

# DP1+2 Erfaringsinnsamling og analyse av skadeårsaker

Metoder for vurdering av skader på bygninger som  
følge av deformasjoner i grunnen

Kjell Karlsrud

BegrensSkade Delrapport nr. 1+2.5

Delprosjekt nr.: 1+2

Dokumenttittel: Metoder for vurdering av skader på bygninger som følge av deformasjoner i grunnen

Date: 2015-06-25

Rev.nr.: 0



---

## Begrensning av skader som følge av grunnarbeider

Delprosjekt nr.: 1+2 Erfaringsinnsamling og analyse av sakdeårsaker

# Metoder for vurdering av skader på bygninger som følge av deformasjoner i grunnen

Delrapport nr: 1+2.5

Dato: 2015-06-25

Revisjonsdato:

Revisjonsnr.: 0

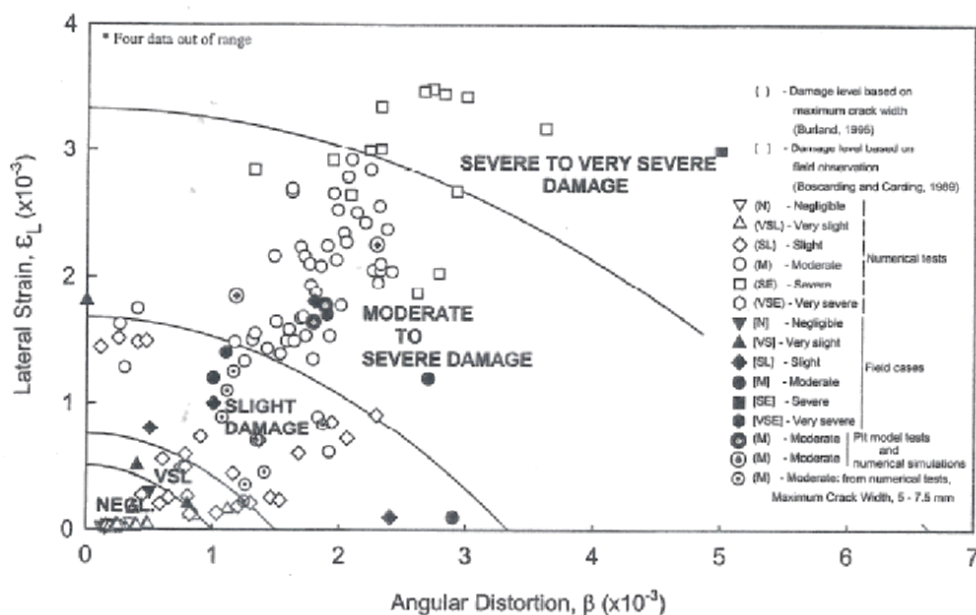
Delprosjektleder: Jenny Langford, NGI

Utarbeidet av: Kjell Karlsrud, NGI

Kontrollert av: Jenny Langford, NGI

## Sammendrag

Rapporten tar for seg hvilke deformasjoner i grunnen som kan medføre skader av ulik alvorlighetsgrad på bygningskonstruksjoner. Dette er utelukkende basert skadekriterier som har vært utviklet internasjonalt over lang tid. Det har vært en klar utvikling fra enkle skadekriterier knyttet opp mot kun differensialsetning til å ta inn det komplette setningsbildet og hvordan det varierer under et bygg, samt ikke minst også å få med hva som skjer når bygget også utsettes for differensielle horisontale deformasjoner, det vil si horisontale tøyninger i konstruksjonen. Figuren under etter Son & Cording (2005) viser et eksempel på skade kategorier definert ut fra en kombinasjon av vinkelendring og horisontal tøyning.



Effekt av horisontale tøyninger har vært lite fokusert i Norge til nå. Det er verd å merke seg at dette kan oppstå både som direkte følge av forventede skjærtøyninger og horisontaldeformasjoner som følge av uttak av en byggegrop, men mindre påaktet har det kanskje vært at også konsolideringssetninger utløst i grunnen kan utløse horisontale deformasjoner som varierer med avstand fra en byggegrop og derved forårsaker horisontale tøyninger i et bygg som blir berørt.

Type bygningskonstruksjon har betydning for hvor alvorlige skader som oppstår. I denne sammenheng er ikke overraskende rene murbygg mer utsatt enn bygg der alle bærende konstruksjonselementer er i stål eller armert betong. Bygg som er lange og lave er også generelt mer utsatt for skade enn høye og smale bygg.

Bygg fundamentert på leire har tendens til å tåle mer deformasjoner enn bygg på sand. Dette antas å ha delvis sammenheng med at setninger ofte utvikler seg senere for bygg på leire enn på sand, noe som gjør at bygget får mer tid til å tilpasse seg deformasjonene gjennom kryp og plastiske deformasjoner.

