusjon grunna den låge permeabiliteten i leire. Normalt er permeabiliteten i leire $10^{-6} - 10^{-9}$ cm/s (Norsk Geoteknisk Forening 1982). Moum et al. (1968) konkluderte med at i lågpermeable avsetjingar med små hydrauliske gradientar vil ionetransporten frå brønnane vere dominert av diffusjon.

Ved å installere saltbrønner i leirmassivet vil ein reversere prosessen og få salt inn igjen i leira og dermed auke styrken. Saltet vil spreie seg som ein kombinasjon av diffusjon og grunnvasstraumar. I tillegg vil hastigheten bli påverka av kor mykje konsentrasjonen i "saltstraumen" endrar seg som følge av at ionar blir adsorbent til leirpartiklane.

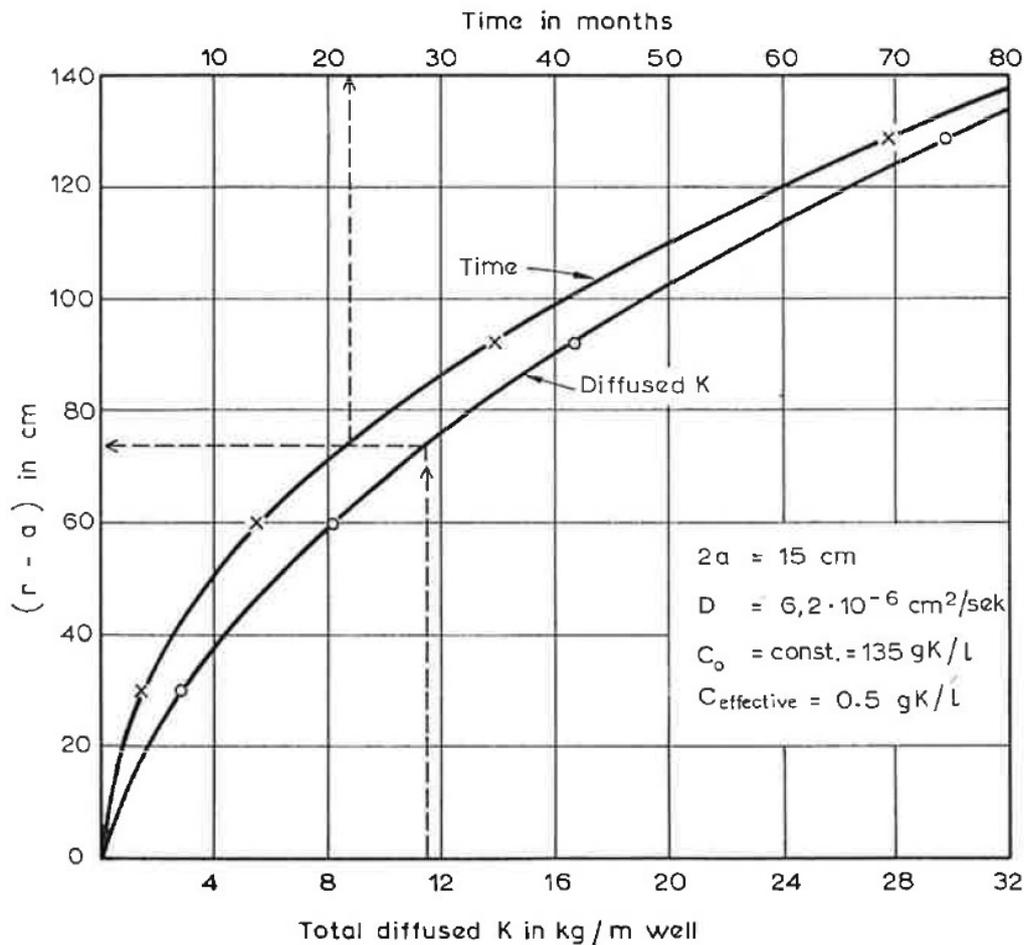
3.1 Diffusjonskoeffisientar i leire

Det er gjort fleire forsøk på å finne diffusjonskoeffisienten i leirer eksperimentelt. Moum et al. (1968) utførte forsøk på uforstyrta kvikkleireprøver. Forsøket blei utført ved å fjerne dei øvste 12 cm og erstatte med saltløyningar av KCl, FeCl₂, FeCl₃, AlCl₃, H₂SO₄ og Ca(OH)₂. Prøvesylindrane blei lagra vertikalt ved 7 °C i 85 dagar før prøvane blei skyvd ut og undersøkt i laboratoriet. Vassinnhald, konusforsøk for å finne uforstyrta og omrørt skjærstyrke, relativ motstandsevne (elektrisk leiingsevne) og kjemien i porevatnet blei analysert. KCl viste seg mest effektiv med ein effektiv diffusjonslengde på 30 cm på 85 dagar. Med effektiv diffusjonslengde meines det den lengda der ionekonsentrasjonen er høg nok til å forårsake signifikante endringar av dei geotekniske parameterane. Diffusjonskoeffisient (D) blei berekna til $D = 6,2 \cdot 10^{-6}$ cm²/s. Analysane viste også god korrelasjon mellom auka konduktivitet, endringar i skjærstyrke og sensitivitet. Vassinnhaldet var tilnærma uendra.

Moum et al. (1968) konkluderte med at ved å plassere saltbrønner med diameter 15 cm (11,5 kg K⁺/m) i ein avstand 2,4 m, vil jordvolumet mellom brønnane vere stabilisert i løpet av 4,2 år med etterfylling av KCl etter 22 månadar (sjå Figur 9).

Talme (1968) utførte diffusjonsforsøk i laboratoriet ved å plassere ein leirprøve i diffusjonscelle. Den utrekna diffusjonskoeffisienten for CaCl_2 blei $0,40 \text{ cm}^2/\text{dag}$, eller $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Moum og Heiberg (1973) utførte laboratorieforsøk for å finne diffusjonskoeffisienten ved å rekne med at opprinneleg saltinnhold var 30 g/l . Forsøka viste at diffusjonskoeffisienten ikkje blei påverka av vassinnhaldet i prøvane. Diffusjonsekperimentet viste også ein auke av monovalente ion og reduksjon av divalente ion i løysning i det frie porevatnet når saltkonsentrasjonen i porevatnet blei redusert. Moum og Heiberg (1973) konkluderte med at dei målte konsentrasjonane indikerte at diffusjonskoeffisienten for K^+ som tilsvarte den for Na^+ ; $0,012 \text{ m}^2/\text{år}$ ved 7°C og $0,02 \text{ m}^2/\text{år}$ ved 22°C .



