

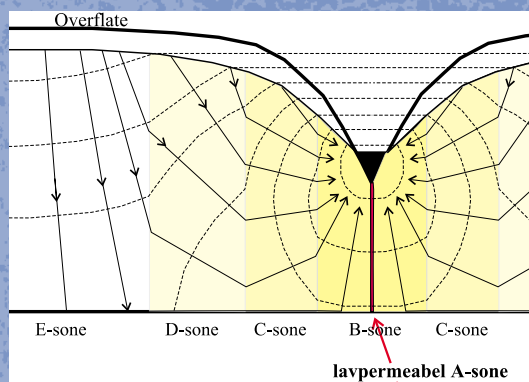
NGU

Norges geologiske undersøkelse



GRÅSTEINEN 7

Et geofaglig tidsskrift for alle – 2000



Bruddsoner i fjell — oppbygning og definisjoner

Alvar Braathen & Roy H. Gabrielsen

Leiv Eirikssons vei 39,
N-7491 Trondheim

Postadresse:
N-7491 Trondheim

Tlf.: 73 90 40 00
Fax.: 73 92 16 20

Administrerende direktør: Arne Bjørlykke

Norges geologiske undersøkelse (NGU) er landets sentrale institusjon for kunnskap om berggrunn, mineralske ressurser, løsmasser og grunnvann. NGU er en forvaltningsbedrift underlagt Nærings- og energidepartementet, og er departementets faginstans i spørsmål innenfor sitt ansvarsområde. NGU har også status som Miljøverndepartementets temasenter for geologiske miljødata i Norge.

NGU gir ut publikasjonsseriene Gråsteinen, Bulletin og Special Publications. De to sistnevnte er engelskspråklige og omfatter vitenskapelige arbeider innenfor norsk geologi. I tillegg til geologiske publikasjoner, gir NGU ut rapporter og kartserier innenfor fagfeltene berggrunnsgeologi, løsmassegeologi, geofysikk og hydrogeologi/geokjemi. Kartkatalog og publikasjonskatalog fåes ved henvendelse til NGU.

Gråsteinen er en norskspråklig serie som skal inneholde artikler om ulike geologiske tema for allmenheten, det være seg offentlige planleggere, skole-verket, amatørgeologer eller andre aktuelle grupper. Stoffet skal presenteres på en slik måte at ikkegeologer har nytte og glede av å lese om geologi og geologiske prosesser.

Redaktører: Anne Birkeland og Rolv Dahl
Sekretær: Anne Haugan
Utgiver: Norges geologiske undersøkelse
Produksjon: Grytting AS

Forsidebilder:

- 1) Øverst til venstre: Utsnitt av artikkelens figur 16. Konseptuell fremstilling av grunnvannsstrømming rundt et bruddlineament, vist i tverrsnitt av berggrunnen.
- 2) Øverst til høyre: Svaberg med brudd i skjærgården på Tjøme. Edelpix.com©Pål Hermansen.
- 3) Nede til venstre: Kjeragbolten i Rogaland. Mange av de spennende landskapsformasjonene vi ser rundt oss, er resultat av spenninger i fjellet og bruddannelser. Edelpix.com©Per Eide.

Bruddsoner i fjell

– oppbygning og definisjoner

Alvar Braathen & Roy H. Gabrielsen

Fakta om Alvar Braathen:

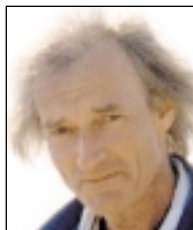


Født 11. juni 1964
Forsker ved faggruppe
for berggrunnsgeologi, NGU.

Telefon 73 90 42 33
E-post:
alvar.braathen@ngu.no

Alvar Braathen er utdannet ved Universitetet i Tromsø, hvor han forsvarte sin Dr. Scient avhandling om strukturgeologi på Spitsbergen i 1994. I den etterfølgende perioden har han drevet med strukturgeologisk forskning på oppbygning av forkastningssoner, og deres betydning for grunnvann i fjell. Andre oppgaver har inkludert strukturgeologiske arbeider knyttet til gulleting i Finnmark og Etiopia, og kartlegging av store skjærsoner i kystsonen som kan følges ut under sedimentbassengene på norsk kontinentalsokkel.

Fakta om Roy H. Gabrielsen:



Født 23. mai 1948
Professor i petroleums-
geologi/strukturgeologi ved
Universitetet i Bergen og
rådgiver ved NGU.

Telefon 55 58 34 32
E-post:
roy.gabrielsen@geol.uib.no

Roy Gabrielsens forskning er konsentrert om mekanismene for dannelse og utvikling av sedimentære bassenger, forkastningers utvikling og geometri og bruddsystemers betydning for væskestrømning i bergarter. Han har arbeidet med disse problemstillingene ved Universitetene i Oslo og Bergen og i oljeindustrien. Gabrielsen har også vært forskningsdirektør i Norsk Hydro.

Sammendrag

Jordskorpen kan bevege seg så kraftig at det oppstår sprekker, forkastninger og knust berg. Slike partier kalles ofte bruddsoner. Ulike deler av bruddsoner har karakteristiske trekk. De sentrale delene består gjerne av forkastningsmel, breksje, kataklasitt eller mylonitt. Denne sonen av forkastningsbergarter kaller vi A-sonen. Rundt A-sonen er det vanlig å finne intenst oppsprukket fjell. Dette kaller vi B-sonen. Utenfor dette avtar bruddfrekvensen gradvis i det vi kaller bruddsonens marginale deler. I marginaldelens C-sone finner vi lange, parallelle brudd, mens i D-sonen finner vi to bruddsett med en vinkel på 60 grader. Utenfor dette, i distaldelen, er det lave bruddfrekvenser og varierende bruddorienteringer. Dette kaller vi E-sonen.

Denne sonebetingete fordelingen av brudd og forkastningsbergarter har stor betydning for vurdering av grunnvannsgjennomstrømning, for injeksjon av masse i berggrunnen og fjellets stabilitet.

Innhold

Innledning4

Definisjoner av begreper6

Oppbygging av bruddsoner11

Stabilitet, grunnvannsstrømning og injeksjon17

Referanser20

Innledning

I dette heftet beskriver vi resultatene fra omfattende strukturgeologiske studier av svakhetssoner i berggrunnen. Bakgrunns materialet er beskrevet og dokumentert i Braathen & Gabrielsen (1998), og vi anbefaler at de leserne som er spesielt interesserte studerer denne rapporten.

Vi ønsker å gi en kortfattet og enkel oppsummering av bruddsoners oppbygning og karakteristikk, både av typiske forkastningsbergarter og fordelingen av brudd/sprekker rundt bruddsoner. Oppbygningen har mange systematiske trekk, som kan knyttes til avgrensede deler og soner (A til E). Hensikten er å -

- (I) gi leseren en fundamental forståelse av bruddstrukturer som er vanlige å observere i Norges berggrunn,
- (II) etablere et felles begrepsapparat for beskrivelse av strukturer i berggrunnen.

Det finnes allerede en etablert terminologi som benyttes av bergingeniører som jobber med stabilitet og sprekkesystemer i berg (for eksempel "Håndbok i ingeniørgeologi – berg" fra 1985). Disse begrepene er delvis forskjellige fra de som benyttes av strukturgeologer. Et mål med denne beskrivelsen er derfor å bidra med en klargjøring av begreper som benyttes ved beskrivelse av svakhetssoner i berggrunnen. Det har også vært ønskelig å beskrive resultatene fra ny geologisk forskning rundt oppbygningen av bruddsoner, som har klare praktiske sider.