Bygg fundamentert på peler kan få betydelige skader som følge av påhengslaster utløst av setninger i grunnen, og horisontale deformasjoner mot en byggegrop. I begge sammenhenger er bygg på betongpeler langt mer utsatt enn bygg på stålpeler.

---

## Innhold

1	Innledning.....	5
1.1	Innhold i rapporten .....	5
2	Skadepotensiale kun knyttet til setninger.....	5
3	Skadepotensiale når det også inntreffer relative horisontalforskyvninger .....	9
4	Skadepotensiale knyttet til pelede konstruksjoner.....	12
5	Referanser .....	13

## 1 Innledning

Bakgrunnen for forskningsprosjektet BegrensSkade er at det ofte oppstår uventede og uønskede skader på naboeiendommer og nærliggende infrastruktur, som følge av grunn- og fundamenteringsarbeider. Det ligger derfor et betydelig potensiale i å utvikle nye metoder og forbedre prosedyrer for å unngå eller begrense slike skader innenfor bygge-, anleggs- og eiendomsbransjen. Forbedret utførelse gir besparelse ved redusert antall skader, raskere gjennomføring, mindre forsinkelser og færre tvistesaker.

BegrensSkade har som mål å utvikle nye utførelsesmetoder og forbedre samhandlingsprosesser, for å begrense skader som kan tilbakeføres til grunn- og fundamenteringsarbeider innenfor bygg-, anleggs- og eiendomsbransjen. Prosjektet har en bred tilslutning fra den norske BA-bransjen med 23 partnere, med representanter fra alle aktører (bygherrer, entreprenører, underentreprenører, konsulenter, eiendoms- og forsikringsselskaper samt forskningsinstitutt og universitet).

Prosjektet ser på hele kjeden av årsaker og forbedringsmuligheter fra prosjektering av grunn- og fundamenteringsarbeider til utførelse og oppfølging. BegrensSkade er delt opp i fem delprosjekter:

DP1+2 Kartlegging av årsaker til skader

DP3 Videreutvikling av metoder for å begrense skader

DP4 Dokumentasjon av nye metoder

DP5 Verktøy for risikovurdering

DP6 Forbedret samhandling i BA-prosessen

### 1.1 Innhold i rapporten

Denne rapporten tar for seg dagens kunnskaper om hva deformasjoner i grunnen kan utløse av skader av ulike type konstruksjoner. Med deformasjoner menes i denne sammenheng både vertikale (setninger) og horisontale forskyvninger i grunnen som konstruksjonen er i direkte kontakt med. Fokus er på konstruksjoner som er direkte fundamentert, men påvirkning på konstruksjoner fundamentert friksjonspeler eller peler til berg blir også kort omtalt.

Til slutt i rapporten diskuteres også hva skader kan utløse av kostnader til utbedring. Dette er primært knyttet til eneboliger, men noen eksempler på erstatning knyttet til skader på bygårder er også trukket frem.

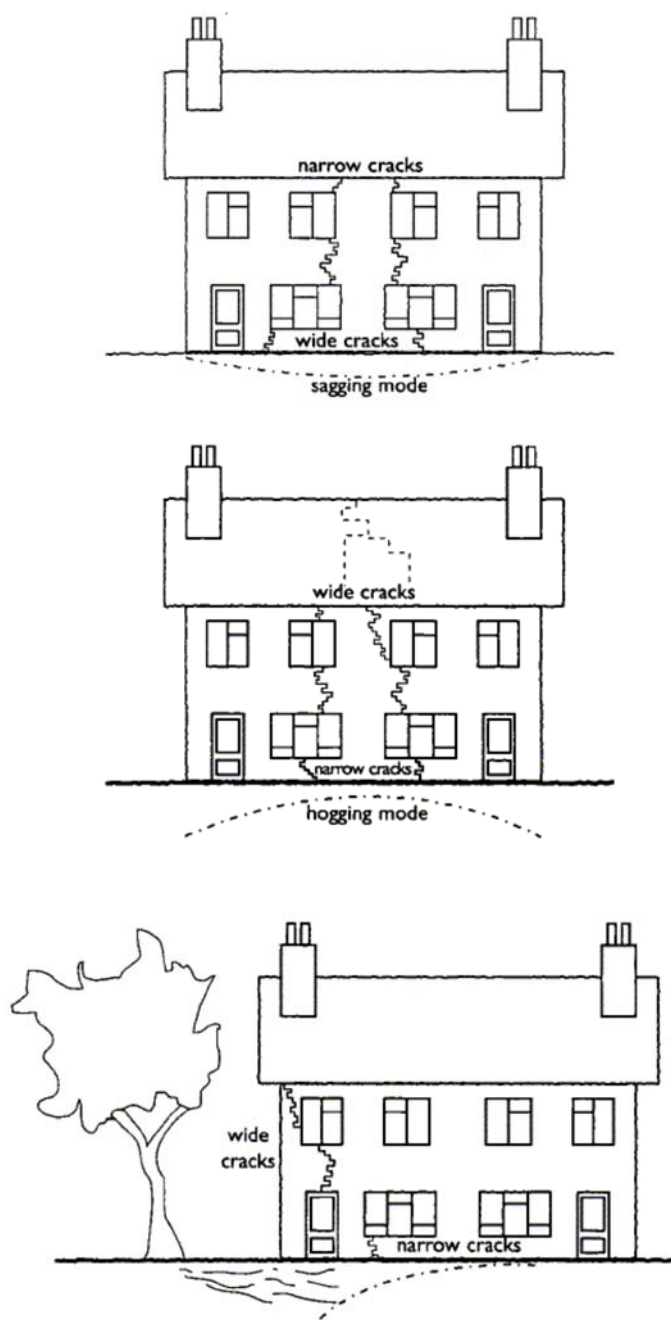
Mye av det etterfølgende er hentet fra Negro et al (2009). For mer utfyllende diskusjon av temaet refereres det til Korff (2009).