Figur 8 Effektiv diffusjonslengde, totalmengde diffundert salt og nødvendig tid for ein saltbrønn tilsatt KCl med diameter 15 cm . Frå Moum et. al 1968.

Bryhn (1981) rekna ut 1D diffusjonskoeffisient for K^+ på $4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. Denne leira hadde imidlertid høgare leirinnhald (42%) enn den som Moum et al. (1968) hadde (36%). Vassinnhald og saltinnhald hadde om lag same verdi i dei to forsøka. Diffusjonskoeffisienten kan dermed ha blitt påverka av lågare permeabilitet i massane.

Tabell 1 Diffusjonskoeffisientar for K^+

	Appelo og Postma (2005)	Moum et al. (1968)	Moum og Heiberg (1973)	Bryhn (1981)	
vassinnhald (%)		32,5	55		
Leirinnhald (%)		36		42	
D 7°C (cm ² /s)		$6,2 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$		
D 22°C (cm ² /s)			$6,3 \cdot 10^{-6}$		
D (cm ² /s)	$1,96 \cdot 10^{-5}$ ¹⁾			$4 \cdot 10^{-6}$ ²⁾	

¹⁾ diffusjonskoeffisient i fritt vatn ved 25 °C ²⁾ temperatur ikkje dokumentert

Talme (1968) fann at $CaCl_2$ og $MgCl_2$ hadde størst effekt på omrørt skjerstyrke enn ved tilsetjing av KCl i små konsentrasjonar. Ved tilsetjing av høge konsentrasjonar hadde KCl om lag same effekt som $CaCl_2$ og $MgCl_2$. Moum et al. (1968) konkluderte med KCl som beste alternativ grunna diffusjonslengde per tid, evne til å auke omrørt skjerstyrke, kostnad og handtering. Grunna dette tilrådest det å bruke KCl ved installasjon av saltbrønnar.

3.2 Teoretisk grunnlag for utrekning av diffusjon

Formelgrunnlaget er henta frå Appelo og Postma (2005).

Diffusjon vil seie at partiklar går frå eit medium med høg konsentrasjon, til eit medium med lågare konsentrasjon. Konduktiviteten ved atom eller molekylær diffusjon blir angitt som diffusjonsevne eller ved ein diffusjonskoeffisient (D). Diffusjonskoeffisienten skildrar mobiliteten til partiklane i diffusjonsprosessen i det gitte miljøet. Den drivande krafta i mange typar diffusjon er variasjonen i konsentrasjon (konsentrasjonsgradient).

Det fins to typar diffusjon som begge er skildra av Ficks lover for diffusjon:

- stasjonær
- ikkje-stasjonær

Stasjonær diffusjon føregår med ein konstant rate. Dvs. at straks prosessen startar så er talet atom (mol) som kryssar ei gitt overflate konstant med tida. Ikkje-stasjonær diffusjon er ein tidsavhengig prosess, og diffusjonsraten er ein funksjon av tid. Saltdiffusjon ved nedsetjing av saltbrønnar er å rekne som ikkje-stasjonær då saltkonsentrasjonen i saltbrønnen vil minke med tida.

Diffusjonskoeffisienten er ulik for ulike ion. I tillegg er den ulik for diffusjon i fritt vatn og i sediment som består av både mineralkorn og porevatn. Diffusjonskoeffisienten er også temperaturavhengig.

Diffusjonskoeffisienten i fritt vatn avheng av temperatur og viskositeten til væska diffusjonen føregår i:

$$D_{(f,T)} = D_{(f,298)} \cdot T \cdot \eta_{298} / (298 \cdot \eta_T) \quad (\text{Eq. 1})$$

Der $D_{(f,298)}$ for K^+ = $1,96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Appelo og Postma 2005)
 η_{298} = dynamisk viskositet av vatn ved 25 °C = $9,1 \cdot 10^4 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (frå Mills 1995)
 η_{280} = dynamisk viskositet av vatn ved 7 °C = $14,5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (frå Mills 1995)

Den effektive diffusjonskoeffisienten tek høgde for "omvegen" diffusjonen får grunna kornskjellettet i sedimentet.

$$D_e = D_f \cdot \varepsilon_w \quad (\text{Eq. 2})$$

Der ε_w = vassfylt porøsitet (i 100 % metta jord er denne lik porøsiteten n)
 $n = e/(1+e)$, og poretalet $e = w \cdot \gamma_s / \gamma_w$
 w = vassinnhald
 γ_s = spesifikk tyngdetetthet (27 kN/m^3)
 γ_w = tyngdetetthet vatn (10 kN/m^3)

Konsentrasjonen som funksjon av tid og avstand frå brønnen er berekna etter formelen:

$$c(x,t) = c_i + (c_0 - c_i) \operatorname{erfc}(x / (2\sqrt{D_e \cdot t})) \quad (\text{Eq. 3})$$

Der c_i = bakgrunnskonsentrasjon (g/l)
 c_0 = konsentrasjon i saltbrønn ved $t=0$
 x = avstand frå brønn (cm)

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) \quad (\text{Eq. 4})$$

Der $z = x / (2\sqrt{D_e \cdot t})$
 $\operatorname{erf}(z) = (1 - e^{-(4z^2/\pi)})^{1/2}$