Hvorfor er det hensiktsmessig med et felles begrepsapparat ved beskrivelse av brudd eller sprekker i berggrunnen? I dagens samfunn forventes det større presisjon i beskrivelsen av geologiske forhold, slik at forutsigbarheten og kvaliteten i planleggingen øker ved utbyggingsprosjekter. Dette er relevant for konstruksjonsarbeider (tunneldrift,

veibygging mm.), så vel som for ressurs- og forskningsproblematikk (grunnvann, grunnvarme, naturstein og pukkforkomster). Framtidens bergingeniører og geologer må kunne framstille sine geologiske observasjoner på en presis, entydig måte. Dette forutsetter at den enkelte har den nødvendige og fundamentale kompetansen innen strukturgeologi.

Forståelsen rundt oppbygningen av bruddsoner kan betraktes som et supplement til dagens mye benyttede vurderinger av Q-verdi og RMR-verdi, som brukes til å beskrive bergmassens egenskaper. Siden disse systemene trekker inn en rekke parametere som benyttes til å beregne rater eller verdier for kvaliteten av en gitt bergmasse, kan de beregnete verdiene ikke direkte knyttes til feltobservasjoner. Det er derfor i mange sammenhenger formålstjenlig å benytte enkle strukturgeologiske betegnelser i beskrivelsen av berggrunnen og dens svakhetssoner, som er direkte basert på observasjonene man gjør under feltarbeid. Etter dette kan Q- eller RMR-verdi eventuelt presenteres.

Stabilitet, grunnvannsstrømning og injeksjon er aktuelle tema for arbeidet som utføres i berg. Strukturgeologiske begreper og modeller kan ikke erstatte de ingeniørgeologiske betraktningene, men kan være med å bygge opp under forståelsen av bergmassekvaliteten. Innsikt i bruddsoners oppbygning gir generell informasjon om egenskaper som blokkstørrelse, grad av oppsprekning av berggrunnen og romlig bruddfordeling, samt opptreden av meget svake bergmasser. Fordelingen av brudd vil for eksempel kunne påvirke strømmingen av grunnvann som vil strømme langs foretrukne løp ut fra fordelingen av åpne brudd og opptreden av forseglende forkastningsbergarter, samt sekundære mineraliseringer.



Definisjon av begreper

I dette avsnittet definerer vi en rekke begreper assosiert med svakhetssoner i berggrunnen. Termene som beskrives er anvendelige både for ingeniørgeologer og strukturgeologer.

Sprø deformasjonsstrukturer

De fleste svakhetssoner i berggrunnen er karakterisert ved en høy intensitet av forskjellig typer oppsprekking, som ofte omtales udifferensiert som brudd. Slike bruddsoner opptrer som langstrakte, forholdsvis rette og smale soner, som ofte vises som topografiske forsenkninger. Når disse er identifisert ved hjelp av fjernmålingsdata (for eksempel fly- eller satellittbilder) betegnes de gjerne som *lineamenter*¹.

Bruddlineament – en bruddsone som har et klart lineært topografisk uttrykk, som er dokumentert (ved feltarbeid) å være karakterisert av en forhøyet bruddfrekvens.

Brudd - en planar eller semiplanar diskontinuitet i en bergart forårsaket av

ytre eller indre spenninger. To typer brudd forekommer;

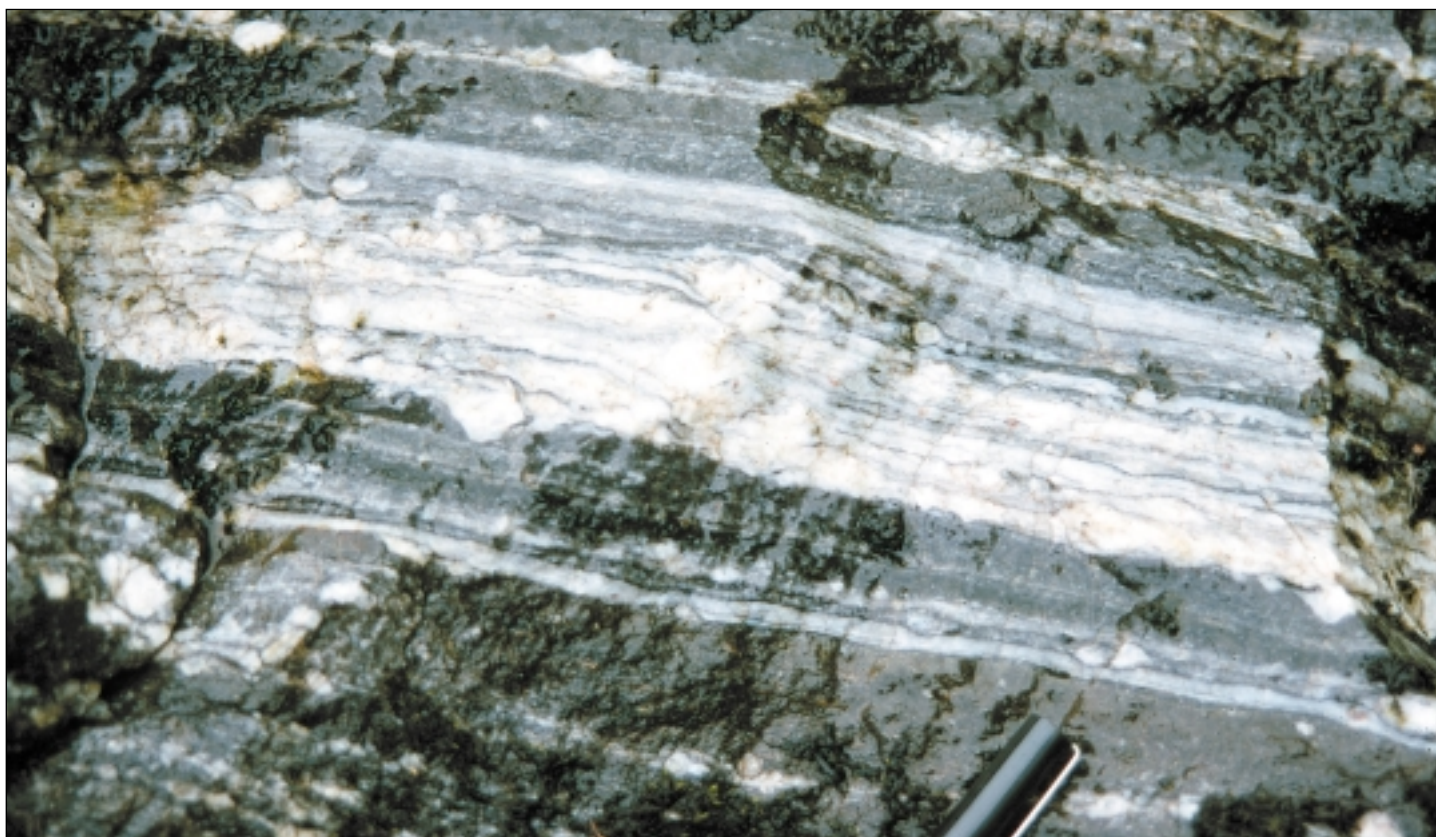
(I) **Tensjonsbrudd** er dannet ved bevegelse vinkelrett på bruddflatene. Tensjonsbrudd kalles ofte *sprekk*, eller *spalte* når det er en viss åpning mellom bruddveggene. Tensjonsbrudd vil normalt øke permeabiliteten langs bruddsoner. Engelsk: *joint*. I følge tradisjonell terminologi i bergmekanikk: mode I bruddmekanisme.

(II) **Skjærbrudd** benyttes om brudd hvor det har vært en bevegelseskomponent parallelt med bruddflatene, altså forkastninger. Skjærbrudd kan både redusere og øke permeabiliteten parallelt med bruddsoner.

Engelsk: *fault*. I følge tradisjonell terminologi i bergmekanikk: mode II og III bruddmekanisme.

Sprekk - en planar eller semiplanar diskontinuitet i en bergart, som kan sidestilles med tensjonsbrudd².

Figur 1. Mylonitt i form av en svart, meget finkornet, foliert bergart med utstrakte øyne og bånd av feltspat. Forkastningsbergarten er dannet ved betydelig skjærbevegelse, som har resultert i kornstørrelse-reduksjon gjennom plastisk og semiplastisk (duktil) deformasjon.





