



RAPPORT

Forskning og utvikling, FoU

Saltstabilisering av kvikkleire (SAK)

Arbeidspakke 3: Evaluering og anbefalinger

Prosjekteier:

Stjørdal kommune v/ Atle Horn

Prosjektleder:

Stjørdal kommune v/ Atle Horn

Arbeidspakkeleder:

Stjørdal kommune v/ Atle Horn

Rapportforfattere:

Multiconsult v/ Tonje Eide Helle

Kvalitetssikrere:

Norges Vassdrags- og Energidirektorat v/ Stein-Are Strand
og Bane NOR v/ Geir Svanø
Norges Geotekniske Institutt v/ Christian Sætre
Multiconsult v/ Anders Samstad Gylland

Prosjektbeskrivelse

Innovasjonsprosjektet «Saltstabilisering av kvikkleire (SAK)» har som mål å teste og utvikle en eller flere skånsomme og kostnadseffektive installasjonsprosedyrer for sikring av kvikkleireområder ved hjelp av saltbrønner. Prosjektet pågår fra høsten 2018 til våren 2021, og er et samarbeid mellom Stjørdal kommune, Statens vegvesen, Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE), Bane NOR, Norges Geotekniske Institutt (NGI) og Multiconsult AS. SAK støttes av Regionale Forskningsfond Midt-Norge, og har en totalramme på 3,2 MNOK.

Saltet kaliumklorid kan brukes som et alternativ til dagens sikrings- og grunnforsterkningsmetoder i kvikkleireområder. SAK skal utvikle og teste ut ulike installasjonsprosedyrer for saltbrønner til sikring av kvikkleireområder. I tillegg vil SAK vurdere kost-/nytte og miljøgevinst av saltbrønninstallasjon som skredsikring kontra eksisterende sikringsmetoder.

Arbeidet er delt inn i tre arbeidspakker:

Arbeidspakke 1: Installasjonsmetoder

Arbeidspakke 2: Kost-/nytte og miljø

Arbeidspakke 3: Evaluering og anbefalinger

Forord

Denne rapporten omhandler Arbeidspakke 3 Evaluering og anbefalinger. Målsetningen med arbeidspakken er å evaluere installasjonsmetodene med hensyn på installasjonseffekter, kostnader og klima. Videre skal arbeidspakken komme opp med anbefalinger for hvordan saltbrønner kan installeres for å sikre mot kvikkleireskred. Det er utført diffusjonsberegninger for å estimere nødvendig senteravstand mellom saltbrønner for ulike grunnforhold. Christian Sætre ved NGI kvalitetssikret diffusjonsberegningene, og Professor Helge Hellevang og professor emeritus Per Aagaard ved Universitetet i Oslo takkes for gode diskusjoner vedrørende modelloppbyggingen.

Prosjektgruppen i AP3 har bestått av:

Stjørdal kommune: Atle Horn

Statens vegvesen: Bob Hamel, Eigil Haugen

NVE: Stein-Are Strand, Toril Wiig

Bane NOR: Geir Svanø

NGI: Bjørn Kristian Fiskvik Bache, Marianne Kvennås

Multiconsult Norge AS: Tonje Eide Helle, Anders Samstad Gylland

Dato: 27. januar 2021

ISSN: 1893-1162

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Innledning	5
2	Bruksområder og krav til sikkerhet	7
2.1	Bruksområder og begrensninger	7
2.2	Redusert risiko for kvikkleireskred.....	7
2.3	Saltstabilisert leire betraktes som sprøbruddmateriale	8
2.4	Lokal- og områdestabilitet	8
3	Kvikkleirers geokjemi er avgjørende for effekten av saltstabilisering	9
3.1	Kvikkleirers geokjemiske historie.....	9
3.2	Saltstabilisering av kvikkleirer	10
3.2.1	Diffusjon – kort forklart	11
3.2.2	Endring av porevannskjemi over tid	11
4	Oppsummering av arbeidspakke 1 og 2	14
4.1	Arbeidspakke 1: Installasjonsmetoder	14
4.1.1	Oppsummering av utprøvde metoder	14
4.1.2	Borerigg.....	15
4.1.3	Lagdeling, grunnvann og poretrykk	15
4.1.4	Saltslurry, saltgranulat eller saltstaver.....	16
4.1.5	Poretrykksrespons	16
4.1.6	Diskusjon og konklusjoner	17
4.2	Arbeidspakke 2: Kost-/nytte og miljø	18
4.2.1	Sikringstiltak.....	18
4.2.2	Kostnader	19
4.2.3	Klimagassutslipp	20
4.2.4	Nytte-/kostanalyser	20
4.2.5	Ikke-prissatte konsekvenser.....	21
4.2.6	Konklusjoner	22
5	Videreutvikling av installasjonsmetoder	24
5.1	Realisering av saltstabilisering	24
5.2	Kaliumklorid i fast form og nødvendig brønn diameter	25
5.3	Alternative installasjonsmetoder.....	26
6	Prosjektering av saltstabilisering	27
6.1	Krav til prosjekterende	27
6.2	Faktorer som påvirker senteravstanden mellom saltbrønner	27
6.3	Nødvendige forundersøkelser	28
6.4	Utstrekning på stabilisert område	28
6.4.1	Saltbrønner installeres i selve skråningen.....	29
6.4.2	Saltbrønner installeres bakenfor kritisk glideflate	30
6.4.3	Alternativ installasjonsretning	32
6.5	Installasjonsmønster og senteravstand	32
6.5.1	Estimat av nødvendig mengde salt	33
6.5.2	Hele leirvolumet mellom saltbrønnene stabiliseres	33
6.5.3	Dekningsgrad	34
6.6	Oppfølging etter installasjon.....	38
6.7	Bestandighet	39
6.8	Miljø.....	39
7	Oppsummering	41
7.1	Bruksområde.....	41
7.2	Kriterium for stabilisering	41
7.3	Installasjonsmetode	41
7.4	Nytte-/kost og ikke-prissatte konsekvenser	41
7.5	Senteravstand	42
7.6	Anbefalinger til videreutvikling av installasjonsmetoden	42
7.7	Anbefaling til innsamling av erfaringsdata på NGTS Tiller-Flotten.....	42
8	Referanser	43
Vedlegg A.	Diffusjonsberegninger	i

FIGURER

Figur 1 a) Installasjonsmønster for saltbrønner. b) Saltbrønner installert i skråning.....	5
Figur 2 Kalium (K^+) har mindre hydratisert radius (lyseblått område) enn natrium (Na^+), magnesium (Mg^{2+}) og kalsium (Ca^{2+}).....	9
Figur 3 Endringer i porevannskjemi avstand a) $X/2$ og b) X , og adsorberte kation i avstand c) $X/2$ og d) X fra saltbrønnen.....	12
Figur 4 Skisse over utviklingen av saltinnhold i leirvolumet mellom to saltbrønner ved en gitt dybde over tid. a) Høy konsentrasjon av KCl i saltbrønnene. b) Konsentrasjonen av salt utjevnes i leirvolumet mellom brønnene. c) Utvasking av saltstabilisert leire.....	13
Figur 5 Poretrykksrespons første døgn etter start av installasjon av a) og b) saltstaver i saltbrønn (SW) 13 og 14, og c) og d) saltslurry i SW19 og SW20.....	17
Figur 6 Installasjonsprosedyrer for saltslurry (Metode B) og saltstaver (Metode C). Det hengende grunnvannspeilet (GVS) er markert på 1 m dybde. Modifisert etter [24].....	17
Figur 7 a)-c) Beregningsgang dersom selve skråningen stabiliseres.....	30
Figur 8 Beregningsgang dersom stabiliseringen utføres i området/platået bak skråningen.....	31
Figur 9 I tillegg til å sikre platået bak skråningen, installeres det på skrå nedover langs skråningen.....	32
Figur 10 a) Hele leirvolumet mellom saltbrønnene stabiliseres etter tid t. b) Senteravstanden (c/c) kan økes dersom det tillates at en viss andel (dekningsgrad) av leirvolumet stabiliseres etter tid t. Dekningsgrad er summen stabilisert (blått) areal delt på totalt areal mellom brønnene.....	32
Figur 11 Saltet sprer seg jevnt rundt brønnen som følge av diffusjon. Densitets- og hydrauliske gradienter vil øke hastigheten på spredningen av salt i en retning fra brønnen.....	33
Figur 12 Mengde KCl/ m^3 stabilisert leire ved ulike senteravstander. Forutsatt at hele volumet mellom saltbrønnene stabiliseres over tid.....	33
Figur 13 Uttak av senteravstand for saltbrønner fylt med 5 kg KCl/m brønn for leire med porøsitet på 50%, kationebyttekapasitet (CEC) på 11,5 meq/100 g tørr jord og KMgCa-forhold på 9,0%. Korrelasjonskurven er hentet fra Vedlegg A.....	34
Figur 14 Skisse på hvordan omrørt skjærfasthet kan variere i avstand fra saltbrønnen de første årene etter installasjon.....	35
Figur 15 a) Gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i KCl-stabilisert materiale ($c_{ur,KCl}$) er satt til 2,5 kPa basert på data fra leire fra ulike dybder rundt saltbrønn nr. 2, 3 og 7 (SW2, 3 og 7) på Dragvoll ca. 3,2 år etter installasjon. b) KMgCa-forholdet i leirprøvene. Data fra [1].....	35
Figur 16 Maksimal senteravstand beregnes ut fra dekningsgraden fra Trinn 1.....	36
Figur 17 a) KMgCa-forhold for omrørt skjærfasthet (c_{ur}) lik 1, 2 og 3 kPa. Data fra [1] og [9]. b) Stabilisert leire i avstand fra saltbrønn for å oppnå c_{ur} lik 1, 2 og 3 kPa i leire med porøsitet (ϵ_w) på 50% og kationebyttekapasitet (CEC) lik 11,5 meq/100 g tørr jord.....	38
Figur 18 a) KMgCa-forhold og b) saltinnhold i saltstabilisert leire under 100 års utvasking. Saltbrønner er plassert i distanse 2, 4, 6 og 8 m fra SOLUTION 0 hvor opprinnelig porevann i kvikkleira slipper inn i den simulerte leirkolonnen. Fra Vedlegg A.....	39
Figur 19 Korrelasjon mellom omrørt skjærfasthet (c_{ur}) og a) KMgCa-forhold og b) saltinnhold for saltstabilisert leire fra Dragvoll og Ulvensplitten. Data fra [1] og [9].....	40

TABELLER

Tabell 1 Sammenheng mellom saltinnhold, kationer og omrørt skjærfasthet.....	10
Tabell 2 Sammenstilling av de ulike installasjonsprosedyrene som ble prøvd ut i arbeidspakke 1.....	14
Tabell 3 Kostnader for installasjon av saltbrønner.....	19
Tabell 4 Kostnader per løpemeter (lm) skråning for de ulike sikringstiltakene.....	19
Tabell 5 Klimagassutslipp per løpemeter (lm) skråning i kg CO_2 -ekvivalenter.....	20
Tabell 6 Nytte-/kostfaktorer for sikringstiltakene inkl. kostnader for klimagassutslipp. NB! Etter ny gjennomgang av tallene er nytte-/kostfaktorene for saltbrønner noe endret fra rapport for arbeidspakke 2 [2].....	21
Tabell 7 Nytte-/kostfaktorer for saltbrønner med ulik senteravstand og enhetspris for ferdig installert saltbrønn. Nytteverdien er hentet fra [2]. Etter ny gjennomgang av beregningene i EFFEKT, er nytte-/kostfaktorene for saltslurry og -staver med senteravstand 1,5 m noe endret fra verdiene først publisert i rapport for Arbeidspakke 2 [2].....	24
Tabell 8 Maksimal mengde salt per m brønn med ulike diametere og ulike former av KCl.....	26
Tabell 9 Faktorer som påvirker senteravstanden mellom saltbrønner.....	28

Tabell 10 Nødvendig dekningsgrad minker med økende opprinnelig omrørt skjærfasthet i kvikkleira ($c_{ur,kvikk}$). Gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i leirvolumet mellom saltbrønnene ($c_{ur,m}$) lik 1 kPa, og i KCl-stabilisert leire ($c_{ur,KCl}$) lik 2,5 kPa.....	35
Tabell 11 Maksimal senteravstand dersom det installeres saltbrønner med diameter 5,6 cm og 5 kg KCl/m brønn i leire med 50% porøsitet og CEC = 11,5 meq/100 g tørr jord.....	37
Tabell 12 Maksimal senteravstand for å oppnå gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet ($c_{ur,m}$) på 1 og 2kPa. Saltbrønn med diameter 5,6 cm og 5 kg KCl/m brønn i leire med porøsitet 50% og CEC = 11,5 meq/100 g tørr jord.....	37
Tabell 13 Variasjon i senteravstand for å oppnå gjennomsnittlig skjærfasthet i leirvolum ($c_{ur,m}$) på 1, 2 og 3 kPa for gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i saltstabilisert leire ($c_{ur,KCl}$) på 2,5 og 3,0 kPa. I eksempelet er det antatt at kvikkleira har omrørt skjærfasthet $c_{ur} = 0,25$ kPa, porøsitet 50% og CEC lik 11,5 meq/100 g tørr jord.	38

SYMBOLER OG FORKORTELSER

a	dekningsgrad (andel av overflaten med $c_{ur} > 1$ kPa)
A	arealet med $c_{ur} > 1$ kPa ved tid t
c	maksimal senteravstand mellom saltbrønnene
Ca ²⁺	kalsium
Ca-X ₂	adsorbent kalsium
Cl ⁻	klorid
c _{ur}	omrørt skjærfasthet (kPa)
c _{ur;m}	gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i det totale leirvolumet = 1 kPa
c _{ur;KCl}	gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i KCl-stabilisert materiale = 2,5 kPa
c _{ur;kvikk}	omrørt skjærfasthet for kvikkleire (0,1-0,5 kPa)
F	sikkerhetsfaktor
F _{kritisk}	sikkerhetsfaktor for kritisk glideflate
γ _{M, cu}	partialfaktor for totalspenningsanalyser
K ⁺	kalium
KCl	kaliumklorid
K-X	adsorbent kalium
Mg ²⁺	magnesium
Mg-X ₂	adsorbent magnesium
Na ⁺	natrium
NaCl	natriumklorid
Na-X	adsorbent natrium
ρ	densitet (g/cm ³)
t	tid
X	avstand fra saltbrønn

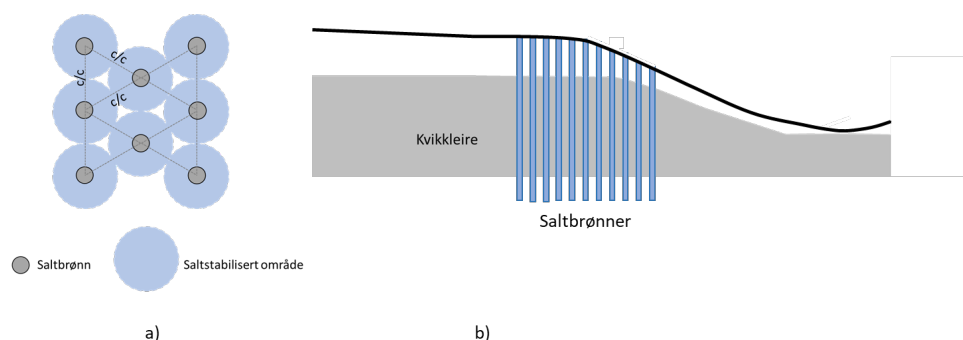
1 Innledning

Sikring av kvikkleireområder utføres som oftest ved å anlegge motfylling eller heve bekkebunnen i foten av skråningen, gjerne i kombinasjon med avlastning av terrenget i toppen av skråningen. Slike tiltak medfører store og til tider uønskede terrenginngrep. Tiltakene er plasskrevende, og kan komme i konflikt med eksisterende bebyggelse, infrastruktur og verneverdige verdier. Mange av de kartlagte kvikkleiresonene befinner seg i områder med raviner. Ravinedalene er definert som sårbare naturtyper, og det forsøkes å bevare de ravinedalene som er igjen. I tillegg til å ødelegge landskapstypen, vil terrenginngrepene også kunne ødelegge det store artsmangfoldet som ofte finnes i ravinedalene.

Grunnforsterkning kan benyttes som et alternativ til terrengtiltak. Kalk-/sementpeling er en effektiv grunnforsterkningsmetode. Ulempene er at metoden kan medføre redusert sikkerhet i skråningen under installasjon, og at det er knyttet store klimagassutslipp til produksjonen av kalk og sement.

Ved å introdusere kaliumklorid (KCl) til leir-vannsystemet i kvikkleire, endres ionekomposisjonen i leira slik at den kvikke oppførselen opphører. Leira oppnår økt omrørt skjærfasthet, flytegrense og plastisitetsindeks som følge av endret ionekomposisjon, selv ved lave saltinnhold (< 2 g/L) [1]. Kaliumklorid, er i likhet med natriumklorid, et salt og produksjon av KCl har lavere klimagassutslipp enn produksjonen av kalk og sement [2]. Forskningsprosjektet «Saltstabilisering av kvikkleire (SAK)» (RFFMIDT prosjekt nr. 284697) ble igangsatt for å finne skånsomme installasjonsprosedyrer, og evaluere nytte-/kost, samt klima- og miljøulempene knyttet til metoden.

I arbeidspakke 1 (AP1) ble ulike installasjonsmetoder benyttet for å installere saltbrønner fylt med kaliumklorid på Norwegian GeoTest Sites (NFR prosjekt nr. 24650) sitt forsøksfelt Tiller-Flotten utenfor Trondheim [3]. Tidsbruk og mengder fra disse installasjonene ble benyttet i nytte-/kost- og miljøanalysene i arbeidspakke 2 (AP2) [2]. 12. september 2019 ble hovedresultatene lagt fram på en workshop i Stjørdal kommune der et utvalg fagpersoner var invitert for å diskutere resultatene og komme med innspill [4]. Rapportene fra AP1, AP2 og innspillene fra workshopen er grunnlaget for arbeidet med evalueringene og anbefalingene i denne rapporten.



Figur 1 a) Installasjonsmønstre for saltbrønner. b) Saltbrønner installert i skråning.

Målsetningen for arbeidspakke 3 (AP3) er å evaluere installasjonsprosedyrene og komme med anbefalinger for hvordan saltbrønner bør installeres (Figur 1) og prosjekteres. For å kunne implementere arbeidet i håndbøker og veiledere har det vært nødvendig å utarbeide beregningsprosedyrer og korrelasjonskurver for å bestemme nødvendig volum av saltstabilisering og maksimalt tillatt senteravstand mellom saltbrønnene for ulike norske grunnforhold. Disse korrelasjonskurvene kan benyttes for prosjektering av saltstabilisering, og vil også kunne benyttes i det videre arbeidet med å gjøre installasjonsprosedyrene mer kostnadseffektive.

Saltet kaliumklorid benyttes for å endre egenskapene i kvikkleira. Bruk av natriumklorid/bordsalt (NaCl) vil *ikke* medføre permanent sikring av kvikkleira (se kapittel 3), og kan derfor ikke benyttes til saltstabilisering. I denne rapporten omtales for enkelhets skyld:

- Kaliumklorid (KCl) som salt
- brønner/borhull fylt med KCl som saltbrønner
- leire stabilisert med KCl som saltstabilisert leire

2 Bruksområder og krav til sikkerhet

2.1 Bruksområder og begrensninger

Kvikkleireproblematikk og områdestabilitet gir utfordringer for byggeprosjekter med store kostnader for sikringstiltak. Saltstabilisering forbedrer grunnforholdene i forkant av bygging slik at områdestabiliteten ikke blir avgjørende for om området kan bebygges eller ikke. Metoden vil kunne sikre gjennomføring av byggeprosjekter i både offentlig og privat regi. Metoden anbefales brukt i områder der konvensjonelle sikringstiltak (terrenginngrep, kalk-/sementpeler) ikke er mulig eller ønskelig å gjennomføre.

Den nye sikringsmetoden ved installasjon av brønner fylt med kaliumklorid vil:

- forebygge mot skred i naturlige og bebygde kvikkleireskråninger, og dermed øke sikkerheten for folk som oppholder seg og ferdes i kvikkleireområder
- sikre gjennomførbarhet av utbyggingsprosjekter
- ivareta landskapstyper (ravinelandskap), miljøverdier og kulturminner
- føre til økt arealutnyttelse som følge av redusert løsne- og utløpsområde, og dermed gjøre arealer som per i dag ikke kan bebygges tilgjengelig for utbygging av bl.a. boligområder, offentlige bygg, næringsbygg, veger, jernbane og gang- og sykkelveger
- øke sikkerheten i anleggsfasen

Saltstabilisering kan ikke benyttes som eneste tiltak:

- når det er krav til absolutt sikkerhetsfaktor (lokalstabilitet)
- i akutte skredsituasjoner
- for å redusere setninger eller vibrasjoner

Saltbrønner bør ikke installeres i områder med artesiske trykk grunnet fare for erosjon av borhull.

Dersom saltstabiliserte masser graves bort, så kan disse massene gjenbrukes i leirfyllinger.

Saltstabiliserte masser anses ikke som forurensede masser.

2.2 Redusert risiko for kvikkleireskred

Kvikkleire har omrørt skjærfasthet lavere enn 0,5 kPa¹ [6]. Sprøbruddmateriale er i NVEs kvikkleireveileder [7] definert som leir- eller siltmaterialer med omrørt skjærfasthet lavere enn 2 kPa og sensitivitet > 15. Områdestabiliteten skal vurderes i områder med sprøbruddmateriale.

Kvikkleireskred i Norge deles inn i:

- Retrogressive skred
- Progressive skred

Store retrogressive kvikkleireskred i Norge og Canada (lengde over 100 m) har gått i områder der leira har omrørt skjærfasthet under 1 kPa [8].

Store progressive kvikkleireskred utløses som følge av at leira overbelastes. Skredet utvikler seg enten forover eller bakover som følge av hurtig og stor reduksjon av skjærfasthet etter brudd.

¹Omrørt skjærfasthet måles med konusforsøk iht. NS 8015:1988 [5]

Saltstabilisering fører til permanent økt omrørt skjærfasthet (se kapittel 3), redusert flyteindeks og økt plastisitetsindeks. Selv om den omrørte skjærfastheten i leira økes til over 1 kPa så kan fortsatt initialscredet løsne, men den bakovergripende (retrogressive) utviklingen vil stoppe opp, og løsneområdet blir dermed betraktelig redusert. Arealet av utløpsområdet reduseres også som følge av redusert løsneområde og pga. at massene ikke strømmes ut av skredgropen.

Treaksialforsøk på saltstabilisert leire har vist at udrenert skjærfasthet ikke øker i saltstabilisert leire [9], men den hurtige reduksjonen av fasthet etter brudd som ses for kvikkleirer ble redusert. Saltstabilisering fører derfor ikke til økt beregningsmessig stabilitet, men risikoen for progressive kvikkleireskred reduseres.

Om det tillates bruk av saltstabilisering som sikringstiltak, må avklares med byggherren og Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) for hver enkelt sak.

2.3 Saltstabilisert leire betraktes som sprøbruddmateriale

Omrørt skjærfasthet øker med økende saltinnhold i leiras porevann. Dvs. at den saltstabiliserte leira ikke er et sprøbruddmateriale så lenge saltinnholdet i leira mellom saltbrønnene er høyt (større enn ca. 2 g/L). Etter hvert tømmes saltbrønnene for salt, og den saltstabiliserte leira utsettes for utvasking. Selv om saltinnholdet minker til under 2 g/L i den utvaskede saltstabiliserte leira, så forblir den omrørte skjærfastheten høyere enn 1 kPa pga. varig endret porevannskjemi (se utdyping i kapittel 3.1). Det er usikkert hvor lang tid det tar før den saltstabiliserte leira får en omrørt skjærfasthet under 2 kPa. Med mindre annet kan dokumenteres, så må saltstabilisert leire derfor betraktes som et sprøbruddmateriale.

2.4 Lokal- og områdestabilitet

Saltstabiliserte områder skal oppfylle krav til lokal- og områdestabilitet iht.:

- Eurokode 7
- NVEs kvikkleireveileder [7]
- Statens vegvesens Håndbok N200 [10]
- Bane NORs Tekniske Regelverk [11]

3 Kvikkleirers geokjemi er avgjørende for effekten av saltstabilisering

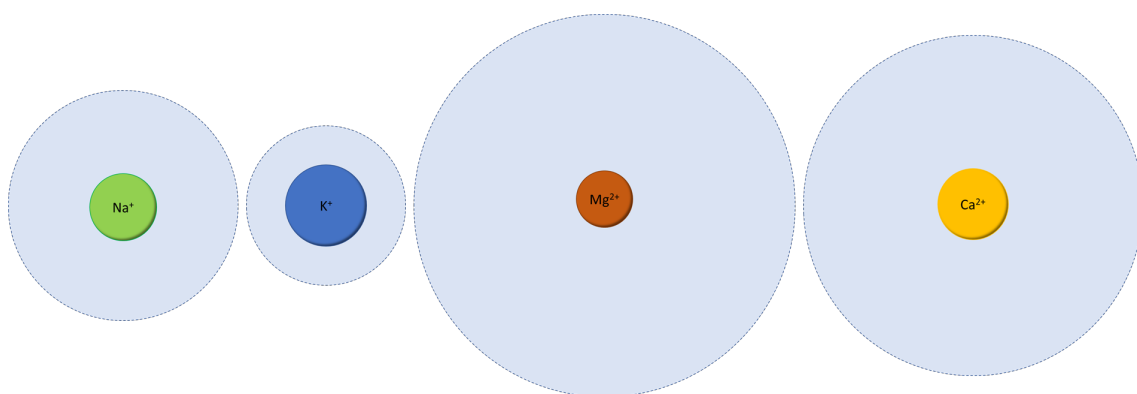
3.1 Kvikkleirers geokjemiske historie

Kvikkleirer er utvaskede marine leirer som opprinnelig ble avsatt under havnivå mot slutten av og etter siste istid. Leirmineralene flokkulerte i det salte avsetningsmiljøet (saltinnhold ca. 30-35 g/L)[12],[13], og dannet en åpen struktur med store porer fylt med saltvann. Sjøvann er dominert av natrium (Na^+) og klorid (Cl^-), og porevannet i de marine leirene inneholdt også størst andel av disse ionene. Den åpne «korthusstrukturen» er sterk så lenge saltinnholdet i porevannet er høyt.

Etter landhevingen har ferskvann vasket ut saltet i deler av de marine leiravsetningene. Når saltinnholdet minker til under 2 g/L, så kan leirene bli kvikke [14],[15]. Forutsetningen for at leirene blir kvikke ved lave saltinnhold er at kationene i porevannet fortsatt er dominert av natrium (Na^+) [16],[17],[12],[18].

Leirmineralene i norske leirer består i hovedsak av illitt og kloritt. I norske leiravsetninger er pH rundt 8-9. Ved slike pH-forhold er leirmineralene negativt ladde. Leirmineraler er elektrokjemisk aktive pga. sine negativt ladde overflater. I et leir-vann-system bestående av leirmineraler og porevann med ulike positivt og negativt ladde ioner (kationer og anioner), så vil leirmineralene adsorbere kationer slik at overflateladningen blir minst mulig. Overflateladningen og de adsorberte kationene utgjør det diffuse dobbeltlaget (DDL). Størrelsen på DDL avgjør hvor store de frastøtende kreftene er mellom leirmineralene.

Høyt saltinnhold i porevannet gjør at de frastøtende kreftene mellom leirmineralene blir små. Dermed blir den omrørte skjærfastheten høy (Tabell 1). Ved lave saltinnhold vil også konsentrasjonen av ulike kationer virke inn. Leirer med lavt saltinnhold der porevannet er dominert av Na^+ , vil ha lavere omrørt skjærfasthet enn leirer med lavt saltinnhold der porevannet består av kationer med mindre hydratisert radius, slik som kalium (K^+) (Figur 2), eller høyere valens (større ladning), slik som kalsium (Ca^{2+}) og magnesium (Mg^{2+}). Dette er fordi kalium, magnesium og kalsium reduserer størrelsen på DDL og dermed også de frastøtende kreftene, sammenlignet med natrium.



Figur 2 Kalium (K^+) har mindre hydratisert radius (lyseblått område) enn natrium (Na^+), magnesium (Mg^{2+}) og kalsium (Ca^{2+}).

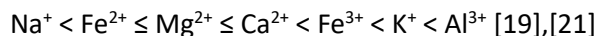
Tabell 1 Sammenheng mellom saltinnhold, kationer og omrørt skjærfasthet

	Saltinnhold	Kationer	Frastøtende krefter	Omrørt skjærfasthet (kPa)
Marin leire	> 2 g/L	Ingen betydning	Små	> 1,0
Kvikkleire	< 2 g/L	Na ⁺ > 80%	Store	< 0,5
Ikke-kvikk leire	< 2 g/L	K ⁺ +Mg ²⁺ +Ca ²⁺ > 20%	Små	> 1,0

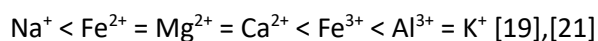
Leirmineralene adsorberer kationer, og de adsorberte kationene er utbyttbare. Kationers evne til å bli adsorbent (affinitet) øker med:

- økende valens (ladning på ionene) og minkende hydratisert radius:
 - Na⁺ < K⁺ < Mg²⁺ < Ca²⁺ < Al³⁺ < Fe³⁺ [19],[20]
- tilgjengelig konsentrasjon i porevannet

Natrium og kalium er begge monovalente, men den hydratiserte radiusen til kalium er mindre enn den hydratiserte radiusen til natrium (Figur 2). Ladningen til kalium blir dermed mer «effektiv», og kalium adsorberes enklere til leirmineraloverflaten enn natrium. Det er også den mindre hydratiserte radiusen som er årsaken til at DDL og dermed også de frastøtende kreftene er mindre i leirer med porevann bestående av kalium enn i porevann bestående av natrium. Dette er årsaken til at ulike kationer har ulik innvirkning på de geotekniske egenskapene. Kationers evne til å øke den omrørte skjærfastheten øker i følgende rekkefølge:



Kationers evne til å øke Atterberg grensene øker i følgende rekkefølge:



Da leirmineralene ble avsatt i sjøvann dominert av natrium, så ble de fleste adsorberte plassene på leirmineraloverflaten også okkupert av natrium. Ferskvann inneholder kalsium og magnesium, som begge har høyere affinitet enn natrium. Når ferskvann introduseres i porevannet blir kalsium og magnesium adsorbent, mens natrium frigis til porevannet. Derfor er porevannet i kvikkleirer fortsatt dominert av natrium, selv om kalsium og magnesium introduseres via grunnvannsstrømmer.

Etter hvert som de fleste adsorberte plassene er okkupert av kalsium og magnesium, tømmes leirvann systemet for natrium. Dermed øker konsentrasjonen av kalsium og magnesium også i porevannet, og etter hvert endres leiren fra å være kvikk til ikke kvikk. Dette er en naturlig pågående stabiliseringsprosess som tar tusenvis av år. Prosessen kan akselereres ved å introdusere saltet kaliumklorid (KCl). Selv om kalium har lavere affinitet enn kalsium og magnesium, så er effekten på de geotekniske egenskapene større (omrørt skjærfasthet og Atterberg grenser). I tillegg er diffusjonshastigheten for KCl større enn for kalsiumklorid (CaCl₂) og magnesiumklorid (MgCl₂), og stabiliseringsprosessen skjer derfor raskere.

3.2 Saltstabilisering av kvikkleirer

For å stabilisere kvikkleirer med KCl, så installeres det brønner fylt med KCl i kvikkleireavsetningen (Figur 1). I 1972 ble det installert saltbrønner over et område på 6000 m² på Ulvensplitten i Oslo for å stabilisere området før utgraving i forbindelse med et vegprosjekt [22]. Saltbrønnene på Ulvensplitten ble det installert med en senteravstand på 1,5 m. Siden saltet tilsettes i fast form,

forblir løsningen i brønnen mettet over lang tid, og diffusjonsprosessen går raskere og pågår over lengre tid enn om saltet tilsettes som løsning.

Ved å installere brønner fylt med kaliumklorid (KCl) i kvikkleire, så vil saltet spre seg ut i omkringliggende leirvolum ved:

- Diffusjon
- Strømning
 - Hydraulisk gradient over området
 - Densitetsgradient mellom løsning i brønn ($\rho > 1,0 \text{ g/cm}^3$) og porevannet i omkringliggende leire ($\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$) så lenge vannspeilet i brønnen er i nivå med grunnvannsnivået i omkringliggende leire

3.2.1 Diffusjon – kort forklart

Virrevandring er et etablert uttrykk i fysikken, og er det samme som Brownske bevegelser. I gasser og væsker virrer molekylene omkring. De flytter seg, kolliderer med hverandre og endrer kurs, slik at det ser ut som de «virrer».

Når et ion flytter seg fra A til B i en væske, så kan et annet flytte seg fra B til A. Eller fra B til C, og et annet fra C til A osv. Om det er lik konsentrasjon overalt så blir det ingen endring i konsentrasjon, men ionene bytter likevel plass. Men om det ved A er dobbelt så stor konsentrasjon som ved B, så kan for eksempel to ion flytte seg fra A til B, samtidig som bare en går tilbake til A. Dermed jevner konsentrasjonen av ioner seg etter hvert ut i væska. Det er i bunn og grunn dette som er diffusjon.