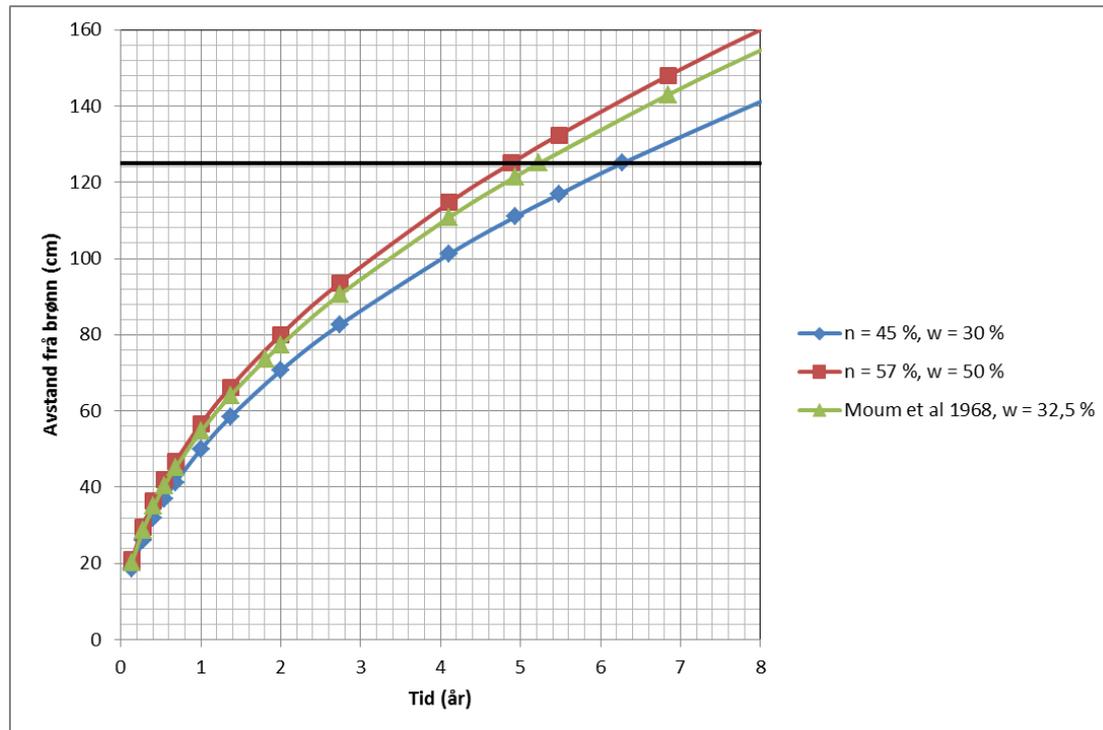
3.3 Tilbakerekning av Moum et al. (1968)

Moum et al. (1968) fann ein diffusjonskoeffisient for K^+ på $6,2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ved 7 °C. Leira som blei nytta i forsøket deira hadde eit vassinnhold på 32,5 %. Det er berekna diffusjonskoeffisientar for leirer ut frå Eq. 1 og Eq. 2 med vassinnhald $w = 30 - 50 \%$. Med 100 % mettingsgrad og antatt spesifikk tyngdetettheit på 27 kN/m^3 , tilsvarar dette porøsitet $n = 45 - 57 \%$. Sidan leira har 100 % metning, tilsvarar denne porøsiteten den vassfylte porøsiteten som nyttast i omrekninga av diffusjonskoeffisienten i fritt vatn til effektiv diffusjonskoeffisient.

Berekna diffusjonskoeffisient for vassinnhald 32,5 % er $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ som er noko lågare enn diffusjonskoeffisienten funne i laboratoriet av Moum et al. (1968). Diffusjonsforsøka presentert av Moum et al. (1968) var også påverka av at saltløysninga låg på toppen av sylindren, og tyngde kan såleis ha akselert prosessen.

Figur 9 presenterar korleis den effektive diffusjonslengden spreier seg over tid med diffusjonskoeffisientar utrekna for eit vassinnhald på 30 % og 50 % i tillegg til Moum et al. (1968) sin diffusjonskoeffisient. Bakgrunnskonsentrasjonen av K^+ i leira er satt $c_i = 0$. Konsentrasjonen i saltbrønnen ved $t = 0$ er $c_0 = 135 \text{ g/l}$. $c(x,t)$ er satt lik $0,5 \text{ g/l}$ som blei funne å

vere den lågaste konsentrasjonen av K^+ som hadde signifikant innverknad på dei geotekniske parameterane (Moum et al. 1968).



Figur 9 Tid og effektiv diffusjonslengde frå saltbrønn for kalium ved ulike porøsitetar Effektiv diffusjonslengde er rekna som kaliumfront med konsentrasjon 0,5 g/l.

Som vist i Figur 9 vil høgare porøsitet (høgare vassinnhald) medføre at det tek kortare tid å stabilisere leirmassivet mellom saltbrønningar med senter-senter avstand 2,5 m. Ved ein porøsitet på 45 % ($w = 30\%$) vil det teoretisk sett ta om lag 6 år og 5 månadar, medan det med ein porøsitet på 57 % vil ta om lag 5 år. Resultata er basert på at konsentrasjonen i saltbrønnen er konstant 135 g K^+ /l, noko som ikkje vil vere tilfelle ute i felt. Spreiing av salt vil også skje ved hjelp av grunnvasstraumar og vil såleis truleg gå noko fortare.

4 Installasjonsmetode

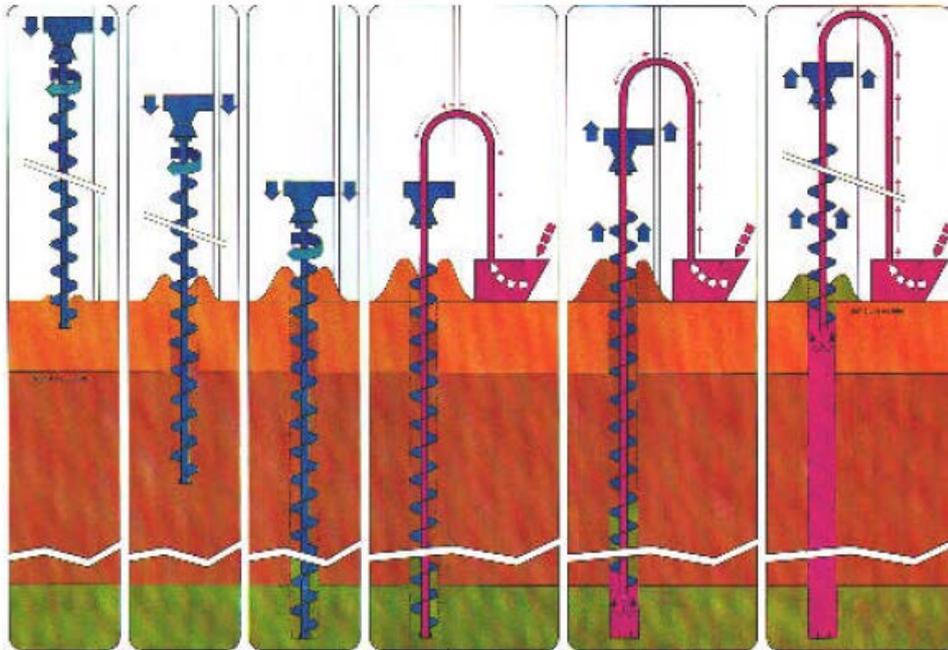
Eggestad og Sem (1976) installerte saltbrønningar ved to boremetodar; spyleboring og rammeboring. Det blei mykje slam med spyleboring, og denne metoden vil dermed vere lite gunstig i utbygde strøk. Rammeboring kan forårsake omrøring av sensitiv leire og dermed redusere skjerstyrken og permeabiliteten og følgjeleg redusere effekten av saltdiffusjonen.