## 2 Skadepotensiale kun knyttet til setninger

Skader som følge av setninger på et bygg er helt avhengig formen på setningene. Figur 2.1 definerer en del typiske setningsmønstre som kan forekomme. Litt forenklet kan disse inndeles i tre hovedkategorier:

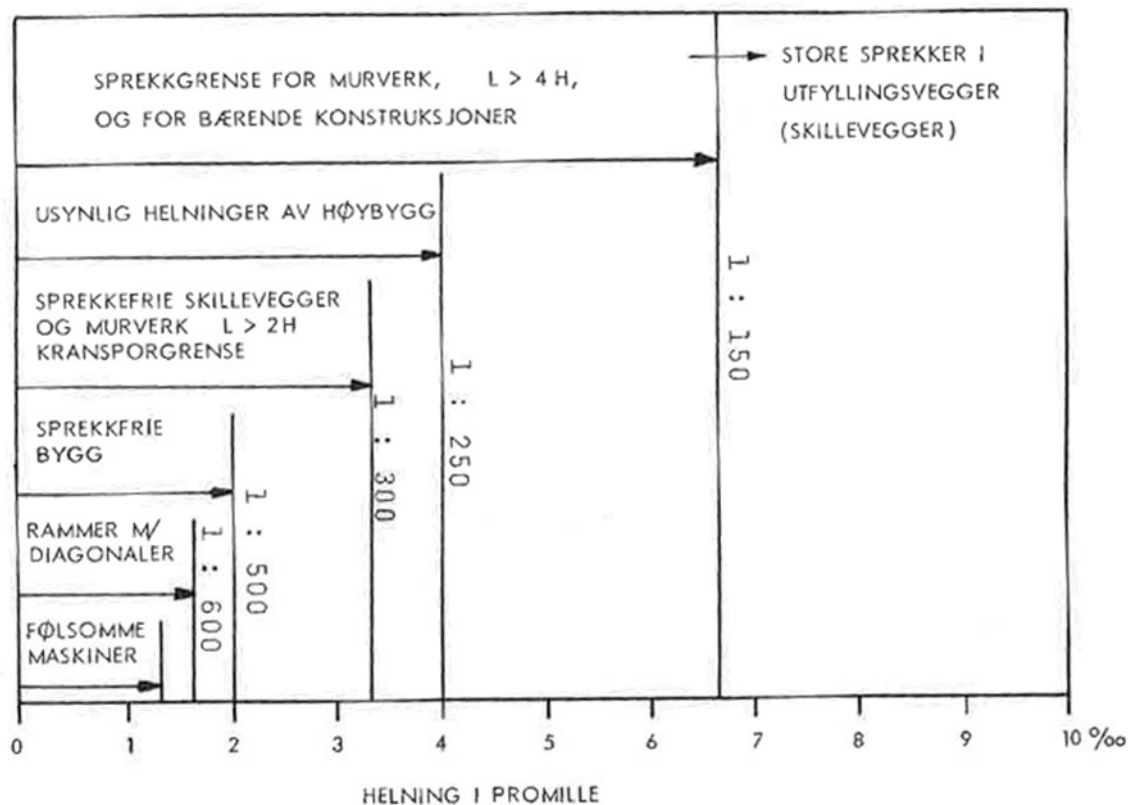
- a) "Sagging" eller "hengende" som kjennetegnes ved indre del av bygget setter seg mer enn ytterveggene. Dette kan være typisk for som setter seg under egenlast der det er jevne grunnforhold, jevnt fordelte laster og god bæreevne av fundamentene.
- b) "Hogging" eller "bulende" som innebærer at yttervegger setter seg mer enn indre del av bygget. Dette kan være typisk for bygg der mye laster er ført ut på ytterveggens fundamenter, og grunnen er relativt anstrengt bæreevnemessig.
- c) "Local" eller "lokal" ytre påvirkning som vist i nederste del av Figur 2.1. Dette er typisk for bygg påvirket av lokale årsaker slik som nærliggende byggevirkosmhet.