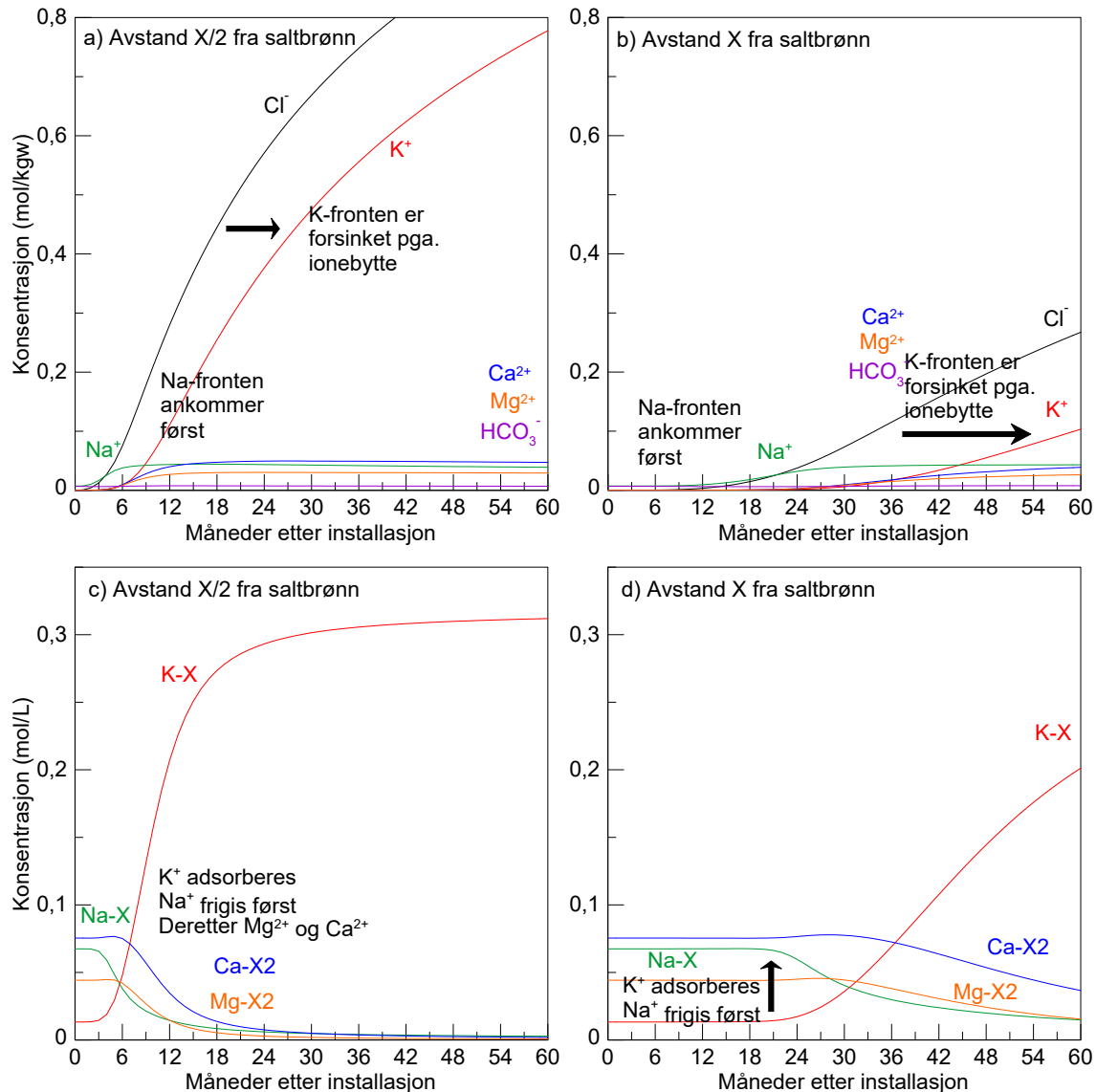
Ficks lov forenkler dette slik at vi beskriver fluksen av stoff fra området med høy konsentrasjon til området med lav konsentrasjon med en lov der fluksen er proporsjonal med konsentrasjonsgradienten, og av dette utleder vi diffusjonsligningen. Så med Ficks lov ser det ut som ionene beveger bare i en retning, fra høy til lav konsentrasjon.

3.2.2 Endring av porevannskjemi over tid

Klorid er et konservativt element som ikke inngår i geokjemiske reaksjoner med leirmineraloverflaten. Kloridfronten transporteres derfor uhindret gjennom leirvolumet i elektrisk likevekt med kationer som er til stede i porevannet. Kalium vil inngå i ionebyttereaksjoner med leirmineraloverflaten, og vil dermed forsinkes gjennom leirvolumet (Figur 3a og b).

Siden konsentrasjonen av kalium etter hvert blir høy i porevannet, så vil kalium adsorberes til leirmineraloverflaten mens de adsorberte ionene frigis til porevannet (Figur 3c og d). Natrium som har lavest affinitet frigis først (grønn kurve i Figur 3). Man vil derfor først se en front av natrium og klorid (svart kurve) som transporteres gjennom leirvolumet etterfulgt av magnesium (oransje) og kalsium (blå). Til slutt kommer kaliumfronten (rød) etter hvert som leirmineraloverflaten fylles med kalium (K-X).

I tenkt avstand $X/2$ er leirmineraloverflaten nesten mettet med kalium etter 48 måneder. Etter hvert vil dette også skje i avstand X fra saltbrønnen. Konsentrasjonen av natrium, magnesium og kalsium i porevannet vil avta med tiden siden de transporteres ut av systemet.



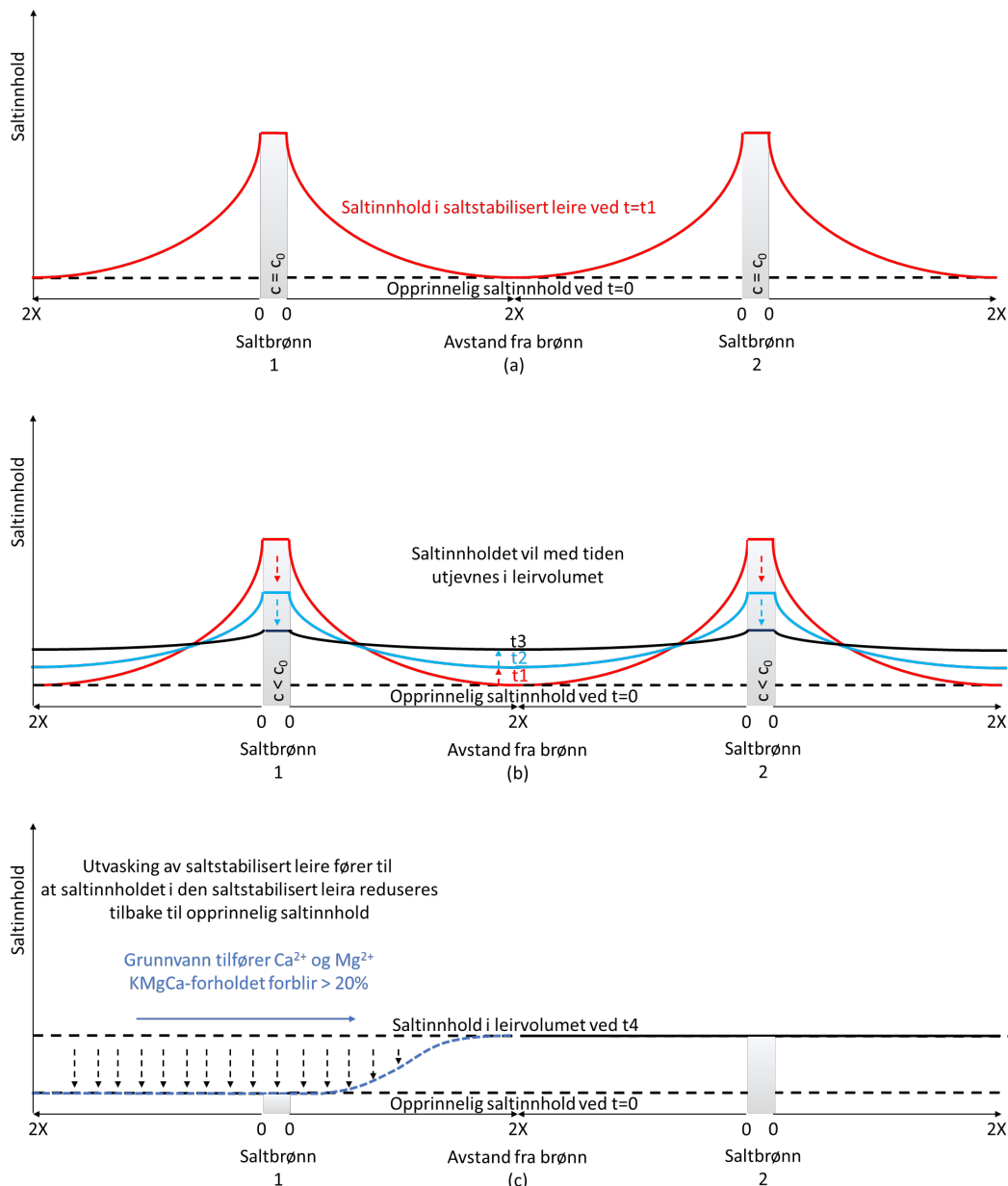
Figur 3 Endringer i porevannskjemi avstand a) X/2 og b) X, og adsorberte kation i avstand c) X/2 og d) X fra saltbrønnen.

Korrelasjoner mellom porevannskjemien og de geotekniske egenskapene for saltstabiliserte leirer fra Ulvensplitten i Oslo og Dragvoll i Trondheim [1] viste at ved å øke kalium-, magnesium- og kalsiumforholdet (KMgCa-forholdet) til over 20% (ligning 1 med alle konsentrasjoner i meq/L) så endret leira seg fra å være til kvikk til ikke kvikk selv ved lave saltinnhold (< 2 g/L). Den omrørte skjærfastheten (c_{ur}) økte til over 1 kPa, flytegrensen økte til over naturlig vanninnhold og plastisitetsindeksen økte fra lav til middels (IP > 10%). Ved å øke c_{ur} til over 1 kPa, så vil store retrogressive kvikkleireskred kunne forhindres.

$$KMgCa - \text{forholdet} = \frac{K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}}{Na^+ + K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}} \cdot 100\% \quad \text{Ligning 1}$$

Det ser ut til at forbedringen av de geotekniske parameterne skjer til et visst saltinnhold i porevannet nås. For kvikkleira på Dragvoll inntraff dette ved et saltinnhold på ca. 10 g/L hvor både konus udrenert skjærfasthet, flyte- og utrullingsgrensene stabiliserte seg på en øvre verdi [1],[21].

Så lenge konsentrasjonen av KCl er høy i saltbrønnene, så vil saltinnholdet i porevannet i leira rundt brønnene øke (Figur 4a). Etter noe tid vil saltbrønnene tømmes for salt, og saltinnholdet i leirvolumet mellom brønnene vil med tiden utjevnes (Figur 4b). Etter hvert vil grunnvannsstrømmer vaske ut saltet fra den saltstabiliserte leira. Dermed reduseres saltinnholdet til opprinnelig saltinnhold (Figur 4c). Likevel blir ikke leira kvikk igjen så lenge det kun er små mengder natrium til stede i grunnvannet. Som oftest består grunnvann i hovedsak av kationene kalsium og magnesium. $KMgCa$ -forholdet vil dermed forbli høyere enn 20%. Derfor kan *ikke* NaCl benyttes til saltstabilisering av kvikkleirer.



Figur 4 Skisse over utviklingen av saltinnhold i leirvolumet mellom to saltbrønner ved en gitt dybde over tid. a) Høy konsentrasjon av KCl i saltbrønnene. b) Konsentrasjonen av salt utjevnes i leirvolumet mellom brønnene. c) Utvasking av saltstabilisert leire.

4 Oppsummering av arbeidspakke 1 og 2

Hovedkonklusjonene fra arbeidspakke 1 og 2, samt innspillene fra workshopen den 12.09.2019 er oppsummert i dette kapittelet.

4.1 Arbeidspakke 1: Installasjonsmetoder

4.1.1 Oppsummering av utprøvde metoder

I arbeidspakke 1 ble ulike installasjonsprosedyrer av saltbrønner utprøvd for å undersøke:

- egnetheten av konvensjonelle geotekniske grunnboringsrigger til installasjon av saltbrønner
- om det er mulig å installere saltbrønner uten poretrykksøkning i kvikkleira
- hvor lang tid installasjonsarbeidene tar

Det ble til sammen installert 21 stk. saltbrønner der alle brønnene ble forboret med spyleboring ned til 20-25 m dybde for deretter å bli fylt med salt enten i form av saltslurry som ble pumpet ned i brønnen, eller ved å installere prefabrikerte staver med sammenpresset salt. Tre ulike rigger ble benyttet:

- Gravemaskin med påmontert Geotech bortårn (Metode A i Tabell 2)
- GeoMachine GM8 grunnboringsrigg (Metode B og C i Tabell 2)
- Sonicrigg (Metode D i Tabell 2)

Forboringen ble utført ved bruk av ulike borkroner, borstenger og rotasjons- og synkehastighet.

Tabell 2 Sammenstilling av de ulike installasjonsprosedyrene som ble prøvd ut i arbeidspakke 1.

	Metode A	Metode B	Metode C	Metode D
Borerigg	Konvensjonell grunnboringsrigg*	Konvensjonell grunnboringsrigg	Konvensjonell grunnboringsrigg	Sonic rigg
Borkrone	90 mm kryssborkrone 19 mm spylehull	90 mm kryssborkrone 19 mm spylehull	90 mm kryssborkrone 19 mm spylehull	85 mm ring bit, drag bit og PDC bit
Borstenger	Titan drill drain 40/27	Totalsonderings- stenger 45 mm	Totalsonderings- stenger 45 mm	Sonicborstenger 75 mm
Rotasjonshastighet	Ikke målt	125-128 rpm	125-128 rpm	Ikke målt**
Synkehastighet	Ikke målt	155-160 cm/min	155-160 cm/min	Ikke målt
Salt	KCl-slurry	KCl-slurry	KCl-staver	KCl-slurry
Installasjon av salt	Pumpet gjennom Ischebeckstagene stående på 18-25 m dybde	Pumpet ned i forborede vannfylte borhull gjennom en 32 mm armert slange	1 m lange staver ble skrudd sammen og senket ned i forborede, vannfylte borhull	Pumpet ned i forborede vannfylte borhull gjennom en 32 mm armert slange
Hastighet på saltslurry	1080 L/t	400 L/t	-	400 L/t
Nødvendig antal bormannskap	3	3	2	3

* ble installert med bortårn påmontert en gravemaskin, men dette har samme funksjon som en konvensjonell grunnboringsrigg

** har maksimal rotasjonshastighet på 170 rpm

4.1.2 Borerigg

Fordelene med å bruke konvensjonelle geotekniske grunnboringsrigger til installasjon av saltbrønner er mange:

- Tilgjengelig hos mange aktører; private så vel som offentlige
- Ofte beltegående og lette (< 10 tonn) slik at de kommer seg relativt enkelt fram i ulendt terreng
- Har gode justeringsmuligheter av bortårnet for å minimere horisontalavvik i dybden
- Lave transport og riggekostnader sammenlignet med større rigger som benyttes for andre formål som f.eks. jetpeling, kalk-/sementpeling, continuous flight auger osv.

Under installasjonsarbeidene i AP1 ble det observert følgende ulemper ved bruk av konvensjonelle geotekniske grunnboringsrigger:

- Installasjonen var svært tidkrevende siden den måtte utføres i flere faser:
 - forboring, installasjon av salt, og tetting med bentonitt
- Ressurskrevende i form av personell for å få til effektiv framdrift; tre personer ved å installere KCl-slurry og to personer ved å installere KCl-staver

Det tok 1,0-2,0 timer å installere hver brønn inkludert tid for tilrigging. Installasjon av prefabrikerte saltstaver var klart mest effektivt både med tanke på tid og behov for personell i felt.

Saltbrønner skal installeres med liten senteravstand. Det er derfor viktig at riggen er enkel å navigere i felt, og at bortårnet har justeringsmuligheter slik at brønnen installeres rettest mulig.

Konvensjonelle grunnboringsrigger er normalt godt utrustet med justeringsmuligheter for bortårnet. Det gravemaskinpåmonterte bortårnet som ble benyttet i dette prosjektet og Sonic-riggen hadde ingen justeringsmuligheter på tvers av gravemaskinarmen eller traktoren. Det var derfor viktig at underlaget som gravemaskinen og traktoren stod på var plant.

Det kan tenkes at saltbrønnene bør installeres på skrå nedover i skråningen. Bortårnet trenger da justeringsmuligheter til større vinkler enn det som er mulig med grunnundersøkelsesrigger.

Det er viktig med skånsom installasjon. Spyleboring med vann er skånsomt så lenge borhullet er åpent hele veien opp til terreng, og sirkulasjonen opprettholdes. De geotekniske grunnboringsriggene er utstyrt med mulighet for å justere vanntrykket. Vanligvis kan pumpetrykket justeres opp mot 50 bar, og spyle opp mot 45 L/min.

Det anbefales ikke å bruke lufttrykk i kvikkleire.

4.1.3 Lagdeling, grunnvann og poretrykk

Lagdelingen på feltet er avgjørende for effektiviteten av installasjonsarbeidene. På Tiller-Flotten var det et sandlag i de øvre 2-3 m. Dette medførte at vannet fant andre veier enn opp gjennom borhullet under spyleboringen. Evakueringen av vann og boreslam fra borhullet ble dermed mindre effektiv, noe som kan ha ført til massefortrengning i borhullet. Ved slike forhold anbefales det å benytte foringsrør gjennom topplaget.

Det er enklere å holde borhullet åpent i rene leiravsetninger enn i avsetninger med silt- og sandlag. Boring med høy rotasjon i kvikkleire vil føre til fullstendig omrørte masser. Disse massene blandet med tilført vann fungerer som støttevæske i borhullet. Mektige silt-/sandlag i avsetningene kan

likevel føre til at borhullene kollapser. Metodene som er benyttet i dette prosjektet anbefales ikke dersom det er mektige silt-/sandlag i avsetningene.

De hydrogeologiske forholdene på feltet har stor innvirkning på hvordan brønnene bør installeres. På NGTS Tiller-Flotten var det et hengende grunnvannsspeil på ca. 1 m dybde, med poretrykk med dybden under hydrostatisk. Boring gjennom de tette lagene førte til økte poretrykk i dybden pga. at det i borhullet ble stående en vannsøyle helt opp til det hengende grunnvannet. Dette medførte at saltbrønnene måtte tettes i toppen, noe som medfører økte installasjonskostnader.

4.1.4 Saltslurry, saltgranulat eller saltstaver

Saltkrystaller ble blandet med vann og pumpet ned i brønnen via en MAI-pumpe NT400 (skruepumpe). For å unngå at rørene tetter seg, så må saltslurrien være i konstant sirkulasjon. Dette var vanskelig å få til i praksis, noe som medførte produksjonsstans med lange pauser og i verste fall avbrutt installasjon.

Basert på evaluering av metodene som ble benyttet i AP1 anses saltstaver som det beste alternativet fordi:

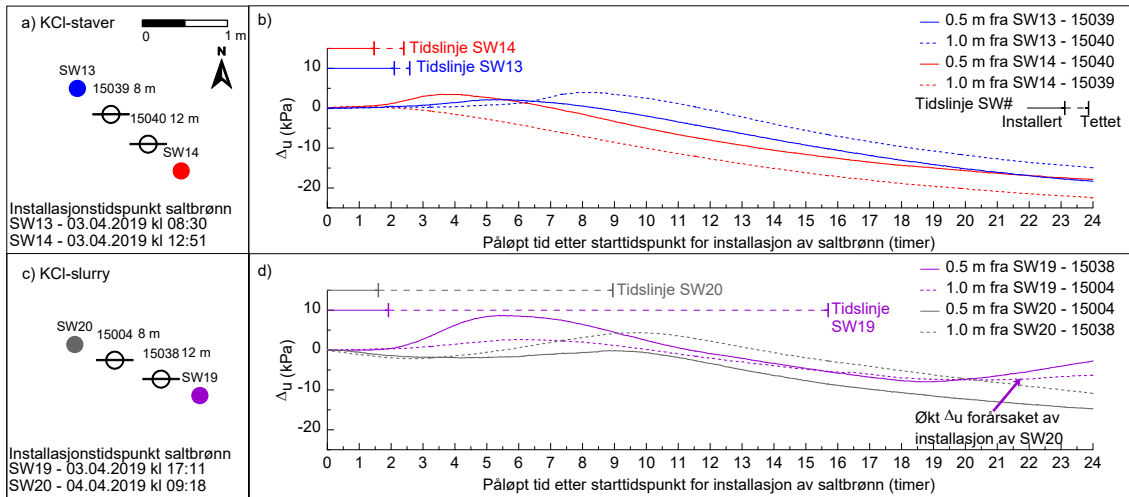
- enkelt å installere i felt
- kontroll med hvor mye salt som installeres i borhullet
- jevn fordeling av salt over hele dybden av brønnen
- unngår overflateforurensning
- installerer mest mulig salt på minst mulig volum slik at diameter på brønnen blir minst mulig

Ferdigproduserte saltstaver er imidlertid ikke tilgjengelig på markedet.

Saltgranulat eller -pellets kan være enklere å håndtere og få ned i brønnene enn det saltkrystallene som ble benyttet til å lage saltslurry. Dette ble imidlertid ikke prøvd ut i dette prosjektet.

4.1.5 Poretrykksrespons

Poretrykksresponsen som følge av installasjonsarbeidene var liten. Det ble observert maksimalt poreovertrykk på 2,3-8,7 kPa i poretrykksmålerne installert i en avstand på 0,5 m fra saltbrønnene 3,5-5,5 timer etter start av installasjonsarbeidene [24]. En meter fra saltbrønnene ble det observert et maksimalt poreovertrykk på 0,6-4,4 kPa 1,1-9,6 timer etter start av installasjonsarbeidene. Lavest poreovertrykk ble observert for installasjon av KCl-staver (Figur 5). Poreovertrykket var forbigående, og varte bare noen fåtalls timer (2-9 timer) før poretrykket sank til lavere nivåer enn opprinnelig.

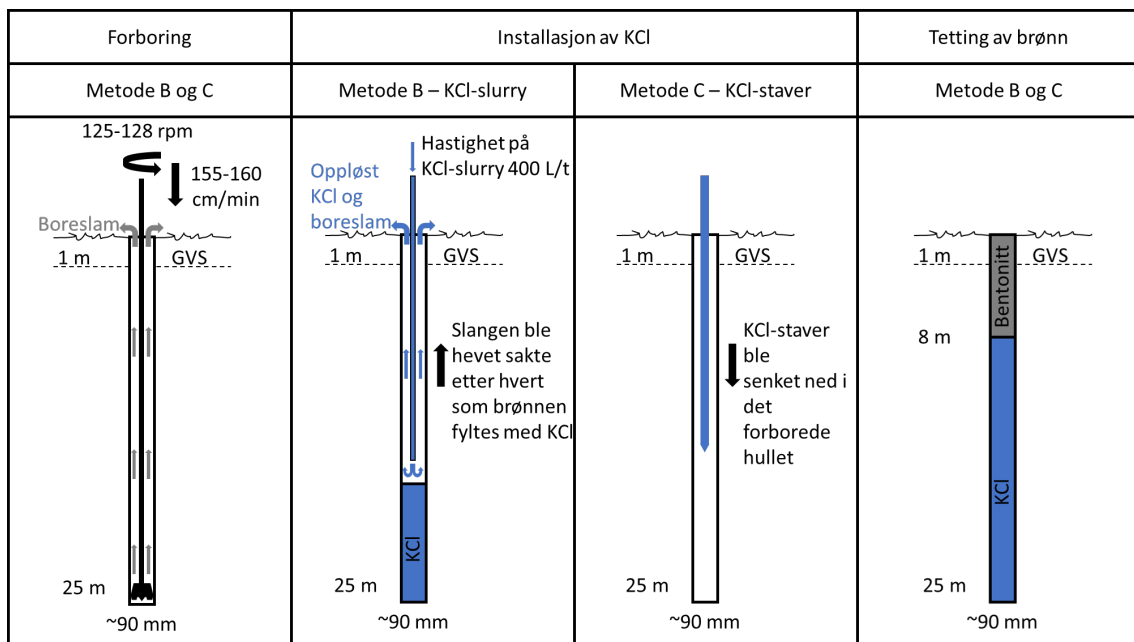


Figur 5 Poretrykksrespons første døgn etter start av installasjon av a) og b) saltstaver i saltbrønn (SW) 13 og 14, og c) og d) saltslurry i SW19 og SW20.

4.1.6 Diskusjon og konklusjoner

Basert på erfaringene fra installasjonsarbeidene og måling av poretrykksrespons, så ble det konkludert at prosedyrene for Metode B og C var best egnet for installasjon av saltbrønner (Figur 6). Installasjon av saltstaver (Metode C) hadde klare fortrinn som beskrevet i avsnitt 4.1.4.

Installasjonsmetodene som ble benyttet i AP1 er altfor tid- og kostnadskrevene til at man kan realisere saltstabilisering som skredsikring i kvikkleireområder. Metoden vil være langt mindre kostnadskrevene dersom boring, installasjon av salt og tetting av borhull utføres i en operasjon.



Figur 6 Installasjonsprosedyrer for saltslurry (Metode B) og saltstaver (Metode C). Det hengende grunnvannsspeilet (GVS) er markert på 1 m dybde. Modifisert etter [24]

Skredsikring utføres ofte i ulendt terreng. Det er derfor viktig at riggen:

- Er lett og enkel å navigere i ulendt terreng
- Har justeringsmuligheter av bortårnet for å sikre at saltbrønnen installeres i riktig vinkel
- Dersom spyleboring skal benyttes, så bør riggen ha mulighet for å justere pumpetrykket, synke- og rotasjonshastigheten (> 125 rpm).
- Dersom installasjonen skal skje ved nedpressing, vil det være behov for stor nedpressingskraft. De fleste geotekniske borerigger som benyttes i Norge kan presse ned med en kraft på opp mot 7 tonn.
- Dersom det benyttes saltslurry, så må boreslam med salt håndteres for å unngå skade på vegetasjon eller utslipp i resipienter.

Kostnadene kan også reduseres ved å øke senteravstanden mellom saltbrønnene. Dess tettere brønnene står, dess kortere tid tar det å stabilisere hele leirvolumet. Dersom det tillates at det tar lenger tid (f.eks. fem år kontra tre år) så kan senteravstanden økes, og kostnadene reduseres.

4.2 Arbeidspakke 2: Kost-/nytte og miljø

I Arbeidspakke 2 (AP2) ble det gjort vurderinger av nytte-/kost og miljøgevinst ved bruk av saltbrønner som skredsikring innenfor kvikkleiresone nr. 1863 Hegramo i Stjørdal kommune. Det ble utført nytte-/kostanalyser og beregning av klimagassutslipp for tre ulike sikringsmetoder:

- Terrenginngrep (avlastning og motfylling)
- kalk-/sementpeling
- saltstabilisering

I tillegg ble det gjort en vurdering av ikke prissatte konsekvenser.

For å kunne gjøre en direkte sammenligning av enhetskostnadene, er eventuelle begrensninger ved bruk av metodene ikke inkludert i dette arbeidet. Begrensninger av egnethet for av sikringsmetodene på Hegramo er:

- Alle metodene vil komme i konflikt med kulturminnene i topplaget
- Mektigheten på laget med friksjonsmasser i topplaget
- Dybde til kvikkleirelag

Da det ikke forelå ferdig prosjekterte løsninger for sikring av Hegramo, er nødvendige mengder og enhetsprisene hentet fra sikringsprosjektet Tømmerås i Grong og fra utførte infrastrukturprosjekter. Skråningen på Tømmerås har omtrent samme topografi som på Hegramo. Kvikkleira på Hegramo ligger imidlertid noe dypere enn på Tømmerås, men behov for sikringstiltak anslås å være i samme størrelsesorden.

4.2.1 Sikringstiltak

Tiltakene som er vurdert skal sikre en 100 m bred skråning. For å kunne sammenligne tiltakene direkte, er kostnadene beregnet per løpemeter skråning. Det er gjort fravik fra regelverket slik at det er benyttet prosentvis «vesentlig forbedring» med 15% for alle tiltakene (se avsnitt 2.4).

Topografiske sikringstiltak

Topografiske tiltak vil innebære senkning av terrenget med ca. 2 m i toppen av skråningen. Gravemassene gjenbrukes som motfylling i skråningsfoten. Dette tiltaket er ikke mulig å gjennomføre i praksis pga. kulturminner i toppen av skråningen, og begrenset tilgjengelig areal i foten av skråningen.

Kalk-/sementpeling

Kalk-/sementpeling er vurdert for å stabilisere platået bak skråningen. I vurderingen er det lagt inn rader med bredde på opp mot 1 m, med 3-4 m mellom hver rad. Kalk-/sementpeling kan imidlertid ikke gjennomføres pga. sandlaget i toppen av skråningen og dybden til kvikkleire (15-20 m). Boring gjennom topplaget vil også ødelegge kulturminnene.

Saltstabilisering

I vurderingen av saltstabilisering er det lagt inn at brønnene installeres i selve skråningen, og bakover til krysningspunktet mellom terreng og glidesirkelen for $\gamma_{M,cu} = 1,15$. Brønnene er prosjektert til 0,25 ganger høydeforskjellen mellom de to krysningspunktene mellom kritisk glidesirkel og terreng (H_1). Brønnene er installert med en senteravstand på 1,5 m og en gjennomsnittlig dybde på 26 m, over et areal på 86x100 m; totalt 3819 brønner. Dette tilsvarer ca. 38 brønner per 1m skråning. Boring gjennom topplaget vil kunne ødelegge kulturminnene.

4.2.2 Kostnader

Nytte-/kostanalyser ble utført basert på kostnadene for installasjonsprosedyrene for:

- Metode B: Forboring og saltslurry
- Metode C: Forboring og installasjon av saltstaver

Tabell 3 Kostnader for installasjon av saltbrønner

Metode	Kostnad per brønn	Kostnad per m brønn
Metode B: Saltslurry	13 500,-	520,-
Metode C: Saltstaver	16 500,-	630,-

Sammenlignet med enhetspriser for geotekniske grunnundersøkelser er ikke kostnaden så stor (Tabell 3), men med tanke på at brønnene installeres svært tett så blir det kostnadskrevenne å benytte disse installasjonsprosedyrene. Saltstabilisering er det dyreste sikringstiltaket av de tre som er vurdert i dette prosjektet (Tabell 4).

Tabell 4 Kostnader per løpemeter (1m) skråning for de ulike sikringstiltakene

Tiltak	Kostnader per 1m skråning kr/1m skråning
Topografiske tiltak*	18 650,-
Kalk-/sementpeling 500 m ² /1m skråning	37 500,-
Metode B: brønner fylt med saltslurry	516 570,-
Metode C: brønner fylt med saltstaver	624 570,-

* Inkluderer avlastning og motfylling, heving og erosjonssikring av bekk

4.2.3 Klimagassutslipp

Topografiske tiltak både med og uten heving av bekkebunnen forårsaker de laveste klimagassutslippene (Tabell 5). Kostnadene og utslippene for topografiske tiltak hadde blitt høyere dersom det hadde vært lagt inn høyere andel av tilkjørte masser til motfyllingen, og deponering av gravemasser fra toppen av skråningen. Kostnadene hadde økt ytterligere dersom gravemassene var forurenset.

For skråningsstabilitet er det ikke nødvendig å benytte så mye bindemiddel som lagt inn i vurderingene i dette prosjektet. Optimalisering av kalk-/sementforbruket ville ha redusert klimagassutslippene betraktelig.

Bruk av saltstaver medfører lavere saltforbruk enn ved bruk av saltslurry. Da 80% av klimagassutslippene for denne metoden stammer fra produksjonen av salt, så er optimalisering av forbruket vesentlig for å kunne redusere klimagassutslippene.

Tabell 5 Klimagassutslipp per løpemeter (1m) skråning i kg CO₂-ekvivalenter

Tiltak	Klimagassutslipp per 1m skråning kg CO ₂ -ekvivalenter	Største bidragsyter
Topografiske tiltak*	295	80% fra dieselforbruk gravemaskiner
Topografiske tiltak inkl. bekkeheving**	466	dieselforbruk gravemaskiner
Kalk-/sementpeling 500 m ² /1m skråning	11638	88% fra produksjon av kalk og sement
Metode B: brønner fylt med saltslurry	5029	80% fra produksjon av KCl
Metode C: brønner fylt med saltstaver***	3608	80% fra produksjon av KCl

* Inkluderer avlastning og motfylling og erosjonssikring av bekk

** ikke aktuelt med bekkeheving for den vurderte skråningen på Hegramo

*** mindre klimagassutslipp som følge av lavere forbruk av salt

4.2.4 Nytte-/kostanalyser

Nytte-/kostanalyser er utført vha. NVEs nytte-/kostverktøy EFFEKT. Nyttien vurderes ut fra at tiltakene reduserer sannsynlighet for skade på verdiene som er innenfor fareområdet, inkludert tap av liv. Dess større reduksjon av sannsynlighet for skade, dess større «nytte». Verdien av videreutvikling av området i Hegra er her ikke inkludert i nytten. Kostnader, både med og uten klimagassutslipp fra de ulike sikringstiltakene (Tabell 6) er lagt inn. Den økonomiske modellen i EFFEKT regner disse om til nåverdi av kostnadene som benyttes for å finne nytte-/kostfaktoren.

Topografiske tiltak kommer klart best ut i nytte-/kostanalysene pga. lave kostnader. Kostnadene knyttet til installasjonen av saltbrønner er såpass høye at nytte-/kostfaktoren er svært lav.

Klimagassutslippene gir størst utslag på nytte-/kostfaktoren for kalk-/sementpeling (reduksjon med 0,9).

Prisnivå i 2020 kr er på 370 kr/tonn CO₂-ekvivalenter. Norge har forpliktet seg til å redusere klimagassutslippene med minst 40% innen 2030 sammenlignet med 1990-nivå. Det pågår diskusjoner om hvorvidt prisen for CO₂-ekvivalenter er for lav til å stimulere næringslivet til «grønne valg». Det kan derfor tenkes at kostnader for klimagassutslipp vil ha større innvirkning på nytte-/kostfaktoren i fremtiden. Topografiske tiltak vil likevel komme gunstigst ut.

Tabell 6 Nytte-/kostfaktorer for sikringstiltakene inkl. kostnader for klimagassutslipp. NB! Etter ny gjennomgang av tallene er nytte-/kostfaktorene for saltbrønner noe endret fra rapport for arbeidspakke 2 [2].

Tiltak	Nytte-/kostfaktor basert på 2019 kr	Nytte-/kostfaktor inkl. CO ₂ basert på 2020 kr
Topografiske tiltak*	25,0	24,9
Topografiske tiltak inkl. bekkeheving**	20,5	20,4
Kalk-/sementpeling 500 m ² /lm skråning	13,1	12,2
Metode B: brønner fylt med saltslurry	1,9	1,9
Metode C: brønner fylt med saltstaver***	1,6	1,6

* Inkluderer avlastning og motfylling og erosjonssikring av bekk

** ikke aktuelt med bekkeheving for den vurderte skråningen på Hegramo

*** mindre klimagassutslipp som følge av lavere forbruk av salt

4.2.5 Ikke-prissatte konsekvenser

Sikringstiltak i kvikkleireområder kan føre til store inngrep i naturen. Det er mulig å inkludere sikringstiltakenes negative innvirkning på klima i nytte-/kostanalysene. Det finnes imidlertid en rekke ugunstige konsekvenser av terrenginngrep og grunnforsterkning som ikke kan prissettes, og dermed faller disse konsekvensene utenfor nytte-/kostanalysene. Disse må likevel hensyntas i vurderingen av alternative sikringstiltak.