Ved å installere saltbrønningar ved odexboring kan brønnane etterfyllast med salt. Ein kan få til dette ved å tre eit spalteryør av plast inni stålrøyet før trekking av stålrøyet. Odexboring til 15-20 m djup vil verte både tidkrevjande og kostbart og føre til mykje slam.

Eit anna alternativ er å installere sanddren, men bruke salt i staden for sand. Sanddren installerast ved å ramme ned stålrør med 150 mm innerdiameter, og med eit lok nedst med diameter 180 mm. Nedramminga av dreinsrøyet forårsakar imidlertid sterk omrøring av massane inntil røyet med den følgje at permeabiliteten avtek og skjerstyrken blir redusert. Ein kan redusere omrøringa til eit minimum ved å bruke spyleboring i staden (Statens Vegvesen 1995). Følgjeleg får ein problem i forhold til handtering av boreslam.

Ved å nytte Continuous Flight Auger (CFA) vil saltlaken bli pumpa ut i enden av borstrengen i det den blir trekt opp igjen (Figur 10). På denne måten vil borholet ha støtte gjennom heile

prosessen slik at det ikkje kollapsar. Metoden vil heller ikkje medføre nokon form for fortregning av massar og vil såleis vere gunstig i forhold til minimal poretrykksoppbygging.



Figur 10 Illustrasjon av prinsippet for installasjon av Continuous Flight Auger pelar. Henta frå www.ncdot.org

Ein kan også nytte drensstikkaren som blir brukt til installasjon av vertikaldren til installasjon av saltbrønner. Drensstikkaren er eit firkantrør som har dimensjon 120x120 mm. Avhengig av kva riggen tåler, kan dimensjonen aukast. Det monterast eit metallstykke på enden av drensstikkaren for å hindre leira å komme inn i firkantrøret under nedpressing. Ved ønska nivå føres ein slange med saltslurry ned i drensstikkaren. Drensstikkaren trekkast opp når den er fylt med saltslurry. Metallplata på enden av drensstikkaren blir verande att i grunnen. Ved faste forhold i toppen kan det nyttast vibrolodd for å penetrere desse. Metoden medfører massefortregning og omrøring av omkringliggende leirer.

Ved installasjon av vertikaldren i kvikkleira under bygging av E18 Kopstad – Gulli (Statens Vegvesen 2007), måtte det setjast på eit vasstrykk for å forhindre at forankringsstykket og dren blei med drensstikkaren opp igjen. Det kan bli nødvendig å setje på eit lite trykk i slurryslangen før ein trekk drensstikkaren opp igjen slik at ein er sikker på at bunnplata ikkje blir med opp igjen. Dette må avgjerast i felt.

Ulempen med denne metoden og CFA i forhold til å installere eit permanent røyr i bakken, er at ein ikkje har moglegheit til å etterfylle med salt. I tillegg er dimensjonen på firkantrøyra mindre enn dei som blei nytta i Eggestad og Sem (1976). Tida det tek å oppnå ønska effekt kan dermed bli auka.

Metoden med drensstikkar er imidlertid svært effektiv. Ved bygging av E18 Kopstad – Gulli (Statens Vegvesen 2007) blei det installert vertikaldren for å redusere konsolideringstida i grunnen. Det blei tilsaman i prosjektet installert 345 831 lm vertikaldren med ein kostnad på kr. 3 389 000,-. I tillegg kom kostnadane for grusputa. I snitt blei det installert 7000 lm vertikaldren pr dag.

Under installasjonen av vertikaldren på E18 Kopstad – Gulli blei det observert ein auke i poretrykket på 10-15 kPa (Statens Vegvesen 2007). Dette må dermed takast med i stabilitetsberekningane før ein installerar saltbrønnane for å ivareta sikkerheiten i anleggsfasen. Riggjen som installerar vertikaldren kan ikkje nyttast i ulent terreng. I skråningar vil det seie at kun aktiv og passiv sone kan stabiliserast ved hjelp av saltbrønnar.

5 Berekningseksempel Bøle

NVE har sikra kvikkleiresona Bøle i Skien kommune ved å legge ut sprengsteinsfylling i elva. Kostnadane for prosjektet var om lag 22,5 millionar kr eks mva. Fleire løysningar blei vurdert, men det blei funne at sprengsteinsfylling var det billigaste alternativet og medførte minst risiko for området i anleggsfasen (NGI 2008).

Ved å auke skjerstyrken i leira ved hjelp av saltdiffusjon kunne ein ha auka den berekningsmessige partialfaktoren. Omfanget av tiltaket i elva kunne dermed ha blitt betrakteleg redusert.