Bruddpopulasjon - en gruppe av mange brudd innenfor et avgrenset område, for eksempel tilknyttet en bruddsone, som har en spesiell orientering eller alder.

Bruddsone³ - en sone med høy bruddtetthet hvor kunnskap angående bevegelse langs sonen mangler. En bruddsone kan mer presist klassifiseres som: -

Sprekkesone - en bruddsone hvor bevegelse langs sonen ikke lar seg påvise, og som utelukkende består av tensjonsbrudd/sprekker.

Forkastning - en bruddsone hvor det kan påvises at det har vært bevegelse langs sonen.

Bruddsverm - en smal sone med høy bruddtetthet i et nettverk av brudd.

Forkastningsbergarter

I forkastningssoner er det vanlig å finne forskjellige typer forkastningsbergarter. En detaljert beskrivelse er gitt i Davis & Reynolds (1996)⁴.

Forkastningsbergarter kan klassifiseres til en av følgende hovedtyper:

Mylonitt - en foliert bergart hvor den opprinnelige kornstørrelsen i vertsbergarten er redusert ved plastisk og semiplastisk deformasjon (Fig. 1). Det finnes flere varianter (protomylonitt, ultramylonitt, blastomylonitt) som skilles fra hverandre ved deformasjonsintensitet og kornstørrelse.

Kataklasitt - en bergart dannet ved mekanisk nedknusning, dvs. ved sprø deformasjon av en bergart til kantede fragmenter (klaster) i en finkornet grunnmasse (matriks). Fragmentene er uten foretrukket orientering. I motsetning til en breksje, er en kataklasitt en hard bergart som forble sammenkittet under dannelsen (Fig. 2 og 3).

Kataklasitter kan deles inn i to typer avhengig av klastestørrelse. En *kataklasitt* har klaster mellom 0.1 mm og 10 mm, mens en *ultrakataklasitt* har klastestørrelse under 0.1 mm.

Figur 2. To typer kataklasitt i en forkastningskjerne (A-sone). Karakteristisk for denne harde forkastningsbergarten er opptreden av vilkårlig orienterte, kantede blokker og fragmenter av vertsbergarten i en meget finkornet, nedknust grunnmasse. Den grålige kataklasitten i øvre del av bildet består av forholdsvis mye blokker og fragmenter og en gjennomgående mindre grad av nedknusning sammenlignet med den svarte kataklasitten under. Sistnevnte har en ekstremt finkornet grunnmasse og kun noen små, spredte fragmenter, og er en ultrakataklasitt.

Figur 3. Sone med gråsvart ultrakataklasitt i granitt. Legg merke til at sonen er reaktivert av et skjærbrudd som inneholder enkelte små linsjer av breksje. Både bruddet og breksjen er sementert av grønn epidot.



¹ Relevante referanser: Nystuen 1989; Braathen & Gabrielsen 1998. ² I ingeniørgeologiske terminologi sidestilles ordet "sprekk" med "brudd".

³ I ingeniørgeologiske terminologi beskrives en *knusningssone* som en sone med en gradvis overgang fra et sentralt oppknust parti via sprekker/brudd til hel sidebergart, og kan derfor delvis sammenlignes med en bruddsone. ⁴ Andre aktuelle referanser: Sibson 1977; Wise mfl. 1984.



Figur 4. Brekksjelinse i en forkastningssone. Fragmentene i linsen består av vertsbergarten. Disse flyter i en mørk grunnmasse av forkastningsmel. Et skjærbrudd til høyre i bildet er dekket av rosa zeolitt (se pil).

Brekksje - en løs bergart dannet ved mekanisk nedknusning av en bergart, med kantete fragmenter i en finkornet matriks (Fig. 4, 5 og 6). Normalt er det ingen orientering av fragmentene. Brekksjer er i mindre grad presset og kittet sammen, og opptrer derfor som en relativt løs sone i berggrunnen. Hardere brekksjer er gjerne dannet gjennom sekundær sementering av matriksen (kvarts eller karbonat vanlig).

Også brekksjene er inndelt i en serie, avhengig av klastestørrelse. En *megabrekksje* har klaster større enn 0.5 m, en *brekksje* domineres av klaster mellom 0.5 m og 1 mm, og en *mikrobrekksje* av klaster mellom 1 mm og 0.1 mm. Brekksjer dominert av en

klastestørrelse under 0.1 mm betegnes som *forkastningsmel*.

Forkastningsmel - en svært finkornet masse med en leiraktig konsistens som er dannet gjennom ekstrem nedknusning av vertsbergarten ved deformasjon i det sprø regimet (Fig. 6 og 7). Det er altså et steinmel. På engelsk kalles dette *gauge*. Kornstørrelsen er mindre enn 0.1 mm, men det finnes gjerne en del bergartskorn. I tørr tilstand er den løs til delvis kompakt og føles som glatt, talkaktig pulver på fingrene. Vått forkastningsmel klistrer til fingre og hammer.

Leirmineraler, zeolitt og andre mineraler som dannes under lavt trykk og temperatur, forekommer gjerne i

soner med forkastningsmel, siden knuste og oppsprukne mineralkorn over tid reagerer med væske- eller gassfasen i sonen, og danner nye mineral-korn. Er det leirmineraler i sonen, betegner bergingeniører mineralene som sleppeleire.

Sleppesone - en løs sone som består av forkastningsmel med eller uten leirmineraler, og varierende mengder av fragmenter. En sleppesone kan klassifiseres til en av undergruppene av breksje⁵.

⁵ I ingeniørgeologiske terminologi er en *sleppe* en sprekk som har mineralfylling av løse eller porøse mineraler av opptil noen cm tykkelse.



Figur 5. Forkastningssone med to typer av sementert breksje. Det mørkere partiet til høyre inneholder cm- til mm-store fragmenter av vertsbergarten og rosa zeolitt i en finkornet, zeolittholdig grunnmasse. Denne grunnmassen sementer bergarten. Den hvite breksjen til venstre består av hvit zeolitt både i fragmentene og i den sementerende grunnmassen som holder bergarten sammen. Siden zeolittsementen har meget lav skjærstyrke, er bergarten svak og delvis helt løs.

Figur 6. Forkastningssone (A-sone) med tre typer forkastningsbergart. Sentralt i bildet opptreer en rød breksje med grønne fragmenter av overliggende bergart. Fargen skyldes en sement av rødlig karbonat, som binder bergarten sammen og gir den en viss styrke. Den grønne bergarten over er en mikrobreksje med meget finkornete bergartsfragmenter i en kvartssementert grønnlig matriks. Denne bergarten er meget hard på grunn av kvartssementen. Det 20 cm brede løse partiet nederst i bildet består av forkastningsmel som inneholder små fragmenter av den røde breksjen. Denne sonen er helt løs, og fører grunnvann.



Figur 7. Forkastningsmel i en sone bestående av en finkornet masse med en leiraktig konsistens som inneholder noen små fragmenter av vertsbergarten.



Oppbygning av bruddsoner

Generelt mønster

En bruddsone representerer en svakhet i berggrunnen som gjerne er dypere erodert i forhold til omliggende berg. Den danner derfor gjerne en topografisk forsenkning. Konsentrasjonen av brudd til en avgrenset, langstrakt sone gjør at den topografiske forsenkningen er langstrakt i forhold til bredden, og dermed danner en lineær struktur i berggrunnen, altså et lineament. Lengde- til breddeforholdet av bruddsoner er normalt større enn 100/1. Lengden av bruddlineamenter varierer, fra noen 10-talls meter til så mye som 100 km eller mer. Bruddsystemer har ofte en fraktal egenskap, dvs. at den geometriske karakteristikken gjentas i forskjellige målestokker. Følgelig er det vanlig å dele lineamenter inn i flere ordener, etter betydning (status) og etter lengde eller lengde-bredde forholdet. For eksempel kan et førsteordens lineament gjerne være 50-100 km langt, et andreordens lineament 5-50 km langt, et tredjeordens lineament 1-5 km, osv. Førsteordens lineamenter vil normalt bestå av en hel serie andre- og tredjeordens lineamenter, med andre ord vil lineamenter av en viss størrelse bestå av flere bruddsoner med mellomliggende relativt lite oppsprukne bergartsblokker.