Setningsformen kan imidlertid ofte være en kombinasjon av disse tre enkle variantene



Figur 2.1 Eksempler på definisjon av setningsformer på bygninger

Skader som følge av setninger på bygg ble først knyttet opp til byggets differensialsetning uttrykt ved normalisert vinkelendring,  $\Delta/L$  (e.g. Skempton og MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963). Her er  $\Delta$  største differensialsetning målt over en viss lengde,  $L$ , langs konstruksjonen. Figur 2.1 etter Bjerrum (1963) viser foreslått sammenheng mellom vinkelendring og graden av skadepotensialet for ulike typer bygningskonstruksjoner.



Figur 2.2- Skadepotensiale relativt vinkelendring foreslått av Bjerrum (1963). Figuren er kopiert fra Janbu (1960)

Hva som vil utløse sprekker eller skader i et bygg er i virkeligheten avhengig av langt flere parametere som definerer setningsformen enn bare vinkeldreiningen  $\Delta/L$ , slik som for eksempel beskrevet av Burland og Wroth (1975), og illustrert ved parameterne som definerer setningsformene i Figur 2.3. Et element å merke seg i denne sammenheng er at en ren vinkeldreining av et bygg som definert ved stivlegeme rotasjonsvinkelen,  $\omega$ , ikke vil gi noen konstruktiv skade på et bygg, men det kan likevel bli oppfattet som "skade" på et bygg hvis vegger og gulv blir skjeve. Det er de lokale vinkelendringene som utløser sprekker og skader. Slike vinkelendringer kan defineres ut fra ulike referanser:

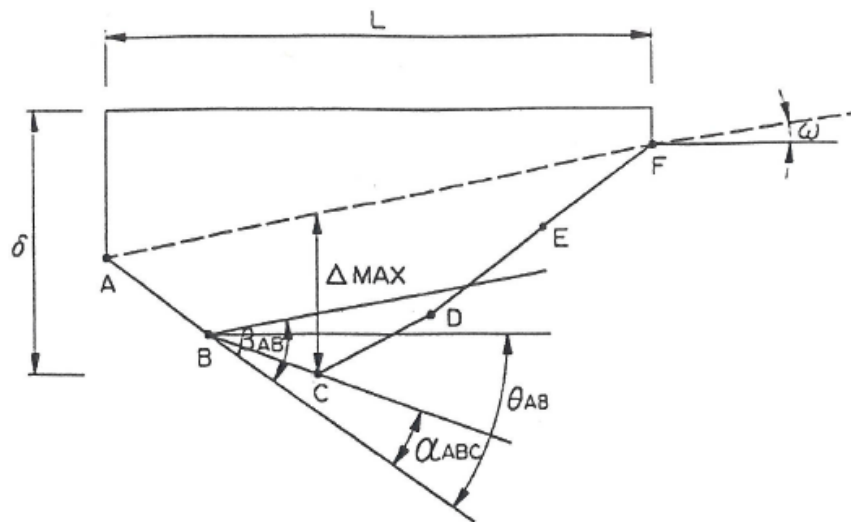
$\alpha$  = endring av helning mellom tre setningspunkter

$\beta$  = helning mellom to setningspunkter i forhold til stivlegeme rotasjonen,  $\omega$