Følgende forhold bør inkluderes i vurderingen av sikringstiltak i kvikkleireområder:

- Landskapstyper og naturmangfold
 - Ravinedaler er vurdert som en sårbar naturtype
 - Sikringstiltak i ravinedaler (motfylling i foten skråningen, heving av bekkebunn) anses som spesielt ugunstig
 - Avrenning og utlekking fra sikringstiltak kan skade vegetasjon og vannkvalitet
- Kulturminne
 - Kulturminner i kvikkleireområder har risiko for å bli skadet som følge av skred
 - Sikringstiltak kan skade kulturminner
 - Graving/fylling

- Boring (kan gjennomføres etter kartlegging av gjenstander slik at det unngås å bore gjennom disse)
- Kjemisk forringelse (tilførsel av oksygen, salt etc.)
- Naturressurser
 - Jordbruks- og skogsareal
 - Vurdere miljølemper som følge av utlekking av tungmetaller fra kalk-/sementpeler, oppvirvling av kalk- og sementstøv under installasjon, spredning av salt på terrengoverflaten eller til resipienter
- Nærmiljø og friluftsliv
 - Unngå at sikringstiltak kommer i konflikt med nærmiljø og friluftsliv

Ikke-prissatte konsekvenser må vurderes fra et tilfelle til et annet da det er store variasjoner i omfang og hvordan disse påvirkes av eventuelle sikringstiltak. For Hegramo er det spesielt skade på kulturminner som anses som den største ikke prissatte konsekvensen.

Saltstabilisering med lette borerigger forårsaker minst terrenginngrep av de tre alternative sikringstiltakene. Metoden er godt egnet til å minimere de ikke-prissatte konsekvensene dersom det sikres at metoden ikke påvirker biologisk liv i vassdrag og grunnvannsressurser, eller ødelegger kulturminner i topplaget.

4.2.6 Konklusjoner

Kostnadene ved saltstabilisering er svært høy sammenlignet med terrenginngrep og kalk-/sementstabilisering. Dette skyldes at installasjonen utføres i tre faser:

- Forboring
- Fylling med salt
- Tetting av borhull

Ved Metode B var det fylling av saltslurry som førte til lang tidsbruk. Metode C der det ble installert saltstaver var langt mer effektiv i felt. Det tok ca. 15 minutter å installere 17 m saltstaver til ønsket nivå. Saltstavene er imidlertid ikke tilgjengelig på markedet. Produksjonen av disse var tidkrevende, noe som førte kostnadene opp. Dersom kostnadene ved saltstabilisering reduseres, kan metoden være aktuell i områder der topografiske tiltak eller kalk-/sementpeling ikke er gjennomførbart.

Kostnadene kan reduseres ved:

- Økt senteravstand mellom brønnene
- Optimalisering av saltforbruk
- Saltstaver som hyllevare
- Installasjon av saltbrønner kan utføres i en operasjon med maksimalt to borledere

Ved å benytte større borerigger vil en trolig kunne installere saltbrønner mer effektivt. Installasjon av saltbrønner med lette borerigger har fortrinn ved at:

- De kommer til i ulendt terreng
- Det trengs ikke å anlegges bærelag før installasjon
- Kan utføres i områder der det er plassbegrensning

Hvorvidt saltstabilisering kan forsvares til tross for lav nytte-/kostfaktor, avhenger av hvor stor samfunnsverdi og -nytte sikringen har. Her vil ikke-prissatte verdier kunne spille en stor rolle, og konsekvensene av å ikke sikre et område bør vektlegges.

Eksempelet fra Hegramo har svært høy nytte-/kostfaktor. Sikringstiltak i kvikkleireområder har normalt nytte-/kostfaktorer i størrelsesorden 1-10. I slike tilfeller vil saltstabilisering, med de kostnadene som fremkommer i dette prosjektet, kunne få nytte-/kostfaktor under 1. Det er viktig å inkludere også ikke-prissatte konsekvenser for å vurdere om saltstabilisering likevel kan være en alternativ sikringsmetode.

I konsekvensutredninger skal klima og miljø inkluderes. Klima og miljø vil få større fokus i framtida. Klimagassutslipp kan inkluderes i nytte-/kostanalysene, mens andre ikke-prissatte miljøulempere ikke kan inkluderes. Det er behov for å utvikle en metodikk som inkluderer alle hensyn som er med i konsekvensutredningene.

5 Videreutvikling av installasjonsmetoder

5.1 Realisering av saltstabilisering

Det er ønskelig med installasjonsprosedyrer for saltstabilisering med nytte-/kostfaktor i størrelsesorden tilsvarende som for kalk-/sementpeler. Flere av de ugunstige konsekvensene av terrenngrep og grunnforsterkning har i dag ingen tallfestede kostnader. Dersom disse ikke-prissatte konsekvensene i fremtiden kan inkluderes i nytte-/kostanalysene, så vil saltstabilisering komme mer gunstig ut selv om nytte-/kostfaktoren i dag er noe lavere enn for kalk-/sementstabilisering.

Flere entreprenører og leverandører er blitt kontaktet for å undersøke alternative installasjonsmetoder. Informasjonen i dette kapittelet er av generell karakter for å ivareta entreprenørenes og leverandørenes interesser.

I AP2 er nytte-/kostfaktoren for saltstabilisering basert på en senteravstand på 1,5 m. Kostnaden for installasjon av saltbrønnene inkl. riggekostnader, tetting med bentonitt og oppstilling per borpunkt er i nytte-/kostanalysene lagt inn med en kostnad i 2019-kroner på 520 kr/m (nåverdi 640 kr/m) for installasjon av saltslurry og 630 kr/m (nåverdi 770 kr/m) for installasjon av saltstaver. Saltstavene har en høyere kostnad siden de ble spesiallaget. Kostnaden her vil kunne reduseres dersom saltstavar blir hylleware. Nyttel-/kostfaktoren øker dersom senteravstanden økes.

Det er tatt utgangspunkt i at et areal på 86 x 100 m på Hegra saltstabiliseres. Tabell 7 viser nytte-/kostfaktoren for saltbrønninstallasjon ved ulike senteravstander og lavere installasjonskostnader enn ved installasjonsprosedurene i AP1. Det er forutsatt at saltbrønnene er 26 m dype, med salt installert i intervallet 16-26 m. Riggkostnader, salt, bentonitt og oppstilling per borpunkt er inkludert i enhetsprisen. Det understrekes at nytte-/kostfaktorene beregnet for caset Hegra generelt er høye.

Tabell 7 Nyttel-/kostfaktorer for saltbrønner med ulik senteravstand og enhetspris for ferdig installert saltbrønn. Nyttelverdien er hentet fra [2]. Etter ny gjennomgang av beregningene i EFFEKT, er nytte-/kostfaktorene for saltslurry og -staver med senteravstand 1,5 m noe endret fra verdiene først publisert i rapport for Arbeidspakke 2 [2].

Variasjon i parametere			Nytte-/kostfaktorer				
Senteravstand	Antall brønner	Antall m boring	KCl-slurry ¹	KCl-staver ²	Alternative installasjonsprosedyrer		
			520 kr/m	630 kr/m	200 kr/m	300 kr/m	400 kr/m
1,5 m	3 822	99 378	1,9	1,6	4,7	3,2	2,5
2,0 m	2 150	55 900	3,3	2,7	7,9	5,5	4,2
2,5 m	1 376	35 776	5,0	4,2	11,6	8,2	6,4
3,0 m	956	24 844	7,0	5,9	15,5	<u>11,2</u>	8,8

¹ 15 kg KCl/m brønn. ² 10 kg KCl/m brønn.

Nytte-/kostfaktoren for kalk-/sementpeling av området på Hegra er beregnet til 13,1 [2]. En nesten tilsvarende nytte-/kostfaktor oppnås dersom saltbrønner installeres med senteravstand 3,0 m, og med installasjonskostnad på 300 kr/m (Tabell 7). Nyttel-/kostfaktoren vil trolig også økes som følge av lavere CO₂-utslipp. Dette er imidlertid ikke vurdert her. Leirvolumet stabiliseres raskere dersom saltbrønnene installeres med mindre senteravstand med den konsekvens at nytte-/kostfaktoren reduseres. Det bør vurderes fra et prosjekt til et annet hvorvidt en lavere nytte-/kostfaktor kan aksepteres i områder der viktige ikke-prissatte konsekvenser ikke gjenspeiles i beregningene.

For å kunne realisere saltstabilisering som skredsikring i kvikkleireområder er det behov for løsninger der:

- Installasjonskostnadene er lavere enn 300 kr/m brønn inkl. salt
- det installeres minimum 5 kg KCl/m brønn, men helst 10 kg KCl/m brønn
- installasjonen kan utføres til 25-30 m dybde
- unngår poretrykksoppbygging i leira

Installasjonskostnadene kan reduseres dersom boring, installasjon og tetting kan utføres i en operasjon.

Håndtering av boreslam er ikke inkludert i nytte-/kostanalysene. Leirslam anses ikke som et problem med tanke på forurensing av terrengoverflaten. Det må imidlertid påses at det ikke strømmer ut i elver eller vassdrag. Slam med salt må samles i tanker og deponeres for å unngå skade på vegetasjon.

5.2 Kaliumklorid i fast form og nødvendig brønndiameter

Kaliumklorid (KCl) kan installeres i ulike former:

- Tørt
 - Finmalt
 - Granulat 2-4 mm [25]
 - Pellets 4-30 mm [25]
 - Sammenpresset
- Slurry av finmalt KCl og vann

Saltet som benyttes bør bestå av 98-100% KCl og inneholde minst mulig andel tungmetaller. Enkelte produkter som markedsføres som kaliumklorid inneholder store andeler kaliumoksid (K_2O) og/eller kaliumhydroksid (KOH). K_2O reagerer med vann og danner KOH. KOH har langt lavere løselighet i vann enn KCl. KOH vil også øke pH-en i leira. I tillegg utgjør KOH en risiko for etseskader under håndtering.

I AP1 ble KCl installert enten som KCl-slurry eller KCl-staver laget av kuber med sammenpresset KCl. Slurryen er vanskelig fordi den må holdes i kontinuerlig sirkulasjon. Ved stopp i sirkulasjonen, faller saltet til bunns og det kreves stor kraft for å få sirkulasjonen i gang igjen.

Det var langt raskere og enklere å installere forhåndsproduserte KCl-staver. Stavene finnes imidlertid ikke på markedet. Per i dag kan KCl-kuber med dimensjon 5x5x5 cm spesiallages. Det bør undersøkes om kubene kan installeres effektivt uten å monteres på stålrør.

Finmalt KCl er svært hygroskopisk. Saltet reagerer raskt med luftfuktighet og klumper seg og sveller. Dette medfører store utfordringer i felt. Større partikler som i granulat eller pellets vil være noe mindre sensitiv for luftfuktighet enn finmalt KCl.

Det er ønskelig å få ned mest mulig salt i borhull med minst mulig diameter. Valg av brønndiameter og mengde salt per m brønn er sterkt avhengig av hvilke produkter som finnes på markedet, og hvilken installasjonsmetode som benyttes.

Ved å installere staver av sammenpresset salt blir det installert større mengde salt per volum enn om en tilsetter finmalt salt, granulat eller pellets (Tabell 8). Sammenpresset KCl finnes i dag kun

tilgjengelig i 5x5x5 cm kuber som veier 250 g per stk. Dermed finnes det et alternativ per i dag der det kan installeres 5 kg KCl/m brønn i brønner med minimum diameter på 7 cm.

Saltslurryen er vanskelig pumpbar dersom blandingen kun består av salt og vann. En homogen blanding kan oppnås ved å tilsette en polymer som f.eks. xantangum. Samtaler med fagmiljøet på kjemi hos NTNU indikerte imidlertid at tilsetning av polymerer kan føre til at saltet kapsles inn slik at diffusjon ut av brønnen forhindres. For å benytte saltslurry bør det utføres en studie for å dokumentere hvorvidt polymerer eller tilsetning av bentonitt medfører at diffusjonsprosessen forsinkes.

Tabell 8 Maksimal mengde salt per m brønn med ulike diametere og ulike former av KCl

Diameter brønn*	Finmalt salt kg KCl/m brønn	Pellets/granulat kg KCl/m brønn	Sammenpresset kg KCl/m brønn
5	2,4	2,0	3,9
6	3,4	2,8	5,7
7	4,6	3,8	7,7
8	6,0	5,0	10,1
9	7,6	6,4	12,7
10	9,4	7,9	15,7

* sirkulær brønn

5.3 Alternative installasjonsmetoder

Det finnes mange entreprenører med ulik type utstyr som kan egne seg for installasjon av saltbrønner. Større rigger vil kunne installere effektivt til ønsket dybde, slik som f.eks. vertikaldrenstikkeren eller kalk-/sementrigger. Store rigger har imidlertid begrenset framkommelighet i ulendt terreng. Disse riggene kan f.eks. benyttes til å installere saltbrønner dersom det er et relativt flatt platå bak skråningen (helning < 1:10). For å installere saltbrønner i selve skråningen er man avhengig av en lettere rigg.

Massefortrenging kan genere poreovertrykk som kan føre til stabilitetsproblemer i kvikkleireskråninger. Dersom det benyttes installasjonsmetoder som fører til massefortrenging, må poreovertrykket og deformasjoner overvåkes nøye. Poreovertrykket kan reduseres ved å sikre fri kommunikasjon til terrengoverflaten slik at eventuelle omrørte masser kan evakuere borhullet, og poreovertrykket kan dissipere langs borhullet. Massefortrengingen vil fortsatt forårsake tøyninger i leira rundt saltbrønnen, men poreovertrykket vil trolig dissipere raskere.

Poreovertrykket øker med økt massefortrenging [26]. Brønndiameteren bør derfor være minst mulig. Poreovertrykket kan også føre til at saltbrønnene får oppdrift. Dette kan avbøtes ved å installere et anker sammen med saltbrønnen.

6 Prosjektering av saltstabilisering

6.1 Krav til prosjekterende

Saltstabilisering er en ny metode som per i dag ikke er prøvd ut som sikring av kvikkleireskrånninger i stor skala. Det pågår en prosess for å innarbeide metoden i veiledere og håndbøker hos offentlige byggherrer.

Sikring av kvikkleireområder med saltstabilisering klassifiseres i geoteknisk kategori 3 og pålitelighetsklasse RC3 grunnet kompleksitet og risiko. Saltstabilisering underlegges prosjekteringskontrollklasse PKK3 og utførelseskontrollklasse UKK3.

Det understrekes at prosjektering av saltstabilisering utføres av geoteknisk foretak med sentral godkjenning for ansvarsrett som ansvarlig prosjekterende iht. plan- og bygningsloven (PBL) og byggesaksforskriften (SAK10). Fagområdet geoteknikk underlegges ansvarsrett med tiltaksklasse 3.

6.2 Faktorer som påvirker senteravstanden mellom saltbrønner

For å hindre store retrogressive skred med saltstabilisering, må porevannskjemien endres slik at omrørt skjærfasthet økes til over 1 kPa. Hvor lang tid det tar fra installasjon av saltbrønner, til en omrørt skjærfasthet over 1 kPa er oppnådd avhenger av flere faktorer (Tabell 9). Det er utført geokjemiske beregninger og laget korrelasjonskurver (Vedlegg A) for hvor lang tid det tar å stabilisere leire (KMgCa-forhold > 20%) i avstand fra brønnen. Korrelasjonskurvene kan benyttes i prosjektering. Kurvene er laget for norske leirer med:

- KMgCa-forhold: 9,0%²
- Porøsitet: 40%, 50% og 60%
- Kationebyttekapasitet (CEC): 6,0, 11,5 og 17,0 meq/100 g tørr jord
- og installert salt i brønn: 5, 10 og 15 kg KCl/m

Korrelasjonskurvene i Vedlegg A er konservative da de kun inkluderer diffusjon, og ingen hydrauliske gradienter.

Senteravstanden kan bestemmes basert på to ulike prinsipper:

- Dersom hele leirvolumet mellom saltbrønnene skal stabiliseres etter en viss tid (< 5 år), så kan maksimal senteravstand mellom saltbrønnene bestemmes fra korrelasjonskurvene i Vedlegg A.
- Dersom det aksepteres at deler av leirvolumet er stabilisert etter tid t, så beregnes senteravstand basert på prinsipp om dekningsgrad slik som for kalk-/sementpeling. Hele leirvolumet vil med tiden stabiliseres, men det tillates at dette tar lenger tid.

² Det er i tillegg laget korrelasjonskurver for leirer med porøsitet på 50% og CEC 11,5 meq/100 g tørr jord med KMgCa-forhold på 5,0%, 15,2% og 19,6% for å vise effekten av ulike KMgCa-forhold.

Tabell 9 Faktorer som påvirker senteravstanden mellom saltbrønner

Faktor som påvirker senteravstanden	Effekt
Opprinnelig KMgCa-forhold og omrørt skjærfasthet (c_{ur}) i kvikkleira	Dess høyere KMgCa-forhold, dess høyere c_{ur} , dess kortere tid tar det å oppnå $c_{ur} = 1$ kPa
Porøsitet	Dess høyere porøsitet, dess fortere går diffusjonen, og dess kortere tid tar det å oppnå $c_{ur} = 1$ kPa
Kationebyttekapasitet (CEC)	Dess lavere CEC, dess raskere går diffusjonen av kalium, og dess kortere tid tar det å oppnå $c_{ur} = 1$ kPa
Hydrogeologiske forhold	Store gradienter i permeable lag kan føre til at det tar kortere tid å spre saltet
Mengde installert KCl	Dess mer salt, dess lenger opprettholdes konsentrasjonsgradienten, dess raskere går diffusjonen

6.3 Nødvendige forundersøkelser

Før saltstabilisering vurderes må de hydrogeologiske forholdene og sesongvariasjoner av disse kartlegges, og designparametere bestemmes.

For å bestemme senteravstanden bør følgende parametere bestemmes fra geotekniske undersøkelser, geologiske og geokjemiske analyser:

- Porøsitet
- Omrørt skjærfasthet
- Porevannskjemi
- Kationebyttekapasitet
- Bulk- og leirmineralogi³

Dersom saltbrønner skal installeres i områder med kulturminner spredt i kulturlaget som på Hegramo i Stjørdal kommune, så kan man planlegge installasjonsmønster ut fra funn med metalldetektor. Boring gjennom gravhauger skal unngås.

Det må beregnes alarmgrenser for poretrykket i skråningen. Saltbrønnene installeres relativt tett. Dersom det oppstår et poreovertrykk i leira rundt saltbrønnen, og dette ikke rekker å dissipere før neste saltbrønn installeres, så vil poreovertrykket i leirvolumet fort kunne overstige alarmgrensen. I forkant av stabilisering i eller nær kvikkleireskråninger, anbefales det derfor å installere saltbrønner med prosjektet senteravstand på et mindre prøvefelt. Dette for å avdekke om det vil være nødvendig å detaljplanlegge installasjonsrekkefølgen for å unngå akkumulering av store poreovertrykk.

6.4 Utstrekning på stabilisert område

For å sikre at et eventuelt initialskred ikke utvikler seg bakover i skredgropen, må et tilstrekkelig stort område stabiliseres med salt. Totalkostnaden blir lavere jo mindre areal som stabiliseres.

³ Ulike leirmineraltyper reagerer ulikt på kjemiske endringer i porevannet. Norske kvikkleirer består i hovedsak av leirmineralene illitt og kloritt.

Installasjon av saltbrønner kan utføres enten ved å:

- 1) Stabilisere selve skråningen (Avsnitt 6.4.1, Figur 7)
eller
- 2) Stabilisere området/platået bak skråningen (Avsnitt 6.4.2, Figur 8)

Valg av hvilket område som stabiliseres baseres på:

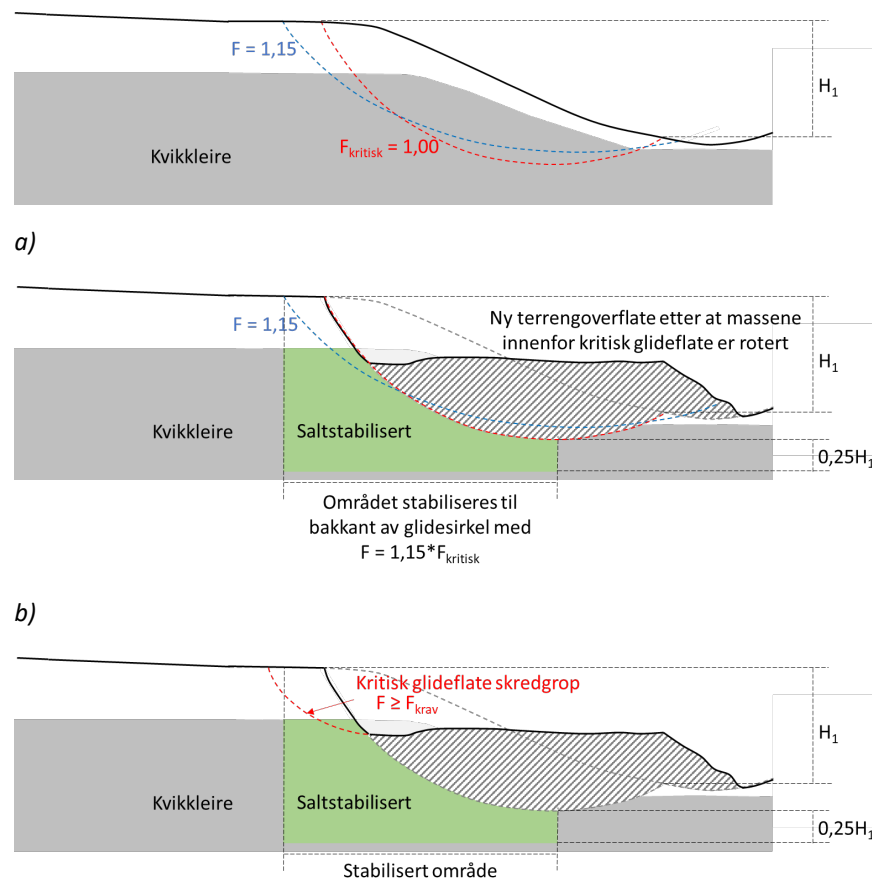
- Topografi
- Kritisk glideflate
- Installasjonsmetode
- Kostnader
- Kulturminner eller mektige permeable lag i topplaget

I skråninger er det stort sett underhydrostatisk trykk i toppen av skråningen, og høyere enn hydrostatisk i foten av skråningen. Ved å installere brønner i toppen og ned mot midten av skråningen kan man unngå ev. problemer med erosjon av borhull.

6.4.1 Saltbrønner installeres i selve skråningen

Dersom saltbrønner installeres i selve skråningen, vurderes stabiliteten slik:

- 1) Finn kritisk glideflate i skråningen (Figur 7a).
- 2) Finn største glideflate med 15% høyere partialfaktor på totalspenningsbasis (udrenert sikkerhetsfaktor) før kvikkleira stabiliseres (Figur 7a).
- 3) Saltbrønner installeres i hele aktiv sone til midt i direkte sone (Figur 7b) innenfor glidesirkelen med 15% høyere udrenert sikkerhetsfaktor. Dybden på saltbrønnene settes lik 0,25 ganger høyden på kritisk glideflate ($0,25H_1$) under bunnpunktet på kritisk glideflate.
- 4) Massene innenfor kritisk glideflate forutsettes stabilisert (omrørt skjærfasthet over 1 kPa) slik at massene ikke strømmes ut av skredgropen, men blir liggende slik som i et rotasjonsskred (Figur 7b). Massene roteres til drivende moment lik 0.
- 5) Kontroller at kritisk glideflate i skredgropen er iht. krav til sikkerhet (Figur 7c).

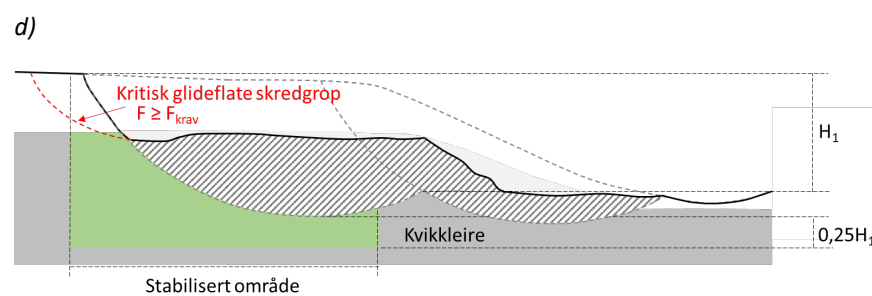
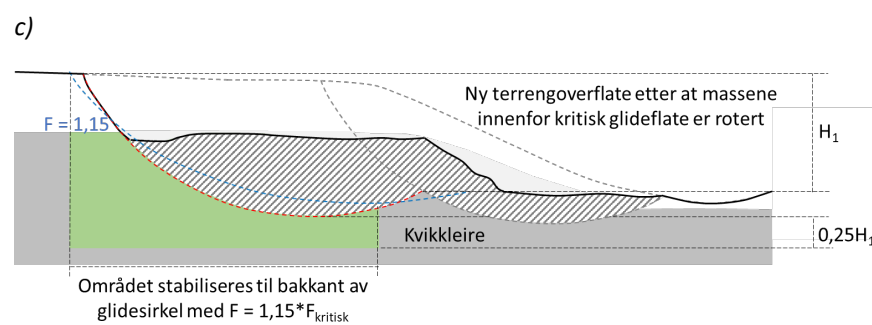
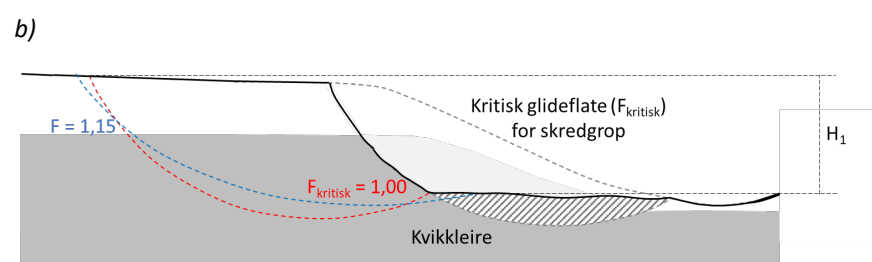
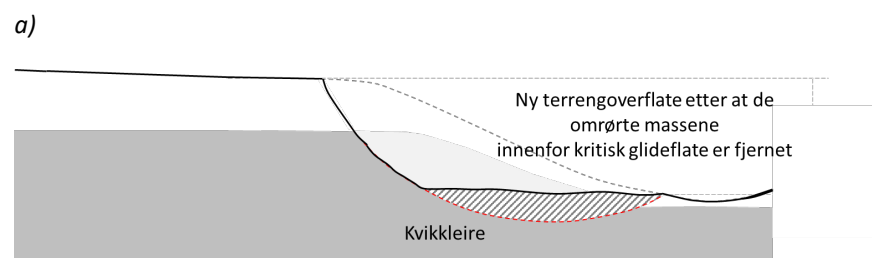
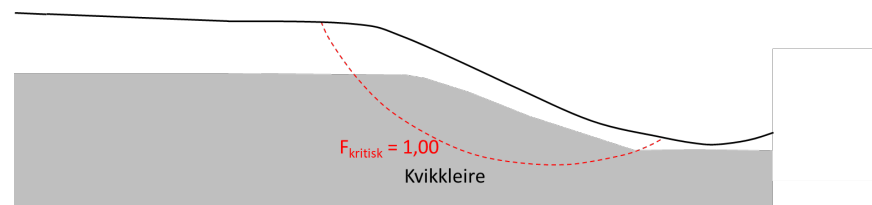


Figur 7 a)-c) Beregningsgang dersom selve skråningen stabiliseres

6.4.2 Saltbrønner installeres bakenfor kritisk glideflate

Dersom saltbrønner installeres bakenfor kritisk glideflate, vurderes stabiliteten slik:

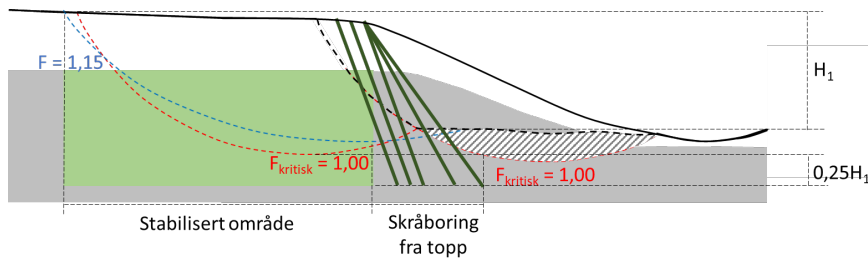
- 1) Finn kritisk glideflate i skråningen (Figur 8a).
- 2) De omrørte massene innenfor den kritiske glideflaten vil strømme ut av skredgropen (Figur 8b).
- 3) Finn kritisk glideflate i skredgropen (Figur 8c).
- 4) Finn største glideflate med 15% høyere partialfaktor på totalspenningsbasis (udrenert sikkerhetsfaktor) før kvikkleira stabiliseres (Figur 8c).
- 5) Saltbrønner installeres i hele aktiv sone til midt i direkte sone (Figur 8d) innenfor glidesirkelen med 15% høyere udrenert sikkerhetsfaktor. Dybden på saltbrønnene settes lik 0,25 ganger høyden på kritisk glideflate ($0,25H_1$) under bunnpunktet på kritisk glideflate i skredgropen (pkt. 3).
- 6) Massene innenfor kritisk glideflate forutsettes stabilisert (omrørt skjærfasthet over 1 kPa) slik at massene ikke strømmer ut av skredgrop nr. 2, men blir liggende slik som i et rotasjonsskred (Figur 8d). Massene roteres til drivende moment lik 0.
- 7) Kontroller at kritisk glideflate i skredgrop nr. 2 er iht. krav til sikkerhet (Figur 8e).



Figur 8 Beregningsgang dersom stabiliseringen utføres i området/platået bak skråningen

6.4.3 Alternativ installasjonsretning

For å sikre et større volum, kan det vurderes om det er mulig å sikre nedover skråningen fra platået ved skråboring (Figur 9).



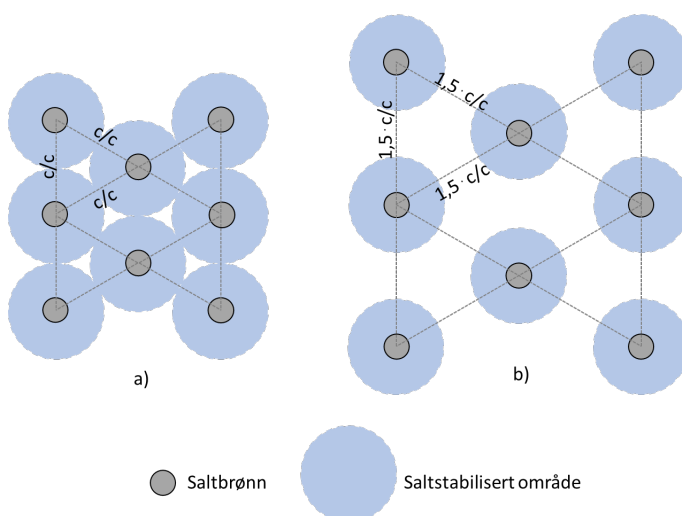
Figur 9 I tillegg til å sikre platået bak skråningen, installeres det på skrå nedover langs skråningen

6.5 Installasjonsmønster og senteravstand

Korrelasjonskurvene i vedlegg A kan benyttes for å bestemme senteravstand mellom saltbrønnene. Disse er basert på geokjemiske simuleringer, og viser i hvor stor avstand fra saltbrønnen kvikkleira stabiliseres over tid. Dvs. hvor lang tid det tar å oppnå et KMgCa-forhold $> 20\%$, og følgelig omrørt skjærfasthet > 1 kPa. Saltet sprer seg ved diffusjon, og vil med tiden stabilisere et større og større område rundt saltbrønnen. Tilgjengelig tid er avgjørende for hvilke av de to prinsippene under som benyttes for valg av senteravstand:

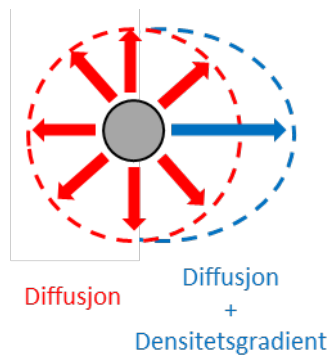
- 1) Hele leirvolumet mellom saltbrønnene skal være stabilisert etter x antall måneder (Figur 10a)
 - a) Korrelasjonskurvene kan benyttes direkte for uttak av senteravstand dersom stabiliseringen av hele leirvolumet skal skje innen 5 år (se avsnitt 6.5.2).
- 2) Det aksepteres at en andel (dekningsgrad) av leirvolumet er stabilisert etter x antall måneder (Figur 10b)
 - a) Se avsnitt 6.5.3

Senteravstanden kan økes, og kostnadene og klimagassutslippene reduseres dersom det tillates å benytte prinsippet om dekningsgrad.



Figur 10 a) Hele leirvolumet mellom saltbrønnene stabiliseres etter tid t. b) Senteravstanden (c/c) kan økes dersom det tillates at en viss andel (dekningsgrad) av leirvolumet stabiliseres etter tid t. Dekningsgrad er summen stabilisert (blått) areal delt på totalt areal mellom brønnene.

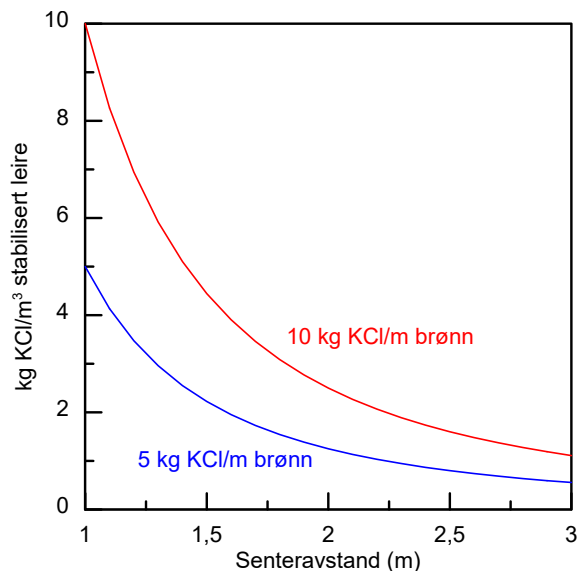
Spredningen av salt avhenger sterkt av lokale forhold som topografi og lagdeling. Densitets- og hydrauliske gradienter vil trolig føre til at saltet sprer seg noe raskere i en retning fra brønnen (Figur 11). Følgelig stabiliseres leirvolumet mellom brønnene raskere enn det som fremkommer av korrelasjonskurvene. Korrelasjonskurvene er å betrakte som konservative estimat av senteravstanden.