Bruddsoner kan deles inn i flere undergrupper basert på bevegelse langs sonen og dens orientering. Disse er vist i figur 8. En enkel gruppering inkluderer:

Steile sprekkesoner består av tensjonsbrudd. Bevegelse langsmed sprekkesonen kan ikke påvises. Fordelingen av brudd er som regel symmetrisk fordelt rundt senteret på sonen.

Steile forkastninger domineres av skjærbrudd, men kan også inneholde hyppige tensjonsbrudd. Lag eller linser av forkastningsbergarter er vanlig i den sentrale delen av strukturen. Slike forkastninger, som er tilnærmet vertikalt orientert, har påviselig forskyvning av geologiske markører. Forskyvningen vil kunne ha en horisontal komponent. Fordelingen av brudd er i regelen symmetrisk fordelt rundt senterlinjen på sonen.

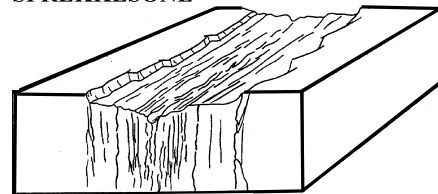
Normalforkastninger domineres av skjærbrudd, samt lag eller linser av forkastningsbergarter, selv om tensjonsbrudd også forekommer. Normalforkastninger faller normalt mellom 50° og 70° fra horisontalen, og har påviselig nedadrettet forskyvning av geologiske markører i hengblokken. I de fleste tilfeller er intensiteten av brudd høyere i hengblokken enn i liggblokken.

Reversforkastninger består av både skjær- og tensjonsbrudd, samt lag eller linser av forkastningsbergarter. Slike forkastninger har normalt et fall på 10°-40° fra horisontalen, og har påviselig oppadrettet forskyvning av geologiske markører. Vanligvis er det en forhøyet bruddintensitet i hengblokken.

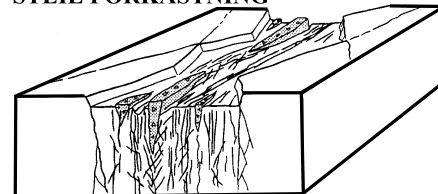
Segmenter og soner

Fordelingen av brudd rundt bruddlineamenter kan kategoriseres til to grupper, nemlig segmenter og soner. *Segmenter* av en bruddsone er etablert gjennom statistisk analyse av et stort datasett på bruddfordeling rundt lineamenter (Braathen & Gabrielsen 1998). Fordelingen og orienteringen av brudd opptrer i bestemte mønstre, dvs. bruddsett eller bruddkomplekser. Ofte vil segmentene være knyttet til variasjon (f.eks. i strøkretningen eller i deformasjonstype) langs bruddlineamenter. Segmentene kan ofte videre inndeles i *soner* på tvers av

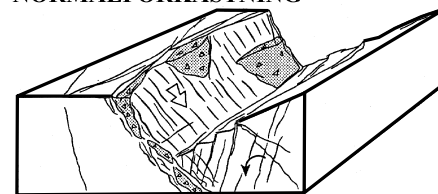
SPREKKESONE



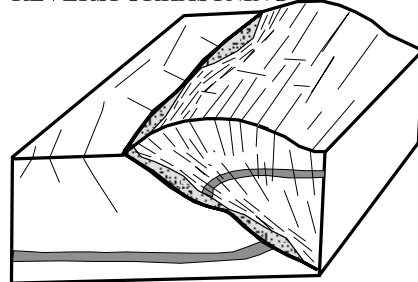
STEIL FORKASTNING



NORMALFORKASTNING



REVERSFORKASTNING

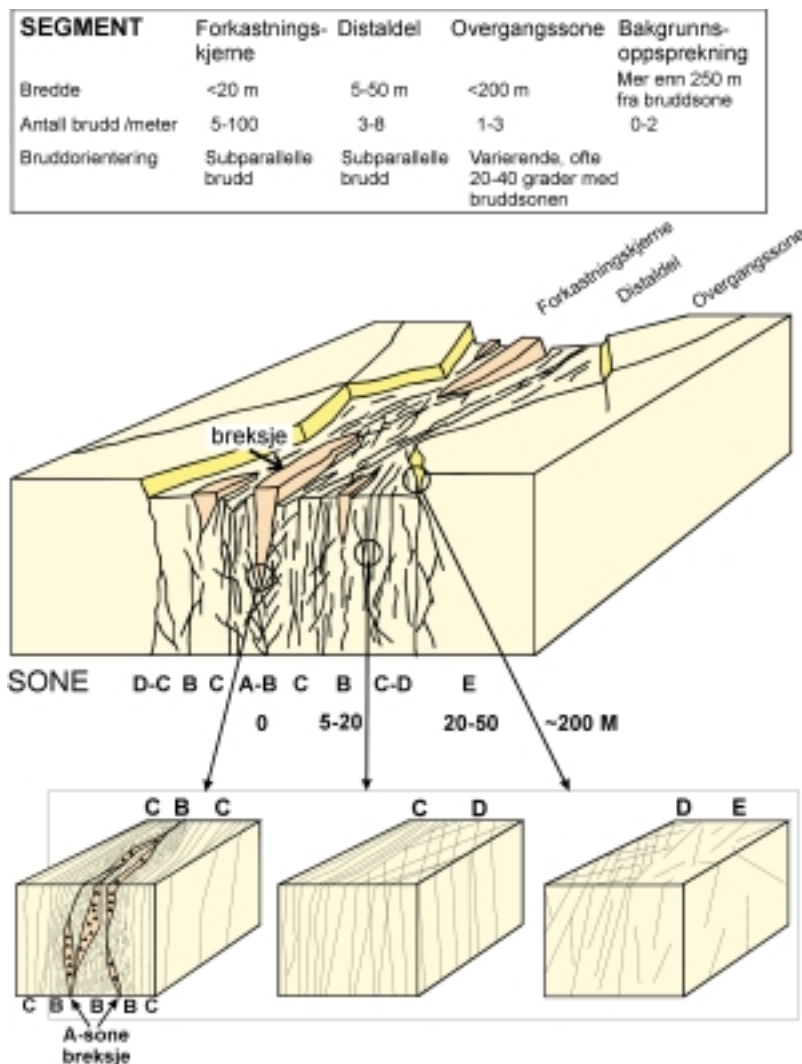


Figur 8. Generell oppbygning av en sprekkesone og de tre hovedtypene av forkastninger.

Figur 9. Oppbygning av bruddsoner, som kan beskrives i segmenter og distinkte soner.

Hver av sonene B, C, D og E er karakterisert ved bestemte bruddsett eller bruddkomplekser.

A-sonen består av forkastningsbergarter.



strøket, som kan identifiseres av geologen i felt. Figur 9 illustrere kategoriseringen av brudd rundt lineamenter.

Bruddlineamenters sonering

En statistisk vurdering av bruddene langs mer enn 100 lineamenter i Norge antyder et generelt mønster for fordelingen og orienteringen av brudd rundt lineamenter. Bakgrunnsdata for bruddintensitet er vist i figur 10.

Forkastningskjernen utgjør den sentrale delen av en bruddsone. Den er normalt mellom noen cm og 20 m bredt. Den er dominert av brudd som er tilnærmet parallell med lineamentet, og inneholder gjerne forkastningsbergarter. Bruddtettheten varierer mellom 5 og 100 eller flere brudd per snittmeter⁶. Denne delen av en forkastningssone betegnes "fault-core"⁷ på

engelsk. Forkastningskjernen omfatter sonene A og B, som forklares nedenfor.