5.1 Auke i skjerstyrke for å oppnå tilfredsstillande sikkerheit

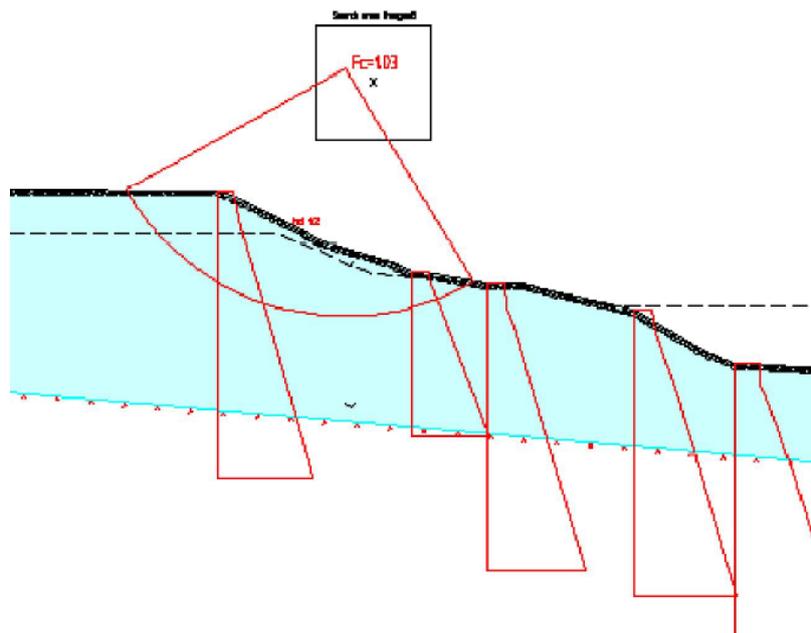
Kor vidt det er mogleg å installere saltbrønnar i sjølve leirskråningen avheng av om riggen kan jobbe i bratt terreng. I dette eksempelet er det brukt ein rigg som ikkje kan gå i brattare helling enn 1:13. Dermed kan brønnane kun installerast i aktiv og passiv sone. Grunna topografiske forhold er det difor lagt inn ei dobling av skjerstyrken i 20 m breidde i aktiv sone, og 14 m breidde i passiv sone.

Den kritiske glideflata før og etter auken av skjerstyrken blei funnen ved hjelp av berekningsprogrammet GeoSuite stability version 5.0.4.0.

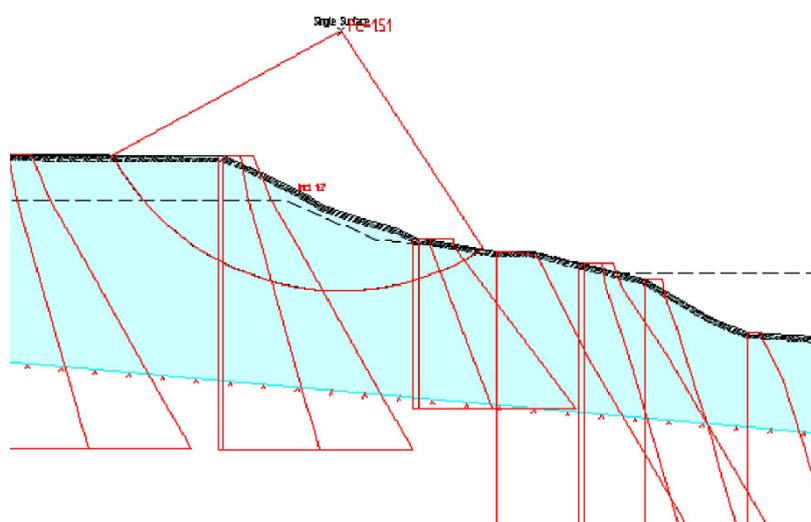
Partialfaktoren for naturleg skråning blei berekna til 1,03 (Figur 11). Partialfaktor for den same glideflata etter saltdiffusjon blei berekna til 1,51 (Figur 12). Den kritiske glideflata for skråningen har imidlertid endra seg, og har partialfaktor 1,22 (Figur 13). Ein auke på 18 %.

Den kritiske glideflata etter auken i skjerstyrken er mindre i utstrekning enn for naturleg skråning. Glideflata startar og sluttar i overgangen mellom stabilisert og naturleg leire. I modellen er det eit skarpt skilje i skjerstyrken i overgangen mellom stabilisert og naturleg leire. I realiteten minkar skjerstyrken gradvis frå stabilisert til naturleg leire. Dermed vil skjerstyrken vere auka om enn i noko mindre grad eit par meter utanfor det stabiliserte området. Diffusjonen er ein tidsavhengig prosess. Dette betyr at den kritiske glideflata vil minke i utstrekning med tida, og etter kvart vil den kritiske glideflata truleg framstå som ei overflategliding.

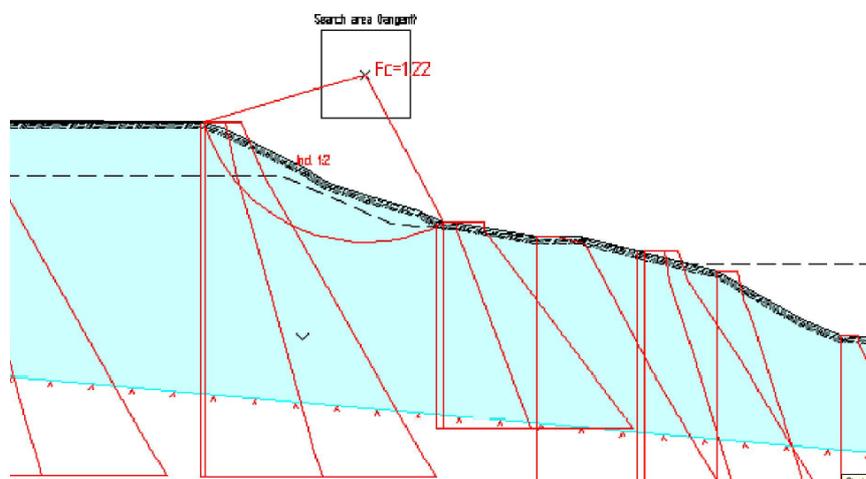
Leira i den aktive og passive sona har endra seg frå kvikkleire til lite sensitiv leire. Eit initialscred i skråningen vil difor ikkje få ei progressiv utvikling. Figur 14 viser partialfaktor 1,41 dersom all masse frå eit initialscred med form som kritisk glideflate blir fjerna. Truleg vil noko av desse massane bli liggande igjen, og følgjeleg vil partialfaktoren bli høgare