Figur 11 Saltet sprer seg jevnt rundt brønnen som følge av diffusjon. Densitets- og hydrauliske gradienter vil øke hastigheten på spredningen av salt i en retning fra brønnen.

6.5.1 Estimat av nødvendig mengde salt

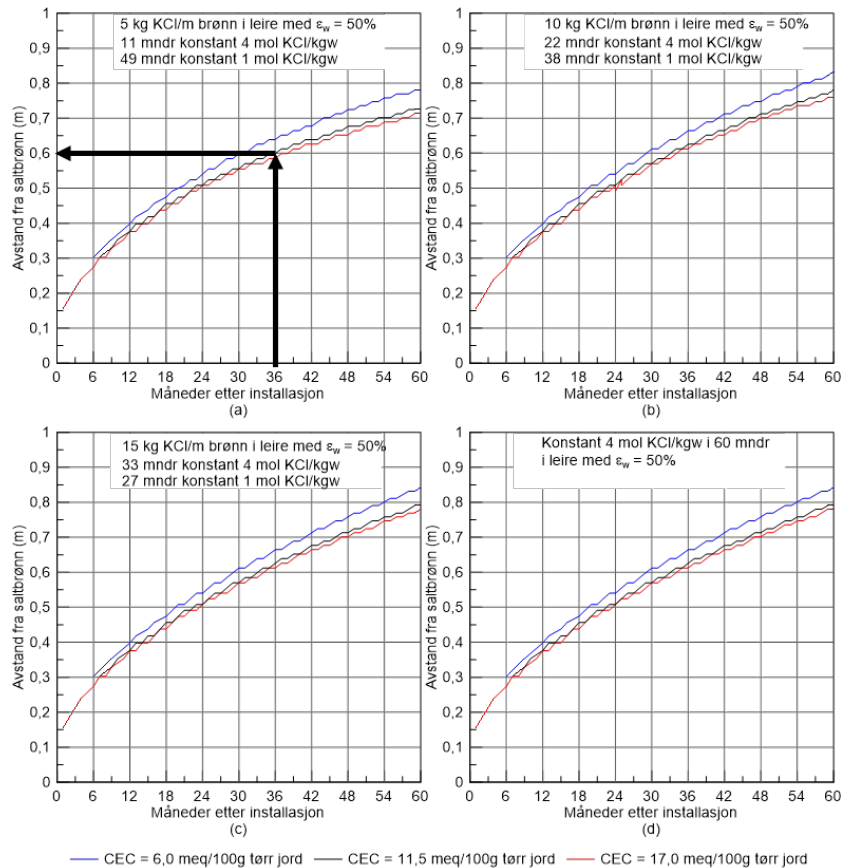
Figur 12 kan benyttes for å estimere mengde KCl per m^3 stabilisert leire for ulike senteravstander for å vurdere kostnader før videre prosjektering. Kurvene viser hvor mange kg KCl som tilsettes per m^3 leire for brønner med 5 og 10 kg KCl/m brønn. Dess større senteravstand, dess færre brønner, og dess mindre mengde KCl tilsettes leirvolumet. Det understrekes at det vil ta lenger tid å stabilisere hele leirvolumet mellom saltbrønner med en senteravstand på 3 m enn på 2 m.



Figur 12 Mengde KCl/ m^3 stabilisert leire ved ulike senteravstander. Forutsatt at hele volumet mellom saltbrønnene stabiliseres over tid.

6.5.2 Hele leirvolumet mellom saltbrønnene stabiliseres

Senteravstand tas ut fra korrelasjonskurvene i Vedlegg A, eller bestemmes ved å finne avstanden der $KMgCa$ -forholdet overstiger 20% fra geokjemiske simuleringer (se Vedlegg A for fremgangsmåter).



Figur 13 Uttak av senteravstand for saltbrønner fylt med 5 kg KCl/m brønn for leire med porøsitet på 50%, kationebyttekapasitet (CEC) på 11,5 meq/100 g tørr jord og K/MgCa-forhold på 9,0%. Korrelasjonskurven er hentet fra Vedlegg A.

Dersom det installeres saltbrønner fylt med 5 kg KCl/m brønn i leire med porøsitet på 50%, kationebyttekapasitet (CEC) på 11,5 meq/100 g tørr jord og K/MgCa-forhold på 9,0%, så vil en radius på 0,6 m være stabilisert i løpet av 3 år (Figur 13). For å stabilisere hele leirvolumet mellom brønnene (Figur 10a) i løpet av 3 år må senteravstanden mellom saltbrønnene ikke overstige 1,2 m.

6.5.3 Dekningsgrad

Det benyttes samme prinsipp som for beregning av dekningsgrad for kalk-/sementpeler. I stedet for å beregne en gjennomsnittlig skjærfasthet for stabiliserte masser, settes det krav til en gjennomsnittlig *omrørt* skjærfasthet i leirmassene på 1 kPa slik at store retrogressivev skred forhindres.

Trinn 1: Bestem nødvendig dekningsgrad for å oppnå $c_{ur,m} = 1$ kPa

Dekningsgraden (a) finnes ved å benytte Ligning 2. Den omrørte skjærfastheten nærmest brønnen vil være større enn 1 kPa (Figur 14). Basert på korrelasjoner for KCl-stabilisert leire fra Ulvensplitten og Dragvoll, så vil c_{ur} være over 3 kPa og minke mot 1 kPa i avstand fra brønnen [1]. Det anbefales å benytte en konservativ gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i saltstabilisert leire lik 2,5 kPa (Figur 15). Dekningsgraden påvirkes av opprinnelig omrørt skjærfasthet i kvikkleira (Tabell 10).

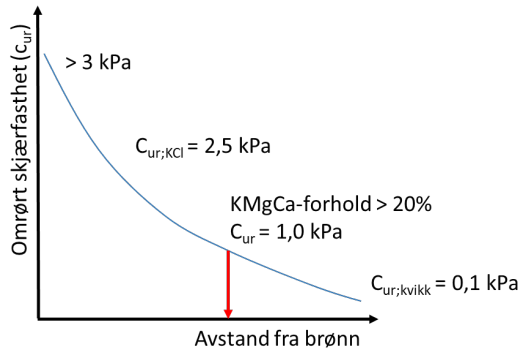
$$c_{ur,m} = a \cdot c_{ur,KCl} + (1-a) \cdot c_{ur,kvikk} \quad \text{Ligning 2}$$

$c_{ur,m}$ gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i det totale leirvolumet = 1 kPa

$c_{ur,KCl}$ gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i KCl-stabilisert materiale = 2,5 kPa

$c_{ur,kvikk}$ omrørt skjærfasthet for kvikkleire (0,1-0,5 kPa)

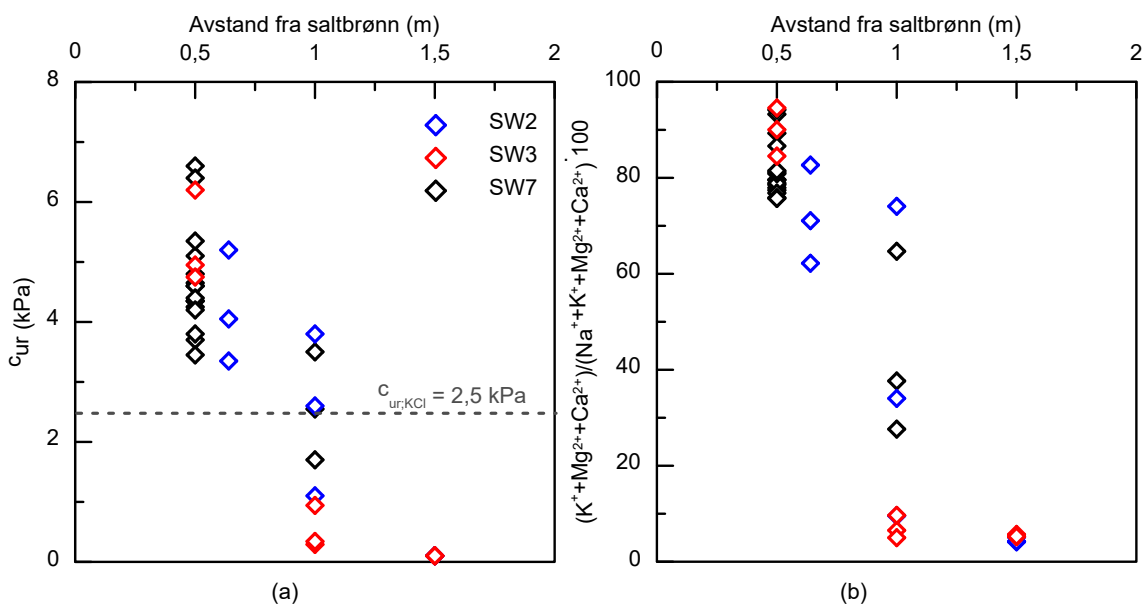
a andel (dekningsgrad) av området mellom saltbrønnene med $c_{ur} > 1$ kPa (Figur 10b)



Figur 14 Skisse på hvordan omrørt skjærfasthet kan variere i avstand fra saltbrønnen de første årene etter installasjon.

Tabell 10 Nødvendig dekningsgrad minker med økende opprinnelig omrørt skjærfasthet i kvikkleira ($c_{ur,kvikk}$). Gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i leirvolumet mellom saltbrønnene ($c_{ur,m}$) lik 1 kPa, og i KCl-stabilisert leire ($c_{ur,KCl}$) lik 2,5 kPa.

	$c_{ur,kvikk}$ 0,1 kPa	$c_{ur,kvikk}$ 0,25 kPa	$c_{ur,kvikk}$ 0,5 kPa
a (-)	0,38	0,33	0,25



Figur 15 a) Gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i KCl-stabilisert materiale ($c_{ur,KCl}$) er satt til 2,5 kPa basert på data fra leire fra ulike dybder rundt saltbrønn nr. 2, 3 og 7 (SW2, 3 og 7) på Dragvoll ca. 3,2 år etter installasjon. b) KMgCa-forholdet i leirprøvene. Data fra [1].

Trinn 2: Bestem maksimalt tillatt senteravstand

Maksimalt tillatt senteravstand bestemmes fra Ligning 3.

- 1) Bestem hvor fort leira skal stabiliseres (tid t)
- 2) Finn radius med $c_{ur} > 1 \text{ kPa}$ ved tid t fra korrelasjonskurvene i Vedlegg A eller geokjemiske simuleringer
- 3) Regn ut areal med $c_{ur} > 1 \text{ kPa}$. Radius er lik summen av radius for brønn og stabilisert radius.
- 4) Finn maksimal senteravstand ved å benytte Ligning 3.

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot A}{\sqrt{3} \cdot a}}$$

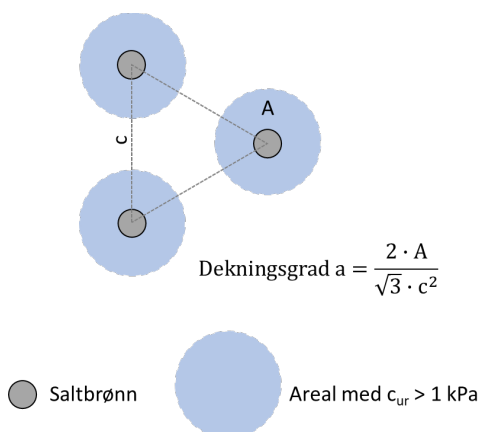
Ligning 3

Hvor:

c er maksimal senteravstand mellom saltbrønnene

A er arealet med $c_{ur} > 1 \text{ kPa}$ ved tid t

a er dekningsgraden fra Trinn 1



Figur 16 Maksimal senteravstand beregnes ut fra dekningsgraden fra Trinn 1

Tabell 11 viser beregnet senteravstand for saltbrønner i kvikkleire med omrørt skjærfasthet 0,10, 0,25 og 0,50 kPa, porøsitet på 50% og kationebyttekapasitet (CEC) på 11,5 meq/100 g tørr jord. Nødvendig dekningsgrad reduseres, og senteravstanden kan økes med økende opprinnelig omrørt skjærfasthet i kvikkleira. Saltbrønnene kan installeres med større senteravstand dersom det tillates lenger tid for å oppnå gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet $c_{ur,m} = 1 \text{ kPa}$ i leirvolumet.

Tabell 11 Maksimal senteravstand dersom det installeres saltbrønner med diameter 5,6 cm og 5 kg KCl/m brønn i leire med 50% porøsitet og CEC = 11,5 meq/100 g tørr jord.

	$c_{ur,kvikk} = 0,10 \text{ kPa}$ $a = 0,38$			$c_{ur,kvikk} = 0,25 \text{ kPa}$ $a = 0,33$			$c_{ur,kvikk} = 0,50 \text{ kPa}$ $a = 0,25$		
Radius(m) med $c_{ur} > 1 \text{ kPa}$	0,51	0,60	0,72	0,51	0,60	0,72	0,51	0,60	0,72
Radius brønn (m) med 5 kg KCl/m ¹	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Tid (år)	2	3	5	2	3	5	2	3	5
Senteravstand (m)	1,67	1,94	2,31	1,77	2,07	2,47	2,05	2,39	2,85

¹ fra Tabell 8

Senteravstand for å oppnå $c_{ur} > 2 \text{ kPa}$

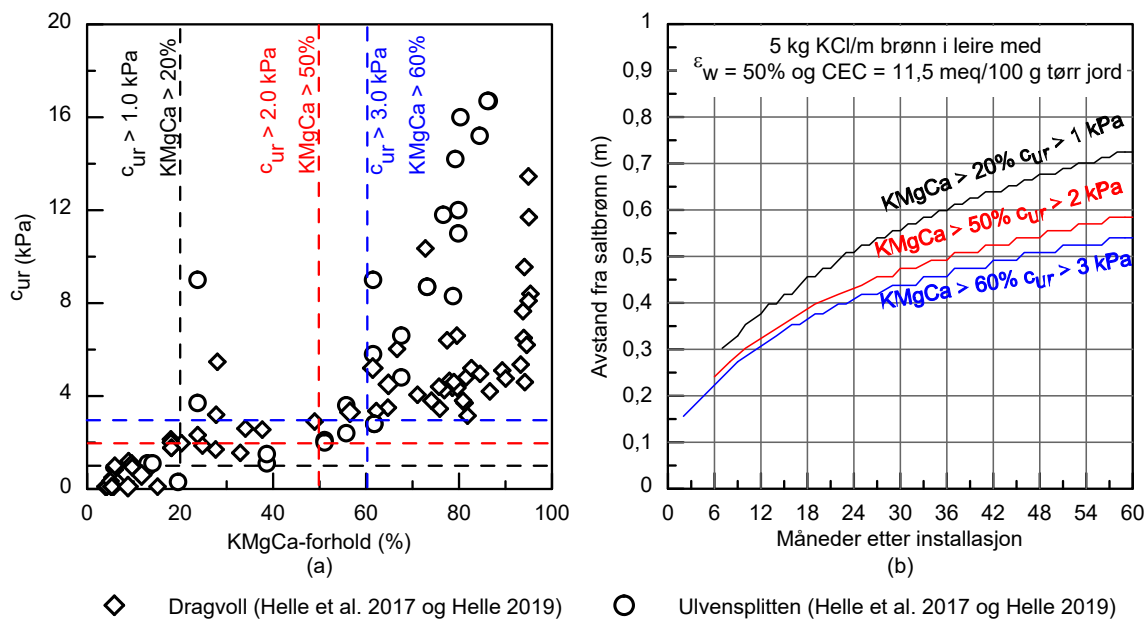
For å unngå å betrakte saltstabilisert leire som et sprøbruddmateriale, så må omrørt skjærfasthet økes utover 2 kPa. Korrelasjoner for KMgCa-forhold og omrørt skjærfasthet (Figur 17a) for saltstabilisert leire fra Ulvensplitten og Dragvoll viser at dette oppnås når KMgCa-forholdet overstiger ca. 50%. Senteravstanden må reduseres betraktelig for å oppnå gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i hele leirvolumet lik 2 kPa sammenlignet med 1 kPa i løpet av 2, 3 og 5 år (Tabell 12).

En ytterligere økning til 3 kPa oppnås ved KMgCa-forhold $> 60\%$. Senteravstanden mellom saltbrønnene kan økes dersom det velges en mindre konservativ gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet for saltstabilisert leire ($c_{ur,KCl}$) lik 3,0 kPa istedenfor 2,5 kPa (Tabell 13). Radius på saltstabilisert leire for omrørt skjærfasthet på 1, 2 og 3 kPa er hentet fra Figur 17b.

Det understrekes imidlertid at den omrørte skjærfastheten i saltstabilisert utvasket leire trolig vil reduseres ned mot 1 kPa. Det er uvisst hvor lang tid dette vil ta. Bestandigheten av saltstabilisert leire er derfor vurdert i neste avsnitt.

Tabell 12 Maksimal senteravstand for å oppnå gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet ($c_{ur,m}$) på 1 og 2 kPa. Saltbrønn med diameter 5,6 cm og 5 kg KCl/m brønn i leire med porøsitet 50% og CEC = 11,5 meq/100 g tørr jord.

$c_{ur,m}$	$c_{ur,kvikk} = 0,10 \text{ kPa}$			$c_{ur,kvikk} = 0,25 \text{ kPa}$			$c_{ur,kvikk} = 0,50 \text{ kPa}$		
	2 år	3 år	5 år	2 år	3 år	5 år	2 år	3 år	5 år
1 kPa	1,67 m	1,94 m	2,31 m	1,77 m	2,07 m	2,47 m	2,05 m	2,39 m	2,85 m
2 kPa	0,98 m	1,13 m	1,32 m	0,99 m	1,14 m	1,33 m	1,01 m	1,16 m	1,36 m



Figur 17 a) K/MgCa-forhold for omrørt skjærfasthet (c_{ur}) lik 1, 2 og 3 kPa. Data fra [1] og [9]. b) Stabilisert leire i avstand fra saltbrønn for å oppnå c_{ur} lik 1, 2 og 3 kPa i leire med porøsitet (ϵ_w) på 50% og kationebyttekapasitet (CEC) lik 11,5 meq/100 g tørr jord.

Tabell 13 Variasjon i senteravstand for å oppnå gjennomsnittlig skjærfasthet i leirvolum ($c_{ur,m}$) på 1, 2 og 3 kPa for gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i saltstabilisert leire ($c_{ur,KCl}$) på 2,5 og 3,0 kPa. I eksempelet er det antatt at kvikkleira har omrørt skjærfasthet $c_{ur} = 0,25$ kPa, porøsitet 50% og CEC lik 11,5 meq/100 g tørr jord.

$c_{ur,m}$	$c_{ur,KCl} = 2,5$ kPa			$c_{ur,KCl} = 3,0$ kPa		
	2 år	3 år	5 år	2 år	3 år	5 år
1 kPa	1,77 m	2,07 m	2,47 m	1,93 m	2,29 m	2,66 m
2 kPa	0,99 m	1,14 m	1,33 m	1,07 m	1,24 m	1,43 m
3 kPa	-	-	-	0,83 m	0,93 m	1,08 m

6.6 Oppfølging etter installasjon

Det anbefales å monitorere spredningen av salt ved å ta opp grunnvannsprøver med jevne mellomrom. Konduktivitetsmålere vil kunne gi en indikasjon på økt saltinnhold, men monitoreringen må suppleres med grunnvannsprøver for å finne porevannskjemien.

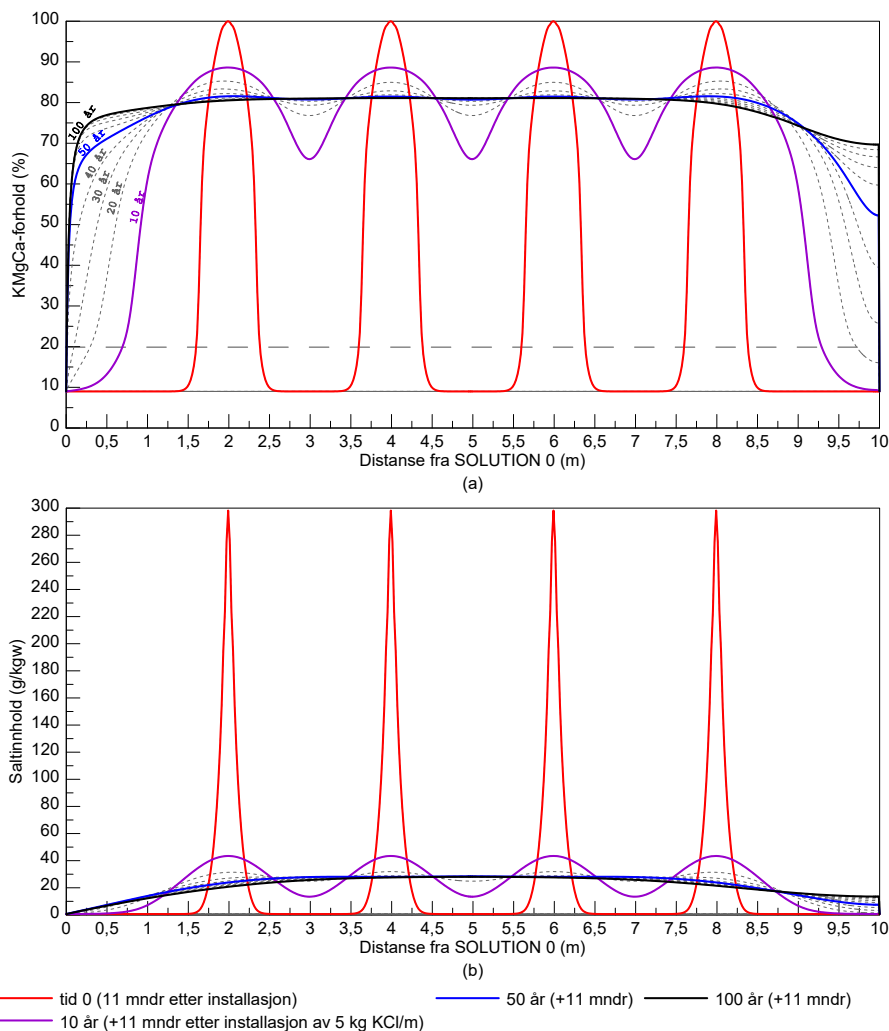
Trykksonderinger med resistivitetsmålinger (RCPTU) kan benyttes til å følge opp spredningen av salt i leirvolumet. Det understrekes at økt spissmotstand i trykksonderinger (CPTU) i saltstabilisert leire kan mistolkes som økt udrenert skjærfasthet ved å benytte eksisterende korrelasjoner [9]. Udrenert skjærfasthet øker *ikke* som følge av saltstabilisering. Økt spissmotstand kan imidlertid benyttes i tolkingen av normalisert spissmotstand og poretrykksforholdet for indikasjon av økt omrørt skjærfasthet, redusert flyteindeks og økt plastisitetsindeks [27].

Det anbefales å ta opp uforstyrrede prøver fra den saltstabiliserte leira etter tid t for å dokumentere oppnådd effekt. Prøvetaking i saltstabiliserte leire byr på utfordringer da den blir veldig seig. I stedet

for å ta opp prøver med større diametere (75 mm og mini-blokk), anbefales det å heller ta opp 54 mm stålsylinderprøver for umiddelbar utskyvning og testing i laboratorium.

6.7 Bestandighet

Det saltstabiliserte området vil med tiden bli utvasket. Simulering av 100 års utvasking av saltstabilisert område med saltbrønner installert med senteravstand på 2 m viser at KMgCa-forholdet er på ca. 75% og saltinnhold på nesten 20 g/L etter 100 års utvasking (Figur 18) med vann med ionekomposisjon som i opprinnelig porevann i kvikkleira. Basert på korrelasjonene fra Ulvensplitten og Dragvoll har leira da en omrørt skjærfasthet på > 3 kPa (Figur 19). Dersom utvaskingen fører til at KMgCa-forholdet reduseres til under 50%, så vil leira trolig få en omrørt skjærfasthet på < 2 kPa. Lokale hydrogeologiske forhold vil påvirke hvor fort utvaskingen går. Til tross for svært lovende simuleringsresultater, vurderes det likevel dithen at saltstabilisert leire skal behandles som sprøbruddmateriale i langtidstilstand.



Figur 18 a) KMgCa-forhold og b) saltinnhold i saltstabilisert leire under 100 års utvasking. Saltbrønner er plassert i distanse 2, 4, 6 og 8 m fra SOLUTION 0 hvor opprinnelig porevann i kvikkleira slippes inn i den simulerte leirkolonnen. Fra Vedlegg A.

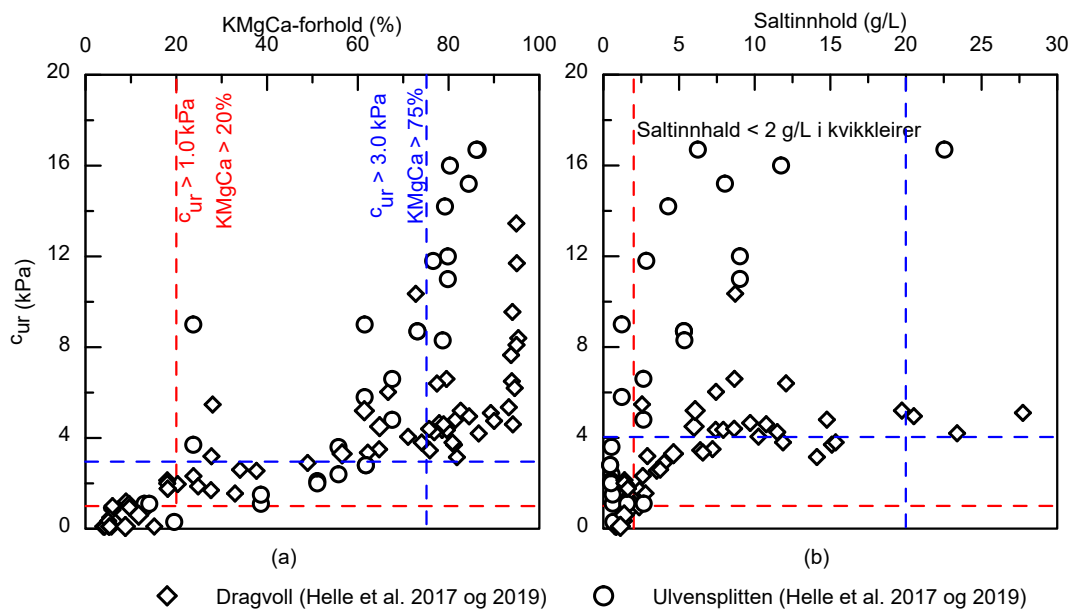
6.8 Miljø

Salt kan skade vegetasjonen, og klorider kan forringe vannkvaliteten i drikkevannskilder. Det er anbefalt at kloridmengden ikke overstiger 200 mg/L i drikkevann.

Saltet vil med tiden spre seg også utenfor det saltstabiliserte området. Utlekking fra det saltstabiliserte området bør simuleres for å finne nødvendig avstand fra drikkevannskilder.

Dersom saltet lekker ut i elver og bekker, så vil saltet transporteres bort fra området. Det anbefales ikke å installere saltbrønner i områder der saltet kan akkumulere i innsjøer eller grunnvannsreservoar. Overflatevann vil vaske saltet vekk dersom saltet lekker ut i terrenget.

Risikoen for at større mengder salt lekker ut av det saltstabiliserte området øker dersom det er permeable vannførende lag i leiravsetningen.



Figur 19 Korrelasjon mellom omrørt skjærfasthet (c_{ur}) og a) KMgCa-forhold og b) saltinnhold for saltstabilisert leire fra Dragvoll og Ulvensplitten. Data fra [1] og [9].

7 Oppsummering

7.1 Bruksområde

Saltstabilisering kan benyttes for å sikre kvikkleireområder mot store områdeskred ved at løsne- og utløpsområdet reduseres. Metoden anbefales brukt i områder der konvensjonelle sikringstiltak (terrenginngrep, kalk-/sementpeler) ikke er mulig eller ønskelig å gjennomføre. Kaliumklorid benyttes for å endre egenskapene i kvikkleira. Bruk av natriumklorid/bordsalt (NaCl) vil *ikke* medføre permanent sikring av kvikkleira, og kan derfor *ikke* benyttes til saltstabilisering.

7.2 Kriterium for stabilisering

Ved å øke omrørt skjærfasthet til over 1 kPa, forhindres utviklingen av store retrogressive skred. Dette oppnås ved å øke KMgCa-forholdet i porevannet i kvikkleira til over 20%, også ved lave saltinnhold (< 2 g/L). Saltstabilisering fører til permanent økning av den omrørte skjærfastheten til over 1 kPa, flytegrense til over naturlig vanninnhold, og plastisitetsindeks over 10%.

Udrenert skjærfasthet øker ikke i saltstabilisert leire, men den hurtige reduksjonen av fasthet etter brudd som ses for kvikkleirer ble redusert. Saltstabilisering fører derfor ikke til økt beregningsmessig sikkerhet, men risikoen for progressive kvikkleireskred reduseres [9].

Simulering av 100 års utvasking av en saltstabilisert leirkolonne viser at saltinnholdet og ionekomposisjonen i porevannet tilsier at leira på dette tidspunktet har en omrørt skjærfasthet over 3 kPa. Saltstabilisert leire betraktes likevel som sprøbruddmateriale da det ikke finnes dokumentasjon på at omrørt skjærfasthet overstiger 2 kPa i permanent fase.

7.3 Installasjonsmetode

Prosjektet lyktes med å finne en skånsom installasjonsmetode med lav poretrykksrespons for saltbrønner i kvikkleire. Installasjonsprosedyren med forboring, installasjon av salt og tetting av borhull er imidlertid svært ressurskrevende. Installasjonsarbeidet er mest effektivt, og risiko for overflateforurensning minimeres, ved å installere saltet kaliumklorid som staver med sammenpresset salt. Det bør tilstrebes å installere mest mulig salt i brønner med minst mulig diameter. Det anbefales å installere minimum 5 kg KCl/m brønn, og helst 10 kg KCl/m brønn.

7.4 Nytte-/kost og ikke-prissatte konsekvenser

Topografiske tiltak gir høyest nytte-/kostfaktor og laveste klimagassutslipp av de tre sikringsalternativene som ble vurdert i dette prosjektet. Saltstabilisering genererer lavere klimagassutslipp enn kalk-/sementpeling, men har en langt høyere installasjonskostnad. Dersom kostnaden knyttet til klimagassutslipp økes i fremtiden, så vil saltstabilisering komme gunstigere ut.

Ikke-prissatte konsekvenser som miljøfaktorer gjenspeiles ikke i nytte-/kostfaktoren. Det er økt fokus på å ivareta ravedaler. I enkelte områder vil ikke-prissatte konsekvenser være utslagsgivende for hvilke sikringstiltak som er gjennomførbare. Saltstabilisering med lette borerigger vil være godt egnet til å minimere de ikke-prissatte konsekvensene dersom det sikres at metoden ikke påvirker biologisk liv i vassdrag og grunnvannsressurser, eller ødelegger kulturminner i topplaget. I slike tilfeller vil man kunne benytte saltstabilisering til tross for at nytte-/kostfaktoren er lavere enn for terrenginngrep og kalk-/sementpeling.

7.5 Senteravstand

Saltet sprer seg i omkringliggende leire ved diffusjon og strømning (hydrauliske og densitetsgradienter). Kun diffusjon er inkludert i korrelasjonskurvene for uttak av nødvendig senteravstand. Korrelasjonskurvene er derfor å betrakte som konservative.

Saltbrønnene kan installeres enten i selve skråningen, eller i området/plataet bak skråningen. Senteravstanden mellom saltbrønnene kan bestemmes på to måter:

- 1) Hele leirvolumet mellom saltbrønnene skal være stabilisert i løpet av en forhåndsbestemt tid
- 2) En andel (dekningsgrad) av leirvolumet stabiliseres i løpet av en viss tid slik at gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet i leirvolumet økes til 1 kPa.

Hele leirvolumet vil med tiden også bli stabilisert ved å velge alternativ 2, men det må påregnes lenger tid enn ved alternativ 1. Ved å tillate å benytte dekningsgrad, så vil leirvolumet oppnå en gjennomsnittlig omrørt skjærfasthet på 1 kPa i løpet av 3 år ved å installere saltbrønnene med en senteravstand på ca. 2 m.

Radius for stabilisert leire (omrørt skjærfasthet > 1 kPa) etter en viss tid kan hentes ut fra korrelasjonskurvene i Vedlegg A, eller ved å finne avstanden hvor KMgCa-forholdet > 20% fra geokjemiske simuleringer.

7.6 Anbefalinger til videreutvikling av installasjonsmetoden

Nytte-/kostfaktoren bør vurderes fra prosjekt til prosjekt, men generelt øker faktoren med økende senteravstand. Det anbefales å videreutvikle installasjonsprosedyrer der saltbrønnen installeres og tettes med bentonitt i en operasjon. Installasjonskostnadene bør ikke overstige 300 kr/m² for å oppnå en forsvarlig nytte-/kostfaktor.

Videreutvikling av installasjonsprosedyrene bør tilfredsstillende følgende:

- Installasjonskostnadene er lavere enn 300 kr/m brønn inkl. salt
- det installeres minimum 5 kg KCl/m brønn, men helst 10 kg KCl/m brønn
- minst mulig brønndiameter
- installasjonen kan utføres til 25-30 m dybde
- unngår poretrykksoppbygging i leira

7.7 Anbefaling til innsamling av erfaringsdata på NGTS Tiller-Flotten

Det anbefales å utføre trykksonderinger med resistivitetsmålinger (RCPTU) og korrelere mot laboratorieforsøk i den saltstabiliserte leira på NGTS Tiller-Flotten for å samle mer erfaringsdata. Det understrekes at økt spissmotstand i trykksonderinger (CPTU) i saltstabilisert leire kan mistolkes som økt udrenert skjærfasthet ved å benytte eksisterende korrelasjoner [9]. Udrenert skjærfasthet øker ikke som følge av saltstabilisert leire. Økt spissmotstand kan imidlertid benyttes i tolkingen av normalisert spissmotstand og poretrykksforholdet for indikasjon av økt omrørt skjærfasthet, redusert flyteindeks og økt plastisitetsindeks [27].

¹Inkluderer riggekostnader, oppstilling for borpunkt, salt og bentonitt.