Distaldelen er fra 5 til mer enn 50 meter bredt. Bruddene er enten orientert nært parallellt med lineamentet eller i to bruddsett med en vinkel mellom bruddsettene på rundt 60°. Bruddtettheten er vanligvis mellom 3 og 8 brudd per snittmeter. Den engelske betegnelsen på distaldelen er "damage zone". Distaldelen omfatter sonene C og D (se nedenfor).

Overgangssonen, eller E-sonen (se nedenfor), utgjør den ytterste sonen av et lineament, hvor en påviselig høyere bruddfrekvens kan påvises. Utenfor dette er berggrunnen upåvirket av bruddeformasjonen. Overgangssonen er opp til 200 m bred. Bruddintensiteten varierer mellom 1 og 3 brudd per snitt-

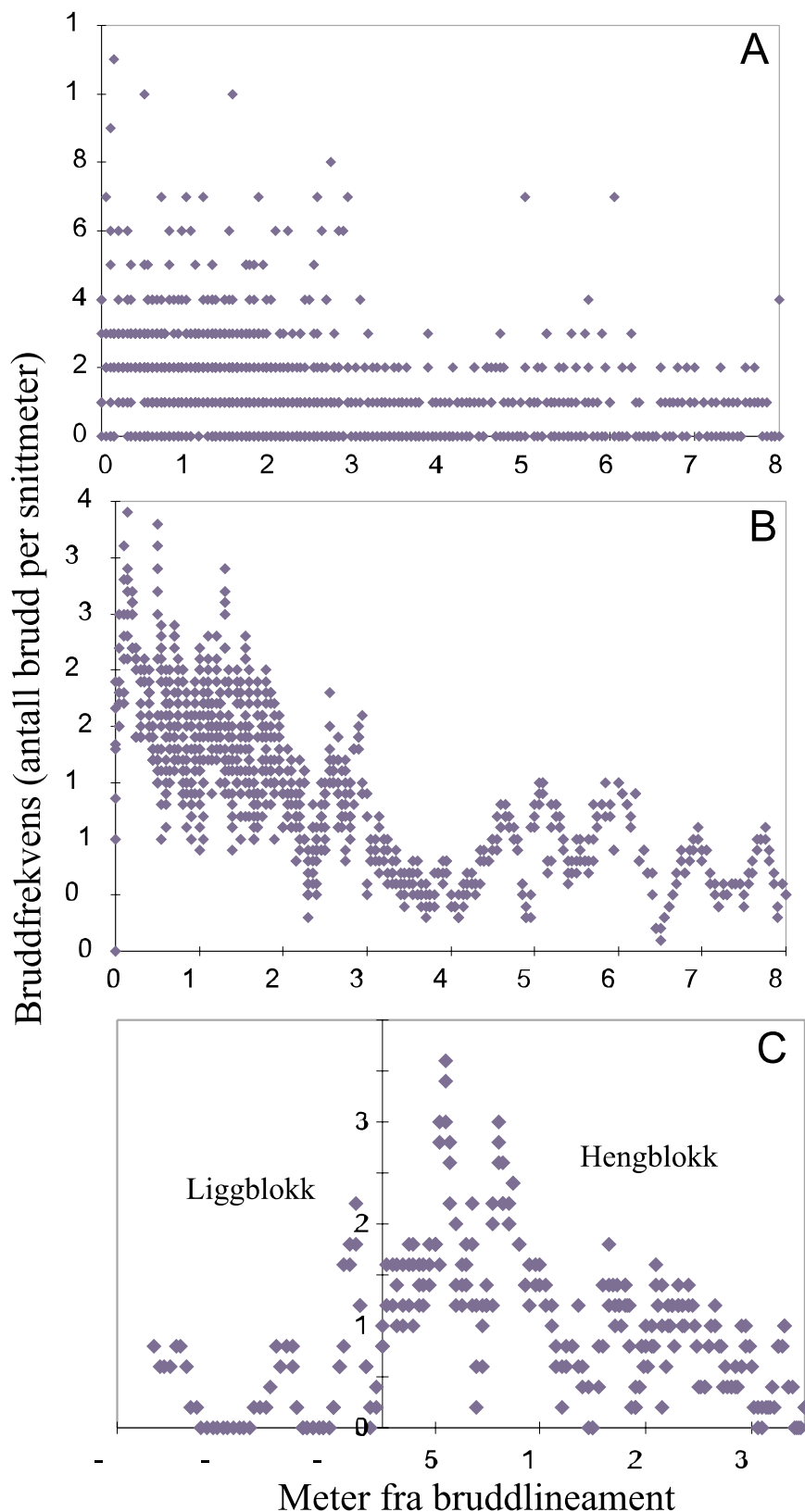
⁶ Bruddfrekvensen kan betegnes ved flere metoder, blant annet ved telling av antall brudd som skjærer en meter lange linjesegmenter (=snittmeter), og antall brudd innenfor et gitt areal. Se Braathen & Gabrielsen (1998) for detaljer rundt metodene. ⁷ Aktuell referanse: Caine mfl. 1996.

meter. Bruddorienteringen er høyst variabel, men det er en tendens til at bruddene har en 20 til 40° vinkel til lineamentet.

Bakgrunnsoppsprekning opptrer i områder utenfor bruddsonene. Så å si all berggrunn er oppsprukket. Den bruddfrekvensen som opptrer over større områder og vekk fra bruddsonene betegnes bakgrunnsbruddfrekvensen.

En sone (A-E) i denne sammenhengen er et bruddsett eller bruddkompleks nær et bruddlineament som kan identifiseres av geologen i felt, og må ikke forveksles med begrepene forkastnings- og sprekkesoner. Karakteristisk for sonene A til E er at de fordeler seg i et bestemt mønster rundt bruddlineamenter. I mange tilfeller kan en sone gå gradvis over i en annen sone, andre ganger kan en sone dø ut. Det er også vanlig at soner overlapper hverandre, slik at for eksempel flere bruddsett danner et bruddkompleks. For at leseren skal få en forståelse av sonenes utseende i felt, er de påfølgende beskrivelsene rikelig illustrert.

Figur 11. (A) (bildetekst neste side)



Figur 10. Plott av bakgrunnsdata for bruddfrekvens på tvers av bruddsoner. (A) Hele datasettet fra mer enn 50 steile bruddlineamenter. (B) Som i A, men i dette tilfellet er frekvensen beregnet ut fra et løpende gjennomsnitt av 10 målinger av frekvens sortert etter avstand fra bruddlineamentet. Legg merke til knekkpunktet på ca. 250 meter fra lineamentet, som viser maksimal bredde på det lineamentspåvirkede området. (C) Bruddfrekvensverdiene fra 20 profiler på tvers av store normalforkastninger, som er glattet gjennom et løpende gjennomsnitt av 10 målinger sortert etter avstand. En klar asymmetri framkommer, med klart høyere bruddintensitet i hengblokken. Datagrunnlaget er nærmere beskrevet i Braathen & Gabrielsen (1998).



Figur 11. (A) (forrige side) Sentralsegmentet av en steil forkastningssone, hvor A-sonen utgjøres av et tynt bånd av forkastningsmel til høyre i bildet (pil) og en megabreksje rundt hammeren. Til venstre i bildet opptrer en B-sone i form av tette brudd, hvorav enkelte er adskilt av linser med mikrobreksje. (B) Lavvinklet forkastningssone, som består av forkastningsmel og breksje (nederst), og overliggende sone med intens oppsprekking.

Figur 12. Typisk B-sone med intens oppsprekking karakterisert ved tilnærmet parallelle, korte brudd. Bruddstilen gir bergarten et linseaktig preg. Det er også noen brudd på tvers av B-sonen, dvs. langs foliasjonen i bergarten (øverst til nederst på bildet).