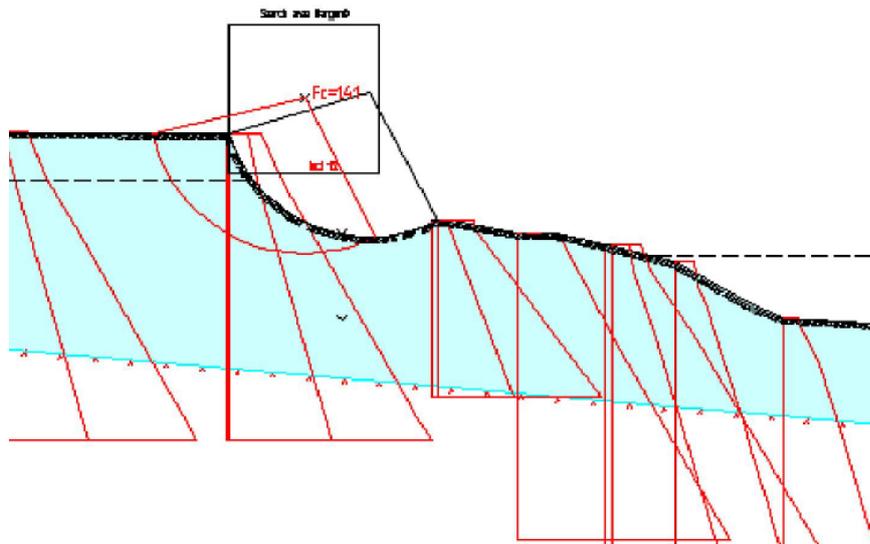
Figur 11 Utrekna partialfaktor for kritisk glideflate



Figur 12 Utrekna partialfaktor for same glideflate etter saltstabilisering.



Figur 13 Kritisk glideflate etter styrkeauke som følgje av saltdiffusjon



Figur 14 Partialfaktor for skråning etter initialscred

5.2 Kostnadsoverslag

Det installerast saltbrønner i aktiv og passiv sone med ei breidde på 20 m og lengde 520 m i aktiv sone, og ei breidde på 14 m og lengde 520 m i passiv sone. I aktiv sone førast saltbrønnane ned til faste massar på 20 m dybde, og i passiv sone ned til 15 m dybde. Diffusjonsprosessen vil avta med avtakande konsentrasjon i saltbrønnen. Ved kva konsentrasjon og når dette skjer er ikkje forsøkt utrekna i denne rapporten. Det er difor lagt inn i kostnadsoverslaget at det er nødvendig å installere saltbrønner i to omgangar for å holde diffusjonsprosessen i gang. Følgjande kostnadsestimat er laga:

- c/c-avstand 2,5 m, to installasjonsrunder
- c/c-avstand 3,0 m, to installasjonsrunder
- c/c-avstand 2,5 m, ein installasjonsrunde

Det er laga kostnadsoverslag for installasjon av saltbrønner ved hjelp av vertikaldrensstikkar. Det er anslått å lage ein saltslurry som består av 0,7 kg KCl per liter.

5.2.1 c/c-avstand 2,5 m, to installasjonsrunder

Totalt blir det 5 824 stikk, som utgjer til saman 104 000 lm. Installasjon av saltbrønner vil truleg ta noko lenger tid enn installasjon av vertikaldren. Ei konservativ tilnærming på 150 borhol pr dag vil medføre at arbeidet med saltstabilisering av Bøle vil ta om lag 4 arbeidsveker for kvar installasjonsrunde.

Tabell 2 Kostnadsestimater for saltstabilisering av kvikkleiresona Bøle. c/c-avstand 2,5 m, etterfylling etter 22 mndr i same posisjon som første installasjon.

	Einingspris (NOK eks.mva.)	Estimert kostnad (NOK eks.mva.)
Gruspute 2x20x520x0,5 m ³	200 kr/m ³	2 080 000
Installasjon av saltbrønner aktiv sone 2x(8x208) stk	540 kr/pr brønn	1 797 120
Installasjon av saltbrønner passiv sone 2x(6x208) stk	540 kr/pr brønn	1 347 840
Salt	4 000 kr/tonn	5 200 000
Erosjonssikring i elva		8 000 000
Sum		18 424 960

5.2.2 c/c-avstand 3,0 m, to installasjonsrunder

Dersom ein ved andre gongs installasjon av saltbrønnane plasserar desse midt mellom dei saltbrønnane som blei satt ut første gong, vil ein kunne auke avstanden mellom brønnane og akselerere prosessen.

Totalt blir det 4 152 saltbrønner som utgjør 74 390 lm. Kvar installasjonsrunde vil ta om lag 3 veker.

Tabell 3 Kostnadsestimater for saltstabilisering av kvikkleiresona Bøle. c/c-avstand 3,0 m, etterfylling etter 22 mndr i posisjon midt mellom brønnane frå første installasjon.

	Einingspris (NOK eks.mva.)	Estimert kostnad (NOK eks.mva.)
Gruspute 2x20x520x0,5 m ³	200 kr/m ³	2 080 000
Installasjon av saltbrønner aktiv sone 2x(7x173) stk	540 kr/pr brønn	1 307 880
Installasjon av saltbrønner passiv sone 2x(5x173)	540 kr/pr brønn	934 200
Salt	4 000 kr/tonn	3 700 000
Erosjonssikring i elva		8 000 000
Sum		16 022 080

5.2.3 c/c-avstand 2,5 m, ein installasjonsrunde

Ved å tillate ei mindre styrkeauking i leira kan ein velge å installere saltbrønner kun ein gong. Styrkeaukinga vil då bli størst i sona rundt brønnane, og avta mot midtpunktet mellom brønnane. Diffusjonsprosessen før ein får homogen skjærstyrkeauke i leirmassivet vil ta mykje lenger tid sidan konsentrasjonsgradientane blir betrakteleg lågare etter kvart som saltbrønnane får lågare konsentrasjon.

Totalt blir det 2 912 saltbrønner som utgjør 52 000 lm. Kvar installasjonsrunde vil ta om lag 2 arbeidsveker.