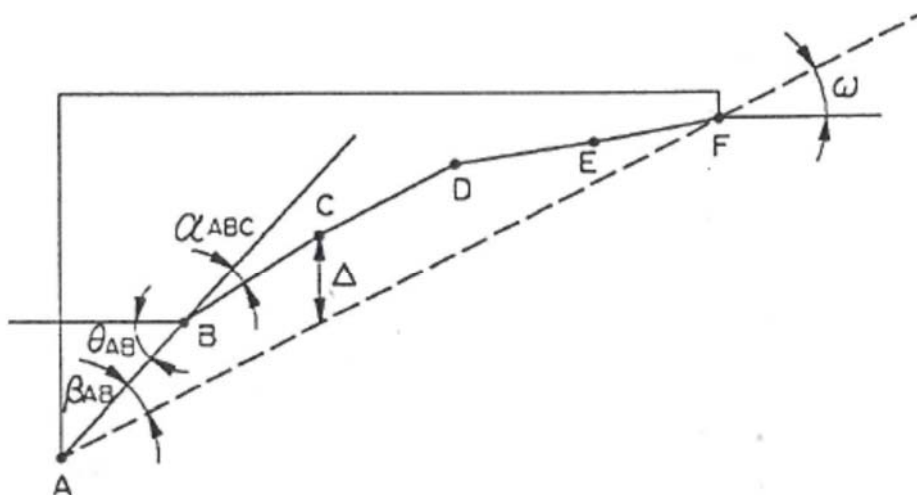
$\Theta$  = helning mellom to setningspunkter i forhold til horisontalplanet

Maksimalt relativ "sagging" ("heng") eller "hogging" ("buling") av et bygg, definert ved maksimal setning i forhold til planet som definerer stivlegeme rotasjonen  $\omega$ , dvs. forholdet  $\Delta_{\max}/L$ , er kanskje den enkelte parameteren som best beskriver skadepotensialet. Merk her at  $L$  i denne sammenheng er definert som byggets totale lengde normalt på setningsprofilen. Forholdet blir ytterligere komplisert hvis setninger varierer både på langs og tvers av et bygg.

## a) "Sagging"



## b) "Hogging"



Figur 2.3- Parametere som benyttes for å beskrive potensialet for setningsindusert skade av et bygg

Burland & Wroth (1975) antydnet at byggets lengde/høyde forhold ( $L/H$ ) påvirker skadepotensialet. Det samme ble tidligere konkludert av Polshin & Tokhar (1957).

Tabell 2.1 Viser et eksempel på skadegrenser satt i forbindelse med bygging av parseller av T-banen i Taipei på slutten av 1980-tallet, avhengig av type bebyggelse som kunne bli påvirket. Disse grensene skulle ivareta at det ikke ville oppstå annet enn mindre riss i bygg.



Tabell 2.1- Eksempel på setningskriterier benyttet i forbindelse med bygging av T-bane i Taipei (basert Karlsrud, 1990)

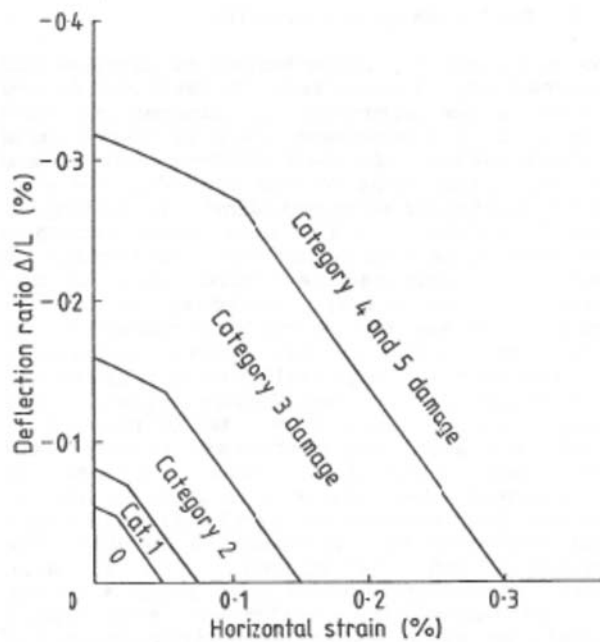
Bygningstypetype	Setning $\delta_{\max}$ (mm)	Absolutt rotasjon $\theta_{\max}$ (rad)	Vinkeendring $\beta_{\max}$ (rad)	"Hogging" tallet $\Delta/L$ (rad)	"Sagging" tallet $\Delta/L$ (rad)
Høyhus (>8 etg) med stålrammeverk fundamentert på hel plate	45	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$
Sålefundamenterte bygg med bæresystem av betong	40	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$0.6 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-3}$
Sålefundamenterte murbygg	25	$2 \times 10^{-3}$	$0.4 \times 10^{-3}$	$0.2 \times 10^{-3}$	$0.4 \times 10^{-3}$
Ulike midlertidige konstruksjoner	40	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$

### 3 Skadepotensiale når det også inntreffer relative horisontalforskyvninger

Burland et al (1977) foreslo at "limiting tensile strain" eller strekktøyning,  $\epsilon_{lim}$ , måtte inkluderes i tillegg til setningsformen for å vurdere potensialet for skade på en bygningskonstruksjon. Horisontale deformasjoner og tøyninger er noe som normalt vil oppstå i forbindelse med byggegroper, både som følge av skjærdeformasjoner i grunnen, men også poretryksreduksjon og konsolideringssetninger kan utløse horisontale forskyvninger som varierer med avstand. Boscarding and Cording (1989) foreslo konkrete grenseverdier knyttet opp til "limiting tensile strain" som angitt i Tabell 3.1. Burland (1997) tok dette videre og kombinerte setning representert ved "hogging ratio" sammen med "limiting tensile strain" for å definere skade kategorier vist i Figur 3.1.