8 Referanser

- [1] Helle TE, Aagaard P, Nordal S, «In-situ improvement of highly sensitive clays by potassium chloride migration», *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, bd. 143, nr. 10, s. 04017074, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001774](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001774).
- [2] Hamel B, Strand SA, Kjøsnes AJ, Kvennås M, Bache BKF, «Arbeidspakke 2: Kost-/nytte og miljø», Statens Vegvesen, ISBN-nummer 978-82-91228-37-2, 2019.
- [3] Helle TE, Kirkevollen OV, Bache BKF, Le TMH, «Arbeidspakke 1: Installasjonsmetoder», Statens Vegvesen, ISBN-nummer: 978-82-91228-35-8, 2019.
- [4] Helle TE, «Workshop 12. september 2019: Oppsummering av innspill», Statens Vegvesen, ISBN nummer: 978-827704-151-3, 2019.
- [5] Standard Norge, *NS 8015:1988 Geoteknisk prøving - Laboratoriemetoder - Bestemmelser av udrenert skjærstyrke ved konusprøving*. 1988.
- [6] Norsk Geoteknisk Forening (NGF), «NGF-melding nr.2: Veiledning for symboler og definisjoner i geoteknikk. Presentasjon av geotekniske undersøkelser.» NGF, rev2011 1982, [Online]. Tilgjengelig på: <https://livelink.multiconsult.no/ll/livelink.exe/open/19490275>.
- [7] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Sikkerhet mot kvikkleireskred : Vurdering av områdestabilitet ved arealplanlegging og utbygging i områder med kvikkleire og andre jordarter med sprøbruddegenskaper (V:7-2014)», NVE, Oslo, Veileder 7–2014, apr. 2014. [Online]. Tilgjengelig på: <https://livelink.multiconsult.no/ll/livelink.exe/open/19486717>.
- [8] Thakur V, Degago SA, Oset F, Aabøe R, Dolva BK, Aunaas K, Nyheim T, Lyche E, Jensen og OA, Sæter MB, Robsrud A, Viklund M, Nigussie D, L'Heureux JS, «Characterisation of post-failure movements of landslides in soft sensitive clays», i *Landslides in sensitive clays: From geoscience to risk management*, the Netherlands: Springer Dordrecht, 2014, s. 91–104.
- [9] Helle TE, «Stabilisering av kvikkleirer med kaliumklorid - Langtidseffekt Ulvensplitten og Dragvoll». Statens vegvesen, 2019.
- [10] V. Statens vegvesen, «Vegbygging (Håndbok N200)», Vegdirektoratet, Oslo, Normaler, jul. 2018. [Online]. Tilgjengelig på: www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Handboker.
- [11] Jernbaneverket, «Jernbaneverkets tekniske regelverk», Nettutgave (<http://trv.jbv.no/wiki/Hovedside>). [Online]. Tilgjengelig på: <http://trv.jbv.no/wiki/Hovedside>.
- [12] Moum J, Løken T and Torrance JK, «A geochemical investigation of the sensitivity of a normally consolidated clay from Drammen, Norway», *Geotechnique*, bd. 21, nr. 4, s. 329–340, 1971, doi: <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.4.329>.
- [13] Appelo CAJ, Postma D, *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2. utg. Leiden, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2005.
- [14] Rosenqvist IT, «A general theory for quick clay properties», i *Proceedings of the 3rd European Clay Conference, Oslo, Norway, 1977*, s. 215–228.
- [15] Torrance JK, «Post-depositional changes in the pore water chemistry of the sensitive marine clays of the Ottawa area, eastern Canada», *Engineering Geology*, bd. 114, nr. 2–3, s. 135–147, 1979.
- [16] Bjerrum L, «Engineering Geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings», *Geotechnique*, bd. 17, nr. 2, s. 83–118, 1967, doi: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1967.17.2.83>.
- [17] Penner E, «A study of sensitivity in Leda clay», *Canadian Journal of Earth Science*, bd. 2, nr. 5, s. 425–441, 1965, doi: <https://doi.org/10.1139/e65-037>.
- [18] Torrance JK, «Towards a general model of quick clay development», *Sedimentology*, bd. 30, nr. 4, s. 547–555, 1983, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1983.tb00692.x>.
- [19] Løken T, «Kvikkleiredannelse og kjemisk forvitring i norske leirer», 75, 1968.
- [20] Mitchell JK and Soga K, *Fundamentals of soil behaviour*, 3. utg. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 2005.
- [21] Moum J, Sopp OI and Løken T, «Stabilization of undisturbed quick clay by salt wells», *Väg- och vattenbyggaren no. 8*, 1968.

- [22] Eggestad A, Sem H, «Stability of excavations improved by salt diffusion from deep wells», i *Proceedings of the 6th European conference on soil mechanics and foundation engineering, Vienna, Austria, 1976*, s. 211–216.
- [23] Helle TE, Aagaard P, Nordal S, «Closure to “In Situ Improvement of Highly Sensitive Clays by Potassium Chloride Migration”», *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, bd. 145, nr. 4, apr. 2019, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002030).
- [24] Helle TE, Kvernås M, Kirkevollen OV, Hamel B, Bache BKF, Strand SA, Svanø G, Gylland A, Haugen E, Wiig T, Horn A, «Quick-clay landslide mitigation using potassium-chloride wells: Installation procedures and effects», i *Proceedings of the 18th Nordic Geotechnical Meeting*, Helsinki, Finland, 2021.
- [25] Solberg industri AS v/ Halfdan Solberg, «E-post», sep. 30, 2020.
- [26] Hoem OI, «Endring i poretrykk og stabilitet ved ramming av peler i skråninger», Hovedoppgave, NTH Institutt for geoteknikk og fundamenteringslære, 1975.
- [27] Helle TE, Long M, Nordal S, Aagaard P, «Effectiveness of resistivity cone penetration tests in salt-treated highly sensitive clay», *Ground Improvement*, bd. 170, nr. G13, s. 173–184.

Vedlegg A. Diffusjonsberegninger

RAPPORT

Saltstabilisering av kvikkleire

OPPDRAKSGIVER

Stjørdal kommune

EMNE

Diffusjonsberegninger

DATO / REVISJON: 03. desember 2020 /00

DOKUMENTKODE: 10207404-RIG-BER-002



Multiconsult

Denne rapporten er utarbeidet av Multiconsult i egen regi eller på oppdrag fra kunde. Kundens rettigheter til rapporten er regulert i oppdragsavtalen. Hvis kunden i samsvar med oppdragsavtalen gir tredjepart tilgang til rapporten, har ikke tredjepart andre eller større rettigheter enn det han kan utlede fra kunden. Multiconsult har intet ansvar dersom rapporten eller deler av denne brukes til andre formål, på annen måte eller av andre enn det Multiconsult skriftlig har avtalt eller samtykket til. Deler av rapportens innhold er i tillegg beskyttet av opphavsrett. Kopiering, distribusjon, endring, bearbeidelse eller annen bruk av rapporten kan ikke skje uten avtale med Multiconsult eller eventuell annen opphavsrettshaver.

RAPPORT

OPPDRAAG	Saltstabilisering av kvikkleire	DOKUMENTKODE	10207404-RIG-BER-002
EMNE	Diffusjonsberegninger	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAAGSGIVER	Stjørdal kommune	OPPDRAAGSLEDER	Anders Samstad Gylland
KONTAKTPERSON	Atle Horn	UTARBEIDET AV	Tonje Eide Helle
KOORDINATER		ANSVARLIG ENHET	Multiconsult ASA
GNR./BNR./SNR.			

SAMMENDRAG

Store retrogressive kvikkleireskred kan forhindres ved at den omrørte skjærfastheten økes til over 1 kPa. Ved å installere brønner fylt med saltet kaliumklorid (KCl) i kvikkleira, endres porevannskjemien slik at leiren ikke lenger er kvikk. Dette inntreffer når kalium, magnesium og kalsium-forholdet (KMgCa-forholdet) i porevannet overstiger 20%. Saltet sprer seg ut fra brønnen ved diffusjon, og endrer komposisjonen av ioner i både porevannet og på mineraloverflatene. Det er utført diffusjonsberegninger ved hjelp av programmet PHREEQC for å finne ut hvor lang tid det tar å stabilisere kvikkleirevolumet ut fra saltbrønnen. Tiden det tar å stabilisere leirvolumet avhenger av grunnforholdene og hvor mye salt som tilsettes i saltbrønnen. Det er derfor utført beregninger for typiske norske leirer med:

- kationebyttekapasitet (CEC) 6,0, 11,5 og 17,0 meq/100 g tørr jord
- porøsitet 40, 50 og 60%
- KMgCa-forhold lik 5,0%, 9,0%, 15,2% og 19,6%
- og saltbrønner fylt med 5, 10 og 15 kg KCl/m brønn, og med konstant mettet konsentrasjon (4 mol/kgw) i 60 måneder

Simuleringsresultatene er benyttet for å lage korrelasjoner for hvor lang tid det tar å stabilisere kvikkleire i avstand fra brønnen. Beregningene inkluderer kun diffusjon. Densitets- og hydrauliske gradienter kan bidra til å spre saltet raskere dersom det finnes permeable lag i kvikkleireavsetningen. Korrelasjonskurvene er derfor konservative.

Tiden det tar å stabilisere kvikkleire øker med minkende porøsitet og KMgCa-forhold, og økende CEC. Dvs. at nødvendig senteravstand mellom brønnene er størst, og teknikken dermed gunstigst, i kvikkleirer med:

- høy porøsitet kontra kvikkleirer med lav porøsitet
- opprinnelig høyt KMgCa-forhold (19,6%) sammenlignet med kvikkleirer med opprinnelig lavt KMgCa-forhold
- CEC < 11,5 meq/100 g tørr jord kontra leirer med CEC ≥ 11,5 meq/100 g tørr jord

For å opprettholde mettet løsning i saltbrønnen lengst mulig, anbefales det å installere minimum 10 kg KCl/m brønn.

Basert på de konservative korrelasjonskurvene vil en diameter på ca. 1,1-1,3 m være stabilisert rundt hver saltbrønn 3 år etter installasjon, og 1,4-1,8 m 5 år etter installasjon. Det stabiliserte volumet øker gradvis med tiden.

Bestandigheten av saltstabilisert område er vurdert ved å simulere 100 års utvasking av saltstabilisert leire. Simuleringene viser at leiren mellom brønnene fortsatt har KMgCa-forhold på ca. 75% 100 år etter installasjon.

Salt lekker ut av det saltstabiliserte området i små konsentrasjoner over tid. Likevel bør ikke saltbrønner installeres i områder der klorid kan akkumulere i innsjøer eller grunnvannsreservoarer.

Simuleringsresultatene viser at ved å installere saltbrønner fylt med KCl med en senteravstand på 2 m, så vil store deler av leirvolumet stabiliseres i løpet av 5 år. Tiden det tar å stabilisere leirvolumet kan reduseres ved å redusere senteravstanden mellom brønnene. Stabiliseringen er varig.

00	03.12.2020		Tonje Eide Helle	Christian Sætre, NGI	Anders Gylland
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Innledning	6
1.1	Bakgrunn.....	6
1.2	Modellering.....	7
2	PHREEQC modellering av diffusjon.....	9
2.1	Inngangsparametere for porevann og leire	9
2.2	Diffusjonskoeffisient	12
2.3	Modellering av diffusjon	13
2.3.1	Saltbrønn	13
2.3.2	Valg av tidstrinn	14
3	Resultater	17
3.1	Sammenligning av modell med mobile kontra immobile celler.....	17
3.2	Innvirkning av plassering av saltbrønn i leirkolonne	18
3.3	Innvirkning av original porevannskjemi på tidsforløpet.....	19
3.4	Korrelasjonskurver	21
3.4.1	Porøsitet 40%.....	22
3.4.2	Porøsitet 50 %.....	23
3.4.3	Porøsitet 60 %.....	24
4	Levetid på saltstabilisering	25
4.1	Utvasking av saltstabilisert område	25
4.1.1	Radiell modell med immobile celler.....	25
4.1.2	Mobile celler med lik lengde	26
4.2	Strømning i tillegg til diffusjon	27
4.3	Strandsonen.....	28
4.4	Miljø.....	28
5	Konklusjoner.....	29
6	Referanser	30

Vedlegg A: Mobile celler

Vedlegg B: Immobile celler

Symboler og forkortelser

A_{ij}	arealet for grenseflaten mellom celle nr. i og j
CEC	Kationebyttekapasitet (meq/L)
D_e	effektiv diffusjonskoeffisient (m^2/s)
D_f	diffusjonskoeffisient i vann (m^2/s)
D_w	diffusjonskoeffisienten for konservativt elementet i vann ved 25 °C
F	formasjonsfaktor (-)
f_{bc}	faktor for mixing mellom celler med ulike grensebetingelser
G_{ij}	geometrisk faktor som korrigerer for tortøsiteten, og er lik $1/\epsilon_{ij}^n$ hvor n er lik Archie's eksponent m minus 1
h_{ij}	avstanden fra senter av celle nr. i til senter av celle nr. j
kgw	kilogram vann
$L_{\#}$	lengde på celle nr. n (-)
L_{tot}	total lengde på kolonnen (m)
L_1	lengden på første cella i kolonnen (m)
m	Archies eksponent
MCD	Multi Component diffusion
meq	milliekvivalenter
n	eksponent benyttet i MCD-simuleringer i IPhreeqc (-)
T	temperatur (°C)
V_j	volum av celle nr. i inkl. både vann og jord
V_j	volum i celle nr. j
$V_{w,j}$	volumet av vann
w	vanninnhold (%)
X	ionebytter i PHREEQC (mol/L)
X_i	ionebytter i celle nr. i
Δt	tidstrinnet (timestep)
ϵ	porøsitet (%)
ϵ_{ij}	porøsiteten over grensesnittet mellom celle nr. i og j
ϵ_w	vannmettet porøsitet (%)
θ^2	tortøsitet (-)
ρ	densitet (g/cm^3)
ρ_d	tørr densitet (g/cm^3)
σ_t	elektrisk konduktivitet i sediment (S/m)
σ_w	elektrisk konduktivitet i porevann (S/m)
#	cellenummer (-)
$\#_{tot}$	totalt antall celler i kolonnen (-)

1 Innledning

I forbindelse med forskningsprosjektet «Saltstabilisering av kvikkleire (SAK)», har Multiconsult utført diffusjonsberegninger av kaliumklorid (KCl) fra saltbrønner. Det er tatt utgangspunkt i [1] hvor spredningen av salt fra en saltbrønn på Dragvoll i Trondheim ble tilbakeregnet. Dragvoll er det eneste stedet i Norge hvor spredningen av KCl i kvikkleire er monitort. Det er derfor tatt utgangspunkt i disse beregningene for å lage korrelasjonskurver for spredning av KCl også for andre grunnforhold enn i [1]. Simuleringsverktøyet IPhreeqc [2] er benyttet.

Dette beregningsheftet dokumenterer:

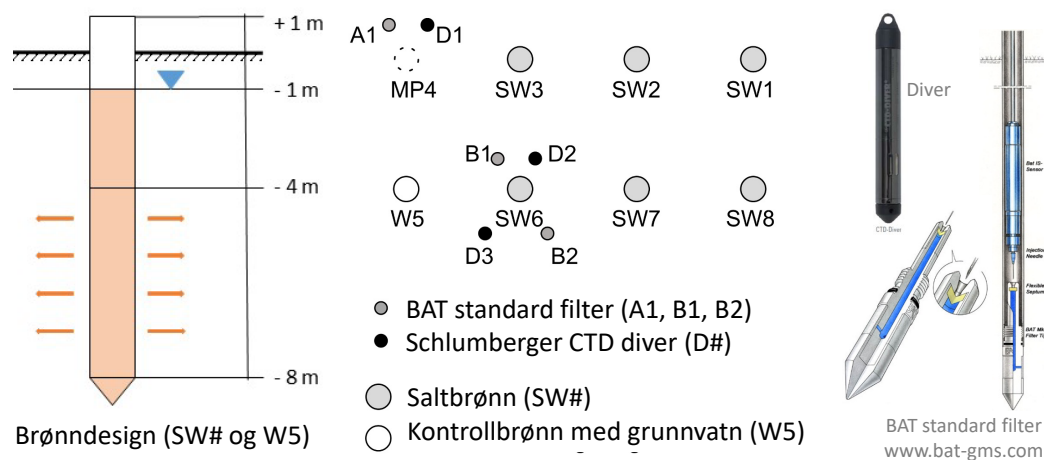
- Normalområder for inngangsparametere for norske leirer
- Estimat for hvor fort saltkonsentrasjonen reduseres i brønnen
- Korrelasjonskurver for hvor fort kvikkleira stabiliseres i avstand fra brønnen
- Bestandighet av saltstabilisering

Hensikten er å kunne benytte korrelasjonskurvene for å bestemme senteravstand mellom saltbrønnene for ulike norske grunnforhold.

1.1 Bakgrunn

På Dragvoll ble det installert to stk. filtre for grunnvannsprøver (BAT-filtre i Figur 1) på 6 m dybde i en avstand på 0,5 m og 1,0 m fra saltbrønn nr. 6 (SW6 i Figur 1). Det ble tatt grunnvannsprøver fra disse filtrene gjennom prosjektperioden på 3 år og 5 måneder. Brønnene ble etterfylt med saltet KCl for å opprettholde mettet løsning i brønnen gjennom prosjektets varighet.

Store retrogressive skred kan inntreffe i leirer med omrørt skjærfasthet mindre enn 1 kPa [3],[4]. Kriteriet for når kvikkleira er stabilisert er derfor definert ved at den omrørte skjærfastheten overstiger 1 kPa. Dette inntreffer når kalium, magnesium og kalsium (KMgCa-forholdet i Ligning 1 med alle konsentrasjoner i meq/L) overstiger 20% av kationene (positive ioner) i porevannet.



Figur 1 Installasjoner på Dragvoll. Saltbrønnene var installert med en senteravstand på ca. 10 m. Tilbakeregningene i [1] er utført for grunnvannsprøver fra BAT B1 og B2 ved saltbrønn nr. 6 (SW6).

Saltet vil spre seg fra saltbrønnene som følge av:

- Diffusjon
- Strømning
 - Hydraulisk gradient over området
 - Densitetsgradient mellom løsning i brønn og porevann i omkringliggende leire

$$KMgCa - \text{forholdet} = \frac{K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}}{Na^+ + K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}} \cdot 100\% \quad \text{Ligning 1}$$

1.2 Modellering

Det geokjemiske beregningsprogrammet IPhreeqc (PHREEQC 3.6.2.15100, utgitt januar 2020) er benyttet for å simulere diffusjonen av KCl i leire. PHREEQC kan beregne både strømning og diffusjon langs en kolonne (linje) bestående av celler. PHREEQC versjon 3 [2] benytter programmeringsspråket C og C++ til å utføre beregninger av komplekse geokjemiske reaksjoner i vann. PHREEQC implementerer flere ulike typer modeller for vann: Lawrence Livermore National Laboratory model, WATEQ4F, Pitzer og Specific ion Interaction Theory (se manual for detaljer).

For saltbrønner regnes diffusjonen radielt. Den radielle leirkolonnen kan modelleres på to ulike måter:

- 1) som mobile celler med likt volum ved å redusere cellelengden med avstand fra brønnen
- 2) som immobile (stillestående) celler med lik cellelengde og ulikt volum

Selv om cellene defineres som immobile i PHREEQC, så er disse cellene likevel tilgjengelige for strømning og diffusjon. For kolonner med mobile celler som er like lange og som har likt volum, beregnes diffusjonen med høy nøyaktighet ved hjelp av kodeblokken TRANSPORT. Ved radiell diffusjon spres imidlertid saltet saktere siden det spres over et større og større areal i avstand fra brønnen. Nøyaktigheten ved beregningen av radiell diffusjonen er ikke like god dersom det benyttes en modell med mobile celler. Dette kan forbedres ved å benytte mange celler med liten cellelengde i modellen, men best nøyaktighet oppnås ved å modellere leirkolonnen med immobile celler.

Modeller for begge metodene er vist i Vedlegg A og B i denne rapporten. I foreliggende rapport er forskjellen i resultatene små, og korrelasjonskurvene er basert på resultater fra modellen med mobile celler.

Korrelasjonskurvene viser spredning av salt kun ved diffusjon. Permeabiliteten i leirer er såpass lav at spredningen av salt trolig vil være lite påvirket av grunnvannsstrømmer i leiren. Dersom leiren har permeable lag, vil saltet kunne spre seg raskere langs disse lagene. Man vil da også få diffusjon vertikalt ut fra disse lagene. Spredningen av salt kan i enkelte tilfeller gå raskere i enkelte retninger fra brønnen som følge av strømning, fordi:

- Løsningen i saltbrønnen har høyere densitet enn porevannet i omkringliggende leire. Det vil dermed oppstå en densitetsgradient fra saltbrønnen og ut i leira. Dette vil kunne føre til høyere hastighet på spredningen av salt enn det som fremkommer av diffusjonsberegningene i denne rapporten. På Dragvoll ble det observert at spredningen av salt gikk raskere i en retning fra brønnene som følge av densitetsgradienter.

- I kvikkleirer med silt-/sandlag vil saltet spre seg raskere langs disse mer permeable lagene, og således føre til at stabiliseringen går hurtigere.
- Hydrauliske gradienter vil også føre til at saltet sprer seg raskere i en retning. I en skråning vil saltet trolig spre seg raskere nedover skråningen som følge av dette.

Det understrekes at korrelasjonskurvene i denne rapporten derfor er konservative, og stabiliseringen av kvikkleira mellom saltbrønner vil trolig være hurtigere enn det som fremkommer her.

2 PHREEQC modellering av diffusjon

IPhreeqc (PHREEQC 3.6.2.15100, utgitt januar 2020) er benyttet for å simulere diffusjon av KCl og geokjemiske reaksjoner langs en kolonne delt inn i # celler. Kolonnen består av porevann (SOLUTION) og ionebytter (X) i form av leire (EXCHANGE). De ulike input-filene for beregningsmodellene finnes i Vedlegg A og B.

SOLUTION er kjent ionekomposisjon i porevannet. Ionebytteren er den totale kationebyttekapasiteten (CEC) for leiren omregnet til mol. PHREEQC setter volumet i cellene lik 1 liter (1 kilogram vann (kgw)). Dette kan endres av brukeren. Det er viktig å merke seg at dersom volumet endres, må ionebytteren multipliseres med volumet i cellen siden denne oppgis som total ionebyttekapasitet i cellen. Elementene på ionebytteren bestemmes ved likevekt med ionene i porevannet. Simuleringen av diffusjonen kjøres derfor i to faser:

1) Likevekt mellom ioner i porevann (SOLUTION) og elementer på ionebytter (EXCHANGE) i cellene for å bestemme utbyttbare (adsorberte) ioner på X (Na-X, K-X, Mg-X₂ og Ca-X₂)

2) Transport av salt fra brønn og transiente endringer i porevann og elementer på ionebytteren

I det følgende er det beskrevet hvordan inngangsparameterne er fastsatt.

2.1 Inngangsparametere for porevann og leire

Kvikkleireavsetninger har blant annet ulikt leirinnhold, ulik sammensetning av leirmineraler, porevannskjemi, porøsitet, densitet og vanninnhold. Hastigheten på saltdiffusjonen vil derfor variere fra en kvikkleireavsetning til en annen. Følgende parametere i kvikkleira er styrende for hvor fort leira får økt omrørt skjærfasthet som følge av saltdiffusjon:

- den opprinnelige komposisjonen og konsentrasjonen av kationer i porevannet
- størrelsen på CEC
- vannmettet porøsitet

Det vil ta kortere tid å stabilisere kvikkleirer med porevann som har en komposisjon der KMgCa-forholdet er nært 20%, enn kvikkleirer som har lavere KMgCa-forhold. For å vise hvordan opprinnelig porevannskjemi påvirker diffusjonen, er det kjørt simuleringer for leirer med ulike initielle KMgCa-forhold (se avsnitt 3.3).

Korrelasjonskurvene i denne rapporten (se avsnitt 3.4.1) er laget ut fra simuleringer med porevannskjemi i kvikkleire fra Dragvoll [5]. Det ble valgt å ta et gjennomsnitt av porevannskjemien i prøver hentet opp fra upåvirket kvikkleire fra 5,9 og 7,8 m dybde; dypt nok til at porevannskjemien er minimalt påvirket av forvitningsprodukter fra topplagene (Tabell 1).

Kationebyttekapasiteten (CEC) oppgis i meq/100 g tørr jord. Ionebytteren i IPhreeqc (X) oppgis i mol. CEC regnes om til meq/L vha. Ligning 2 der ρ_d er tørr densitet og ϵ er porøsiteten til sedimentet. Mol settes lik meq, og CEC multipliseres med volumet i cellen for å finne ionebytteren X.

$$CEC \cdot \rho_d / \epsilon = CEC \cdot (1 - \epsilon) / \epsilon \quad \text{Ligning 2}$$

$$(\text{meq}/100 \text{ g tørr jord} \cdot 10 \text{ hg}/\text{kg} \cdot \text{kg}/\text{L})$$

CEC påvirkes av mineraltype, leirinnhold, spesifikt overflateareal (SA) og organisk innhold. Dess større SA, dess større CEC. Norske kvikkleirer er dominert av illitt og kloritt. Grunnet sin unge geologiske alder, har de Skandinaviske og Canadiske leirmineralene mindre SA enn illitt og kloritt av diagenetisk opphav. Norske marine leirer har SA på 15-50 m²/g [6] (Figur 2 og Tabell 2), og en oversikt over kanadiske leirer viser SA på 10-36 m²/g [7]. Kvikkleira på Dragvoll hadde SA på 18-28 m²/g [8].

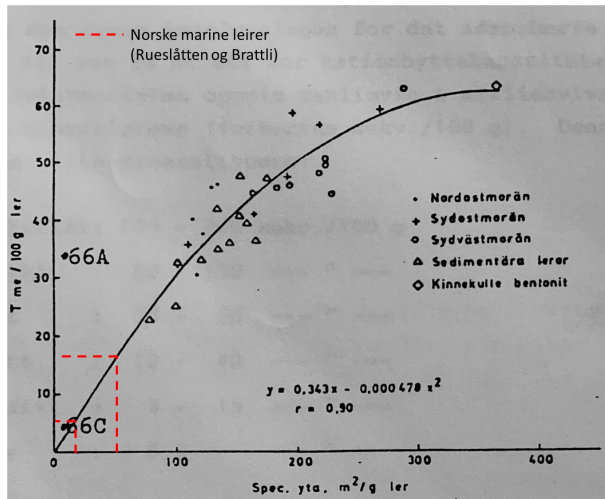
Verdiene i Tabell 3 er benyttet i simuleringene kjørt med CEC på 6,0, 11,5 og 17,0 meq/100 g tørr jord. CEC regnes om til meq/L ved å bruke Ligning 4. Norske leirer har vanligvis tyngdetetthet 17-21 kN/m³, porøsitet 40-60% og vanninnhold 25-55%. Figur 3 viser korrelasjoner mellom porøsitet, vanninnhold og tyngdetetthet for ulike metningsgrader. Det er her benyttet forholdene ved 100% metning. Ionebytteren X benyttet i simuleringene finnes i Tabell 3.

Tabell 1 Porevannskjemi i sentrifugert porevann fra kvikkleire fra Dragvoll i Trondheim. Gjennomsnitt av porevannskjemi fra 5,9 og 7,8 m dybde.

Element	Konsentrasjon
Na ⁺ (mmol/L)	7,17
K ⁺ (mmol/L)	0,25
Mg ²⁺ (mmol/L)	0,11
Ca ²⁺ (mmol/L)	0,12
Cl ⁻ (mmol/L)	0,26
F ⁻ (mmol/L)	0,29
SO ₄ ²⁻ (mmol/L)	0,03
Br ⁻ (mmol/L)	0,02
NO ₃ ⁻ (mmol/L)	0,00
PO ₄ ³⁻ (mmol/L)	0,02
Alkalinitet som HCO ₃ ⁻ (meq/L)	6,88
pH (-)	8,8
Temperatur (°C)	6
KMgCa-forhold (%)	9,0

Tabell 2 Leirinnhold, spesifikt overflateareal og kationebyttekapasitet i detritale leirer

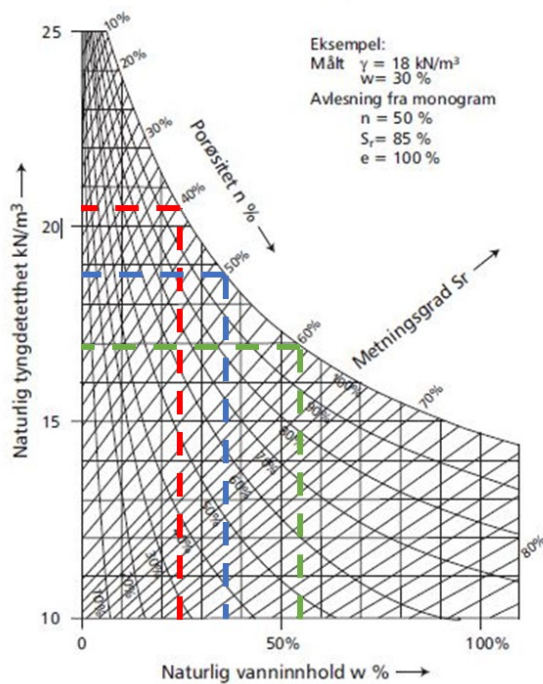
Kilde	Sted	Leirinnhold (%)	SA (m ² /g)	CEC (meq/100 g tørr jord)
Kenney (1967)	Norge	42-44	-	9-11
Locat og St-Gelais (2014)	Canada	30-83	10-36	6-17
Helle (2019)	Ulvensplitten, Norge	40-46		6
Helle (2019)	Dragvoll, Norge	34-41	18-28	6-8



Figur 2 Spesifikt overflateareal for leirfraksjoner i noen svenske jordarter med tilhørende kationebyttekapasitet.

Tabell 3 Porøsitet (ϵ), densitet (ρ), vanninnhold (w), tørr densitet (ρ_d), CEC og X benyttet i simuleringene

ϵ (%)	ρ (g/cm ³)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)	CEC/ X (meq/100 g tørr jord / meq/L)	CEC/ X (meq/100 g tørr jord / meq/L)	CEC/ X (meq/100 g tørr jord / meq/L)
40	2,1	25	1,7	6,0/0,25	11,5/0,48	17/0,71
50	1,9	35	1,4	6,0/0,17	11,5/0,32	17/0,48
60	1,7	55	1,1	6,0/0,11	11,5/0,21	17/0,32



Figur 3 Tyngdetetthet basert på vanninnhold i norske leirer på 25-55 %. Figuren er hentet fra [12]. Rød, blå og grønn stiplede linje viser tyngdetetthet og vanninnhold for porøsitet 40%, 50% og 60% ved metningsgrad 100 %.

2.2 Diffusjonskoeffisient

Diffusjonen beregnes ved hjelp av multi-component diffusion (MCD) i PHREEQC som tillater at ulike elementer har ulik diffusjonshastighet. I beregningene er det benyttet MCD med klorid som konservativt element¹ med diffusjonshastighet i fritt vann ved 25 °C $D_f = 2,03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

Diffusjonskoeffisientene til de øvrige elementene i løsningen er oppgitt i databasen phreeqc.dat, og benyttes av PHREEQC i diffusjonsberegningene. Diffusjonen er temperaturavhengig. Temperaturen i SOLUTION i alle cellene er derfor lik temperaturen i leira; 6 °C.

Diffusjonsberegningene gjøres langs en rett kolonne. I leire må ionene imidlertid «gå en omvei» rundt partiklene (tortøsitet θ^2). Hastigheten på diffusjonen i porevannet (D_p) går dermed ned (Ligning 3).

$$D_p = D_f / \theta^2 \quad \text{Ligning 3}$$

PHREEQC bruker Archies lov til å ta høyde for tortøsiteten. Vannfylt porøsitet (ϵ_w) og eksponenten n må oppgis som inngangsparametere sammen med D_f for det konservative elementet. Det understrekes imidlertid at eksponenten n i PHREEQC tilsvarer eksponenten m i Archies lov minus 1 (Ligning 4).

$$D_p = D_f \cdot \epsilon_w^{(m-1)} = D_f \cdot \epsilon_w^n \quad \text{Ligning 4}$$

Archies lov er egentlig ikke gyldig for leirer, men kan likevel benyttes ved å velge en høy eksponent m (2-3) for å ta høyde for at partiklene er plateformet og ikke sfæriske [1],[9],[10],[11],[12],[13],[14].

I sand kan Archies eksponent bestemmes via formasjonsfaktoren F (Ligning 5), der F er forholdet mellom elektrisk konduktivitet i porevannet (σ_w) og konduktiviteten i sedimentet (σ_t).

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma_t} = \epsilon_w^{-m} \quad \text{Ligning 5}$$

Siden leirmineraler er elektrisk ladede, så kan man ikke finne F ved å måle konduktiviteten i sedimentet. Archies eksponent er derfor estimert basert på tortøsiteten. I følge [15] kan tortøsiteten estimeres fra Ligning 6 for finkornede løsmasser med porøsitet 0,3-1,0.

$$\theta^2 = 1 - 2 \cdot \ln(\epsilon_w) \quad \text{Ligning 6}$$

Archies eksponent m regnes ut med Ligning 7 og 8, og eksponenten n som benyttes i PHREEQC beregnes med Ligning 9.

$$F = \theta^2 / \epsilon_w \quad \text{Ligning 7}$$

$$m = -\ln(F) / \ln(\epsilon_w) \quad \text{Ligning 8}$$

$$n = m - 1 \quad \text{Ligning 9}$$

Saltbrønner installeres i mettet leire, og hele porøsiteten er dermed vannmettet. Norske leirer har en porøsitet på 40-60 %. Det er utført diffusjonsberegninger for porøsiteter 40 %, 50 % og 60 % med eksponent n i Tabell 4.

¹ Det konservative elementet inngår ikke i reaksjoner med leira, og transporteres uhindret gjennom leirvolumet.

Tabell 4 Vannmettet porøsitet (ϵ_w) og Archies eksponent benyttet i IPHREEQC-simuleringene

Vannmettet porøsitet ϵ_w (-)	Archies eksponent m (-)	PHREEQC eksponent n (-)
0,4	2,14	1,14
0,5	2,25	1,25
0,6	2,38	1,38

2.3 Modellering av diffusjon

Spredningen av salt fra saltbrønnen beregnes som radiell diffusjon. Modellering av leirkolonnen og saltbrønnen avhenger av om man benytter mobile (Vedlegg A) eller immobile celler (Vedlegg B). De ulike måtene å modellere på er beskrevet i vedleggene. I det følgende beskrives valg av input i saltbrønn og valg av tidstrinn.