Tabell 4 Kostnadsestimat for saltstabilisering av kvikkleiresona Bøle. c/c-avstand 2,5 m, kun ein installasjon

	Einingspris (NOK eks.mva.)	Estimert kostnad (NOK eks.mva.)
Gruspute 2x20x520xx0,5 m ³	200 kr/m ³	2 080 000
Installasjon av saltbrønner aktiv sone 8x208 stk	540 kr/pr brønn	898 560
Installasjon av saltbrønner passiv sone 6x208 stk	540 kr/pr brønn	673 920
Salt	4 000 kr/tonn	2 600 000
Erosjonssikring i elva		8 000 000
Sum		14 252 480

6 Oppsummering og konklusjonar

Korleis saltet vil spreie seg i leirmassivet avheng av grunnvasstraumar på staden, porevasskjemi, vassinhald, mineralogi og permeabilitet. Metoden har vist seg å fungere bra i det eine feltforsøket som er gjennomført i Noreg (Eggestad og Sem 1976). Likevel er det store usikkerheiter i forhold til kva grunnforhold metoden fungerer, og ikkje minst kor den ikkje fungerer. Tabell 1 viser sprikande verdiar for diffusjonskoeffisienten, følgjeleg er det store usikkerheiter rundt kor lang tid det tek å stabilisere leire i felt. I tillegg må det utførast analysar på om det er fare for at saltet blir vaska ut igjen av stabilisert område, kva innverknad dette har på dei geotekniske parameterane og kor lang tid det tek å «vaske saltet» ut igjen. For å kunne utvikle metoden til kommersielt bruk må forståinga av geokjemiske og mineralogiske samanhengar aukast i tillegg til forståinga av den kopla samanhengen mellom advektiv transport, diffusjon og dispersjon.

Ved å stabilisere kvikkleiresona Bøle med saltdiffusjon som grunnforsterking av kvikkleira i kombinasjon med erosjonssikring i staden for den massive fyllinga i elva, kunne ein auka partialfaktoren for den kritiske glideflata før stabilisering til 1,51. Den kritiske glideflata har imidlertid endra seg, og blitt mindre i utstrekning. Likevel er partialfaktor lågare enn 1,4; 1,22. Denne glidesirkelen har utstrekning mellom saltstabilisert aktiv og passiv sone (Figur 13), og vil med tida truleg minke grunna at salt med tida vil spreie seg i sjølve skråningen. Leira i den aktive og passive sona har endra seg frå kvikkleire til lite sensitiv leire. Følgjeleg vil eit initialskred i skråningen ikkje få ei progressiv utvikling. I dette tilfellet er også utløysande årsak som erosjon fjerna.

Det understrekast imidlertid at det er usikkert om metoden ville ha fungert i dette området då det ikkje ligg nokon geokjemiske analysar eller modellering til grunn. I tillegg er det usikkerheiter i forhold kva som skjer med sjølve saltbrønner etter at saltet har diffundert, og om dette i seg sjølv kan medføre stabilitetsproblem. Det er kun anslått kostnadar ut frå eit tenkt scenario (Tabell 5). Kostnadsestimatet inneheld usikkerheiter i forhold til val av entreprenør, tilgjengeleg utstyr, tilgang til vatn, transport av utstyr etc.

Tabell 5 Innsparing som følge av saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire

Alternativ	Estimert kostnad kr eks.mva.	Innsparing kr eks.mva.	Innsparing %
c/c 2,5 m, 2 installasjonar	18,4 mill	4,1 mill	18
c/c 3,0 m, 2 installasjonar	16,0 mill	6,5 mill	29
c/c 2,5 m, 1 installasjon	14,3 mill	8,2 mill	36

Metoden er verdt å prøve i områder der ein har kontroll på geokjemi, mineralogi, permeabilitet og grunnvasstraumar slik at ein på førehand kan modellere optimal brønnplassering og nødvendig mengde salt.

7 Vidare arbeid

Forprosjektet har resultert i at forfatternen har starta på doktorgradsstudie ved NTNU frå hausten 2012. Det vil i doktorgradsstudiet bli fokusert på å auke forståinga av geokjemi og mineralogi i norske leirer, samt kva prosessar som vil påverke spreining av salt i felt. Arbeidet vil bestå av teoretisk modellering, laboratorie- og feltforsøk, installasjon av saltbrønner og oppfølging av desse i felt. Målsetjinga med arbeidet er å finne for kva grunnforhold metoden fungerer og ikkje og kor lang tid det tek å oppnå tilfredsstillande styrke i kvikkleira.

8 Referansar

Andersson-Sköld, Y., Torrance, J.K., Lind, B., Odén, K., Stevens, R.L. og Rankka, K. (2005). Quick clay – A case study of chemical perspective in Southwest Sweden. Engineering Geology, volume 82, issue 2, pp. 107-118.

Appelo, C.A.J.. og Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution. Second edition. CRC Press.

Bjerrum, L. (1954a). Geotechnical properties of Norwegian marine clays. Géotechnique, vol. 4, nr. 2, 49-69.

Bjerrum, L. (1954b). Norske marine leirers geotekniske egenskaper. NGI publikasjon nr. 7.

Bjerrum, L. (1967). Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. 7th Rankine lecture. Géotechnique, Vol 17, No 2, pp 83-117.

Bryhn, O. (1981). Stabilization of Norwegian quick clay with potassium chloride and lime. NGI-rapport 52752-1, datert 12. mai 1981.

Clausen, C.-J.F. og Moum, J. (1968). Stabilization of soft clay by salt wells. Laboratory consolidation tests. NGI intern rapport F.338-1, september 1968

Eggestad, A. & Sem, H. (1976). Stability of excavations improved by salt diffusion from deep wells. European conference on soil mechanics and foundation engineering, 6, Vienna, March 1976. Proceedings, Vol 1.1. pp. 211-216

Larsson, R. (2010). Inverkan av förändringar i porvattnets kemi – främst salturlakning – på naturlig leras geotekniska egenskaper – Litteraturstudie. Statens Geotekniska Institut, Varia 611.

Løken, T. (1970). Recent research at the Norwegian Geotechnical Institute concerning the influence of chemical additions on quick clay. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, Volum 92, del 2, Stockholm 1970.

Løken, T. (1968). Kvikkleiredannelse og kjemisk forvitring I norske leirer. Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon nr. 75.

Løken, T, Moum, J. og Heiberg, S. (1967). Undersøkelser over endringen av en kvikkleires egenskaper ved tilsetning av salter. NGI intern rapport F.322-1, datert 13. juni 1967.

Mills, A. F. (1995) Heat and Mass Transfer.

Mitchell, J.K. (1976). Fundamentals of Soil Behaviour. John Wiley & Sons, Inc.

Moum, J., Løken, T. og Torrance, J.K. (1971). A geochemical investigation of the sensitivity of a normally-consolidated clay from Drammen, Norway. Geotechnique 21, 329-340.