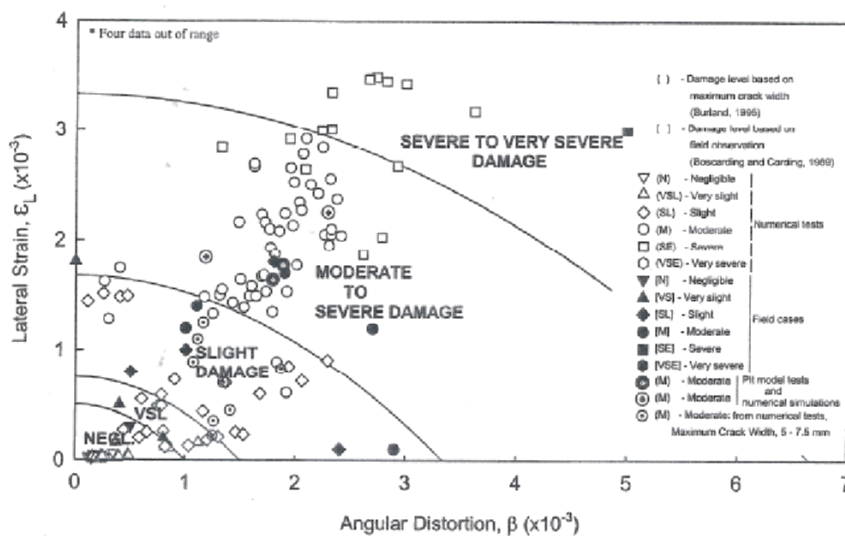
Tabell 3.1- Skadegrenser basert "limiting tensile strain" foreslått av Boscarding and Cording (1989)

Skade kategori	Normal alvorlighetsgrad	"Limiting tensile strain", $\epsilon_{lim}$ (%)
0	Neglisjerbar	0-0.5
1	Meget liten	0.05-0.075
2	Liten	0.075-0.15
3	Moderat	0.15-0.3
4 to 5	Alvorlig til meget alvorlig	>0.3



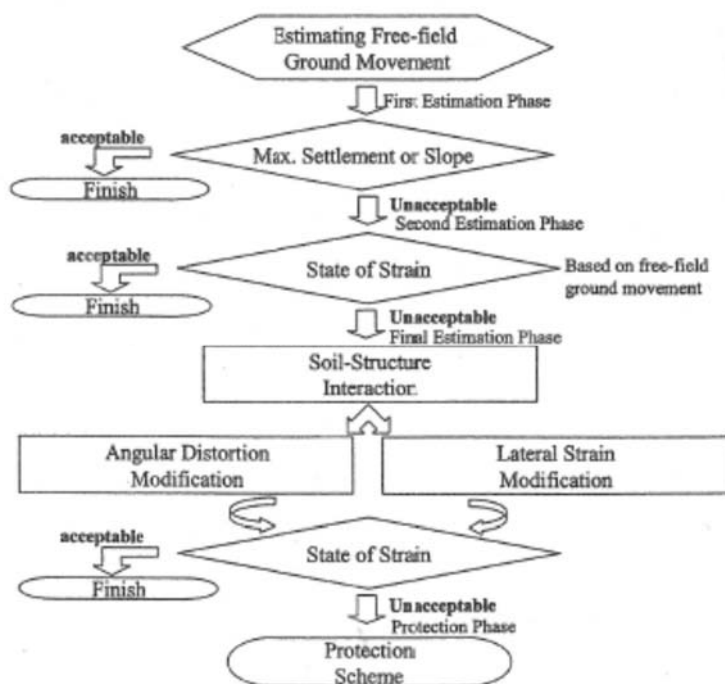
Figur 3.1- Forhold mellom skade kategori, normalisert nedbøyning,  $\Delta/L$ , og horisontal tøyning for "hogging" tilfellet for et byhh med  $L/H = 1$  (etter Burland, 1997)

Son and Cording (2005) presenterte resultater fra numeriske analyser av bygninger støttet opp med modellforsøk for bedre å forstå hva som forårsaker skader. De kombinerte også dette med virkelige skadetilfeller og foreslo genser for ulike skade kategorier som sammenstilt i Figur 3.2. Alvorlighetsgraden eller skade kategorien er den samme som definert i Tabell 3.1 og Figur 3.1.