2.3.1 Saltbrønn

Hvor lang tid det tar å tømme en brønn for salt avhenger av:

- hvor mye salt som er installert i utgangspunktet
- hvor fort konsentrasjonsgradienten mellom saltbrønnen og porevannet i omkringliggende leire reduseres

Det er altså en tidsavhengig prosess der det forbrukes mest salt per dag i starten, og gradvis mindre etter hvert som konsentrasjonen av salt øker i porevannet i leira rundt brønnen. Det er knyttet usikkerhet til hvor lang tid det vil ta å tømme en brønn for salt. I det følgende er det derfor estimert hvor mye salt som forbrukes per dag ved å se på observert forbruk i saltbrønn nr. 1 på Dragvoll.

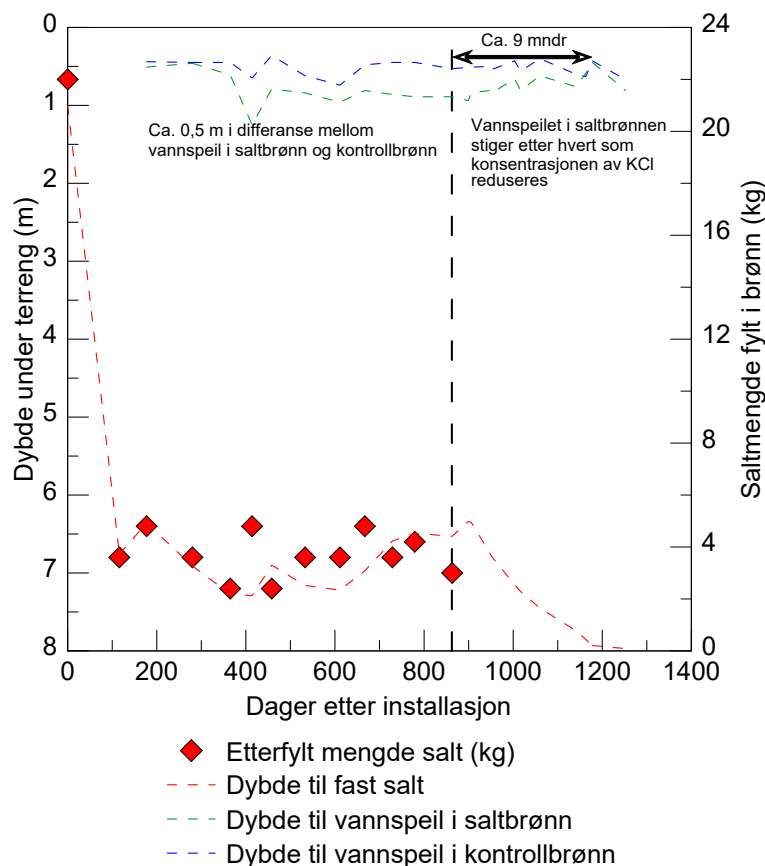
Observert saltforbruk på Dragvoll

Saltbrønnene på Dragvoll hadde en ytre diameter på 63 mm. Disse var perforert over en lengde på 4 m; fra 4 til 8 m dybde (Figur 1). I tillegg ble det installert en kontrollbrønn der det ikke ble tilsatt salt (W5 i Figur 1). Denne ble installert på samme måte som saltbrønnene, men inneholdt kun vann. Kontrollbrønnen ble brukt til å observere differansen mellom vannspeilet i saltbrønnene (grønn stiplet linje i Figur 4) og vannspeilet i naturlig leire (blå stiplet linje i Figur 4). Figur 4 viser utviklingen av vannspeilet og dybde til fast salt over tid i saltbrønn nr. 1, sammenlignet med vannspeilet i naturlig leire.

I saltbrønn nr. 1 ble det totalt forbrukt ca. 67 kg KCl. Brønnen ble fylt med 22 kg salt på installasjonsdatoen, og etterfylt jevnlig med 3-5 kg salt (røde symboler i Figur 4). Siste etterfylling ble gjort 863 dager etter installasjon av saltbrønnen. Det tok ca. 280 dager fra denne siste etterfyllingen til det var tomt for fast salt i brønnen; dybde til fast salt (rød stiplet linje i Figur 4) går mot 8 m (bunnen av brønnen).

Grunnet tyngden av saltlaken i saltbrønnen ($\rho_{KCl} = 1,2 \text{ g/cm}^3$) var det ca. en halvmeter i differanse mellom vannspeilet i saltbrønnen og i kontrollbrønnen. Det er uvisst hvor lang tid konsentrasjonen i brønnen forble mettet. Ca. 9 måneder etter siste etterfylling var vannspeilet i saltbrønnen ca. i same nivå som i kontrollbrønnen. Dette tyder på at konsentrasjonen av KCl ble redusert slik at densiteten av løsningen i brønnen etter hvert ble lik som for vann ($\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$). Dette skjer når saltinnholdet kommer under ca. 20 g/L. Dvs. at over en periode på ca. 9 måneder sank konsentrasjonen i brønnen fra mettet (4 mol KCl/L) til å ha et saltinnhold under ca. 20 g/L (ca. 0,3 mol KCl/L)

Det er uvisst hvor mye salt som gikk ut av brønnen hver dag, og hvor mye salt som var igjen i brønnen etter siste fylling. Forbruket av salt per dag reduseres etter hvert som konsentrasjonsgradienten går ned. I det følgende er det benyttet et gjennomsnitt av totalt forbruk i saltbrønn nr. 1 (67 kg) over tid (ca. 1140 dager) over 4 m perforert brønn, som tilsvarer et forbruk på 15 g KCl per dag per m brønn. Dette er mye salt dersom man betrakter kun diffusjon. På Dragvoll spredte imidlertid saltet seg også som følge av densitetsgradienter, og forbruket ble følgelig større enn om det kun var diffusjon.



Figur 4 Vannspeilet i saltbrønnen (grønn stiple linje) steg til samme nivå som vannspeilet i kontrollbrønnen (blå stiple linje) etter ca. 9 måneder. Det var da ikke noe fast salt igjen i brønnen (rød stiple linje). De røde symbolene viser hvor mange kg salt som ble fylt på ved de ulike tidspunktene.

2.3.2 Valg av tidstrinn

I feltforsøket på Dragvoll ble KCl etterfylt i brønnene for å opprettholde mettet (4 mol/kgw) konsentrasjon gjennom hele prosjektperioden over 3 år og 5 måneder. Dette er ikke kostnadseffektivt. Det må derfor tas sikte på at brønnene kun fylles med salt på installasjonstidspunktet. Dermed vil konsentrasjonen i brønnen avta med tiden, noe som kan medføre at diffusjonsprosessen tar litt lengre tid enn det som ble observert på Dragvoll.

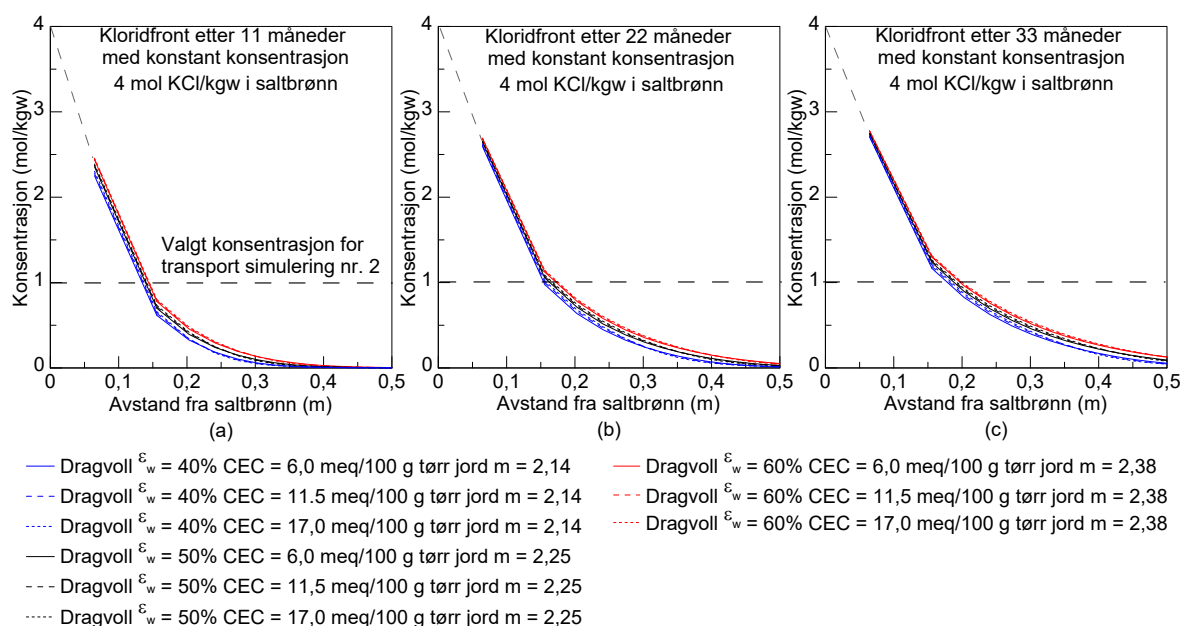
Dess mer salt en har nedi brønnen per meter, dess lengre tid tar det å tømme brønnen. En får installert mest salt per meter ved å installere sammenpresset salt istedenfor saltkrystaller. Densiteten på KCl-kubene som ble produsert for dette prosjektet var 2 g/cm³. Dersom diameteren på disse saltstavene er 8 cm, vil en kunne installere 10 kg KCl/m brønn. Ved å anta at det forbrukes 15 g KCl/dag per m brønn, så vil alt saltet være løst opp etter 22 måneder. Etter at alt saltet er gått i løsning, og konsentrasjonen av KCl etter hvert synker så vil det likevel pågå diffusjon utover fra den

saltstabiliserte leiren. Det blir derfor feil å sette konsentrasjonen i saltbrønnen lik 0. Det ble derfor valgt å ta ut en konsentrasjon fra beregningene basert på estimert tid med mettet løsning i saltbrønnen (Figur 5). For å ta høyde for at ulike installasjonsmetoder vil kunne føre til ulik mengde salt per m brønn, så er det kjørt simuleringer med tre ulike tidsintervall (Tabell 5). Figur 5 viser kloridfronten etter 11, 22 og 33 måneder (5, 10 og 15 kg KCl/m brønn).

Tabell 5 Tidstrinn basert på hvor mange kg KCl som installeres per m brønn

Installert kg KCl per m brønn	Diameter brønn ^a (cm)	Måneder (shifts) med mettet løsning i brønnen (4 mol/kgw)	Måneder (shifts) med redusert konsentrasjon i brønnen (1 mol/kgw)
5	5,6	11	49
10	8,0	22	38
15	9,8	33	27

^a dersom saltet er runde staver av sammenpresset KCl



Figur 5 Kloridfront etter a) 11 måneder (5 kg KCl/m brønn), b) 22 måneder (10 kg KCl/m brønn) og c) 33 måneder (15 kg KCl/m brønn).

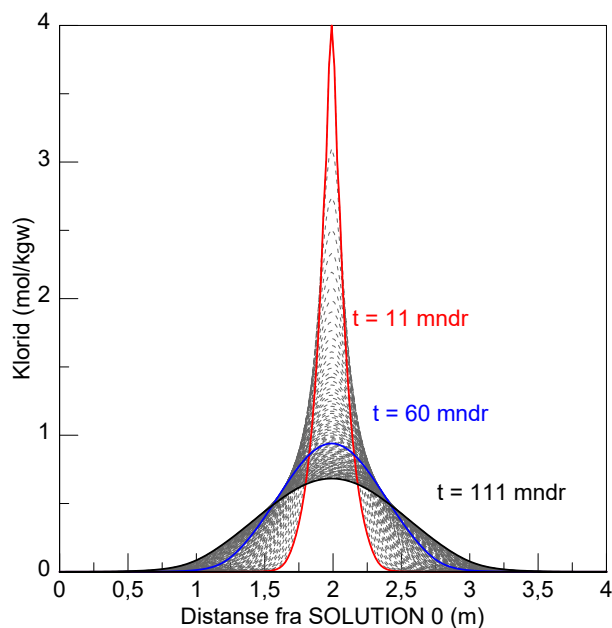
For å verifisere at estimert konsentrasjon på 1 mol KCl/kgw er konservativt, ble det kjørt en simulering der en saltbrønn med 5 kg KCl/m brønn ble plassert i midten av en 4 m leirkolonne med lik cellelengde. SOLUTION 0 kommer inn i kolonnen ved avstand $x = 0$, og er opprinnelig porevann som vaskes inn i leirkolonnen. SOLUTION i cellene rundt brønnen i midterste celle ($x = 2$ m) ble hentet fra simuleringen av saltbrønn med konstant konsentrasjon 4 mol KCl/kgw i 11 måneder ved å benytte radiell modell med immobile celler (Vedlegg B). Leira i kolonnen hadde porøsitet 50% og CEC lik

11,5 meq/100 g tørr jord. Simuleringen bekrefter at valget av 1 mol/kgw i brønnen fram 11 til 60 måneder etter installasjon er konservativt.

For å simulere forskjellen mellom ulike mengder installert salt, så er det kjørt simuleringer med konstant konsentrasjon på 4 mol KCl/kgw i brønnen i 60 måneder, og i tillegg simuleringer av diffusjonen i to transportfaser:

- 1) Konstant konsentrasjon 4 mol/kgw i SOLUTION 0 i X måneder etterfulgt av
- 2) Konstant konsentrasjon 1 mol/kgw i SOLUTION 0 i (60-X) måneder

Simuleringene av diffusjonen er kjørt i tidstrinn (time step) på 30 dager i totalt 5 år som utgjør 60 trinn (shifts) i modellen.



Figur 6 Konsentrasjon av klorid etter 11 måneder med konstant konsentrasjon 4 mol KCl/kgw i saltbrønn (rød linje), etterfulgt av 49 måneder (blå linje) og 100 måneder (svart linje) med utvasking.

3 Resultater

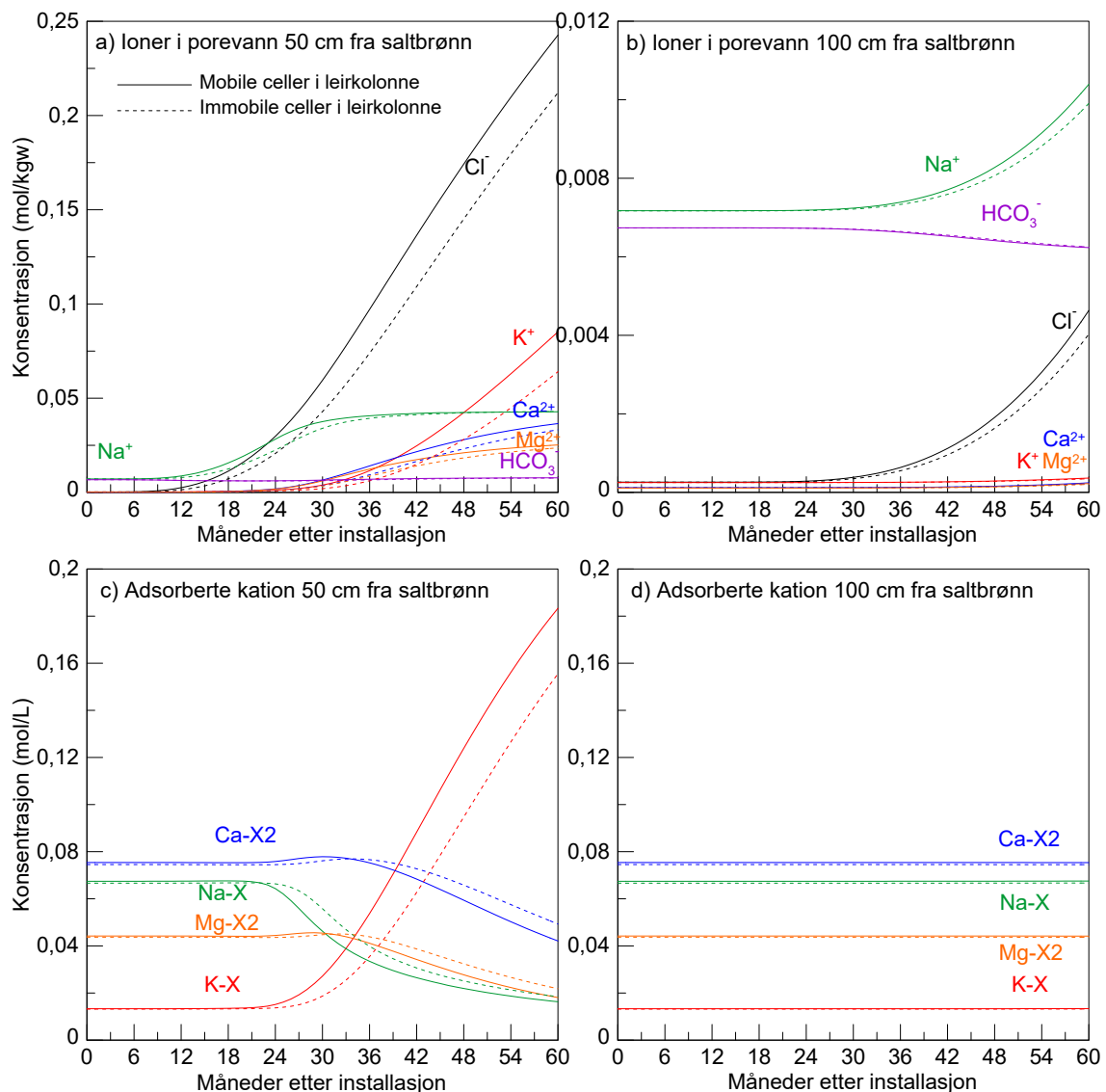
3.1 Sammenligning av modell med mobile kontra immobile celler

Diffusjonen kan modelleres enten ved å modellere leirkolonnen som mobile eller immobile celler. Diffusjonen av KCl går marginalt saktere gjennom leirkolonnen med immobile celler enn ved å modellere leirkolonnen som mobile celler (Figur 7).

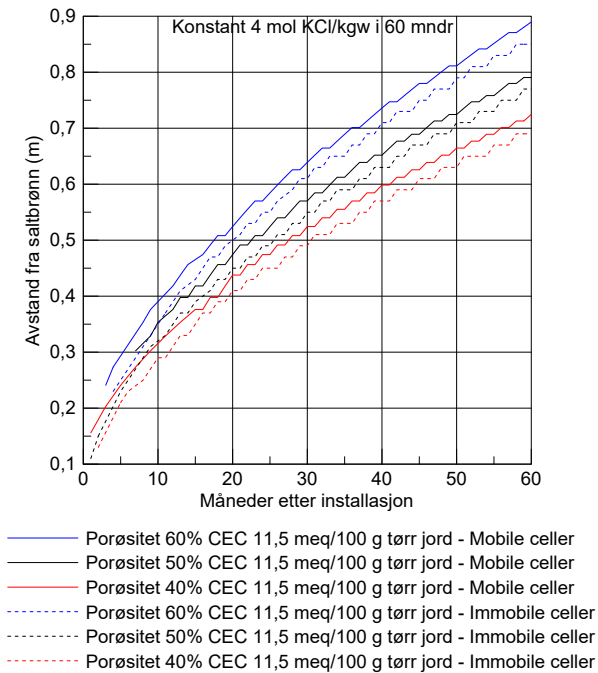
Nødvendig senteravstand bestemmes basert på tiden det tar å oppnå et KMgCa-forhold > 20%. Forskjellen i senteravstand med mobile og immobile celler er på ca. 2-3 cm (Figur 8).

Avvikene mellom resultatene er såpass små at de ikke har noen praktisk betydning.

Korrelasjonskurvene er derfor beregnet med modellen der det benyttes mobile celler i leirkolonnen.



Figur 7 Forskjell mellom konsentrasjonsfrontene ved å modellere leirkolonnen som mobile celler (heltrukne linjer) og immobile celler (stiplede linjer). Konsentrasjon av natrium (Na⁺), kalium (K⁺), magnesium (Mg²⁺), kalsium (Ca²⁺), klorid (Cl⁻) og bikarbonat (HCO₃⁻) a) 0,5 m og b) 1,0 m fra saltbrønnen. Adsorberte kationer c) 0,5 m og d) 1,0 m fra saltbrønn. Leiren har porøsitet 50%, CEC 11,5 meq/100 g tørr jord og KMgCa-forhold 9,0%.

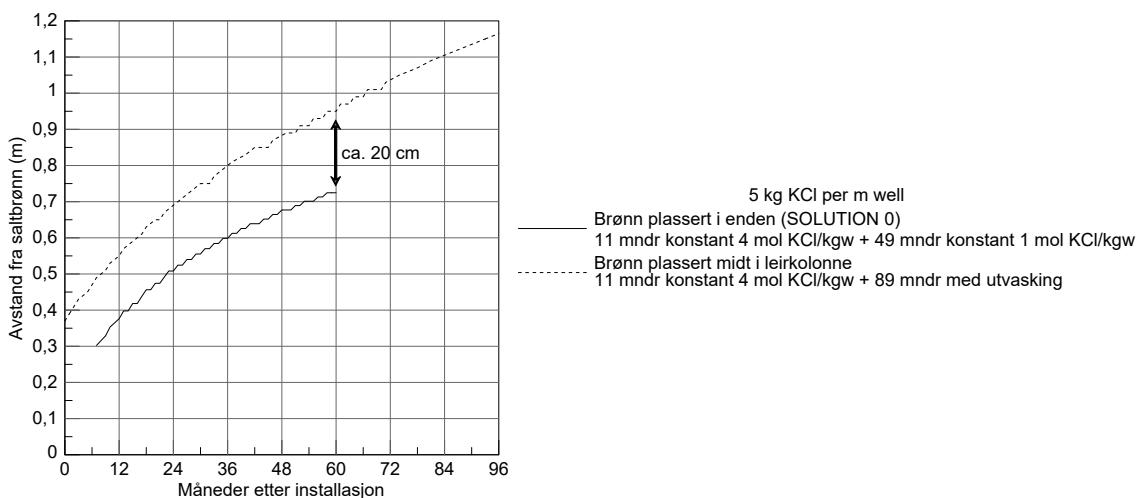


Figur 8 Tiden det tar å stabilisere kvikkleire med porøsitet 40, 50 og 60% i avstand fra saltbrønn. Heltrukne linjer er simuleringsresultat fra modell med mobile celler og stiplet linje for modell med immobile celler.

3.2 Innvirkning av plassering av saltbrønn i leirkolonne

Korrelasjonskurvene er modellert konservativt med antakelse om at det etter et visst antall måneder med konstant konsentrasjon 4 mol KCl/kgw erstattes konsentrasjonen i saltbrønnen med en konstant konsentrasjon på 1 mol/kgw.

Figur 17 viser resultater fra beregninger der saltbrønnen er plassert i enden (i kontakt med celle nr. 1) av en leirkolonne med mobile celler med ulik lengde (heltrukket linje), og i midten av en leirkolonne med mobile celler med like lengder (0,02 m) etter 11 måneder med konstant konsentrasjon 4 mol KCl/kgw (5 kg KCl/m brønn).



Figur 9 Sammenligning av stabilisert leirvolum beregnet ved å plassere saltbrønnen i starten av leirkolonne med mobile celler (heltrukket linje) og ved å plassere saltbrønnen i midten av leirkolonne med mobile celler (stiplet linje).

Ved å plassere brønnen midt i leirkolonnen stabiliseres leiren over en større avstand enn ved å modellere radiell diffusjon. Simuleringen er utført over en kolonne med like lange celler. Diffusjonen går derfor noe raskere enn ved å simulere radiell diffusjon. Dette illustrerer imidlertid at korrelasjonskurvene er på den konservative siden. Det bør utføres detaljerte simuleringer for å finne maksimal senteravstand for det aktuelle området som skal sikres.

3.3 Innvirkning av original porevannskjemi på tidsforløpet

Det er kjørt simuleringer for å undersøke hvor stor effekt opprinnelig KMgCa-forhold i porevannet har på tidsforløpet. Simuleringer ble kjørt med konstant konsentrasjon i saltbrønnen i 60 måneder for leirer med:

- CEC = 11,5 meq/100 g tørr jord
- Porøsitet 40, 50 og 60%
- Porevann med KMgCa-forhold 5,0%, 9,0%, 15,2% og 19,6% (Tabell 6)

Tabell 6 Ionekomposisjon i porevann med KMgCa-forhold på 5,0%, 9,0%, 15,2% og 19,6%

Konsentrasjon	Dragvoll ^a KMgCa 5,0%	Dragvoll ^b KMgCa 9,0%	Dragvoll ^c KMgCa 15,2%	Ulvensplitten ^d KMgCa 19,6%
Na ⁺ (mmol/L)	9,62	7,17	7,78	6,74
K ⁺ (mmol/L)	0,27	0,25	0,33	0,28
Mg ²⁺ (mmol/L)	0,07	0,11	0,30	0,42
Ca ²⁺ (mmol/L)	0,05	0,12	0,23	0,26
Cl ⁻ (mmol/L)	0,57	0,26	0,27	0,40
F ⁻ (mmol/L)	0,30	0,29	0,26	0,13
SO ₄ ²⁻ (mmol/L)	0,00	0,03	0,06	0,18
Br ⁻ (mmol/L)	0,00	0,02	0,00	0,05
NO ₃ ⁻ (mmol/L)	0,00	0,00	0,00	0,05
PO ₄ ³⁻ (mmol/L)	0,00	0,02	0,00	0,09
Alkalinitet som HCO ₃ ⁻ (meq/L)	9,32	6,88	8,10	6,55
pH (-)	8,68	8,80	8,72	8,70
Temperatur (°C)	6	6	6	6

^a Porevannskjemi i kvikkleire fra Dragvoll borhull P2C fra 5,25 m dybde [14]

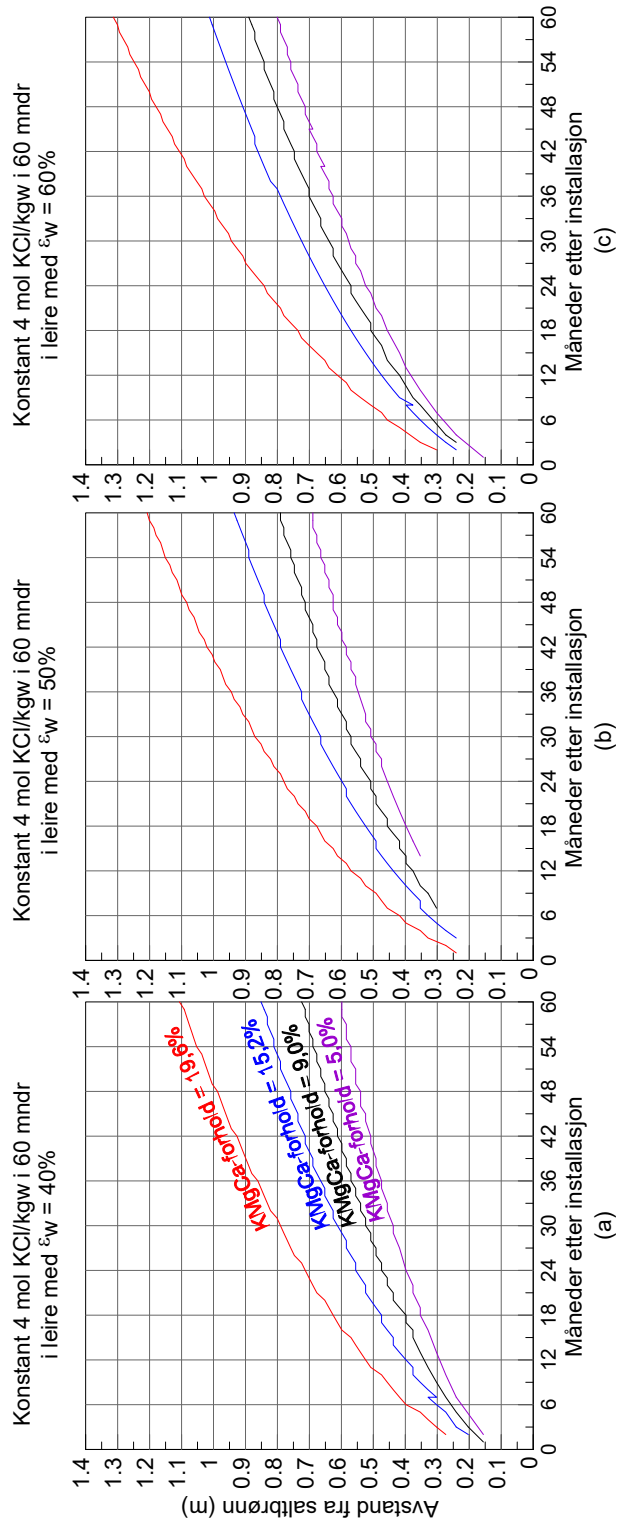
^b Samme som i Tabell 1. Benyttet for å lage korrelasjonskurvene i avsnitt 3.4.1, 3.4.2 og 3.4.3

^c Porevannskjemi i kvikkleire fra Dragvoll fra borhull MD1 fra 4,15 m dybde [5]

^d Ulvensplitten, Oslo borhull BP2 fra 6,2 m dybde [16]

Desto høyere KMgCa-forholdet er opprinnelig i porevannet i kvikkleira, desto kortere tid tar det å stabilisere leira (Figur 10). Dvs. at nødvendig senteravstand mellom saltbrønnene kan økes med økende KMgCa-forhold. Dersom all leire mellom brønnene skal være stabilisert i løpet av 3 år, så vil det for leire med opprinnelig KMgCa-forhold på ca. 5% og porøsitet 50% være nødvendig med en

senteravstand på 1,1 m. I leire med opprinnelig KMgCa-forhold på ca. 15% og porøsitet på 50%, er nødvendig senteravstand 1,4 m. I tillegg øker diffusjonshastigheten med økende porøsitet. Senteravstanden kan derfor være større i kvikkleire med porøsitet på 60% enn i kvikkleire med porøsitet på 40%.



Figur 10 Tiden det tar å stabilisere kvikkleire med ulike KMgCa-forhold og porøsitet i avstand fra saltbrønn med konstant konsentrasjon 4 mol KCl/kgw. CEC lik 11,5 meq/100g tørr jord. Porøsitet a) 40%, b) 50% og c) 60%.

3.4 Korrelasjonskurver

Korrelasjonskurvene er konservative, og laget ved å sortere resultatene med et KMgCa-forhold på 20-25%, og plote avstand mot tid. Korrelasjonskurvene i Figur 11-Figur 13 er laget for leirer med:

- Porøsitet 40% (Figur 11), 50% (Figur 12) og 60% (Figur 13)
- KMgCa-forhold 9,0%
- CEC lik 6,0, 11,5 og 17 meq/100 g tørr jord

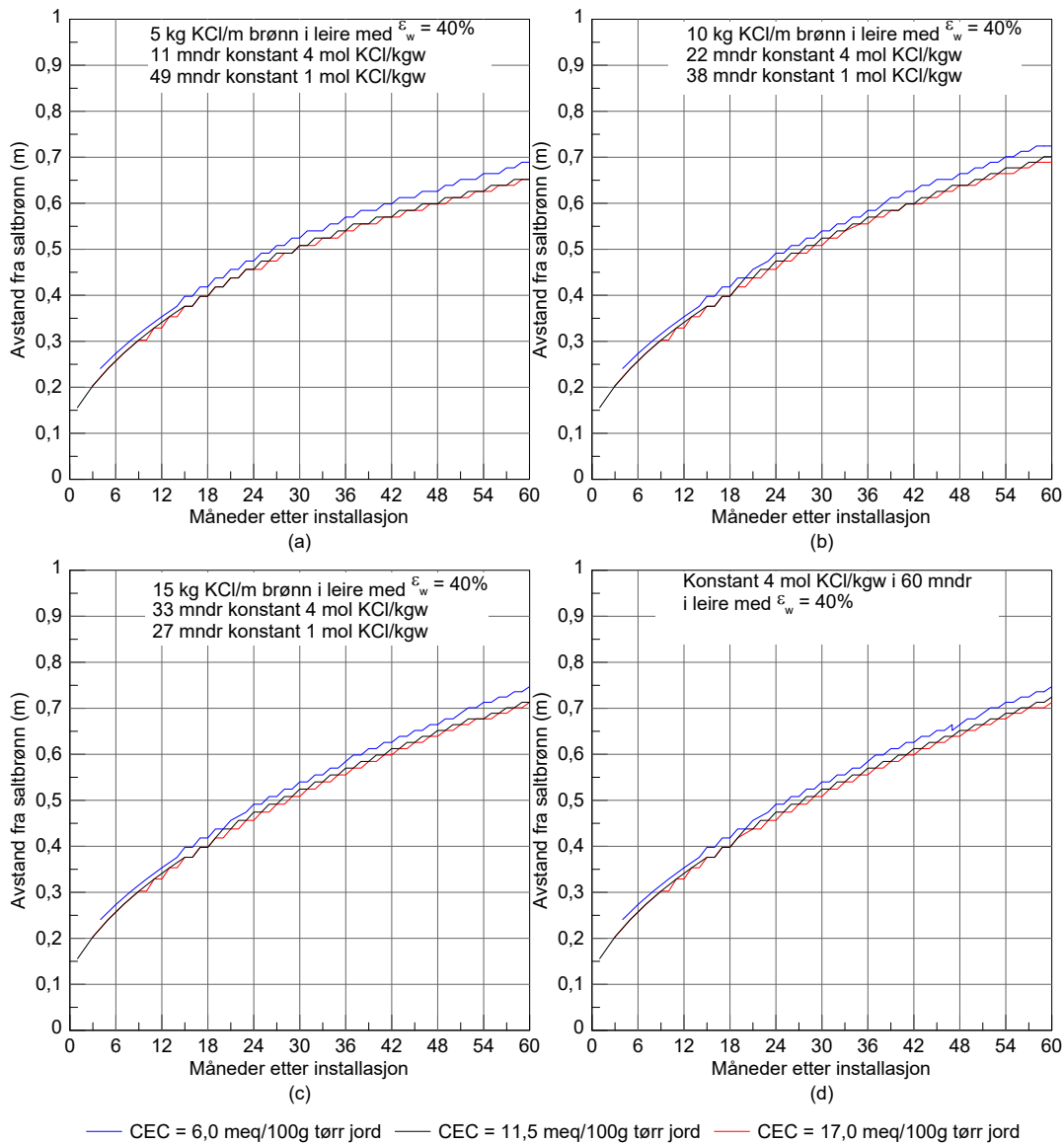
Og saltbrønner med 5, 10 og 15 kg KCl/m brønn og med konstant mettet løsning.

Diffusjonen går raskest i leirer med lavest CEC (6 meq/100 g tørr jord, blå linjer). Dette er fordi leirvann systemet da blir raskere mettet med kalium enn i leirer med høyere CEC der det vil ta lenger tid å skifte ut de adsorberte ionene med kalium. Det er liten forskjell mellom CEC lik 11,5 og 17,0 meq/100 g tørr jord, spesielt for leirer med porøsitet på 40%. Forskjellen i spredningen øker imidlertid noe med økende porøsitet.