A-sonen utgjør senteret av bruddlineamenter. Begrepet brukes på den delen av lineamentet som består av forkastningsbergarter, som mylonitt, kataklasitt eller breksje. Et eksempel er vist i figur 11. Forkastningsbergarter opptrer ofte i et nettverk eller som langstrakte linser langs lineamentet, og kan både være kontinuerlige eller kun finnes i isolerte lommer. A-soner kan variere i bredde fra noen mm til flere 10-talls meter, men er vanligvis i dm- til m-skala. Storstilte forkastninger kan ha A-soner med en bredde opp mot en km.

A-sonen er i mange tilfeller mineralisert (kvarts, karbonat, epidot, zeolitt mm.). Det er ikke uvanlig å finne flere generasjoner med forskjellig forkastningsbergarter langs et lineament, for eksempel en mylonittsone som er kuttet av en sone med kataklasitt, som igjen er breksjiert. A-sonen er ikke alltid utviklet, og forekommer bare i forkastningssoner der et minimum av bevegelse har funnet sted.

B-sonen sammen med A-sonen, utgjør senteret av lineamentet. I tilfeller hvor A-sonen mangler eller opptrer sporadisk, utgjør B-sonen senteret av lineamentet alene. B-sonen er karakterisert ved en veldig høy bruddkonsentrasjon av korte, hovedsakelig parallelle brudd. Dette er illustrert i figurene 12 og 13. Bruddene danner ofte en liten vinkel med lineamentet. Avstanden mellom enkelt brudd varierer fra mindre enn 10 cm til noen mm, mens bruddlengden er fra 10 til 50 cm. Bruddintensiteten tilsvarer 10 til mer enn 100 brudd per snittmeter. Bredden av B-sonen varierer over en avstand på noen cm, men er sjelden mer enn noen få meter. Ofte er sidebergarten til brudd i denne sonen bleket, noe som tyder på at væsker eller gasser har sirkulert i bruddene. Sekundære mineraler forekommer, men er mindre vanlig enn i A-sonen. B-sonen inneslutter ofte A-sonen der denne er utviklet, eller opptrer i forlengelsen av linser med A-sone forkastningsbergarter.



Figur 13. B-sone med meget intens oppsprekking av korte, planære brudd. Avstanden mellom de parallelle bruddene er fra noen mm til 2 cm, noe som gir en bruddfrekvens på over 100 per snittmeter.

C-sonen er karakterisert ved store, parallelle bruddflater, som har en vinkel på 5 til 20° til lineamentet. Avstanden mellom brudd er gjerne mellom 10 og 50 cm, noe som gir en vanlig bruddtetthet på 2 til 10 brudd per snittmeter (Fig. 14). Mineralisering og bleking forekommer sjelden. I et godt utviklet lineament opptrer C-sonen i en bredde på 5 til 50 m utenfor B-sonen.

Grensen mellom sonene er i regelen skarp. I noen tilfeller, hvor A- og B-sonene mangler eller opptrer sporadisk langs lineamentet, utgjør C-sonen senteret av lineamentet. Observasjoner av C-sone brudd som går over i en B-sone langs strøket, kan forklare slike variasjoner langs lineamenter.

Figur 14. Godt utviklet C-sone bestående av forholdsvis lange, omtrent parallelle brudd. Avstanden mellom bruddene varierer fra 10 til 40 cm.



Figur 15. Typisk D-sone, med to steile bruddsett som har en minste vinkel på ca. 60 grader mellom settene. Dette gir den karakteristiske trinnformede, topografiske kanten av dette bruddlineamentet. Det er også enkelte lavvinklede brudd langs foliasjonen i bergarten.



D-sonen vises som to sett av lange brudd, som opptrer symmetrisk om lineamentsaksen. Vinkelen mellom denne aksen og strøket av bruddsettene er gjerne rundt 30°, noe som gir en minste vinkel på rundt 60° mellom settene (se Fig. 15). Bruddintensiteten er i regelen rundt 2-3 brudd per snittmeter. Denne sonen, som er 5 til 10 m bred, utgjør normalt den steile kanten av et lineament som har et klart topografisk uttrykk.

E-sonen opptrer utenfor D-sonen, i det ytterste området av bruddlineamentet. Bredden varierer fra noen 10-talls meter til mer enn 200 meter. Orienteringen av brudd varierer, mens bruddintensiteten typisk gir en konsentrasjon på mellom 1,5 og 2,5 brudd per snittmeter, selv om mer høyfrekvente bruddsvermer kan forekomme. Det er en svak dominans av brudd med en vinkel mindre enn 40° til lineamentet.

Bakgrunnsoppsprekning er betegnelsen for den delen av berggrunnen som ikke er påvirket av lineamentet. Vanlige bruddfrekvenser varierer mellom 0,5 og 1,5 brudd per snittmeter. Området starter gjerne 100 til 300 meter fra et lineament, og dekker strekningen til det neste bruddlineamentet. Bakgrunnsoppsprekning er derfor det vanligste bruddsystemet over store områder, selv om enkelte bruddsvermer kan forekomme. Høyere bruddintensitet er også vanlig langs bergartsgrenser.

Stabilitet, grunnvannsstrømning og injeksjon

Stabilitet

Stabiliteten av berg er i hovedsak kontrollert av bruddorientering og bruddfrekvens, som påvirker størrelsen av potensielt løse blokker, samt opptreden av svakhetssoner. Svake soner er gjerne betinget av forkastningsbergarter eller høyfrekvente bruddsystemer, men kan også skyldes en foliasjon eller skifrihet betinget av parallelle stilte mineraler (glimmer, leirmineraler), eller svake bergartslag. Mineralbelegg på brudd er også viktig, siden brudd forseglert med for eksempel mineraler som kalkspat og kvarts, har en langt bedre stabilitet enn leir-mineraliserte brudd. Injeksjonsmasse vil selvfølgelig også være med på å stabilisere brudd.

Soneinndelingen av bruddsystemer rundt en bruddsone gir klare indikasjoner for sikringstiltak. A- og B-sonene, som gjerne består av løse og meget ustabile forkastningsbergarter med høy bruddfrekvens (unntaket er mylonitt og kataklasitt), blir ofte dekket med sprøytebetong kombinert med bolting, i hvert fall når sonene har noen meters bredde. Bredere soner blir gjerne helstøpt. C-sonen gir middels store blokker, som ofte har en langstrakt form. Blokkstørrelsen gjør at bolting kan være effektivt, selv om sprøytebetong i noen tilfeller er nødvendig i tillegg. Går tunneltraseen omtrent i samme retning som bruddlineamentet, vil blokkfall fra taket kunne bli et betydelig problem. D-sonen gir store, rombiske blokker, som kan stabiliseres med bolting. Opptreden av blokker vil i mindre grad være avhengig av tunnelorienteringen. E-sonen påvirker bergstabiliteten i relativt liten grad, men kan ha enkelte store blokker som må sikres med bolter. Utenfor dette, i områder

med bakgrunnsoppsprekning, er behovet for sikring forholdsvis lite, selv om bruddsvermer og litologiske grenser kan by på lokale problemer.