Figur 3.2 Skadeklasser basert lateral tøyning og vinkelendringen,  $\beta$  (se fig. 2.3) foreslått av Son and Cording (2005)

Son and Cording (2005) anbefalte en trinnvis vurdering av skade potensialet som illustrert i Figur 3.3. Det siste trinnet inkluderer en omfattende samvirke analyse mellom jord og konstruksjon. Det er i dag mulig å gjennomføre slike analyser med tilgjengelige kommersielle programmer for både 2D og 3D FEM analyser.



Figur 3.3- Trinnvis prosedyre for å vurdere skade potensiale for bygninger nær en byggegrøp. (etter Son and Cording, 2005)

Å få til en mest mulig realistisk modellering kan være utfordrende. Spesielt vanskelig kan det være å fange opp alle mekanismer og årsaker til deformasjoner i jorda og hvordan de kan variere romlig over et område. Det vil antagelig kreve at man manipulerer med jordas stivhet og dens variasjon med dybde og lateralt for å sikre at beregningene gir et realistisk bilde av forskyvninger sett i lys av erfaringer med setninger og horisontale forskyvninger utløst av ulike årsaker.

Finno et al (2005) foreslo en forenklet modell for å representere bygningskonstruksjoner i kombinert jord-konstruksjon analyser basert på et "laminated beam" eller "laminert bjelke" konsept. Dette er en forbedring sett i forhold til bruk av "simple deep beam theory" som ble brukt av Burland and Wroth (1975) og Burland (1997). Finno et al's konsept konverterer den fullstendige stivhetsmatrisen for et bygg i mange etasjer til en ekvivalent laminert bjelke, som tar hensyn til stivhet av alle de ulike bærende elementer i et bygg, inkludert gulv, søyler, vegger etc.. Teorien er basert metoder og analyser som ble presentert av Voss (2003). Finno et al (2005) viser ved et virkelig eksempel at "laminert bjelke" konseptet gir lang bedre samsvar med observerte strekk-induserte sprekker i et skole bygg forårsaket av en utgraving, enn den enklere "simple deep beam" metoden.

Zhang and Ng (2007) gjennomgikk tilstand og skader observer for 380 forskjellige bygg av ulik karakter, de fleste fundamentert på leire, men også noen på sand. Noen av de observasjonene de gjorde var:

- Det er en tendens til at bygg fundamentert på peler får skade ved mindre relativ rotasjon enn bygg som er direkte fundamenterte (hel plate eller såler).
- Bygg fundamentert på leire har tendens til å tåle mer deformasjoner enn bygg på sand. Dette antas å ha delvis sammenheng med at setninger ofte utvikler seg senere for bygg på leire enn på sand, noe som gjør at bygget får mer tid til å tilpasse seg deformasjonene gjennom kryp og plastiske deformasjoner.
- Bygg med rammekonstruksjoner (stål eller betong) får ikke så lett skade som bygg med bærende vegger av murstein eller andre blokkmaterialer. Forskjellen kan utgjøre 20-25 % i relativ rotasjon.

## 4 Skadepotensiale knyttet til pelede konstruksjoner

For konstruksjoner fundamentert på friksjonspeler vil setninger i grunnen overføres til pelene. Dette vil i første omgang gi påhengslaster som kan utløse ganske lokale setninger på enkelt peler/pelefundamenter hvis samlet last på pelene derved overstiger bæreevnen. Dette er noe av årsaken til at setninger av bygget kan bli av mer lokal karakter enn for direkte fundamenterte bygg.

Går pelene dypt ned under det nivå de største setninger opptrer og de har god bæreevne (tåler påhengslaster) kan setninger på bygget bli mindre og jevnere fordelt enn om det var direkte fundamentert.

For bygg fundamentert på spissbærende peler til berg, som er mer vanlig enn friksjonspeler for norske forhold, er evnen til å oppta negative påhengslaster et spesielt viktig aspekt å vurdere, spesielt for lange peler. Hvis en eller flere peler overbelastes og går til brudd som følge av påhengslaster de ikke er dimensjonert for, vil byggets last også overføres til selve pelefundamentet, som ofte ikke er av slik dimensjon at det kan bære byggets last uten peler. Selv om fundamentet skulle kunne bære, vil det få store setninger når pelene ikke lenger bærer, og antagelig vesentlig større enn de setningene som utløste påhengslaster.

Peleveiledningen-2012 (NGF, 2012) beskriver metoder for å beregne påhengslaster på peler. Et viktig poeng å merke seg i den sammenheng er at full påhengslast utvikles ved en relativ deformasjon mellom jord og pel som bare utgjør 1 til 3 % av pelens diameter.