Mengden salt ser også ut til å ha liten innvirkning på hvor fort leira stabiliseres. Ved å tilsette 10 kg KCl/m brønn eller mer, så vil stabilisert leirvolum etter en viss tid være nokså likt. Ved å tilsette 5 kg KCl/m brønn vil radiusen med stabilisert leire være noen få cm mindre.

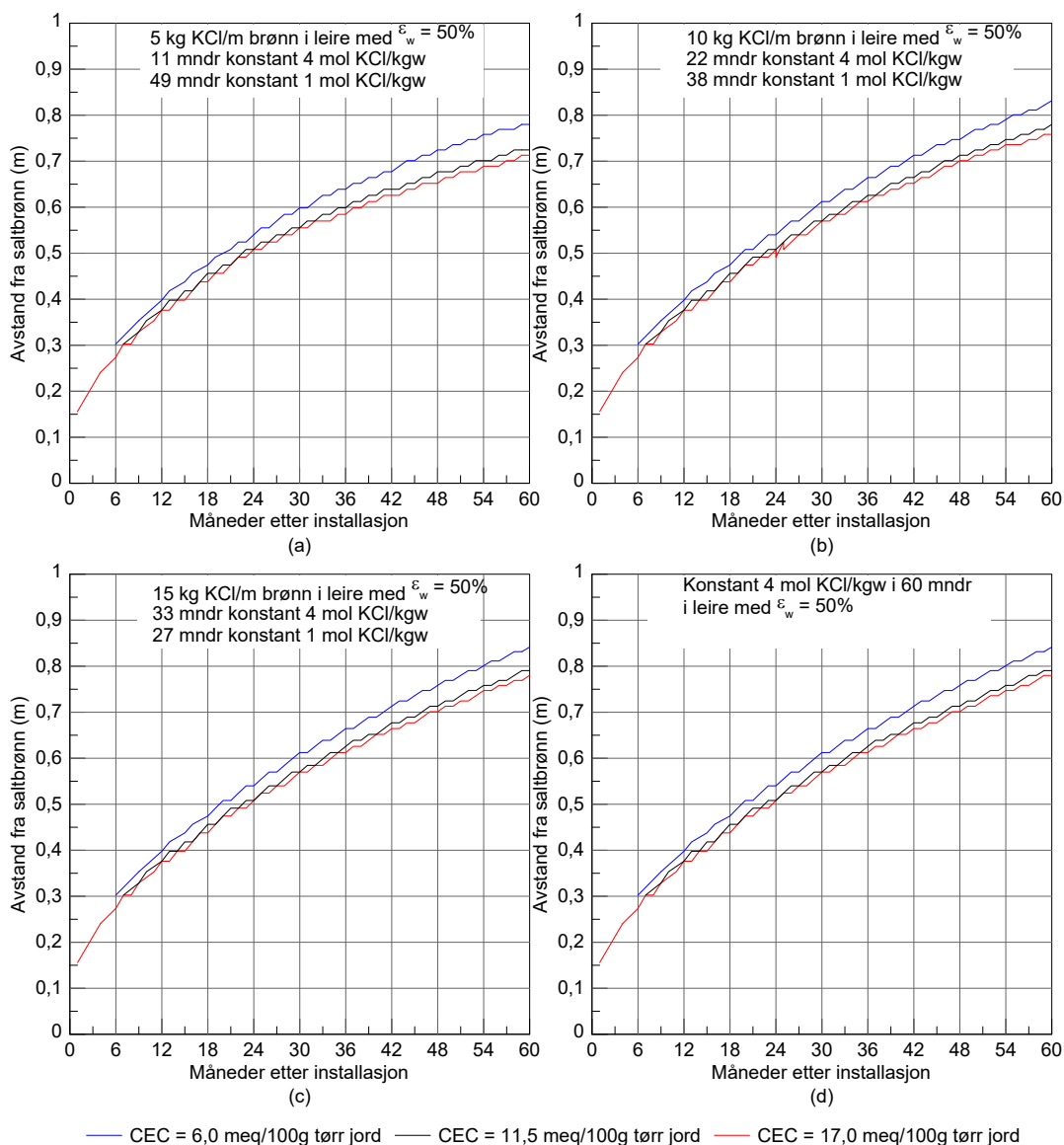
Det understrekes at beregningene er utført ved å estimere hvor lenge saltbrønnen har mettet konsentrasjon på 4 mol KCl/kgw basert på observasjoner på Dragvoll. Saltforbruket kan bli større enn på Dragvoll dersom det finnes vannførende, permeable lag i kvikkleireavsetningen. Det anbefales derfor å tilsette minimum 10 kg KCl/m brønn for å opprettholde mettet løsning i brønnen lengst mulig.

3.4.1 Porøsitet 40%



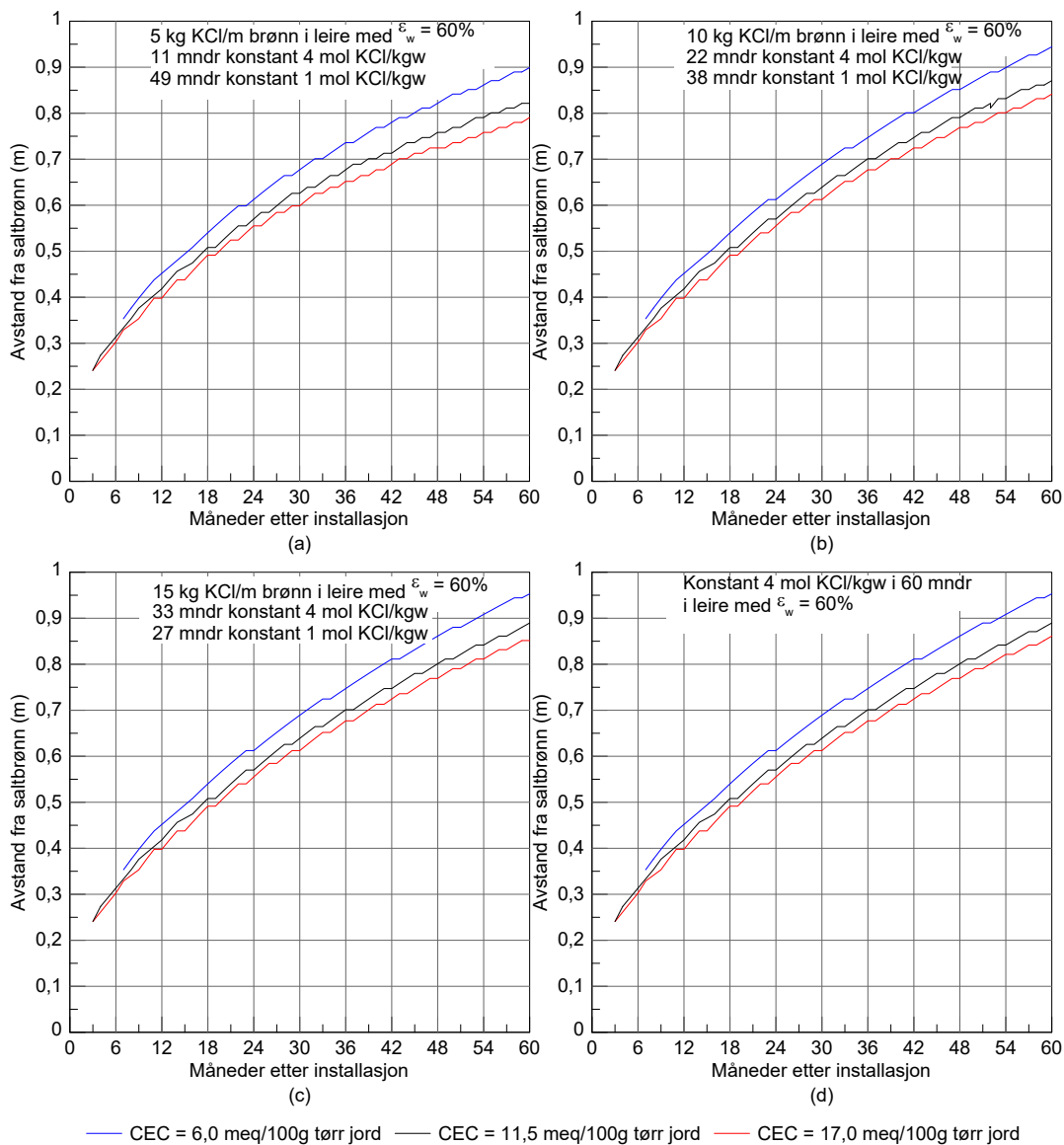
Figur 11 Tid det tar å stabilisere kvikkleire med porøsitet 40% ved å installere a) 5 kg KCl/m brønn, b) 10 kg KCl/m brønn, c) 15 kg KCl/m brønn, og d) ved å holde konsentrasjonen i brønnen konstant lik 4 mol KCl/kgw

3.4.2 Porøsitet 50 %



Figur 12 Tid det tar å stabilisere kvikkleire med porøsitet 50% ved å installere a) 5 kg KCl/m brønn, b) 10 kg KCl/m brønn, c) 15 kg KCl/m brønn, og d) ved å holde konsentrasjonen i brønnen konstant lik 4 mol KCl/kgw

3.4.3 Porøsitet 60 %



Figur 13 Tid det tar å stabilisere kvikkleire med porøsitet 60% ved å installere a) 5 kg KCl/m brønn, b) 10 kg KCl/m brønn, c) 15 kg KCl/m brønn, og d) ved å holde konsentrasjonen i brønnen konstant lik 4 mol KCl/kgw

4 Levetid på saltstabilisering

4.1 Utvasking av saltstabilisert område

Utvasking av det saltstabiliserte området ble utført på ulike måter:

- Radiell modell med immobile celler der saltbrønnen ble plassert i enden av kolonnen
- Modell med like lange mobile celler der saltbrønnen ble plassert midt i kolonnen
- Modell med like lange mobile celler der fire saltbrønner ble plassert med senteravstand på 2 m

Leiren i kolonnen har porøsitet på 50% og kationebyttekapasitet på 11,5 meq/100 g tørr jord. Porevannet hadde et KMgCa-forhold 9,0%. Utvaskingen ble utført ved å tilbakeføre opprinnelig porevann med KMgCa-forhold 9,0% inn i kolonnen.

4.1.1 Radiell modell med immobile celler

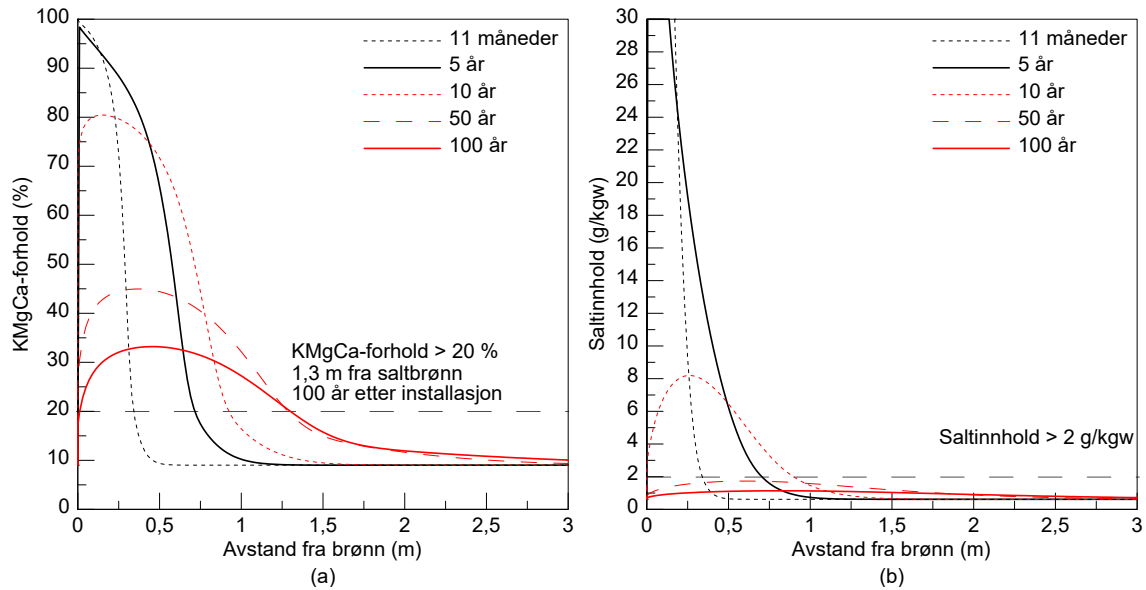
Utvasking ble simulert i radiell modell med immobile celler i en 10 m lang leirkolonne med cellelengde 0,02 m. MIX og TRANSPORT (se Vedlegg B) ble kjørt i tre etterfølgende simuleringer der SOLUTION 0-2 og 3 og antall shifts ble endret for hver simulering (Tabell 7).

Det er her kun simulert en brønn i leirkolonnen. Det er også simulert at utvaskingen skjer fra saltbrønnen. Noe som ikke vil være tilfelle i praksis. Resultatene fra simuleringene gir kun en indikasjon på hva som kan skje under utvaskingen av den saltstabiliserte leira, og resultatene er konservative.

Selv om saltinnholdet i leirkolonnen er under 2 g/L (ekvivalent med 2 g/kgw) 50 og 100 år etter installasjon, så er KMgCa-forholdet fortsatt over 20% over en avstand på 1,3 m fra saltbrønnen. Dvs. at en diameter på 2,6 m rundt saltbrønnen fortsatt er stabilisert med en omrørt skjærfasthet over 1 kPa 100 år etter installasjon. Med tanke på at saltbrønnene installeres med en senteravstand på 2-3 m over et stort område, så vil utvaskingen av et saltstabilisert område ta mye lenger tid enn disse simuleringene viser.

Tabell 7 Input i de tre ulike simuleringene av MIX og TRANSPORT

MIX og TRANSPORT simulering nr.	SOLUTION 0-2 og 3	Varighet	Påløpt tid etter installasjon
1	4 mol/kgw KCl	11 måneder (5 kg KCl/m brønn)	11 måneder
2	1 mol/kgw KCl	49 måneder	5 år
3	Opprinnelig porevann	95 år	100 år

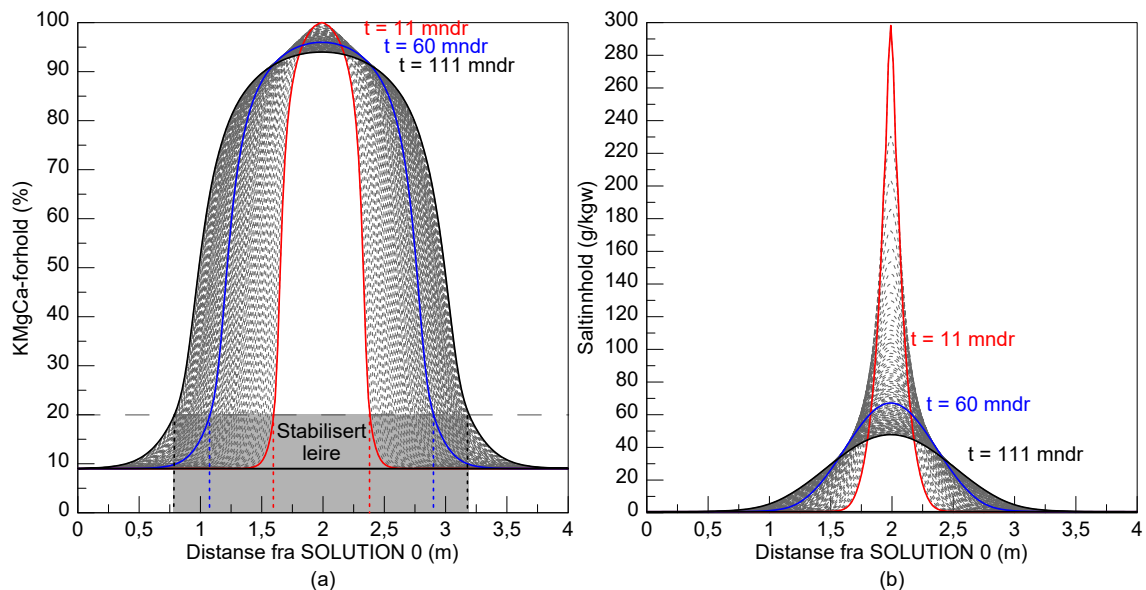


Figur 14 a) KMgCa-forhold og b) saltinnhold i leirkolonne 11 måneder, 5 år, 10 år, 50 år og 100 år etter installasjon av saltbrønn.

4.1.2 Mobile celler med lik lengde

Utvasking ble simulert over en leirkolonne med like lange celler (0,02 m). SOLUTION 0 ble erstattet med opprinnelig porevann. Simuleringen ble kjørt for en saltbrønn med 5 kg KCl/kgw. Konsentrasjonen i cellene rundt saltbrønnen ble hentet ut fra resultatene av simuleringen av radielle immobile celler etter 11 måneder med konstant konsentrasjon 4 mol KCl/kgw i saltbrønnen. Deretter ble det kjørt en simulering av 100 måneder utvasking (Figur 15).

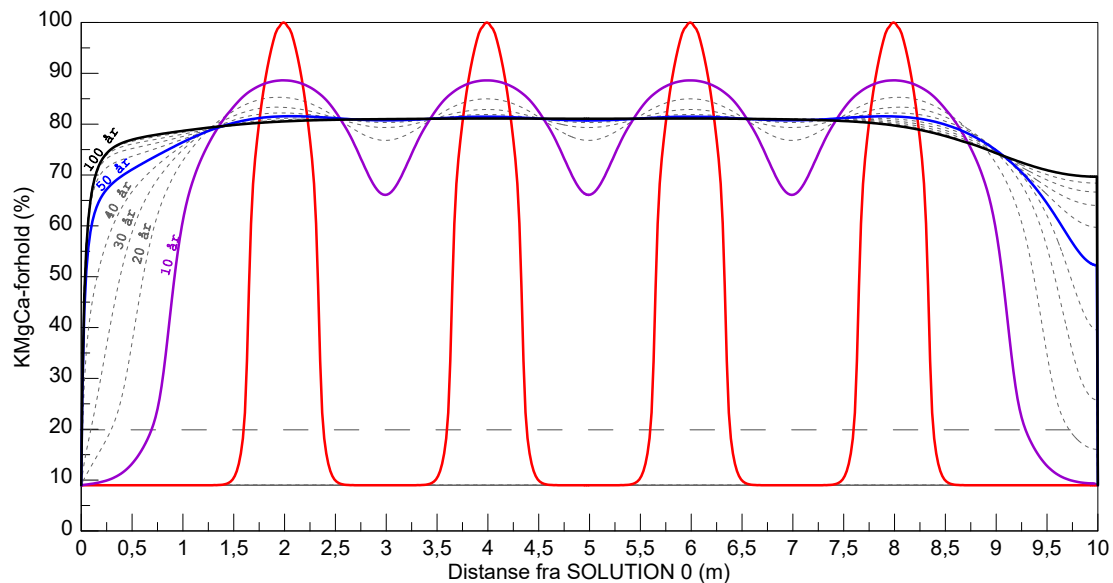
Saltinnholdet i brønnen minker. Leirvolumet stabiliseres i større og større avstand fra saltbrønnen selv om konsentrasjonen avtar i brønnen. 60 måneder (5 år) etter installasjon er leire over en diameter på ca. 1,8 m stabilisert, og 111 måneder (9,25 år) etter installasjon er leire over en diameter på ca. 2,8 m stabilisert.



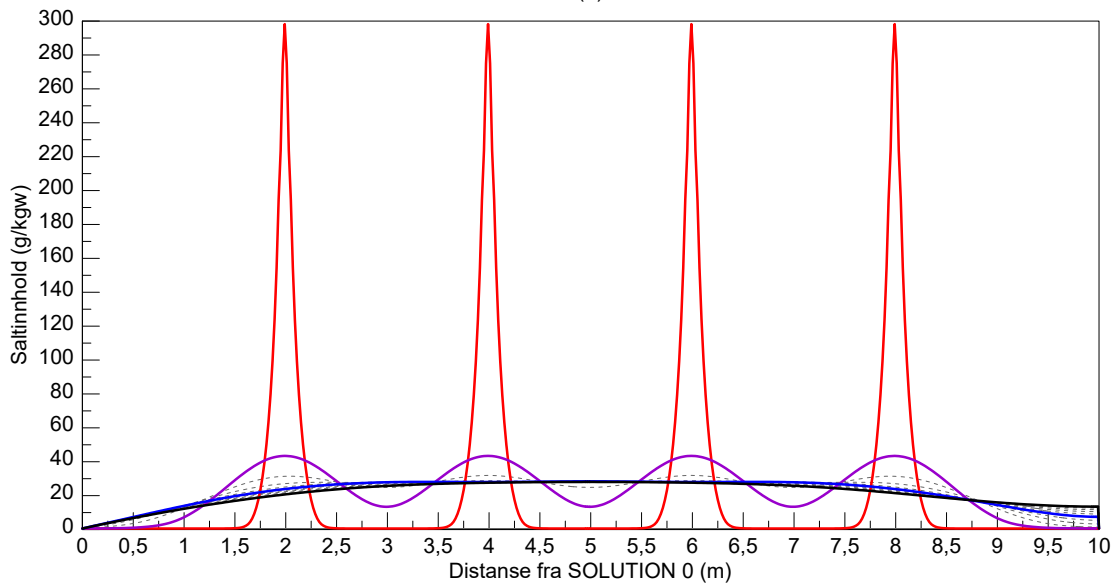
Figur 15 a) KMgCa-forhold og b) Saltinnhold etter at 5 kg KCl/m brønn har løst seg opp. Rød linje viser resultater ved start av utvasking (11 mndr etter installasjon), blå linje 5 år etter installasjon og svart linje etter 100 måneder utvasking (9,25 år etter installasjon).

Denne modellen ble utvidet til en 10 m lang kolonne med saltbrønner installert ved 2, 4, 6 og 8 m, og det ble simulert 100 års utvasking av det saltstabiliserte området.

Etter 40-50 år er porevannskjemien mellom brønnene utjevnet. Dvs. at både KMgCa-forholdet og saltinnholdet er likt i hele leirvolumet (Figur 16). Etter 10 år med utvasking er KMgCa-forholdet i hele leirvolumet mellom saltbrønnene over 75%; langt over kriteriet for stabilisert leire på 20%. Etter 100 års utvasking er saltinnholdet på ca. 30 g/kgw mellom saltbrønnene. Diffusjonen fører til at saltet sprer seg ut fra det saltstabiliserte området, og med tiden stabiliseres et stadig større område.



(a)



(b)

— tid 0 (11 mndr etter installasjon) — 50 år (+11 mndr) — 100 år (+11 mndr)
 — 10 år (+11 mndr etter installasjon av 5 kg KCl/m)

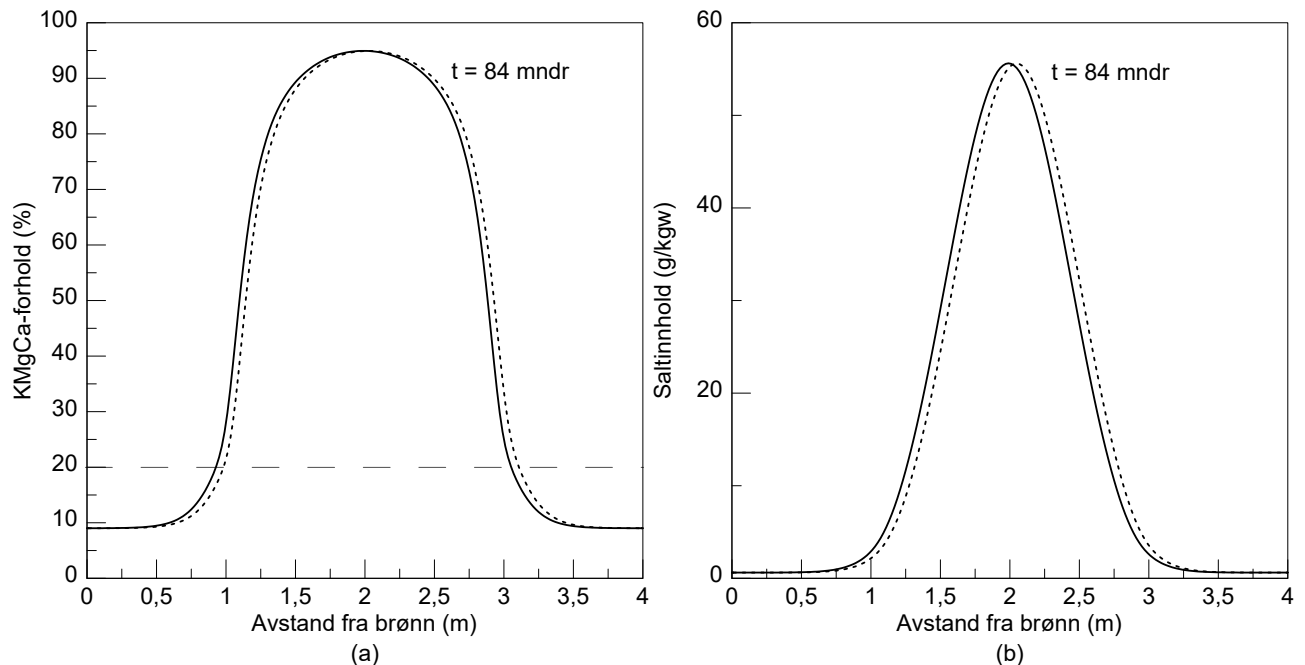
Figur 16 Utvasking av saltstabilisert leire over 100 år. Endring av a) KMgCa-forhold og b) saltinnhold. Saltbrønnene har senteravstand 2 m, og er plassert 2, 4, 6, og 8 m fra SOLUTION 0. SOLUTION 0 er opprinnelig porevann med KMgCa-forhold på 9,0%..

4.2 Strømning i tillegg til diffusjon

Det ble undersøkt hvordan saltet sprer seg fra brønnen ved å legge til en liten gradient i leirkolonnen. Leira ble antatt å ha en permeabilitet på 0,01 m/år, og en gradient på 0,5. Med porøsitet lik 50% ble

tidstrinnene tilpasset slik at porevannet hadde en hastighet på $3,17 \cdot 10^{-10}$ m/s gjennom cellene. «Flow direction» i TRANSPORT ble endret til «forward», og grensebetingelsene til «flux» for å inkludere både strømming (adveksjon) og diffusjon.

Forskyvningen av saltspredningen som følge av strømmingen er svært liten (Figur 17). Effekten av adveksjon på saltspredning i leire regnes derfor som neglisjerbar.



Figur 17 Sammenligning av kolonne med (stiplet linje) adveksjon i tillegg til diffusjon, og kun diffusjon (heltrukket). a) KMgCa-forhold og b) saltinnhold.

4.3 Strandsonen

For å vurdere om saltstabilisering kan benyttes i strandsonen bør det utføres simuleringer der diffusjon av saltvann og hydrauliske gradienter inkluderes.

4.4 Miljø

Modellen med 100 års utvasking av leirkolonnen med fire saltbrønner (Figur 16) ble benyttet for å vurdere utlekking av salt fra det saltstabiliserte området. Salt kan skade vegetasjonen, og klorider kan forringe vannkvaliteten i drikkevannskilder. Det anbefales at kloridmengden ikke overstiger 200 mg/L i drikkevann.

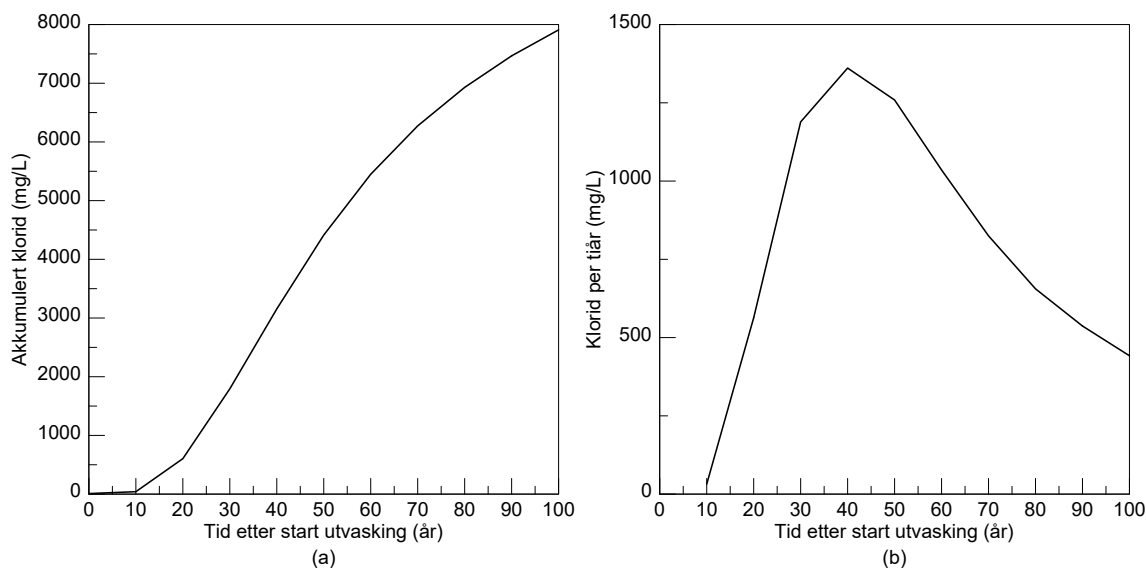
Saltet vil med tiden spre seg utover det saltstabiliserte området. Utlekking fra det saltstabiliserte området bør simuleres for å finne nødvendig avstand fra drikkevannskilder.

Dersom saltet lekker ut i elver og bekker, så vil saltet transporteres bort fra området. Det anbefales ikke å installere saltbrønner i områder der saltet kan akkumulere i innsjøer eller grunnvannsreservoar.

Figur 18 a) viser akkumulert kloridmengde i utløpet av leirkolonnen fra Figur 16; altså 2 m fra siste saltbrønn. I Figur 18 b) vises hvor mye klorid som lekker ut i enden av leirkolonnen per tiår. Mengdene er veldig små.

Det understrekes at saltbrønner vil bli installert lenger unna bekker og elver enn 2 m. Likevel vil kloridmengder i denne størrelsesordenen kunne lekke ut til overflaten av skråningen. Overflatevann vil vaske saltet vekk.

Risikoen for at større mengder salt lekker ut av det saltstabiliserte området øker dersom det er permeable vannførende lag i leiravsetningen.



Figur 18 a) Akkumulert klorid og b) utlekket klorid per tiår 2 m fra saltbrønn.

5 Konklusjoner

Porøsitet, CEC og opprinnelig porevannskomposisjon er avgjørende for hvor fort leira rundt saltbrønnene stabiliseres. Hastigheten øker med:

- Økende porøsitet
- Minkende CEC
- Høyere KMgCa-forhold i opprinnelig porevann

Nødvendig senteravstand mellom saltbrønnene er større i leirer med høy porøsitet, høyt KMgCa-forhold (opp mot 20%) og lav CEC, enn i kvikkleirer med lav porøsitet, lavt KMgCa-forhold og høy CEC.

Selv om mengde tilsatt salt i brønnen tilsynelatende har liten innvirkning på resultatene, så kan lokale forhold medføre at saltet vaskes raskere ut av brønnene enn det som er estimert i disse beregningene. For å opprettholde høy konsentrasjon i brønnen så lenge som mulig, anbefales det å installere minimum 10 kg KCl/m brønn.

Utvasking av saltstabilisert området tar lang tid. Simulering av utvasking av en 10 m lang kolonne med fire saltbrønner viste at leiren har KMgCa-forhold langt over 20% etter 100 års utvasking.

Saltbrønner må ikke installeres i nærheten av drikkevannskilder.

Ved å installere saltbrønner fylt med KCl med en senteravstand på 2 m, så vil store deler av leirvolumet stabiliseres i løpet av 5 år. Tiden det tar å stabilisere leirvolumet kan reduseres ved å redusere senteravstanden mellom brønnene. Senteravstanden kan økes dersom det tillates at leirvolumet stabiliseres med en viss dekningsgrad etter en gitt tid. Siden diffusjonen av KCl vil fortsette så lenge det er konsentrasjonsforskjeller i leirvolumet mellom brønnene, så vil hele leirvolumet med tiden stabiliseres. Stabiliseringen er varig.