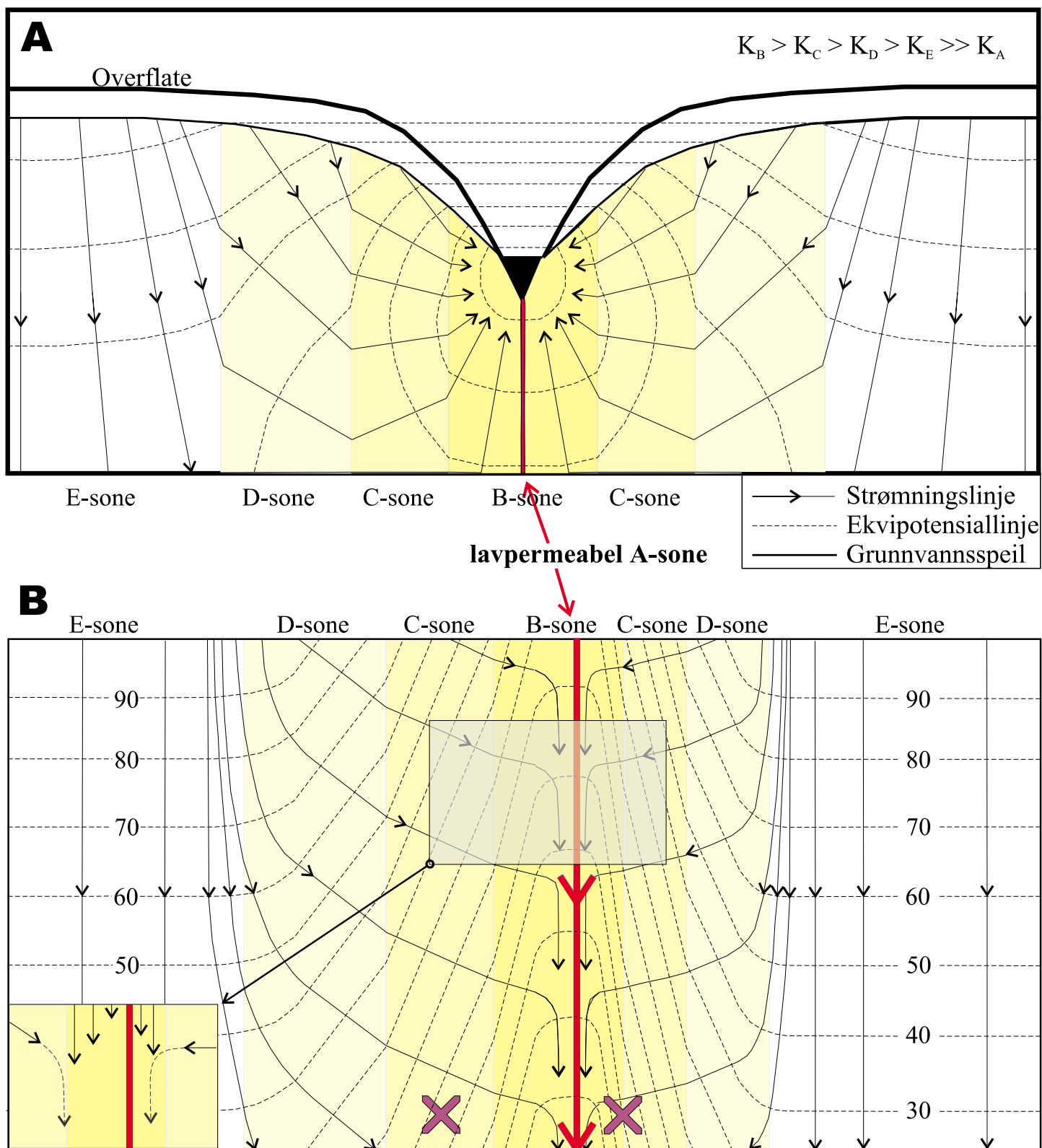
Grunnvann og injeksjon

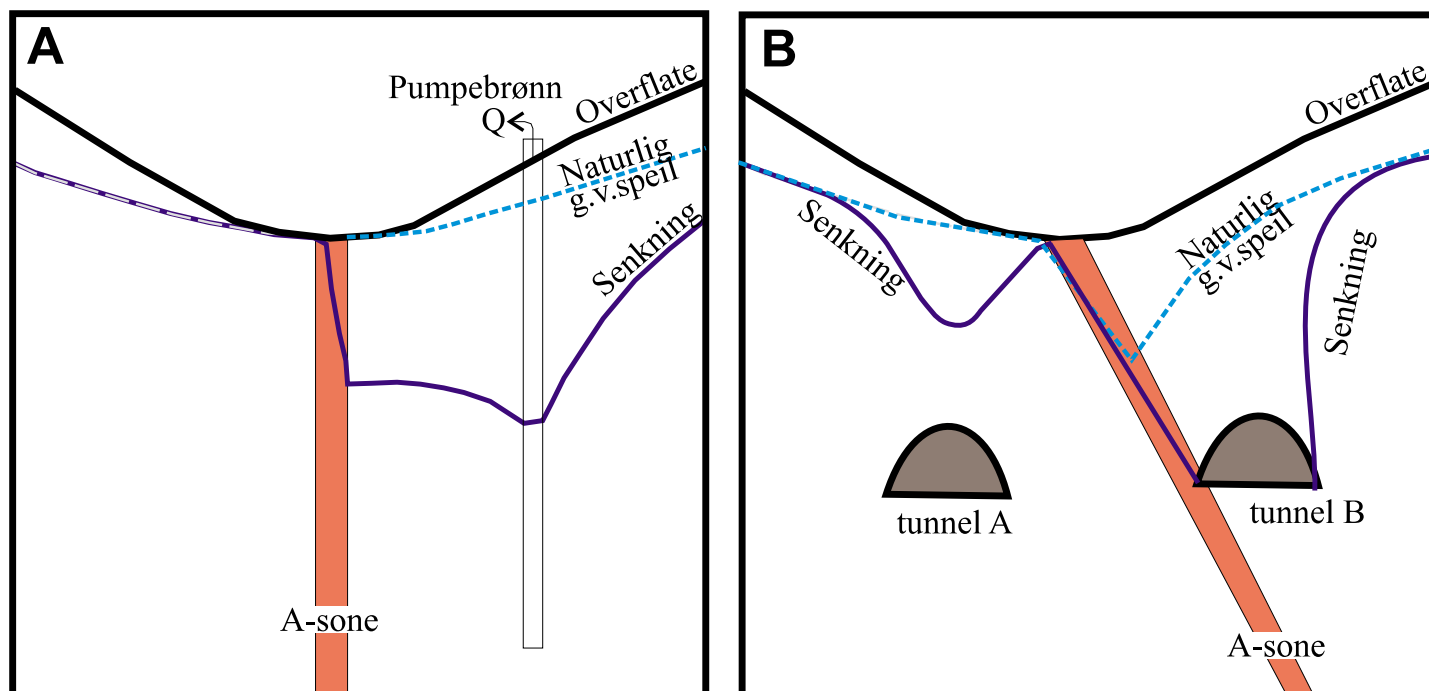
Faktorer som bruddfrekvens og konnektivitet⁸, forsegling, åpenhet av brudd og bergspenninger har stor betydning for grunnvannsstrømning og porøsitet i berg, samt for mengden injisering i bergmassen. Studier og modellering av grunnvannsstrømning har gitt noen få klare kriterier, for eksempel at brudd som karakteriseres av store, sammenhengende flater potensielt transporterer langt mer vann enn mindre brudd. Det er verdt å merke seg at brudd med forholdsvis små flater for en stor del utgjør porøsiteten i krystallin/metamorf berggrunn. Andre viktige faktorer for evnen til væsketransport inkluderer konnektivitet av brudd, hvor høyere konnektivitet øker potensialet for vannstrømning. Bruddflater med høyere ruhet gir også større transportevne, siden ru brudd ikke lar seg presse helt i sammen. Åpenhet av brudd vil delvis være kontrollert av bergspenninger og berggrunnens elastisitet – brudd parallelt med retningen for største bergspenning presses åpne, mens brudd med en stor vinkel til denne spenningsaksen trykkes igjen. Blir differensialspenningen tilstrekkelig høy, kan eksisterende brudd reaktiveres, eller nye brudd dannes. Dette vil kunne bidra til en betydelig permeabilitetsøkning i berggrunnen, som vises ved at aktive forkastninger gir opphav til langt større grunnvannsbevegelser enn gamle, inaktive forkastninger.

Selv om grunnvann og injeksjonsmasse (sement, bindings- og tetningsmidler) har forskjellig viskositet, synes det å være en sammenheng mellom mengde

⁸ Konnektivitet angir antall andre brudd som er i kontakt med bruddet som beskrives.