Moum, J. og Heiberg, S. (1973). An experimental determination of the diffusion constant for high in situ salt concentrations in Norwegian marine clays. NGI intern rapport 50703-2, datert juni 1973.

Moum, J., Sopp, O.I. & Løken, T. (1968). Stabilization of undisturbed quick clay by salt wells. Väg- og vattenbyggaren, 1968, no 8. pp 98-103

NGI (2008). Bøle, Skien kommune. Risiko for kvikkleireskred. Rapport nr. 20011544-3, rev. 1, datert 8. august 2008.

Norsk Geoteknisk Forening (1982). Veiledning for symboler og definisjoner i geoteknikk. Presentasjon av geotekniske undersøkelser. Melding nr. 2, utgitt 1982.

Norsk Vassdrags- og Energidirektorat (2009). Planlegging og utbygging i fareområder langs vassdrag. Retningslinjer 1/2008. Sist revidert 5. mars 2009.

Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V. og Dahlin, T. (2004). Quick Clay in Sweden. Statens Geotekniska Institut, Report 65.

Rosenqvist, I.Th. (1954). Fysikalsk-kjemisk-mineralogisk undersøkelser over norske leirjordarter. Nordic Geotechnical meeting in Oslo, 24-26 May 1954.

Sveian, H., Janbu, N., Nestvold, J., Røe, Ø. og Skjelstad, L. (2002). Leirras sett fra en geologisk og geoteknisk synsvinkel. Bygda og raset – Leirras i Skjelstadmark og Hegra. Hegra Historielag.

Statens Vegvesen (1995). Håndbok 188 Veg på bløt grunn – Grunnforsterkning.

Statens Vegvesen (2007). E18 Kopstad – Gulli. Erfaringer med bruk av vertikale dren. Teknologivdelingen, rapport nr. 2496. 19 p.

Talme, O.A. (1968). Clay Sensitivity and Chemical Stabilization. Rapport nr. 56/68 frå Byggeforskningen, Stockholm.

Talme, O.A., Pajuste, M. og Wenner, C.-G. (1966). Secondary changes in the strength of clay layers and the origin of sensitivity clay. Byggeforskningsrådet rapport nr. 46.

Torrance, J.K. (1974). A laboratory investigation of the effect of leaching on the compressibility and shear strength of Norwegian marine clays. Geotechnique Vol. 24, No. 2, pp. 155-173.

Torrance, J.K. (1979). Post-depositional changes in the pore water chemistry of the sensitive marine clays of the Ottawa area, eastern Canada. Engineering Geology 114, 135-147.

Torrance, J.K. (1983). Towards a general model of quick clay development. Sedimentology, volume 30, pp 547-555.

Torrance, J.K. (1999). Physical, chemical and mineralogical influences on the rheology of remoulded low-activity sensitive marine clay. Applied Clay Science 14 (1999), 199-223.

<http://www.ncdot.org/doh/PRECONSTRUCT/highway/struktur/workshop/ContinuousFlightAugerPiles.pdf>

Utgitt i Rapportserien i 2013

- Nr. 1 Roller i det nasjonale arbeidet med håndtering av naturfarer for tre samarbeidende direktorat
- Nr. 2 Norwegian Hydrological Reference Dataset for Climate Change Studies. Anne K. Fleig (Ed.)
- Nr. 3 Anlegging av regnbed. En billedkavalkade over 4 anlagte regnbed
- Nr. 4 Faresonekart skred Odda kommune
- Nr. 5 Faresonekart skred Årdal kommune
- Nr. 6 Sammenfatning av planlagte investeringer i sentral- og regionalnettet for perioden 2012-2021
- Nr. 7 Vandringshindere i Gaula, Namsen og Stjørdalselva
- Nr. 8 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. Ellen Skaansar (red.)
- Nr. 9 Energibruk i kontorbygg – trender og drivere
- Nr. 10 Flomsonekart Delprosjekt Levanger. Kjartan Orvedal, Julio Pereira
- Nr. 11 Årsrapport for tilsyn 2012
- Nr. 12 Report from field trip, Ethiopia. Preparation for ADCP testing (14-21.08.2012)
- Nr. 13 Vindkraft - produksjon i 2012
- Nr. 14 Statistikk over nettleie i regional- og distribusjonsnettet 2013. Inger Sætrang
- Nr. 15 Klimatilpasning i energiforsyningen- status 2012. Hvor står vi nå?
- Nr. 16 Energy consumption 2012. Household energy consumption
- Nr. 17 Bioenergipotensialet i industrielt avfall
- Nr. 18 Utvikling i nøkkeltall for strømnetselskapene
- Nr. 19 NVEs årsmelding
- Nr. 20 Oversikt over vedtak og utvalgte saker. Tariffer og vilkår for overføring av kraft i 2012
- Nr. 21 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Utstrekning og utløpsdistanse for kvikkleireskred basert på katalog over skredhendelser i Norge
- Nr. 22 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Forebyggende kartlegging mot skred langs strandsonen i Norge Oppsummering av erfaring og anbefalinger
- Nr. 23 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Nasjonal database for grunnundersøkelser (NADAG) – forundersøkelse
- Nr. 24 Flom og skred i Troms juli 2012. Inger Karin Engen, Graziella Devoli, Knut A. Hoseth, Lars-Evan Pettersson
- Nr. 25 Capacity Building in Hydrological Services. ADCP and Pressure Sensor Training Ministry of Water and Energy, Ethiopia 20th – 28th February 2013
- Nr. 26 Naturfareprosjektet: Delprosjekt Kvikkleire. Vurdering av kartleggingsgrunnlaget for kvikkleire i strandsonen
- Nr. 27 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. Ellen Skaansar (red.)
- Nr. 28 Flomberegninger for Fedaelva, Kvinesdal kommune, Vest-Agder (025.3A1) Per Alve Glad
- Nr. 29 Beregning av energitilsig basert på HBV-modeller. Erik Holmquist
- Nr. 30 Flåm - Stampa norsk oppsummering. Lars Harald Blikra
- Nr. 31 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 4 Overvåking og varsling Overvåking ved akutte skredhendelser
- Nr. 32 Landsomfattende mark- og grunnvannsnett. Drift og formidling 2012. Jonatan Haga
- Nr. 33 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire. Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no