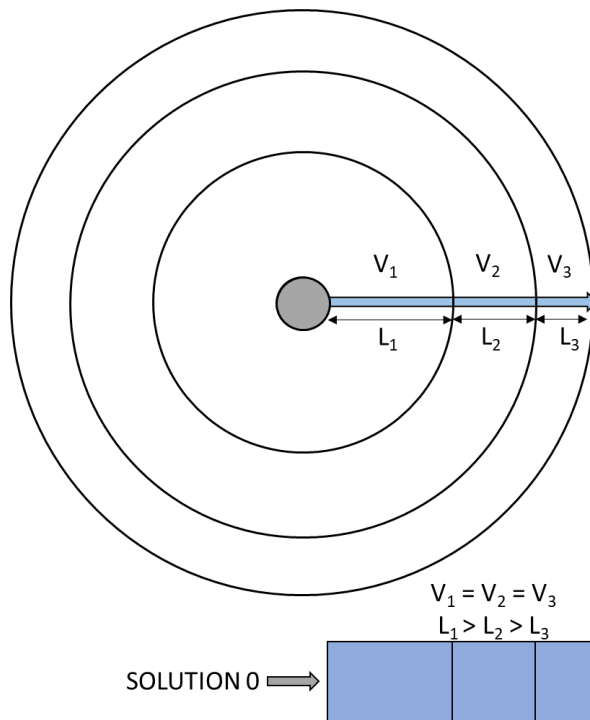
6 Referanser

- [1] Helle TE, Aagard P, «Predicting required time for stabilising Norwegian quick clays by potassium chloride», *Environ. Geotech.*, bd. 6, nr. 7, s. 489–502, okt. 2019, doi: <https://doi.org/10.1680/jenge.17.00032>.
- [2] USGS, «PHREEQC Version 3». aug. 10, 2020, [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3>.
- [3] Leroueil S, Tavenas F, Le Bihan JP, «Proprietes caracteristiques des argiles de l'est du Canada», *Can. Geotech. J.*, bd. 20, nr. 4, s. 681–705, 1983.
- [4] Thakur V, Degago SA, Oset F, Aabøe R, Dolva BK, Aunaas K, Nyheim T, Lyche E, Jensen og OA, Sæter MB, Robsrud A, Viklund M, Nigussie D, L'Heureux JS, «Characterisation of post-failure movements of landslides in soft sensitive clays», i *Landslides in sensitive clays: From geoscience to risk management*, the Netherlands: Springer Dordrecht, 2014, s. 91–104.
- [5] Helle TE, Aagaard P, Nordal S, Long M, Bazin S, «A geochemical, mineralogical and geotechnical characterization of the low plastic, highly sensitive glaciomarine clay at Dragvoll, Norway», *AIMS Geosci.*, bd. 5, nr. 4, s. 704–722, doi: 10.3934/geosci.2019.4.704.
- [6] Rueslåtten H, Brattli B, *Jordarters sammensetning og egenskaper*. Trondheim, Norge: Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet.
- [7] Locat J, St-Gelais D, «Nature of sensitive clays from Quebec», i *Landslides in sensitive clays: From geoscience to risk management*, Springer Dordrecht, 2014, s. 25–37.
- [8] Helle TE, Aagaard P, Nordal S, «In-situ improvement of highly sensitive clays by potassium chloride migration», *J. Geotech. Geoenvironmental Eng. ASCE*, bd. 143, nr. 10, s. 04017074, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001774](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001774).
- [9] Atkins ER, Smith GH, «The significance of particle shape in formation resistivity factor - porosity relationships», *J. Pet. Technol.*, bd. 13, nr. 3, s. 285–291, 1961, doi: <http://dx.doi.org/10.2118/1560-G-PA>.
- [10] Atlan Y, Bardon C, Minssieux L, Quint M, Delvaux P, «Conductivite en milieu poreux argileux. Interpretation des diagraphies», i *Troisieme colloque de Fassociation de recherche sur les techniques de forage et de production*, 1968, s. 12–15.
- [11] Taylor Smith D, «Acoustic and electric techniques for sea-floor sediment identification».
- [12] Jackson PD, Taylor-Smith D, Stanford PN, «Resistivity-porosity-shape relationships for marine sands», *Geophysics*, bd. 43, nr. 6, s. 1250–1268, 1978, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-004-0387-4>.
- [13] Campanella RG and Weemeees I, «Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contaminant studies», *Can. Geotech. J.*, bd. 27, nr. 5, s. 557–567, 1990.
- [14] Kelly R, Pineda JA, Suwal L, «A comparison of in-situ and laboratory resistivity measurements in soft clay», i *Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'5)*, bd. 2, Australian Geomechanics Society, 2016, s. 883–886.
- [15] Boudreau BP, «The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments», *Geochim. Cosmochim. Acta*, bd. 60, nr. 16, s. 3139–3142, 1996.
- [16] Helle TE, «Stabilisering av kvikkleirer med kaliumklorid - Langtidseffekt Ulvensplitten og Dragvoll». Statens vegvesen, 2019.
- [17] Appelo CAJ, Postma D, *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2. utg. Leiden, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2005.

Vedlegg A: Mobile celler

Vedlegg A.1: Modellering med mobile celler

Cellene i kolonnen har likt volum. For å beregne radiell diffusjon modelleres diffusjonen langs en kolonne der cellelengden minker med avstand fra brønnen (se Figur A. 1). Nøyaktigheten av simuleringene er mindre når cellene har ulik cellelengde enn om cellene har lik lengde. Nøyaktigheten forbedres ved å ha mange celler i kolonnen.



Figur A. 1 PHREEQC regner transport langs en kolonne (blå pil) med celler med likt volum. Ved radiell diffusjon reduseres lengden på cellene i avstand fra brønnen. SOLUTION 0 er konsentrasjonen av KCl i brønnen.

Beregningene er utført med radiell diffusjon ut fra brønnen over en 2 m lang kolonne fordelt over 240 celler. Siden volumet er likt i alle cellene, modelleres radiell diffusjon ved å redusere lengden av cellene i kolonnen ved å benytte Ligning 2 og 3 [17].

$$L_1 = L_{tot} / \sqrt{\#_{tot}} \quad \text{Ligning A.1}$$

$$L_{\#} = L_1 \cdot (\sqrt{\#} - \sqrt{\# - 1}) \quad \text{Ligning A.2}$$

Der L_1 er lengden på første cella i kolonnen, L_{tot} er total lengde på kolonnen, $L_{\#}$ er lengde på celle nr. $\#$, og $\#_{tot}$ er totalt antall celler i kolonnen.

Randbetingelsene settes til «constant» i kontakt med saltbrønnen (SOLUTION 0) og «flux» i enden av kolonnen (utgangen av celle nr. 240). Dermed holdes konsentrasjonen i brønnen konstant, og det tillates diffusjon ut gjennom enden av kolonnen. Det understrekes at PHREEQC hensyntar at konsentrasjonen på utsiden av kolonnen endres over tid; altså er ulik 0 slik at modellen simulerer riktig diffusjon også i enden av kolonnen.

Vedlegg A.1: Cellelengder i kolonne med mobile celler

Lengde på kolonne: 2 m

Antall celler: 240

Cellenr.	Lengde	Cellenr.	Lengde	Cellenr.	Lengde
1	0,12910	53	0,00891	105	0,00631
2	0,05347	54	0,00883	106	0,00628
3	0,04103	55	0,00874	107	0,00625
4	0,03459	56	0,00866	108	0,00623
5	0,03048	57	0,00859	109	0,00620
6	0,02755	58	0,00851	110	0,00617
7	0,02534	59	0,00844	111	0,00614
8	0,02358	60	0,00837	112	0,00611
9	0,02215	61	0,00830	113	0,00609
10	0,02095	62	0,00823	114	0,00606
11	0,01993	63	0,00817	115	0,00603
12	0,01904	64	0,00810	116	0,00601
13	0,01826	65	0,00804	117	0,00598
14	0,01757	66	0,00798	118	0,00595
15	0,01695	67	0,00792	119	0,00593
16	0,01640	68	0,00786	120	0,00590
17	0,01589	69	0,00780	121	0,00588
18	0,01543	70	0,00774	122	0,00586
19	0,01501	71	0,00769	123	0,00583
20	0,01462	72	0,00763	124	0,00581
21	0,01426	73	0,00758	125	0,00579
22	0,01392	74	0,00753	126	0,00576
23	0,01361	75	0,00748	127	0,00574
24	0,01332	76	0,00743	128	0,00572
25	0,01304	77	0,00738	129	0,00569
26	0,01278	78	0,00733	130	0,00567
27	0,01254	79	0,00729	131	0,00565
28	0,01231	80	0,00724	132	0,00563
29	0,01209	81	0,00719	133	0,00561
30	0,01188	82	0,00715	134	0,00559
31	0,01169	83	0,00711	135	0,00557
32	0,01150	84	0,00706	136	0,00555
33	0,01132	85	0,00702	137	0,00552
34	0,01115	86	0,00698	138	0,00550
35	0,01099	87	0,00694	139	0,00548
36	0,01083	88	0,00690	140	0,00547
37	0,01068	89	0,00686	141	0,00545
38	0,01054	90	0,00682	142	0,00543
39	0,01040	91	0,00679	143	0,00541
40	0,01027	92	0,00675	144	0,00539
41	0,01014	93	0,00671	145	0,00537
42	0,01002	94	0,00668	146	0,00535
43	0,00990	95	0,00664	147	0,00533
44	0,00979	96	0,00661	148	0,00531
45	0,00968	97	0,00657	149	0,00530
46	0,00957	98	0,00654	150	0,00528
47	0,00947	99	0,00650	151	0,00526
48	0,00937	100	0,00647	152	0,00524
49	0,00927	101	0,00644	153	0,00523
50	0,00917	102	0,00641	154	0,00521
51	0,00908	103	0,00638	155	0,00519
52	0,00899	104	0,00634	156	0,00518

Cellenr.	Lengde	Cellenr.	Lengde	Cellenr.	Lengde
157	0,00516	214	0,00442		
158	0,00514	215	0,00441		
159	0,00513	216	0,00440		
160	0,00511	217	0,00439		
161	0,00510	218	0,00438		
162	0,00508	219	0,00437		
163	0,00506	220	0,00436		
164	0,00505	221	0,00435		
165	0,00503	222	0,00434		
166	0,00502	223	0,00433		
167	0,00500	224	0,00432		
168	0,00499	225	0,00431		
169	0,00497	226	0,00430		
170	0,00496	227	0,00429		
171	0,00494	228	0,00428		
172	0,00493	229	0,00427		
173	0,00491	230	0,00426		
174	0,00490	231	0,00425		
175	0,00489	232	0,00424		
176	0,00487	233	0,00423		
177	0,00486	234	0,00422		
178	0,00485	235	0,00422		
179	0,00483	236	0,00421		
180	0,00482	237	0,00420		
181	0,00480	238	0,00419		
182	0,00479	239	0,00418		
183	0,00478	240	0,00417		
184	0,00477				
185	0,00475				
186	0,00474				
187	0,00473				
188	0,00471				
189	0,00470				
190	0,00469				
191	0,00468				
192	0,00466				
193	0,00465				
194	0,00464				
195	0,00463				
196	0,00462				
197	0,00460				
198	0,00459				
199	0,00458				
200	0,00457				
201	0,00456				
202	0,00455				
203	0,00454				
204	0,00452				
205	0,00451				
206	0,00450				
207	0,00449				
208	0,00448				
209	0,00447				
210	0,00446				
211	0,00445				
212	0,00444				
213	0,00443				

Vedlegg A.2: Beregninger med mobile celler

Konstant konsentrasjon i alle skift										
Filnavn	Porevann	KMgCa-forhold %	Porøsitet %	CEC meq/100g	w %	dry density g/cm3	X mol	n	shifts	solution 0 mol/kgw
Dragvoll_CEC025_n114_constant	Dragvoll	9,1	40	6	25		0,25	1,14		60
Dragvoll_CEC048_n114_constant	Dragvoll	9,1	40	11,5	25		0,48	1,14		60
Dragvoll_CEC071_n114_constant	Dragvoll	9,1	40	17	25		0,71	1,14		60
Dragvoll_CEC017_n125_constant	Dragvoll	9,1	50	6	35	1,41	0,17	1,25		60
Dragvoll_CEC032_n125_constant	Dragvoll	9,1	50	11,5	35	1,41	0,32	1,25		60
Dragvoll_CEC048_n125_constant	Dragvoll	9,1	50	17	35	1,41	0,48	1,25		60
Dragvoll_CEC011_n138_constant	Dragvoll	9,1	60	6	55		0,11	1,38		60
Dragvoll_CEC021_n138_constant	Dragvoll	9,1	60	11,5	55		0,21	1,38		60
Dragvoll_CEC032_n138_constant	Dragvoll	9,1	60	17	55		0,32	1,38		60

KMgCa-forhold										
Filnavn	Porevann	KMgCa-forhold %	Porøsitet %	CEC meq/100g	w %	dry density g/cm3	X mol	n	Shifts mndr	Solution 0 mol/kgw
Dragvoll_CEC032_n125_constant_KMgCa5	Dragvoll	5,1	50	11,5	35	1,41	0,32	1,25		60
Dragvoll_CEC021_n138_constant_KMgCa5	Dragvoll	5,1	60	11,5	55	1,12	0,21	1,38		60
Dragvoll_CEC048_n114_constant_KMgCa5	Dragvoll	5,1	40	11,5	25	1,67	0,48	1,14		60
Dragvoll_CEC032_n125_constant_KMgCa15	Dragvoll	15,3	50	11,5	35	1,41	0,32	1,25		60
Dragvoll_CEC021_n138_constant_KMgCa15	Dragvoll	15,3	60	11,5	55	1,12	0,21	1,38		60
Dragvoll_CEC048_n114_constant_KMgCa15	Dragvoll	15,3	40	11,5	25	1,67	0,48	1,14		60
Ulvensplittan_CEC032_n125_constant	Ulvensplittan	19,5	50	11,5	35	1,41	0,32	1,25		60
Ulvensplittan_CEC021_n138_constant	Ulvensplittan	19,5	60	11,5	55	1,12	0,21	1,38		60
Ulvensplittan_CEC048_n114_constant	Ulvensplittan	19,5	40	11,5	25	1,67	0,48	1,14		60

Porøsitet 40%													
Filnavn	Porevann	KMgCa-forhold %	Porøsitet %	CEC meq/100g	w %	dry density g/cm3	X mol	n	Shifts med 4 mol/kgw mndr	Solution 0 mol/kgw	Shifts med 1 mol/kgw mndr	Solution 0 mol/kgw	kg KCl per m brønn kg
Dragvoll_CEC025_n114_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	40	6	25	1,67	0,25	1,14	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC048_n114_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	40	11,5	25	1,67	0,48	1,14	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC071_n114_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	40	17	25	1,67	0,71	1,14	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC025_n114_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	40	6	25	1,67	0,25	1,14	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC048_n114_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	40	11,5	25	1,67	0,48	1,14	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC071_n114_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	40	17	25	1,67	0,71	1,14	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC025_n114_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	40	6	25	1,67	0,25	1,14	33	4	27	1	15
Dragvoll_CEC048_n114_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	40	11,5	25	1,67	0,48	1,14	33	4	27	1	15
Dragvoll_CEC071_n114_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	40	17	25	1,67	0,71	1,14	33	4	27	1	15

Porøsitet 50%													
Filnavn	Porevann	KMgCa-forhold %	Porøsitet %	CEC meq/100g	w %	dry density g/cm3	X mol	n	Shifts med 4 mol/kgw mndr	Solution 0 mol/kgw	Shifts med 1 mol/kgw mndr	Solution 0 mol/kgw	kg KCl per m brønn kg
Dragvoll_CEC017_n125_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	50	6	35	1,41	0,17	1,25	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC032_n125_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	50	11,5	35	1,41	0,32	1,25	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC048_n125_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	50	17	35	1,41	0,48	1,25	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC017_n125_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	50	6	35	1,41	0,17	1,25	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC032_n125_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	50	11,5	35	1,41	0,32	1,25	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC048_n125_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	50	17	35	1,41	0,48	1,25	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC017_n125_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	50	6	35	1,41	0,17	1,25	33	4	27	1	15
Dragvoll_CEC032_n125_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	50	11,5	35	1,41	0,32	1,25	33	4	27	1	15
Dragvoll_CEC048_n125_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	50	17	35	1,41	0,48	1,25	33	4	27	1	15

Porøsitet 60%													
Filnavn	Porevann	KMgCa-forhold %	Porøsitet %	CEC meq/100g	w %	dry density g/cm3	X mol	n	Shifts med 4 mol/kgw mndr	Solution 0 mol/kgw	Shifts med 1 mol/kgw mndr	Solution 0 mol/kgw	kg KCl per m brønn kg
Dragvoll_CEC011_n138_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	60	6	55	1,12	0,11	1,38	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC021_n138_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	60	11,5	55	1,12	0,21	1,38	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC032_n138_4+1_11mo	Dragvoll	9,1	60	17	55	1,12	0,32	1,38	11	4	49	1	5
Dragvoll_CEC011_n138_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	60	6	55	1,12	0,11	1,38	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC021_n138_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	60	11,5	55	1,12	0,21	1,38	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC032_n138_4+1_22mo	Dragvoll	9,1	60	17	55	1,12	0,32	1,38	22	4	38	1	10
Dragvoll_CEC011_n138_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	60	6	55	1,12	0,11	1,38	33	4	27	1	15
Dragvoll_CEC021_n138_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	60	11,5	55	1,12	0,21	1,38	33	4	27	1	15
Dragvoll_CEC032_n138_4+1_33mo	Dragvoll	9,1	60	17	55	1,12	0,32	1,38	33	4	27	1	15

Vedlegg A.3: Mobile celler: inputfil

```
SOLUTION 1-240
  temp      6
  pH        8.8
  pe        4
  redox     pe
  units     mmol/l
  density   1
  Alkalinity 6.9 as HCO3
  Br        0.02
  Ca        0.12
  Cl        0.26
  F         0.29
  K         0.25
  Mg        0.11
  Na        7.17
  P         0.02 as PO4-3
  S(6)     0.03
  -water    1 # kg

EXCHANGE 1-240
X 0.32 # NB! Endre kationebyttekapasitet
-equilibrate 1
END

SOLUTION 0 # Konstant konsentrasjon i brønnen 4 mol/kgw i x måneder
  temp      6
  pH        7
  pe        4
  redox     pe
  units     mol/kgw
  density   1
  Cl        4
  K         4
  -water    1 # kg

TRANSPORT 1-240 #2 m lang kolonne
-flow direction diffusion
-lengths #lengdene er oppgitt i Vedlegg A
-time_step 2592000 # 1 måned
-shifts 22 # NB! Endre til 11 (5 kg KCl/m) eller 33 (15 kg KCl/m)
-cells 240 #
-boundary_conditions constant flux
-multi_d true 2.03e-009 0.5 0 1.25 # NB! Endre porøsitet og n
-punch_cells 1-240
-punch_frequency 1
-dump C:\PHREEQC\Dragvoll_CEC032_n125_4+1_22mo_1.file

SELECTED_OUTPUT 1
-file C:\PHREEQC\Dragvoll_CEC032_n125_4+1_22mo_1.txt
-reset true
-totals Na K Mg Ca F Cl S(6)
        C(+4) Br P Alkalinity
-molalities NaX KX CaX2 MgX2

END # ved simulering med konstant konsentrasjon, kan resten av inputfilen slettes

SOLUTION 0 # Konstant konsentrasjon i brønnen 1 mol/kgw i (60-x) måneder
  temp      6
  pH        7
  pe        4
  redox     pe
  units     mol/kgw
  density   1
  K         1
  Cl        1
  -water    1 # kg

TRANSPORT 1-240 # antall celler og lengder leses fra transport fase 1
-flow direction diffusion
-time_step 2592000 # 1 time step equals 1 month
-shifts 38 # NB! Endre til 49 (5 kg KCl/m) eller 27 (15 kg KCl/m)
-boundary_conditions constant flux
-multi_d true 2.03e-009 0.5 0 1.25 # NB! Endre porøsitet og n
-punch_cells 1-240
-punch_frequency 1
```

```
-dump C:\PHREEQC\Dragvoll_CEC032_n125_4+1_22mo_2.file
```

```
SELECTED_OUTPUT 1
```

```
-file C:\PHREEQC\Dragvoll_CEC032_n125_4+1_22mo_2.txt  
-reset true  
-totals Na K Mg Ca F Cl S(6)  
C(+4) Br P Alkalinity  
-molalities NaX KX CaX2 MgX2
```

Vedlegg B: Immobiler celler

Vedlegg B.1: Immobiler celler: modell

For å beregne radiell diffusjon med høy nøyaktighet så kan leira modelleres som en kolonne med immobile celler. Cellene har lik cellelengde og økende volum i avstand fra brønnen (Figur B. 1). Kodeblokken MIX benyttes for å simulere diffusjonen mellom de immobile cellene. MIX angir en mixingfaktor mellom celle nr. i og j slik at diffusjonen hensyntar volumforskjellene i cellene, og det økende arealet på grensesnittet mellom cellene ut fra brønnen. For å få til dette så beregnes det et harmonisk gjennomsnitt av parameterne:

$$\frac{\varepsilon_{ij}}{G_{ij}h_{ij}} \quad \text{Ligning B.1}$$

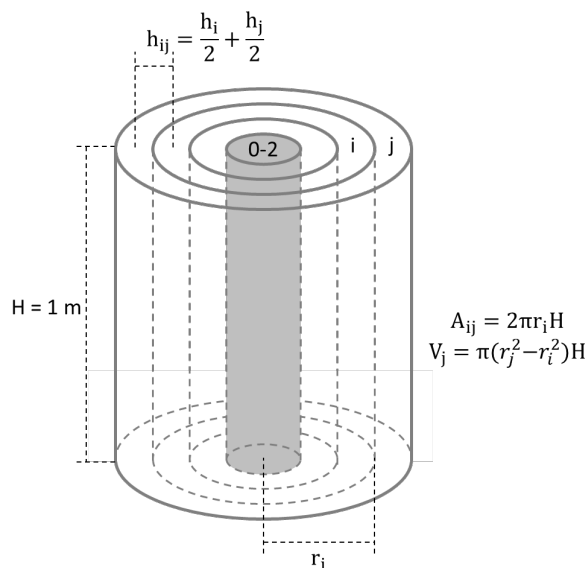
Hvor

ε_{ij} er porøsiteten over grensesnittet mellom celle nr. i og j

G_{ij} er geometrisk faktor som korrigerer for tortøsiteten, og er lik $1/\varepsilon_{ij}^n$ hvor n er lik Archie's eksponent m minus 1

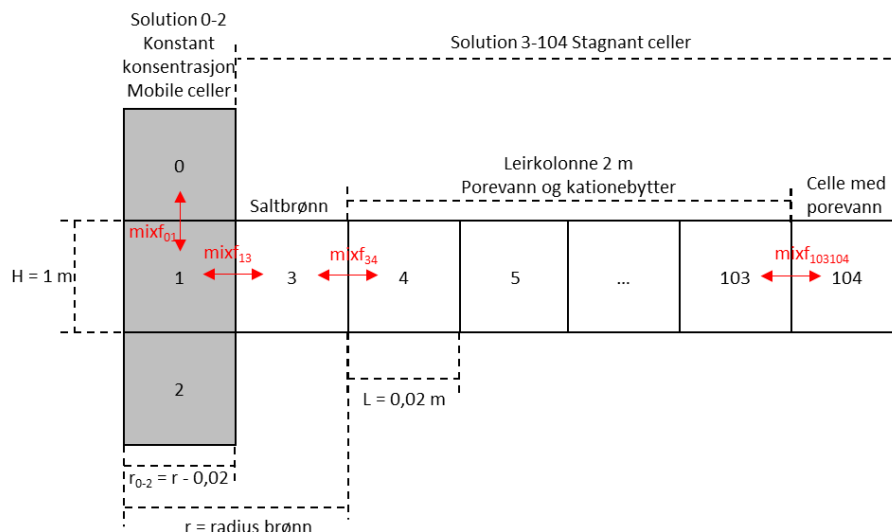
h_{ij} er avstanden fra senter av celle nr. i til senter av celle nr. j

Ved å benytte et harmonisk gjennomsnitt er det mulig å modellere med ulike cellelengde og ulike materialparametere fra en celle til en annen. I denne rapporten er leiren simulert som en 2 m kolonne med 100 immobile celler med lik lengde (Figur B. 2).



Figur B. 1 Prinsippskisse for modellering av radiell diffusjon med immobile celler med like lengder og ulikt volum.

Saltbrønnen modelleres som en mobil celle (Solution 1) i kontakt med en immobil celle (Solution 3). For å holde konsentrasjonen i saltbrønnen konstant legges det inn to celler på hver side av Solution 1 (Solution 0 og 2) som har samme konsentrasjon som Solution 1 og 3. Randbetingelsene for kolonnen med Solution 0-2 er «constant» og «closed». Dvs. at Solution 0 er konstant og at det ikke tillattes noen form for diffusjon ut av kolonnen gjennom celle nr. 2. Dermed tvinges diffusjonen inn i kolonnen med immobile celler (SOLUTION 3-104).



Figur B. 2 Prinsippskisse for saltbrønn og leirkolonne benyttet i modellering av radiell diffusjon.

Lengden på immobil celle nr. 3 (SOLUTION 3) er lik som for de immobile cellene i leirkolonnen (SOLUTION 4-104); 0,02 m. Lengden på celle nr. 1 (SOLUTION 1) er lik det som er angitt som høyden (1 m) i Figur B. 2. Volumet av celle nr. 1 beregnes ut fra en radius (r_{0-2}) lik total radius på saltbrønn (r) minus lengden av celle nr. 3 (0,02 m).

For å holde konsentrasjonen i celle nr. 3 nær konstant, må det legges inn mixingfaktorer mellom Solution 0 og 1 ($mixf_{01}$), og Solution 1 og 3 ($mixf_{13}$). For å opprettholde høy konsentrasjon settes $mixf_{01}$ lik 2. De øvrige mixingfaktorene beregnes ved hjelp av Ligning B.2.

$$mixf_{ij} = D_w \cdot \varepsilon_{ij}^n \cdot \varepsilon_{ij} \cdot \frac{A_{ij} \Delta t}{h_{ij} V_j} \cdot f_{bc} \quad \text{Ligning B.2}$$

Hvor

D_w er diffusjonskoeffisienten for konservativt elementet i vann ved 25 °C. I disse beregningene er det konservative elementet klorid med $D_w = 2,03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

A_{ij} er arealet for grenseflaten mellom celle nr. i og j (Figur B. 1). Radien er summen av radien i saltbrønn og akkumulert lengde av cellene t.o.m. celle nr. i.

Δt er tidstrinnet (timestep). Tidstrinnet justeres for å unngå negative konsentrasjoner.

f_{bc} er 2 for mixing mellom celle nr. 1 som har konstant konsentrasjon og 4. For alle de andre cellene der transiente endringer finner sted har f_{bc} lik 1.

V_j i Ligning B.2 settes lik 0,001 m³. PHREEQC tilpasser V_j til det faktiske volumet av vann i celle nr. j, og multipliserer mixingfaktoren for hvert element a i SOLUTION med forholdstallet $D_{w,a}/D_w$.

Volumet av vann ($V_{w,j}$) i hver enkelt celle beregnes ved å finne volumet av ringen som cellen (V_j) utgjør og multiplisere med porøsiteten:

$$V_{w,i} = V_i \cdot \varepsilon_i$$

Kationebyttekapasiteten må også tilpasses volumet av vann i de ulike cellene:

$$X_i = V_{w,i} \cdot X$$

SOLUTIONS, EXCHANGE, MIX og TRANSPORT beregnes ved å benytte filen i Vedlegg B.2.

Diffusjonsberegningen utføres ved å benytte inputfilen i Vedlegg B.3.

Vedlegg B.2: Immobiler celler: beregning av SOLUTIONS, EXCHANGE, MIX og TRANSPORT til inputfil

Filen er modifisert fra eksempel 21 i brukermanualen til PHREEQC.

```

SOLUTION 0-2 #
  K 4; Cl 4
-water 4.398 # basert på 1 m brønn med radius 0,045 m.
END

KNOBS; -diagonal_scale true # -tolerance 1e-20 # pga. Lave konsentrasjoner

SOLUTION 3 # Første immobile celle. Utgjør saltbrønnen sammen med Solution 0-2
K 4; Cl 4
  -water 1.963 # basert på 1 m brønn med radius 0,045 m.
SELECTED_OUTPUT
  -file Input.txt; # Denne inputfila benyttes til å simulere diffusjonen (Vedlegg F)
-reset false

USER_PUNCH
  # Definer symboler og pi
1  nl$ = EOL$           # ny linje
2  x$  = CHR$(35)       # hashtag '#'
3  sc$ = CHR$(59)       # semikolon ';'
4  pi  = 2 * ARCTAN(1e10) # 3.14159...

  # Definer saltbrønn og leirkolonne
10 height = 1          # Lengde av celle nr. 1 er satt til 1 m brønn (m)
20 r_int = 0.045       # Radius på saltbrønn (Celle 1 +3) (m)
30 r_ext = 2.045       # Lengde av leire + radius av saltbrønn (m)
110 thickn_clay = r_ext - r_int # kolonne med leire (m)
120 por_clay = 0.5      # porøsitet
130 rho_b_eps = 2.75 * (1 - por_clay) / por_clay # tørr bulk densitet (kg/L)
140 CEC = 0.06 * rho_b_eps # CEC / (eq/L porevann)

# Definer total varighet for simulering
160 DIM exp_time(1)
200 DATA 60 * 60 * 24 * 30 * 60 # total varighet på diffusjonen er 60 mndr
210 READ exp_time(1)

# Definer parameterar i modellen
350 Dw = 2.03e-9       # diffusjons koeffisient for Cl i vann ved 25oC(m2/s)
380 nclay = 100         # antall celler i leira
410 tort_n = -1.25      # eksponent n for å rekne ut tortøsitet. NB! settast inn med negativt
fortegn.
420 G_clay = por_clay^tort_n # tortøsitet
450 punch_time = 60 * 60 * 24 *30 # punch time (s). Skriv ut verdier for hver mnd

# Definer porevatnet
520 sol$ = nl$ + ' pH 8.8' + sc$ + ' temp 6'
530 sol$ = sol$ + nl$ + ' Na 9' + sc$ + ' K 0.2' + sc$ + ' Mg 0.12' + sc$ + ' Ca 0.12' + sc$ + ' Br 0'
540 sol$ = sol$ + nl$ + ' Cl 0.3' + sc$ + ' S(6) 0' + sc$ + ' F 0.2' + sc$ + ' Alkalinity 8.1 as HCO3'

  # Regn ut volum og kationebyttekapasitet for hver celle
810 r1 = r_int # radius saltbrønn (celle nr. 1 +3)
820 x = thickn_clay / nclay # cellelengde
830 FOR i = 1 TO nclay
840   num$ = TRIM(STR$(i + 3)) + sc$
850   V_water = 1e3 * height * por_clay * pi * (SQR(r1 + x) - SQR(r1))
860   punch nl$ + 'SOLUTION ' + num$ + ' -water ' + STR$(V_water)
870   punch sol$
940   punch nl$ + 'EXCHANGE ' + num$ + ' -equil ' + num$
950   punch nl$ + ' X ' + TRIM(STR$(CEC * V_water)) + nl$
960   r1 = r1 + x
970 NEXT i

1200 punch nl$ + x$ + 'Legg til en celle med porevann på utsiden av leirkolonna'
1210 num$ = TRIM(STR$(4 + nfilt1 + nclay + nfilt2)) + sc$
1220 punch nl$ + 'SOLUTION ' + num$ + ' -water ' + STR$(V_water)
1230 punch sol$
1240 punch nl$ + 'END'
1240 punch nl$ + 'END'

```



```

# Definer mixing faktorer for diffusiv flux mellom celle i og j (1 og 2):
# J_12 = -2 * Dw / (x_1 / g_1 + x_2 / g_2) * (c_2 - c_1) # Flux
# Multiply with dt * A / (V = 1e-3 m3). (Actual volumes are given with SOLUTION; -water)
# Use harmonic mean: g_1 = por_1 / G_1, g_2 = por_2 / G_2, x_1 = Delta(x_1), etc.
1420 g = por_clay / G_clay
# Find max time step = 0.5 * V_water * dx * G_factor / (Dw * por * A * fbc)
# V_water = por * pi * height * ((r + dr)^2 - r^2)
# A = por * pi * height * r * 2
# At the inlet of the tracers, fbc = 2...
1530 ffl = (SQR(r_int + x) - SQR(r_int)) * x * G_clay / (r_int * 2) / 2
# Perhaps the clay has very small cells...
1590 dt_max = 0.5 * ffl / Dw
# Check with punch times, set shifts...
1610 IF punch_time < dt_max THEN dt = punch_time ELSE dt = dt_max
1620 punch_fr = 1
1630 IF dt < punch_time THEN punch_fr = ceil(punch_time / dt)
1640 dt = punch_time / punch_fr
1650 shifts = (exp_time(1) / dt)

# Skriv mixingfaktorer
1700 punch nl$ + nl$ + x$ + ' mixing factors...'
1710 r1 = r_int
1711 r2 = r_int - x
1730 A = height * 2 * pi
1731 mixf1 = Dw * 2 / (0.5 * (r2 / g + x / g)) * dt * A * r2 / 1e-3
1738 punch nl$ + 'MIX ' + TRIM(STR$(0)) + sc$ + STR$(1) + STR$(2)
1739 punch nl$ + 'MIX ' + TRIM(STR$(1)) + sc$ + STR$(3) + STR$(mixf1)
1740 FOR i = 0 TO nclay
1750 IF i = 0 THEN fbc = 2 ELSE fbc = 1 # endra frå OR i = nfilt1 + nclay + nfilt2 THEN fbc = 2
ELSE fbc = 1
1820 mixf = Dw * fbc / (x / g) * dt * A * r1 / 1e-3
1840 IF i < nclay THEN r1 = r1 + x
1880 punch nl$ + 'MIX ' + TRIM(STR$(i + 3)) + sc$ + STR$(i + 4) + STR$(mixf)
1890 NEXT i
1900 punch nl$ + 'END'

# Skriv TRANSPORT-blokka
2000 punch nl$ + 'TRANSPORT'
2010 stag = 1 + nclay + 1
2020 punch nl$ + ' -warnings true'
2030 punch nl$ + ' -shifts ' + TRIM(STR$(shifts))
2040 punch nl$ + ' -flow diff' + sc$ + ' -cells 1' + sc$ + ' -bcon 1 2' + sc$ + ' -stag ' +
TRIM(STR$(stag))
2050 punch nl$ + ' -time ' + STR$(dt)
2060 punch nl$ + ' -multi_D true ' + STR$(Dw) + STR$(por_clay) + ' 0.0 ' + TRIM(STR$(tort_n))
2080 punch nl$ + ' -punch_fr ' + TRIM(STR$(punch_fr)) + sc$
END

```

Vedlegg B.3: Immobile celler: Inputfil

```
SOLUTION 0-2
  temp      6
  pH        7
  pe        4
  redox     pe
  units     mmol/kgw
  density   1
  Cl        4000
  K         4000
  -water    4.398 # kg
END

SOLUTION 3
  temp      6
  pH        7
  pe        4
  redox     pe
  units     mmol/kgw
  density   1
  Cl        4000
  K         4000
  -water    1.963 # kg

SOLUTION 4; -water 3.5249e+00
pH 8.8; temp 6
Na 9; K 0.2; Mg 0.12; Ca 0.12; Br 0
Cl 0.3; S(6) 0; F 0.2; Alkalinity 8.1 as HCO3
EXCHANGE 4; -equil 4;
X 6.3330e-01

Osv. Lim inn inputfila beregnet med koden i Vedlegg E

END

MIX 0; 1      2
MIX 1; 3      0.82467
MIX 3; 4      1.66997e+00

Osv. Lim inn inputfila beregnet med koden i Vedlegg E

END

TRANSPORT
  -shifts      800
  -time_step   162000 1 # seconds
  -flow_direction diffusion_only
  -boundary_conditions constant closed
  -stagnant    102
  -punch_frequency 16
  -multi_d     true 2.03e-09 0.5 0 1.25

SELECTED_OUTPUT 1
  -file        C:\PHREEQC\Output.txt
  -reset       true
  -totals      Na K Mg Ca F Cl S(6)
              C(+4) Br Alkalinity
  -molalities NaX KX CaX2 MgX2

USER_GRAPH 1
  -plot_concentration_vs x
          10 GRAPH_X CELL_NO
          20 GRAPH_Y TOT("Cl")

END

Ved simulering av flere transporttrinn der SOLUTION 0-3 endres, legges ny SOLUTION 0-2, SOLUTION 3, mixingfaktorer, TRANSPORT og
SELECTED_OUTPUT inn etter END
```