Figur 16. (A) Konseptuell fremstilling av grunnvannsstrømning rundet et bruddlineament, vist i tverrsnitt av berggrunnen. Sonene B, C, D og E opptrer på begge sider av A-sonen, og har ulike konduktivitetsverdier. (B) Skjematisk kart over et asymmetrisk bruddlineament, hvor ekvipotensiallinjene (vinkelrett grunnvannsstrømning) gjenspeiler topografien langs bruddlineamentet. Skråningen ned mot A-sonen er brattere på høyre side i forhold til på venstre side. Elva i midten følger lineamentets sentrale segment, som er karakterisert ved tette forkastningsbergarter. Legg merke til at en brattere skråning inn mot bruddlineamentet favoriserer størst strømning nærmere senteret av sonen. Kryssene illustrerer beste plassering av grunnvannsbrønner. Figurene er modifisert fra Berg (200).





berginjisert masse og potensialet for vannstrømning. I et studium av sonefordelingen i en tunnel (Oslofjord-forbindelsen) ble det påvist at mengde injisert sement samsvarte med sonebetinget grunnvannsstrømning, dvs. at den klart største mengden sement ble injisert i partier med potensiell høy vannstrømning.

Med basis i fordelingen av soner langs bruddlineamenter med karakteristiske bruddsystemer, er det klart at potensialet for vannstrømning er større langs, - enn på tvers av lineamenter (Fig. 16). Dette gir et sonebetinget strømningsmønster.

A-sonen, med forkastningsbergarter og opptreden av sekundære mineraler, har lav porøsitet og redusert permeabilitet. Den opptrer derfor som en hydraulisk barriere. En konsekvens av den minimale permeabiliteten er at det hydrauliske potensialet (grunnvannsspeilet) kan være forskjellig fra heng- til liggblokken over forkastninger (Fig. 17). I tilfeller hvor forkastningsbergartene kun opptrer som isolerte linser, vil den hydrauliske barrieren kunne være brutt. Det vil vanligvis injiseres små mengder masse i A-sonen.

B-sonen, som preges av intens oppsprekning av korte brudd, har meget

god porøsitet, men lav permeabilitet. Den utgjør derfor det største grunnvannsmagasinet (akviferen) langs en bruddsone. En konsekvens av dette er at en punktert B-sone, for eksempel i en tunnel, vil kunne gi mye vann til å begynne med, mens strømningen vil ganske raskt kunne avta. Injeksjonsmønsteret vil ha et lignende forløp.

C-sonen, med lange, parallelle brudd, utgjør den delen av en bruddsone med potensielt høyest permeabilitet. Porøsiteten er moderat. Denne sonen har derfor stor betydning for grunnvannsstrømning rundt bruddlineamenter. Sonen vil også gi de høyeste injeksjonsmengdene, - i enkelte tilfeller vil det kunne være vanskelig å bygge opp et injeksjonstrykk.

D- og E-sonene og området med bakgrunnsoppsprekning viser en avtagende bruddfrekvens og avtagende konnektivitet. Grunnlaget for grunnvannsstrømning og mengde injeksjon er derfor også avtagende. I områder med lavere bruddfrekvens vil bergspenningene kunne virke på enkeltbrudd, i stedet for bruddnettverk. I dette området vil derfor orienteringen av brudd i forhold til spenningsaksene ha betydning for permeabiliteten langs enkeltbrudd.

Figur 17. (A) Idealisert tverrsnitt av berggrunnen med antydnet grunnvannsspeil. Senkningen skyldes pumping i en brønn som grenser til en lavpermeabel A-sone, og hvor vanntransporten foregår i B- og C-sonen. (B) Tverrsnitt av berggrunnen med antydnet grunnvannsspeil, som har forskjellig nivå over en impermeabel A-sone. Tunneler med vannlekasjer kan ha stor betydning for senkning av grunnvannsspeilet. Legg merke til den store effekten av en tunnel rett over forkastningen, dvs. i sterkt oppsprukne bergarter (B, C og D-sone). g.v. = grunnvann. Figur A er fra Berg (2000).

Vi retter en takk til følgende personer, som har kommet med gode innspill til dette arbeidet:

Silje Berg,
Arne Grønhaug,
Per Hagelia,
Edvard Iversen,
Alf Kveen,
Vidar Kveldsvik,
Tor Erik Lynneberg,
Øystein Nordgulen,
Arild Palmstrøm og
Knut Borge Pedersen.

Referanser

Berg, S. 2000. Strukturell analyse av bruddsoner med hensyn på grunnvannspotensialet i oppsprukne bergarter. *Cand. Scient. oppgave, Universitetet i Bergen*.

Braathen, A. & Gabrielsen, R.H. 1998. Lineament architecture and fracture distribution in metamorphic and sedimentary rocks, with application to Norway. *Norges geologiske undersøkelse Report 98.043*. 78 p.

Caine, J.S., Evans, J.P. & Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.

Davis, G.H. & Reynolds, S.J. 1996. Structural Geology of Rocks and Regions. *John Wiley & Sons, Inc.*, 776 pp.

Norsk Bergmekanikkgruppe 1985. Håndbok i Ingeniørgeologi – berg. *Tapir Forlag*, 140 p.

Nystuen, J.P., (ed.), 1989: Rules and recommendations for naming of geological units in Norway. *Norsk geologisk Tidsskrift*, 69 (Supplement 2), 110pp.

Sibson, R.H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society of London*, v. 133, 191-213.

Wise, D.U., Dunn, D.E., Engelder, J.T., Geiser, P.A., Hatcher, R.D., Kish, S.A., Odom, A.L. & Schamel, S. 1984: Fault rocks: Suggestions for terminology. *Geology*, 12, 391-394.

Tidligere utgivelser

- Gråsteinen 1: Bruk av digital informasjon innen lokal areal- og ressursforvaltning.
Per Ryghaug 1996.
- Gråsteinen 2: Istidsspor i Røros kommune.
Arne J. Reite 1997.
- Gråsteinen 3: Geologi på Varangerhalvøya: En oversikt med ekskursjonsforslag.
Anna Siedlecka, David Roberts og Lars Olsen 1998.
- Gråsteinen 4: Geologiske severdigheter langs bil- og sykkelveier og turstier i Alvdal.
Bjørn A. Follestad og Morten Thoresen 1999.
- Gråsteinen 5: Trondheim fra istid til nåtid – landskapshistorie og løsmasser.
Arne J. Reite, Harald Sveian og Eyolf Erichsen, 1999.
- Gråsteinen 6: Grunnvann – ikke bare vann.
David Banks, Bjørn Frengstad, Aase K. Midtgård, Jan R. Krog, Terje Strand, Ulrich Siewers og Bjørn Lind, 2000.



Arbeid i fjell er komplisert og kostnadskrevenende. God kunnskap om forholdene for partene som deltar i konstruksjonsarbeidene, betinger at man har et felles begrepsapparat som gir entydige og presise beskrivelser av eventuelle svakhetssoner. Bildet er fra Setergrotten, Helgeland. edelpix.com©Elias Bjørnå.

Sprekker i fjell – bruddsoners oppbygning

Dette heftet gir presise og entydige definisjoner av svakhetssoner som er vanlig å finne i berggrunnen i Norge.

Fjell har alltid partier med sprekker, forkastninger, knust berg. Dette har praktisk og økonomisk betydning ved store konstruksjonsarbeider i fjell, for grunnvann og grunnvarme og knyttet til forekomster av naturstein og pukk.

For å få en god kvalitet på planlegging og utførelse av slikt arbeid er det nødvendig med et godt begrepsapparat som gir entydige og presise beskrivelser av svakhetssoner i fjell. Et slikt begrepsapparat bør være praktisk og kunne brukes i felt, og det bør være felles for ulike faggrupper knyttet til arbeid i fjell, for eksempel bergingeniører og strukturgeologer.