Betongpeler er ut fra forholdet mellom diameter og kapasitet langt mer utsatt for effekt av påhengslaster enn stålpeler, Stålkjernepeler er i den sammenheng minst utsatt.

Horisontalforskyvninger i grunnen vil kunne gi betydelige horisontale laster på peler. Hvis pelen er helt stiv (uforskyvelig) kan lasten som følge av jordas bevegelse i forhold til pelen beregnes ut fra mobiliseringskurver beskrevet i Peleveiledningen-2012 (NGF, 2012). Eksempelvis vil for en pel i leire maksimalt jordtrykk som følge av jordas bevegelse rundt en pel opptre ved en relativ forskyvning tilsvarende 4-6 % av pelediameteren.

De minst momentstive pelene vil i stor grad følge jordas bevegelse. Også i dette tilfellet er betongpeler langt mer sårbare enn stålpeler, og stålkjernepeler ofte de minst sårbare. Peleskjøter ofte er det svakeste leddet både for betongpeler og stålkjernepeler. Hvor skjøten ligger i forhold til det nivået de største forskyvningene forventes, er derfor være et viktig aspekt å ta med i vurderingen av mulige konsekvenser.

Det finnes i dag programvare som kan beregne effekt av at jorda ønsker å bevege seg i forhold til peler under et fundament, eksempelvis Geosuite-Peler (Geosuite, 2014). Det må imidlertid også vurderes

om eller i hvilken grad toppen av pelefundamentet kan trekkes med, dvs. om bygget (konstruksjonen) kan overføre de horisontalkrefter pelefundamentet vil bli utsatt for gjennom samvirket mellom jordas deformasjon og pelene.

For skråpeler må det også tas hensyn til at selv bare rene setninger i grunnen vil gi en radiell forskyvningskomponent, med tilhørende last og moment i pelen. Eksempelvis vil for en pel satt med helning 1:5 bli utsatt for en relativ radiell forskyvning på 2 cm hvis grunnen rundt pelen setter seg 10 cm.

## 5 Referanser

Bjerrum, L. (1963). Allowable settlement of structures. Discussion to ECSMFE Wiesbaden, Proc. Vol II, pp. 135.

Boscardin, M. and Cording, E. (1989). "Building Response to Excavation Induced Settlement". Journal of Geotechnical Engineering 115(1): 1-21.

Burland, J.B., and Worth, C.P. (1975). "Settlement of buildings and associated damage". Proc., Conf. on Settlement of Structures, Cambridge Pentech Press, London, 611-654.

Burland, J.B., Broms, B.B., and de Mello, V.F. (1977). "Behaviour of foundations and structures," 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-art Rep., Vol. 2, Tokyo, 495-546.

Burland, J.B. (1997). "Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavations." Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng., pp. 1189-1201. Tokyo 1995. Balkema.

Finno, R.J., Voss Jr., F.T., Rossow, E., and Tanner Blackburn, J. (2005). "Evaluating Damage Potential in Buildings Affected by Excavations." ASCE, JGGE, October 2005, pp. 1199-1210.

Geosuite (2014). Geosuite Toolbox 2014.

Janbu, N. (1960). Grunnlag i geoteknikk. Tapir

Karlsrud, K. (1990). geotekniske problemstillinger i forbindelse med T-bane utbygging i Taipei. Fjellsprengning- bergmekanikk- geoteknikk, Oslo 1990. Foredrag pp. 26.1-26.25. Tapir, Trondheim.

Korff, M. (2009). Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils. Deltares Project dok. 10010307-004-GEO-002. Dated 2009-11-26.

Negro, A. jr.; Karlsrud, K.; Srithar, S.; Ervin, M.; Vorster, E. (2009). Prediction, monitoring and evaluation of performance of geotechnical structures. State-of-the-art lecture. (Prévision, contrôle et l'évaluation de la performance des structures géotechniques.) International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 17, Alexandria, Egypt 2009. Proceedings, pp. 2930-3005.

Norsk Geoteknisk Forening (2012). Peleveilendingen 2012. Utgitt av Den norske Pelekomiteen.

Polshin, D.E. and Tokar, R.A. (1957). Maximum allowable non-uniform settlement of structures. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on SMFE, London, U.K., Vol.1. Butterworth's scientific.

Skempton, A. W. and MacDonald, D.H. (1956). "Allowable Settlement of Buildings". Proc. Inst. Of Civ. Engg., Pt. III,, Vol.5, pp. 727-768.

---

Son, M., and Cording, E.J. (2005). "Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements." ASCE, JGGE, February 2005, pp. 162-177.

Voss, F. (2003). "Evaluating damage potential of buildings affected by excavations". MS Thesis Northwestern University, Evanston, Ill.